



LUND UNIVERSITY

Atomer och stjärnor

Edlén, Bengt

Published in:
Kosmos

1972

[Link to publication](#)

Citation for published version (APA):
Edlén, B. (1972). Atomer och stjärnor. *Kosmos*, 49, 57-68.

Total number of authors:
1

General rights

Unless other specific re-use rights are stated the following general rights apply:
Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

Read more about Creative commons licenses: <https://creativecommons.org/licenses/>

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

LUND UNIVERSITY

PO Box 117
221 00 Lund
+46 46-222 00 00

Atomer och stjärnor

Föredrag vid Fysiska Föreningens hundraårsjubileum
den 8 oktober 1971

Fysiska Föreningens i Lund jubileum går i Janne Rydbergs tecken. Det må vara ett skäl för att ta upp ett ämne som kan belysa hur vi förvaltat arvet efter Rydberg. Kanske det också kan ursäktas att ämnet behandlas ganska elementärt och med viss tonvikt på den historiska utvecklingen för att få mera direkta anknytningar till Rydbergs arbete.

Sammanställningen av atomer och stjärnor, de minsta och de största klumpar av materie som finns, är som vi skall se mycket naturlig. I båda fallen är det vanskligt att ge en åskådlig bild av förenälen för vårt studium. Ingen har ännu »sett» en atom, och en bild av en stjärna hjälper oss inte mycket. Det enda som ger oss någon information om de här objekten är det ljus som de utsänder och speciellt den spektrala fördel-

ningen av detta ljus. Det blir därför atomernas och stjärnornas spektra som vi får hålla oss till.

»Den skånska jorden är full av atomer» meddelade Lunds Dagblad när atomkommittén bildades. Inte fullt så trivialt är påståendet att stjärnorna består av atomer, om man nämligen menar *fria* atomer. Sådana är mycket sällsynta på jorden. Stjärnornas spektra blir därför sammansatta av spektra från en mängd olika atomer.

För att åskådliggöra vad vi talar om skall jag strax visa ett stjärnspektrum, och vi tar solen som exempel. Solen representerar den vanligaste typen av stjärnor och kan studeras mycket bättre eftersom den ligger så nära. Solljuset behöver 8 minuter för att nå oss, men redan från de närmaste stjärnorna behöver ljuset lika många år, och det går drygt en halv miljon minuter på ett år. Fig. 1 visar ett litet avsnitt, ungefär en hundradel, av solens spektrum. Ljuset är i stort sett jämnt fördelat över hela det synliga våglängdsområdet från violet till rött. Detta ljusband är emellertid genomdraget av smala, mörka områden. I spektroskopet ser man den som linjer som går tvärs över spektrum. Läget för varje sådan linje, och dess intensitet, är de primära data man har att arbeta med både när det gäller atomer och stjärnor.

Eftersom vi skall tala om spektrallinjer rätt mycket i det följande, vill jag berätta om profes-

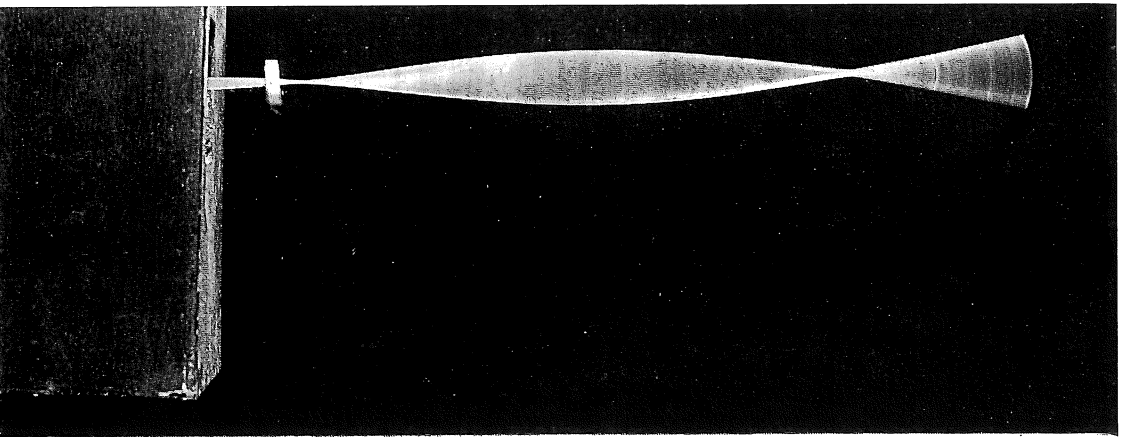
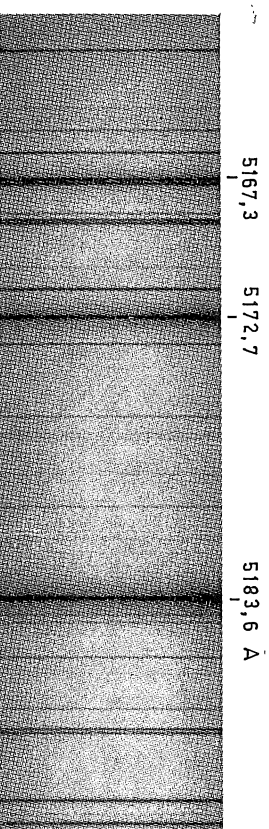


Fig. 1. Kort avsnitt av solens spektrum som visar några av de ca 20 000 mörka linjer som observerats i solspektrum. De markerade linjerna tillhör magnesium.



den tillkommit för att visa dem vad jag »med »kinetisk rytm». Denna skulptur är ett exempel på en rörelse, där en endimension som vibrerar i två dimensioner ger av en tredimensionell bild.

sor Granquists tentamenstråga: varför är en spektrallinje en linje och inte någon annan figur, t. ex. en åtta? Svaret skulle vara att varje spektrallinje är en bild av spektroskopets spalt, som ju i regel har formen av en rät linje.

