

Kvantteknik- the final frontier....

En föreläsning om kvantmekanik, klurigt ljus, och hur kvanteffekter blir allt viktigare inom informationsteknik

Prof. Anders Karlsson, IMIT, KTH

Kvantteknik- the final frontier.....	1
Om föreläsningen.....	2
Introduktion.....	2
Varde ljus och se det vart ljus.....	3
Om kvantmekanik.....	3
Kvantregler.....	4
När måste vi tänka kvantmekaniskt?.....	5
Om information och kvantinformation.....	6
Förstår man kvantmekaniken?.....	6
Kvantteknologi i vardande.....	7
Kvantmekanik på ME-programmet.....	8
Ytterligare läsning:.....	8

Om föreläsningen

När dessa anteckningar skrevs, aug. 2002, var det ännu långt ifrån klart vad jag exakt skulle prata om. Föreläsningen kommer säkerligen att ta upp lite om konceptuella grunder, och hur dessa gestaltar sig för fotoner. Sen kommer jag att illustrera med ett aktuellt tillämpningsexempel på en kvantteknik. En del kommer kanske att vara svårsmält, lite förvirrande, men förhoppningsvis aldrig obegripligt.

Avsikten med föreläsningen är absolut inte att vara en lektion i formalismen för kvantmekanik och optik, utan avser att stimulera till eftertanke om att det fortfarande finns massor av nya saker att upptäcka i fysiken.

Introduktion

Fysiken har under 1900 talet upplevt två stora revolutioner; Einsteins relativitetsteori, och kvantmekaniken. Medan relativitetsteorin främst behandlar fenomen vid hastigheter nära ljushastigheten och över stora, kosmiska avstånd, såsom gravitationen, så beskriver kvantmekaniken den lilla världen av atomer, elementarpartiklar och fotoner- små energiknippen av ljus. Ingen annan teori är så noggrant testad som kvantmekaniken. Det är med kvantmekanikens hjälp som vi förstår atomers uppbyggnad, strukturen hos DNA, det periodiska systemet, har kunnat utveckla kärnenergi, och all den elektronik och datorer som utgör ryggraden i informationssamhället. *Say no more...*

Trots att kvantfysiken kommer in i de flesta av områdena inom modern fysik, och i stort sett alla fysiker kan operationellt räkna ut olika saker med hjälp av kvantmekanik, så är det lite förvånande att 100 år efter teorins födelse så debatteras fortfarande dess konceptuella grunder. *Varför kvanta?*

En utveckling som parallellt, och inte helt oberoende, börjar ta form är att man försöker använda kvantmekanikens speciella klurigheter för att åstadkomma nya saker inom informationsteknik. Tack vare diverse tekniska framsteg, såsom lasern och ickelinjär optik, har man idag nått ett läge där man på ett kontrollerat sätt kan hantera och studera enstaka kvantsystem, typ atomer, joner, eller fotoner. Miniaturiseringen inom mikroelektroniken gör också att det blir alltmer relevant att förstå hur elektronik fungerar när kvantfysikens effekter dominerar. Med kvantfysikens upptäckt vid förra sekelskiftet som den första kvantrevolutionen, så står vi nu enligt vissa bedömare inför en andra revolution – kvantteknologin --- där vi börjar utnyttja kvanteffekter på helt nya sätt. Längst fram har man kommit inom optiken med prototypsystem för absolut säker kommunikation, sk. kvantkryptering, men inom frontlinjeforskningen spekuleras det även om helt nya sorters datorer, sk. kvantdatorer, som i princip är möjliga, men i praktiken nästan omöjliga att bygga för väldigt många databitar.

Under er utbildning kommer kvantmekaniken att dyka upp dels som en egen kurs, dels som en del av en mängd andra kurser. Kanske blir det sen ni som ingenjörer och forskare som tar fram nya revolutionerande kvanttekniker?

