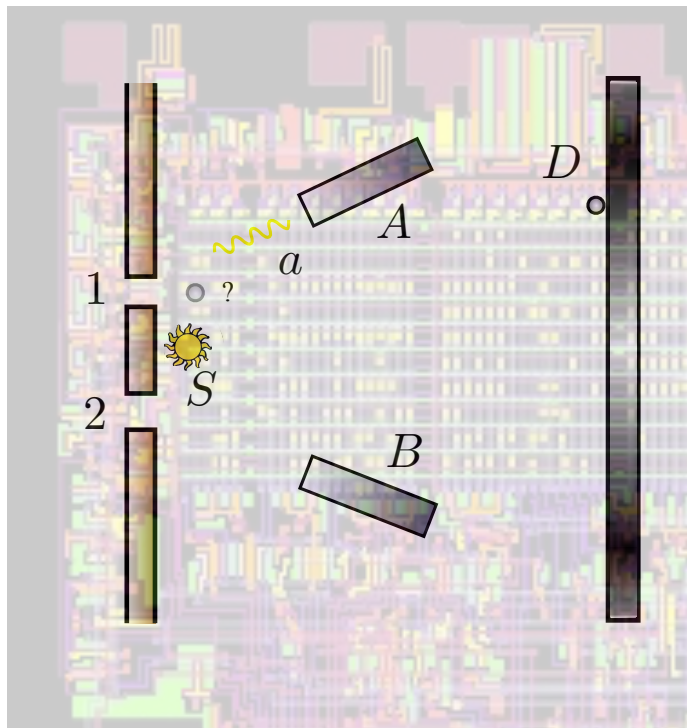
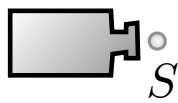




Kvantfysik i verkligheten



Marcus Berg

2022-05-08

Kvantfysik i verkligheten

(Har du inte kommit in i lärplattformen Canvas än? Gå till tp.hotell.kau.se/marcus/notes/sommarvideor.html)

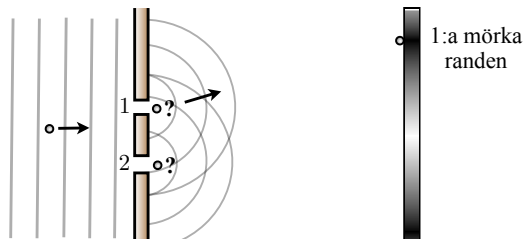
Det här kompendiet är kurslitteratur på sommarkursen *Kvantfysik i verkligheten*, som komplement till Cassidys bok *Beyond Uncertainty* [6], till [Stanford-encyklopedin](#) (blå text utgör klickbar länk, om din PDF-läsare tillåter det) och till föreläsningarna.

För att komma igång börjar jag med några spännande koncept som låter lite som science fiction, men har testats i riktiga experiment och undervisas på fysikutbildningar (t.ex. vår kurs *Inledande modern fysik*, FYGA21). Sedan kommer lite om experiment och fenomenologi, några tillämpningar, och lite om kvantfysikens filosofi. Till sist lite om forskningsfronten.

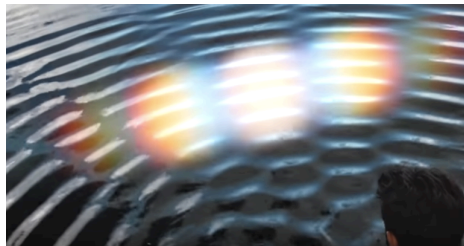
1. Summan av alla möjliga historier.

Dubbelspalt-experimentet är ”hjärtat” i kvantfysik, som Feynman beskriver det [1]: *”impossible, absolutely impossible, to explain in any classical way, and which has in it the heart of quantum mechanics. In reality, it contains the only mystery. We cannot make the mystery go away by “explaining” how it works. We will just tell you how it works.”*

Det var känt sedan 1800-tal att lyser man mot en skärm med två små vertikala springor (spalter) så bildas ett fint mönster av ränder på en skärm som står bakom den första, som i figuren nedan. Det var lätt att förstå i det dåvarande synsättet att ljus består av vågor, för ljuset som gick igenom ena spalten till en viss punkt på



skärmen har färdats kortare än ljuset som kom från andra spalten. När de två ljusvågorna träffar en viss punkt på skärmen kan de då vara *ur fas*, dvs. den ena vågen kan vara på väg upp när den andra på väg ned så de släcker ut varandra (*”interfererar destruktivt”*), och det blir en mörk rand. Eller så är de i fas, t.ex. är bägge vågorna på väg upp, då hjälps de åt och det blir en ljus rand (*”interfererar konstruktivt”*). Interferens går att testa i verkligheten med vattenvågor, som i den här tydliga YouTube-videoen:



Veritasium YouTube-kanal, *”Original Double Slit”*: [YouTube-videolänk](#)

Jag har en video om [klassisk vågfysik](#). Det nya sedan ungefär 1980-talet är att med noggrannhet skicka in *en elementarpartikel åt gången* (foton, elektron, etc) in i experimentet, som jag också skissade i figuren ovan. Så här ser ett experimentresultat ut, från [Hitachis experiment](#) 1989:



Om du tänker efter så är bilderna faktiskt lite kusliga. Varje vit prick är avtrycket av en partikel som åkte *ensam* igenom experimentet. För att få ränder i experimentet med vatten måste vågor från ena spalten påverka vågor från andra spalten, med andra ord *interferera*. Kan en partikel som redan lämnat sitt avtryck på skärmen verkligen ”påverka” en som inte kommit fram ännu? Nej, inte utan tidsmaskin. Men sådana finns

inte, så vad är det som händer? Om vi sätter en detektor för att se om en enskild partikel åkte igenom antingen den ena eller den andra spalten så försvinner mönstret (det här är en teoretisk bild som jag har ritat):



Ett sätt att uttrycka det som hänt med vanliga ord som inte motsäger experimentet är: *historien att partikeln åkte igenom ena spalten har något samband med historien att partikeln åkte igenom andra spalten*. Oj! Det låter konstigt, nästan som ”parallella universa” som man hör om i science fiction. Jag återkommer till skillnaden mellan science-fiction-historier och kvantfysikens historier i sektion 6 nedan. Här tänker jag fokusera på kvantfysiken: ”samband” betyder inte nödvändigtvis att det är någon mätbar ”kraft” mellan partiklarna. (Två elektroner repellerar i och för sig varandra med elektrisk kraft, men det var ju bara en elektron i experimentet åt gången. Det blir också samma resultat för fotoner, som är elektriskt neutrala.)

Det enklaste sättet att karaktärisera vad som menas med ”samband” här är som två vågtoppar som träffar varandra och interfererar konstruktivt, alltså $1 + 1 = 2$. Egenskapen att kunna adderas kan verka som en ovanlig användning av ordet ”samband”, men att man kan addera två storheter tyder faktiskt i sig på ett slags samhörighet, som att man inte kan addera äpplen och päron, annat än om man ignorerar väsentliga skillnader hos frukterna. Kan man addera två vågtoppar kan man också addera vågtoppar och vågdalar, det ger destruktiv interferens, som subtraktion: $1 - 1 = 0$, vilket motsvarar en mörk rand på en mörk skärm där inget har träffat. Men om addition/subtraktion är nyckelidén här, hur adderar/subtraherar man isåfall *historier*?

Svar: vi är tydligen tvungna att behandla partiklarna som vågor för att få interferens-ränderna vi känner igen från klassisk vågfysik. Höjden på en vanlig våg ovanför medelhöjden, t.ex. på en vattenyta som i videon ovan, kallas *amplituden*. Negativ amplitud motsvarar en vågdal som ligger under medelhöjden. Det som åkte igenom dubbelspalten var enligt Max Born (*nobelpris för det 1954*) en för vår vardagsförståelse totalt främmande våg som beskrivs av en ”*sannolikhets-amplitud*” där sannolikheten P (i procent) att en elektron påträffas vid en viss punkt på skärmen fås som sannolikhetsamplituden i kvadrat. Sannolikhetsamplituden betecknas med grekiska bokstaven alfa: α , och *Borns regel* är alltså att sannolikheten $P = \alpha^2$. I motsats till sannolikheter P måste de här sannolikhetsamplituderna α kunna vara *negativa* (i liknande bemärkelse som vågdalar är negativa) och därigenom interferera så det blir en mörk rand.

Här är ett exempel för att poängtera hur ovanligt det här verkligen är. Tag en ”kvant-tärning” som har sannolikhetsamplituden $1/2$ att man skall få 1 och sannolikhetsamplituden $-1/2$ att man skall få 2. Tänk dig ett experiment som liknar dubbelspaltexperimentet, där man inte kan mäta huruvida man fick 1 eller 2, men bara att man *inte* fick 3, 4, 5 eller 6. Då skulle det aldrig bli 1 eller 2, för sannolikheten blir faktiskt $(1/2 - 1/2)^2 = 0$. (Jag var tvungen att ha fler möjliga utfall än 1 och 2 för att sannolikheten att få de andra resultaten tillsammans fortfarande måste vara 100% för att undvika logisk motsägelse.) Det verkar vid första anblick konstigt att blotta existensen av utfallet 2 i vissa fall skall kunna göra så att det blir färre utfall 1. Men det i sig gäller också i klassisk sannolikhetslära: med fler än sex sidor på tärningen, t.ex. med en tiosidig tärning, är chansen att få 1 lägre än för en sexsidig tärning. Hur många alternativ det finns för vad som skulle kunna ske påverkar alltså chansen även i klassisk sannolikhetslära. Skillnaden är att hur många sidor du än har på en klassisk tärning så går inte chansen för något utfall till noll, eftersom sannolikheter aldrig kan vara negativa.

För att sammanfatta: dubbelspaltexperimentet tvingar oss att tänka i nya banor, och ett fundament i det ramverk som kvantfysik utgör är Borns regel. Ramverket underbyggs sedan i vidare experiment som ”bombtestaren”, som vi tar upp under kursens gång, där ”*det som inte sker, men hade kunnat ske, faktiskt spelar roll*”, som Holst beskriver det [19]. Ur klassisk-fysik-synpunkt är det som verkligen händer i de här experimenten direkt ”ologiskt”. I vardagsspråk betyder ”ologiskt” ibland att något är ”fel”. Men i en empirisk vetenskap som fysik har experimenten alltid rätt! Kvantfysiker som Born och Feynman blir tvungna att utveckla en ”kvantlogik”, som försöker bena ut hur naturen funkar på djupet. Susskind uttrycker det så här [31]: det är ur evolutionär synpunkt inte konstigt att vår mänskliga begreppsapparat är dåligt anpassad för att greppa mikroskopiska skeenden. Det överraskande är snarare motsatsen: att fysiker, och studenter på den här kursen, med lite övning kan utveckla viss förståelse för vår kvantfysiska verklighet.

Från en så här förkortad beskrivning kan man få intrycket att fysiker ganska lättvindigt efter ett par experiment halkar in på extravaganta hypoteser om verkligheten. I själva verket finns det förstås många

detaljer i t.ex. dubbelspaltexperimentet man kan ifrågasätta, och det tog hundratals tålmodiga fysiker nästan 80 år av experiment innan tankarna ovan blev riktigt oundvikliga, dessutom bråkar en minoritet av forskare fortfarande. Låt mig ta upp tre exempel på saker att ifrågasätta i dubbelspaltexperimentet.

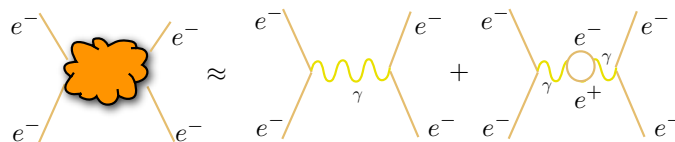
Ifrågasätt 1. Vore det t.ex. inte enklare att säga att partikeln var lite *tjock* så den skulle kunna dela upp sig i två delar och varje halva åker igenom en av spalterna? Så beskrivs experimentet i många YouTube-filmer. Men folk har försökt dela upp elementarpartiklar i ett otal andra experiment, och de är definitivt odelbara med så här låg energi som i det här experimentet. Med andra ord: elektronens eller fotonens *egen* radie, om de har någon, är för liten för att hittills ha uppmätts, och definitivt försumbart liten jämfört med spaltavståndet i det här experimentet. Vi kan alltså inte utesluta att det går att dela upp elektroner i två delar med någon framtida partikelaccelerator, men inte ens med de högsta energierna på CERN har någon gjort det, så det kan inte vara relevant för det här lågenergi-experimentet.

Ifrågasätt 2. Vi påstod att partiklarna åkte en och en genom experimentet, kanske det inte är så på riktigt? Men det var inte bara en förhoppning, vi testar det: får man två på en gång så kan man avbryta experimentet, och kommentaren ovan att folk har blivit bättre och bättre på att göra experimenten betyder det att det kan gå helt igenom utan att behöva avbryta [25]. Så jo, partiklarna åkte igenom en och en, det var aldrig en partikel i ena spalten och en i andra spalten *samtidigt*, då vore det ju två partiklar i experimentet just då. Summan är över *historierna* att det ena eller andra inträffade. För att poängtera att partiklarna åker igenom experimentet en och en kallar man det ibland ”dubbelspaltexperimentet med låg intensitet”, där *intensitet* i det här sammanhanget betyder antalet partiklar som träffar skärmen per tidsenhet. För att mäta något överhuvudtaget när man har låg intensitet måste man ha en mycket känslig detektor, som Hitachis, vilket förklarar varför vi inte märker det här i vardagssammanhang. Man kan göra ett klassiskt interferensexperiment med vågor i en vanlig sjö, men för att studera små partiklar behöver man lite mer avancerad utrustning.

Ifrågasätt 3. Kanske det här ”sambandet” ändå är påverkan med någon slags kraft, någon mer lättförståelig slags indirekt påverkan som skapar interferensmönstret? Nej, för att utesluta det har folk tagit partiklarna långt ifrån varandra (se sektion 3 nedan), och eftersom t.ex. elektrisk kraft är noggrannt uppmätt vet man då exakt hur mycket det skulle kunna påverka. Tar man fotoner (ljuspartiklar) så är kraften mellan dem dessutom noll. Man kan alltså inte trola bort mysteriet i dubbelspaltexperimentet i genom att skylla på någon klassisk kraft.

Feynman tog det på allvar och formulerade om kvantfysik uttryckt just i ”summan över historier”, eller med ett lite tråkigare ord ”vägintegral-formuleringen av kvantmekanik”, s.k. Feynman-diagram. Även om det kanske är oförståeligt just nu vill jag tala om vad det är man faktiskt räknar ut: till varje historia associerar man ett tal, som är den naturliga basen $e = 2,718\dots$ upphöjt till $2 \cdot \pi \cdot i \cdot E \cdot t / h$. Här står E för energin för en viss möjlig bana, t är tiden det tar för den banan och h är Plancks konstant, en naturkonstant som är grunden i kvantfysik och har enheten energi gånger tid (joule-sekund). Den matematiska konstanten i är kvadratroten ur -1 . Sedan bildar man summan över alla sådana historier. En liten [animering](#) ges på Wikipedia-sidan. Feynman beskriver det också i sin bok QED [13].

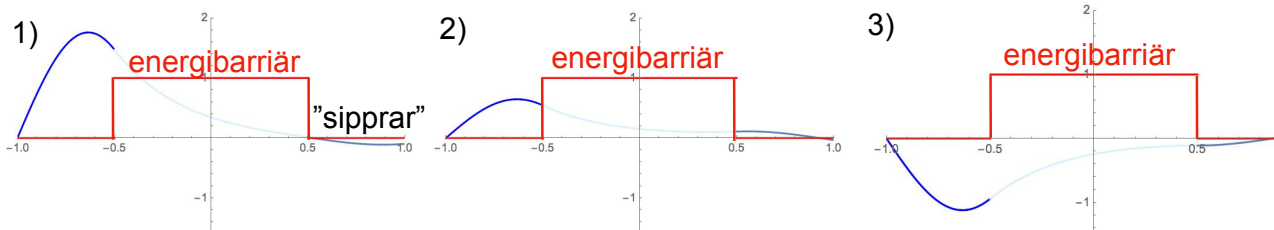
Min handledare Cécile DeWitt-Morette var en av de första som använde Feynman-diagram för att räkna ut hur många nya partiklar som produceras i strålar från rymden som kommer till jordytan [2]. Sådana partiklar kan idag smidigt uppmätas med din [mobil](#). En av Céciles kollegor berättar på Web of Stories [3] hur han och Cécile åkte till Feynman och lärde sig metoden innan Feynman publicerade den i september 1949. Man kan rita Feynman-diagram för två elektroner som slår in i varandra såhär, om vi tänker oss tid som går uppåt (min teckning från [1]):



Det brandgula molnet kan alltså bestå av flera olika processer, som i klassisk fysik skulle ha varit ömsesidigt uteslutande, alltså flera olika *möjliga historier*. (Wolfgang Pauli kallade molnet ”*den mörka punkten*” [5], idag kallas det ”växelverkansregionen”: det slutar ofta med lite tråkigare namn.) Man måste addera amplituderna $\alpha = e^{2 \cdot \pi \cdot i \cdot E \cdot t / h}$ för alla möjliga historier innan man kvadrerar för att få totala sannolikheten P för processen. Varje Feynman-diagram representerar ett α för varje möjlig historia, som kan interferera.