Om vi återgår till solspektrum så ser vi redan inom det lilla intervall som bilden visar, ett stort antal av dessa mörka linjer, starka och svaga om vartannat. Totalt har man registrerat mer än 20 000. För de allra flesta har man kunnat ange det atomslag den härrör från. Det råder nämligen en entydig korrespondens mellan de mörka linjerna i solspektrum och emissionslinjerna som utsändes av olika grundämnenas atomer, när man i laboratoriet med hjälp av någon lämplig ljuskälla bringar dem att lysa. På det sättet har man påvisat över 60 olika grundämnen i solmaterien.

ATOMERNAS BYGGNAD

Det kan vara intressant att skjuta in en kort historik. Linjerna i solspektrum upptäcktes av Fraunhofer i början av förra århundradet, men det dröjde ett halvsekel innan Bunsen och Kirchhoff lyckades visa korrelationen med kemiska ämnen. Till en början var det oklart vad för slags partiklar av ämnet som utsände eller absorberade strålningen. Vad vi nu kallar atom var ännu ett okänt begrepp, och man talade om molekyler i en tämligen odefinierad betydelse av små partiklar med möjlighet till interna svängningar. Det fysikaliska atombegreppet tog fast form först när Rutherford 1911 upptäckte att materiens massa var koncentrerad i positivt laddade kärnor, som var 100 000 gånger mindre än atomerna som helhet, och när Niels Bohr två år senare uppställde sin modell för väteatomen. Slutligen kom den definitiva teorin för atomernas struktur i och med kvantmekanikens upptäckt 1925. Kvantmekaniken leder till en differential-

ekvation, som beskriver elektronernas rörelser kring kärnan och i princip gör det möjligt att härleda atomens alla egenskaper. Jag säger »i princip» därför att ekvationen kan inte exakt lösas annat än i det specialfall då atomerna bara innehåller en enda elektron. För andra fall får man tillgripa approximationsmetoder som ger mer eller mindre osäkra men dock användbara resultat. Ett allmänligt och ytterst viktigt resultat är att en lösning till ekvationen existerar endast när atomens inre energi har vissa bestämda, skarpt definierade värden. Denna kvantisering av energinivåerna är den fundamentala skillnaden mellan ett atomärt system, där kvantmekaniken gäller, och ett makroskopiskt system som följer den klassiska mekaniken. Det är denna kvantisering som gör att det finns linjer i atomernas och stjärnornas spektra.

Den bild som en spektroskopist gör sig av en atom är en sammansättning av dess möjliga energinivåer. Fig. 2 visar nivåskemat för en joniserad magnesiumatom, vars spektrum betecknas med symbolen Mg II. Nivåerna representeras av korta horisontella linjer, och varje nivå har en beteckning, där talet n kan betraktas som ett mått på lyselektronens medelavstånd från atomens centrum ($r \sim n^2$). De sneda linjerna i diagrammet symboliserar övergångar mellan nivåer, och siffran anger våglängden för den spektrallinje som utsändes i samband med övergången. Vi ser att nivåerna kan ordnas i serier, och vi kan av figuren ana oss till att varje serie innehåller ett oändligt antal nivåer som asymptotiskt närmar sig diagrammets övre begränsningslinje, seriegränsen. Nivåernas avstånd från seriegränsen är just vad som uttryckes med Rydbergs formel. I diagrammet betecknas de olika serierna med bokstäverna s, p, d, f etc. Det vore mer rationellt att ersätta dem med talen 0, 1, 2, 3 etc., som då anger elektronbanans impulsmoment. Bokstavssymbolerna infördes av Ryd-

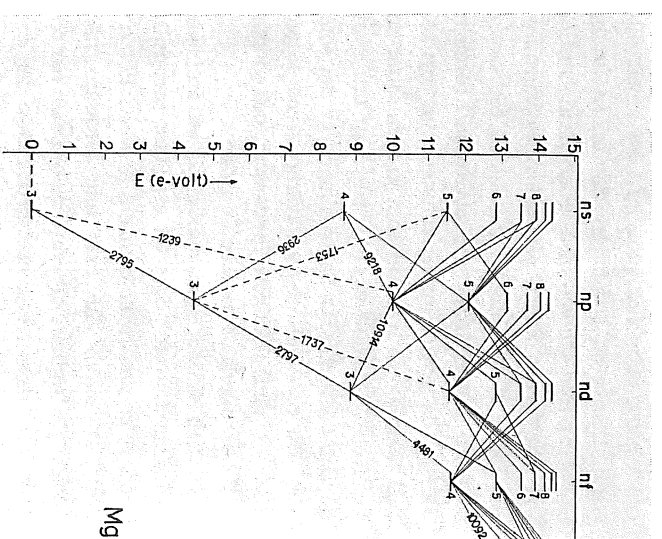


Fig. 2. Systemet av energinivåer hos en joniserad magnesiumatom.

berg som förkortning paltserien, diffusa serier och man har bibehållit av pietetsskäl utan n praktiskt att blanda stäver.