Varde ljus och se det vart ljus

Jag tänkte framförallt under den här timmen främst använda mig av ljus för att belysa kvantmekanikens klurigheter. Anledningen är inte bara den att det är mitt eget forskningsområde, utan den att just ljus har använts väldigt mycket i kvantfysiken. Ljus används för att undersöka atomernas energinivåer. Det var bl.a. de diskreta sk. spektrallinjerna, att bara vissa frekvenser förekommer i atomernas spektra som ledde till kvantteoriens uppkomst. Vidare är det så att man har idag i lasern en suverän källa för att generera ett väldigt frekvensrent (monokromatiskt) ljus, plus att det finns väldigt bra detektorer för ljus. Ljus är en elektromagnetisk vågrörelse. Om detta har ni redan hört i Gunnar Björks föreläsning, och kommer att höra mycket om i kurser som kommer, bl.a. i fysikkursen till våren. Om man mäter energin hos en ljusstråle finner man att den är kvantiserad, ljus kommer bara i diskreta energiknippen, kallade fotoner. I de flesta fall kommer det så många fotoner på en gång att man inte behöver beskriva ljuset som partiklar, men det går även att mäta på så svagt ljus att man bara mäter en foton åt gången.

Räkneuppgift: I en HeNe Laserstråle med 1 mW, våglängd 633nm, hur många fotoner kommer det under en mikrosekund? Svar: Energin $E = N \cdot hc/\lambda = P \cdot t$, där N är antal fotoner, h Plancks konstant, c ljushastigheten, λ våglängden, P effekten och t mättiden att

$$N = P \cdot t \cdot \lambda / hc = 10^{-3} \cdot 10^{-6} \cdot 633 \cdot 10^{-9} / (6.6 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8) = 3 \cdot 10^9 \text{ fotoner}$$

Slutsats; en enskild foton är således en mycket liten ljusmängd.

Om kvantmekanik

När ni hittills stött på kvantfysiken i gymnasiet, eller någon annanstans, så har det förmodligen handlat om att partiklar även har vågegenskaper, och att detta medför radikala avvikelser för hur mekaniken för materiens minsta delar ser ut. Förmodligen har ni hört också att formalismen, utifrån diverse antaganden, som stämmer överens med experimenten, innebär att vi måste överge bilden av naturen som *deterministisk*, förutsägbar, utan att man i många fall bara kan beräkna sannolikheten för vad som skall hända. Säkert har ni också sett bilden på ett elektronmoln kring en atom som visar sannolikheten för att elektronerna är på en viss plats, och fått höra att via en speciell ekvation som kallas Schrödingerekvationen så kan man räkna ut en sk. vågfunktion som säger hur elektronmolnet ser ut. Eftersom molnet beskriver en rörelse så kan man även räkna ut vilka energier som rörelsen motsvarar. Energierna ger upphov till atomernas spektrallinjer -- deras fingeravtryck.

"We all agree that your theory is crazy, but is it crazy enough?"

-- Niels Henrik David Bohr, en av kvantfysikens grundare

Vågfunktioner och energinivåer-spektrallinjer är en viktig del av kvantmekaniken, och har historiskt kanske varit den allra viktigaste delen. Genom vågfunktionen följer massor av viktig information om hur partiklarna, elektronen, atomen, fotonen, rör sig, hur fort olika reaktioner går och en mängd fysikaliska egenskaper. En stor del av halvledarfysiken handlar om hur man designar fram komponentegenskaper utifrån vågfunktionen för systemet.

Men ändå, det kanske allra fascinerande med kvantmekaniken är att det är en radikal, revolutionerande, vacker, och alldeles underbar..avvikelse från den världsbild vi har alltsedan de gamla grekerna.

"Anyone who is not shocked by quantum theory has not understood it."

-- Niels Henrik David Bohr

Kvantregler

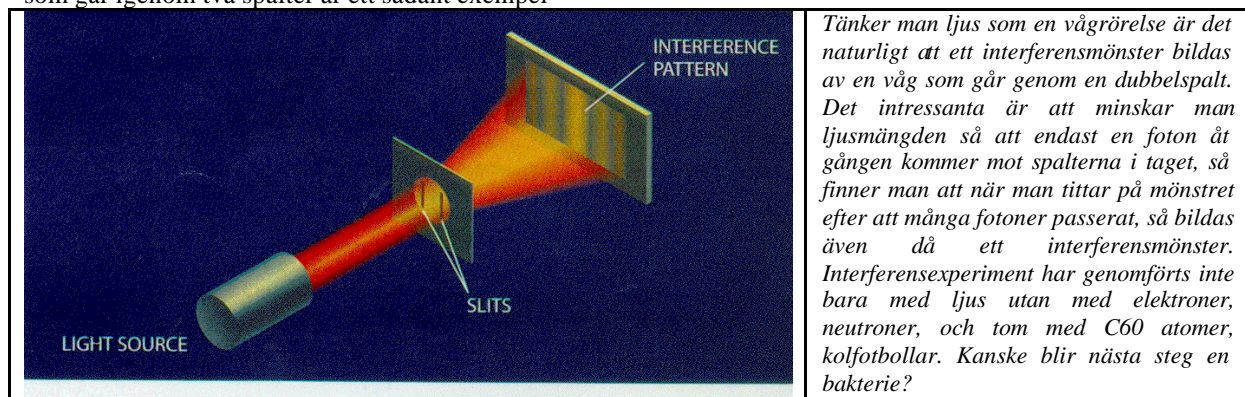
I kvantmekaniken finns ett antal regler, eller koncept som kort presenteras nedan.

