Laserfysik ved lagerringen i Århus: laserkøling og ionstrenge?

Martin Kristensen og Ove Poulsen, Det fysiske Institut, Aarhus Universitet

Ved ASTRID lagerringen[1] i Århus er de første eksperimenter med tunge ioner gennemført i foråret 1990. Gennem den tekniske afvikling af disse forsøg er ASTRID trådt frem som et velfungerende og fleksibelt forskningsredskab. Forskningsprogrammet omkring ASTRID's tungiondel består af et bredt spektrum af problemer fra atomfysik, molekylefysik, kvanteoptik, plasmafysik og acceleratorfysik. Centralt i forskningsprogrammet indgår laserkøling af lagrede ioner dels med henblik på observation af ion-krystaller (se forklaring i boks) dels realisering af ultra-kolde ionfordelinger med henblik på fundamentale fysiske undersøgelser af for eksempel rum- og tids-strukturer.

Forklaringer på specielle begreber.

Ionkrystal: Tætpakket gruppe af kolde ioner, hvor forholdet mellem den potentielle og den kinetiske energi er større end 170. Et sådant system har mange lighedspunkter med en normal krystal, blot er afstanden mellem de enkelte partikler cirka 100 000 gange større.

Lukket optisk overgang: Elektromagnetisk overgang mellem to atomare niveauer (elektronbaner), som ikke kan henfalde til andre tilstande.

Powerforbredt absorptions profil: Form af spektrallinie, der angiver absorptionssandsynligheden som funktion af frekvensen for et atomart system, der er udsat for et resonant elektromagnetisk felt.

Landau-dæmpning: Dæmpning af en bølge i et plasma ved at dens energi absorberes af partikler, der bevæger sig med bølgens fasehastighed.

Ramsey-frynser: Interferens mellem en række af elektromagnetiske eksitationer af et atomart system med en levetid, som er lang i sammenligning med tiden mellem eksitationerne.

Elementer af dette forskningsprogram er afviklet i foråret 1990. Ion beam dynamik og laserkøling er studeret og en ultra kold (T_0 = 500 μK), 40 m lang ion-streng er muligvis observeret.

Ion stråle dynamik.

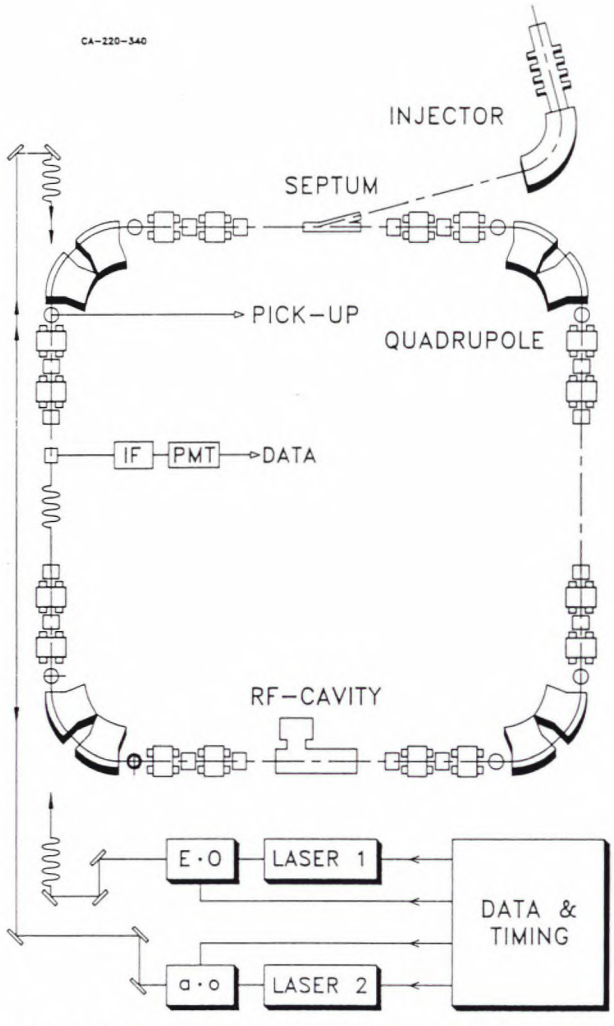
En af de vigtigste vekselvirkninger mellem ioner i et beam er intrabeam spredning. Det dominerende bidrag hertil er binære kollisioner, hvor to ioner i beamet refordeler deres kinetiske energi. Virkningen af disse processer vil være en kobling af de forskellige frihedsgrader i beamet, hvorved temperaturforskelle udlignes.

For ASTRID er udligningssprocessen hurtig sammenlignet med andre lagerringe, som vist af A. Sørensen[2]. I løbet af de første 10 ms efter injektion af et 100 keV $^7Li^+$ beam i ringen vokser energispredningen fra 2 eV til 100 eV. Årsagen er, at vi injicerer et beam af specielt høj kvalitet (lille divergens, stor intensitet og lav longitudinal temperatur $T_\parallel$), hvor tætte partikelstød forekommer ofte.

