

Korrespondensprincippet diskrete charme

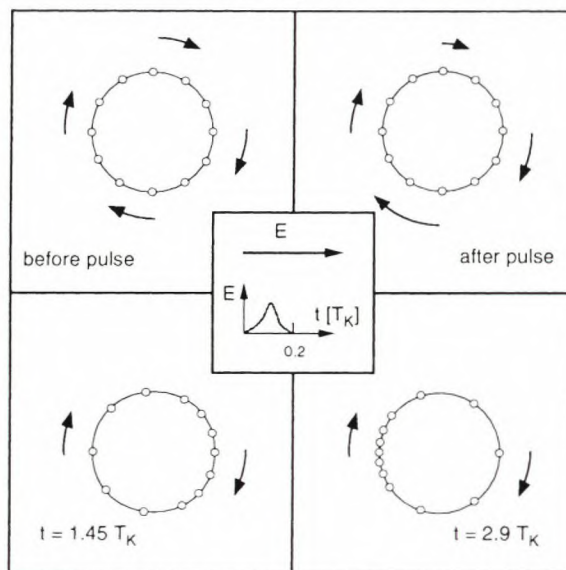
Ove Nathan

Overgangen fra det klassiske billede af atomet til kvantebeskrivelsen er tilsyneladende et udtømmeligt emne i fysikken. Pudsigt nok, for kvantemekanikken giver os jo - i al fald i princippet - en fuldstændig beskrivelse af atomets fysik, og hvad skal man så med den forældede og fejlagtige, halv-klassiske atommodel med elektroner, der bevæger sig i elliptiske Keplerbaner omkring kernen, og som er underkastet nogle postulerede kvantebetingelser?

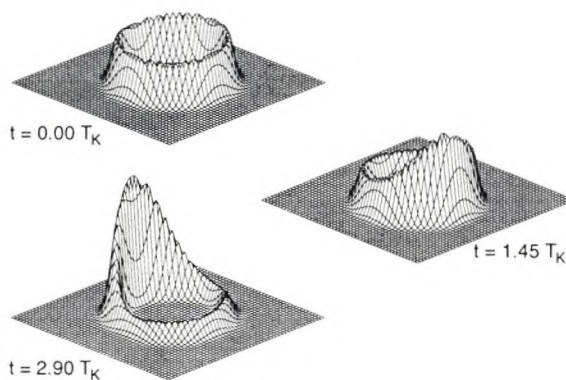
Men nye måder at anskue gamle sager kan føre til overraskende udviklinger. Den halv-klassiske model indeholder blandt andet en pædagogisk inspiration, som ikke mindst har sit udspring i korrespondensprincippet. Princippet udsiger, at den klassiske beskrivelse og kvantebeskrivelsen nærmer sig hinanden i grænsen af høje værdier af hovedkvantetallet n . For store værdier af n skulle Keplerbanerne altså have en slags fysisk realitet. Tænk, hvis man kunne eftervise det eksperimentelt, altså - for at tale i kvantesproget - skabe lokaliserede elektron-bølgepakker og følge bølgepakkens bevægelse i en cirkulær eller en elliptisk bane rundt i atomet, i al fald nogle omgange. Kvantemekanikkens fædre var meget optaget af sådanne bølgepakker og af bølgepakkernes opbygning via kohærente kvantetilstande. På den tid var det udelukket at lave eksperimentet. Værktøjet manglede. Men nu er værktøjet til rådighed: pulsede lasere, der kan producere ultrakorte pulser, af varighed, der måles i picosekunder og femtosekunder. Med sådanne laserpulser er det blevet muligt at skabe lokaliserede bølgepakker i "Rydberg-atomer", dvs atomer med en eller flere elektroner anslået til tilstande med store værdier af n , i området $n = 25$ til 100, eller højere, og med store baneimpulsmomenter. Rydberg-atomet kan have forholdsvis lang levetid overfor spontant henfald, af størrelsesordenen mikro- eller millisekunder. Rydberg-atomets rumlige udstrækning er betydelig, nemlig proportional med kvadratet på n , således at man opnår atomradier af størrelsesordenen 10 000 Bohr radier - atomet får næsten makroskopisk dimension.