2a. Kvant-tunnling: fusion.

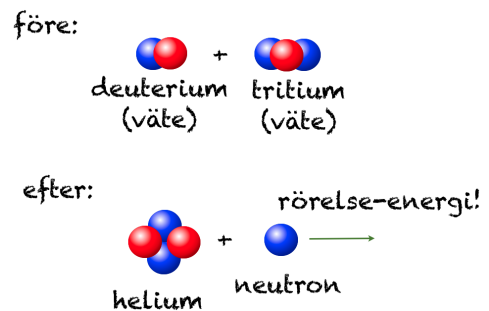
Här är en bild från en liten uträkning i grundläggande kvantfysik som jag har på min hemsida (Mathematica-arbetsbladet `schrodinger_tunnling.nb`, för den som är intresserad av detaljer, eller prova [PhET-appen](#)):



Det kommer in en partikel från vänster: den **blå** vågen säger vad sannolikhetsamplituden α är att vara i ett visst intervall (enligt ovan kan amplituden vara negativ, alltså under den horisontella axeln). Det **röda** är en *energi*barriär. Barriärens höjd i energi är vald så att i klassisk (före-kvant-)fysik skulle partikeln ha för lite energi för att ta sig igenom barriären och komma ut till höger. Partikeln kommer alltså *aldrig* ut till höger, enligt klassisk fysik. Men enligt kvantfysik ([Heisenbergs obestämdhetsrelation](#)) finns det *en liten chans* att partikeln plötsligt befinner sig till höger om barriären, som man ser i figuren: det är en liten blå våg som sipprar igenom. Skalan är i nanometer. Om barriären mycket bredare än nanometer, eller högre i energi, så en motsvarande klassisk partikel inte är i närheten att ta sig igenom, så är den lilla vågen som tagit sig igenom så liten att vi kan säga att den är ungefär noll. Då funkar klassisk fysik som approximation.

Ett sätt att sammanfatta ovanstående är att säga att kvantfysik-fenomen i sig är "bräckliga": de framträder tydligast i noggranna experiment med små partiklar, och uppträder sällan direkt i människors vardag.

Men de uppträder indirekt i vår vardag. Till och med avgörande för vår existens! Skillnaden på noll sannolikhet och liten sannolikhet kan spela stor roll över tid. Det viktigaste exemplet på kvant-tunnling är fusion av atomkärnor i solen, energin som får solen att lysa, som är nödvändigt för allt liv på jorden. Skissen till höger är från min video om bindningsenergi från [videolistan](#). För att få kärnfusion i solen måste atomkärnor i väte (nummer 1 i periodiska systemet) på något sätt komma tillräckligt nära varandra om de skall slås ihop till atomkärnor i helium (nummer 2 i periodiska systemet) och avge energi via kärnfusion. Problemet är att protoner är elektriskt plus-laddade och alltså *repellerar* (puttar ifrån) varandra!



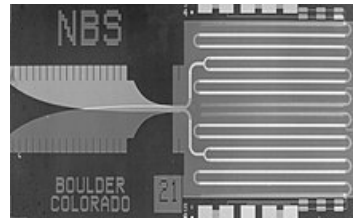
I videon föreslår jag följande liknelse: tänk dig den repellerande kraften som en skidbacke, och att du blir avsläppt vid parkeringen, som nästan är vid toppen av backen. Då måste du alltså först mödosamt saxa upp en liten bit, alltså bidra med en liten insats-energi, innan du kan få ut mer energi av att åka nedför hela backen ("två vätekärnor slås ihop till en heliumkärna"). Men låt oss säga att du är för svag i benen för att saxa upp. Kvantfysik säger då att om du hade varit en atomkärna, så bara du börjar saxa upp så finns en liten chans att du plötsligt befinner dig på toppen och kan börja åka nedför hela backen. Du har tunnlat igenom energi-barriären, som den blå vågen i bilden ovan. Det har alltså att göra med Heisenbergs obestämdhetsrelation och bilden av "sannolikhetsmoln" som i periodiska systemet: om vi inte kan säga säkert att du *inte* är precis på toppen när du väl börjat gå upp, så kanske du *är* precis på toppen? Räknar man ut den lilla chansen att vätekärnorna tunnlar igenom elektrisk-kraft-barriären mellan dem är det precis vad som behövs för att [solen skall lysa](#). Tur!

För att vara tydlig: liknelser som den om skidbacken skall man inte tolka för bokstavligt. Du som skidåkare representerar alltså en proton i solens inre. Kvanttillstånd är som sagt ganska bräckliga, de tappar sin *koherens* på mikrosekunder, där koherens är ytterligare ett koncept snott från våglära som sätter en siffra på hur mycket "i takt" olika delar av samma våg är. Är inget alls i takt är det ingen våg. Så för en verklig icke-kvant-koherent skidåkare som verkligen saxar upp så är chansen att hoppa framåt överhuvudtaget väsentligen exakt noll, och det är missvisande att börja leta sådana effekter i en verklig skidbacke.

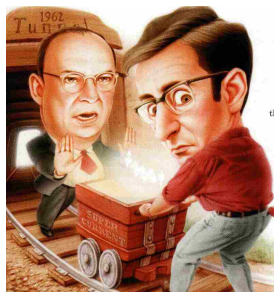
(Jag skrev "för liv på jorden", för kanske är solenergi inte nödvändigt för allt möjligt liv. Det skall utforskas av två nya satelliter som skall till Jupiters måne *Europa*; den månen har stora hav under is dit inget solljus når. Istället är det Jupiters tyngdkraft som kramar ihop den lilla månen och alstrar värme.)

2b. Kvant-tunnling: supraledning.

En annat exempel på kvanttunnling är *Josephson-effekten*, som upptäcktes på 1960-talet och under de senaste årtiondena har ersatt de gamla standard-definitionerna för enheten för elektrisk spänning, *volt*. Effekten skulle också kunna vara nyckeln till enorm teknologisk utveckling i framtiden (se nedan). En vanlig elledning leder elektrisk ström, alltså elektroner, enligt Thomsons experiment från 1897 som jag tar upp nedan. Under vanliga omständigheter studsar elektronerna omkring i elledningen och utvecklar värme, som är rent slöseri. (Det är t.o.m. lätt att räkna ut slöseriet: antal watt som slösas på värme är antalet volt gånger strömmen i ampère, som i sin tur uttrycks i antalet elektroner som rör sig förbi någon viss mätpunkt per sekund.) En vanlig elledning är alltså åtminstone lite grand en *resistor*, ett *motstånd* mot strömledning. Men om man kylar elledningen till minus några hundra grader, som är relativt lätt att göra i laboratorier nuförtiden genom att köpa lite kylmedel (t.ex. en behållare med flytande helium), så börjar strömledningen tvärt vid någon specifik ämnesberoende temperatur uppföra sig som att den överfördes av en enda stor "kollektiv" våg istället för av enskilda elektroner. Den här vågen är alltså inte sannolikhetsvågen för enskilda elektroner som i dubbelspaltexperimentet ovan, som utförs vid rumstemperatur, utan sannolikhetsvågen för miljoner elektroner tillsammans, då känsliga kvanteffekter får fullt spelrum och enskilda elektroner inte går att urskilja. Den stora vågen rör sig genom ledaren utan att slösa energi. Det fenomenet kallas *supraledning*, och används t.ex. på sjukhus i MR-kameror ("magnetrontgen", se sektion 5e nedan) för att generera stora strömmar och därmed starka och stabila magnetfält: det är för att få igång supraledningen som MR-kameran använder kylutrustning med flytande helium ända nere vid $-269\text{ }^{\circ}\text{C}$. (På svenska, tyska och franska har vi kvar ett historiskt prefix *supra-* istället för att direkt erkänna att det vi vill säga är att elledningen är *super-bra*: på engelska heter det mycket riktigt *superconductivity*.)



Så vad är det i supraledning som kvant-tunnlar sig igenom någon barriär? Sätt ihop två supraledare med en tunn vägg (barriär) emellan, som i chipet på bilden ovan. Enligt ovanstående diskussion kommer lite av den stora elektronvågen att *tunnla igenom* barriären. Det Josephson insåg från teoretisk kvantfysik var att eftersom det inte finns någon anledning att tunnla åt något visst håll, så tunnlar ("skvalpar") vågen fram och tillbaka. (Nedan i diskussionen om kemisk bindning tipsar jag en app där du kan prova att själv få en kvantvåg att "skvalpa".) Svängningen fram och tillbaka har en frekvens som är oberoende av hur tjock barriären är, och som Josephson först räknade ut teoretiskt: frekvensen är dubbla elektronens elektriska laddning e gånger antalet volt delat med Plancks konstant h . För mikrovolt ger det gigahertz, som är mikrovågor, som i en mikrovågsugn, som också används för WiFi-nätverk. Så Josephson-effekten är praktisk att testa med väl utvecklade trådlösa metoder. Därför sätter man sedan 1990-talet ihop ett stort antal (20 208) sådana supraledande kvanttunnlings-barriärer i ett chip som på kortet ovan, som står och svänger fram och tillbaka och säger att det definierar vad en volt av elektrisk spänning är. Det är just för att Josephson-frekvensen inte är så beroende av t.ex. vilken tjocklek barriären har i laboratoriet som det är så bra att ha som standard. Elektronens elektriska laddning e och Plancks konstant h är naturkonstanter, dvs. samma i alla laboratorier världen över.

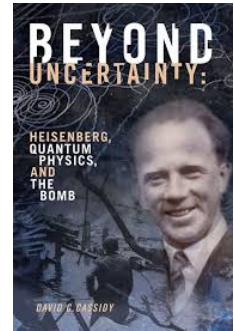


För att illustrera generationsskiftet i materialfysik på 1960-talet finns en fin artikel [5] hur John Bardeen, som fått nobelpris i fysik för både transistor och för teorin för supraledning, försökte säga åt Brian Josephson att Josephsons effekt inte finns i verkligheten: Bardeen försökte bildligt talat stoppa Josephsons superström från att åka igenom kvant-tunneln, som i teckningen här bredvid [5]. Men inom ett år hade experimenten gjorts som stödde Josephsons teori, och Bardeen fick ge upp. Det är många bråk och stora egon inom fysik, men experiment får alltid sista ordet.

3. Varför Heisenberg?

Om man måste välja en person som gjorde nyckelframstegen i kvantfysik och verkligen förstod vilken revolution han åstadkommit var det Werner Heisenberg runt 1925. (Som kontrast förstod Erwin Schrödinger själv inte kvantfysik, som vi kommer att se!). Därför skriver jag det här utifrån Heisenberg-biografin *Beyond Uncertainty* [6], en optimal kursbok för den som gillar lite 2:a-världskrigshistoria inifrån. En röd tråd ur

historisk (och dramatisk) synpunkt är det som alla ville fråga Heisenberg: valet och kvalet att lämna Tredje riket eller inte. Många kollegor var öppet aggressiva mot honom: hur kan du stanna kvar och samarbeta med Hitlers regim, som sparkat ut över hälften av dina närmaste vänner och kollegor för att de hade judiskt påbrå, i och med *Berufsbeamtengesetz* 1933? Tyskar betraktar matematik och naturvetenskap som en del av det tyska kulturarvet, det sorterar som sådant under *Kultusministerium* [9], och Heisenbergs politiske mentor Max Planck sade att om alla flyr Hitler har vi ingen naturvetenskaplig kultur kvar; det var ungefär förklaringen Heisenberg gav till att inte lämna Tyskland. Att det skulle ha varit vanlig feighet bestrids t.ex. av den holländske judiske fysikern Goudsmit i sitt tal på Heisenbergs begravning: Heisenberg åkte nästan själv i koncentrationsläger för sina många bråk med nazistiska fysiker, när han vägrade sluta prata om Einsteins relativitetsteori, och bara när Heisenbergs mamma vädjade till Himmlers mamma (!) ordnade det sig [6].



Boken beskriver ett vetenskapligt ”krig” perioden 1925-1927, med kombattanter som den erfarna Bohr, som hade konstruerat den då ledande Bohr-modellen för atomen redan 1913 [32], och de yngre Heisenberg och Schrödinger. Motargumenten gavs av ingen mindre än Albert Einstein. Schrödingers våg-bild av elektronen gör det på ett sätt lättare att visualisera atomen än Bohrs mer abstrakta ”stationära tillstånd” (som vi idag kallar *orbital*, ett ord som kom 1932): elektronen är i Schrödingers synsätt en ”stående våg” (”*standing wave*”, Cassidy s.148) som hålls fast av elektriska plusladdningen i atomkärnan. Det är den stående vågen vi kallar atomens ”elektronmoln”. Men Schrödingers visualisering av elektronen i atomen är lite av en pedagogisk fälla, eftersom Schrödinger själv inte förstod vad vågens amplitud betydde: ”*Schrödinger had assumed that, when multiplied by the electron charge, this density function [”vågfunktionen” ψ , grekiska psi, min kommentar] represented the density of the electric charge. But the assumption fell apart in Born’s analysis. [...] The square of Schrödinger’s wave function had nothing to do with the density of matter or charge. It referred to the probability of finding a given matter wave in a given state, either within an atom or after a scattering process. For numerous particles, the probability thus represented the number of particles found in each state.*” [1], s.158

Schrödingers egen (felaktiga) bild var alltså väsentligt klassisk: kvadraten på vågens amplitud $\alpha_{\text{där}}$ att vara på ett visst ställe är hur mycket elektrisk laddning det finns där (som bråkdel av elektronladdningen, får man anta), och på ett annat ställe $\alpha_{\text{här}}$ hur mycket laddning det finns ”här”. Då är det ju inget särskilt svårt att förstå eller visualisera: elektronen vore bokstavligen ”utsmetad”, som en vanlig vattenvåg också är utbredd. Men enligt ovanstående citat söndersmulas Schrödingers påståenden av Borns omtolkning av elektronmolnet (*fell apart*). En omtolkning som Born själv också till slut fick nobelpriset för 1954 [4].

Bohr enade till sist fysikerna bakom våg-partikeldualitet på en konferens i Italien 1927. Den som konsekvent uttryckte sitt missnöje även efter 1927 var Einstein. Han sade: *ödet har bestraffat min brist på respekt för auktoritet med att göra mig till en auktoritet själv*. Einstein hade tre välkända och dokumenterade debatter med Bohr, och de kulminerade 1935, i ”blixten från klar himmel” [6]: Einstein påstod att kvantfysik må kunna beskriva experiment hittills, men föreslog i princip ett nytt sorts experiment som skulle motbevisa kvantfysik, i artikeln Einstein-Rosen-Podolsky [10] (”EPR”, men de två yngre kollegorna ”P” och ”R” var i efterhand inte lika framstående utan verkade mest kanalisera Einsteins tankegångar). Fotoner (partiklar av ljus) har polarisation, det som kan filtreras ut av polaroidglasögon: ljuspartiklar kan t.ex. ”snurra” antingen åt vänster eller höger. Tag en partikel som kan sönderfalla till två fotoner. Om den ursprungliga partikeln inte har någon polarisation måste den ena fotonen isåfall snurra åt vänster och den andra åt höger. I Einsteins föreslagna experiment låter man först fotonerna åka *långt bort från varandra* innan man mäter vilken som snurrar åt vilket håll. Då ”vet” fotonen enligt kvantfysik själv till att börja med inte vilket håll den snurrar åt. Inte förrän man mätt att den ena snurrar åt vänster så ”vet” den andra ögonblickligen att den måste snurra åt höger. (I Brian Greenes fina dokumentär *Fabric of the Cosmos* [23] representerar han det med två ”lyckohjul” som snurrar, och uppvisar något mystiskt samband.) Einstein sade att det måste vara fel: det låter misstänkt likt någon slags ögonblicklig *påverkan* mellan fotonerna, så information skulle överföras snabbare än ljusets hastighet. Istället måste de enligt Einstein redan snurra höger/vänster när de separeras, bara att vi inte vet om vilken som är vilken. Den synen på verkligheten kallas ”lokal realism”, och det är som man tänker sig vardagsfysik: en partikel har i klassisk fysik vissa egenskaper oavsett om jag mäter dem eller inte. Om experimentresultat stödde Einsteins hypotes skulle det tillintetgöra kvantfysikidéerna ovan om summan av historier: det skulle innebära att dubbelspaltexperimentet istället förklaras av en hittills oupptäckt, men vanlig klassisk, kraft som verkar i alla

EINSTEIN ATTACKS QUANTUM THEORY

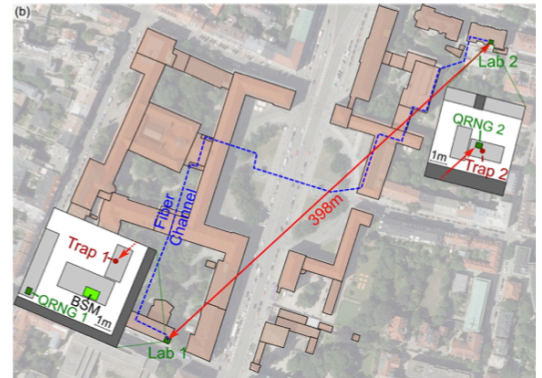
Scientist and Two Colleagues Find It Is Not 'Complete' Even Though 'Correct.'