Osäkerhet och komplementaritet

Om vi har ett kvantsystem finns det alltid ett sätt att mäta med ett deterministiskt utfall, samtidigt finns det alltid ett annat, sk. komplementärt sätt att mäta där utfallet är fullständigt slumpmässigt. Detta är ett exempel på vad som kallas komplementaritet, och ibland (lite felaktigt) ses det som ett exempel på den sk. osäkerhetsrelationen av Heisenberg.

Superposition och interferens

Om två händelser som inte kan särskiljas kan hända samtidigt, så kommer kvantsystemet uppträda i en superposition där det verkar som om bägge händer samtidigt. Exemplet med Youngs dubbelspalt, där två strålar som går igenom två spalter är ett sådant exempel



Tunneling

En kvantpartikel kan tunnla, hoppa igenom, energibarriärer där den enligt klassisk fysik inte kan vara. Detta kan bla. användas för att göra nya elektronikkomponenter. 1973 fick Leo Esaki Nobelpriset (delat med Brian Josephson och Ivar Giaever) för sina arbeten kring tunneling och den sk. tunneldioden, samt för arbeten kring sk. supergitter (där man likt i lasern ovan likt en tvättbräda ändrar energilandskapet elektronerna rör sig i). När man gör transistorer allt mindre, som illustrerats i Hannu Tenhunnens föreläsning, så kan elektroner tunnla genom de oxidskikt som används som för att isolera olika delar av kretsen. Detta begränsar hur små transistorerna kan göras.

Intrassling, eller entanglement

Om det finns korrelationer mellan kvantpartiklar, och dessa korrelationer kan göras på flera icke särskiljbara sätt, då hamnar de i en superposition. Detta gör att kvantmekanikens korrelationer kan vara mycket starkare än de som medges klassiskt, något bla. Albert Einstein hade svårt att förlika sig med. En sådan speciell situation kallas på engelska för entanglement, vilket man kan översätta med intrassling eller snärjning.

Exempelvis skulle korrelationerna kunna användas till att realisera två magiska tärningar, som betraktad var och en ger helt slumpmässiga utfall, men där man finner att så fort man har kastat den ena, så kommer den andra alltid att visa samma sak som den första. Låter konstigt, eller hur? Lugn, du är i celebert sällskap, inte ens Albert tyckte ju om dessa ideer.

Låt nu Lisa Lurig åka till Las Vegas med en tärning, och Kalle Fusk sitta kvar i Forum med den andra. Kalle kastar först sin tärning, ringer sen upp Lisa och talar om vilket utfall hon skall satsa på innan hon kastar sin tärning. *Använd vinsten för att finansiera framtida aktiviteter på ME-sektionen.*

Koppling till omvärlden

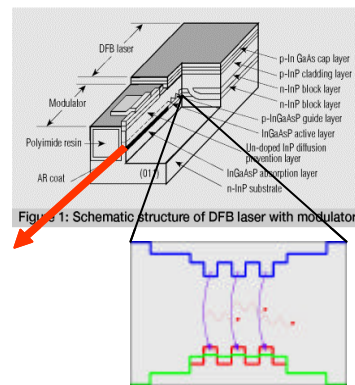
Om ett kvantsystem kopplas till omgivningen så övergår kvantmekaniska superpositioner mycket snabbt till från ett "både och" tillstånd till ett "det ena" eller "det andra". Det är av denna anledning det är svårt att se kvantmekaniska superpositioner för väldigt stora system, vilket brukar exemplifieras med den sk. Schrödingers kattparadox.

