

KVANTMEKANIKENS HISTORIA

Vad som följer är dels en sammanfattning av, dels en utveckling från, min föreläsning i kursen om Nobelprisets historia, våren 2003. Det är nog ingenting jag kan rekommendera åt den läsare som är mer intresserad av kvantmekaniken än av dess historia. Och för övrigt är jag ingen historiker...

KLASSISK MEKANIK

Åren 1665 och 1666 var universitetet i Cambridge stängt på grund av en florerande böldpest, och den unge Isaac Newton tillbringade det mesta av denna tid i sitt föräldrahem i Woolsthorpe. Han använde tiden väl; vi har bara hans egna ord för att det var dunsen av ett fallande äpple som länkade in hans tankar på gravitationslagen, men vi vet att han under dessa år lade grunden till den klassiska mekaniken.

Ett konkret problem som Newton löste var att visa att om solen drar till sig en planet med en kraft som är omvänt proportionell mot avståndet så kommer planeten att röra sig i en ellips kring solen med systemets tyngdpunkt i den ena brännpunkten. Att så är fallet var känt efter Johannes Keplers analyser av planetrörelserna i början av 1600-talet. Newtons teori är emellertid långt överlägsen Keplers, vilket visar sig när man undersöker vad den säger om det mer komplicerade fallet med flera planeter i rörelse runt samma sol. Om planeterna även påverkar varandra inbördes med krafter omvänt proportionella mot avstånden, låt vara med mindre krafter eftersom planeterna väger bara någon bråkdel av solen, kommer planetbanorna att avvika något från ellipser. Sådana avvikelser från Keplers lagar, i mycket god överensstämmelse med Newtons teori, har observerats. Newtons teori kan till och med användas för att analysera hur solsystemet en gång bildades ur ett kollapsande gasmoln.

I händerna på lysande matematiker som Lagrange, Laplace och Hamilton förvandlades Newtons teori bygger till ett allmänt ramverk som tycktes gott nog att beskriva hela naturen. Maxwells teori för det elektromagnetiska fältet, Boltzmanns atomteori och Einsteins relativitetsteori kan alla passas in i Hamiltons formulering av Newtons mekanik. Det centrala i klassisk mekanik är att man kan beskriva världens tillstånd vid en given tid. I fallet med planetrörelsen betyder detta att man specificerar planetens läge och hastighet vid den givna tidpunkten. Kalla dem $x(0)$ och $v(0)$. Det finns sedan ekvationer som tillåter oss att beräkna läget (och hastigheten) vid varje annan tid, $x(t)$. Det verkligt centrala här, som man tillsynes inte kan rucka på, är inte att framtiden på så sätt kommer att bli fullständigt bestämd av det närvarande. Det verkligt centrala är att situationen vid varje tillfälle kan beskrivas fullständigt, i detta fall av läge och hastighet.

Under nittonhundratalets första årtionden började man göra experiment där naturens uppförande på atomnivå studerades. Resultaten stod ofta i direkt motsägelse mot

etablerade teoretiska principer; över hela linjen började sprickor uppstå i den Newtonska världsbilden. I stort sett fanns det två huvudfåror i utvecklingen här. Den ena gick från Max Planck över Albert Einstein till Erwin Schrödinger och koncentrerade sig kring statistisk fysik och egenskaper hos den elektromagnetiska strålningen. Den andra koncentrerade sig kring atomerna och dominerades länge av Niels Bohr. Vi väljer att följa den andra.

VÄTEATOMEN

Experiment som utfördes i Cambridge, i det laboratorium som förestods av den nya zeeländske fysikern Ernest Rutherford, klarade väteatomens struktur: Den består av en lätt elektron och en tung kärna; kärnan och elektronen har motsatt elektriskt laddning och attraherar därför varandra med en kraft som är omvänt proportionell mot avståndet. Hela objektet har en diameter av omkring 1 Ångström (en tiomiljarddels meter) i diameter och kärnan är mycket mindre än så. Från matematisk synpunkt förefaller problemet identiskt med problemet att beskriva en planets rörelse kring solen. Andra och tyngre atomer består av en kärna och flera elektroner som attraheras av kärnan och repellerar varandra, varför det matematiska problemet blir likartat men inte identiskt med Newtons.

