

# KVANTEFYSIKK – FRA FASCINERENDE NATURFENOMEN TIL FRAMTIDENS TEKNOLOGI

foredrag på møte  
7. desember

av professor Susanne Viefers, Fysisk institutt, Universitetet i Oslo

## **Sammendrag**

Kvantefysikken revolusjonerte vår forståelse av verden da den ble utviklet av mange kloke hoder i første halvdel av det 20. århundre. Dette paradigmeskiftet ble utløst av innsikten om at datidens ”klassiske” fysikk ikke strakk til for å beskrive naturens minste byggestener. En viktig grunn til at kvantefysikken fascinerer mange, er at den forutsier fenomener (typisk på atom-nivå) som helt bryter med vår hverdagslige intuisjon. Men den har også stor praktisk betydning i hverdagen ved at blant annet mye av dagens datateknologi ikke hadde vært mulig uten forståelse og utnyttelse av kvanteeffekter. Nå ønsker man å gå lenger: Det satses for tiden stort på forskning omkring ”kvanteteknologi” – målrettet utnyttelse av kvanteeffekter for å skape grunnleggende ny teknologi som for eksempel kvante-datamaskiner.

Dette foredraget vil gi en kort oversikt over kvantefysikkens historie, hovedtrekk ved teorien, og knytte an til såkalte ”topologiske faser” som er et aktivt forskningsområde i vår gruppe ved UiO, og som var tema for Nobelprisen i fysikk i 2016. Videre vil jeg si litt om den teknologiske betydningen kvantefysikken har hatt til nå, samt den store internasjonale satsningen på drømmen om en kvanteteknologisk framtid.

## **Litt historikk**

Rundt år 1900 var den rådende oppfatningen at hovedtrekkene i fysikken var forstått. Det vi nå omtaler som den klassiske fysikken – den newtonske mekanikken og Maxwell-teorien for elektromagnetisme – var veletablert, og man ventet ikke noen store overraskelser. Men så viste det seg at det

fantas eksperimentelle observasjoner som ikke kunne forklares med klassisk teori. Det vil føre for langt her å gå i detalj på dette, men noen stikkord er fotoelektrisk effekt, sort legeme-stråling og selve strukturen til atomene. Det som begynte med en innsikt om at ”noe måtte være galt” med klassisk fysikk, endte med et grunnleggende paradigmeskifte i vår forståelse av naturen: I løpet av de følgende tiårene ble kvantefysikken utviklet ved en stor, kollektiv innsats med bidrag fra mange dypt tenkende fysikere – Bohr, Heisenberg, Einstein, Schrödinger og mange flere (og mange av oppdagelsene fra denne tiden ble etter hvert belønnet med nobelpriser). Dette i motsetning til relativitetsteorien, som også ble utviklet på begynnelsen av 1900-tallet, og som i mye større grad var et énmannsverk. Som så mange ganger i historien førte den nye teoretiske kunnskapen også med seg ny teknologi etter hvert – mer om dette senere. Det kan også nevnes at selv om selve formalismen er veletablert og til dags dato har stått sin prøve i alle eksperimentelle tester, så forskes det fortsatt på noen av kvantefysikkens grunnlagsproblemer som for eksempel tolkningsproblemer.

### **Hva er kvantefysikk, og hva skiller den fra ”klassisk” fysikk?**

I dette foredraget vil jeg primært snakke om kvalitative egenskaper, konsekvenser og anvendelser av kvantefysikken. Men i mer praktisk ”daglig bruk” er kvantemekanikken først og fremst en velutviklet og veltestet matematisk modell med veldefinerte regneregler. Den brukes til å regne på hvordan naturen oppfører seg, for eksempel for å forutsi eller forklare resultatet av et eksperiment. Sentralt i denne formalismen står noe vi kanskje kan kalle kvantemekanikkens grunnleggende bevegelsesligning. Den kalles Schrödingerligningen og er på mange måter kvantemekanikkens svar på det newtonske ”kraft er lik masse ganger akselerasjon”. Det som er spesielt med Schrödingerligningen er at den er av samme slags form som ligninger man vanligvis bruker til å beskrive bølger – for eksempel lydbølger, vannbølger, svingninger på en snor. Dette har store konsekvenser, som vi skal komme tilbake til. Men kort fortalt fører dette til at kvantefysikken forutsier en rekke fenomener som totalt strider mot vår intuisjon, noe som vekker fascinasjon langt utenfor fysikernes rekke.