Baserat på de här relativt enkla principerna ovan kan man visa en del intressanta konsekvenser för hur information på kvantnivå kan behandlas. Exempelvis så visade man så sent som 1982 att generella kvanttillstånd inte kan kopieras perfekt. Ger någon dig ett okänt kvanttillstånd så kan du inte kopiera detta perfekt. Om motsatsen gällde skulle en konsekvens vara att man kunde bryta mot osäkerhetsrelationen. En annan konsekvens vore att man skulle kunna skicka information snabbare än ljushastigheten, vilket skulle strida mot kravet på kausalitet (att orsak kommer före verkan).

När måste vi tänka kvantmekaniskt?

När ser man kvantfenomen? Naturligtvis överallt i vardagen, men om vi menar fenomen där man ser effekter av enstaka kvantsystem krävs oftast väldigt kontrollerade experiment där kvantsystemet hålls isolerat från omgivningen. Ett annat kriterium för att se kvantiserings effekter i rummet är partikeln är instängd i ett utrymme av samma storleksordning som materievåglängden $\lambda = h/mv$, där m är partikelns massa och v dess hastighet. Kan det uppfyllas i praktiken? Ja, faktiskt, bla. de laserdioder ni har i CD-spelarna i er dator är en sk. kvantbrunnslaser där elektronerna stängs in mellan tunna skikt, ca 10 nm i tjocklek (ett femtiotal atomlager i kristallen), av en speciell halvledare som gör att deras energier, och indirekt färgen hos laserljuset bestäms av hur laseringenjören designar halvledarmaterialet. Den här typen av speciellt designade halvledare tilldelades halva Nobelpriset i Fysik år 2000 (Herbert Kroemer och Zhores Alferov).

I en modern halvledarlaser (laserdiod), så bygger man med avancerade halvledarmetoder (kurs ÅK2 & senare) den aktiva delen av lasern där ljusemission sker, i form av flera tunna brunnar (med lägre energi än omgivningen så elektronerna faller in). Brunnarna är så tunna (5-10 nm), så att elektronernas energier blir kvantiserade, liksom de bestämda tonerna från en inspänd gitarrsträng. Ju längre ned på gitarrhalsen man sätter fingret, ju högre blir tonen. Ju tunnare kvantbrunn, desto större energi (högre ton).



Räkneuppgift:

Vilken är de Broglie våglängden för en elektron som har en termisk rörelse $\frac{1}{2}mv^2 = kT$ vid $T=300K$, och vid $T=4 K$ (flytande Helium)?

$\frac{1}{2}mv^2 = kT$ ger $v(300 K) = 10^5 m/s$ och $v(4 K) = 10^4 m/s$,

Svar: $\lambda = h/mv$ ger $\lambda(300K)= 8 nm$, och $\lambda(4K)= 80 nm$

Kommentar: Att de Broglie-våglängden är runt tio nm vid rumstemperatur innebär att det går att utnyttja kvantiserings effekter i praktiska halvledarkomponenter, och det är precis vad man gör i den stora majoriteten av laserdioder som använts. Genom en speciell tillväxtteknik kan man ändra halvledarkristallens egenskaper atomlager per atomlager (ca 0.3 nm), och därmed påverka hur elektronerna utbreder sig. Kyler man ned materialet ännu mer, till 4 K, blir de Broglievåglängden så lång att man skulle kunna se vågeffekter även i de elektronikkomponenter som sitter i värsta Pentiumprocessorn (där minsta kretsmönstret idag är kring 190 nm).

Om information och kvantinformation

"Fysiken handlar inte om att säga vad naturen är, utan vad vi kan säga om naturen"

-- Niels Henrik David Bohr

En mycket intressant utveckling, så här i IT-ålderns tider, är att man börjar se allt fler kopplingar mellan kvantfysiken och den matematiska teorin för information. Ursprunget till detta kan man kanske tolka i citatet ovan från Bohr, ty att säga något om något, det är ju att få information.

