

Interessante resultater med en hjemmelaget spektrograf

Roar Skartlien, 2014

Innledning

Denne artikkelen viser hvordan du kan lage en hjemmelaget spektrograf med en relativt høy oppløsningsevne, slik at Doppler-hastigheter ned til ca. 10 km/s kan måles. Spektrografer av denne typen kan monteres på et amatørteleskop med solid montering. En kan da for eksempel måle Jupiters rotasjonshastighet om sin egen akse, komponenter i spektroskopiske dobbeltstjerner, eller man kan identifisere ulike grunnstoffer i stjerne- eller planetatmosfærer. Noen eksempler blir vist nedenfor. I en slik spektrograf kan du eventuelt benytte gamle kameralinser som du ikke bruker lenger, men det trengs et godt refleksjonsgitter for å spalte lyset i de forskjellige farger. Slike gittere kan skaffes til en relativt rimelig pris.

Hva er spektroskopi?

Spektroskopi er det viktigste verktøyet for å analysere den elektromagnetiske strålingen vi mottar fra Universet. Detaljene i spekteret er "fingeravtrykk" som viser hvilke grunnstoffer objektene består av. Absorpsjon og emisjon av lys med bestemte farger i spekteret skyldes energioverganger til elektroner som er bundet til ioner, atomer og molekyler, og det er disse energiovergangene som genererer spektrallinjene i spekteret du observerer. I tillegg kan hastigheter måles via fargeforskyvningen av spektrallinjene (Doppler-effekten), og andre forhold som temperatur og trykk kan måles via bredden av spektrallinjene. Denne forståelsen er bygget på kvantefysikken som ble utviklet i første halvdel av det forrige århundret, samt fysiske modeller av stjerneatmosfærer. Slike beregninger resulterer i syntetiske, data-genererte spektra som kan sammenliknes mot observasjoner, og dette har lenge vært en gren innenfor astrofysikken.

Kan hobby-astronomer utføre spektroskopi?

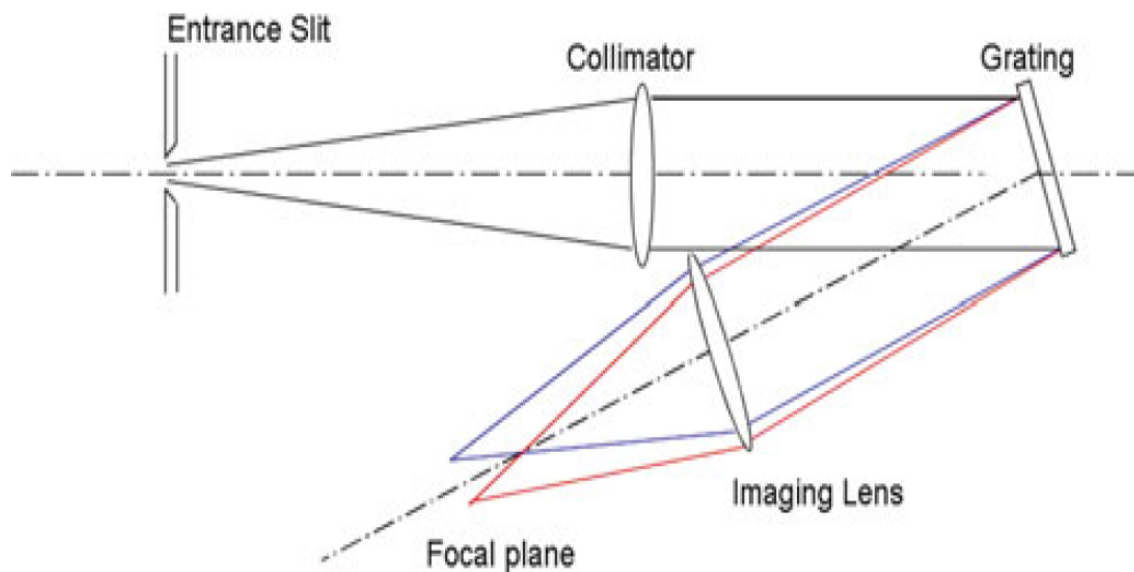
Astrofotografering med digitale kameraer eller CCD er både gøy og interessant, men spektroskopi åpner opp én dimensjon til. Hobby-spektroskopi har nå blitt mulig på grunn av den høye lysfølsomheten til kommersielt tilgjengelige digitale kameraer og CCD-kameraer. Spektrografer for «amatørbruk» har lenge vært anvendt for analyse av stjernespektra, novaer og super-novaer, og til og med for måling av rødforskyvningen til galakser og kvasarer. Slike spektrografer kan lages selv eller kjøpes. Den enkleste formen for spektrograf består av et enkelt transmisjonsgitter, som for eksempel «Star Analyzer», som kan settes inn i lysgangen til et teleskop, eller foran en telelinse. Med dette oppnås en forholdsvis lav spektral oppløsning på 5-10 Ångstrøm, men til gjengjeld kan man få spektra av meget svake objekter som galakser og supernovaer ved bruk av CCD. Et enkelt transmisjonsgitter er et naturlig startpunkt hvis du vil begynne med spektroskopi, og jeg begynte selv med «Star Analyzer» (samme størrelse som et okularfilter), sammen med softwaren R-Spec for å plote og analysere spektra (også brukt nedenfor).