Jeg stødte på den sag engang sidste sommer ved at læse en kommentar i det engelske tidsskrift Nature. Redaktøren af Nature, John Maddox (selv fysiker), har et vågent blik for, hvad han kalder "fun and games" i fysikken, og man bliver sjældent skuffet, hvis man via hans tilbagevendende klumme går på jagt i originallitteraturen. Maddox var blevet inspireret af en publikation fra august 1994 i The Physical Review Letters, skrevet af en fysikergruppe fra Institute of Optics ved Rochester Universitetet i USA. Heri fortælles om eksperimenter i det klassisk-kvantefysiske grænseområde, og som forløber i tre faser. I første fase - hvor der benyttes allerede kendt teknologi - skabes en cirkulær Rydberg-tilstand, fx i et alkali-atom. I eksperimentets næste fase benyttes en kort laserpuls til at konver-

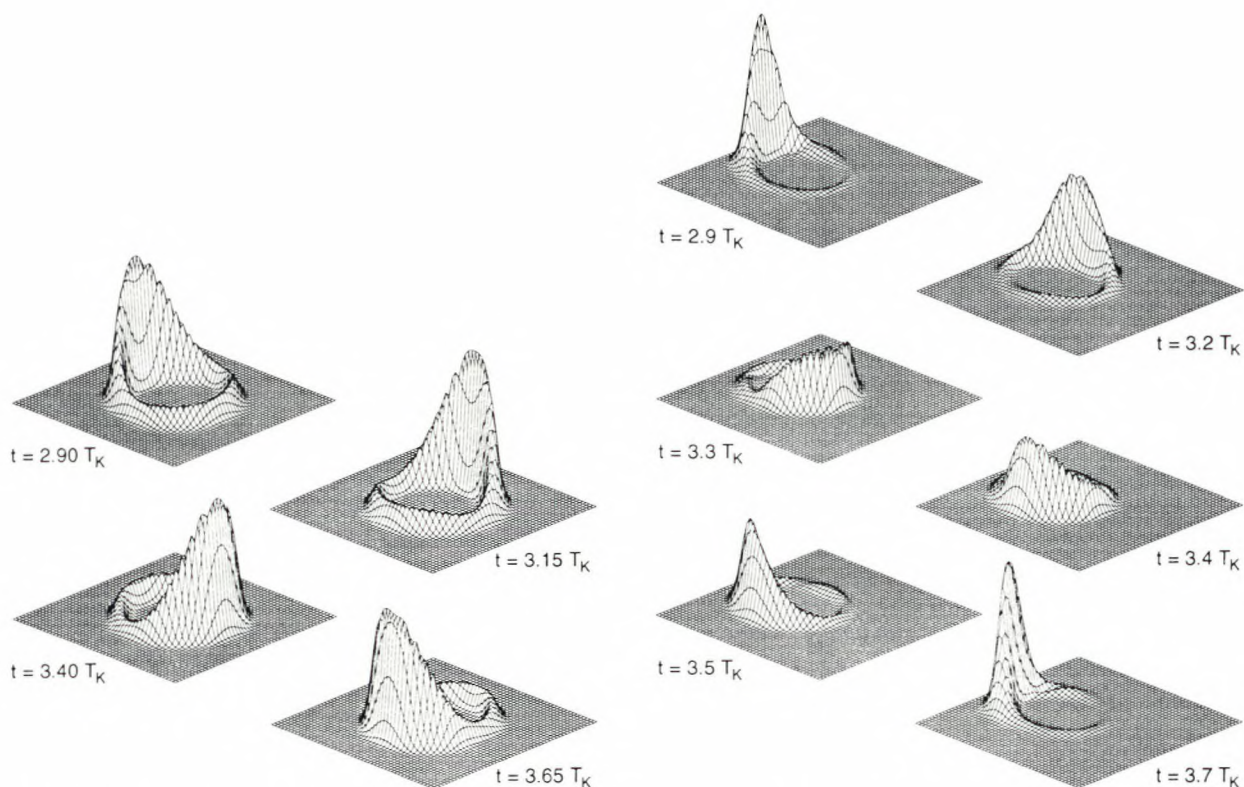
tere den cirkulære elektrontilstand til en bølgepakke, som er lokaliseret både radielt og i de to vinkelkoordinater.



Figur 1. Bundtning af elektroner, der bevæger sig i en cirkulær Rydberg-bane. Et ensemble af klassiske elektroner bevæger sig på cirklen, jævnt fordelt, og udsættes for en elektrisk impuls, hvis længde kun er en brøkdel af omløbstiden, T_K , i keplerbanen (boksen i midten). Lige efter impulsen vil der være en hastigheds-dispersion, men endnu ingen bundtning (foroven, til højre). Efter tre omløb er bundtningen tydelig (forneden, til højre).