Från datatekniken är den minsta enheten en binär bit, en etta eller nolla. Låt oss tänka oss det enklaste kvantsystemet vi kan; Ett system som har två diskreta tillstånd, "0" och "1". En atom som har två energinivåer är ett exempel. Ett annat exempel vi kan ta är en enskild foton som vi kan ha som horisontellt polariserad = noll, eller vertikalt polariserad = ett. En sådan databit på kvantnivå brukar kallas en kvantbit i den moderna terminologin, eller qubit på engelska (uttalas kjubit). Det kan vara intressant att veta att denna benämning uppkom först år 1993. Just idag ser man en trend inom vissa delar av kvantmekaniken att försöka förklara kvantmekaniken utifrån kvantbitar (se nedan om kvanttekniker), och förmodligen kommer ni att höra mer om detta i er kurs i kvantmekanik i Åk2.

Om just denna utveckling finns kanske bara ett par tre stycken läroböcker, och egentligen är det ingenting man normalt stöter på alls i kurser i kvantmekanik förrän man kommer till kurser i ÅK 4 med titlar som *"Kvantmekanik, fortsättningskurs"*, eller *"Kvantmekanik, fördjupningskurs"*..
-- *get the picture?*

Samtidigt, alltför som forskar i kvantmekanik, inser att just detta betraktelsesätt är oerhört fruktbart. Kanske kommer ni att möta det redan i eran grundkurs i kvantmekanik i årskurs 2, så låt oss berätta lite om de verkliga moderna (yngre än 10 år), tankegångarna inom kvantmekanik. *Enjoy the ride!*

Förstår man kvantmekaniken?

"... I think I can safely say that nobody understands Quantum Mechanics"

--Richard P. Feynman, Nobelpristagare I Fysik 1959

Visst är kvantmekaniken mycket väl förstådd i det att man har en mycket väl fungerande teori som möjliggör allt noggrannare beräkningar både rent ingenjörsmässigt, och som ett medel för ny fysik, exempelvis i sökandet efter elementarpartiklar. Samtidigt, som antyds av Feynman, så innebär detta inte nödvändigtvis att man förstår varför naturen uppträder som vi kan se den via kvantmekaniken.

Den österrikiske fysikern Anton Zeilinger menar att vi ännu saknar en "urprincip" för kvantmekaniken, något som skulle kunna liknas vid termodynamikens huvudsats. Han menar vidare att kanske finns denna urprincip i kopplingen mellan kvantmekanik och information. Om man accepterar superpositionsprincipen och sen antar att en kvantbit, ett tvånivåsystem kan lagra en bit klassisk information, då följer exempelvis komplementaritetetsbegreppet och intrasslingens egenskaper ur detta. Ännu är vi dock långt ifrån ett slutgiltigt svar om *"what it is all about"*, och kanske når vi inte dit. Vad som dock är riktigt intressanta är att forskningen kring kvantmekanikens konceptuella grunder är efter att varit insomnad ett antal årtionden åter är mycket aktiv.

Kvantteknologi i vardande

Tittar vi på vad man forskar på idag inom blivande kvanttekniker, så finns en hel del roligt. Mycket av dagens teknik bygger som sagt på god kunskap i kvantmekanik. Däremot är det få tekniker som bygger specifikt på de grundprinciper för hur kvantmekaniken fungerar, som jag nämnde ovan.

Kvantelektronik

-förtjänar en föreläsning i sig. När skalningen av dagens elektronik inte längre kan fortsätta, se Hannu Tenuunens föreläsning, så måste en ny sorts elektronik tas fram. Kanske kommer den att bygga på att använda elektroners vågegenskaper, eller deras inre magnetiska egenskaper, det sk. spinnet. Ingen vet idag, men forskning pågår.

Atomoptik, atomlasrar och koherent materia

- genom att bromsa atomers värmerörelse med hjälp av laserljus, ty fotoner har rörelsemängd (Nobelpris 1997 till Steven Chu, William Phillips och Claude Cohen-Tannoudji) kan man få deras materievåglängd $\lambda = h/mv$ att bli tillräckligt stor för att kunna observera interferenseffekter. Mer om kylda atomer och användning av detta kommer ni att få höra under nästa timme av Björn Hessmo. Kylda atomer kan sen användas för förbättrad litografi, för mer precisa atomklockor, och för noggranna mätare av gravitation. En mycket spännande forskning just nu handlar om atomlasrar och tillämpningar av sk. Bose-Einstein kondensat (Nobelpris 2001 till Eric Cornell, Carl Weiman och Wolfgang Ketterle), där atomerna kylts till så låga temperaturer att de hamnar alla i ett gemensamt kvanttillstånd, ett sk. kondensat.

