

Hvordan oppfatter fysikkelever og –studenter sentrale begreper i kvantefysikk?

Carl Angell og Ellen K. Henriksen

Innledning

I prosjektet **ReleKvant - Begrepsutvikling og erkjennelse i relativitetsteori og kvantefysikk** (<http://www.mn.uio.no/fysikk/forskning/prosjekter/relekvant/>) ønsker vi å finne ut hvilken forståelse fysikkelever og -studenter har av noen sentrale begreper innen disse fagområdene og bruke dette til å utvikle bedre undervisning. ReleKvant er et forskningsprosjekt i samarbeid mellom Universitetet i Oslo og flere utdanningsinstitusjoner.

For å kartlegge elevers og studenters forståelse av noen sentrale begreper i kvantefysikken utviklet prosjektgruppa et spørreskjema som ble gitt til elever ved tre videregående skoler, samt studenter på kvantefysikkemnet FYS2140 ved Universitetet i Oslo, våren 2013. Spørreskjemaet er i to versjoner, ett for Fysikk1 elever og ett for Fysikk2 elever og studenter ved UiO. Det var både avkryssnings spørsmål og åpne spørsmål der respondentene skulle skrive egne kommentarer. Spørreskjemaet er elektronisk («Nettskjema»). På grunn av en feil i spørreskjemaet kan vi ikke skille studentene fra elevene, slik at svarene fra Fysikk 2-eleven vises i denne rapporten sammen med svarene fra universitetsstudentene. I det følgende oppsummerer vi svarene vi fikk fra hver av gruppene. Spørsmålene er i samme rekkefølge som de var i spørreskjemaet. Det kom inn 52 svar fra Fysikk 1-elever, og 56 svar fra Fysikk 2-elever og fysikkstudenter til sammen.

Fysikk 1-elevenes svar

Hvilken av påstandene under synes du er den mest dekkende beskrivelsen av lys, ut fra det du har lært i din fysikkutdanning så langt?

Svar	Antall	Prosent
Lys er både bølger og partikler	40	82 %
Lys er partikler	2	4 %
Lys er enten bølger eller partikler	4	8 %
Lys er bølger	2	4 %
Lys er verken bølger eller partikler	0	0 %
Annet – forklar eller kommentér	1	2 %
TOTALT	49	100 %

Tabell 1: Beskrivelse av lys – Fysikk 1-elevenes svar

De fleste svarer som vi ser av tabell 1, at lys er både bølger og partikler. De fire elevene som har svart at lys enten er bølger eller partikler, er alle jenter. Det er bare en som har kommet med en kommentar: «Lys er partikler som oppfører seg som bølger». Vi kan også merke oss at ingen mener at lys er *verken* bølger eller partikler.

I kvantefysikken brukes ofte begrepene «bølgeegenskaper» og «partikkelegenskaper» (eller «bølge-partikkel-dualisme») om lys. Hva legger du i disse begrepene?

Det er 45 elever som har svart på spørsmålet. Den største gruppen (14 elever) gjentar mer eller mindre opplysningene i spørsmålet, at lys har bølge- og partikkelegenskaper. F. eks.: «Lys har egenskaper som bølger og som partikler». Eller mer utfyllende: «Lys er unikt i at det kan oppføre seg som både bølger og som partikler. Det kommer an på hvordan man utfører et forsøk, men også om man observerer lyset eller ikke. Enkelt forklart så kan lys både oppføre seg som bølger, det har da bølgeegenskaper, og det kan oppføre seg som partikler, det har da partikkelegenskaper».

Seks elever fremhever forskjellen mellom interferensfenomener og en partikkelbeskrivelse. En skriver: «bølgeegenskaper interferens, partikkelegenskaper kvantisert». En annen: «At lys har egenskaper som klassifiserer det til å være både bølger og partikler. Eks: «Bølge pga interferens, men partikkel pga. at energi sendes ut som energikvant».

