

Øllen som kvantemekanisk system

Af Kaj Ove Roland

Selv om kvantemekanikken har eksisteret i mere end 60 år, er det først for ganske nylig, at nogen har tænkt på at anvende dens begrebsapparat på en øl. Det epokegørende fremskridt skete under *The Second Annual Seminar on Beer*, i Rågeleje, den 29. november 1985. Vi vil i denne artikel for første¹ gang offentliggøre de tanker, der dengang aftegnede sig i vore omtågede hjerner.

Betragt vort fysiske system, en simpel øl (figur 1a). En øl synes umiddelbart at besidde mange egenskaber, der vanskeligt lader sig omfatte af kvantesproget. Vor første opgave bliver da også – i overensstemmelse med god fysisk tradition – at abstrahere en smule. Vi vil *idealisere* vort fysiske system. Flaskens farve, form og rumindhold, øl-mærket og bryggeriet er alle detaljer, der er irrelevante for den følgende diskussion. Betragt en sådan idealiseret øl, en *kvante-øl* (figur 1b).



FIG. 1. a.:
EN SIMPEL
KØBMANDS-
ØL (CARLS-
BERG HOF).



FIG. 1. b.:
DEN IDEALISEREDE
ØL, KVANTE-
ØLLEN.

Kvanteøllen har to fundamentale frihedsgrader: Den kan være åbnet eller lukket. Og den kan være fuld eller tom. Den er således beskrevet ved blot to fysiske variable: *Åbningsgraden*, \hat{a} , der angiver om kapslen er fjernet eller ej. Og *fyldningsgraden*, \hat{f} , der angiver, hvorvidt øllen er fuld eller tom.

Begge variable kan opfattes som diskrete, med blot de to værdier, 0 og 1. Vi kan derfor nøjes med at introducere følgende fire øl-tilstande:

$ \text{🔒} \rangle$	lukket øl	($\hat{a} = 0$)
$ \text{🔓} \rangle$	åben øl	($\hat{a} = 1$)
$ \text{🍷} \rangle$	tom øl	($\hat{f} = 0$)
$ \text{🍺} \rangle$	fuld øl	($\hat{f} = 1$)

Man kan indvende, at en øl gives andre muligheder end blot de to: At være fuld eller tom. Hvordan passer en halvtom øl ind i formalismen? Hertil må siges, at for en ægte øldrikker er begrebet "en halvtom øl" ikke rigtig veldefineret. Han drikker nemlig sin øl i ét drag. Og flasken vil derfor i praksis altid være fuld eller (snarere) tom. Problemet er således ret akademisk. Men man kan, hvis man insisterer, fremstille en halvfuld øl som en kvantemekanisk superposition:

$$|\text{🍷} \rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\text{🔓} \rangle + |\text{🍺} \rangle) \quad (1)$$

Når øllen *forekommer* halvtom, skyldes det, at øjet ikke kan følge med i de hastige oscillationer (den halvtomme øl udgør ikke en stationær tilstand).

Svarende til de to fysiske observable, \hat{f} og \hat{a} , har vi to kvantemekaniske operatører, *drikke-operatoren* \mathbf{D} og *åbnings-operatoren* \mathbf{A} , hvormed vi kan virke på kvanteøllen.

Disse operatører svarer til de to mulige fysiske påvirkninger af kvanteøllen: Vi kan drikke den og vi kan åbne den. Den fundamentale pointe er nu følgende: *Operatorerne* \mathbf{D} og \mathbf{A} *kommutterer ikke!!* Dette kan let eksperimentelt verificeres: Fat om en tillukket øl, frisk fra købmanden. Virk først med åbningsoperatoren! Du har da en åben øl. Drik den! Du har da en tom øl (figur 2a). Omvendt: Start med at påvirke den tilkapslede øl med drikke-operatoren. Intet sker (den tilkapslede øl-tilstand er *egen-øl* for \mathbf{D} !). Prøv dernæst at åbne den. Du har da en åben, ikke-tom øl (figur 2b).

Skrevet i kvantesprogets kompakte notation, koger de ovenstående overvejelser ned til følgende:

$$[\mathbf{D}, \mathbf{A}] \neq 0. \quad (2)$$

Det er nu et velkendt træk ved kvantesproget, at ikke-kommutativitet mellem to kvanteoperatører medfører en komplementaritet mellem de tilhørende fysiske observable, altså i dette tilfælde mellem fyldningsgraden \hat{f} og åbningsgraden \hat{a} .