Men det verkliga problemet är att alla väteatomer är likadana. Vid den här tiden hade man ingenting bekant om planetsystem kring andra stjärnor än solen, men en sak var man klar över: När nya planetsystem upptäcks kommer man att finna att de skiljer sig från vårt, dels därför att planetmassorna kommer att vara annorlunda, dels därför att även om de vore identiska så skulle deras avstånd från stjärnan med säkerhet skilja sig---mer eller mindre mycket---från våra planeters avstånd från solen. Väteatomer däremot är helt identiska med varandra. Det finns ett annat problem med beskrivningen av Rutherfords atom. Enligt Maxwells teori för elektromagnetismen kommer en elektriskt laddad elektron i rörelse kring en atomkärna att utsända ljus eller elektromagnetisk strålning av annat slag. Ingenting sådant observeras. Det kommer visserligen strålning från en upphettad vätgas, men av någon anledning som är obegriplig inom ramen för den klassiska fysiken sker detta bara vid vissa speciella våglängder. Lundensaren Janne Rydberg analyserade de mätdata som fanns tillgängliga för honom och fann en formel som talar om vilka dessa våglängder är, nämligen

$$1/\lambda = R(1/m^2 - 1/n^2) ,$$

där λ är det utsända ljusets våglängd, m och n är godtyckliga heltal (i det observationsmaterial som Rydberg hade förekom bara fallet $m = 2$), och R är en naturkonstant vars uppmätta värde blir $1/1097$ meter.

Niels Bohr framlade 1913 en teori ur vilken Rydbergs formel kunde härledas och hans konstant beräknas som en funktion av elektronens laddning och massa samt Plancks konstant h . Bohrs teori använder sig av den Newtonska beskrivningen av väteatomen, men lägger till extra villkor som säger att vissa rörelsekonstanter måste anta bestämda värden, som skiljer sig med heltalsmultiplar av Plancks konstant. Detta gör att den totala bindningsenergin för elektronerna inte längre kan anta godtyckliga värden. Man får en diskret uppsättning energinivåer E_n . Om man dessutom gör det godtyckliga antagandet att elektronerna utsänder ljus endast då de byter energinivåer kommer det utsända ljuset att förekomma i "kvanta" med energierna $E_m - E_n$. Om man slutligen använder Max Plancks formel för våglängden av ett ljuskvantum med energin E , det vill säga $E = hc/\lambda$ där c är ljushastigheten, så kan de våglängder vid vilka väteatomen kan emittera ljus beräknas som

$$1/\lambda = (E_n - E_m)/hc .$$

E_n kan beräknas med Bohrs teori och visar sig vara omvänt proportionell mot kvadraten på heltalet n . En jämförelse med Rydbergs formel visar alltså att teorin kan användas för att beräkna Rydbergs konstant R ; resultatet blir det korrekta.

Bohr var uppenbarligen på rätt väg. Men hans teori var otillfredsställande av flera skäl. Dels därför att den visade sig svår att tillämpa på mer komplicerade atomer, vilket har att göra med valet av de rörelsekonstanter som skall kvantiseras. För väteatomen är de lätta att identifiera, men sedan blir det problematiskt. Men teorin är också otillfredsställande därför att den inte alls förklarar varför elektronen utsänder ljus endast vid övergången från en energinivå till en annan. Enligt Maxwells teori borde den utsända ljus kontinuerligt. Bohrs teori kan inte heller förklara varför vissa spektrallinjer lyser kraftigare än andra.

Bohr återvände till Danmark och blev i kraft av sin personlighet centralfiguren kring vilken många av de ledande kvantfysikerna samlades. Man hade alldeles klart för sig att en stor omvälvning av fysikens grundbegrepp var på väg. Som vittne väljer jag Sir Oliver Lodge. Mer precist citerar jag ur förordet till hans 1924 utgivna populärvetenskapliga bok *Atoms and Rays* : "För många av oss står det klart att vi lever i en Keplersk tidsålder: det vill säga, i en tid då alla slags hypoteser läggs fram, och jämförs med experiment och observationer för att se om de håller, även om deras motivering inte alltid förstås och kan behöva vänta, för full förklaring, på den Newtonska tidsålder som bör komma i sinom tid. Några av oss har till och med föreslagit att den Newtonska tidsåldern börjar nu..."

WERNER HEISENBERG

I slutet av maj år 1925 anlände 23-åringen Werner Heisenberg till Helgoland ute i Nordsjön, för att bota sin svårartade hörsnuva. Med sig hade han ideer och kalkyler som han utvecklat i samarbete med Niels Bohr i Köpenhamn och Max Born i Göttingen.