Noen fremhever hva bølge- og/eller partikkelegenskaper er. For eksempel: «Bølgeegenskaper, bølgelengde, frekvens, amplitude. Partikkelegenskaper, egenskapene til partikler, energi, fart».

Det er få som har noe begrep om bølge-partikkel-dualisme, men det er i alle fall en som skriver følgende: «Lys kan opptre både som bølger og partikler. Når en skal se på absorpsjonsspektre og emisjonsspektre er det naturlig å se på lys som bølger. Ved eksitering av atomer og energinivåer ser vi på lys i form av fotoner. Bølge-partikkel-dualisme er vel da man må ta hensyn til lysets bølge og partikkelegenskaper samtidig.»

Hvilken av beskrivelsene under er mest dekkende for hvordan du tenker på elektronet i et hydrogenatom?

Svar	Antall	Prosent
Elektronet beveger seg rundt atomkjernen i en bestemt sirkelbane.	4	8 %
Elektronets posisjon på et gitt tidspunkt er helt ubestemt.	4	8 %
Elektronets posisjon på et gitt tidspunkt kan beskrives av en elektronsky.	13	27 %
Elektronet beveger seg rundt atomkjernen i en bølgeformet bane.	0	0 %
Rundt atomkjernen er det flere elektronskall som elektronet kan være i. Når atomet er i grunntilstanden, vil elektronet være i det innerste skallet.	25	51 %
Annet – forklar eller kommentér	3	6 %
TOTALT	49	100 %

Tabell 2: Elektronet i hydrogenatomet – Fysikk 1-elevenes svar

Som vist i tabell 2 har de fleste en oppfatning av at elektronene i et hydrogenatom kan være i ulike skall. Men det er også en del som beskriver elektronene i en elektronsky. Det er få som kommenterer, men her er et sitat: «Elektronet befinner seg i nærheten av kjernen. Det beveger seg ikke i faste baner eller mønstre, men flytter seg rundt hele tida. Det finnes imidlertid enkelte områder hvor det er mer sannsynlig å finne et elektron, dette er de såkalte "elektronskalla". Skalla er bare tenkte. Elektronene befinner seg i orbitaler, og der disse ligger i nærheten av hverandre er det mer sannsynlig at vi finner et elektron. Der er det altså et "skall"». Det er mye som tyder på at «skallbegrepet» er mye brukt i kjemien og at mange elever kan ha det med seg derfra.

Hvordan vil du beskrive et foton?

Det er 48 elever som har svart på spørsmålet. De aller fleste beskriver noe som de fleste fysikere vil oppfatte som sentralt ved fotonbegrepet. Den største gruppen, på 31 elever, har med at et foton er en partikkel med en viss energi, en energipakke eller porsjon energi. For eksempel: «en kvantisert energipakke» eller «et foton er en slags liten energipakke». Noen legger også vekt på sammenhengen med det elektromagnetiske spekteret: «Et foton er en partikkel med en viss energi, kan forekomme som lys eller andre elektromagnetiske bølger». Formuleringen at fotonet kan «forekomme som bølger» er vel et eksempel på hvor vanskelig det er å forstå, og ordlegge seg, i dette feltet og hvor mange forvirrende formuleringer som kan finnes i lærebøker angående fotoner, noe som også ble bemerket av Reidun Renstrøm (2011). Det er også 12 elever som har med fotonenes sammenheng med absorpsjon og emisjon i atomer. En elev skriver: «Et foton er en energikvant, altså en bestemt mengde energi som sendes ut når et elektron går fra ett energinivå til et lavere». Men det forekommer også noen litt mer «alternative forestillinger»: «Foton kan være forskjellige farger eller lengder, det kommer an på hvilket atom som eksiteres».