Om vi betraktar i dess uppbyggnad ar ning åt höger i figu serier blir oändligt. givetvis bara fastställda. Figuren visar hur lån Det intressanta är, at observationer kan hä möjligt att noggrant helst av denna dubbe vänder då dels Ryd

, som beskriver elektronernas rörelser man och i princip gör det möjligt att atomens alla egenskaper. Jag säger »i därför att ekvationen kan inte exakt lösas än i det specialfall då atomen bara har en enda elektron. För andra fall får man använda approximationsmetoder som ger mindre osäkra men dock användbara. Ett allmänt giltigt och ytterst viktigt resultat är lösningen till ekvationen existerar för atomen inre energi har vissa bestämda värden. Denna kvantiserade energinivåer är den fundamentala mellan ett atomärt system, där kvantiserade gällar, och ett makroskopiskt system är den klassiska mekaniken. Det är kvantiserade som gör att det finns linjer i spektra och stjärnornas spektra.

Id som en spektroskopist gör sig av en sammansättning av dess möjliga värden. Fig. 2 visar nivåskemat för en magnesiumatom, vars spektrum betecknas med symbolen Mg II. Nivåerna representeras av korta horisontella linjer, och varje linje är betecknad, där talet n kan betraktas nätt på lyselektronens medelavstånd från centrum ($r \sim n^2$). De sneda linjerna i skemat symboliserar övergångar mellan olika siffror anger våglängden för den övergången som utsändes i samband med övergången. Vi ser att nivåerna kan ordnas i serier, och av figuren ana oss till att varje serie är ett oändligt antal nivåer som avsmalnar sig diagrammets övre begränsning, seriergränsen. Nivåernas avstånd från varandra är just vad som uttryckes med Rydbergs konstant. I diagrammet betecknas de olika nivåerna med bokstäverna s, p, d, f , etc. Det vore naturligt att ersätta dem med talen 0, 1, 2, 3, som då anger elektronbanans impulsmoment. Bokstavssymbolerna infördes av Ryd-

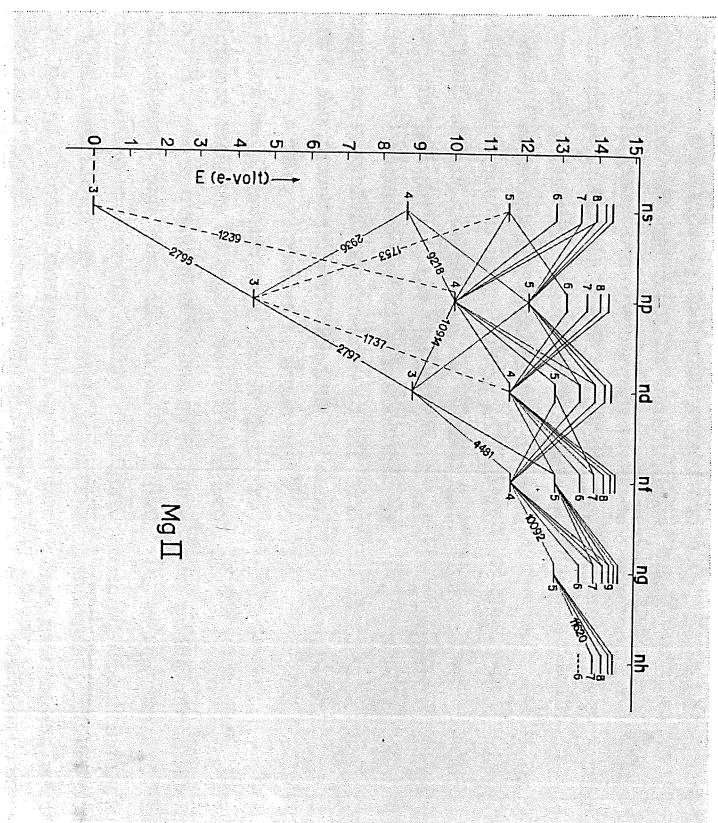


Fig. 2. Systemet av energinivåer hos en joniserad magnesiumatom.

berg som förkortning för skarpa serier, principserien, diffusa serien och fundamentalserien, och man har bibehållit dessa symboler, knappast av pietetsskäl utan mera för att man funnit det praktiskt att blanda upp siffrorna med bokstäver.

Om vi betraktar nivåskemat igen ser vi hur dess uppbyggnad antyder en fortsatt utsträckning åt höger i figuren, så att även antalet av serier blir oändligt. Experimentellt kan man givetvis bara fastställa ett begränsat antal nivåer. Figuren visar hur långt observationerna har nått. Det intressanta är, att man på grundval av dessa observationer kan härleda samband som gör det möjligt att noggrant beräkna vilken nivå som helst av denna oändliga mängd. Man använder då dels Rydbergs formel, något modi-

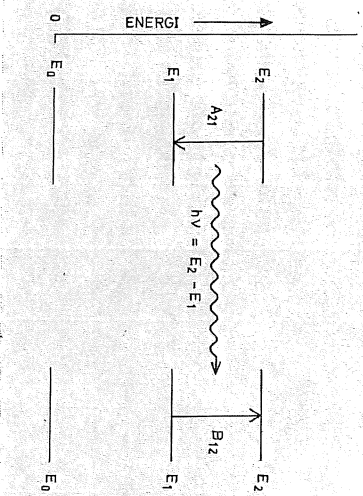
fierad, dels den s. k. polarisationsformeln, som beskriver systemets utsträckning åt höger och som introducerats vid senare arbeten här i Lund. Mg II representerar en speciellt enkel typ av nivåsystem. Jag har valt det som exempel för att det principiella i uppbyggnaden skall framgå så klart som möjligt. Men det är bara i sällsynta undantagsfall som våra problem är så enkla.