Kvantefysikkens regime er grovt sagt naturens minste byggestener, altså oppførselen til mikroskopiske objekter på størrelse med for eksempel et atom. Her bryter den klassiske beskrivelsen sammen. I denne sammenhengen er for eksempel et sandkorn enormt stort (eller ”makroskopisk”) og langt innenfor regimet som trygt kan beskrives klassisk. Det er et interessant

og forskningsaktuelt spørsmål i seg selv hvor stort noe kan være og fortsatt oppføre seg ”kvanteaktig”. Vi har ikke tid til å gå i detalj på dette her, men det korte svaret er kanskje at det ikke finnes noe absolutt svar – en prøver å pushe denne grensen ved stadig mer raffinerte eksperimenter, og drømmen er å komme opp i noe så stort som små virus (Hornberger 2012:157, Treutlein 2015: 832). Men det kan være verdt å nevne at det ikke er noen ”motsetning” mellom klassisk fysikk og kvanteteorien. Klassisk fysikk er ikke gyldig på veldig liten skala. Men prøver man å bruke kvanteteorien til å beskrive makroskopiske ting (hvilket vel er litt som å skyte spurv med kanoner) så vil resultatet sammenfalle med den klassiske teorien.

La oss også si noen ord om bakgrunnen for begrepet ”kvante” i navnet. Dette skyldes at det viser seg at fysisk målbare størrelser (tenk for eksempel på hastigheten til en partikkel) typisk er *kvantisert* – de kan bare anta visse, diskrete verdier, men aldri noen av verdiene imellom. Dette er litt som at man bare kan kjøpe melk (i butikken i hvert fall) i hele, eventuelt halve, antall liter, men aldri for eksempel 0,64 liter. I kvanteverdenen er kvantisering en fundamental egenskap ved naturen som man ikke kommer utenom.

Hva er så hovedtrekkene i det som skiller kvantefysikken fra klassisk fysikk? La meg spesielt komme inn på stikkordene determinisme og bølgenatur. Klassisk fysikk er fullstendig deterministisk. Kaster vi en ball og vet nøyaktig i hvilken retning og med hvilken hastighet den forlater hånda (samt eventuelle andre faktorer som luftmotstand), kan vi ved hjelp av bevegelsesligningene regne ut nøyaktig hvor ballen vil befinne seg til ethvert tidspunkt mens den er i luften. I kvanteverdenen er det annerledes. En løsning av den kvantemekaniske bevegelsesligningen gir oss kun *sannsynligheten* for å observere en tilsvarende ”kvanteball” (for eksempel et atom) på et gitt sted ved en gitt tid. Denne løsningen inneholder likevel all informasjon det er prinsipielt mulig å få om dette atomet! Det er fundamentalt umulig å vite nøyaktig hvor vi vil finne atomet før vi måler. Dette betyr imidlertid ikke at determinismen har gått tapt! Teorien gir noe vi kanskje kan kalle ”statistisk determinisme”: Hadde vi hatt veldig, veldig mange (si hundre tusen) helt like atomer i nøyaktig samme tilstand og utført samme slags måling på hvert av dem, hadde vi fått mange forskjellige måleutfall. Men *fordelingen* av måleutfall ville tilsvart nøyaktig den sannsynlighetsfordelingen som Schrödingerligningen ga oss. Med andre ord, der Schrödingerligningen sier at sannsynligheten er stor for å finne ett av våre atomer, vil vi observere mange av dem. Der Schrödingerligningen sier at det er null sannsynlighet, vil ingen av de hundre tusen atomene noen gang dukke opp.