Med andre ord: Har vi en øl med en bestemt værdi for \hat{a} , dvs en øl, der er *enten* helt lukket *eller* helt åben, ja, så er mængden af øl i flasken *fuldstændig ubestemt!*

Omvendt, betragtes et øl-system, der med sikkerhed vides at være fyldt, er vi fuldstændig afskåret fra at udtale os om, hvorvidt kapslen sidder på eller ej. Ligeledes med en øl, der vides at være tom.

¹Oprindeligt publiceret i GAMMA nr. 65, 1986 [1].



IKKE-KOMMUTATIVITETEN AF FLASKEÅBNING OG ØLDRIKNING.
 FIG. 2a. (ØVERST): ÅBN FØRST OG DRIK DERNÆST!
 FIG. 2b. (NEVERST): RESULTATET AF AT DRIKKE FØR MAN HAR
 ÅBNET. (IKKE ANBEFALELSERVÆRDIGT...)

Vi ser, hvorledes kvantesproget giver anledning til uventede makroskopiske fænomener. De hidtidige betragtninger kan muligvis forekomme abstrakte og uventede. Imidlertid er det formalismens triumf, at den er i stand til at redegøre for et fænomen, der er uhyre velkendt, ikke blot blandt øldrikkere, men i langt bredere kredse. Dette vil vi i det følgende gøre rede for:

Indfør en ny operator, *fyldnings-operatoren F*, der virker ved at fylde øl på en flaske. Betragt en fuld øl! Virk på den med driknings-operatoren *D*! Man får da en tom øl, altså en $f = 0$ tilstand,

$$| \text{fuld} \rangle \xrightarrow{D} | \text{tom} \rangle \quad (3)$$

Prøv da at fylde denne tomme ølflaske op igen, dvs virk nu på systemet med fyldnings-operatoren *F*! Her må vi huske på, at da operatorerne *D* og *F* ikke kommuterer, har de ikke fælles egentilstande. Den tomme øl er følgelig en superposition af de to forskellige *f*-tilstande:

$$| \text{fuld} \rangle = \gamma_1 | \text{fuld} \rangle + \gamma_2 | \text{fuld} \rangle \quad (4)$$

Lad os virke med *F* på højresiden, led for led! Forsøger man at fylde en flaske uden kapsel, går det let og smertefrit, vi får en fuld flaske ud af det. Så langt så godt.

Forsøger vi imidlertid nu at fylde en flaske *med* kapsel, er det klart, at al den påfyldte øl vil rende ved siden af. Vi har derefter en tilstand sammensat *dels* af en tilkapslet ølflaske, *dels* af en masse øl hældt ud over gulvet. (Bemærk, at vi for at definere denne tilstand er nødt til at introducere nye begreber i formalismen ("øl udenfor flaske", "gulv"). Matematisk sker der det, at *F* drejer os ud af vort hidtidige Hilbert-rum, en detalje for feinschmeckere.)

Det er muligt, at γ_2 er meget lille i forhold til γ_1 , sådan at kun en meget lille del af den øl, vi søger at

påfylde, vil havne på gulvet. Men *netop* fordi *D* og *F* ikke kommuterer, ved vi, at γ_2 fundamentalt er $\neq 0$. Og at der derfor altid vil havne en ikke-forsvindende væskemængde på gulvet.

Vi står her overfor et velkendt empirisk fænomen: At det er umuligt at fylde øl på en ølflaske uden at spilde. Men *hvad vi ser er, at dette forhold kan føres tilbage til fundamentale kvantemekaniske principper, at det er et dybt resultat, affødt af ikke-kommutativiteten af D og F!!*

Dette var, hvad der blev opdaget ved ølseminaret i Rågeleje i 1985.

Selv om kvante-øl-dynamikken (QBD) således havde fejret sine første triumfer, stod der stadig væsentlige spørgsmål ubesvarede tilbage. F.eks.: Hvad er de eksakte værdier af γ_1 og γ_2 Dette spørgsmål blev taget op under *The Third Annual Seminar on Beer*, der fandt sted i Gilleleje fra den 3. til den 5. oktober 1986. Her forsøgte vi at foretage en empirisk bestemmelse: For vi ser jo, at har man en tom øl, er sandsynligheden for at finde den med kapsel lig med $|\gamma_2|^2$ og sandsynligheden for at finde den uden er $|\gamma_1|^2 = 1 - |\gamma_2|^2$.