EN LYSANDE GAS

Om vi betraktar en individuell atom så befinner den sig i ett visst ögonblick i något av sina möjliga energitillstånd. I en samling av ett stort antal atomer, som vi alltid har att göra med i verkliga livet, kommer alla möjliga tillstånd att vara företrädade. Det relativa antalet atomer som befinner sig i de olika tillstånden bestämmas dels av nivåernas karaktär (statistiska vikt) och dels av yttre förhållanden, särskilt av temperaturen hos den gasvolym där atomen ingår. Vid en tillräckligt låg temperatur ligger alla atomer i den lägsta nivån, grundnivån. När temperaturen höjs så växer sannolikheten för att de högre nivåerna blir besatta. Det kan slutligen inträffa att någon atom tillföres så stor energi att den släpper taget om den yttre elektronen. Den blir fri och lämnar efter sig en positivt laddad rest, en jon.

En gasvolym som innehåller ett stort antal atomer och har en viss temperatur, befinner sig i ett slags jämviktstillstånd, där atomernas olika energinivåer har bestämda besättningsantal, och där neutrala atomer, joniserade atomer och fria elektroner förekommer i bestämda proportioner. Emellertid är det viktigt att konstatera att det här är fråga om en dynamisk jämvikt, där individuella atomer ständigt ändrar sitt tillstånd. Varje atom som hamnar i en viss energinivå, övergår mycket snart till någon lägre nivå, var-

Fig. 3. Två identiska atomer representerade av förenklade nivåsystem. Den till vänster övergår från ett högre energitillstånd E_2 till ett lägre E_1 under utsändande av en foton. Atomen till höger tar upp samma foton och ökar därigenom sitt energi-innehåll från E_1 till E_2 .



vid en del av atomens energi omvandlas till strålning, men jämvikten bevaras genom att samtidigt lika många nya atomer landar på den ursprungliga nivån. Likaså bevaras jonisationsjämvikten genom att antalet atomer som joniseras under en viss tid, precis uppvägs av det antal joner som under samma tid återintångar en elektron och därigenom återbildas till neutrala atomer. Sådan är situationen i stjärnornas atmosfärer liksom också i de flesta ljuskällor som användes i laboratoriet för att studera atomernas spektra.

Låt oss närmare betrakta hur strålningsprocessen går till. När en atom går över från ett högre till ett lägre energitillstånd (se fig. 3) omvandlas skillnaden i energiinnehåll till strålning enligt relationen $E_2 - E_1 = h\nu$, där h är Plancks konstant och ν är den utsända strålningens frekvens. Ju större energiförändringen är, desto större blir alltså ljusets frekvens och desto kortare dess våglängd. Vi har så vant oss vid denna beskrivning att vi tycker den är naturlig och lätt att förstå. Men det är bara som vi har vant oss. Ägnar man beskrivningen en närmare eftertanke blir den genast svårare att förstå. Vi har en atom som i ena ögonblicket befinner sig i ett tillstånd

och i nästa ögonblick plötsligt i ett annat tillstånd, medan ett strålningskvantum, en foton, är på väg från atomen med ljusets hastighet. På vad sätt förvandlingen gått till säges ingenting om. Detta kunde Einstein själv aldrig förklara sig med. En motsägelse synes ligga redan i formeln $\Delta E = h\nu$, då den definerar fotonen som partikel med hjälp av en frekvens som ju förutsätter en vågrörelse. Likafullt vågar vi påstå att uttrycket ger den enda möjliga beskrivningen av det som sker. De förståndsmässiga svårigheterna ligger redan i kvantmekanikens fundament, och vi kan bara konstatera att naturen är sådan.

Vi skall vidare lägga märke till att atomens övergång från ett högre till ett lägre energitillstånd är en statistiskt betingad process. För en individuell atom kan man inte förut säga när övergången kommer att ske, men om man har ett stort antal atomer kan man precis ange den genomsnittliga tid atomerna stannar i en viss nivå och tala om nivåns medellivslängd. Dessa livslängder ligger ofta omkring en tiondels sekund.

MÖRKA SPEKTRALLINJER

Högra delen av fig. 3, visar hur en atom som träffas av en foton förntar denna genom att ta upp hela dess energi och samtidigt lyfta sig själv till en högre nivå. Denna absorptionsprocess är omvändningen av en föregående emissionsprocess. Här införes begreppet oscillatorstyrka som mått på den större eller mindre lärtthet varmed absorptionen äger rum.

Vi skall nu återvända till solens spektrum och försöka förklara varför linjerna är mörka. Antag att vi har en gas som emitterar ett atomspektrum och alltså visar ljusa spektrallinjer mot en mörk bakgrund, och antag vidare att vi skickar kontinuerligt ljus från en ljuskälla med hög tempera-

ögonblick plöjsligt i ett annat tillstånd genom ett strålningskvantum, en foton, från atomerna med ljusets hastighet. På vandringen gått till såges ingenting under Einsteins själv aldrig förtika sig utsägelse synes ligga redan i formeln den definierar fotonen som partikel i en frekvens som ju förutsätter en rikatullt vägar vi påstå att uttrycket a möjliga beskrivningen av det som rständsmässiga svårigheterna ligger immekanikens fundament, och vi kan era att naturen är sådan.

idare lägga märke till att atomens in ett högre till ett lägre energitillstånd statistiskt betingad process. För en atom kan man inte förutsäga när kommer att ske, men om man har ett tommer kan man precis ange den genomsnittliga tiden som ett atomer i en viss nivå i nivåns medellivslängd. Dessa livslängder ofta omkring en tiondels

»EKTRALLINJER

I av fig. 3, visar hur en atom som i foton förintar denna genom att ta is energi och samtidigt lyfta sig själv i nivå. Denna absorptionsprocess är en av en föregående emissionsprocess införes begreppet oscillatorstyrka i den större eller mindre lättet varionen äger rum.