Dette henger tett sammen med noe vi sa tidligere, at Schrödingerligningen har form som en bølgeligning. Dette betyr at for eksempel et atom

ikke kan tenkes på som en partikkel i klassisk forstand (en liten kule eller klump), men også har iboende egenskaper som ligner mer på det vi er vant til å tenke på som en bølge. Dette omtales gjerne som bølge-partikkel dualismen, et begrep som er kilde til mye forvirring og misoppfatninger. Det er kanskje best å si det på følgende måte: Atomer, elektroner og andre objekter i kvanteverdenen er grunnleggende forskjellige fra makroskopiske objekter, som vi har en intuisjon for gjennom våre sanseerfaringer. La oss kalle dem for kvantepartikler. De er verken partikler eller bølger i klassisk forstand, men kan oppføre seg ”partikkelaktig” eller ”bølgeaktig” avhengig av omstendighetene, og hva slags eksperiment vi gjør med dem. For å sitere fritt etter noe jeg en gang leste i en lærebok i kvantemekanikk: ”Quantum particles are completely crazy. But at least they are all crazy in the same way.”

### **Noen fascinerende konsekvenser av materiens bølgenatur**

Kvantepartiklers iboende bølgenatur har en rekke dramatiske konsekvenser for deres oppførsel, som helt strider mot vår hverdagslige intuisjon. Vi vil her kort nevne noen av dem.

*Uskarphet:* Vi er vant til å tenke at vi selvsagt kan vite hvor noe befinner seg og samtidig kjenne til hvor fort det beveger seg. Vi kan for eksempel si at en kaffekopp står helt i ro på et nøyaktig spesifisert sted. Slik er det ikke for kvantepartikler. De kan helt fundamentalt ikke ha en veldefinert posisjon og en veldefinert hastighet (egentlig bevegelsesmengde) samtidig – og jo mer presist vi kjenner deres posisjon, desto mindre presist kjenner vi deres hastighet, og omvendt. Dette er ikke et måleteknisk problem – kvantepartikkelen *har ikke* veldefinert posisjon respektive bevegelsesmengde.

*Tunnelering:* Triller vi en ball opp en bakke, kan vi forutsi nøyaktig hvor den vil snu og trille ned igjen. Jo høyere utgangshastighet (og dermed kinetisk energi), desto høyere opp i bakken vil den nå, og vendepunktet er der den opprinnelige kinetiske energien akkurat kompenseres av den potensielle energien i tyngdefeltet. Ballen vil aldri nå høyere enn den har ”lov” til utfra dette energiregnskapet. En kvantepartikkel derimot ville hatt en viss sannsynlighet til å trille lenger opp enn den hadde ”lov” til. Med andre ord, kvantepartikler kan befinne seg i områder der de ”egentlig” (utfra klassisk tenkemåte) ikke har nok energi til å være. For å fortsette med analogien, en kvanteball kunne ha funnet på å dukke opp på den andre siden av fjellet uten

å ha hatt nok energi til å trille over toppen! Dette er tunnelering, kanskje en av de mest myteomspunne egenskapene ved kvantefysikken. For store objekter som en ball er sannsynligheten for tunnelering så ekstremt forsvinnende liten at det aldri vil skje. Men i kvanteverdenen er tunnelering helt hverdagslig. For eksempel er såkalt alfastråling – en type radioaktivitet – en kvantemekanisk tunneleringsprosess: Mekanismen bak alfastråling er at en tung kjerne sender ut en heliumkjerne (kalt alfa-partikkel), selv om heliumkjernen ”egentlig” ikke har nok energi til å rive seg løs. Den tunnelerer ut av den tunge kjernen.

*Kvantisering:* Vi brukte innledningsvis den litt flåsete analogien om at melk er kvantisert i hele antall liter – hvilket selvsagt ikke er en fundamental egenskap ved melk, men noe produsentene har valgt. Men i kvantefysikken er det regelen snarere enn unntaket at målbare størrelser (eksempelvis energier/hastigheter, elektrisk motstand med mer) bare kan anta visse, diskrete verdier og aldri noen verdier som ligger mellom disse – og her er dette en fundamental egenskap ved naturen.