Figur 2. Kvantemekanisk beregning af det samme fænomen, som i fig. 1. Også her udsættes et cirkulært Rydberg-atom (med hovedkvantetal, n , af størrelsesorden 50) for en kort elektrisk impuls, som ikke ændrer den cirkulære bølgepakkens rumlige udseende lige efter impulsen. Men efter forløbet af tre Kepler-perioder har elektronens sandsynlighedsfordeling nu form af en bølgepakke, der er afgrænset til et snævert vinkelrum, og hvis bevægelse følger en Kepler-bane.



Figur 3. Bølgepakken fra fig. 2 følges her i sin cirkulære bane over det meste af en Kepler-periode.

Figur 4. Ved hjælp af et forholdsvis svagt elektrisk felt i baneplanen, som påtrykkes i en impuls, hvis varighed er adskillige Kepler-perioder, kan man deformere en cirkulær bane. Banen bliver elliptisk, og bølgepakken forbliver i den nye elliptiske Kepler-bane. Ellipsens storakse er vinkelret på feltvektoren. Bølgepakken kan følges under et omløb på figurens fem "snapshots". Excentriciteten er 0,6. Bølgepakken bevæger sig hurtigst nærmest kernen og langsomt i den modsatte ende. Bølgepakkens form er tydelig forskellig i de to situationer.

Bølgepakken bevæger sig langs en cirkelbane, og den kan genereres så skarpt, at den næsten bliver en "minimal-pakke", dvs rumligt så koncentreret som ubestemthedsrelationerne tillader det. I eksperimentets slutfase benyttes endnu en laserimpuls til at konvertere bølgepakkens bane fra cirkulær form til en ellipse, med stor excentricitet. De eksperimentelle enkeltheder kan studeres i originallitteraturen, nærværende fremstilling skal blot opfattes som appetitvækker.

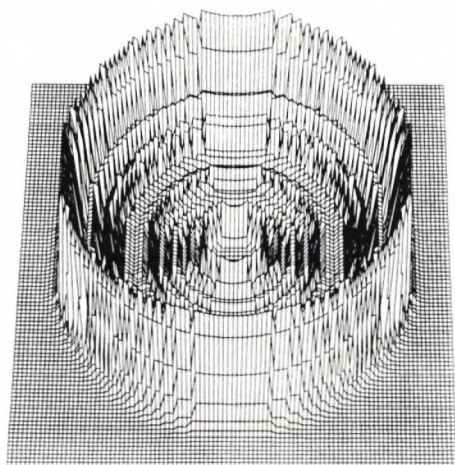
I fig. 1 illustrerer Rochester-gruppen med en klassisk analogi, hvordan en kort laserpuls kan modulere bevægelsen af et ensemble af jævnt fordelte elektroner, der bevæger sig i en cirkelbane, så der skabes et elektronbunt - en bølgepakke. Hver negativ partikel modtager en impulsændring fra laserens elektriske felt, således at partikler der bevæger sig mod feltretningen, bliver accelereret, partikler, der bevæger sig med feltretningen, bliver bremset, mens partikler, der bevæger sig vinkelret på feltretningen, ikke påvirkes. Lige efter laserpulsens har alle partikler praktisk taget uændrede positioner, men der er altså sket en hastighedsmodulation. Efter nogen tid vil spredningen i impulsrummet omdannes til en spredning i koordinatrummet - de hurtige partikler vil have indhentet de langsomme, og der sker en bundtning. Opbygningen af bølgepakken kan naturligvis også følges

kvantemekanisk, se fig.2. Den cirkulære bevægelse af bølgepakken over en Kepler-periode er vist på fig.3. Figur 2 og 3 er teoretiske beregninger, men teknikken er så udviklet, at bølgepakkens udvikling i tid kan verificeres eksperimentelt i stor detalje. Så meget om eksperimentets fase 2.

Kronen på værket - foreløbig - er fase 3, de elliptiske Kepler-baner. Rochester-gruppen beskriver, hvorledes man med endnu et passende formet, pulset elektrisk felt kan konvertere bølgepakkens bane fra cirkulær til elliptisk. Fig.4 viser en bane med excentricitet på ca. 0,6, og hvor bølgepakkens bevægelse igen følges over en Kepler-periode. Figuren illustrerer smukt, at bølgepakkens udseende varierer med hastigheden i banebevægelsen. Når bølgepakken er tættest ved atomets kerne, bevæger den sig hurtigt (jfr. planetbevægelsen i solsystemet), og bølgepakken tværes ud. Når bølgepakken er fjernest fra kernen, er hastigheden lavere, og bølgepakken koncentrerer sig. Bølgepakken kan følges - teoretisk og eksperimentelt - i nogle Kepler-perioder, indtil den opløses via kvantemekaniske interferenseffekter.