Høyere spektral oppløsning fås med tilleggsoptikk og gjerne i kombinasjon med et refleksjonsgitter og en smal spalte for å gjøre spektrallinjene så smale at den naturlige bredden til linjene kommer frem. En slik spektrograf vil bli beskrevet nedenfor. Kommersielle spektrografer med oppløsning ned til 1 Ångstrøm eller mindre er ofte svært dyre i et lite marked, og mange hendige amatører har derfor bygget sine egne spektrografer fra linser og reservedeler, med imponerende resultater. Den viktigste begrensningen synes å være lysmengden som teleskopet kan samle inn, der amatørteleskop med over 16 tommers objektivdiameter er sjeldne. Noen av de mest ivrige har bidratt til vitenskapelige artikler med data og analyser, og dette er et tegn på at resultater med høy kvalitet kan genereres med tilgjengelig utstyr. Hvis du er ekstra motivert, og har sans for systematisk og utfordrende arbeid, er det mulig å bidra til slike prosjekter!

Oppskrift på en hjemmelaget gitter-spektrograf

Hvis du er hendt, og din økonomi ikke tillater innkjøp av en dyr spektrograf, kan det å bygge selv

være et godt alternativ til en ferdiglaget spektrograf. En rekke pionerer beskriver sine resultater på internett, og en av disse er Christian Buil. På hans nettside beskrives hvordan man kan lage en standard type gitter-spektrograf (figur 1) fra vanlige kameralinser, et kvalitets-gitter, og med materialer du har for hånden. Ellers finnes noen gode bøker som en kan få ideer fra, f.eks. «Astronomical Spectroscopy for Amateurs» av Ken Harrison. Et mål for meg var å designe en spektrograf med en oppløsning på 1 Ångstrøm (0.1 nanometer) slik at Doppler-skift av mange objekter kan måles (for eksempel spektroskopiske dobbeltstjerner). Jeg benyttet meg av et regneark som kan lastes ned fra Christians nettside, for beregning av ulike avstander og vinkler for montering av «normale objektiver» som brukes for speilreflekskameraer. En kan også klare seg uten disse beregningene med litt prøving og feiling, som beskrevet under.



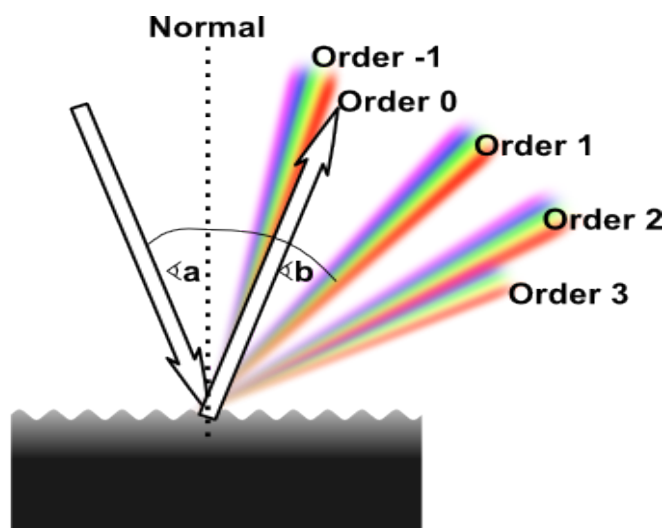
FIGUR 1: Prinsippskisse for en gitterspektrograf. Lyset fra teleskopet kommer inn fra venstre og fokuseres på en smal spalteåpning (entrance slit), der bare noe av lyset i diffraksjons-skiven slipper gjennom. Kollimatoren gjør strålene fra spalteåpningen parallelle, før de faller inn på gitteret (grating). Der reflekteres lyset i en vinkel som avhenger av bølgelengden/fargen på lyset (hvitt lys inneholder «alle» farger), og dermed dannes et spektrum. Objektivet (imaging lens) fokuserer spekteret i bildeplanet (focal plane) der sensoren eller CCD'en sitter. Spalten sørger for god spektral oppløsning (smale nok spektrallinjer).

Den viktigste ingrediensen i en spektrograf er selve gitteret som spalter lyset i forskjellige farger, og her bør det ikke spares. Jeg anskaffet to Edmund Optics 30x30 mm reflekterende gittere, med 600 og 1200 linjer per millimeter (på ca 100 euro hver), og en justerbar monteringsbrakett. Lys med forskjellige bølgelengder reflekteres med forskjellig vinkel fra gitteret (figur 1 og 2), og monteringsbraketten gjør at gitter-vinkelen kan justeres slik at ønsket del av spekteret kommer inn i kameralinsen. Gitteret består av en serie skråttstilte speilstriper («linjene») som hver og en reflekterer det innkommende lyset. Disse bidragene genererer tilsammen et interferensmønster som avhenger av lysets bølgelengde, og på denne måten dannes flere spektra som vist i figur 2. Spekteret av orden 1 (eller -1) benyttes som oftest da det har størst lysstyrke. Jo fler linjer/speilstriper per millimeter, jo «bredere» blir spekteret og den spektrale oppløsningen øker, men lysstyrken på kamerasensoren blir da lavere. I kombinasjon med en smal spalte og en kollimator (figur 1), dannes det mørke eller lyse linjer i spekteret på bestemte farger. Fargen eller bølgelengden på disse spektrallinjene tilsvarer energiovergangene til atomene eller ionene i det astronomiske objektet som observeres.