Newton hade beskrivit världen som bestående av partiklar utrustade med bestämda lägen i rummet; teorins uppgift var att beskriva (och att så långt som möjligt förutsäga) hur dessa lägen ändras med tiden. Med andra ord, partiklarna beskrevs av sina lägen som funktioner av tiden, $x(t)$. Långt senare hade Maxwell och Boltzmann förklarat hur Newtons teori kan handskas med en situation där man inte känner till partiklarnas lägen, utan bara vet att de med viss sannolikhet kan förväntas ha vissa lägen. Men att ge upp iden om funktionen $x(t)$ skulle innebära att partiklarna inte har några lägen alls. Som Heisenberg uttryckte saken försökte han "skapa en teoretisk kvantmekanik, analog med klassisk mekanik, i vilken endast relationer mellan observerbara storheter förekommer ... Vi kan ställa frågan i sin enklaste form: Om vi istället för en klassisk storhet $x(t)$ har en kvantteoretisk storhet, vilken kvantteoretisk storhet kommer att uppträda istället för $x(t)$?". Heisenberg gav själv svaret: $x(t)$ måste ersättas av $\langle n | x | m \rangle \exp[i(E_n - E_m)t/\hbar]$. Detta är kanske inte alltigenom begripligt för en oförberedd läsare, även om jag talar om att i denna formel står n och m för godtyckliga heltal, E_n för möjliga värden på den observerade energin (det vill säga Bohrs energinivåer) och \hbar för Plancks konstant. Heisenbergs artikel om resultatet av hans vistelse på Helgoland tillhör heller inte förströelselitteraturen. Men formeln har en konkret innebörd. Det konkreta problem som Heisenberg löste på ön var att identifiera hur energin kan uttryckas i de nya storheterna. Heisenberg har själv skildrat hur han vid tretiden på natten avslutade en serie beräkningar som övertygade honom om att han hade funnit den rätta ansatsen för att förklara atomernas inre. "Först var jag djupt oroad. Jag kände att jag kunde se genom de atomära fenomenens yta in i deras egendomligt vackra inre, och kände mig närmast yr vid tanken på att jag nu måste utforska den rikedom av matematiska strukturer som naturen med generös hand hade spritt ut framför mig. Jag var alltför upphetsad för att kunna sova, så medan den nya dagen grydde begav jag mig till öns sydspets, där det fanns en klippa ut i havet som jag hade längtat efter att att bestiga. Jag gjorde så utan större besvär, och väntade på soluppgången."

MAX BORN

Även om Cambridge intog en ledande roll på experimentsidan, var det Tyskland som låg i täten för teoriutvecklingen. Miljön skildras kanske enklast om vi följer någon av protagonisterna. Som en blygsam kompensation för den en smula styvmoderliga behandling han fick av Nobelkommitten väljer vi att följa Max Born.

Born föddes 1882 och dog 1970; vill man veta vem han var finns hans egen självbiografi att tillgå (*Mein Leben: Die Erinnerungen des Nobelpreistägers*, publicerad efter författarens död). Hans litterära produktion var i övrigt mycket omfattande och inkluderar populära (*Einstein's Theory of Relativity*) och halvpopulära (*The Philosophy of Cause and Chance*) verk likaväl som betydande monografier (*Optics* av Born och Wolf).

Born föddes i Breslau och tillhörde en judisk släkt av förmögna textilfabrikörer. Hans far var medicinare och anställd vid universitetet i Breslau, som efter andra världskriget blev den polska staden Wrocław. Till sin livsåskådning hörde fadern närmast till de tyska

liberaler som led nederlag 1848. Judendomen praktiserades inte. Familjen såg sig som tysk men tycks huvudsakligen ha umgåtts i judiska kretsar; de första förebuden om den antisemitiska katastrofen kunde redan skönjas. En detalj är att fadern i likhet med många bildade tyskar i sin generation kunde båda banden av Faust utantill. En annan är att Max slutade att leka med tennsoldater sedan fadern berättat om sina erfarenheter (som sjukvårdare) under det fransk-tyska kriget. Modern dog då Max var fyra år gammal, fadern år 1900.

Max Borns självbiografi formar sig till en skildring av en civilisation som nu har försvunnit. Som Born säger, "jag tyckte om den och kan försäkra er att den inte var så illa som den framställs idag".

I gymnasiet erbjöds en klassiskt humanistiskt skolning med tonvikt på Greklands, Roms och det Heliga Tysk-Romerska Rikets historia, kulminerande i den preussiska staten. Matematiken utgjorde en annan viktig del av schemat och Born säger sig ha "hatat Euklides nästan lika mycket som jag hatade Schiller". Den enda av sina lärare som Born nämner med värme var naturkunskapsläraren Dr Maschke, som---inspirerad av Marconis då dagsaktuella förehavanden---lät sina elever utföra ett experiment där man lyckades med trådlös överföring av ett Morse-meddelande från ett rum till ett annat. Max genomgick sin *Abitur*--examen år 1901 och nämner den som den enda verkliga examen som han genomgick under sitt liv.

Musiken spelade redan från början en viktig roll i Borns liv. Han ägde förutom piano och fiol också en viola och en cello. Mot slutet av sitt liv spelade han nästan uteslutande Bach, men nämner med förtjusning sina minnen också av till exempel Wagner.