Hva betyr det at noe er kvantisert? Gi eksempler

Her er svarene mer upresise og til dels ikke riktige. Det er også flere som svarer vet ikke. Men de fleste som skriver en noenlunde akseptabel forklaring er inne på at det er noe som er udelelig, at det finnes minstedeler, at det er delt opp i pakker eller at det er knyttet til bestemte energinivåer i atomer. For eksempel: «noe som er delt opp i minstedeler, størrelsen ikke lenger vilkårlig verdier, men bare spesielle verdier som avhenger av Plancks konstant». Eller: «Det betyr at det er i et bestemt energinivå». Videre skriver en: «Når noe er kvantisert befinner det seg i en tilstand med kun gitte størrelser. F.eks. et elektron kan kun befinne seg i gitte baner tilsvarende gitte energimengder, og kan ikke befinne seg mellom skallene. Dermed kan ikke energitilstanden til elektronet være hva som helst, man bare ha den energien som energibanene til atomet har». Og til slutt: «Det betyr at den tingen bare kan "eksistere" i en del gitte tilstander, og at den "hopper" mellom disse. Den kan ikke gå mellom tilstandene eller ligge mellom dem. Siden jeg bare har hatt fysikk 1 kommer jeg ikke på andre eksempler enn energinivåene i atomet og "elektronskallene"».

Jeg synes det er mer/mindre interessant å lære om kvantefysikk sammenlignet med andre deler av fysikken

Svar	Antall	Prosent
...mer interessant...	33	66 %
...mindre interessant...	17	34 %
Totalt	50	100 %

Tabell 3: Fysikk 1-elevenes interesse for kvantefysikk

Et klart flertall synes altså at kvantefysikken er mer interessant enn andre deler av fysikken. I det følgende ser vi på noen av begrunnelsene elevene har for sine svar.

Jeg synes det er mer/mindre interessant å lære om kvantefysikk sammenlignet med andre deler av fysikken, fordi...

Det er 49 elever som har skrevet en kommentar. Den største gruppen som svarer at kvantefysikk er mer interessant, skriver noe om det grunnleggende perspektivet kvantefysikken gir, og at det er nytt. En skriver: «Det er noe av det helt grunnleggende i fysikken». Og en annen: «det er kunnskap som ligger på fronten av forskningsfronten. Det er så mye vi fortsatt ikke forstår og akkurat kvantefysikk har en del ideer som krever at en må tenke på verden på en litt annen måte».

Mange skriver også at det er interessant og spennende, slik som denne eleven: «jeg hørte en del om det før jeg begynte med fysikk, og det at lys kan oppføre seg forskjellig ut i fra om vi observerer det eller ikke skapte stor interesse for kvantefysikk».

Av de som krysser av for at kvantefysikken er mindre interessant, er det flest som peker på at kvantefysikken er vanskelig og teoretisk. En elev skriver: «Det er litt vanskelig forklart i læreboken, mye som er det samme, bare motsatt, og ikke så lett å se for seg».

Jeg bruker læreboka

Svar	Antall	Prosent
Rom Stoff Tid	12	23 %
ERGO	40	77 %
Totalt	52	100 %

Tabell 4: Læreverk som Fysikk1-elevne bruker

Det er en overvekt av Ergo-brukere.

Jeg er

Svar	Antall	Prosent
Jente	28	54 %
Gutt	24	46 %
Totalt	52	100 %

Tabell 5: Fysikk 1-respondentenes kjønn

Jentene ser ut til å være litt overrepresentert blant respondentene: Vi kjenner ikke den nøyaktige kjønnsfordelingen på de tre skolene som har deltatt her, men på landsbasis utgjør jentene 42 % av Fysikk 1-elevene.

Oppsummering

Til tross for at begrepene i kvantefysikk er vanskelige og at kvantefysiske fenomener er fremmedartet for de fleste, er det mange fysikk1 elever i denne undersøkelsen som svarer forholdsvis godt på flere spørsmål. Men ikke uventet er det få som for eksempel har klare forestillinger om hva som menes med bølge-partikkel dualisme.

Elektronskall-modellen er mer utbredt enn elektronsky-modellen blant disse elevene. Det betyr altså at de ikke har en statistisk tolkning av elektronet i et hydrogenatom.