Det nest viktigste ingrediensen er spalten, som sørger for at spektrallinjene blir skarpere. Det er velkjent at en punktkilde som en stjerne har en endelig utstrekning (en diffraksjons-skive) i

fokusplanet, med en diameter som er omvendt proporsjonal med teleskopobjektivets diameter (på hovedspeil eller linse). En slik diffus skive vil også smøre ut spekteret, og formålet med spalten er at noe av lyset i diffraksjons-skiven blokkeres ut, slik at bare en tynn strek slipper gjennom. Oppløsningen blir bedre (linjene i spekteret blir smalere), men på bekostning av at mindre lys utnyttes. Det ble anskaffet et eksemplar fra Thor Labs, med en mikrometer justerings-skrue slik at spaltebredden kan varieres. Dette er viktig, slik at en kan først sentrere objektet inne i en vid spalte, og deretter justere bredden ned til en «tynn strek». I tillegg må kvaliteten være god slik at spaltekantene er parallelle helt ned til en åpning på 10-20 mikrometer. Denne spalten var dyrere enn begge gitterne tilsammen, men den var verdt prisen siden denne gir (dramatisk) mye bedre spektral oppløsning, ned til de ønskede 1 Å.

Den siste hovedingrediensen i spektrografen er linsene (kollimatoren og objektivet), og en kan da tørke støv av gamle linser som du ikke får brukt lenger. Jeg hadde en 28-90 mm Vivitar serie 1 zoomlinse liggende «brakk», som jeg brukte til kollimator, og en 55-200 mm Canon zoomlinse som jeg brukte som objektiv. Kollimatoren bruker jeg på 90 mm brennvidde ved $f/3.5$, og kameralinsen bruker jeg i området 100-200 mm, avhengig av ønsket «spenn» i bølgelengde.



FIGUR 2 Prinsippskisse for et gitter. Flere spektra genereres (Order 1, 2, etc). Vanligvis velges Orden 1, da dette har størst lysstyrke. Ren refleksjon forekommer i Orden 0, og dette kan brukes til fokusering av optikken.

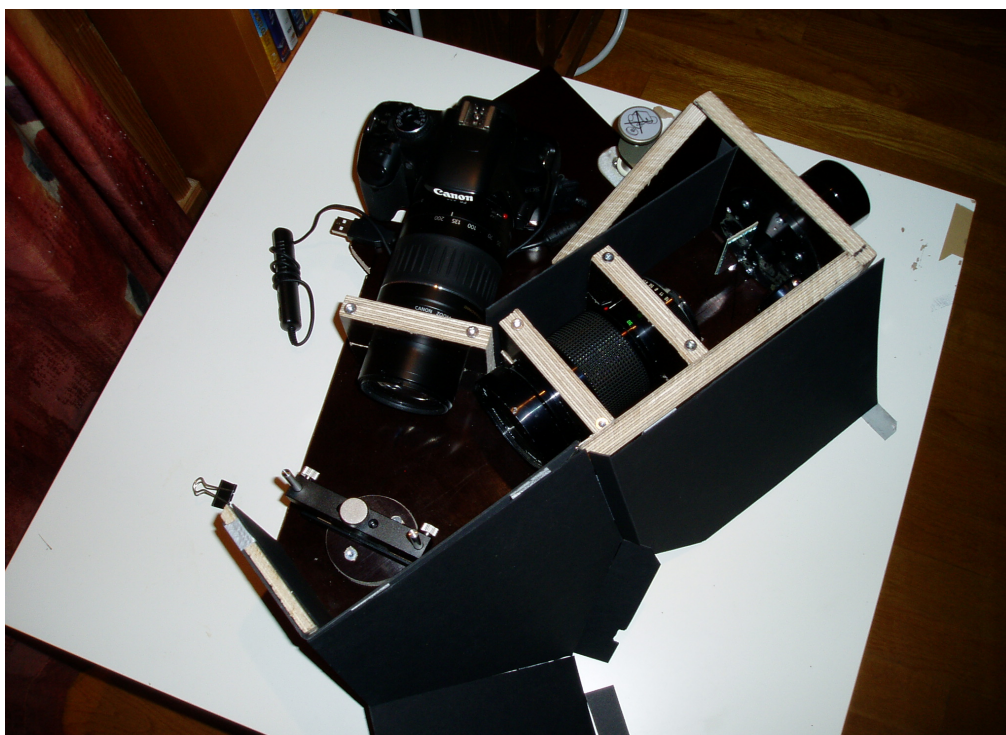
Hvordan settes så disse ingrediensene sammen? Spalten er plassert i senter av strålegangen, og kollimatoren fokuseres på spalteåpningen (figur 1). Fokuspunktet for teleskopets objektiv sammenfaller også med spalteåpningen (der lyset fra teleskopet kommer inn fra venstre i figuren). Kollimator-linsen er satt inn "baklengs" slik at lyset entrer baksiden av linsen og går ut gjennom frontlinsen (figur 3 og 4). Denne linsen settes på uendelig avstand, slik at strålene (fra teleskopets fokuspunkt/spalteåpningen) er parallelle når de faller inn på gitteret (figur 1). Kameralinsen (objektivet) er også satt til uendelig, og spalten er da i fokus i kameraets bildeplan (figur 1). Fokuseringen kan sjekkes ved at gitteret stilles inn på en slik vinkel at det virker som et speil (ved bruk av Orden 0: se figur 2), slik at spalten kan sees direkte i kameraet som en tynn strek.

De to linsene og gitteret monteres sammen i en kasse, ved å bruke for eksempel lett kryssfiner. De viktigste parametrene er vinklene a og b (innfalls- og utfallsvinkelen) for gitteret (figur 2), og avstandene mellom spalte, linser og gitter. Med kravet om at kollimatoren skal fokuseres på spalteåpningen, og at spalten skal være i fokus i kameraet, kan en klare å montere dette sammen uten beregninger, men da med noe prøving og feiling. Jeg benyttet istedet Christian Buils regneark for å beregne avstandene og vinklene. Eventuelt kan man benytte formelverket fra grunnen av, og dette finnes blant annet i Ken Harrisons bok.