Rochester-gruppen har arbejdet i mere end et årti med lokalisering af elektron bølgepakker i Rydberg-atomer, i forskellige varianter. Således illustrerer fig.5 et arbejde

fra 1988, hvor en bølgepakke lokaliseres i vinkelkoordinaterne, men ikke radielt. Bølgepakken er igen praktisk taget en minimum-pakke, opbygget af $n = 50$ tilstande. Bølgepakken kan følges eksperimentelt under flere omløb af en Kepler-bane, indtil dens kohærens ødelægges ved strålingshenfald eller ved atomare sammenstød. Fig.6 skitserer den eksperimentelle opstilling.

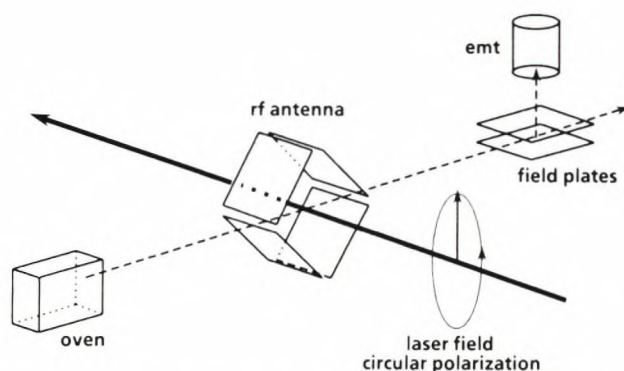


Figur 5. Ved en kohærent superposition af Rydberg-tilstande kan man opbygge en bølgepakke, der er lokaliseret i vinkelkoordinaterne, men ikke radielt. Figuren er beregnet, et slags computerekperiment, hvor bølgepakken er mikset sammen af tilstande i natriumatomet med højt hovedkvantetal, $n=50$, og med store impulsmomenter. Rigtig eksperimentelt, kan en sådan tilstand skabes ved en kombination af en optisk excitation og et passende radiofrekvens-felt. Når rf-feltet er fjernet, vil bølgepakken kunne fortsætte i nogen tid i en klassisk banebevægelse. Eksperimentelt kan man efterfølgende studere bølgepakkens bevægelse ved at ionisere atomet med et kortvarigt elektrisk felt, og derefter iagttage ioniseringssignalet. Ioniseringsstyrken afhænger bl.a. af bølgepakkens position i banen.

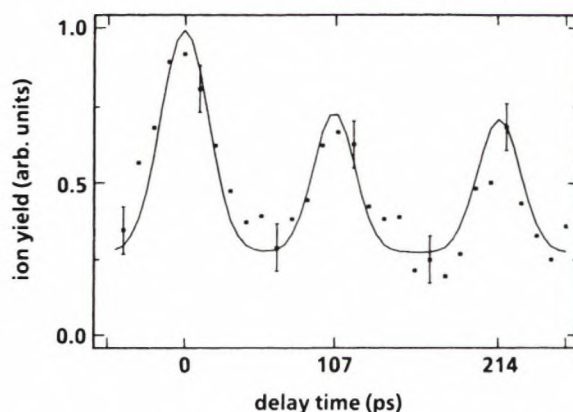
Måling af sandsynligheden for ionisering er et centralt element i registreringen af Rydberg-atomernes egenskaber. I mange tilfælde kan man udnytte den omstændighed, at ioniseringsandsynligheden vokser, når elektronen nærmer sig atomets kerne, og dermed får voksende sandsynlighed for at udveksle impuls med kernen. Umiddelbart kunne man måske have gættet anderledes. Når elektronen er langt fra den positivt ladede kerne, er den elektrostatisk tiltrækning jo relativt svag. Og så skulle det være forholdsvis nemt for et ydre felt at rive elektronen ud. Men ioniseringen er et dynamisk fænomen, hvor impulsoverførsel er væsentlig. Og kernen har større sandsynlighed for at opfange impulsen, når elektronen er tæt ved den.