*Interferens:* Kaster man to stener i vannet, vil ringformede bølger bre seg på vannoverflaten rundt dem. Der disse bølgene møtes og overlages, oppstår et såkalt interferensmønster. På lignende måte kan man lage interferensmønster av (laser)lys ved å skinne lyset gjennom to smale spalter i en vegg – spaltene spiller da tilsvarende rolle som de to punktene der stenene traff vannflaten, og lysbølger brer seg fra hver av dem og overlages. Men det som er umulig å forstå utfra klassisk tenkemåte, er at man faktisk kan lage interferensmønster med atomer (og andre kvantepartikler)! Dette gjøres på helt tilsvarende måte ved å skyte atomene gjennom en dobbeltspalte. Interferensmønsteret som oppstår er umulig å forklare dersom man tenker på atomer som små klumper (en atomkjerne med elektroner som beveger seg rundt den) – det er en uomtvistelig demonstrasjon av kvantepartikkelens iboende bølgeegenskaper. Eksperimentell forskning på slik materiebølgeinterferens er fortsatt et høyst aktivt og spennende forskningsfelt (Hornberger 2012: 157, Treutlein 2015: 832).

### **Kvantefysikk i lave dimensjoner, topologi og Nobelpriser**

Vi er vant til å tenke på at vi lever i en tredimensjonal verden. Men i visse materialer er det mulig å skape to- eller éndimensjonale (kvante)verdener, der for eksempel atomer eller elektroner er fanget på en todimensjonal flate

eller langs en endimensjonal linje. (Mer om dette senere). Og som om ikke kvantefysikken var sær nok i tre dimensjoner, så viser det seg at den blir enda særere i en eller to dimensjoner. Det kanskje viktigste eksemplet på dette har med den grunnleggende kategoriseringen av (kvante)partikler å gjøre: Ser man i en hvilken som helst lærebok i grunnleggende kvantemekanikk, vil man lære at alle naturens elementærpartikler (og partikler sammensatt av disse) faller i én av to kategorier: De er enten fermioner eller bosoner. Eksempler på fermioner er elektroner, protoner, nøytroner, mens for eksempel fotoner (kvantepartiklene som lyset består av) er bosoner. De to kategoriene av partikler karakteriseres av vidt forskjellige egenskaper, som vi ikke skal gå inn på her.

Denne oppleste og vedtatte sannheten ble utfordret av nordmennene Leinaas og Myrheim som i 1977 viste at i *to* dimensjoner vil det, i tillegg til bosoner og fermioner, finnes uendelig mange andre mulige kategorier av partikler (Leinaas 1977:1). Disse fikk senere navnet anyoner. Denne teoretiske oppdagelsen var på mange måter forut for sin tid, for det skulle ta enda en del år før én- og todimensjonale kvantematerialer kunne fremstilles rutinemessig i laboratoriet. Men som vi skal se senere er anyoner selve grunnkonseptet i et stort internasjonalt forskningsfelt og satsningsområde der man blant annet har som mål å konstruere verdens mest robuste kvantedatamaskin.

Anyoner er bare ett eksempel på at kvantefysikken i én og to dimensjoner tillater fenomener som aldri vil kunne opptre i tre dimensjoner. Dette er selvsagt av fundamental interesse i seg selv, og mye god teoretisk grunnforskning er gjort og gjøres på dette feltet. Men det ga opplagt en ekstra dimensjon (sic) til fagfeltet da flere og flere lavdimensjonale materialer kunne framstilles i laboratoriet. Dette ga muligheter til å teste teoriene, og åpnet dessuten muligheten for å tenke ut potensielle nye teknologiske anvendelser av disse kvanteeffektene.

Når vi sier at et materiale er todimensjonalt, så mener vi at partiklene vi studerer, for eksempel elektroner (ladningsbærerne i elektrisk strøm) bare kan bevege seg i et plan, som på en bordplate, men ikke i retningen ut av planet ("opp eller ned"). Bak dette utsagnet ligger det kvantefysiske prinsippet om kvantisering som vi nevnte tidligere: Den tillatte energien i den bevegelsesretningen vi ønsker å "forby", må være kvantisert på en slik måte at det vil koste våre partikler en uoverstigelig stor energi å ta i bruk denne retningen i sin bevegelse. Skal systemet være effektivt éndimensjonalt, må *to* av de tre bevegelsesretningene være "forbudt" ved slike energigap.