SEE FULLER ONE POSSIBLE

Believe a Whole Description of 'the Physical Reality' Can Be Provided Eventually.

vanliga experiment, även vid rumstemperatur och låg energi, och ger upphov till interferensmönster och liknande effekter, istället för Max Borns mer abstrakta sannolikhetsväg. Så det låter lovande.

Men EPR-experiment har sedan dess utförts, ett av de första av Clauser med medarbetare på 1970-talet. (EPR-experiment kallas ofta "Bell-test-experiment" efter fysikern John Bell, som formulerade testet lite tydligare, och höll med Einstein att man borde ha lokal realism.) Många förbättrade experiment har gjorts sedan Clauser, ett av de mer moderna är av Weinfurters forskargrupp i München 2016 [18]. Einstein hade fel både om vad experimentet skulle visa och hur man tolkar det! Experimentet visar att den ena fotonen faktiskt direkt "vet" att den andra snurrar åt andra hållet. Men Einsteins oro var ogrundad, för det betyder inte att det går att skicka information fortare än ljuset: kvantfysik motsäger inte på något sätt Einsteins relativitetsteori. Faktum är att Feynmans formulering av kvantfysik som summan över historier (strax innan Einsteins död) lämpar sig väldigt väl för att anpassas till relativitetsteori: händelser i rumtiden som är för långt ifrån varandra för att kommunicera med varandra saknar enligt relativitetsteori "observatör-oberoende tidsordning": huruvida A hände *före* eller *efter* B beror alltså på hur fort jag rör mig relativt A och B. Finns ingen objektiv tidsordning kan det heller inte finnas något orsak/effekt-samband mellan dem i vanlig mening (annars skulle tidsmaskiner finnas). Det kan däremot finnas *korrelation*, som är svagare än ordet "påverkan" i vardagsspråk, mer som ordet "samband" som jag använde ovan: två situationer kan hänga ihop med ett samband utan att det ena implicerar det andra. Att förklara varför ett sådant samband inte går att använda för att kommunicera snabbare än ljusets hastighet kräver lite matematik och mynnar ut i det s.k. *no-communication theorem*, vi kan lämna detaljerna till en annan gång. En lite rolig epilög till att EPR-artikeln diskuterats mycket i modern tid är att den nu är Einsteins mest citerade artikel: fler andra artiklar hänvisar till den än både till relativitetsteori-artikeln och till hans nobelprisbelönta artikel om fotoelektriska effekten, som först introducerade ljuspartikeln som vi idag kallar fotonen.

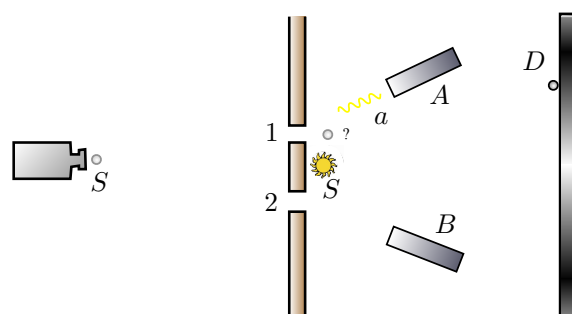


Weinfurter et al, <https://arxiv.org/abs/1611.04604>

Notera att trots att *kvant-teleportering* (som Wikipedia-sidan med det namnet) är det accepterade ordet för fenomenet att den ena fotonen genast "vet" att den skall snurra åt ett visst håll så har man alltså inte teleporterat någon *materia*, vilket är det man brukar mena med "teleportering" i science fiction, som i Star Trek, som Brian Greene tar upp i sin ovan nämnda dokumentär *Fabric of the Cosmos*. I de riktiga experimenten som det i München har man bara överfört *information* om materia, den ursprungliga materian (partiklar som elektroner och protoner) är kvar där den började. Men Brian Greene tar lite lekfullt upp idén att kanske är det som ger ett system individualitet just kvant-sambanden och inte materian (partiklarna) själva, eftersom alla atomer av en viss sort är exakt identiska. Ordet *kvant-informations-teori* börjar mer allmänt ersätta flera av de här äldre koncepten. Men finns kvantdatorer? Mitt svar är sedan oktober 2019 ja, och jag återkommer till dem nedan.

De kvantsamband jag pratat om kallas med ett mer precist ord att partiklarna är *snärjda*, eng. *entangled*. Ibland översätts det till *intrasslade* eller *sammansflätade* men jag föredrar Ingemar Bengtssons översättning: *snärjelse* för *entanglement*. Snärjelse har en matematiskt precis definition: ett "tensortillstånd som inte är ett produkttillstånd". Vi skall studera den definitionen mer, men i ord betyder det alltså att ett kvantsystem har kvantsamband med andra delar av ett kvantsystem. Nästan alla tänkbara kvanttillstånd är snärjda.

Mätprocessen kan nu betraktas som snärjelse mellan mätapparat och mätobjekt. Det var ungefär så Heisenberg argumenterade 1927 [20]: i dubbelspalt-experimentet med elektronen i början av den här texten nämnde jag i förbifarten (på s. 2) att om vi tar reda på vilken spalt elektronen gick igenom så försvinner interferensmönstret på skärmen, dvs. prickarna blir jämnt fördelade utan växlande ljusa och mörka ränder. Men hur tar man reda på vilken väg elektronen tagit? Man kan utöver källan S, som förut bara var en elektronkälla (t.ex. en upphettad tråd med en liten elektrisk spänning som accelererar iväg elektronerna), nu lägga till en fotonkälla, en lampa som har så låg intensitet att den bara skickar ut en foton åt gången. Elektronen kan nu när den går igenom spalten "studsa" mot fotonen och därigenom avslöja något om sitt läge och sin



rörelsemängd. Den fotonen detekteras sedan av en detektor A om elektronen gått igenom spalt 1, och av detektor B om elektronen gått igenom spalt 2. Det är nu snärjelsen mellan den ”bort-studsade” fotonen och elektronen som är nyckeln. Tänker man igenom det inser man att det blir ganska viktigt om vi betraktar mätprocessen som a) i sig makroskopisk, att den inte är fullbordad förrän den makroskopiska displayen på en detektor ställer in sig på ett värde, eller b) som att en mikroskopisk partikel (fotonen) utför det väsentliga steget i ”mätningen”. Det blir då en definitionsfråga om man vill kalla alternativ b ”mätning” överhuvudtaget. På grundkurser i kvantfysik brukar man reservera ordet ”mätning” för alternativ a, en fullbordad ”total” mätning när fotonen har registrerats i den makroskopiska detektorn. Då brukar man säga att mätprocessen är komplicerad, vi bakar ihop allt till en enkel regel som kallas ”kollaps av vågfunktionen”. Susskind skriver i sin bok [31] mer om mätprocessen: alternativ a i kap. 4.14 och alternativ b i kap. 7.8. Redan i förordet till boken poängterar han att de flesta andra böcker mest undviker frågan, snarare än att ta tjuren vid hornen, som Heisenberg påbörjade 1927.

4. Experiment och fenomenologi

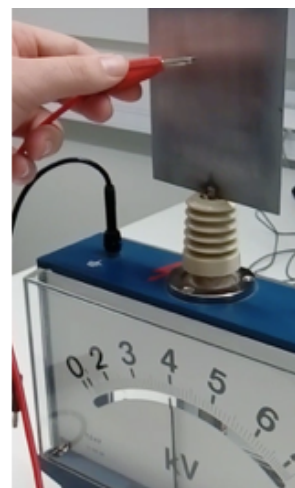
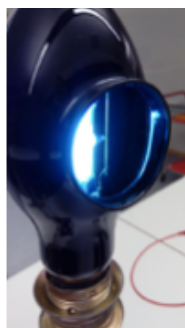
Fenomenologi är för en fysiker studiet av mätdata (fenomen) i ett skede av forskningsutveckling innan man gör anspråk på att ha ett överbryggande ramverk. (Om man söker på nätet på ”fenomenologi” får man ofta dess ursprungliga betydelse inom psykologi, även från Stanford-encyklopedin.) Det långsiktiga syftet för teoretiska fysiker är att konstruera ramverk som överbryggat olika experiment och säger något om vad som *ligger bakom* experimentresultaten, en mer ambitiös ”teori”. Men man måste börja någonstans, och i första skedet nöjer man sig med fenomenologi för ett sorts experiment i taget. Den specifika förståelsen kan mycket väl motsäga förståelse från andra sorters experiment, och motsägelser kan leda till nya insikter. Notera att i vardagspråk betyder ordet ordet ”teori” ofta ”hypotetisk”, som i ”det är ju bara i teorin”, men i fysik används ordet ”teori” ofta precis tvärtom: när ett ramverk överbryggat olika sorters experiment och redan har gått igenom årtionden av intensivt experimentellt testande förtjänar det namnet teori, som i ”kvantteori”. I ett tidigare skede kan man kalla det fenomenologi, och det kan alltså inom ett forskningsområde finnas flera försök till teorier som alla representerar olika sätt att förklara samma fenomenen kvantitativt.

Nu kan läsaren invända: kvantteori är ju redan etablerat, så vad är isåfall meningen med att prata om fenomenologi här? Det finns en pedagogik som kallas ungefär ”fenomenen först”: vi vill i utbildning simulera forskningsprocessen, inom rimliga gränser. Med andra ord, vi behöver inte gå igenom varje krusprång, varje stickspår som varenda forskare i historien har svettat sig igenom, men att bara presentera fullbordat faktum är inte bara historiskt missvisande utan hindrar studenter att se kvantfysik (eller fysik mer allmänt) för vad det är: en empirisk vetenskap grundad i mätdata. Det var nya mätdata som tvingade forskare som Heisenberg till sina teorier om verkligheten. Jag tycker ”motvilligt” karakteriserar väl hur de själva beskriver processen, fast sådana värdeord är svåra att göra precisa ur historisk synpunkt (hur hade Heisenberg agerat om det var ”med vilja”?).

Nedanstående är korta sammanfattningar, de ersätter inte diskussion på föreläsningar och i kurslitteraturen, bara kompletterar.

4a. Fotoelektriska effekten

Om man laddar en zink-platta med elektrisk laddning (bild till höger) så kan man ladda ur genom att lysa på plattan med en lampa med ultraviolett ljus. Lyser man istället med en vanlig lampa med mest synligt ljus så laddas metallplattan inte ur, inte ens om man tar en stark vanlig lampa som levererar mycket energi per tidsenhet (watt). Mätresultatet om urladdning tolkade Einstein 1905 som att det finns partiklar av ljus (fotoner) som måste ha minst en viss ”tröskel”-energi för att riva loss elektroner från plattan: starkare lampa betyder i och för sig *fler* fotoner, men det räcker inte: energin *per foton* måste vara tillräckligt stor för att slå bort laddning från plattan. Mer förklaras i Einstein-biografin.

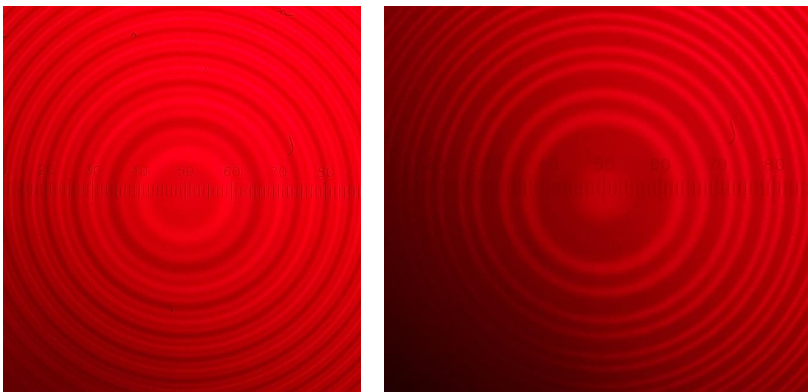


Hur stor tröskel-energin är beror på materialet. I video 4 på [videolistan](#) utför vi en variant på experimentet där materialet istället för zink är täckt med en film som sänker tröskelenergin så att även synligt ljus kan riva loss

elektroner. Istället för att byta lampa tar vi filter för olika färger. Genom att också lägga på en motriktad elektrisk spänning kan man få strömmen av de elektroner som rivits loss ned till noll, och den spänningen karakteriserar då hur mycket energi de bortrivna elektronerna hade. Om vi tar Einsteins formel $E = h \cdot f$ som modell så tillåter oss det här experimentet att mäta Plancks konstant h i ett annat sammanhang än det som Planck introducerade det i: han studerade energi-innehåll i elektromagnetisk strålning (mer om det i samband med solceller nedan). Vi prickar in energin hos elektronerna i en graf med färgen hos lampan på horisontella axeln, och utan Einsteins insikt om att ljus har en minsta byggsten skulle lutningen i den grafen vara orelaterad till Plancks konstant h som uppmätts i andra experiment, men Einstein visade att det här experimentet gav ungefär samma mätvärde på h . Han kunde inte vara exakt säker utifrån mätdata som fanns då, men han säger i artikeln från 1905 att det stämmer ganska bra.

4b. Zeeman-effekten

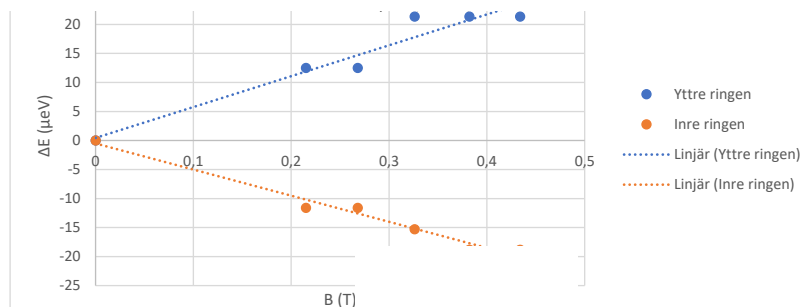
Astronomer tillbaka till Fraunhofer och Ångström på 1800-talet kom på att man kan dela upp ljus från stjärnor som solen med ett spektroskop (ungefär som ett prisma, som delar upp vitt ljus i ett regnbågspektrum) och notera att det är mörka streck i ett i övrigt regnbågsliknande spektrum. Redan då hade forskare märkt i laboratorier att om man har lyckats isolera gas av ett enda grundämne, hettar upp gasen och tittar på ljuset genom ett prisma så ser man i ljuset från en sådan lampa bara vissa ljusa linjer (ett "fingeravtryck" av det grundämnet), och med lite detektivarbete kunde man ser att precis de färger som är ljusa i laboratorieexperimentet är de som fattas i ljuset från solen. Mer om det i gymnasieutdraget på Canvas och i Video 1.



Spektroskopi, studiet av spektral-linjer, är en stor del av början av Heisenberg-biografen. Innan Heisenberg föddes hade Zeeman noterat att om man sätter

en upphettad gas i ett magnetfält så "breddas" linjerna. Idag skulle vi säga att om flera linjer förut låg ovanpå varandra så separeras de av magnetfältet, och är separationen liten ser det ut som att linjen blir bredare. I bilden till vänster har våra studenter tagit en lampa med upphettat kadmium (Cd, nr 48) och splittrat linjerna med justerbart magnetfält från en elektromagnet. "Linjerna" ser ut som cirklar för att man använder en optisk s.k. Fabry-Perot-interferometer för att förstora vad som annars är en ytterst liten splittring. (Bilden till höger ovan är för den som är intresserad av detaljer: det är när man satt på ett polarisationsfilter, då ser man att ljuset från olika linjer är olika polariserat, för vissa försvinner.)

Är man noggrann, som studenterna i rapporten till höger, kan man med den här ändå relativt enkla utrustningen mäta hur mycket splittringen av en viss ring blir i mikro-elektronvolt, som funktion av hur starkt magnetfält man har slagit på, i enheten tesla. Resultatet blir ungefär $54 \mu\text{eV}/\text{T}$ (kolla att du



laborationsrapport, M. Grabler, N. Larsson & C. Andersson (2019)

kan räkna ut det själv från figuren), inte långt ifrån resultatet $58 \mu\text{eV}/\text{T}$ från mer omfattande mätningar. Den lutningen kallas av historiska skäl kallas "en Bohr-magneton" μ_B , för Bohr lyckades i en förenklad modell koppla lutningen till Plancks konstant: $\mu_B = e \cdot h / (2 \cdot m_e)$, där e är elektronens elektriska laddning och m_e är elektronens massa. (Notera att vi nu har två helt olika men bägge välanvända betydelser av grekiska bokstaven μ (my): å ena sidan som "mikro", alltså miljondel, och å andra sidan μ för "magnetisk").