Det var en vän och före detta assistent till fadern, en Dr Lachmann, som väckte den unge Borns intresse för naturvetenskapen och särskilt för astronomin. Lachmann var dessutom socialdemokrat och Borns sympatier kom att ligga åt samma håll. Lachmann lyckades övertyga Born att ge sig in på den akademiska banan; målet var att bli akademisk lärare eller---om detta misslyckades---att leva på ärvda pengar. De första två åren tillbringades huvudsakligen vid universitetet i Breslau, och bland de föreläsningar som Born följde kom Rosanes' föreläsningar i matriskalkyl så småningom att bära en rik frukt; matriskalkylen var då ett stycke avancerad matematik som var okänt för fysikerna, men som vi skall se har detta förhållande ändrats. Tillsammans med två andra studenter, bland dem den nästan 40-årige Lachmann, tog Born också lektioner i astronomi. Dessa bestod av instrumentkunskap och omfattande numeriska beräkningar. Det senare låg inte för Born som aldrig lärde sig att utföra omfattande kalkyler korrekt, medan de nattliga sejourerna i observatoriet (beläget på universitetets knappast vibrationsfria tak) tycks ha tilltalat hans sinne för romantik---instrumenteringen var delvis från Wallensteins dagar. Studentlivet, med sin tonvikt på öldrickning och idiotiska dueller, tycks inte ha tilltalat Born nämnvärt. Det är att märka att inga examina genomgicks och att det var naturligt för Born att tillbringa en del tid också på andra universitet, nämligen de i Heidelberg (där han knöt en livslång vänskap med James Franck) och i Zurich (där han förvånades över att studenter från andra länder inte automatiskt betraktade sina länder som underlägsna det tyska).

Utbildningen var mycket fri; de tyska universiteten erbjöd endast föreläsningar och lät studenterna avgöra om de var värda att följa. Born tog från början till vana att föra anteckningar under föreläsningarna och att, om möjligt samma dag, skriva ut dem till en sammanhängande berättelse. "Ett villkor för att göra detta är naturligtvis en inställning till kunskap som betraktar varje kurs som en unik föreställning lik ett konstverk. Föreläsaren bygger upp sitt ämnes mönster, medan hans personlighet ger arbetet karaktär."

År 1903 anlände Born till Göttingen, utrustad med ett rekommendationsbrev till Minkowski från styvmodern (som dansat med denne i sin ungdom). Göttingen var då det klart ledande universitetet på det matematiska området, dominerat av Felix Klein och de två dioskurerna David Hilbert och Hermann Minkowski. Hilbert hade just påbörjat sina studier av integralekvationer och vad som senare kom att kallas Hilbertrum. I själva verket lade han de matematiska grundvalarna för det som skulle bli kvantmekaniken. Enligt sin vana utvecklade han sitt tema i form av en föreläsningsserie med någon harmlös titel. Born fick uppdraget att föra de officiella föreläsninganteckningarna och kom därför att stå Hilbert nära. Born följde också kurser i fysik och filosofi (och nämner "Heidecker" med viss avsmak).

Born fick sitt första forskningsproblem av Hilbert, men han nådde snabbt slutsatsen att hans begåvning inte lämpade sig för den rena matematiken. (Hilbert skrattade hjärtligt och förklarade att det samma hade hänt honom själv som ung.) Doktorsavhandlingen (1906) kom att handla om ett stabilitetsproblem inom elasticitetslära med Runge som handledare--eftersom en fnurra hade uppstått på tråden till Klein var ämnesbeskrivningen tillämpad matematik. De akademiska studierna avbröts av värnplikt; denna tilltalade inte Born så mycket mer som antisemitismen vid det laget hade gjort sig ganska bred inom armen. Svårartade problem med astma ledde lyckligtvis till att Born frikallades. Han tillbringade därefter en tid i Cambridge och anställdes sedan vid Universitetet i Breslau, där han delvis kom att ägna sig åt experimental fysik. Hans huvudsakliga insats här tycks ha bestått i att han med hjälp av sitt vattenkylda svartkroppsstrålningsexperiment lyckades åstadkomma en större översvämning i universitetets lokaler. År 1908 erbjöds han att komma till Göttingen som Minkowskis medarbetare inom relativitetsteori och elektrodynamik, vilket han med förtjusning antog.

Då Minkowski dog av brusten blindtarm kort tid därefter fick Born redigera dennes efterlämnade papper, och inledde sedan sitt livslånga arbete med att förstå elektronens självenergi. Detta ledde till ett arbete där han försökte sig på att definiera begreppet stel kropp inom relativitetsteorins ram. Born presenterade sina resultat i ett katastrofalt föredrag inför Göttingens matematiska sällskap. Publiken---gamla "mandariner" som Klein, Hilbert, Runge och Schwarzschild och uppåtgående stjärnor som Zermelo, Herglotz, Weyl och Abraham---var inte lätt att tillfredsställa, eller ens att tala till eftersom nyutgiven litteratur hela tiden cirkulerade på de gröna borddukarna. Klein gick till angrepp och uppmanade till sist Born att sätta sig ned. Efter föredraget inleddes en räddningsaktion av Borns vänner. Med stöd av Hilbert och Runge fick man Kleins tillåtelse att ta om föredraget, som nu gick rimligt väl. Born noterar emellertid att han aldrig blev någon god

föreläsare. Borns definitioner utreddes senare av Gustav Herglotz, som nöjde sig med en kort hänvisning i en fotnot till Born---Born nämner att han blev upprörd och att han "inte kan lova att frågor av denna art inte kommer att dyka upp fler gånger in dessa minnen".