Vi skal her bare nevne noen få konkrete eksempler på lavdimensjonelle materialer. Opprinnelig fantes de primært i halvledermaterialer. For eksempel kunne man sette sammen to spesielle slags halvlederkrystaller på en slik måte at elektroner ble fanget i grenseflaten mellom disse, og dermed hadde man skapt en todimensjonal elektrongass. Et annet materiale der elektroner er kvantemekanisk todimensjonale er grafen – et enkelt lag av karbonatomer organisert i et heksagonalt gitter. Grafen kan rulles sammen til veldig tynne rør, såkalte karbon-nanorør. I disse oppfører elektronene seg éndimensjonalt, som om verdenen de lever i bare er en linje. Videre har det vært en rivende utvikling innen den eksperimentelle atomfysikken de siste årtiene, der det er utviklet teknikker for å fange visse typer atomer ved hjelp av elektromagnetiske feller slik at gassen er begrenset til et plan (som en pannekake), en linje, flere parallelle plan eller linjer, eller nesten en hvilken som helst konfigurasjon man måtte ønske.

Det første av de nevnte eksemplene, den todimensjonale elektrongassen i halvlederkrystaller, har vært av spesielt stor betydning for fagfeltet. Det var i denne settingen man oppdaget den såkalte kvante-Halleffekten (Hansson 2017:1), ett av de mest studerte fenomener i kondenserte fasers fysikk de siste 30 årene. Her var det så mye fundamentalt ny fysikk at kvante-Halleffekten er belønnet med hele tre Nobelpriser siden dens oppdagelse (1985, 1998, 2016)... Eksperimentet går ut på at man utsetter den todimensjonale elektrongassen for et ekstremt sterkt magnetfelt og ekstremt lave temperaturer (en brøkdeler av én grad over det absolutte nullpunkt) og så studerer den elektriske motstanden i materialet. Det viser seg da at motstanden – nærmere bestemt den såkalte Hallmotstanden – er kvantisert. Den kan bare anta visse, diskrete verdier. Disse verdiene er uavhengige av detaljer i eksperimentet, og kvantiseringen er så presis (en til tusen milliarder) at dette eksperimentet nå brukes til å definere den internasjonale SI-standarden for elektrisk motstand.

Samtidig med at denne ultrapresise kvantiseringen har fått en praktisk nytteverdi, er den en direkte manifestering av fundamentalt ny fysikk som har ført til store mengder grunnforskning og uante teknologiske muligheter: Egenskapene (de mulige tilstandene) til kvante-Hallsystemet karakteriseres og klassifiseres som såkalte topologiske faser, som vi skal komme tilbake til om et øyeblikk. Det viktigste poenget for senere deler av foredraget er at i denne settingen finner man anyoner! Disse norsk-oppdagede, sære kvantepartiklene som bare kan eksistere i to dimensjoner er altså en fysisk realitet, og nå er de i vinden som aldri før i forbindelse med den ”andre kvanterevolusjonen” som vi skal snakke om litt senere.