Man kan udnytte denne dynamiske ioniseringseffekt til at måle omløbstiden, når banen er stærkt elliptisk, jfr. fig. 4. Der kommer et maksimum af ionisering, når den udtværede bølgepakke suser forbi kernen i den ene ende af storaksen, og et minimum i den modsatte ende. Fænomenet ses også smukt i forsøg med cirkulære bølgepakker, der er lokaliseret radielt, men ikke i vinkelkoordinaterne. Den slags bølgepakker kan bringes i en oscillerende bevægelse, så bølgepakken så at sige ånder ind

og ud (Rochester-gruppen, 1989). Ioniseringssignalet bør så vise en tilsvarende, periodisk struktur (fig.7).



Figur 6. Grundelementerne i en forsøgsopstilling, der kan anslå og registrere en lokaliseret bølgepakke som den, der er vist på fig.5. Signaturen emt står for electron multiplier tube - som bruges til at måle ioniseringsstyrken.



Figur 7. Oscillationer af en radielt lokaliseret bølgepakke. punkterne er eksperimentelle ioniseringsudbytter, og kurven er en teoretisk forudsigtelse, svarende til en klassisk baneperiode på 107 picosekunder. Bredden af oscillationssignalet afhænger af antallet af tilstande, der er involveret i opbygningen af bølgepakken. Kurven er beregnet for 5 tilstande med $87 < n < 91$.

Der er også en levende interesse for Rydberg-atomer flere steder i det danske forskningsmiljø. En atomfysisk gruppe ved Fysisk Institut i Århus har således benyttet en metode med krydsede elektriske og magnetiske felter til at danne såvel cirkulære som orienterede, elliptiske Rydberg atomer. Metoden egner sig for produktion af et egentligt target af orienterede, elliptiske Rydberg atomer, så man fremover vil kunne udføre både spektroskopiske studier af den slags systemer og studere deres opførsel i atomare sammenstød.

Studiet af Rydberg-tilstande i atomer og molekyler har mange forgreninger, bl.a. til astrofysikken. Og springet

til at anvende pulsedede lasere i specielle kemiske reaktioner er måske ikke så stort. Men først og fremmest tjener Rochester-gruppens arbejde med de ultra-korte laserpulser til at belyse sammenhængen mellem klassisk fysik og kvantemekanik. Eksperimenterne viser, at det klassiske system, som et atom nærmer sig i korrespondensprincipets grænse, har at gøre med en forholdsvis kompleks, dynamisk genstand, der følger en klassisk bane. Billedet af en simpel klassisk elektron, en ladet punktpartikel med masse, der bevæger sig i en bane i et Rydberg atom, det billede holder ikke. Og selvom systemets udvikling over korte tider viser et ret enkelt, klassisk forløb, så er udviklingen over længere tider mere kompleks, og rører den underliggende kvantenatur af den slags kohærente, atomare tilstande. Som Rochester-gruppen udtrykker det, er det et af deres mål at kunne studere sammenhængen mellem et klassisk, kaotisk system og bevægelsen af kvantefysikkens bølgepakker. Det er min fornemmelse, at de har præsteret en indsats i den retning, der vil blive stående.

Referencer:

1) Rochester-gruppen:

Z.D.Gaeta et al., *Excitation of the Classical-Limit State of an Atom*, Physical Review Letters **73**, 636 (1994)

John A.Yeazell et al., *Classical Periodic Motion of Atomic-Electron Wave Packets*, Physical Review A

40, 5040 (1989)

John A.Yeazell and C.R.Stroud, Jr., *Observation of Spatially Localized Atomic Electron Wave Packets*, Physical Review Letters **60**, 1494 (1988)

- og referencer citeret i disse artikler.

2) Århus-gruppen:

S.B.Hansen et al., *Electron Capture from Circular Rydberg Atoms*, Physical Review Letters **71**, 1522 (1993)

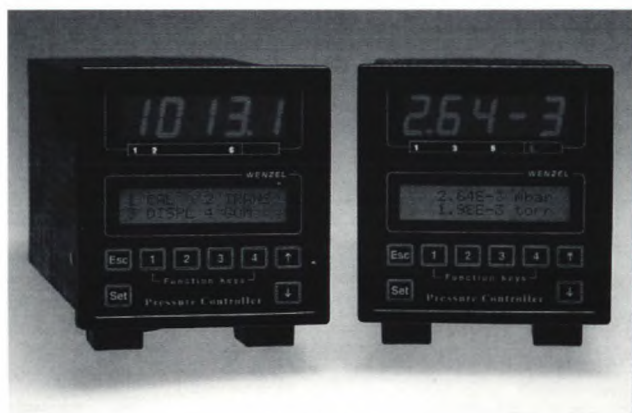
J.C. Day et al., *Formation of Oriented Elliptic Rydberg Atoms*, Physical Review Letters **72**, 1612 (1994)

- og referencer citeret i disse artikler.