Tillsammans med den ungerske juden Theodor von Karman publicerade Born 1912 en studie av vibrationer i kristallgitter, ett tema som därefter går igen i hela Borns karriär. Arbetet innebar kontakt med Einsteins kvantteoretiska förklaring av fasta kroppars specifika värme men väckte ringa uppmärksamhet beroende på Debyes samtida och enklare utredning av samma ämne. Borns habilitationsföreläsning kom att handla om "Thomson's plum--puddingsmodell av atomen", ett ämnesval som bröt av mot den tradition av intresse för klassisk fysik som rådde i Göttingen.

Born gifte sig 1913 och tillbringade smekmånaden i Köpenhamn, Sverige och Wien. Vissa problem vållades av hustruns kristna konfession, och efter påtryckningar från svärföräldrarna lät Born döpa sig. Samma år publicerades Bohrs arbeten om atomteori vars betydelse genast insågs av Born. Första världskriget bröt ut samma dag som Born erbjöds en professur i Berlin, dit familjen flyttade 1915. Under kriget arbetade Born i Berlin med tekniska frågor för artilleriets räkning, vilket dock inte hindrade honom från att fortsätta sin forskning på ledig tid. En bestående vinst från åren i Berlin var familjens vänskap med Albert Einstein; en brevväxling som fortfor fram till Einsteins död finns publicerad och har blivit ett klassiskt dokument. År 1921 utnämndes Born och---på Borns rekommendation---Franck till ordinarie professorer i Göttingen. Borns hela institution bestod av honom själv, en assistent och en halvtidsanställd sekreterare. Den experimentella fysiken sköttes av Franck. Born erbjöd en treårskurs i fysik med föreläsningar (en serie per termin) fyra gånger i veckan, jämte en föreläsning i veckan om aktuella problem. Bland Borns assistenter märktes Pauli, Heisenberg, Jordan och Hund.

Forskningen inriktades från början på dynamik i kristallgitter och på kvantteorin för atomernas elektronstruktur. År 1925 publicerade Born tillsammans med Hund *Vorlesungen uber Atommechanik I*, i vilken den "gamla" kvantteorin sammanfattades och behandlades med hjälp av kanonisk störningsteori. I förordet förklarades den provokativa siffran "I" i titeln med att den "slutliga teorin" kunde förväntas föreligga "om få år". Det förväntades allmänt att lösningen skulle komma från Bohr i Köpenhamn. Born berättar att det kunde hända att han och Franck enats om betydelsen av ett visst experiment, men att Franck inte satte igång förrän han hade fått svar på det brev han skrivit för att få Bohrs uppfattning om saken---och att Franck blev "lite skakad" när lösningen kom inte från Köpenhamn utan från kontoret bredvid.

Born ger en dramatisk skildring av händelserna i samband med kvantmekanikens upptäckt där prioritetsfrågan naturligtvis blir central; han uppger att hans skildring sammanfaller med Pascual Jordans på hans uppmaning nedskrivna minnesanteckningar. I början av år 1925 hade Born och Jordan observerat att Plancks strålningsteori kunde formuleras med hjälp av "övergångsstorheter" som var kvadrater av vibrationsamplituderna i den klassiska teorin. Heisenberg anlände i början av juli med ett manuskript som Born först lade åt sidan, eftersom han var trött efter terminen. Efter några dagar hade manuskriptet helt

fångat Borns intresse och en morgon "omkring 10 juli" insåg han att Heisenbergs symboliska manipulationer var ett exempel på den matriskalkyl som han hade lärt sig mer än tjugo år tidigare. Mer speciellt insåg han att Heisenbergs kvantteoretiska storhet $\langle n|x|m\rangle$ är en matris. Heisenbergs uttryck för hastigheten v är också en matris. I Rosanes' föreläsningar hade det givits ett recept för hur man multiplicerar två sådana matriser med varandra. Det är nu att märka att det spelar roll om man multiplicerar från höger eller från vänster. En närmare inspektion ledde Born till den centrala formeln