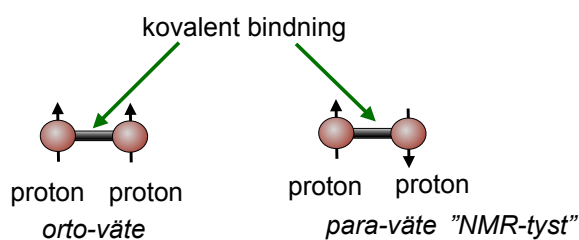
Tar vi istället för röd kadmiumlampa en gul natriumlampa (som många känner till från gatulampor, fast de nu håller på att ersättas av LED-lampor) så är den gula linjen redan naturligt splittrad i två. Om man sedan slår på ett magnetfält som ovan splittras den ena i fyra linjer, den andra i sex linjer. Den Zeeman-effekten kallas runt 1920 "anomal" för att det inte blev tre eller fem som man hade sett tidigare. Man kan ändå göra ett liknande diagram som ovan för dels gruppen av fyra linjer, dels gruppen av sex linjer, och man får olika

multiplar av Bohrs grundstorhet $58 \mu\text{eV}/T$. Det var det som Heisenberg brottades med 1920, och för att få ut rätt lutningar tvingades han tillåta halv-heltaliga kvanttal, som $1/2$ och $3/2$. Energinivå-diagram som det Heisenberg ritade beskriver jag i videon [Att tyda spektrallinjer](#), och på webbplatsen [HyperPhysics](#). Som Cassidy skriver, "fractional numbers and momenta soon became a permanent option in Göttingen and Munich. They were, of course, later justified as arising from the spin of the electron, a notion completely foreign to physics before 1926." (s.113).

Än idag ser man i läroböcker spår av den tidiga förvirringen kring elektronens magnetism. Rotation (rörelsemängdsmoment $L = m \cdot v \cdot r$) hos elektronen kring atomen, som att jorden går runt solen på ett år, beskrivs väl av Bohrs teori. Men år 1920 hade Bohr inte ens försökt beskriva det vi idag kallar elektronens "spinn": det ordet kommer från att några forskare runt den här tiden försökte beskriva elektronens "inbyggda" magnetism som att den uppstår från att elektronen är ett litet klot av laddning som roterar kring sin egen axel (som jorden gör på ett dygn, i motsats till år, som rotationen kring solen tar), men försöket misslyckades. För elektronens inbyggda magnetism är Bohr-magnetonen μ_B bättre att betrakta som en praktisk måttstock för mätdata, och inte förrän den mer avancerade kvantelektrodynamiken, med Dirac och Fermi och Feynman, lyckades man räkna ut elektronens magnetiska egenskaper från teorin.

4c. Kemisk allotropi

Det är intressant vad som övertygade den ganska konservativa nobelkommittén att ge Heisenberg nobelpriset för den nya kvantfysiken. Endast ett experiment omnämns i deras motivering för Heisenbergs nobelpris 1932: hans förklaring av "allotropa former av väte" från 1927. De två allotroperna kallas idag *orto-väte* och *para-väte* och isolerades 1929 av kemisterna Bonhoeffer och Harteck. Heisenbergs förutsägelse att två varianter borde finnas är skissad till höger: även protonen borde ha spinn som elektronen, och det leder isåfall till aningens splittrade energier för de två formerna av väte. Alltså en ganska subtil skillnad, som kanske inte märks under normala omständigheter. Jag är inte kemist, men mitt intryck är att det först var viss osäkerhet kring Bonhoeffer-Harteck-experimentet, och att det bara i efterhand klarnade att reaktionen de studerade inte skett inne i själva gasen utan huvudsakligen vid kärnväggen av mässing, dvs. det var en katalyserad reaktion. Modern forskning om para- kontra orto-väte använder NMR-spektroskopi för att skilja dem åt (paraväte är relativt "NMR-tyst") och studerar dem även i olika lösningar av andra ämnen.



På [Wikipedia-sidan](#) för para- och orto-väte står det att de är varandras *isomerer* och inte *allotroper*. Två ämnen kallas isomerer om de har samma kemiska formel, t.ex. H_2 . Olika struktur (alltså geometriska förhållande mellan atomerna) medan allotroper av kol som diamant och grafit är två olika sätt för kolatomer att kombinera. Eftersom skillnaden ovan är lite subtil kanske man kan använda bägge orden. Både "isomer" och "allotrop" infördes av den svenske kemisten Berzelius.

Para- kontra orto-väte är i alla fall ett fint exempel på att detaljerade egenskaper hos en enskild partikel (protonens spinn) ger nya egenskaper i ett sammansatt system (två protoner med en bindning av elektroner) som går att mäta i makroskopiska experiment (para-vätgas går att separera från orto-vätgas). Det här kopplar till diskussionen senare av reduktionism kontra emergens. Se nedan för en nygammal tillämpning av vätgas för energilagring ("tankstationer" i Sverige idag).

4d. Radioaktivitet: vilka grundämnen alfasönderfaller? Radon? Cesium?

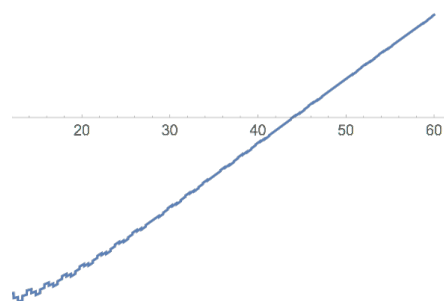
Vi skall prata om relativitetsteori så lite vi kan, för man måste begränsa sig någonstans, men vi kan inte undvika det helt. Einsteins formel $E = m \cdot c^2$ säger att energi, t.ex. i bindning, motsvarar massa. Bindningsenergi är negativ: tänk dig två partiklar långt ifrån varandra som har noll energi. Om de attraheras av elektrisk kraft, eller en av elektriska kraftens mindre kända kusiner som stark kärnkraft, så får partiklarna energi om man släpper dem närmare varandra, t.ex. skulle du kunna spänna en fjäder om du kunde koppla den till den ena partikeln (och så funkar faktiskt voltmätaren i 4a ovan: två små metallklot som när de känner av elektrisk kraft dras något närmare varandra och rör mätvisaren åt höger). Bindningsenergin märks i vägning

av isotoper: de som är mer bundna är lättare. För att komma igång med kärnfysik, titta på Video 5a,5b,6 och 7 på [videolistan](#). De videorna är för natur/teknik på gymnasiet och kanske för detaljerad för flera av er, men liknelsen med skidbacken och relationen med batterier kanske hjälper något.



För att visualisera radioaktiva sönderfall kan man t.ex. använda en dimkammare. Lägg en metallplatta på lite torr-is (koldioxid), håll på isopropyl-alkohol, täck med plastlåda som håller kvar den dimma som bildas strax ovanför plattan, och vänta. I videon jag tar upp om det så ser man alfa-sönderfall (tjocka raka spår) och betasönderfall (tunna små spår som åker hit och dit och snabbt tar slut). Notera att det här alltså är *naturliga* partikelstrålar: grundämnet strontium (Sr) finns i berggrunden (särskilt i en gruva i Strontian i Skottland, varifrån det först isolerades), och radon i gasform tar sig också upp från berggrund eller från material som används i konstruktion.

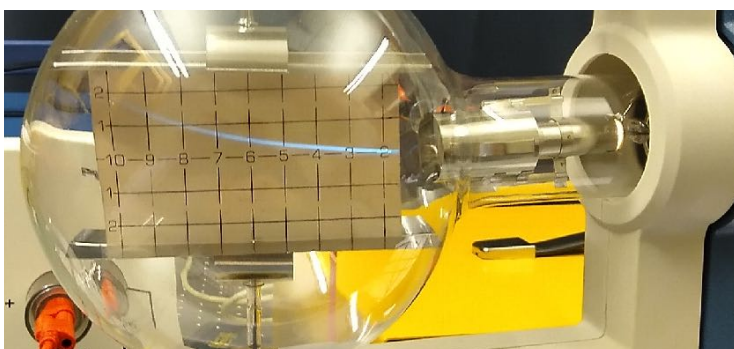
Låt mig göra det lite kvantitativt som i slutet av Video 7. Betrakta en atom med Z protoner och A kärnpartiklar totalt (protoner + neutroner), som alfasönderfaller. Min graf till höger är Bethe-Weizsäcker-formelns massa hos restprodukten (som har $A - 4$, $Z - 2$, och massan är inklusive bindningsenergi) plus massan hos en alfapartikel, minus massan för A , Z innan alfasönderfallet. Grafen visar bara just isotoperna $A = 2 \cdot Z$. Från och med ungefär $Z = 45$ börjar det enligt grafen bli positiv energi över. Atomkärnor är då alltså tillräckligt svagt bundna för att kunna alfasönderfalla spontant. Stämmer den här teoretiska grafen med mätdata från [nuklidkartan](#)?



Att en atomkärna *kan* sönderfalla betyder inte att den gör det *inom rimlig tid*. Teorin för alfasönderfall visar att biten som ”vill” ut ofta måste kvant-tunnla (”sippra ut”), som i 2a ovan. Naturlig radioaktivitet, särskilt hos grundämnen som är precis på gränsen att kunna sönderfalla, är alltså en kvantfysik-effekt, att ”sannolikhetsmolnet” för en alfapartikel når en liten bit utanför atomkärnan. Sannolikheten för en del av en kärna att tunnla ut, eller för en inkommande partikel att tunnla in i kärnan, kallas [Gamow-faktorn](#).

4e. Partikelstrålar

Thomson upptäckte redan 1897, innan kvantfysik, den första ”partikeln” i modern bemärkelse, alltså något som är en bråkdel av en atom, i hans fall den yttersta och mer lättupptäckta delen av atomen: elektronen. Experimentet jag diskuterar här är inte precis som det Thomson gjorde, men liknande grundidé. Man hettar upp en tråd av grundämnet volfram (nr 74) så det bildas ett litet moln av elektroner, och så accelererar man dem genom en spänning (apparaten nere till vänster i kortet är en spänningskälla).



För att elektronerna inte skall studsas för mycket mot luftpartiklar tar man en glastub och pumpar ut luft ur den. Man sätter också en skärm täckt med ett fluorescerande material som lyser upp när elektronstrålen träffar den, och ritar ett rutnät på skärmen i centimeter. Sedan sätter man på en ytterligare elektrisk spänning i vertikal led som gör att strålen åker upp, och eftersom den spänningen är känd kan man från klassisk (newtonsk) mekanik räkna ut egenskaper hos partiklarna man tror utgör strålen. Den uppåt-accelerande kraften som resulterar från en viss påslagen spänning är proportionell mot partikelns elektriska laddning, och hur mycket acceleration den kraften ger upphov till är proportionellt mot partikelns massa. Den accelerationen ger i sin tur en mätbar avlänkning i höjdlid (tydligt i det här fallet 2 cm i kortet, när strålen färdas 10 cm i sidled, för en viss pålagd spänning). Så den här typen av experiment för att mäta

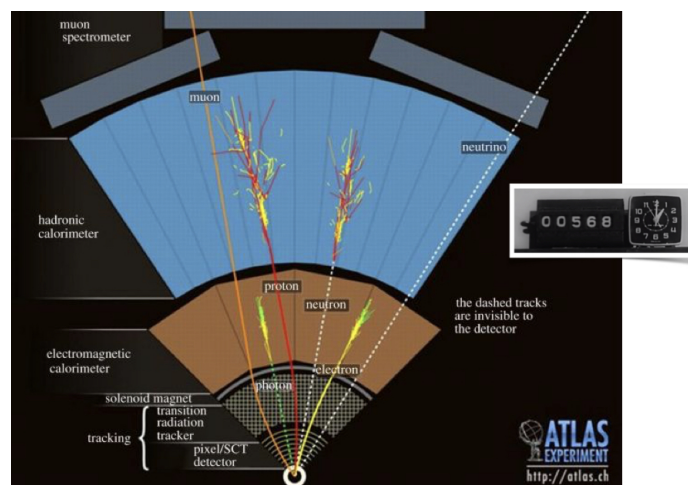
elektronens laddning e och massa m_e var redan gjorda när Bohr började med sina teorier, och hans fenomenologi kombinerade dem med Plancks konstant h , som i förklaringen av Zeeman-effekten ovan.

Thomson hade i efterhand lite tur att elektronen för inte alltför höga accelerationsspänningar åker med klart under ljushastigheten, eftersom han gjorde upptäckten före Einsteins relativitetsteori 1905. Men det gick att korrigera i efterhand: han hade kanske ännu mer tur att elektronen uppför sig huvudsakligen klassiskt i de här experimenten, så han slapp oroa sig för Heisenbergs obestämdhetsrelation och kunde använda newtonsk mekanik. Elektronen uppför sig mestadels klassiskt i en sådan här partikelstråle för att det är alldeles för många elektroner som accelereras för att man skall se dem enskilt på skärmen ovan. Det är typiskt svårt att se kvantfysik-effekter när man har väldigt många partiklar, som i det ursprungliga dubbelspaltexperimentet med ljus på 1800-talet. Så är det i viss utsträckning än idag: den mest kraftfulla partikelstrålen är den på CERN och det är ganska många partiklar åt gången. I Sverige håller vi för övrigt på att bygga en ny accelerator i Lund: ESS. Den skall accelerera partiklar till mycket lägre energi än på CERN och man försöker inte upptäcka nya partiklar.

Läs också i Weinberg-utdraget om stackars Walter Kaufmann, som gjorde Thomson-experimentet först.

4f. Partikeldetektorer

I kompendiet [Modern fysik 1](#) kan man avnjuta den fina tvärsnittsbilden på en partikeldetektor till höger. Jag har också inflikat ett svartvitt kort på en gammal klassisk räknare, från Frisch-Smiths experiment där de räknade kosmiska strålar. I den mer moderna detektorerna i stora bilden har man olika sorts material som är specialiserat att detektera olika sorts partiklar. De yviga rödgula spåren kallas "kvastar" och är från protoner och neutroner. Så undrar du hur en proton "ser ut" är kvasten kanske det bästa visuella svaret som finns. Men varför är spåret yvigt? Det är en lång och intressant historia, kort kan man säga att det produceras en skur av andra partiklar när protonen träffar detektormaterialet, så skuren "är" i den bemärkelsen inte protonen, men sett på det sättet "är" ju inte spåret i dimkammaren ovan heller alfapartiklar.

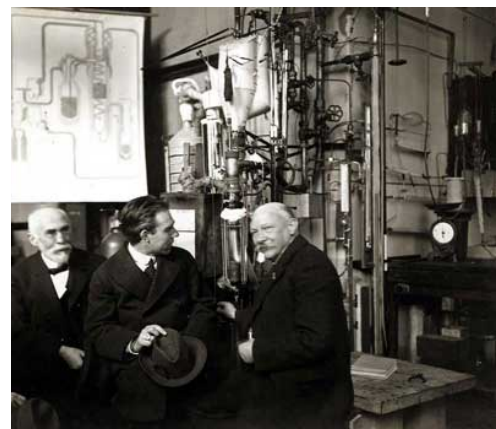


Ett viktigt koncept för att identifiera partiklar är *räckvidden*, hur långt de tar sig genom detektormaterialet, och hur mycket energi de tappar. Det beskrivs väl av Bethes formel som jag tar upp i kompendiet.

4g. Supraledning

Ledning av elektrisk ström utan resistans har jag redan diskuterat ovan. Låt mig här bara nämna två saker för att sätta det i historiskt sammanhang. Först, Onnes hade 1911 världens bästa kyl och det var han som först upptäckte att kvicksilver tvärt blir supraledande vid så kalla temperaturer som 4,2 kelvin (ca - 269 grader Celsius). I bilden ser man från vänster Lorentz, en ung Niels Bohr och Onnes i sistnämndes kryolaboratorium i Leiden 1919 (copyright för kortet utgången!).

Det andra jag ville nämna är att teorin bakom supraledning inte kom förrän mycket senare: BCS-teori från 1957 ([nobelpris 1972](#)). Den teorin nämner Anderson i sin essä "More is Different" (1972). Higgs-partikeln som upptäcktes 2012 med hjälp av partikeldetektorer på CERN har faktiskt intressant gemensam historia med försök att fördjupa förståelsen av BCS-teorin, av bl.a. Anderson, som därför pratar om "Anderson-Higgs-mekanismen". Det här handlar ytterst om två olika syner på fundamental fysik: *reduktionism* (som Weinberg företräder) kontra *emergens* (som Anderson företräder).