Nobelprisen i fysikk i 2016 ble tildelt David J. Thouless, F. Duncan M. Haldane og J. Michael Kosterlitz ”for theoretical discoveries of topological phase transitions and topological phases of matter”. La oss prøve å forklare kort hva som menes med dette: De fleste er vant til å tenke på at stoff, for eksempel vann, kan eksistere i tre faser: Fast (is), flytende og gass (damp). Går man fra en av disse til en annen, for eksempel ved at is smelter til flytende vann, kalles det en faseovergang. Forskningen bak fjorårets Nobelpris tok for seg helt nye og revolusjonerende måter å klassifisere materialer på, og hvordan de endrer seg fra en fase til en annen. Grovt sagt gikk dette ut på en matematisk klassifisering av de mulige kvantemekaniske egenskapene i (primært) lavdimensjonelle materialer. Det som karakteriserer disse kvantemekaniske fasene, er en såkalt topologisk invariant, en eller annen størrelse som bare kan anta visse, diskrete verdier. En analogi til dette er at man kan ”klassifisere” en leireklump ved antallet hull den har gjennom seg. Siden det ikke finnes ”halve hull”, må dette alltid være et heltall, og dette heltallet er ”robust” ved at antall hull ikke endrer seg bare man forandrer litt på formen på leireklumpen ved å klemme eller strekke litt. Det er denne topologiske klassifiseringen som ligger bak robustheten til disse tilstandene – som at den tidligere nevnte Hall-motstanden er så nøyaktig kvantisert, uavhengig av små detaljer i materialet/eksperimentet. Hall-motstanden er klassifisert ved en topologisk invariant og er dermed nødt til å ha visse, veldig presise verdier.

Kvante-Halleffekten er historisk sett første eksempel, prototypen, på en stor klasse ”topologiske materialer” som er oppdaget med tiden. Det Nobelprisen hedret var teoretisk, visjonær grunnforskning uten tanke på eventuelle anvendelser. Men samtidig er topologiske materialer og anyonene i disse høyaktuelle nå som mulig arena for framtidens kvantecomputere. Mer om dette litt senere.

### **Teknologi med kvante, og kvanteteknologi (AKA første og andre kvanterevolusjon)**

Historien har vist gang på gang at rent nysgjerrighetsdrevet grunnforskning, motivert utelukkende av et ønske om å forstå naturen, på sikt også fører til ny teknologi. Så også med kvanteteorien. Transistoren er blitt omtalt som ”verdens viktigste oppfinnelse” – en oppfinnelse som ble til nærmest ved en tilfeldighet da Walter Brattain, John Bardeen og William Shockley ved Bell Labs studerte egenskapene til visse halvledermaterialer rett etter andre verdenskrig. De mottok Nobelprisen for dette i 1956. Transistoren er selve



grunnstenen i all moderne datateknologi, det finnes millioner og milliarder transistorer i hver datamaskin, mobiltelefon og lignende. Dens funksjonalitet baserer seg på halvledere, som ikke kan forstås uten bruk av kvantefysikk. Dette er bare ett eksempel på teknologi der kvantemekanismer spiller en avgjørende rolle for funksjonaliteten. Noen andre stikkord er lasere, LED-pærer, superledere, fiberoptisk kommunikasjon, solceller, ... I tillegg er det slik at teknologien blir mer og mer kompakt. Der det i 1967 var to transistorer på en microchip, og fem millioner i 1997, er man i dag oppe i milliarder. Da blir ting så små at også utilsiktede kvanteeffekter kan komme inn, som for eksempel tunnelering av elektroner mellom ulike komponenter på en chip. Både for å unngå uønskede effekter og for å utnytte mulighetene disse kvanteeffektene gir, trengs en teoretisk forståelse av kvantefysikken bak. En del av materialene som inngår i den moderne teknologien, er forøvrig lavdimensjonale. Slik sett er den teoretiske grunnforskningen på lavdimensjonell kvantefysikk også viktig i lys av den teknologiske utviklingen.