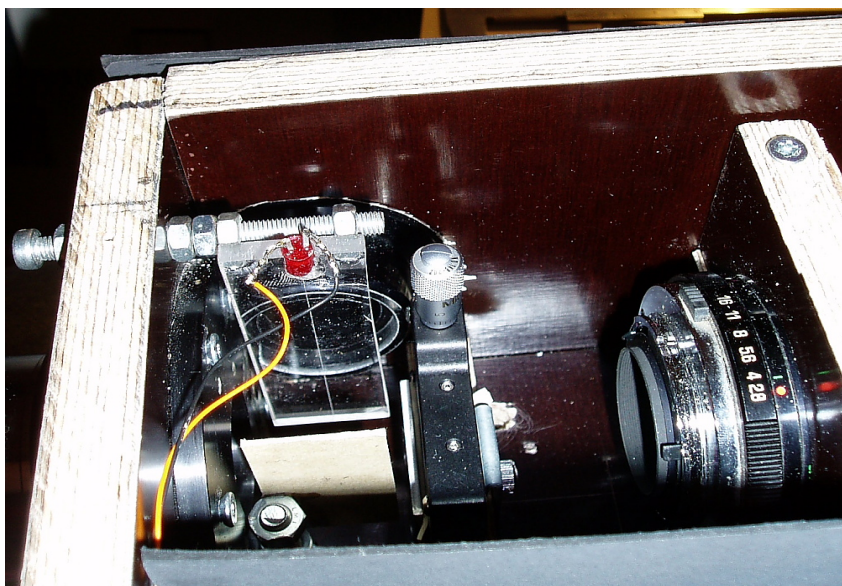
For å sentrere et objekt på spalten, brukes ofte speilbelagte spalteplater som reflekterer det lyset

som ikke går gjennom spalten, tilbake inn i et okular. I okulalet vil det da være en svart strek gjennom objektet der spalteåpningen befinner seg. Jeg fikk ikke tak i en slik reflekterende spalte, og derfor satte jeg inn et flippspeil før spalten, og denne kaster lyset ut i et sideokular. En ledelinje i plexiglass ble montert mellom speilet og okulalet for å sentrere objektet, som vist i figur 4. Ledelinjen er opplyst med rødt lys og den ligger i okulalets fokuspunkt. Når objektet sentreres på denne linjen, vil teleskopets fokus treffe spalten når flippspeilet flyttes tilbake (figur 4). Denne prosedyren virker tilfredsstillende når teleskopet har god tracking. En reflekterende spalte er nok mer robust siden det da ikke trengs noe flippspeil, og en kan korrigere trackingen manuelt også under lange eksponeringer, om trackingen glir ut på mindre nøyaktige monteringer. Figur 5 viser okulalet, og inngangsrøret til spektrografen som kan monteres i okularholderen til et teleskop.

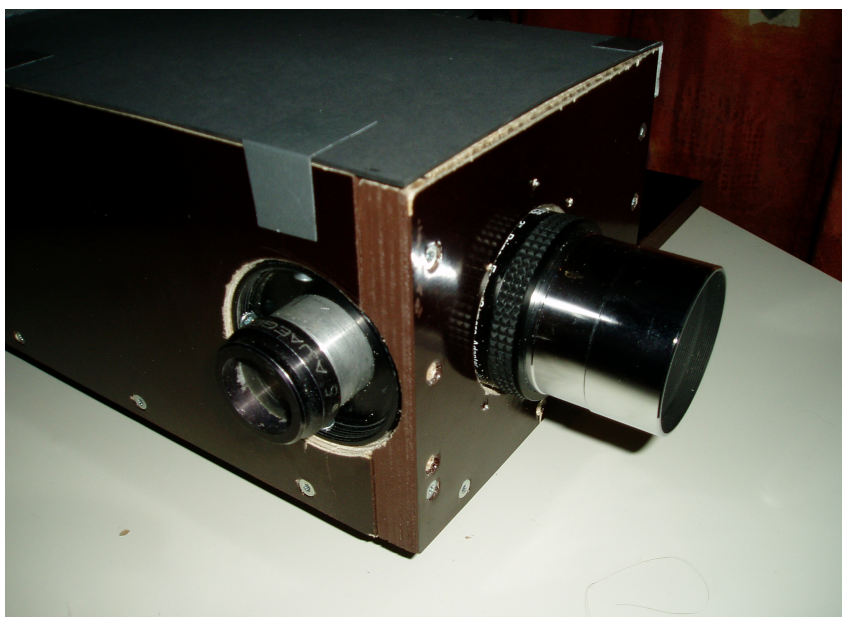
Alle delene ble montert sammen med 12 mm (stiv) kryssfiner som ble kuttet og montert ved hjelp av treskruer. Tynnere og lettere finer kan også brukes. Et standard speilreflekskamera (f.eks. mitt Canon 450 D), eller et CCD kamera kan monteres inn i spektrografen. Sluttresultatet blir da en «hi-fi IKEA» spektrograf! Denne har jeg kalt QCSPEC: «Quantum Café SPECTrograph» siden den da brukes ofte på mitt observatorium «Quantum Café» på Fetsund. Jeg brukte omtrent en måned på å bygge dette instrumentet, i mars 2013.