Den där ”vätskan” jag diskuterade ovan, som utgör ”super-strömmen” som leds i supraledare, hur kan man tänka på den som att den ”består” av elektroner, när elektronerna är negativt laddade och repellerar varandra? Svaret är i någon bemärkelse att elektroner i ett gitter av atomer inte uppför sig som fria elektroner i partikelstrålen ovan, utan kan uppleva en svagt attraktiv kraft. Men exakt hur ”super-vätskan” kondenserar fram ur en ”gas” av elektroner i gittret är ganska svårt att beskriva. Bardeen själv (B:et i BCS) sade att det är tveksamt att betrakta Cooper-paren (C:et i BCS), ”dropparna” i supervätskan, som att de ”består” av två elektroner.

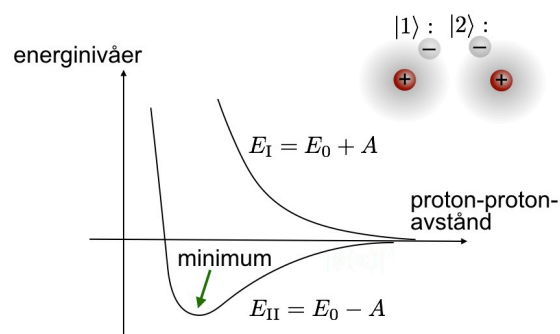
Ibland hjälper det om man kan relatera två svåra problem till varandra. Problemet vad som är inne i protonen, som var det Weinberg ursprungligen försökte beskriva när han tillämpade Higgs-mekanismen på betasönderfalls-fysik istället för på protonen, är fortfarande delvis olöst, men kanske är kondensering av Cooper-par åtminstone formellt relaterat till hur protonen bildas av kvarkar. Mer om det nedan.

5. Tillämpningar

5a. Periodiska systemets struktur och kvantkemi

Historien om hur fysiker som Bohr efter hårt arbete till slut lyckades förklarade åtminstone de stora dragen i strukturen i periodiska systemet, som i sin tur representerar enorma mängder mätdata av kemister under ett århundrade (från Dalton 1808 till Ostwalds deklamation av ”atomism” 1908), måste man kalla en av naturvetenskapens största triumfer. (Se t.ex. min video 1.) Men tyvärr har många människor idag ingen aning om hur periodiciteten (mönstret) som definierar periodiska systemet uppstår, trots att insikter därifrån också har enorma tillämpningar i vardagen. Periodiska systemet reduceras kanske för några i skolan till en affisch i kemisalen, mer som en lista av kända fakta istället för en imponerande och levande sammanställning av mätdata som skriker efter fenomenologi, vilket var situationen på Bohrs tid.

När man pratar om att grundämnen i periodiska systemet upptäcktes av någon viss kemist så säger man ofta att kemisten ”isolerade” grundämnet. Man behöver ”isolera” dem för att de sällan förekommer för sig själv i naturen, utan i olika blandningar, t.ex. när flera atomer binds ihop till molekyler. Thijs Holleboom tog på sin gästföreläsning hos oss upp Heitler-London-teorin med bindning i vätegas H_2 , alltså två väteatomer som binds tillsammans av sina elektronmoln. Feynman [diskuterar](#) det något enklare exemplet H_2^+ , två protoner som delar en elektron. Med våra amplituder kan vi prata om ”skillnaden” (I) kontra ”summan” (II) av tillstånden att elektronen är vid första protonen (1) eller vid andra protonen (2). Tillstånd II har något lägre energi än I och tillsammans med proton-proton-repulsion ger det ett minimum. Där blir elektronmolnet stabilt bundet. Varför? Feynman poängterar att det för två protoner ”... finns mer utrymme där elektronen kan ha låg lägesenergi. Elektronen kan spridas ut — och sänka sin rörelseenergi — utan att höja lägesenergin. Slutresultatet är lägre energi än för bara en ensam proton + väteatom.” [6].



Att beskriva bindning i vätegas från kvantfysik kanske någon inte tycker är en ”tillämpning”. Men vätegas har många tillämpningar där studiet av dess bindningar hjälper förståelsen. En tillämpning av förståelsen att det finns två olika varianter av väte i den här bemärkelsen är att det gör det svårare att lagra väte i flytande form, för reaktionen är exoterm. Det har viss effekt på väte som bränslemedel [16], se t.ex. [vatgas.se](#).

Mer konstruktivt kallas det vidare studiet av hur mer komplexa system byggs upp från atomer *kvantkemi*: att verkligen räkna ut fysikalisk-kemiska egenskaper hos ett sammansatt ämne från kännedom om ingredienserna via kvantfysik. Då blir den till synes tråkiga affischen med periodiska systemen i princip nyckeln till allt gott. Man kan t.ex. drömma att om man vill ha ett läkemedel med någon viss biokemisk egenskap skulle man kunna designa det teoretiskt på atomnivå, istället för att utföra experiment där man provar varje kombination för sig. Att prova sig fram är svårare än man först kan tro, t.ex. tänk dig en aminosyra i din kropp som har runt 20 atomer, med nästan 100 stabila grundämnen finns det uppemot 100^{20} kombinationer med 20 atomer, och det tillkommer ofattbart många olika strukturer och orienteringar för varje kombination. Att testa alla molekyler med samma komplexitet som aminosyror i experiment är inte praktiskt möjligt. I dagsläget är det inte heller praktiskt att simulera på en dator, men i princip.

Mer realistiskt (för att det inte överbryggas lika många naturvetenskaper) kan man redan idag designa hur väl, och hur, ett material leder elektrisk ström. Ett sätt som jag tar upp nedan är att tillsätta t.ex. fosfor i kisel som man gör i datorchip. Ett annat sätt diskuterar Krister Svensson på sin gästföreläsning: olika former av kol ger nya sorters makroskopiska material. Det är svårt att tänka sig hur de tillämpningarna skulle kunna ha mejslats fram utan den detaljerade förståelse av periodiska systemets struktur som atomfysik bidrar med.

Mer specifikt, det mest grundläggande sättet att studera uppkomsten av band är att föra två protoner mot varandra med bara en elektron emellan, som ovan. (Thijs Holleboom beskrev i sin gästföreläsning bildning av kovalent bindning t.ex. i H_2 , där bindningen består av två elektroner, det är en stark bindning och därför ”viktigare” för kemiska tillämpningar än en-elektronsbindning, men aningens mer komplicerat att förstå.). Det går bra att prova i PhET-appen ”Quantum Bound States” under fliken molekylbindning.

5b. Informationsteknologi: halvledarfysik

För att diskutera datorchip på atomnivå måste vi börja med ledning av elektrisk ström på atomnivå. Elektronen i ett gitter (periodisk struktur av atomer i fast ämne) uppför sig lite som om hela gittret vore en ”jätteatom”. Bara man sätter ihop två atomer till en molekyl, som ovan (5a) i vätgas H_2 , men även t.ex. i kvävgas N_2 (huvudkomponenten i vanlig luft) så börjar spektrallinjerna gruppera sig i ”band”, och molekyler med fler atomer än två får desto tydligare band. Vi kan från erfarenhet med naturliga atomer (alltså atomer en och en) anta att de här grupperna motsvarar grupper av energinivåer hos elektronerna, och hoppen mellan dem ger spektrallinjerna. På grund av Pauliprincipen kan inte alla elektroner vara i samma tillstånd, utan alla tillstånd som redan är fyllda med elektroner är otillgängliga. Översta energin kallas *Fermi-energin* för att Enrico Fermi var den första att beskriva elektronerna som en ”gas” av elektroner som fyller materialet (se Fermi-biografien). Bandet precis under Fermi-energin kallas ”valens-bandet” i liknelse med att de yttersta elektronerna i ett grundämne kallas valens-elektroner, och bandet precis ovanför Fermi-energin kallas ”ledningsbandet” som liknelse med att elektroner som tillförs en viss energi (Rydberg-energi 13,6 eV för väteatomen) slås bort så att atomen blir en jon, alltså tappar en elektron. (Som vi för övrigt kan mäta med tungan: pH i kemi mäter hur surt något är, och pH är minus logaritmen av antalet vätejoner H^+).

En av de första som försökte tillämpa Fermis ”gas-av-elektroner”-teori på ledning av elektrisk ström var Heisenbergs mentor i München: Sommerfeld. De som sedan vidareutvecklade bandteorin var Heisenbergs unga adepter Bloch och Wilson. Bloch förklarade utifrån kvantfysik hur elektrisk resistans vid rumstemperatur främst uppkommer från termiska vibrationer av gittret (en aspekt av *Bloch's sats*, som jag tar upp i Video 10 på [videolistan](#)).

Bardeen fick nobelpriset i fysik för uppfinningen av transistorn 1947 säger i sin nobelföreläsning [29] att hans arbete var grundforskning, inte tillämpad forskning för att uppfinna en viss apparat. Mer konkret: ”*Wilson was the first to formalize an adequate mathematical theory in terms of the band picture of solids [...]. The band picture itself, first applied to metals, is a consequence of an application of quantum mechanics to the motion of electrons in the periodic potential field of a crystal lattice. Energy levels of electrons in atoms are discrete. When the atoms are combined to form a crystal, the allowed levels form continuous bands.*”

”Kristall” (*crystal*) betyder här inte nödvändigtvis kristall som kvarts, utan vilket ämne som helst som har upprepad (periodisk) mikroskopisk struktur. Det gäller de flesta förhållandevis rena grundämnen, t.ex koppar och kisel. Kristallgittret (*crystal lattice*) i citatet är gittret av *joner*: ett ämne består ju av *elektriskt neutrala* atomer, men när en elektron blir fri att röra sig i en ledare är ”resten” av atomen som är kvar plusladdad, alltså en jon [4].

Alan Wilson var i Heisenbergs grupp i Leipzig på 1930-talet och skrev boken ”Semiconductors and Metals” 1939. Wilson skriver ”*there seem to be no other properties distinguishing insulators from semiconductors... the observed conductivity of semiconductors must be due to the presence of impurities.*” Och därför det lustiga påståendet: ”*If this is the correct view then the occurrence of semiconductors is purely accidental.*” (s.35) Det vill säga, om kemister verkligen hade isolerat de grundämnen de påstår sig ha isolerat som rena ämnen (utan andra ämnen i), så hade ingen upptäckt halvledare. Vilken tur!

Det verkar passande att titta på ett vidare citat ur Bardeens nobelföreläsning [29] om hur man går från fenomenologi av kombination av atomer ur periodiska systemet till en övergripande teori hur man skall göra för att få den kontroll över elektriska ledningsegenskaper man vill ha, och hur man räknar på det: ”*The purest material available now corresponds to about one donor or acceptor in 10^{10} . The resistivity drops, as*

illustrated, with increasing antimony concentration; as little as one part in 10^7 makes a big difference.” [3]. ”Antimony” är grundämnet antimon, nr 57, som Bardeen verkar diskutera som störämne i germanium (nr 32). Det enda viktiga här är alltså att antimon är i spalten till höger om germanium, så den atomen bidrar med en *extra* elektron om man ”blandar i” antimon i germanium (man måste ”blanda försiktigt” så man har kvar ovan nämnda gitterstruktur), precis som om man blandar i fosfor i kisel för att göra moderna transistorer (se figur till höger, ut Video 11 från videolistan). Forskargruppen som Bardeen var verksam i hade alltså börjat både bättre mäta och bättre förstå hur man skall kombinera atomer ur periodiska systemet för att åstadkomma precis definierade elektriska egenskaper.

En hel bok [24] med det fina namnet ”Crystal Fire” (”kristall” som ovan, alltså även kisel) utgår bl.a. från intervjuer med Bardeen. ”The key to the discovery was the recognition that quantum-mechanical entities – the holes – had a crucial role to play in carrying electric current near a semiconductor surface. A classical understanding of how this material behaved would not have sufficed.” (s.141). Det här är ju det tydligaste påstående man kan önska sig om hur viktigt kvantfysik var för uppfinningen av transistoren.

Hade Bardeen och hans forskargrupp arbetat med kisel istället för germanium hade de också uppfunnit MOS (metall-oxid-halvleder-övergång, [24], s.271), som är det som dagens datorchip är uppbyggda av. I germanium, som Bardeen och andra använde 1947, går oxid som bildas på ytan att tvätta bort, men i kisel sitter oxid fast på ytan. En mer modern transistor med MOS tillverkades först 1960: det som nu kallas MOSFET. Första ”officiella” datorchipet byggt av MOSFET var Intel 4004, det var 1971. Mitt favoritchip 6502 kom 1975, och hamnade i Commodore 64 år 1982, men även t.ex. i Nintendo, Atari, Apple, etc.

Så: förstår du hur en vanlig dator fungerar, eller datorchipet i din mobiltelefon? Ett mobilchip som Apple A12 i iPhone XS består av 7 miljarder transistorer på en yta mindre än en kvadratcentimeter. Den minsta beståndsdel är alltså en transistor, som är förkortning för *transfer resistor*, en pytteliten bit kisel (grundämne nummer 14 i periodiska systemet, som utvinns från sand) där antalet volt kan kontrolleras av en spänning. Man delar sedan in hur många volt det är i ”noll” (t.ex. mindre än 1 volt) eller ”ett” (t.ex. mer än 2 volt). Notera att alla antal volt mindre än 1 volt representerar ”noll” och alla som är mer än 2 volt representerar ”ett”, och att det egentligen är ett ”tomt gap” mellan 1 och 2 volt som är *varken 0 eller 1!* Det kan verka som slöseri: man skulle i princip kunna lagra mer information i transistorerna om man t.ex. använde hur många volt det var som siffra istället för bara ”lite” eller ”mycket” som 0 och 1, en *bit*. Förklaringen att begränsa sig till bit-konceptet är kanske uppenbar: man kan inte lita på exakt hur många volt man har (redan efter mindre än en sekund läcker en typisk komponent lite elektrisk laddning och måste kontinuerligt ”förfriskas” med eltilförsel). Det var ännu mer så när transistorerna uppfanns, så man måste ha en ”säkerhetsklausul”: om datorn märker att någon transistor har en spänning i det ”tomma gapet” 1 till 2 volt så räknas den som ”felaktig” och slutar användas. Även ett nysålt datorchip har ganska många felaktiga transistorer bland de där miljarderna, kan vara uppemot 50%! Det bestäms i datorchip-produktionskedjan i s.k. *Wafer testing*, som några på min forskarutbildning i fysik gav sig in på. I tävlingen att vara billigast producerar modern teknologi mycket skräp som vi inte ens märker.

En annan aspekt att transistorer kan betraktas som en lite förlegad teknologi (tänk Bardeen mot Josephson!) är att de, som man alltså hör på namnet, är resistorer. Största delen av införseln av elektrisk energi till ett datorchip går åt till önskad *värme* – i många datorer måste man som bekant använda ytterligare elektrisk energi för att driva en fläkt eller annat som blåser bort värmen och förhindrar överhettning. Problem med önskad värmeutveckling är bekanta: låt oss som typiskt exempel ta en turbin på Karlstads energi (först i Sverige med att sälja el från att bränna avfall, på 1950-talet). Turbinens fläktblad snurrar av att varm sopbränningsluft blåser igenom, och fläktens axel snurrar i en växelströmgenerator, så turbinen omvandlar värmeenergi till el. En turbin är alltså motsatsen till en resistor! En optimal turbin vore en utan inre friktion, alltså som inte värmer upp sig själv av att användas. Man säger att ju mindre *entropi* turbinen producerar desto bättre, så omgivningen inte värms upp när den är i bruk: en optimal turbin som producerar noll entropi kallas *reversibel*. I datateknik finns det en principell gräns, [Landauers princip](#), att den minsta värmeenergi ett traditionellt icke-reversibelt datorchip kan producera är 0,02 elektronvolt per operation. Dagens transistorer producerar en miljon gånger mer värmeenergi än det! Kan man göra bättre med vanliga transistorer? Enligt Moores lag tar det bara två år att lyckas fördubbla antalet transistorer på en krets. En miljon gånger är ungefär 2^{20} , så skulle alla de resurserna fokuseras på att få ner värmeförbrukningen kanske man skulle nå Landauers teoretiska gräns om 40 år. (Sådana spådomar är förstås extremt osäkra!) En del datatekniker vill redan nu bygga mer reversibla kretsar, som inte blir så varma. Det har hittills varit billigare att sätta in fläktar

än att optimera för att utveckla mindre värme, men om man vill fortsätta öka prestandan måste man antagligen någon gång byta grundteknologi. Ett stort paradigmskifte vore kvantdatorer, mer om det nedan.