$$2\pi m(v_x - xv) = ih,$$

där matriserna som beskriver partikelns läge och hastighet förekommer tillsammans med dess massa m och Plancks konstant h , och där i är kvadratroten ur -1 . Tills vidare lyckades han endast verifiera diagonalelementen i denna matrisekvation men Jordan lyckades visa att matrisen är diagonal, och de skrev ett arbete *Zur Quantenmechanik* som de sände dels till Heisenberg (som befann sig på semester), dels till *Zeitschrift für Physik*. Förutom matriskalkylen och "Heisenbergs kommuteringsrelationer"---som står inristade på Borns gravsten---innehåller arbetet en första ansats till kvantisering av det elektromagnetiska fältet. Omkring 1 september, efter semestern, började ett hektiskt samarbete mellan Born, Jordan och Heisenberg, där tidsschemat bestämdes av att Born i slutet av oktober hade accepterat att ge en föreläsningsserie i USA. Heisenberg befann sig till att börja med i Köpenhamn och deltog med en intensiv korrespondens. Det berömda *Drei Männer-Arbeit* som blev följden innehöll en väsentligen fullständig beskrivning av kvantmekanikens matrisformulering. (Det var på den tiden ytterst ovanligt att så många som tre fysiker skrev ett gemensamt arbete; idag är det rutin.) Borns egna bidrag till arbetet hängde på hans kunskaper i matriskalkyl och Hilbert teori om matriser i form av operatorer verkande på ett oändligt dimensionellt vektorrum.

Göttingen etablerade sig under några år som ett ledande centrum för utvecklingen och listan på unga forskare som samlades kring Born---och vid de seminarier som han började ge i sitt eget hem---är lång och stjärnspäckad. Borns arbetsbörda under dessa år var mycket stor och vintern 1928 hade det gått för långt---vid en semesterresa fann han sig oförmögen att stiga upp på tåget och tvingades sedan avstå från arbete under närmare ett år. Utom arbetsbördan hade den politiska situationen i Tyskland---och den växande antisemitismen---redan blivit besvärande. Born flydde 1933 och fick, efter en kortare sejour i Cambridge, en professur i Edinburgh. Han fortsatte där att ge flera tungt vägande bidrag till fysiken under de närmaste tjugo åren. I sina memoarer beskriver han denna andra halva av sitt liv tämligen kortfattat, uppgivande ålderskäl som anledning. Han återvände till Tyskland efter sin pensionering.

VÅGMEKANIKEN

Den nya matrismekaniken ledde snabbt till en fullständig förståelse av väteatomens

energinivåer, och det stod klart att det bara var en tidsfråga innan problemen med tyngre atomer och med detaljerna i utsändandet av elektromagnetisk strålning skulle kunna lösas. Redan året därpå skedde emellertid någonting som vid första påseendet tycktes innebära en fullständig scenförändring---och som välkomnades som sådan av de många fysiker som fann Heisenbergs ideer svårsmält abstrakta. Under 20 år hade Einstein drivit linjen att ljuset, som länge betraktats som en elektromagnetisk vågrörelse, under vissa omständigheter lämpligen ses som en samling av ljuspartiklar. Slutligen ställde Louis de Broglie den naturliga frågan om partiklar, elektronen till exempel, under lämpliga omständigheter kan beskrivas som vågfenomen. En poäng med detta är att man lätt kan få vågor att så att säga manifesteras sig som heltal. Detta är ju grundförutsättningen för låt oss säga en stråkorkester, där en viss ton svarar mot ett visst antal stående vågor i en fiolsträng.

Under våren 1926 lyckades österrikaren Erwin Schrödinger göra de Broglies ideer precisa. Han uppställde en ekvation, nu känd som Schrödingerekvationen, som exakt beskriver en våg som man kan associera med en elektron utsatt för en väldefinierad kraft. Andra fysiker, bland dem Cornelius Lanczos och svensken Oscar Klein, hade haft samma ide men stupat på bristande kunskaper om Hilberts metoder för hur sådana ekvationer kan hanteras. I Schrödingers händer gav vågekvationen en elegant härledning av väteatomens energispektrum. I en serie arbeten utvecklade han dessa ideer vidare och lyckades också, efter lämpliga matematiska transformationer, fastställa att hans egen vågmekanik är matematiskt ekvivalent med matrismekaniken från Göttingen. Men på en punkt gick han bet: Vad menas egentligen med Schrödingers vågfunktion?

Matematiskt rör det sig om en mycket enkel typ av våg, men den fysikaliska tolkningen är subtil. I fallet med en ensam elektron kan man tänka sig att "vågen" i varje punkt av rummet definierar en liten pil---en pil som lever i ett tvådimensionellt plan som införts speciellt för ändamålet. Denna pil har en längd och en riktning men ingen direkt fysikalisk tolkning. Men Max Born, som insåg betydelsen av Schrödingers arbete, hade klart för sig att kvantmekaniken måste ges en statistisk tolkning. Han såg också att kollisionsprocesser var lämpliga för att bringa en sådan tolkning i fokus. Detta ledde fram till förståelsen av vågfunktionens beloppkvadrat som en sannolikhetsstäthet. För att återgå till vår lilla pil med storlek och riktning så sade Born att kvadraten på längden av pilen i en punkt är proportionell mot sannolikheten att påträffa elektronen i denna punkt. Eftersom all information om elektronens rörelse finns nerlagd i dess vågfunktion har detta den intressanta konsekvensen att banan för en elektron aldrig kan förutsägas exakt---det bästa som kan åstadkommas är en förutsägelse om sannolikheten för att den skall påträffas i en viss punkt vid en viss tidpunkt. Om emellertid vågen samlar ihop sig så att längderna på de små pilarna är noll överallt utom i ett litet område vet man med säkerhet att elektronen kan påträffas där; det är genom att göra argument av den typen precisa som man kan visa att kvantmekanikens förutsägelser kommer att sammanfalla med den klassiska mekanikens under lämpliga omständigheter. (Det är inte bara elektroner som har vågfunktioner---jorden har också en vågfunktion, och det är lämpligt att denna är skarpt koncentrerad kring en av Keplers ellipser.)