FIGUR 3: Ferdig montert "IKEA-spektrograf". Svart pappdeksel (lett) brukes for å hindre strølys. Et Edmund Optics 30x30 mm gitter er plassert i holderen som kan roteres for å sentrere et hvilket som helst bølgelengdeområde innenfor kameraets synsfelt.



FIGUR 4: Thor Labs spalten med justeringsskrue (midt på bildet) er på plass, og jeg laget en justerbar opplyst ledelinje (kuttet med en skarp kniv) i plexiglass som brukes slik at objektet kan sentreres på spalten ved hjelp av okular og flippspeil. En rød LED (Light Emitting Diode) ble boret inn i plexiglasset. Kollimatorlinsen er montert inn baklengs (til høyre).

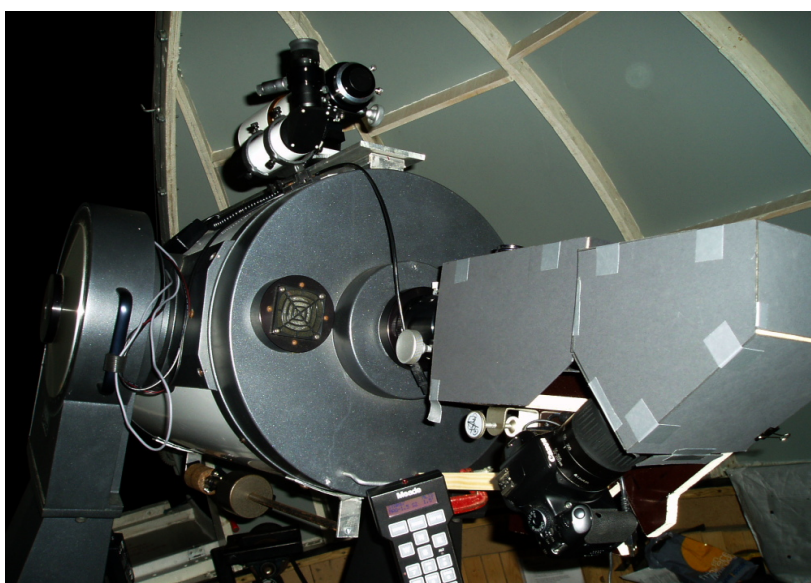


FIGUR 5: Okular for bruk med flippspeil for sentrering av objektet på spalten. Røret til høyre er av standard dimensjon som passer i okularholderen til de fleste teleskop.

Spektrografen brukes i 10 tommeres Newton-reflektoren i observatoriet (figur 6), og på 16 tommeres Schmidt-Cassegrain teleskopet på Hågård-observatoriet (til Gjøvik og Toten Astronomiske Forening) (figur 7). Spektrografen er ganske tung (4-5 kg), men instrumentene har stått så langt, med ekstra motvekter. Vekta kan reduseres vesentlig ved å bruke en enklere kollimator-linse (en enkel apokromatisk linse), en enkel lett kameralinse, og tynnere kryssfiner. Kommersiell spektrografer er ekstra lette, men også «ekstra dyre», og kanskje heller ikke så fleksible når det gjelder endring og tilpasning til de spesifikke behov.



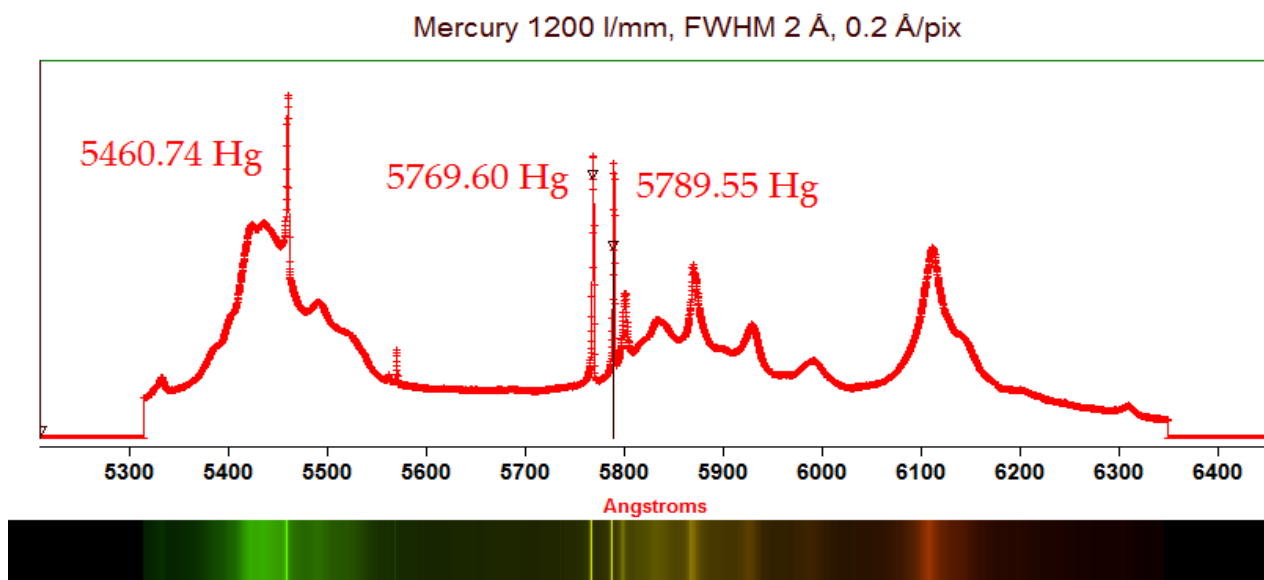
FIGUR 6: Testing på 10 tommeren i Quantum Café.