Begrepet foton og det at noe er kvantisert er også begreper som nok er uklare for mange. Men likevel er det mange gode tilløp til ganske gode formuleringer. Det er faktisk få som har åpenbare misoppfatninger eller alternative forestillinger.

Det er også verdt å merke seg at flertallet blant disse elevene sier at kvantefysikk er mer interessant enn andre deler av fysikken. Dette kan henge sammen med at mange fysikkelever er fascinert av de mer «eksotiske» fenomenene og filosofiske aspektene ved faget (Angell et al., 2004).

Fysikk 2-elevenes og fysikkstudentenes svar

Hvilken av påstandene under synes du er den mest dekkende beskrivelsen av lys, ut fra det du har lært i din fysikkutdanning så langt?

Svar	Antall	Prosent
Lys er både bølger og partikler	39	72 %
Lys er partikler	0	0%
Lys er enten bølger eller partikler	1	2 %
Lys er bølger	0	0 %
Lys er verken bølger eller partikler	5	9 %
Annet – forklar eller kommentér	9	17 %
Totalt	54	100 %

Tabell 6: Beskrivelse av lys – Fysikk 2-elevenes og studentenes svar

De fleste svarer som vi ser av tabell 6, at lys er både bølge og partikkel. Også de 9 (bare gutter) som har svart «Annet» har skrevet at lys oppfører seg som både bølge og partikkel, at lys viser bølge- og partikkelegenskaper, at forsøk viser at lys kan oppføre seg som både bølger og partikler under forskjellige omstendigheter eller lignende. I denne respondentgruppa er det 5 som har krysset av for at lys *verken* er bølger eller partikler. En slik tolkning er i tråd med det som Ireson (2000) anbefaler for kvantefysikkundervisningen: Begreper som «bølge-partikkel-dualisme» og «materiebølger» unngås; både fotoner og elektroner beskrives som «ikke partikler, ikke bølger, men kvanteobjekter».

En interessant kommentar fra han som krysset av for at lys verken er bølger eller partikler er følgende: «I noen tilfeller oppfører lys seg som partikler, mens andre ganger som bølger. Ettersom ingen av modellene er tilfredsstillende alene, er det ikke usannsynlig at det er en helt ny modell som bør brukes».

I kvantefysikken brukes ofte begrepene «bølgeegenskaper» og «partikkelegenskaper» (eller «bølge-partikkel-dualisme») om lys. Hva legger du i disse begrepene?

Det er 50 (av 56) som har svart på spørsmålet. Mange gir mer eller mindre presise forklaringer på hva de mener med bølger og partikler, og at lys har begge egenskaper. For eksempel: «At lys har noen egenskaper som kan beskrives ved at man ser på lys som bølger og noen egenskaper som kan beskrives ved at man ser på lys som partikler». Noen fremhever også det eksperimentelle aspektet: «At lys ved noen eksperimenter utviser bølgeegenskaper (som interferens etc., mens det i andre oppfører seg som partikler (f.eks. fotoelektrisk effekt))».

Selv om det ikke er så mange som problematiserer begrepet dualisme, er det noen som forsøker seg. For eksempel: «Dualisme: noe som ser ut til å opptre på to (gjerne motstridende) måter samtidig. Bølgeegenskaper: evnen noe har til å oppføre seg på en måte man tradisjonelt har forbundet med bølger (interferens, bølgelengde, frekvens etc.) Partikkelegenskaper: evnen til å oppføre seg som et kjedelig, solid objekt (f.eks. evnen til å støte mot materie)». Eller: «Med "bølgeegenskaper" menes de

egenskapene ved lyset som gjør at det kan knyttes til bølger - f.eks. interferensmønstre som dannes etter en dobbeltspalt med monokromatisk lys. Med "partikkelegenskaper" menes de egenskapene som gjør at lyset kan tilordnes en partikkelnatur, f.eks. at man kan tolke et foton som en energipakke med $E = hf$. "Bølge-partikkel-dualisme" er da en betegnelse på at lyset opptrer med både bølge- og partikkelegenskaper, alt ettersom hvilken sammenheng man studerer lys i».