Wikipedia, "MOS Technology 6502"



Wikipedia, "Solar cell"



5c. Solceller

Här kommer vi till sammanhanget där Max Planck introducerade Plancks konstant h , som är så central i kvantfysik att man idag säger att definitionen av att ett fenomen är kvantfysiskt kan vara om h dyker upp i den teoretiska beskrivningen av fenomenet. Det Planck studerade var energi-innehåll i elektromagnetisk strålning, t.ex. värmestrålning i en masugn, som man runt sekelskiftet 1900 började kunna studera med samma typ av instrument som man länge använt i astronomi: spektroskop, väsentligen prisma som delar upp ljuset i olika färger. För hög energi hos strålningen (hög frekvens: violett eller ultraviolett ljus, som att lågan i ett stearinljus är blå längst in) verkade det innan Plancks insikt finnas *oändligt* med energi i de högre frekvenserna, men det måste vara fel. Problemet kallades i klassisk fysik Rayleigh-Jeans-katastrofen. Det Planck bedrev var inget mindre än fenomenologi: om strålningen bara fanns i diskreta "paket" (energikvanta) skulle det lösa problemet, för om varje litet energipaket i sig har stor energi vid hög frekvens så finns det vid en viss temperatur för lite total energi tillgänglig i en värmereservoar (t.ex. masugnen som innehåller värmestrålning) för att särskilt många paket skall kunna existera. Det konstiga i den här historien för oss idag är att Planck kände sig nödgad att poängtera att de här energipaketerna av ljus var matematiska fiktioner som inte finns i verkligheten, trots att experimentresultaten gav tydliga indikationer att verkligheten uppför sig på det sättet. Det var en lång men professionell tvist mellan Einstein och Planck, och Planck undlät inte ens att nämna det i sin egen rekommendation att välja in Einstein i preussiska akademien: "*att han ibland skjutit över målet med sina spekulationer, till exempel med ljuskvanta-hypotesen, bör inte räknas emot honom alltför mycket*", s. 100 i Einstein-biografen.

En intressant aspekt av solceller är att den fotovoltaiska effekten, att en foton absorberas av en elektron i valensbandet och tar upp den i ledningsbandet, upptäcktes *före* den fotoelektriska effekten som Einstein diskuterade i sin artikel från 1905. Men eftersom för lite var känt i materialfysik var det svårt att göra en kvantitativ teori för det då. Med bandteori går det att förstå varför vissa halvledare lämpar sig väl som solceller, och varför kisel är ganska bra men inte perfekt. Avvikelsen från en perfekt solcell kvantifieras av Shockley-Queisser-gränsen som jag tar upp i mina anteckningar om solceller: även en perfekt solcell av kisel kan som bäst konvertera drygt 30% av inkommande solenergi till elektrisk ström. Ett problem är just att kvantfysik är ganska omutbart: avståndet mellan ledningsbandet och valensbandet (se 5a ovan) kallas *bandgapet*, den "klyfta" som elektronen måste överbrygga i sitt kvanthopp för att leda ström. I kisel är bandgapet runt 1 eV, och mycket av solenergin är för låg energi för att kunna slå upp så högt. Faktum är att tittar man på en bit kisel med en infraröd kamera ser man rakt igenom den. För att göra bättre skulle man t.ex. kunna kombinera en kiselcell med andra material, en s.k. tandemsolcell, som är föremål för aktiv forskning. Man kan också tänka sig mer komplicerade molekyler, vi har forskning här på KaU på solceller av organiska material som t.ex. kan ge böjliga solceller som kan vara bra för vissa tillämpningar, t.ex. att ha dem på kläder.

Boken *Crystal Fire* [24] utgår bl.a. från intervjuer med Bardeen. Wilson tänkte sig först att de måste tunnla genom, men som t.ex. Mott förklarade senare, termisk energi räcker så de inte behöver tunnla ([3],s.86). Det var Ohl som upptäckte att det relativt rena kisel de började kunna framställa "av sig själv" blev två olika sorter som de grupperade utifrån "strömriktning relativt en punktkontakt": de kallade dem p-typ och n-typ. De visste inget om kvasipartiklar eller hål, beskrivningen var alltså helt fenomenologisk (makroskopisk mätning). Forskarna märkte att n-typ luktade (!) lite annorlunda: "*By their noses they were detecting concentrations of phosphorus way below the spectroscopic limit*" skrev en. De valde att fokusera på kisel och germanium, som verkade enklast att förstå (s.125), istället för kopparoxid och selen, som ofta användes i tillämpningar innan dess. Det kan man ta som ett tydligt tecken på grundforskning: man är inte rädd att tillfälligt göra något som verkar sänka tillämpligheten för att förstå bättre. Bardeen åkte till England och berättade för ovan nämnde Mott om sin kvantmekaniska teori för tillstånd på ytan av en halvledare. "*The key to the discovery was the recognition that quantum-mechanical entities – the holes – had a crucial role to play in carrying electric current near a semiconductor surface. A classical understanding of how this material behaved would not have sufficed.*" (s.141)

Det verkar passande att avsluta med ett längre citat ur den boken, om just hur man går från fenomenologi av pn-övergångar (som Ohl ovan) till en övergripande teori hur man skall göra och hur man räknar på det: ”In 1949 Pearson and Bardeen published a comprehensive paper on the role of donor and acceptor elements in relation to P and N-type semiconductors. [...] elements in Group III such as boron [...] give defect or P-type conductivity. Elements in Group V such as phosphorus [...] give excess or N-type conductivity. X-ray crystallography was used to show that the Group III and V impurities did occupy the silicon positions in the crystal lattice. A Group V element has one more electron than required to bond with the adjacent silicon atoms and is only weakly bound. This is [...] of the order of 0.1 eV. This means that at room temperature most of the impurity atoms are thermally ionised and their associated electrons are in the conduction band. These ideas were first set out by Alan Wilson in 1931.” [3]. Man gjorde alltså utifrån en stor mängd mindre experiment kvalificerade gissningar som sedan uttryckligen bekräftades i experiment, i synnerhet kristallografi med röntgenstrålar, ungefär samma princip som i diffraktionsröret vi diskuterat.

Samme Pearson som skrev med Bardeen skrev 1954 en artikel som ledde till New York Times framsida: “Vast Power of the Sun Is Tapped by Battery Using Sand Ingredient”

5d. Kärnkraft och kärnvapen

Börja med att se Video 5a och 5b på [videolistan](#) om du inte har gjort det. Man kan tycka att kärnkraft och kärnvapen av etiska skäl inte borde nämnas i samma andetag, men från ett historiskt perspektiv är det omöjligt: den amerikanska kärnreaktorn (Fermi) och Hitlers kärnreaktor (Heisenberg) utvecklades bägge som ett led i produktion av atombomber. Många av de stora fysikerna vi diskuterar har sin historia djupt sammankopplad med kärnvapen, även tidigare kvantfysiker som Bohr, till senare som Feynman och Bethe. Man kan genast ifrågasätta om det börjar låta som att läraren undervisa studenter i kärnvapenteknik, men det lilla som står här är offentlig information, och en del av den relaterade forskningen i Sverige, t.ex. på FOI, handlar om hur man hanterar farliga situationer som uppstår när någon annan har använt kärnvapen, kompetens som vi knappast vill vara helt utan.

En fysikfråga som är relevant för både kärnreaktorn och kärnvapen är: hur klyver man effektivt uran? Fermi klyvde uran med neutroner, som det står i Fermi-biografen, och neutronerna fick han precis som Hahn-Strassmann några år senare från en blandning av radium eller radon och beryllium. Den blandningen skickar naturligt ut neutroner, och Fermis poäng var att neutroner har lättare att ta sig in i atomkärnor än alfapartiklar, för alfapartiklar är plusladdade liksom atomkärnan själv och repelleras sålunda. Men de här ”naturliga” neutronerna visar sig vara för snabba för att effektivt klyva uran. Både varför neutronerna bör vara långsamma och hur man saktar ned dem förklaras i Fermi-biografen. Jag skrev att de ”bör” vara långsamma för huruvida det behövs beror också på vad uran-preparatet består av för olika isotoper av uran. Naturligt uran ur berggrunden – det finns en fyndighet vid Skövde, som skulle grävas ut i Ranstadsgruvan – består av varianter som alla har samma antal protoner (92 st, annars heter de inte uran) men olika många neutroner i atomkärnan, t.ex. uran-238 (238 – 92 = 146 neutroner) kontra uran-235 med tre neutroner färre. Det diskuteras i detalj i Rhodes bok (utdrag om Bohr). Det var uran-235 som användes i bomben ”Little Boy” som släpptes på Hiroshima 1945. Runt ett kilogram uran-235 genomgick kärnfission, och förstörelsen från det uppskattas till över 2000 ton (2 miljoner kg) av konventionella bomber. Det stämmer väl med våra uppskattningar att kärnfysik handlar om mega-elektronvolt medan atomfysik (och därmed kemi) handlar om elektronvolt, de skiljer sig med en faktor en miljon.

Ett historiskt dokument med första uträkningen är av Peierls (Heisenbergs assistent när han var i Leipzig, som då hade flytt Hitler till England) i mars 1940 som säger att man behöver 1 kg U-235 [21] om man använder snabba neutroner, utifrån Bohrs artikel 1939. Heisenberg sade enligt Cassidy ”stor som en ananas” som också dramatiseras i norska TV-serien Kampen om tungvattnet.

En ödets ironi i den historien är att Fermi själv missförstod vad som hade hänt i deras tidiga experiment i Rom (1932). Han trodde de skapat nya grundämnen nr 93 och 94 och gav dem t.o.m. [namn](#), som man senare fick ta tillbaka. Nobelpriset han fick för det tog man med rätta inte tillbaka, för metoden var ytterst värdefull även om det var några år före sin tid, så Fermi kunde inte rimligen förstå resultaten förrän framåt 1938.

Vätebomben representerar det som kom senare (Rhodes har en annan bok om den: ”Dark Sun”), och kärnkrafts-motsvarigheten till vätebomben vore kärnfusionsreaktor, som ITER som är under byggnation i Sydfrankrike och beskrivs ovan under Kvanttunnling.

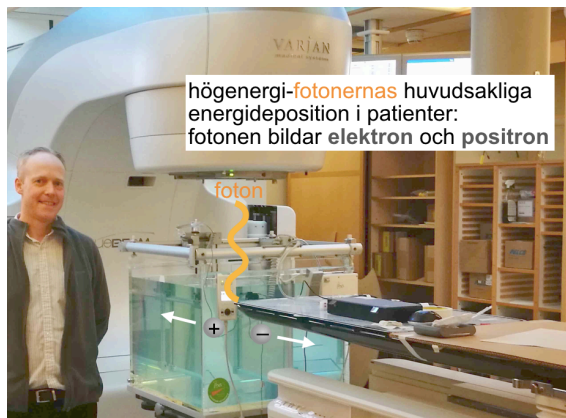
För den som är intresserad av kärnkraft i svensk politik, läs gärna Energiöverenskommelsen från 2016 på regeringen.se. I mer global politik får Sverige bra betyg på FN:s [globala klimatmål](#) (särskilt mål 7, ren energi) delvis tack vare vår kärnkraft, som visar hur komplex energifrågan är: för några år sedan skulle kärnkraft inte ha hamnat på särskilt många listor om mål för en bättre global miljö. Men KaU-fysikforskare som [Markus Rinio](#) propagerar för att vi skulle kunna ha upp till 50% solenergi i Sverige, och då skulle vi i princip kunna avveckla kärnkraften. I vilket fall som helst är det väl viktigt för alla moderna samhällen att medborgarna är hyfsat informerade om utmaningar som samhället står inför, som frågan om energiförsörjning, och känner man inte till något alls om hur kärnkraft fungerar är det nog svårt att kunna ha en informerad åsikt om huruvida vi skall ha det eller inte.

5e. Medicinsk strålningsfysik och MR-kameran

Det snabbaste sättet att konkret illustrera de två forskningsområdena inom medicinsk fysik är med två kort från ett par projekt [26,27] jag har handlett med sjukhusfysiker. I cancerbehandling produceras högenergifotoner (mega-elektrovolt) som i sin tur ger upphov till elektron-positron-par, på samma sätt som i ”summan över historier” i början av den här texten. I den stora runda vita spolen på kortet i MR-kameran löper en supra-ledande ström



(det som Kivelson kallar ”makroskopiskt kvanttillstånd” eller ”Schrödingers katt”), och inre spolar kommunicerar med proton-spinn i patientens kropp. Mer detaljer har jag i två anteckningssamlingar för vidarestudier om medicinsk strålningsfysik och MR-fysik på min [kursmaterial-sida](#). Bläddra gärna igenom dem, de är nägot för avancerade för en allmän kurs.



cancerbehandling, Karlstads centralsjukhus

5f. Kvantdatorer.

Som datavetaren Scott Aaronson ofta skriver på sin [blogg](#): kvantdatorer löser *inte* problem genom att prova alla möjligheter samtidigt! (Det hör man ibland i populärvetenskapen.) Däremot kan summan av historier utnyttjas för att processa information på ett sätt som är kvantifierbart mer effektivt än klassiska datorer som använder spänning 0 eller 1: kvantdatorer använder hela sannolikhetsamplituden a , som alltså är ett tal som kan vara vad som helst, i synnerhet är det inte begränsat till bara 0 eller 1. Teoretiska argument visar att en kvantdator därigenom skulle kunna göra vissa uppgifter på överkomlig tid som det tar en vanlig dator längre än universums ålder att utföra. (Mer precist för datorexpert: nuvarande forskning påstår att praktiskt intressanta algoritmer som kryptering är [BQP](#) men kanske inte P, dvs. tiden det tar att utföra algoritmen på en vanlig dator är mer än en potens av antalet tecken i input.) Google tog sig förbi den gränsen i oktober 2019, beskrivet i en forskningsartikel som förut nämnde Aaronson var expertgranskare för, som han går igenom på sin blogg [7]. Med alla pengar som pumpas in hoppas man ha kanske en kvant-kilobyte (K) om 10 år.

Kvantdatorer är en naturlig fortsättning på den utveckling jag beskrev ovan för transistor, som blir mindre och mindre och får större och större problem att det både blir trängre mellan elledningarna, och mer värme som utvecklas. Om man använder t.ex. en supraledande ledning istället för en vanlig, så är det noll resistans, och därför ingen värmeutveckling alls. Det är en bra början i princip, men med de supraledande material vi har idag går det åt mer energi att kyla ned ledningen under -200 °C än det man tjänar rent ström-mässigt på att ha noll resistans! Det finns å andra sidan ingen fysikalisk princip som hindrar att hitta nya kombinationer av material som blir supraledande vid högre temperatur: rekordet är f.n. småmysiga -135 °C , så

en snabb extrapolering ger vid handen att vi borde ha hittat supraledare vid rumstemperatur om 100 år! Eller mindre eftersom mer resurser används för det nu än förr. Och när man väl har supraledning kan man ju lika väl använda den tidigare omnämnda stora kollektiva vägen av elektroner istället för enskilda elektroner. I Googles första kvantdatorchip (nedan) är det supraledande safir (aluminiumoxid) där kollektivvägen tunnlar mellan barriärer och utgör en kvantbit (eng. *qubit*), som alltså pålitligt skall representera vilket tal som helst, och kunna adderas som hela vågor adderas, istället för att bara addera 0 och 1. Wallenberg har nyligen startat [WACQT](#), ett kvantdator-forskningscentrum på Chalmers för en miljard kronor, med kvantchipet i den vita kylan till höger.

En fråga är: vill vi ha kvantdatorer? En naturlig konsekvens vore t.ex. att många standardkrypteringar liknande BankID måste göras om eftersom de snabbt knäcks av kvantdatorer, så några datasäkerhetsexperter gör sig redan beredda [8]. Men att därför vägra utveckla dem är nog direkt riskabelt: man lämnar det då till icke-offentlig verksamhet och skummare aktörer som satsar på sådant.

6. Filosofi.

Det är också en intressant historia i Cassidy hur Heisenberg som ung revolterar mot en bild i en lärobok av atomer med ringar och stålpinnar som representerar bindningar. Heisenberg försökte göra kvantfysiken åskådlig (*anschaulich*), eftersom ordet var med i **titeln** på hans artikel om obestämdhetsrelationen [3]. Ur Stanford-encyklopedin [2]:

”Why was this issue of the Anschaulichkeit of quantum mechanics such a prominent concern to Heisenberg? [...] His leading idea was that only those quantities that are in principle observable should play a role in the theory, and that all attempts to form a picture of what goes on inside the atom should be avoided. In atomic physics the observational data were obtained from spectroscopy and associated with atomic transitions.

I believe that one can formulate the emergence of the classical “path” of a particle succinctly as follows: the “path” comes into being only because we observe it. (Heisenberg 1927: 185)

Det här går tillbaka på Paulis ”mörka punkt” som Heisenberg var entusiastisk kring ([1] s.165). Citatet ovan låter som att elektronen *inte tar någon väg alls* mellan två punkter A och B om man inte observerar den mellan A och B. Men det låter otillfredsställande, lite som att undvika frågan, vilket kanske ytterst har att göra med att uttrycket ”ta en väg” är klassiskt och bygger på ”lokal realism”: att mätningar av position i klassisk fysik inte har något inflytande på den ontologiska situationen (vad som ”egentligen finns”): om jag kör bil från Karlstad till Umeå tar jag en viss väg oavsett om jag mäter min position med GPS eller ej. Så det enda Heisenberg egentligen säger 1927 är att man bara inte kan uttala sig säkert om vilken väg en elektron tar mellan A och B när man inte uppmätt var den är däremellan, och att man (precis som i hans ursprungliga argument från 1925) inte borde bygga in alltför konkret i sina uträkningar det man inte kan uttala sig om.