FIGUR 7: Ferdig QCSPEC, montert på 16 tommeren (Schmidt-Cassegrain). En autoguider er montert på toppen av teleskopet, noe som er til stor hjelp for å holde spalten i ro på objektet. Her analyseres komet Panstarrs i 2013.

Testing og kalibrering av spektrografen

Når en da har investert mye tid på å sette sammen en slik spektrograf, er spenningen elektrisk ved første testing. Med spalten på plass, dyttet jeg inn en sparepære i inngangsrøret, fokuserte linsene, og justerte ned spalteåpningen til ca. 20 mikrometer. Figur 8 viser spekteret med gitteret på 1200 linjer/mm, og vi ser noen skarpe spektrallinjer som viser emisjon på energiovergangene til kvikksølv. Dette var et svært oppmuntrende resultat. Bredden på spektrallinjene var ca 2 Å, noe mer enn oppløsningsevnen på ca 1 Å, da spektrallinjene har en viss bredde i seg selv. En slik sparepære, eller aller helst en neopære (fra komfyr eller vaskemaskin), egner seg utmerket til bølgelengdekalibrering av spektrografen. Det enkleste er å kalibrere bølgelengdeaksen på kjente linjer i spekteret fra det objektet en observerer, om disse kan identifiseres.



FIGUR 8: Spektrallinjer fra kvikksølv (Hg) vises i lyset fra en sparepære. Tallene angir bølglengden i Ångström ($1\text{\AA} = 0.1\text{ nanometer}$). Selve spekteret er stripa i bunnen, mens kurva over viser lysstyrken langs etter spekteret. Hvert kryss på kurva markerer ett piksel i bildet fra kameraet.

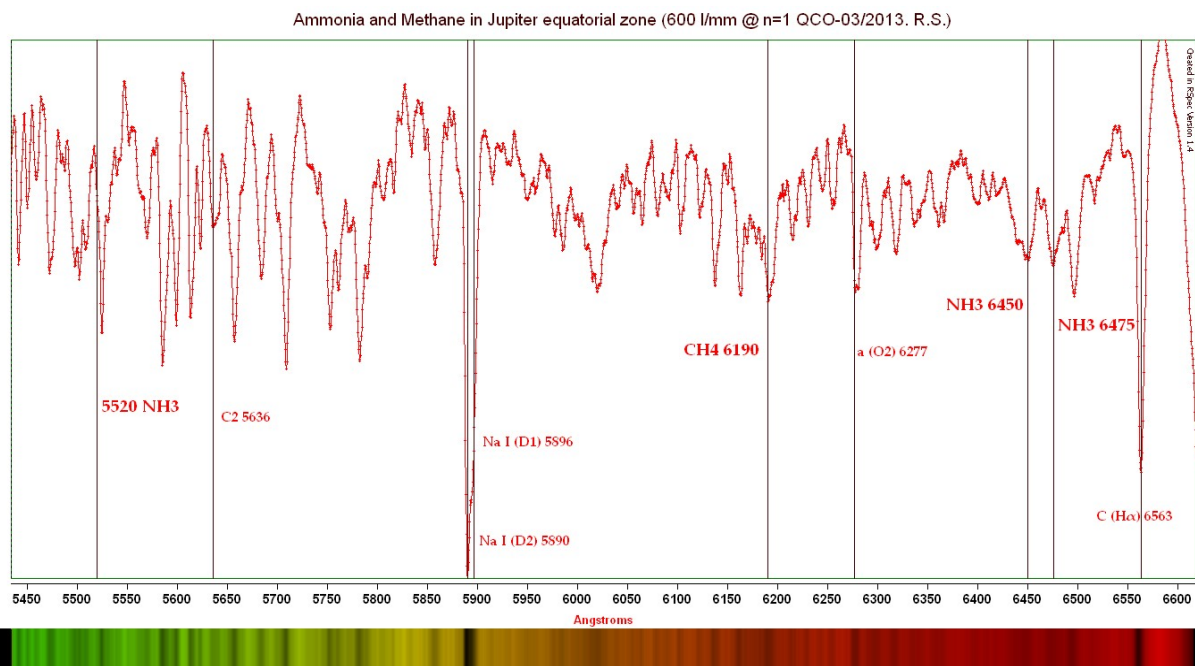
Jupiters rotasjonshastighet og atmosfæriske gasser

Målet var her å detektere Doppler-effekten i Jupiters spektrum som skyldes planetens rotasjon om sin egen akse. Dette spekteret dannes naturligvis på grunn av reflektert sollys, siden planeten ikke sender ut eget lys. De fleste spektrallinjene er da solare, men noen linjer skyldes absorpsjon i enkelte molekyler i Jupiters atmosfære.