u återvända till solens spektrum och lara varför linjerna är mörka. Antag gas som emitterar ett atomspektrum sar ljusa spektrallinjer mot en mörk ch antag vidare att vi skickar kons från en ljuskälla med hög tempera-

tur genom den lysande gasen. Då kan det inträffa att absorptionsprocesserna kommer att överväga, så att man ser ett omvänt spektrum med mörka linjer mot en ljus bakgrund. Det är en sådan situation som åstadkommer det för solen och de flesta stjärnor karakteristiska spektret. Solens inre utsänder — liksom alla ogenomskinliga kroppar vid hög temperatur — en strålning med kontinuerligt spektrum. Innan detta strålningsflöde jämnar solytan har det filtrerats genom solens yttre skikt där man har en utåt minskande temperatur och täthet. Atomerna i dessa skikt både absorberar och återutsänder de frekvenser som passar in i deras nivåsystem, men då temperaturen hela tiden sjunker längs strålningens väg utåt, kommer absorptionen att väga över, och nettoresultatet blir ett spektrum med mörka linjer.

KVANTITATIV ANALYS AV STJÄRNAMATERIEN

En absorptionslinjes styrka beror givetvis på hur många atomer av ett visst grundämne som finns i det absorberande skiktet, och detta borde ge möjlighet till en kvantitativ kemisk analys av solmaterien. Problemet är emellertid mycket komplicerat på grund av andra, svårbesträdda faktorer som också inverkar på linjestyrkan. Man måste bl. a. veta hur stor procent av ämnets atomer, som befinner sig i just det energitillstånd som kan absorbera linjen ifråga. Detta beror i sin tur på temperaturen och elektronfätheten i de olika skikt av solgasen där absorptionen sker. Men denna temperatur- och täthetsfördelning kan inte direkt mätas. Man måste därför pröva olika antaganden beträffande denna fördelning tills man får en acceptabel överensstämmelse med det observerade spektret. Vidare måste man känna för varje linje dess oscillatorstyrka, en

Tabell I. Summarisk översikt av elementens kosmiska förekomst.

H	1 000 000
He	100 000
C, N, O, Ne	1 000
Mg, Si, S, Fe	100
Na, Al, Ar, Ca, Ni	10
Övriga	≤1

storhet som är svår att mäta eller beräkna med önskvärd noggrannhet. Ett mycket omfattande arbete har under många år ägnats denna kvantitativa elementaranalys av solens och stjärnornas materia. Svårigheterna belyses av det faktum att för bara två år sedan fann man anledning att ändra den gällande siffran för järnets andel i solmateria till ett tio gånger högre värde.

Tabell I ger en översikt av resultaten beträffande grundämnenas relativa förekomst. Resultaten gäller inte bara för solen utan också för de flesta stjärnor som analyserats på samma sätt. Förekomsten är angiven i relativa antal atomer, där siffran för väte har godtyckligt satts till en miljon. Vi ser att väte är helt dominerande, närmast följt av helium. Som bekant upptäcktes helium i solen, innan det var känt på jorden, och fick därav sitt namn. Till nästa grupp, som omfattar kol, kväve, syre och neon, är det ett långt steg, motsvarande en faktor 100, och sedan följer en grupp omfattande Mg, Si, S och Fe. I stort sett avtar ymnigheten med växande atomnummer, men vi ser också att element med jämna atomnummer är typiskt tio gånger ymnigare än närliggande udda element. Om man bortser från vätet och ädelgaserna kan man säga att stjärnmateria är i stort sett densamma som i den skånska jorden, kanske helst i norra Skåne där det finns något mera järn.

Inte alla stjärnor har samma spektrum som solen. Fig. 4 visar några typiska stjärnspektra

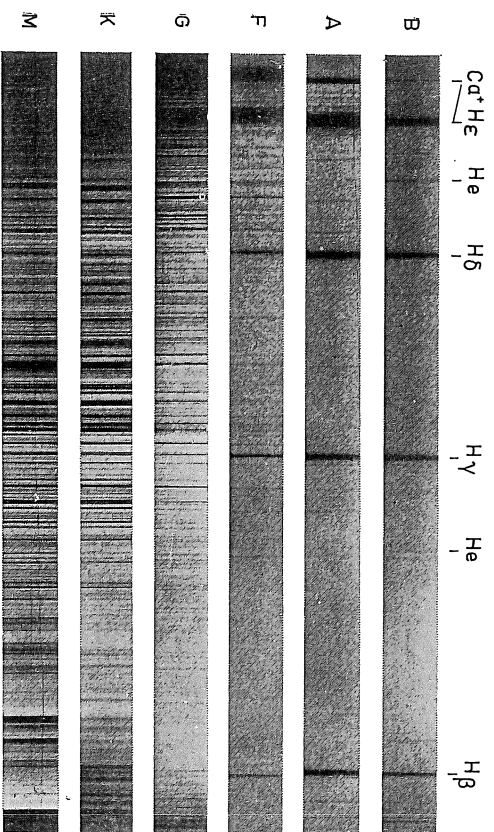


Fig. 4. Några typiska stjärnspektra (3 900-5 000 Å) ordnade efter temperatur med de hetaste stjärnorna överst.

ordnade efter en temperaturskala. I de hetare stjärnornas spektra, överst i bilden, har de i solen (G i figuren) mycket talrika metallinjerna nästan försvunnit, och spektrum domineras av väte- eller heliumlinjer. Man kan visa att denna förändring av spektrum är en följd av den högre temperaturen och inte behöver tyda på någon ändring i kemisk sammansättning. Detta illustrerar på sitt sätt den kvanitativa spektralanalysens problematik.