I Rolf V. Olsens (1999) undersøkelse av elevers kvantefysikkforståelse svarte de fleste elevene at lys kan oppføre seg som både bølger og partikler, mens langt færre elever mente det samme om elektroner. Olsen bemerket også at mange elever er i stand til å beregne f.eks.



Figur 1: Fra Rolf V. Olsens hovedoppgave, 1999.

materiebølgelengden for et elektron, men de har ikke alltid en konseptuell forståelse av hva beregningene betyr. Olsen foreslo at man burde unngå å bruke begrepet «bølge-partikkel-dualisme», siden elever kan ha (alternative) forestillinger hvor de knytter enkle konkrete bølgeegenskaper til en ellers klassisk partikkel (se figure 1).

Undersøkelsene til Reidun Renstrøm (2011), bl.a. av lærebøkers beskrivelse av fotoner, har påvist formuleringer som er egnet til å skape forvirring heller enn klarhet, som f.eks. at fotonet er «en bølgete partikkel», at fotoner er «partikler som brer seg som bølger» osv.

Hvilken av beskrivelsene under er mest dekkende for hvordan du tenker på elektronet i et hydrogenatom?

Svar	Antall	Prosent
Elektronet beveger seg rundt atomkjernen i en bestemt sirkelbane.	1	2 %
Elektronets posisjon på et gitt tidspunkt er helt ubestemt.	5	9 %
Elektronets posisjon på et gitt tidspunkt kan beskrives av en elektronsky.	29	54 %
Elektronet beveger seg rundt atomkjernen i en bølgeformet bane.	0	0 %
Rundt atomkjernen er det flere elektronskall som elektronet kan være i. Når atomet er i grunntilstanden, vil elektronet være i det innerste skallet.	8	15 %
Annet – forklar eller kommentér	11	20 %
Totalt	54	100 %

Tabell 7: Elektronet i hydrogenatomet – Fysikk 2-elevenes og studentenes svar

I tabell 7 ser vi at elektronskymodellen har tatt over for skallmodellen som den dominerende blant respondentene (jfr. tabell 2). Ideen om at elektronet best kan beskrives med en elektronsky, dominerer svarene. Det er bare én som har en forestilling om elektronet i en bestemt sirkelbane rundt kjernen. Men det er 8 som krysser av for at en skallmodell er den beste beskrivelsen. Alle de 14 som kommenterer dette spørsmålet, skriver noe om sannsynlighet for å finne et elektron beskrevet av en elektronsky. For eksempel: «Jeg tenker både at elektronsky og ulike elektronbaner som

beskriver plasseringen av elektronene som skiller de ulike atomene som passende beskrivelse av elektroner, men i et hydrogenatom er det bare ett elektron hvor det da ikke er aktuelt med flere skall i dette atomet. Elektronets posisjon kan ikke beskrives nøyaktig ut fra ett gitt tidspunkt, Heisenbergs uskarphetsrelasjon, men en elektronsky vil gi ett innblikk i hvor det er mest sannsynlig at den vil befinne seg rundt atomkjernen". Eller kort og godt: «Sannsynligheten for å finne et elektron på et bestemt sted kan beskrives av elektronsky modellen».

Hvordan vil du beskrive et foton?

Det er 51 som har svart på dette spørsmålet. De aller fleste gjør gode forsøk på å skrive noe meningsfullt om fotonet. Den største gruppen (16 personer) skriver noe om fotonet som en «energipakke». For eksempel: «"Energipakke" med bølgelengde og frekvens, beveger seg med lyshastigheten (i vakuum, vel å merke)». Eller: «En mengde energi som har både bølgeegenskaper og partikkelegenskaper, og som beveger seg med lysets hastighet».

En annen gruppe av svar (14 personer) legger vekt på at fotonet er en masseløs partikkel. For eksempel: «Et foton er en masseløs partikkel som har en frekvens og bølgelengde, og beveger seg i lysets hastighet». En slik masseløs partikkel blir også av noen beskrevet som et energikvant eller bærer av energi, som for eksempel: «Et foton er en partikkel uten masse som bærer på energi».