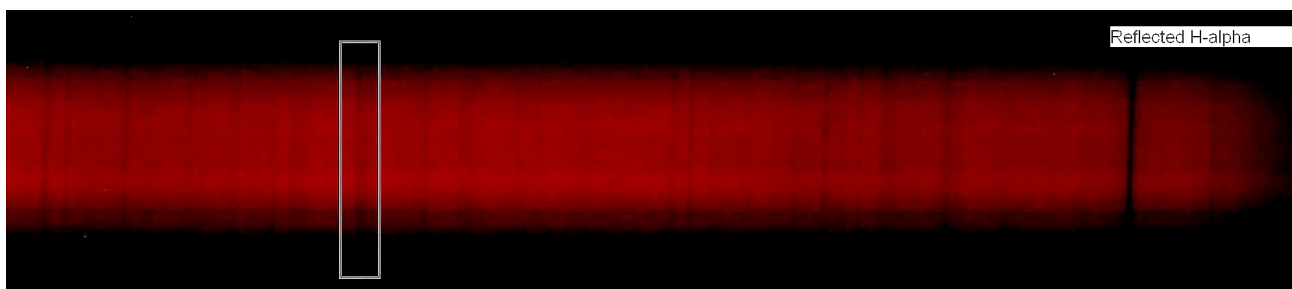
Spalten ble plassert langs Jupiters ekvator, og en skal da forvente skrå spektrallinjer på grunn av Doppler-effekten. På vestre rand blir lyset litt blåforskjøvet da planetatmosfæren beveger seg mot oss, og på østre rand blir det motsatt, med en rødforskyvning. De skrå spektrallinjene kan sammenliknes mot enkelte rette linjer i det samme spekteret som ikke er forskjøvet, og for disse kan en velge absorpsjonslinjer dannet av oksygen i Jordas atmosfære. Figur 9 viser spekteret av Jupiter med den solare Hydrogen alpha linjen på $6563\text{\AA}$, og en jordisk absorpsjonslinje i oksygen (O_2 på $6277\text{\AA}$). Figur 10 viser at oksygenlinjen er rett, og at de andre linjene fra Jupiter er skrå på grunn av rotasjonen. Ramma viser oksygenlinjen fra jordatmosfæren, og vi kan se at de øvrige linjene er en tanke skrå. Den kraftige hydrogen-alpha linjen ble brukt til å måle Jupiters rotasjonshastighet.

Rotasjonshastigheten V er gitt ved sammenhengen $V/C = D/l$, der C er lyshastigheten, l er (den uforskjøvede) bølglengden til spektrallinjen, og D er bølglengdeforskyvningen. Hydrogenlyset fra Sola ankommer Jupiters østre rand med rødforskyvning, målt av en observatør som følger med Jupiters rotasjon. Lyset reflekteres tilbake til Jorda, men siden randhastigheten tilsvarer bevegelse vekk fra Jorda, ankommer lyset dobbelt rødforskjøvet inn teleskopet til en observatør på Jorda. Ved å ta hensyn til dette, og ved å måle hvor skrå Hydrogen-linjen er i spekteret (figur 10), ble rotasjonshastigheten på Jupiters ekvator beregnet til 11.4 km/s . Det riktige svaret er 12.6 km/s , så estimatet var bare 10% feil! Dette må sies å være overraskende nøyaktig med slikt primitivt utstyr.

Jupiter-spekteret dannes på grunn av reflektert sollys, og mange av linjene er derfor dannet i Solas atmosfære. Ammoniakk og metan-molekyler kan ikke eksistere på Sola fordi temperaturen er for høy, og siden spekteret i figur 9 viser absorpsjon i ammoniakk (NH_3) og metan (CH_4) må da disse gassene befinne seg i Jupiters atmosfære. Dermed inneholder dette spekteret mye informasjon, om både rotasjon og bestanddeler i Jupiters atmosfære.



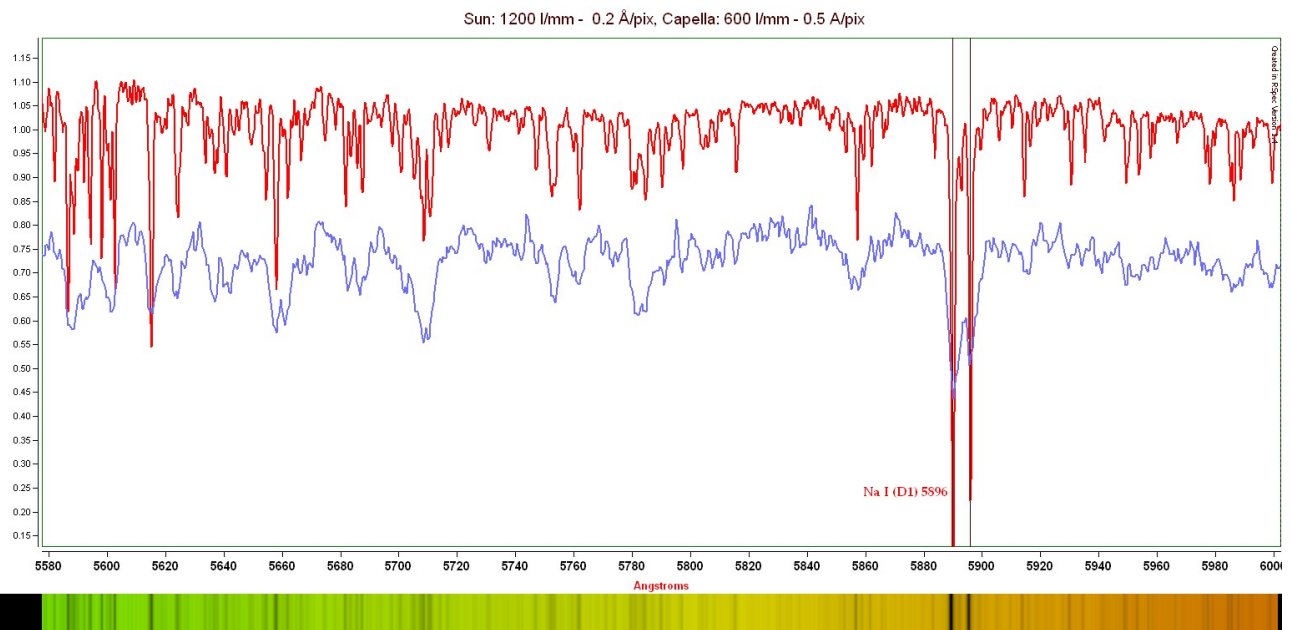
FIGUR 9: Spekteret av Jupiter viser reflektert sollys som Hydrogen alpha på 6563Å, men også absorpsjon i ammoniakk (NH₃) og metan (CH₄) som finnes i Jupiters atmosfære. I tillegg vises absorpsjon i oksygen i Jordas atmosfære (O₂ på 6277Å).