HETA STJÄRNOR MED LJUSA LINJER

Ovanför skalan i fig. 4 finns ytterligare en typ av stjärnor, de hetaste av alla. Deras spektra består av ljusa linjer (fig. 5). Linjerna har en avsevärd bredd, vilket tyder på att materien strömmar ut från stjärnan med hög hastighet. Jag betraktar dessa s. k. Wolf-Rayet-stjärnor som mina speciella vänner därför att de gav anledning till mitt första bidrag till astrofysiken. Hösten 1931

åhörde jag föreläsningar om stjärnspektra av Carl Schalen, och han nämnde beträffande Wolf-Rayet-stjärnorna att en del av linjerna hade vissats tillhöra helium samt kol, kväve och syre, men för många av dem var ursprunget okänt. Jag höll just då på med att undersöka vakuumgnistspektra av kol, kväve och syre i extremt ultraviolett och hade ställt upp nivåskeman för 3 gånger joniserat kol, 4 gånger joniserat kväve och 5 gånger joniserat syre. Dessa joner är isoelektroniska, dvs. de innehåller samma antal elektroner och har därför likartade spektra. Ett linjepar i gula området i stjärnspektrum hade redan identifierats med ett i gnistan observerat linjepar tillhörande 3 gånger joniserat kol (C IV),

och det låg nära till hands att söka efter motsvarande linjepar i kväve och syre. Dessa hade inte kunnat observeras direkt, men ur de nivåskeman som konstruerats med hjälp av linjer observerade i extremt ultraviolett kunde läget av de sökta linjeparen lätt beräknas, och mycket riktigt, där fanns stjärnlinjer exakt på beräknad plats. Kvävedubletten syns i översta spektrogrammet markerad med N V. Det var första gången så höga jonisationsstadier hade påvisats i något astronomiskt objekt.

SOLKORONAN

Tio år senare kom jag in på ett annat astronomiskt identifikationsproblem. Det gällde solkronan (fig. 6). Kronan sträcker sig långt utanför solranden men lyser så svagt att man kan se den först när solskrivans ljus har blivit helt avskärmat av månen vid en total solförmörkelse. Koronans spektrum visar ett antal ljusa linjer på en bakgrund av kontinuerligt ljus. Det kontinuerliga ljuset är solljus som spritts av fria elektroner i koronagasen. Ur dess intensitet kan elektrontätheten beräknas och därmed även

Fig. 5. Spektra av två Wolf-Rayet-stjärnor, den övre (WN5) av kvävetypen, den undre (WC7) av koltypen, med jämförelsespektrum från järnljusbåge.

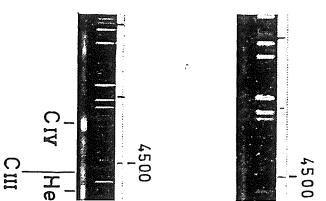
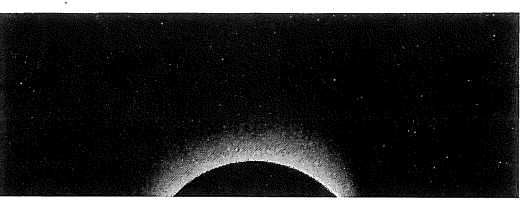


Fig. 6. Solkronan fotograferad vid en total solförmörkelse.



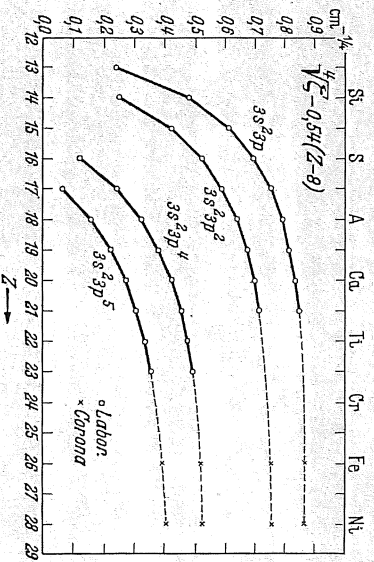


Fig. 7. Grafisk jämförelse av nivå-intervall i fyra olika isoelektroniska serier, använd 1942 för identifiering av koronalinjer.

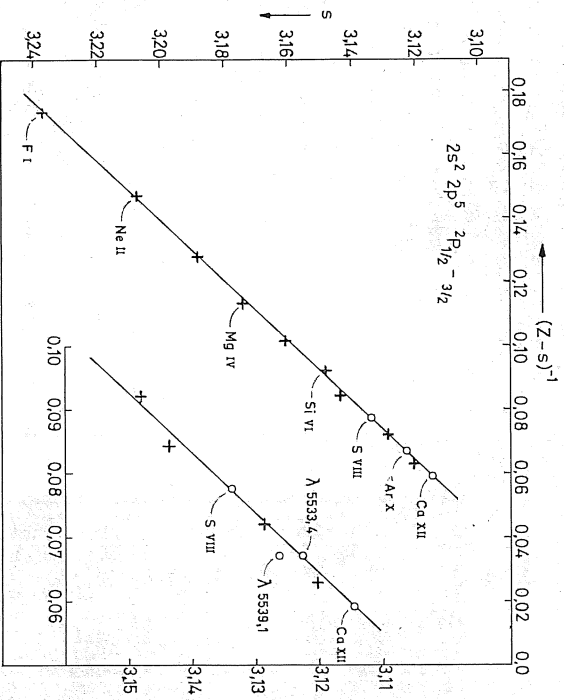


Fig. 8. Modifierad metod för iso-elektronisk jämförelse av nivå-intervall, använd 1969 för kontroll och komplettering av koronalinjernas identifiering. Z är atomkärnans laddning och Z-s den »effektiva» laddningen.

underlättat extrapolationen. Fig. 8 visar hur grundterm-intervallet hos fluorinknande joner kan framställas på detta sätt. Diagrammet användes nyligen för att verifiera identifieringen av argon i solkronan. Det linjära sambandet är exakt inom mätfelet, och identifieringen av tre koronalinjer som tillhörande S VIII, Ar X och Ca XII bekräftas definitivt. Jag visar detta som ett exempel på de häpnadsväckande noggranna relationer som man med lämpliga metoder kan finna i serier av isoelektroniska spektra och som är till så stor hjälp vid studiet av högt joniserade atomer.