Laserspektroskopi er en ideel måde at studere forløbet af opvarmningen sammenlignet med andre metoder som for eksempel signaler fra en elektronisk pick-up, fordi absorptionen af fotoner ikke afhænger af kollektive fænomener i beamet. Det eneste alvorlige krav er, at den studerede ion skal have en lukket optisk overgang. En af de få ioner, der opfylder dette krav, er $^7Li^+$ ionen i den metastabile $^3S_1$ tilstand. Overgangen fra $^3S_1$ (F = 5/2) til $^3P_2$ (F = 7/2) er næsten lukket med et tab fra $^3P_2$ til grundtilstanden på under 10^{-5}.

Laserspektroskopien udføres med en ringlaser, som løber parallelt med ionbeamet i en af lagerringens fire lige sektioner (se figur 1). Absorption af laserlys finder kun sted, når frekvensen af det Dopplerskiftede laserlys svarer til overgangsfrekvensen for ionerne. Kun én hastighedsklasse vil være i resonans, hvorved det bliver muligt at måle den longitudinale hastighedsfordeling af de lagrede ioner ved at ændre frekvensen af laseren. Den hastigheds afhængige absorption måles ved den inducerede fluorescens, som er proportional med antallet af ioner i en bestemt hastighedsklasse. En sådan hastighedsklasse er defineret ved bredden af den powerforberedte absorptions profil. Dette begrænser opløsningen til den naturlige liniebredde. Det udsendte lys opsamles af et teleskop og detekteres med en photomultiplier (PMT). Et interferens filter (IF) diskrimenerer mod laserlys, som er spredt direkte fra væggene i vakuum kammeret.

Der er god overensstemmelse mellem vore målinger af den longitudinale opvarmning og den teoretiske beskrivelse[2] for en helt fyldt ring. Hvis man kun fylder en del af ringen med ioner og efterlader resten tom, skifter opvarmningen



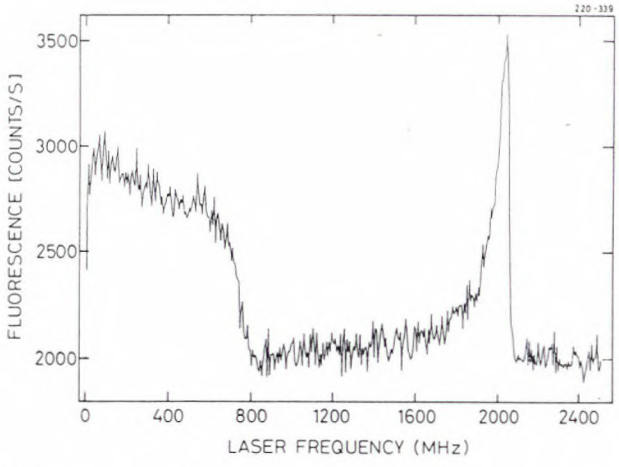
Figur 1. Skematisk tegning af ASTRID lagerringen. Nederst er angivet de to lasere, der anvendes til laserkølingen. E.O og a.o er optiske modulatorer, der bruges til at tænde og slukke for laserne.

karakter. Intra beam spredning er nu ikke længere dominerende, men i stedet foregår opvarmningen ved en Coulomb eksplosion, hvor enderne af ionbundtet frastødes af resten af ionerne. En sådan opvarmning kan være mere end 10 gange hurtigere end intra beam spredning. Så vidt vi ved, er denne form for opvarmning ikke blevet studeret i detaljer tidligere. I andre lagerringe injiceres ionerne normalt med så stor impulspredning, at den yderligere opvarmning ikke bemærkes.

Laser køling.

Ved laserkøling udnyttes den netto impulsoverførsel, som finder sted ved absorption af laserfotoner fra en retning og udsendelse i tilfældige retninger. Hvis man skyder én laser ind parallelt med ionbeamet og indstiller dens frekvens til at være i resonans med de langsomste ioners overgangsfrekvens og en anden laser antiparallelt med beamet og i resonans med hurtigste ioner, er det muligt at skubbe ionerne sammen omkring middelhastigheden. For de ioner, som er tæt på én af laserne, er processen meget effektiv.

Køling af et ionbeam i en lagerring v.h.a. lasere blev første gang realiseret ved TSR i Heidelberg for ca. 1 år siden[3].



Figur 2. Den udsendte fluorescens fra et 100 keV $^7Li^+$ beam under laserkølingen. Frekvensaksen angiver ændringen af den ene frekvens fra værdien ved injektionen af ionerne. Frekvensen ændres med en hastighed på 625 MHz/s, hvorfor aksen samtidig er en tidsakse, der begynder med injektionen og slutter 4 sekunder senere.