Enligt beskrivningen ovan definierar elektronens vågfunktion, i varje punkt av rummet, en abstrakt "pil" med storlek och riktning i ett abstrakt plan. Born gav en fysikalisk tolkning av längden. För att se betydelsen av riktningen vänder vi oss till ett tankeexperiment som blev föremål för djuplodande analyser i de berömda diskussioner om kvantmekanikens tolkning som fördes mellan främst Bohr och Einstein (där den senare uppträdde som skeptiker). Först studerar vi en elektron som kommer in mot en öppen spalt i en vägg, passerar spalten, och träffar en detektor på andra sidan. Experiment av liknande typ gjordes tidigt (av Davisson och Germer, 1927) och man vet att om (och endast om) spalten är tillräckligt liten kommer elektronens vågfunktion att spridas ut bakom spalten. Sannolikheten att påträffa elektronen kommer därför att vara skild från noll, och uppvisa ett karaktäristiskt mönster, i en bred sektor bakom spalten. För att se detta experimentellt gäller det att upprepa experimentet många gånger; sannolikheten styr fördelningen av elektroner över detektorn. Men vad händer om två spalter är öppna? Enligt teorin skall vi då addera vågfunktionen för en elektron som går genom den ena spalten till den för en elektron som går genom den andra. Matematiskt sker detta genom att vi tar de två pilarna i varje punkt och adderar dem. Pilarnas riktning blir nu väsentlig--- två lika långa pilar med motsatt riktning adderar sig till noll. Resultatet blir ett nytt karaktäristiskt mönster för sannolikheterna som har egenskapen att den är noll i vissa punkter dit elektronerna mycket väl kan komma om bara en av spalterna är öppna. Försöker man nu tänka igenom detta resultat med hjälp av sunt förnuft och det vid första påseendet rimliga antagandet att elektronen går antingen genom den ena spalten eller genom den andra, finner man att det är någonting som är konstigt här. Detta kan spåras tillbaka, inte så mycket till att teorin endast förutsäger sannolikheter, utan till att den inte adderar sannolikheter utan "sannolikhetsamplituder", storheter med längd och riktning vars längd i kvadrat ger sannolikheter.

FORMALISMEN FÄRDIGSTÄLLS

Heisenberg hade presenterat sin första version av kvantmekaniken i ett föredrag i Cambridge redan på sommaren 1925. I publiken fanns den unge Paul Dirac, som mycket snart och med oöverträfflig elegans kom att föra teorin vidare. Den matematiska formuleringen av kvantmekaniken finns i allt väsentligt färdig redan i Diracs berömda *Principles of Quantum Mechanics* (första upplagan 1930, reviderad fjärde upplaga 1967); en av århundradets stora böcker även i rent stilistiskt avseende. Bland Diracs stora insatser var att han kunde visa att kvantmekaniken har en matematisk struktur som i stora stycken är identisk med strukturen hos Newtons mekanik, så som den på 1800-talet formulerades av irländaren Hamilton. Så har till exempel Heisenbergs kommuteringsrelationer (det vill säga Borns och Jordans upptäckt att x gånger v inte är lika med v gånger x) en direkt motsvarighet i Hamiltons mekanik. Från Diracs örnperspektiv är det också lättare att sätta fingret på skillnaderna mellan klassisk mekanik och kvantmekanik. Med formalismen under kontroll lyckades Dirac lösa problemet med precis hur atomerna faktiskt utsänder elektromagnetisk strålning, och Rydbergs formel kan anses som fullständigt förklarad.

En intressant egenskap i kvantmekaniken är "komplementariteten" mellan läge och hastighet, som Heisenberg fångade i sin så kallade osäkerhetsrelation. En partikel med väldefinierat läge har en vågfunktion som är noll så när som på i punktens omedelbara närhet. Men en partikel med väldefinierad hastighet visar sig svara mot en våg med en väldefinierad våglängd, vilket innebär en våg som är utsträckt över hela rymden. Ett väldefinierat läge står alltså i motsatsställning till en väldefinierad hastighet. Matematiskt är problemet detsamma som det som uppstår om man försöker spela en jigg på en orgels lägsta register. Jiggen kräver att tonerna produceras vid väldefinierade tider, men orgeltonerna har mycket låga frekvenser och kräver därför väl tilltagna tidsintervall för att höras som toner.