Beträffande koronalinjerna skall ytterligare konstateras att det är frågan om övergångar med mycket liten sannolikhet, s. k. förbjudna övergångar. De har ingen chans att komma till stånd om inte gasen är så starkt förtunnad att kollisioner mellan partiklarna blir mycket sällsynta. Naturligtvis blir emissionen per volymenhet under dessa omständigheter ytterst liten. Strålningen blir observerbar endast tack vare koronans genomskinlighet och stora utsträckning, som gör att man ser den sammantagna emissionen från alla punkter längs en sträcka av 100 000-tals kilometer i synlinjens riktning. Vi har i solkronan en ljuskälla som givetvis är omöjlig att efterlikna i laboratoriet och som ger oss informationer om atomerna själva, som inte kan fås på något annat sätt.

Av den spektroskopiskt påvisade jonisationsgraden följer att koronagassens temperatur måste vara minst 2 miljoner grader, vilket på sin tid ställde invanda föreställningar om solens fysik helt på huvudet. Uppträkten kom som en frukt av studier av olika atomspektra som gjorts i ett helt annat våglängdsområde och utan tanke på det speciella problem som fick sin lösning. Motralen av detta skulle vara att det stundom är en fördel att kalkas ett problem från sidan, liksom i förbigående. Går man rakt på uppgiften, laddad

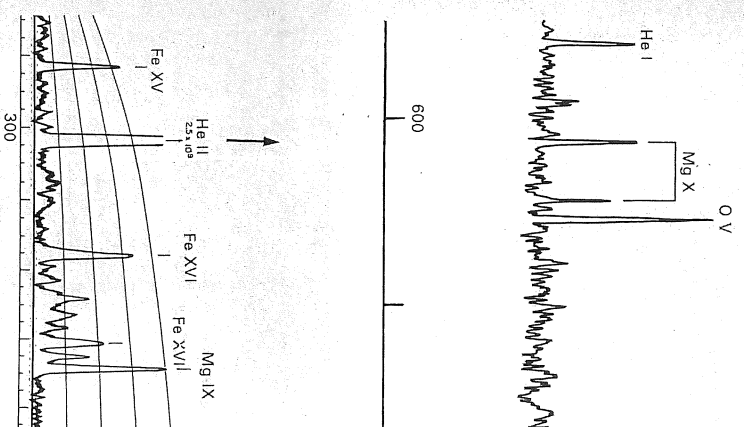


Fig. 9. Emissionslinjer i solspektrum från 900 till 280 Å. (Se Kosmos 1968.)

med förkunsk bara möjlighet början elimine möjligheten att SOLSPEKTRI ULTRAVIOLET Det område a som kan observeras som del av strålningen

extrapolationen. Fig. 8 visar hur intervalllet hos fluorliktande joner tillås på detta sätt. Diagrammet antingen för att verifiera identifieringen av olkronan. Det linjära sambandet är en måttelen, och identifieringen av tre r som tillhörande S VIII, Ar X och kraftfas definitivt. Jag visar detta som en på de häpnadsväckande noggranna som man med lämpliga metoder kan er av isoelektroniska spektra och som or hjälp vid studiet av högt joniserade koronalinjerna skall ytterligare s att det är frågan om övergångar med en sannolikhet, s. k. förbjudna över-; har ingen chans att komma till stånd sen är så starkt förtunnad att kollan partiklarna blir mycket sällsynta. s blir emissionen per volymenhet a omständigheter ytterst liten. Strål- r observerbar endast tack vare koro- mskintighet och stora utsträckning, tt man ser den sammanlagda emissio- la punkter längs en sträcka av 100 000- mer i synlinjens riktning. Vi har i sol- n ljuskälla som givetvis är omöjlig att laboratoriet och som ger oss inforrna- atomerna själva, som inte kan fås på it sätt.