På grund af den hurtige opvarmning fra intra beam spredning er det dog ikke muligt at holde beamet koldt lige fra injektionen. Desuden er det for et $^7Li^+$ beam kun muligt at køle på den meget lille del af ionerne (~ 10^{-4}), som er i $1s2s\ ^3S_1$ (F = 5/2) tilstanden. I praksis må kølingen derfor foretages ved at placere frekvensen af lyset fra laserne et stykke væk fra den oprindelige hastighedsfordeling for at undgå at tabe for mange ioner i begyndelsen. Derefter scannes den ene lasers frekvens opad, således at alle ionerne skubbes sammen foran den anden. Figur 2 viser den udsendte fluorescens under dette scan. Spektret viser to bemærkelsesværdige fænomener: En indledende fase med megen fluorescens afsluttet med en skarp kant og en laser kølet fordeling, som opstår, når frekvensen af de to kølelasere stemmer overens i ionernes hvilesystem.

Der knytter sig en række overraskende observationer til kølespektrene. For det første er det ikke muligt at detektere nogen laser kølet fordeling før kanten, og for det andet afhænger kantens placering hverken af intensiteten, scanne hastigheden eller den præcise placering af laserne. Kantpositionen er derimod afhængig af tiden efter injektion. Det forløbne tidsinterval med høj fluorescens afhænger svagt af beamstrømmen, men lineært af længden af det bundt af ioner, som vi injicerer. Intensiteten af fluorescensen er proportional med kvadratroden af lasernes intensitet. Endelig opnås den konstante fluorescens altid indenfor 20 ms efter injektion. Positionen af den kølede top er derimod kun afhængig af laserfrekvenserne. Så snart disse stemmer overens i hvilesystemet, observeres den kølede fordeling.

Ved at måle den kølede top med væsentlig bedre opløsningsevne end på figur 2 (d.v.s. lavere laser intensitet) og sammenligne resultaterne med computer-simuleringer[4] finder vi, at den laveste temperatur bliver ca. 500 μK. Dette svarer til en impulsspredning på $\Delta p/p \sim 10^{-6}$. Den opnåede

temperatur er væsentligt lavere end ved de tidligere eksperimenter i Heidelberg, hvor den hidtidige rekord er ca. 200 mK.

Ionstrenge ?

En nærmere analyse af vore resultater tyder på, at kølingen fører til dannelse af en kold streng af ioner. Vi mener at strengen dannes i forbindelse med fluorescens-kanten ved, at den transversale energi samles på langbølgede svingninger og de longitudinale svingninger køles næsten væk. En yderligere køling af den longitudinale frihedsgrad til 500 μK finder derpå sted under resten af scannet.

Dannelse af strengen kræver en afkobling af nogle få af ionerne fra resten. Dette kan f.eks. forekomme ved, at energien overført til de individuelle ioner i strengen ved hårde stød med varme ioner overføres til kollektive vibrationer. Energien i disse vibrationer kan delvis leveres tilbage til den varme "suppe" på grund af Landau-dæmpning. Vi er ikke sikre på, at dette er den eneste mekanisme i afkoblingen. Den næste serie af eksperimenter med laserkøling vil blandt andet sigte på at undersøge dette. Det vil også blive prøvet at køle på en anden type ioner, hvor den lukkede overgang udgår fra grundtilstanden. Herved håber vi, at blive i stand til at køle hele beamet, hvorved der er chance for at at danne regulære ionkrystaller med interessante, nye strukturer. En oplagt kandidat er $^{166}Er^{+}$. Den lukkede overgang i denne ion ser endvidere ud til at tillade væsentligt lavere temperaturer end de 500 μK.

Den kolde streng er dog ganske interessant i sig selv. Den giver perfekte muligheder for høj præcisions spektroskopi, fordi den lave temperatur reducerer første ordens Doppler forbredning. Desuden åbner den lange levetid og velordnede opførsel af en ionstreng mulighed for at observere Ramsey frynser fra successive excitationer af mikrobølge-overgange i ionerne. En lagerring er specielt velegnet til denne form for spektroskopi. For eksempel kan excitationerne her foretages i den samme mikrobølgekavitet, hvilket reducerer fasefejl, og antallet af excitationer kan vælges næsten frit. Det er kun begrænset af lagringstiden og levetiden af mikrobølge kohærenserne.

Ved at udnytte fordelene ved sådanne Ramsey-teknikker er der i princippet mulighed for at opnå liniebredder på Hz niveau. Ved at variere på antallet og varigheden af excitationerne muliggør dette at udføre tests af lineariteten af kvantemekanikken og rummets isotropi.

Litteratur.

1. J.F.Bak, KVANT nr. 1, 17 (1990)
2. A.H. Sørensen i **CERN** 87-10 (udgiver: S. Turner), 135 (Geneve, 1987).
3. S. Schröder et al.; Phys.Rev.Lett. **64**, 2901 (1990).
4. Beregninger udført af K.Berg-Sørensen og K. Mølmer.



Ove Poulsen født 1946, fysiker med baggrund indenfor atom- og laserfysik



Martin Kristensen, Ph.D. studerende ved Det fysiske Institut i Århus.