VAD SOM SEDAN HÄNDE

Från 30-talet och framåt skiftade fysikens frontlinjer först till kärnfysik, med Niels Bohr och så småningom hans son Aage Bohr som ledande namn, och sedan till elementarpartikelfysik. En ny generation av fysiker tog över. Experimentanläggningarna växte till mångnationella jättelaboratorier som CERN i Geneve, med flera tusen aktiva fysiker. På teorisidan är det svårt att undgå observationen att fysiker som Heisenberg och Dirac handikappades av en bristande tilltro till sin egen skapelse. När svårigheterna tornade upp sig hade de en tendens att tro att en ny omvälvning av fysikens grundvalar stod för dörren. Sedan mitten av 70-talet har vi emellertid en tillfredsställande teori för elementarpartiklar. Den har häpnadsväckande inslag men det kanske mest häpnadsväckande är att den kvantmekanik som utvecklades för att förstå atomerna kvarstår i omodifierad form. Einsteins allmänna relativitetsteori för gravitationen står kvar i upphöjt majestät som den enda del av fysiken som ännu inte har bringats i överensstämmelse med kvantmekaniken.

Kvantmekaniken har också gjort det möjligt att förstå material omkring oss, från vanliga egenskaper hos enkelt sammansatta material som metaller till exotiska material och fenomen som supraledning---och denna lilla mening är avsedd att täcka lejonparten av det arbete som har utförts inom fysiken under de år som har gått sedan 1925.

Med början någon gång på 70-talet hade teknologin i fysiklaboratorierna avancerat så långt att en tredje typ av frågeställningar började närma sig fokus. För första gången blev det möjligt att fånga in enkilda atomer i "fällor" av elektromagnetiska fält, och göra experiment på atomer tagna en och en, samtidigt som framstegen i laserfysiken möjliggjorde experiment med ljuskvanta tagna en och en. Dialogen mellan Bohr och Einstein om kvantmekanikens mening kom därmed i ny belysning, eftersom många av deras tankeexperiment nu kunde utföras i laboratorierna. Speciellt finns det mycket vackra realiseringar av det berömda tvåspaltförsöket. Frågan om vad kvantmekaniken egentligen betyder har därför fått förnyad aktualitet. Hur kommer det sig att en populärföreläsning om speciell relativitetsteori kan ge en klar formulering av den logiska

grundvalen för sitt ämne, medan en populärföreläsning om kvantmekanik får nöja sig med vaga antydningar?

Den nya utvecklingen kan spåras tillbaka till ett berömt arbete av Einstein, Podolsky och Rosen från 1935, i vilket dessa författare (som i detta sammanhang går under det kollektiva namnet EPR) försökte visa att kvantmekaniken inte kan duga som slutlig teori. Den är helt enkelt för egendomlig. Grundproblemet har att göra med vad man menar med ett fysikaliskt systems "tillstånd". I Newtons mekanik kan tillståndet för en partikel utgöras av läge och hastighet vid given tid (och givet att andra aspekter på partikeln försummas). I kvantmekaniken ges tillståndet av partikelns vågfunktion. Ett första problem är nu att det är omöjligt att mäta en partikels vågfunktion. Vi kan mäta dess läge eller dess hastighet, men det ger bara mycket begränsad information om vad vågfunktionen egentligen var. Å andra sidan är det möjligt att manipulera en partikel så att vi vet att den beskrivs av en vågfunktion som vi har valt. EPR visade nu att det under vissa omständigheter är möjligt att genomföra dessa manipulationer så att säga på avstånd; givet två elektroner med en gemensam historia kan man välja tillståndet för den ena genom att manipulera den andra. Men eftersom det inte går att mäta det fullständiga tillståndet för den elektron vars tillstånd har ändrats kan denna typ av ideer inte användas för att skicka signaler mellan de två platser där elektronerna befinner sig. EPRs ideer utvecklades vidare av Schrödinger, som myntade begreppet *Verschränkung* (eng. entanglement, sv. snärjelse) för att beskriva den typ av speciellt kvantmekaniska korrelationer som utnyttjas här. EPRs och Schrödingers arbeten kom att tillbringa sitt första halvsekel som fotnoter till historien men ses nu som frön till en nyfödd vetenskap kallad kvantinformatik- teorin. Iden är att se snärjelse som en resurs; liksom man på 1800-talet använde värmeläran för att utveckla ångmaskinen försöker man nu använda kvantmekaniken för att utveckla nya sätt att sända och bearbeta information. Ett ambitiöst mål är att bygga en kvantmekanisk dator---en maskin som i vissa avseenden är principiellt mer kraftfull än de datamaskiner som nu är i bruk. Men det mest ambitiösa målet förblir att sammanfatta kvantmekaniken i några principer lika enkla och begripliga som de som styr Einsteins speciella relativitetsteori.