Utviklingen fra kvantefysikkens spede begynnelse og fram til denne typen kvantebasert teknologi, omtales ofte som første kvanterevolusjon. Den såkalte *andre* kvanterevolusjonen, som er i gang nå, går et skritt videre: Her ønsker man mer spesifikt å skape, manipulere og bruke kvantetilstander i fundamentalt nye typer teknologi. For eksempel er det snakk om aktivt å utnytte rene kvanteeffekter som sammenfiltrering. Ett hovedmål på sikt er å skape fungerende kvante-datamaskiner, men det er også snakk om anvendelser innen sensorteknologi, kryptografi med mer. Samlebegrepet for denne utviklingen er Kvanteteknologi, og dette er noe det satses stort på internasjonalt for øyeblikket. Ikke minst er dette tema for EUs nye Flagship, som finansieres med ti milliarder kroner over ti år og starter opp i 2018. Blant de store målene for denne satsningen er en såkalt topologisk kvantedatamaskin. Grunnideen her er å bruke visse typer anyoner i topologiske materialer til å kode informasjon. Grunnen til at dette ansees som en lovende vei å gå er den tidligere omtalte robustheten til de topologiske tilstandene – den kodede informasjonen vil ikke så lett gå tapt gjennom ytre forstyrrelser, urenheter i materialet osv. Dette i motsetning til mange andre kandidater for kvantedatamaskiner, der dette ”informasjonstapet” (såkalt dekoherens) skaper praktiske begrensninger. Det er gjort mye teoretisk forskning på topologisk kvante-computing gjennom en årrekke, og man er enig om at en topologisk kvantedatamaskin vil ha stort potensial og en uovertruffen robusthet dersom det er mulig å bygge den. Dessverre er det høyst ikke-trivielt å framstille materialene det er snakk om, å skape anyoner, påvise at de er der, for ikke å

snakke om å kontrollere dem, og så skalere dette opp fra små prototyper (få qubiter) til faktiske kvante-datamaskiner. Men akkurat nå er det en stor verdensomspennende teknologisk satsning og utvikling på gang, og det er nylig gjort store gjennombrudd i arbeidet med å skape og påvise såkalte Majorana-partikler, se for eksempel (Pribrig 2017:252). Majorana-partiklene er en eksotisk type anyoner som er spesielt interessante i denne sammenhengen, og de er observert i blant annet meget tynne halvledertråder som ligger inntil en superleder og utsettes for et magnetfelt. Likevel er det langt igjen til en faktisk kvantedatamaskin – ikke bare skal man kontrollere og ”masseprodusere” Majorana-partikler, men for å skape en fullgod kvantedatamaskin holder det faktisk ikke med disse Majorana-anyonene. Man trenger enda ”særere” anyoner, som det per i dag bare finnes hypotetiske, teoretiske scenarier for. Men den imponerende framgangen de senere år og den store internasjonale satsningen gir grunn til å tro at mye spennende vil skje på dette området framover.

### **Avsluttende ord**

Som dette foredraget forhåpentligvis har vist, så fortsetter altså kvante-verdenen å fascinere, overraske og inspirere til teknologisk utvikling, godt over hundre år etter kvantefysikkens spede begynnelse. En uforutsett utvikling som har gjort seg gjeldende de siste årtiene, er den fundamentalt nye fysikken en finner i kollektive fenomener i lavdimensjonale systemer – og spesielt da de topologiske materialene. En annen viktig konklusjon fra dagens foredrag er at de store gjennombruddene i vitenskapen oftest kommer i nysgjerrighetsdrevet grunnforskning, og at ny teknologi vanligvis følger i kjølvannet. Fjorårets Nobelpris i fysikk hedrer nettopp viktigheten av slik langsiktig, visjonær grunnforskning. Samtidig er den såkalte ”andre kvanterevolusjonen” i gang, med massiv forskning på framtidens kvanteteknologi. Det blir spennende å følge med på denne utviklingen i årene som kommer.

### **Litteratur**

- Hansson, Thors Hans, Maria Hermanns, Steven H. Simon og Susanne F. Viefers 2017. ”Quantum Hall physics: Hierarchies and conformal field theory techniques.” *Reviews of Modern Physics*, vol. 89, s. 025005-1 – 025005-61.
- Hornberger, Klaus, Stefan Gerlich, Philipp Haslinger, Stefan Nimmrichter og Markus Arndt 2012. ”Colloquium: Quantum interference of clusters

and molecules.” *Reviews of Modern Physics*, vol. 84, s. 157–173.

Leinaas, Jon Magne og Jan Myrheim 1977. ”On the theory of identical particles.” *Nuovo Cimento B*, vol.37, s. 1–23.

Pribiag, Vlad S. 2017. ”A twist on the majorana fermion.” *Science*, vol. 357, s. 252–253.

Treutlein, Phillipp 2015. ”Matter-wave interference: Nanomechanical answer to Einstein.” *Nature nanotechnology*, vol. 10, s. 832–833.