Det er også noen som beskriver fotonet som en bølgepakke eller lypakke: «En reisende bølgepakke. Det er da en krysning mellom en bølge og en partikkel, slik at vi kan tenke på det som begge deler».

I det følgende kommer to sitater som kanskje uttrykker noe mer mangelfull forståelse for fotonbegrepet: «Som et lite lysglimt». Og: «Jeg forestiller meg en strøm av partikler som til sammen utgjør en bølge. Det virker som en brukbar forestilling for å fremheve at vi noen ganger må betrakte fotoner som bølger og andre ganger som partikler».

En (mest sannsynlig en av studentene) har en helt annen tilnærming til begrepet: «Fotonet er, så vidt jeg har forstått det, bærer-partikkelen for den elektromagnetiske kraften».

Hva betyr det at noe er kvantisert? Gi eksempler.

Det er 46 som har gitt svar på dette spørsmålet. De aller fleste legger vekt på at kvantisert betyr noe som bare kan ha diskrete verdier og gir eksempler fra atomfysikken. For eksempel: «Dvs at noe kun består av diskrete verdier f.eks 1,2,3 osv. og at det ikke er mulig å ta verdier mellom disse. Energien til elektroner i atomer er eksempler på dette». Eller: «At det kun forekommer i et visst antall, for eksempel ett elektron, to elektroner osv. Man kan da ikke ha for eksempel 1,74 elektroner».

Noen har også med en mer konkret forklaring på hva de mener med kvantisert. For eksempel: «En trinnvis inndeling, i motsetning til en kontinuerlig inndeling. Eks.1: Fysiske penger - Man har mynter eller sedler for 1, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500 og 1000 kroner. Dette er de eneste verdiene en pengeenhet kan ha. Det finnes ikke en 27,3-mynt eller -seddel. Eks.2: Energinivået til et elektron i et hydrogenatom. Elektronet kan bare være på visse energinivåer». Det er også noen få (sannsynligvis elever i fysikk 2) som sier de ikke har hørt om begrepet.

Hvilket av utsagnene under synes du er den beste formuleringen av Heisenbergs uskarphetsrelasjon?

Svar	Antall	Prosent
Alt i naturen er usikkert.	4	7 %
For noen par av fysiske størrelser er det umulig å snakke om noen absolutt nøyaktighet; uskarphet er en iboende egenskap ved naturen.	24	44 %
For noen par av fysiske størrelser er det en nedre grense for hvor nøyaktig vi kan måle begge størrelser samtidig, fordi enhver måling i seg selv introduserer en uskarphet.	23	43 %
Når vi gjør vitenskapelige eksperimenter, vil apparaturen og instrumentene vi bruker, alltid introdusere en viss usikkerhet i resultatene.	2	4 %
Annet - forklar eller kommentér...	1	2 %
Totalt	54	100 %

Tabell 8: Fysikk 2-elevenes og studentenes tolkning av Heisenbergs uskarphetsrelasjon

Her er det to formuleringer som forekommer hyppigst. Den ene (som vi oppfatter som den beste) peker på uskarphet som en iboende egenskap ved naturen. Flertallet blant guttene (49 %) og 27 % av jentene krysser av for dette alternativet. Den andre formuleringen legger vekt på at det er målingene som introduserer en uskarphet. Flertallet blant jentene (55 %) og 40 % av guttene krysser av her.

På hvilke måter kan vi si at kvantefysikken representerer et brudd med klassisk fysikk?