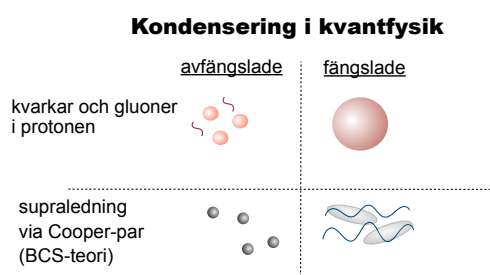
Unga Heisenberg som ogillar naiva visuella representationer är ganska konsekvent med äldre Heisenberg som säger att vägen inte ”finns” i sig, för om man är ute efter visuella representationer men bara klassiska sådana finns att tillgå, då tager man vad man haver. Bohrs komplementaritet är ett användbart koncept: olika klassiska representationer kan hjälpa med olika aspekter av en frågeställning, och en skiss som fokuserar på en viss aspekt gör ofta en annan aspekt grumligare, så ingen enskild klassisk representation är allmängiltig. (Rhodes kapitel om Bohr heter ”*Tvi*”, som i ”tvetydighet”. Det ordet används ofta negativt på svenska, jag vet inte hur det är på danska.)

Heisenberg skrev i ett personligt brev: ”Det Schrödinger skrev om sin *anschaulichkeit* tycker jag är *mist*”. (Mina tyska kollegor använder gärna ordet ”*mist*”, det betyder ungefär ”skitsnack”, kanske något svagare, på Stanford-encyklopedin föreslår de ”*bullshit*”.) Man kan å ena sidan misstänka att det som Cassidy skriver om med att Schrödinger plötsligt hade lättare att få fina jobb i Tyskland påverkade Heisenbergs syn på Schrödinger, å andra sidan hade Heisenberg så här i efterhand definitivt rätt att Schrödinger själv inte förstod sin vågfunktion och på grund av sina egna missuppfattningar överdrev hur *anschaulich* vågfunktionen egentligen är. Det kan verka underligt att en upphovsman grundligen missförstår sin egen skapelse, men det är i själva verket vanligt i fysik: ett annat relevant exempel är Diracs syn på ekvationen som bär hans namn. Weinberg diskuterar ”hårda” och ”mjuka” delar av teorier, där han med hård menar som hos fossil, alltså benbitar som blir kvar när mjukdelar multnat bort. Både Diracs och Schrödingers ekvationer är benbitar som är kvar, men deras egna tolkningar multnade bort under vidare granskning. Det är däremot inte alltid så, t.ex. Einsteins ekvation för gravitationsfältet betraktas idag åtminstone ur grundläggande synpunkt ganska precis som Einstein såg den. (Däremot gav han själv på äldre dagar upp argumentationsvägen hur kan kom dit, som delvis var utifrån Machs filosofi. Men jag försöker hålla mig borta från relativitetsteori här, så mycket det går.)

Diskussionen om matematisk precision på Stanford-encyklopedin är också intressant, men jag väljer att inte ta upp den på föreläsningarna, för matematik är inte fokus här, och matematisk precision spelar överraskande liten roll! Med "överraskande" menar jag att man skulle kunna tro att eftersom fysik formuleras i matematiska termer är matematisk precision det enda vi har att hänga upp allting på, så all fysik borde bli mer och mer precist formulerade matematiska axiom. Men så fungerar fysikforskning inte alls. Här gillar jag följande citat av en fysiker jag diskuterade med i Santa Barbara, Joe Polchinski: "...my own misspent youth. I used to focus too much on rigor and formalism, and have become a much more creative and productive scientist since learning, very slowly, to see through these to the physics", från en [bloggdiskussion](#) 2007.

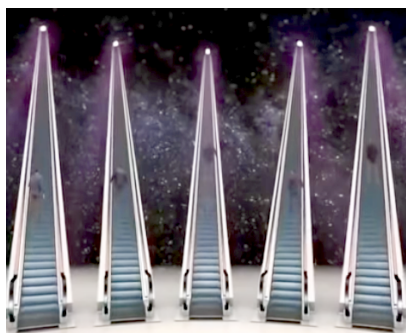
Är obestämdhetsrelationerna "grundprincipen" i kvantfysik? [34] Popper tycker inte det, men enligt encyklopedin har Popper missat poängen (*misses the point*), och de anför Einstein som mot-auktoritet, med det trevliga exemplet evighetsmaskin som empiriskt motiverad idé (i sig ändå abstrakt!) och entropins ökande som slutgiltig "princip". I kvantfysik skulle "principen" alltså kunna ses som att observerbara storheter beskrivs av matriser A och B , som inte måste kommutera ($AB \neq BA$). Det är väsentligen en av de fyra mer matematiska principerna som också Susskind listar i sin bok. Är du intresserad av andra saker Popper skrev om kvantfysik som missar poängen (!) så konsultera David Mermins kanske överkritiska "recension" av Poppers bok i Mermins essäsamling [19]. I korthet argumenterar Popper, enligt Mermin, att

sannolikhetslära har vissa egenskaper, men i kvantfysik är en viktig poäng att man tvingas till att arbeta med sannolikhetsamplituder α (som kan vara negativa) istället för bara sannolikheter P i procent. Det är inte så konstigt att icke-fysiker som Popper missar poängen i fysik, men det är intressant att de "felaktiga" argumenten sedan i efterhand ändå är intressanta att ta upp i en sådan här diskussion i fysik, för de gör det åtminstone tydligt vad man skulle behöva lära sig för att verkligen förstå: man måste förstå lite om α .



En mer konkret filosofisk fråga som fysiker faktiskt diskuterar är ovan nämnda *reduktionism* kontra *emergens*. Ett exempel är att man säger att protonen består av tre kvarkar, men ingen har någonsin observerat en fri kvark. Det gör dem inte mindre "verkliga" eftersom man kan räkna ut hur protonen uppför sig vid mycket hög energi från en modell av tre kvarkar, och det stämmer mycket väl med partikeldetektor-mätningar. Tänk dig en ihopknuten säck med tre metallkuler: du kan sluta dig till ungefär vad som är i säcken och hur mycket kulorna väger från hur säcken rör sig om du kastar den några gånger, utan att någonsin öppna säcken. En mer trängande fråga är vid låg energi, det är t.ex. inte känt i kärnfysik exakt hur man räknar ut "tvåpuckel-kurvan" av sönderfallsprodukter från uran (Video 5b i [listan](#)) från grundprinciper, ytterst för att det inte är känt exakt hur kvarkarna och gluonerna är fångslade inne i protonen. För att verkligen förstå det skulle man behöva en teori som beskriver hur kvarkarna i det tidiga universum ursprungligen fångslades i protonerna, och det är inte riktigt klart ännu.

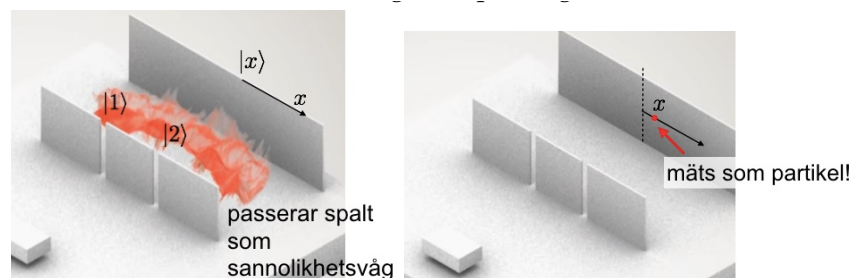
Någon kan tycka att emergens i materialfysik (se Andersons essä "More is Different"), i t.ex. supraledare, inte alls verkar hänga ihop med ovanstående djupa frågor om fångsling i kärnfysik. Men det intressanta för en partikelfysiker är att den fångslade teorin är den svåra i partikelfysik, men den *lätta* i materialfysik, för det är i de enklaste fallen BCS-teori som alltså klarnade på 1950-talet. Frågan i materialfysik är snarare hur beståndsdelarna, elektronerna, beter sig i supraledare. Några fysiker som Shankar spekulerar i att snärjelse kanske spelar större roll i en framtida teori för högttemperatur-supraledare än det gjorde i de först upptäckta supraledande materialen, t.ex. supraledande legeringar av grundämnet niob, som de som används i MR-kameran, eller supraledande aluminium som i kvantdatorchipsen.



Deutsch skriver att världstolkningen (MWI) [35] hjälper att förstå kvantdatorer. Vad betyder då mångvärldstolkningen? I bilden till vänster [23] åker Brian Greene rulltrappa från mikro-världen till vår vanliga värld. I "Köpenhamns-tolkningen" försvinner de andra rulltrapporna med de andra Brian på vägen. Men i MWI fattas inget beslut vilken av världarna som är vår (ingen "kollaps"). Det skulle motsvara att lösningen på "mysteriet" i dubbelspaltexperimentet är att när elektronen mäts på en viss punkt på skärmen så har den i ena världen gått igenom ena spalten till den punkten och i andra världen genom andra spalten, och interferens uppstår i summan över historier. Det löser på ett sätt problemen som uppstår att kollaps är icke-lokal. Som Martin Cederwall sade på vår debatt 2020: "Man insisterar att det skall finnas ett icke-unitärt element,

då har man konstruerat sig ett problem som man inte behöver”. Sedan vid 20:50: ”Köpenhamns-tolkningen är också jätteflummig, den inför någon sorts besynnerlig process som man inte kan beskriva när och varför den händer, men man vet att den är icke-unitär [...] man kallar det för tolkning, men man insisterar på att det de facto ska hända saker som man inte har en aning om hur man beskriver.”

Med ”icke-unitär” menar Cederwall just ”kollaps” av vågfunktionen (amplituderna) till ett visst läge, så elektronen efter mätning plötsligt befinner sig vid en viss plats på skärmen i dubbelspaltexperimentet, som i videon till höger från toutestquantique.org. Då ”vet” alla andra delar av skärmen att elektronen inte är där, trots att ingen ”signal” kan ha hunnit dit från x . Einstein tog upp det som ett problem i ”rond 1” (1927) av Einstein-Bohr-debatten [33], s.212.



Einstein introducerade t.o.m. 1927 vad vi idag skulle kalla en ”teori för gömda variabler” [37], där extra variabler håller reda på mer information än obestämdhetsrelationerna tillåter, men tog tillbaka den innan den hann publiceras. ”*We believe however that such a theory [“a complete description of the physical reality”] is possible*”: after 1927 Einstein regarded the hidden variables project — the project of developing a more complete theory by starting with the existing quantum theory and adding things, like trajectories or real states — an improbable route to that goal.”. Den typen av teori har sedan återupptäckts många gånger, kanske mest kända är den s.k. Bohm-teorin, efter den amerikanske fysikern David Bohm. Ej att förväxla med (och för oss betydligt mindre viktig än) dansken Niels Bohr eller tysken Max Born! Det EPR-(Bell)-test-experimenten som diskuteras ovan utesluter lokala gömda variabler. Bohms teori är mycket riktigt icke-lokal: varje partikels hastighet beror på varje annan partikels hastighet. De som känner någon olust inför den icke-lokalitet som ur klassiskt perspektiv tycks uppstå i kvantfysik är knappast trygga med den definitiva klassiska icke-lokaliteten i Bohms teori. Det verkar vara därför som Einstein bedömde gömda variabler som oframkomlig väg.

”Kollaps”-beskrivningen som är vanlig i kursböcker är egentligen en ganska ”extrem” eller ”tidig” Köpenhamns-tolkning, som man kan tillskriva Bohr och senare matematikern von Neumann, då ingenting ”finns” innan man har mätt det, och det är en skarp separation mellan kvantfysik-system och den klassiska personen som mäter. Heisenberg ändrar sig under tidens gång hur man skall tänka på det: ”*an ever-increasing renunciation of classical realism [...] Instead, the old separation of the observer from the observed had become increasingly blurred*” [1], s.182, i en bok från 1958. Heisenberg motsätter sig på äldre dagar lite grand ordet ”tolkning” överhuvudtaget: ”*man kan till och med säga att det inte alls rör sig om motförslag till Köpenhamns-tolkningen utan om exakta upprepningar av den, fast i andra ordalag*” [8], min översättning. (En argumentations-strategi som jag skulle kalla ”absorbbera motståndarna”!) Och han har rätt att kvantfysik som det är beskriver all experimentdata som finns, det är enorma mängder mätdata. Att ”tolka” kvantfysik låter som att man måste tillföra något viktigt, men huruvida ovan diskuterade detaljer i mätprocessen är ”viktiga” är smaksak. Det handlar isåfall om ontologi (huruvida något ”finns”, vad det nu betyder): om sannolikhetsvågen inte ”finns” innan man mäter den (att den inte är ”verklig”) så gör det kanske inget om den är på Mars eller Jupiter. Icke-lokaliteten är då inte heller verklig. Jürgen Fuchs menade i Paneldebatt 1 att han som fysiker inte behöver befatta sig med filosofi. Det verkar som en legitim ståndpunkt för en fysiker.

Var står då jag (Marcus)? Jag är dewittsk, dvs. jag tror som min handledares man Bryce DeWitt att det inte behövs någon tolkning, för kvantmekaniken är klar nog: ”...*let the formalism speak for itself*” [37], s.144. Heisenberg-bilden och Schrödinger-bilden är överens på den punkten: kvantfysikens mekaniska ekvationer är ”försiktiga” (unitära). Bohrs Köpenhamns-tolkning introducerar icke-unitär (”våldsam”) kollaps, som i dubbelspaltexperimentet ovan. Mer allmänt, det som kollapsar är matriser till ett *egenvärde*, enligt min video ”[Matriser i kvantfysik](#)”, eller en sannolikhetsamplitud till en vanlig sannolikhet i procent, som aldrig kan vara negativ. Vi tappar information, och det skapar i sig problem som vi inte behöver. Inbitna Köpenhamns-tolkare säger att jag bara har ”skjutit upp problemet”: mätprocessen är enligt Bohr inte ”färdig” förrän kollaps har inträffat. Jag med min så kallade försiktiga MWI har då varit så försiktig att jag inte mätt någonting. Men för mig representerar ordet ”färdig” en syn på mätprocessen som ignorerar hur man faktiskt mäter saker i laboratorier.

Från mitt perspektiv är ”färdig mätning” snarare en flytande gräns som experimentalfysikerna specificerar som ”kvalitetskrav” – 70% dekoherent? 99% dekoherent? Dekoherens betyder här att de bräckliga kvantamplituderna ”suddas ut” av smuts och värme i experimenten. Man kan *mäta* i dubbelspaltexperimentet med låg intensitet hur smutsigt det är: i verkligheten kan t.ex. luftmolekyler studsas mot elektronerna och suddas ut ränderna, ner till en känslighetsgräns hos utrustningen som kallas ”interferometrisk synlighet”: förhållandet mellan ljusaste och mörkaste delen på skärmen. Ett försök att få ja/nej-svar på ”färdig mätning?” oberoende av kvalitetskrav verkar därför meningslöst att göra objektivt eller allmängiltigt i fysik, på samma sätt som ”noggrann” inte hade någon objektiv, allmängiltig definition i klassisk fysik: precision ± 1 centimeter? ± 1 nanometer? Du väljer. (Ett bra experiment har tydligt specificerade kvalitetskrav, men det ligger inget särskilt djupt filosofiskt i det i sig.) Det här är särskilt relevant för ”del-mätningar”, som i Weinfurters experiment. När man samlar in del-information om ett kvantsystem kan man bevara en del av kvant-informationen. Är en del-mätning en mätning enligt Bohr? Det verkar omöjligt att besvara, eftersom Bohr aldrig fick se de här nyare experimenten.

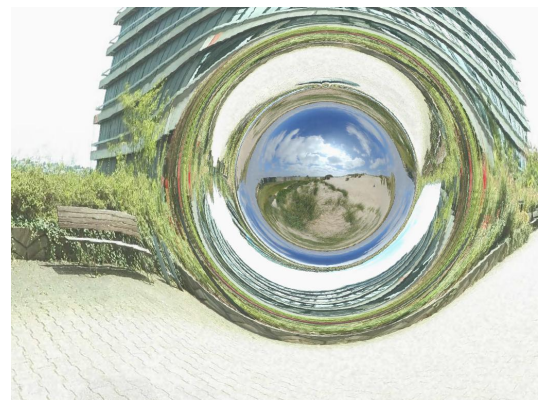
För att koppla ihop det med ovanstående diskussion av emergens: har du t.ex. sett Sean Carroll berätta om sin bok [15] (som jag inte särskilt rekommenderar, men det hjälper mitt argument här!) säger Carroll att förgreningen av universums vågfunktion till många världar i sig är emergent. Förgreningen finns isåfall bara om man betraktar den från ett visst perspektiv. Å andra sidan säger han att rumtiden själv är emergent, och därkring finns ingen konsensus i forskningsvärlden, eller experiment som direkt skulle kunna testa det påståendet. Carroll tillskriver som mycket av populärvetenskapen MWI specifikt till en som hette Hugh Everett. Men Everett hann aldrig specificera sina idéer så väl, eftersom han slutade med fysik direkt efter doktorsavhandlingen. Everetts handledare John Wheeler var antagligen källan till de här idéerna. Wheeler nämns i Cassidy i samband med Bohr-Wheelers fissionsteori (och vidare i Rhodes bok). Wheeler samarbetade nära med Bryce DeWitt: det var t.ex. Wheeler som ordnade att paret DeWitt flyttade till North Carolina, som i sig är en underhållande historia [39]. DeWitt säger [38] att Wheeler beskriver det som: *”I sat down with Everett and told him what to say”* och att förklaringen att Wheeler själv inte publicerade det var *”It was anti-Copenhagen; Bohr was one of Wheeler's heroes [...] he has refused to have anything to do with it in all the years since”*.