FIGUR 10: Ramma viser oksygenlinjen fra jordatmosfæren, og de øvrige linjene er skrå (heller mot høyre). Den kraftige hydrogen-alpha linjen i reflektert sollys (til høyre) ble brukt til å måle rotasjonshastigheten til Jupiter, da signal/støy forholdet er relativt lavt her.

Sola sammenliknet med Capella

Vi vet alle at Sola er en stjerne. For å illustrere dette kan en sammelikle solspekteret mot en stjerne av liknende spektralklasse. Capella er en dobbeltstjerne der begge komponenter er av spektralklasse G, og rundt disse sirkler det enda et dobbeltstjernesystem der begge komponentene er svake røde dverger. Capella har forlatt hovedserien, og G-komponentene er på vei mot kjempestadiet (de startet med en annen spektralklasse på hovedserien). Siden spekteret domineres fullstendig av G-stjernene kan man forvente at det har mange felles trekk med solens G-spektrum, selv om Capella er på et senere utviklingsstadium. Figur 11 avslører at likhetene er slående over hele spekteret. Begge spektra har tydelige Natrium-linjer, der den doble Fraunhofer D-linjen er markert. Solspekteret ble målt i spektrografen bare ved å slippe lys direkte inn på spalta uten teleskop-optikk. Capellas spektrum ble målt med spektrografen montert på teleskopet.

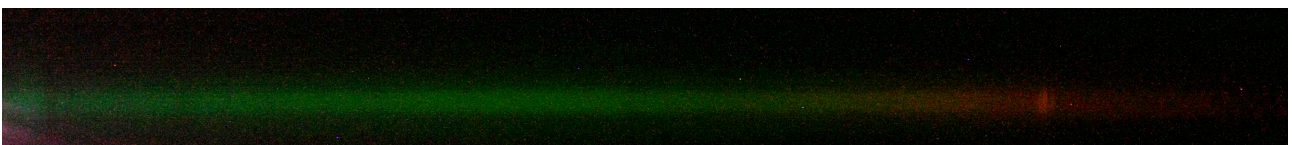


FIGUR 11: En del av spekteret til Capella (blått) sammenliknes med Solens spekter (rødt). Spektrene har forskjellig oppløsning (Capella-spekteret har lavere oppløsning) slik at kvantitativ sammenlikning er vanskelig, men det er tydelig at det er mange fellestrekk. Begge har tydelige Natrium-linjer, der den doble Fraunhofer D-linjen er markert. Spekteret nederst er også solspekteret.

Natrium i komet Pan-STARRS

Komet Panstarrs ble analysert med spektrografen den 25. mars 2013, på Hågård-observatoriet. Å måle spektra fra kometer kan være en utfordring siden de beveger seg samtidig med at lyset fra kometkjernen må falle inn på spalten. En autoguider som tracker på kometen løser dette problemet. Siden kometer er utstrakte objekter, er det helt nødvendig å bruke spalte for å få frem detaljer i spekteret.

Normalt sett viser kometer emisjonsbånd som skyldes energioverganger i molekyler, slik som C2 molekylet (to karbon-atomer bundet til hverandre). Disse energiovergangene skyldes endringer i vibrasjons og rotasjonsenergi inne i de enkelte molekylene. Komet Panstarrs viste en klassisk C2 emisjon i den grønne delen av spekteret, men at det var relativt kraftig emisjon i Natrium i gult/oransje kom som en stor overraskelse. Figur 12 viser en del av spekteret til kjernen og komaen, og emisjonslinjen til høyre er fra Natrium. Senere analyse utført av andre observatører viste at kometens gasshale også inneholdt Natrium. Denne Natrium-emisjonen tilsvarer de samme energiovergangene som for den doble Fraunhofer D-linjen i solspekteret (og for Capella). Natrium er en bestanddel i bordsalt (Natrium-Klorid), så det er jo morsomt i seg selv at også kometer inneholder kjente stoffer som dette.



FIGUR 12: En del av spekteret av kjernen og komaen til komet Panstarrs. Emisjonslinjen til høyre er fra Natrium.

Videreføring

Alt i alt har dette vært et svært interessant prosjekt, og det var verd innsatsen. En spektrograf av denne typen kan også brukes til å detektere komponentene i spektroskopiske dobbeltstjerner. En annet mål kan være å sammenlikne spektrene fra forskjellige typer stjerner mot beregninger som bruker modeller av stjerneatmosfærer. På denne måten kan man utføre en mer detaljert analyse av forholdene på andre stjerner. Slike beregnings-programmer er fritt tilgjengelige uten kostnad, men dette kommer jeg eventuelt tilbake til i en annen artikkel. Mer om dette, og flere andre resultater med spektrografen kan finnes på min nettside for Quantum Café:

<http://www.home.no/quantumcafe/index.html> Her finnes også resultater med et enkelt «Star Analyzer» transmisjonsgitter brukt på en telelinse eller i et teleskop, og dette oppsettet kan anbefales for å bli kjent med spektroskopi. Jeg håper at flere kunne være interessert i liknende prosjekter, slik at vi kunne dele erfaringer og kanskje generere resultater sammen.