Det er 50 som har svart på dette spørsmålet. Mange av svarene inneholder noe om at i kvantefysikken, i motsetning til klassisk fysikk, opererer vi med sannsynligheter og at uskarphetsrelasjonen gjelder. Her er et sitat: «I kvantefysikken kan man ikke forutse utfall nøyaktig, i motsetning til den klassiske fysikken. I kvantefysikken er ting grunnleggende usikkert og man opererer med sannsynlighet og statistikk for å beskrive fenomener og forutse fordeling av utfall i det lange løp. Mens i den klassiske fysikken kan/skal modellene forutse enkeltutfall nøyaktig». Og et til: «I klassisk fysikk har man ingen uskarphetsrelasjoner, ingen størrelser er kvantifisert og man regner ikke med at det finnes tilfeldigheter i noen legemers bevegelse». En annen skriver: «Hvis man har fullstendig kunnskap om et system ved et gitt tidspunkt, kan man etter klassisk fysikk beregne akkurat hvordan systemet vil oppføre seg til evig tid fremover. Kvantefysikken bryter med dette, og grunnet den iboende usikkerheten i naturen vil man aldri kunne beregne 100 % nøyaktig et utfall i fremtiden».

Det er også noen som trekker inn noen mer filosofiske aspekter: «Den setter en spiker i kista for det deterministiske verdenssynet som hadde vært å tilstede siden antikken, og dominert totalt siden Newton. Kvantefysikken viser oss at selv om vi kjenner alle naturlover, og alle nåværende "tilstander" kan vi ikke avgjøre hvordan verden ser ut i morgen». Eller: «Kvantiseringen i brudd med kontinuitet Determinisme hører til klassisk fysikk, universet er basert på sannsynligheter. Lokal realisme - noe med at noe som skjer et sted, påvirker noe et annet sted...».

Beskriv med noen få setninger det du mener er essensen i kvantefysikken

Det er 47 som har svart på dette spørsmålet. Mange av svarene likner svarene på spørsmålet om kvantefysikkens brudd med klassisk fysikk. Her er et lite utvalg sitater. «Naturen har en iboende naturlig usikkerhet og uskarphet. Fenomener på kvantenivå kan ikke beskrives med klassiske fysikkmodeller og må forklares med sannsynlighetsmodeller. I kvantefysikken må man kanskje se bort ifra den intuitive forståelsen av verden, og heller se på den som teoretisk matematiske modeller». Videre: «På liten skala oppfører naturen seg helt annerledes enn vi er vant til, noen målbare størrelser kan bare ta visse kvantiserte verdier, og vi kan bare si noe om sannsynligheten for å gjøre en bestemt måling». Og: «Partikkelnatur er annerledes enn det vi med bakgrunn fra El.mag og mekanikk kan si noe om. Ting er veldig rart....». Til slutt: «Essensen i kvantefysikken er at verden er uskarpt og vi kan bare snakke om (ekte) sannsynlighet, at sammenfildrede fotoner kan "kommunisere" med hverandre fortere enn lysets hastighet, at energi er kvantisert og at dette er nødvendig for å forstå big bang».

Jeg synes det er mer/mindre interessant å lære om kvantefysikk sammenlignet med andre deler av fysikken

Svar	Antall	Prosent
mer interessant...	42	75 %
mindre interessant...	14	25 %
Totalt	56	100 %

Tabell 9: Fysikk 2-elevenes og kvantefysikkstudentenes interesse for kvantefysikk

Det er et solid flertall som sier at kvantefysikk er mer interessant. Fordelingen blant henholdsvis gutter og jenter er omtrent den samme. Nesten alle (53) kommenterer dette. Mange skriver at de tiltrekkes av det abstrakte, det uvirkelige, det mystiske eller det ubegripelige ved kvantefysikken. Flere er inne på at kvantefysikken handler om å forstå den verden vi lever i. Noen peker også på at kvantefysikk er moro, spennende og utfordrende. Det er nesten ingen som skriver at kvantefysikk er mindre interessant, men noen peker på at det er vanskelig og at matematikken kan være utfordrende.