I memoarerna står att läsa: *”In my opinion the views of both Everett and myself lie somewhere between realism and Platonic idealism. We both believe in the “reality” of the many worlds but we also believe that ultimately the abstract idea, theory, wave function, or ideal form behind it all is the true reality.”* [39], s.97.

Resterande sektioner handlar om forskningsfronten, så det blir oundvikligen klart mer osäkert än tidigare.

Okänt 1. Är kvantsambanden maskhål?

Einstein skrev efter EPR en till artikel med författaren ”R” 1935, om maskhål (eng. *wormholes*) i rumtiden, som kan fungera som portaler mellan olika delar av ett visst universum. Det verkar leda till att rumtiden kan ha slutna tidslika kurvor, dvs. *tidsmaskiner!* Rum och tid är ju närbesläktade i Einsteins relativitetsteori, så om ett maskhål kopplar ihop två olika ställen i rymden så kan man bli väldigt orolig att de isåfall också kopplar ihop två olika ställen i *tiden*. Fysikens lagar klarar såvitt vi vet inte av tidsresor. Men det är inte så att fysikens lagar *förbjuder* tidsresor, med ”klarar av” menar jag att ingen vet hur man skall jobba med fysikens lagar i den situationen: hur kan man lita på laboratorie-experiment om någon efter experimentet är slutfört åker tillbaka i tiden och fiffjar med den ursprungliga uppställningen och inte talar om det? Det matematiska uttrycket för att fysik inte klarar av tidsmaskiner är ”initialvillkorsproblemet blir odefinierat”.



Simulering av maskhål till fransk strand. Praktiskt ifall man känner för ett dopp. Från [spacetime travel](#).

Einstein trodde först att hans ekvationer uteslöt tidsmaskiner, men Gödel visade tydligt att det inte var fallet. ER-artikeln från 1935 introducerar Einstein-Rosens brygga, ett maskhål som lösning till Einsteins ekvationer. Det visade sig att maskhål kräver negativ energi för att vara stabilt, och i klassisk fysik finns ingen negativ energi, så det kanske tog kål på maskhålerna. Men maskhål har en tendens att komma tillbaka, som i en riktig publicerad fysikartikel med namnet *”Return of the Giant Wormholes”* från 1989.

En uppenbar fråga är nu: om det finns negativ energi i kvantfysik, och kvantfysik beskrivs av summan över historier, tänk om man kan kommunicera mellan olika möjliga historier med hjälp av maskhål? Det var en i övrigt oproduktiv fysiker som hette Everett som tillsammans med min handledares man Bryce DeWitt propresenterade för tolkningen av historierna i kvantfysik som ”olika världar” (eng. *many-worlds interpretation*, MWI ovan): inget mindre än parallella universa. En science-fantasy-bok *Anathem* av Neal Stephenson utforskar det i detalj. Joe Polchinski, tidigare nämnd fysiker i Santa Barbara, införde konceptet ”Everett-telefonen”: om de olika världarna skall kommunicera måste kvantfysik modifieras – vilket ingen hittills inte hittat några tecken på. Ett maskhål som tillåter sådan kommunikation kallas ett ”genomresbart” (eng. *traversable*) maskhål. Den kanske mest framgångsrike nu levande teoretiske fysikern, Juan Maldacena på Princeton, hade en idé tillsammans med Susskind på Stanford: ER = EPR? Det vill säga, kanske Einsteins två olika forskningsartiklar från 1935 beskrev samma sak, kanske är sambandet mellan kvantpartiklar att de är ihopkopplade med maskhål? Det vore ett underfundigt sätt att komma undan undantaget om svag påverkan som experiment verkade ha uteslutit: påverkan skulle inte vara mellan två punkter i vårt universum, utan gå via ett litet, litet maskhål till ett annat parallellt universum. Det låter som ren science fiction, och kanske är det helt fel, men det är alltså seriösa fysiker som föreslår det. Idén är heller inte helt ny, liknande tankar går tillbaka i alla fall till Everetts handledare Wheeler på Princeton.



Hittills är ”ER = EPR” ytterst spekulativt eftersom maskhål enligt gängse teori alltså fortfarande kräver negativ energi för att gå att resa igenom (stabiliseras). Maldacena kom på en möjlig lösning på det i juli 2018: tag teorierna för supraledare och låt det som finns på ytan stå till tjänst med negativ energi. Idéer om vad som finns på ytan av en ledare, både en supraledare och en vanlig ledare, går tillbaka via Josephson till Bardeen och ännu tidigare till Ettore (Hektor) Majorana (t.v.). Han var doktorand hos Fermi i Rom, och försvann under mystiska omständigheter 1938. Så kallade *Majorana-partiklar* kan ha upptäckts [40].

Okänt 2. Holografi: kan kvantfysik beskrivas med svarta hål?

Samma Maldacena som ovan är mest känd för *holografi*: att teorin för stark kärnkraft kanske kan ersättas av en (sträng-)teori för gravitation. Brian Greene har en fin bit om det i sin dokumentär *Fabric of the Cosmos*. Ursprungliga motiveringen till den teorin är fångslings-frågan ovan om hur atomkärnor håller ihop: det måste vara någon slags extra ”lim” mellan kärnpartiklarna, eftersom de inte attraherar varandra elektriskt. Det finns [en miljon dollar i pris](#) till den som löser det, genom att räkna ut massan hos en limboll (eng. *glueball*). Jag och några tyska kollegor har några idéer om det [12]. Precis som de flesta idéer om okända saker är de antagligen fel. Men den första av våra två artiklar har i alla fall charmen att det kanske är enda artikeln publicerad i forskningstidskriften *Nuclear Physics* som nämner namnet *Earendil*.

Maldacenas holografi, som verkar väldigt abstrakt, visar sig ha nära samband med accepterade och beprövade aspekter av materialfysik! Några stödord för den intresserade att leta vidare är *Bulk/boundary correspondence* och *Kramers-Wannier-dualitet* som bl.a. Jürgen Fuchs här på KaU har forskat om. Det är relaterat till ovanstående: Majoranas fermioner ”bor” tydligen på ytan av nya sorts supraledare, och de har en gravitationell beskrivning som maskhål i *extra dimensioner* enligt idén om holografi [11]. Extra dimensioner låter minst lika spekulativa som parallella universa (i flervärlds-bemärkelse) men är betydligt lättare att förstå, för extra dimensioner kan vara helt klassiska, och alltså beskrivas av Einsteins etablerade gravitationsteori. Man kan leta sådana t.ex. med partikelacceleratorer (det är roligt att läsa om seriösa experiment med titeln ”[Continuing the search for extra dimensions](#)”). Hittills har ingen hittat någon extra dimension, annars skulle du nog ha hört om det!

En paneldebatt [Is Time Travel Possible?](#) modererad av Veritasium-killen kan vara en bra introduktion för den som är intresserad av sådana frågor. För modern forskning kring snärjelse gillar jag idén av en [snärjelse-tsunami](#), som inte riktigt är en våg, mer av en ”icke-lokal våg”. Det börjar luckras upp lite att tillåta viss icke-lokalitet. Det är ett måste i strängteori och alla teorier som inte begränsar partiklar till att vara matematiska punkter med noll radie. Det låter abstrakt direkt man pratar om strängteori, men liknande gäller även *kvasipartiklar* i materialfysik, se t.ex. [Thomas avhandling](#) [14] som har en trevlig populärvetenskaplig introduktion på svenska: ”*Den icke-lokala informationen manifesterar sig endast indirekt genom att den växelverkar med den lokala, och då ter den sig fullständigt slumpmässig.*”

Jämför frågan i relativitetsteori huruvida en fullständigt rigid stång som räcker till månen puttar snabbare än ljusets hastighet. Svaret är att det är frågan det är fel på: det finns inga rigida stänger, för de består av punktpartiklar som påverkar varandra med krafter vars utbredning inte är större än ljusets hastighet (och oftast mycket mindre, t.ex. knackar du på en järnbit så fortplantar sig knackningen med en 5000 m/s, i och

för sig hög hastighet men mätbar med enkla medel). I några försök att få till en teori för kvantgravitation, som strängteori, fortplantas pulser inte heller fortare än ljusets hastighet, för strängen själv lyder under relativitetsteori. Men teorin belyser olika sätt det hade kunnat hända på. Jämför faktumet att rymden faktiskt expanderar snabbare än ljuset, eftersom rymden inte är något ”objekt” som rör sig.

(Som exempel: den [kosmologiska händelsehorisonten](#) är 16 miljarder ljusår bort, vilket betyder att mellan oss och galaxer som är längre bort än så *sträcks rymden ut fortare än ljusets hastighet*, enligt Hubbles lag $v = Hr$, så det ljus de skickar ut idag kommer vi aldrig att kunna se. Vi kan däremot se ljus som skickats ut från dem i det förflutna, så de räknas ändå in i det observerbara universum som är 47 miljarder ljusår i radie. Poängen här var bara att relativitetsteori inte kategoriskt förbjuder hastigheter som är högre än ljuset, bara det inte är hos fysiska ”objekt” – notera att jag undvek att säga att det var galaxerna själva som åkte så fort! – och frågan i kvantfysik blir i vilken utsträckning t.ex. en sannolikhetsväg skall betraktas som ”objekt” överhuvudtaget.)

Liten bibliografi

- [1] R.Feynman, ”*Quantum Behavior*”, Feynman Lectures on Physics Vol III, feynmanlectures.caltech.edu/III_01.html
- [2] C. Morette, ”*On the Production of π -Mesons by Nucleon-Nucleon Collisions*” (mottagen 27/6 1949). Feynmans artikel ”Theory of Positrons” med Feynman-diagram kom ut 15/9 1949. De här är inte lättlästa, jag bara nämner dem av historiskt intresse. Bättre är kanske nästa referens.
- [3] F. Dyson, ”*Meeting Feynman with Cécile DeWitt-Morette*”, Web of Stories, [youtube.com/watch?v=Z5fKBacxCK4](https://www.youtube.com/watch?v=Z5fKBacxCK4)
- [4] M. Berg. ”*Modern fysik, Kompendium I*”, tp.hotell.kau.se/marcus/notes
- [5] D. McDonald, ”*The Nobel Laureate Versus the Graduate Student*” (2001), [Physics Today](#)
- [6] D. Cassidy, ”*Beyond Uncertainty: Heisenberg, Quantum Physics, and the Bomb*” (2012)
- [7] S. Aaronson, ”*Quantum Supremacy: the Gloves are Off*”, blogginslägg (2019), scottaaronson.com/blog/?p=4372
- [8] Wikipedia, [Post-quantum cryptography](#)
- [9] Tyska Wikipedia, de.wikipedia.org/wiki/Kultusministerium
refererar till första sådana exemplet, i Preussen. Sedan blev det REM, lett av Bernhard Rust, under Hitler.
- [10] Einstein, Podolsky, Rosen, ”*Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete?*” (1935).
- [11] J. Maldacena et al, ”*Traversable wormholes in four dimensions*”, arxiv.org/abs/1807.04726
- [12] M. Berg, M.Haack, W.Mück, ”*Glueballs vs. Gluinoballs: Fluctuation Spectra in Non-AdS/Non-CFT*”, arxiv.org/abs/hep-th/0612224
- [13] R.Feynman, ”*QED: The strange theory of light and matter.*” (1985), Princeton. Om man söker ”Sum over histories” på engelska Wikipedia dirigeras man (korrekt) om till: en.wikipedia.org/wiki/Path_integral_formulation
- [14] T. Kvorning, ”*Non-local behaviour from local interactions*” (2017), Avhandling Stockholms universitet.
- [15] S. Carroll, ”*Something Deeply Hidden*” (2019). Se t.ex. Google Talks, [youtube.com/watch?v=F6FR08VyIO4](https://www.youtube.com/watch?v=F6FR08VyIO4)
- [16] M. Ball, M. Wietschel, ”*The future of hydrogen – opportunities and challenges*”, Int.J.H.Energy (2009).
- [17] A. Whitaker, ”*John Stewart Bell and Twentieth Century Physics: Vision and Integrity*” (2016), Oxford University Press.
- [18] Weinfurter et al, ”*Event-Ready Bell Test Using Entangled Atoms Simultaneously Closing Detection and Locality Loopholes*” (2016), [länk till arXiv.org nr 1611.04604](http://arxiv.org/abs/1611.04604)
- [19] D.Mermin, ”*Boojums All the Way through: Communicating Science in a Prosaic Age*” (1990), Cambridge University Press.

- [20] W.Heisenberg, ”Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik” (1927), Zeitschrift für Physik, [länk till Springer](#)
- [21] Frisch och Peierls PM, atomicarchive.com/resources/documents/beginnings/frisch-peierls.html
- [22] S.Holst, ”Bombproblemet” (Fysikaktuell nr 4 2011), sorenholst.se/tankeexperiment
- [23] B.Greene, ”*Fabric of the Cosmos Part 3: Quantum Leap*”, PBS-dokumentär.
- [24] M.Riordan, L.Hoddeson, ”*Crystal Fire: The Invention of the Transistor and the Birth of the Information Age*” (1999), Norton.
- [25] R. Bach et al, ”Controlled double-slit electron diffraction” (2013) New J. Phys. 15 033018, [länk](#)
- [26] O. Eriksson, ”Radiation exposure to personnel during fluoroscopic procedures” (2018), examensarbete i fysik på Karlstads universitet, [länk till fulltext](#)
- [27] A.Blagoiev, ”Implementation and verification of a quantitative MRI method for creating and evaluating synthetic MR images” (2020).
- [28] S.Kivelson, ”Superconductivity and Quantum Mechanics at the Macro-Scale” (2016), YouTube-föreläsning, [länk](#)
- [29] J.Bardeen, nobelföreläsning 1956, <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1956/bardeen/lecture>
- [30] S. Aaronson, ”*Quantum Supremacy: the Gloves are Off*”, blogginlägg (2019), scottaaronson.com/blog/?p=4372
- [31] L.Susskind, A.Friedman, ”Theoretical Minimum: Quantum Mechanics” (2014), Basic Books.
- [32] O.Darrigol, ”*Bohr’s trilogy of 1913*” (2016), i 100-års-jubileums-volym av Bohrs trilogi av artiklar, [länk](#)
- [33] N.Bohr, ”*Discussions with Einstein on Epistemological Problems in Atomic Physics*” (1949), Niels Bohr Collected Works Vol 7 (1996), red. Rüdinger, Aaserud, Elsevier.
- [34] Stanford-encyklopedin, ”The Uncertainty Principle”. plato.stanford.edu/entries/qt-uncertainty/ (Jag betraktar länken på första sidan av det här kompendiet som ”huvudsidan”. Min ref. 34 och ref. 35 är två bra under-sidor.)
- [35] Stanford-encyklopedin, ”*Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics*”. plato.stanford.edu/entries/qm-manyworlds/
- [36] Stanford-encyklopedin, ”*The Einstein-Podolsky-Rosen Argument in Quantum Theory*”, plato.stanford.edu/entries/qt-epr/
- [37] B.DeWitt, ”*The Global Approach to Quantum Field Theory*” (2003), Vol I, Oxford.
- [38] K.Ford, AIP history interview (1995), aip.org/history-programs/niels-bohr-library/oral-histories/23199
- [39] C.DeWitt-Morette. ”The Pursuit of Quantum Gravity: Memoirs of Bryce DeWitt”
- [40] B.Jäck, Y.Xie, A.Yazdani, ”*Detecting and distinguishing Majorana zero modes with the scanning tunnelling microscope*” (2021). *Nature Reviews Physics* **3**, 541–554.

Övriga referenser

- Mina ”huvud-biografier”:

D.Cassidy, ref.6 ovan (Heisenberg-biografi)

R. Rhodes, ”The Making of the Atomic Bomb” (inkl. en biografi av Niels Bohr)

W.Isaacson, ”Einstein: His Life and Universe” (Einstein-biografi)

D.Schwartz, ”The Last Man Who Knew Everything” (Fermi-biografi)

G.Farmelo, ”The Strangest Man” (Dirac-biografi)

En annan bra populärvetenskaplig bok:

B.Greene, ”Fabric of the Cosmos” (se även hans PBS-dokumentärer som *Illusion of Time*)