γ_1 og γ_2 kan således bestemmes statistisk ved at tømme en utrolig masse øl og optælle antallet af tilfælde, hvor flasken derefter fremtræder *med* kapsel. Dette er præcis, hvad vi forsøgte at gøre.

I perioden fra 17:30 fredag til 11:15 søndag blev der af i alt ni personer nedsvælget 115 øl. Og der blev registreret *to* tilfælde af tilkapslede øl efter tømningen.

Den første blev opdaget af Steen Varsted sent fredag aften. Som manden, der for første gang målte denne effekt, er hans navn indskrevet i historien på linje med Galilei, Rømer, Michelson, Rutherford, Ørsted, Faraday og andre.

Vi har

$$|\gamma_2|^2 = \frac{2}{115} = 0,017. \quad (5)$$

Indenfor et 70-procents konfidensinterval er

$$0,0085 \leq |\gamma_2|^2 \leq 0,035 \quad (6)$$

Ved påfyldning af en flaske vil altså mindst $\sim 1,7\%$ havne ved siden af, som følge af den fundamentale kvantemekaniske begrænsning. En eksperimentel test af denne kvantitative forudsigtelse bør være næste opgave.

En særlig tak må rettes til alle de øvrige deltagere i øl-seminarerne i 1985 og '86, uden hvilke QBD aldrig ville have set dagens lys: Henrik "Havskum" Bruus, "Haarde" Kaare Danielsen, Nils "Pils" Gjørup, Michael "Canyon" Hansen, Per "Humlehyll" Hyldgaard, Anders "Jensen" Jensen, Claus "C.J." Jeppesen, Henrik "Mesteren" Gliese, Ann Berit "Sovedyr" Saust og Steen Varsted, manden der opdagede den første kvanteøl.

Litteratur

- [1] Kaj Ove Roland (1986), Øllen som kvantemekanisk system, GAMMA nr. 65, 1986.



Kaj Ove Roland drak sin første Hof i 1985, men opnåede aldrig rang af ølmester. Ph.d. i partikelfysik 1991. Siden 1999 ansat på Rødovre Gymnasium.

PFEIFFER VACUUM

ACP Dry Pump



**Olie- og partikelfri
Flertrins Roots teknologi**

Tlf. 4352 3800 Fax 4352 3850
Erik.Fjeldgaard@pfeiffer-vacuum.dk
www.pfeiffer-vacuum.com

Bliv redaktør!

KVANT søger unge redaktører med friske idéer til hvad der kan komme i bladet og til at være med til at udvikle den nye gruppe på facebook:

www.facebook.com/KVANT.fysiktidsskrift

Skriv til kvant@kvant.dk og hør nærmere.

Kvant er svært – men også sjovt!

Hvis du efter at have læst Kaj Rolands artikel om kvanteøllen – eller nogle af de andre kvante-artikler i dette nummer af KVANT – ikke forstår kvantefysikken, er du ikke alene! Niels Bohr skulle have sagt, at "hvis du tror, at du kan tale om kvanteteori uden at blive svimmel, har du ikke forstået noget af den". Fysikstuderende er ingen undtagelse og derfor har de næsten altid en sang med om kvantefysik i den traditionelle FysikRevy™ på Københavns Universitet.



For et par år siden var det en følelsesladet popballade over Alphavilles "Forever Young". Den kan ses på www.fysikrevy.dk og YouTube [1]. De første vers er:

Forever Kvant

Jeg er til revy, det er min første gang,
tiden til Kvant-1, den virker pludselig lang.
Jeg griner med, for jeg synes det' flovt,
at jeg ik' forstår, at kvant er sjovt.

Jeg synger med på kvanter i måneskin,
men egentlig, så fatter jeg ik' en pind.
Ja, jeg kan hverken regne, ud eller ind,
på energi og kvantespin.

Tænk at forstå, blot en enkelt sang,
grine af en sketch, blot en enkelt gang.
Vide hvem Per Hedegård egentlig er,
de andre griner.

Men jeg – forstår det ik',
før jeg får kvantemekanik.
Alle andre griner højt omkring mig,
men ik' mig
men ik' mig
Hva' en hæveoperator egentlig?

...
jeg ved det ik'.

[1] YouTube: "FysikRevy 2011: Forever Kvant",
www.youtube.com/watch?v=94E710v6wEM