En elev i videregående skole skriver: «det er enda mer ubegripelig enn resten av det vi har lært, og det bryter med mange dagligdags oppfatninger. Utfordrer den logiske tenkningen slik vi kjenner den, og tvinger deg til å tenke mer "abstrakt". Virker umulig å forstå, og det tiltrekker meg, det er nesten som om det er en annen verden. Kvantefysikk og astrofysikk er de mest interessante tingene vi har slumpet innom i løpet av vgs., forholdene er så ekstreme». En annen skriver: «Det er mer spesielt, sært, abstrakt osv. enn andre deler av fysikken (så langt jeg har kommet i løpet, i alle fall). Det forklarer det uforklarlige og kommer med fenomener som strider fullstendig mot all form for intuisjon». For noen er nok matematikken vanskelig. Det gjelder særlig studentene fordi matematikken i kvantefysikken i videregående skole er ikke spesielt komplisert. Her er hva en skriver: «jeg føler at man ofte blir for opphengt i regningen, slik at det spennende bak fysikken kan komme litt i skyggen. Jeg liker å kunne se hvordan det jeg regner på kan realiseres til virkeligheten, og ønsker derfor større fokus på eksempler hvor teorien anvendes». Til slutt kan det følgende være et passende sitat: «Det er mye mer spennende. Klarer ikke å forklare hvorfor. Ser på interessen som en iboende egenskap i meg selv».

Jeg er

Svar	Antall	Prosent
Jente	13	23 %
Gutt	43	77 %
Totalt	56	100 %

Tabell 10: Kjønnfordelingen til Fysikk 2-elevne og fysikkstudentene som svarte på undersøkelsen

Kjønnfordelingen viser stor overvekt av gutter – noe større enn man skulle forvente ut fra kjønnfordelingen av Fysikk 2-elever på landsbasis (73 % gutter) og fysikkstudentene på landsbasis (ca. 66 % gutter).

Oppsummering

Selv om svarene fra fysikk2 elevne og studentene ikke alle er like klare og presise, er det mange som har gode forsøk. Ganske mange svarer faktisk godt på flere spørsmål, og flere gir uttrykk for at de har tenkt mye rundt kompliserte begreper og fenomener som er fremmedartede for mange.

Svarene her viser ikke uventet en dypere forståelse for begreper og fenomener enn fysikk1 elevne viste. For eksempel er det nå elektronskymodellen som klart dominerer svarene om hvordan en skal beskrive elektronet i et hydrogenatom.

Beskrivelsen av et foton og hva det vil si at noe er kvantisert er også gjennomgående fint besvart. Men det er en som sier at et foton er et lysglimt, og det må vel sies å være en misoppfatning.

På spørsmålet om Heisenbergs uskarphetsrelasjon fordeler svarene seg i hovedsak på to like store grupper. Forestillingen om at dette dreier seg om måleusikkerhet og ikke om en iboende egenskap ved naturen, er altså ganske utbredt.

Det er flere interessante svar og kommentarer til kvantefysikkens brudd med klassisk fysikk og essensen i kvantefysikk. Det er til og med noen som trekker inn filosofiske aspekter. Det er jo av særlig interesse for fysikk2 elever fordi læreplanen her inneholder både filosofiske og erkjennelsesmessige elementer.

Det er et solid flertall som sier at kvantefysikk er mer interessant enn andre deler av fysikken. Mange skriver at de tiltrekkes av det abstrakte, det uvirkelige, det mystiske eller det ubegripelige ved kvantefysikken, og flere er inne på at kvantefysikken handler om å forstå den verden vi lever i. Det siste er også i overenstemmelse med tidligere funn om elevers og studenters interesser.

Referanser

- Angell, C., Guttersrud, Ø., Henriksen, E. K., & Isnes, A. (2004). Physics: Frightful, But Fun. Pupils' and Teachers' View of Physics and Physics Teaching. *Science Education*, 88(683-706).
- Ireson, G. (2000). The quantum understanding of pre-university physics students. *Physics Education*, 35(1), 15-21.
- Olsen, R. V. (1999). *Kvantefysikk i skolen*. Hovedoppgave, Universitetet i Oslo, Oslo.
- Renstrøm, R. (2011). *Kvantefysikkens utvikling - i fysikklærebøker, vitenskapshistorien og undervisning*. Doktoravhandling, Universitetet i Oslo.