Kvantkryptering

- är ett sätt för två personer att etablera en hemlig datafil (en massa ettor och nollor) för användning inom kryptering där själva komplementaritetsbegreppet och omöjligheten att mäta exakt på okända kvanttillstånd används för att avslöja varje försök till tjuvlyssning. Kvantkryptering är den nya kvantteknik som kommit närmast praktisk användning. Idag finns prototypsystem som fungerar över 50 km optisk fiber. Vid KTH har vi gjort försök upp till 40km.

Kvantteleporterung-”Beam me up Scotty!”.

- innebär att man ”förstör” ett kvantsystem på ett ställe och återskapar sedan samma system på ett annat ställe – bara genom att överföra information. Kvantteleporterung har av enstaka fotoner eller speciella ljusstrålar har gjorts av flera laboratorier.

Beröringsfri kvantmätning

- är ett sätt att använda superposition & interferens för att kunna mäta på absorberande objekt utan att, i princip, någon av de infallande fotonerna behöver absorberas. På KTH har vi gjort det experiment som (fortfarande?) håller rekordet för att vara mest beröringsfritt.

Kvantlitografi

-är ett sätt att använda intrassling för att klistra ihop fotoner på ett sätt så deras materievåglängd blir kortare. Därmed kan man göra interferens med dem och rita fina litografiska mönster med en detaljupplösning som är mycket finare än den optiska våglängden, vilken för vanligt ljus sätter gränsen. KTH var en av de första grupperna att föreslå kvantlitografi.

Kvantdator

- är en dator som använder superposition och intrassling för att kunna beräkna mer effektivt än klassiska datorer. Svårigheten att bygga en kvantdator praktiskt är att ju större den görs, desto störningskänsligare blir den. Den största kvantdatorn som gjorts (av ett forskarlag från IBM), kan faktorisera talet 15. Den stora poängen med kvantdatorn är dock ännu mer principiell än praktisk.

Kvantmekanik på ME-programmet

Vilka kurser fortsätter efter denna med inriktning mot kvantfysik? Ni kommer att ha stora möjligheter att fördjupa er inom kvantmekanik, och speciellt den kvantmekanik som används inom modern elektronik, optik och material- och nanofysik.

För att på ett någorlunda komfortabelt sätt ta till sig kvantmekanik och kunna använda teorin beräkningsmässigt krävs en hel del matematik. Framförallt att man kan analysen (derivator, integraler, differentialekvationer), kan använda komplexa tal, linjär algebra, och kan räkna med funktioner av flera variabler.

Detta kommer du att möta i kurserna Matematik I-III, samt i kursen "Matematiska metoder för Mikroelektronik" i ÅK 2.

I årskurs två läser ni en separat kurs i kvantmekanik som dels presenterar historiken, dels går igenom formalismen på ett systematiskt sätt.

Kvantmekaniken används senare till användning i en mängd kurser: Den är grunden för halvledarfysiken och för materialfysiken. Den återkommer inom optiken för att förstå en del experiment.

Slutligen, för nästan all nanoteknik måste man kunna en hel del kvantmekanik.

Ytterligare läsning:

Problemet att ge bra Internetreferenser till kvantfysik, kvantoptik och kvantinformatik är inte att de inte finns, utan att det finns för många. Här kommer några användbara referenser, varav en del är ganska lokalt färgade:

1. Avdelningen för kvantelektronik och kvantoptik vid KTH-IMIT: <http://www.ele.kth.se/OEO/>
2. Vårt projekt om Kvantinformation: <http://www.ele.kth.se/OEO/projects/qinfo/kvantinfopop.html>
3. New Scientists guide till kvantvärlden: <http://www.newscientist.com/hottopics/quantum/quantum.jsp>
4. En jättebra site om kvantinformation: www.qubit.org
5. Anton Zeilingers forskargrupp i Wien: <http://www.quantum.univie.ac.at/>
6. Ett EU-sponsrat nätverk som koordinerar EUs forskning inom kvantinformatik: <http://www.quiprocone.org>
7. www.nobel.se (antar att ni kan gissa vad den handlar om ☺) Är en mycket bra källa till information.