Ove Nathan er professor ved Niels Bohr Institutet. Har tidligere arbejdet med eksperimentel kernefysik. Derefter i en årrække universitetsrektor. Nuværende interesse: fysik, i bred forstand.

MODERNE VAKUUMTEKNIK TIL FORSKNING OG INDUSTRI



PRC X1

1x10⁻⁵ TO 1999.9 mbar.

DUALTRANS MICROPIRANI PIEZO

WENZEL VAKUUM TEKNIK har i 23 år solgt ALCA-TEL's vakuumprodukter i Danmark; men trods særdeles stor salgsfremgang i 1994, har ALCATEL pludselig valgt en ny partner. WVT vil dog stadig tilbyde alle vore AL-CATEL kunder fuld mekanisk og elektronisk service på alle vakuumprodukter. Vort store og ofte lagerførte program i standard vakuumfittings til konkurrencedygtige priser er helt uafhængig af ændringen, og gennem ny leverandører kan vi stadig til byde vakuumpumper og tilbehør i høj kvalitet til konkurrencedygtige priser. WENZEL ELECTRONICS dansk udviklede præcisions måle- og styreinstrument, 1x10⁻⁵mb – 1999,9 mb, som leveres med certifikat for sporbarhed, er blevet en stor succes, og vi fortsætter med udviklingen af ny produkter, ligesom vi fremstiller flere og flere specialanlæg til f.eks. sputtering eller elektronkanonfordampning, afgangning og vakuumimprægnering, massespektrometeranalyse etc.

ALLE FORMER FOR OLIEFRI & OLIESMURTE ROTATIONSVAKUUMPUMPER • FEDTSMURTE TURBOMOLEKULAR- SPIRO- & HYBRIDPUMPER • DIFFUSIONS- & CRYOPUMPER • VAKUUMMÅLEINSTRUMENTER, VENTILER, HV & UHV FITTINGS • HELIUM LØKSØGERE & MASSESPEKTROMETRE • SPUTTER- ELEKTRONKANON & ÆTSEANLÆG • RF & HV STRØMFORSYNINGER • RUSTFRI SPECIALKAMRE & DELE • OMBYGNING AF VAKUUMANLÆG

**WENZEL VAKUUM TEKNIK APS • NYBROVEJ 283 • DK-2800 LYNGBY • TLF. 45 87 97 35
SHOWROOM, SERVICE, LAGER • NYBROVEJ 193 • BIL 30 42 63 00 • FAX 45 93 32 93**

Korrespondensprincippet diskrete charme

Rettelse.

Mads Hammerich, redaktør.

I KVANT, 1,(1995) blev derved en fejltagelse sat et forkert billede i Ove Nathans artikel om eksperimentel test af korrespondensprincippet mellem kvantemekanik og klassisk mekanik. Den rigtige figur, og sammenhængen, følger her:

"Rochester-gruppen har arbejdet i mere end et årti med lokalisering af elektron bølgepakker i Rydberg-atomer, i forskellige varianter. Således illustrerer fig.5 et arbejde fra 1988, hvor en bølgepakke lokaliseres i vinkelkoordinaterne, men ikke radielt. Bølgepakken er igen praktisk taget en minimum-pakke, opbygget af $n = 50$ tilstande. Bølgepakken kan følges eksperimentelt under flere omløb af en Kepler-bane, indtil dens kohærens ødelægges ved strålingshenfald eller ved atomare sammenstød."

Figur 5. Ved en kohærent superposition af Rydberg-tilstande kan man opbygge en bølgepakke, der er lokaliseret i vinkelkoordinateme, men ikke radielt. Figuren er beregnet, et slags computerekperiment, hvor bølgepakken er mikset sammen af tilstande i natriumatomet med højt hovedkvantetal, $n=50$, og med store impulsmomenter. Rigtig eksperimentelt, kan en sådan tilstand skabes ved en kombination af en optisk excitation og et passende radiofrekvens-felt. Når rf-feltet er fjernet, vil bølgepakken kunne fortsætte i nogen tid i en klassisk banebevægelse. Eksperimentelt kan man efterfølgende studere bølgepakkens bevægelse ved at ionisere atomet med et kortvarigt elektrisk felt, og derefter iagttage ioniseringssignalet. Ioniseringsstyrken afhænger bl.a. af bølgepakkens position i banen.