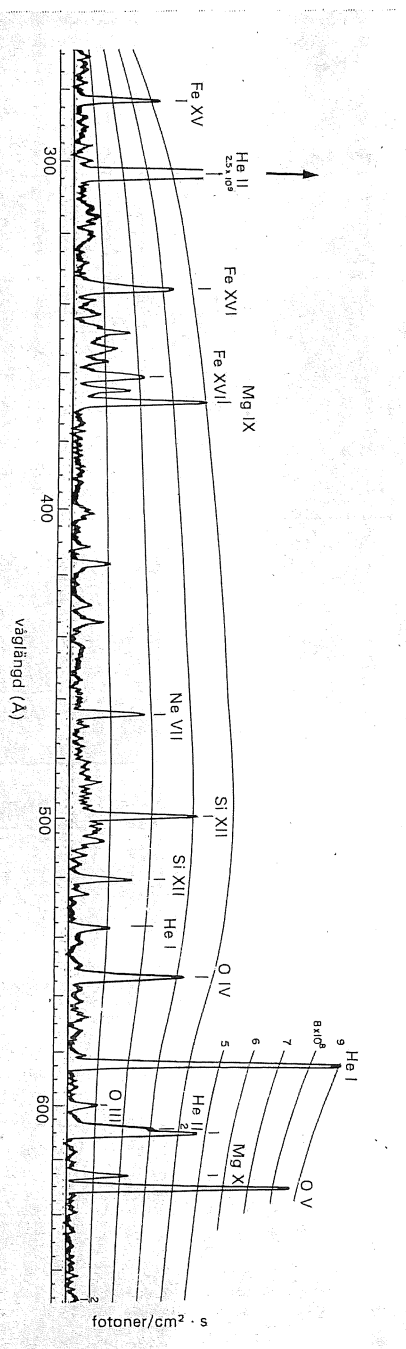
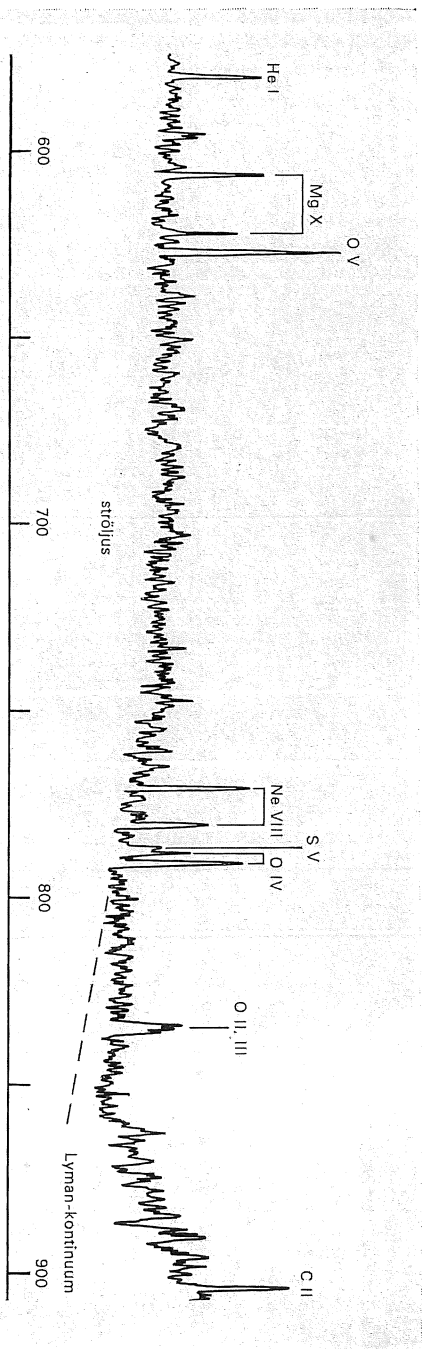


Fig. 9. Emissionslinjer i solspektrum från 900 till 280 Å. (Se Kosmos 1968.)

med förkunskaper, och försöker jirninga tänkbara möjligheter, kan man riskera att redan från början eliminera den riktiga lösningen och missa möjligheten att finna något radikalt nytt.

SOLSPEKTRUM I EXTREMT ULTRAVIOLETT

Det område av solens och stjärnornas spektra som kan observeras från jordytan är endast en liten del av strålningens hela spektrum. Hela det kortvågiga området ända upp till 3 000 Å är obönhörligt avklippt av absorptionen i jordens atmosfär. Det är först genom den senaste tidens rymdforskning som detta område blivit tillgängligt för observation. I Kosmos 1968 har jag beskrivit vad man funnit med hjälp av höghöjdsraketer och satelliter beträffande solens spektrum i extremt ultraviolett. När man kommer nedanför ca 2 000 Å börjar solspektrum att helt ändra sin karaktär. Det kontinuerliga ljuset från solskivan, som har den spektrala fördelning som enligt Plancks strålningsformel gäller för en temperatur

Fig. 10. Monokromatiska solbilder erhållna med spaltlös spektrograf. (Se Kosmos 1968.)

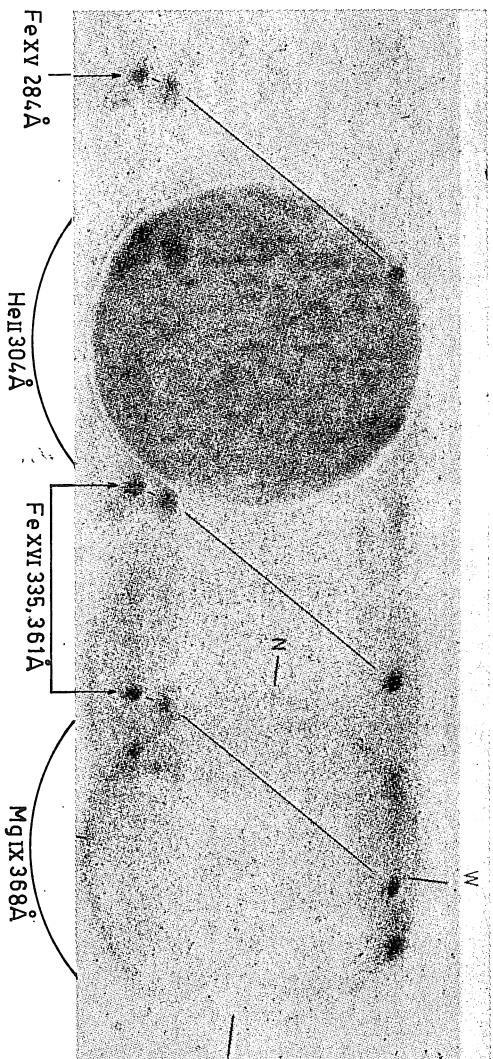
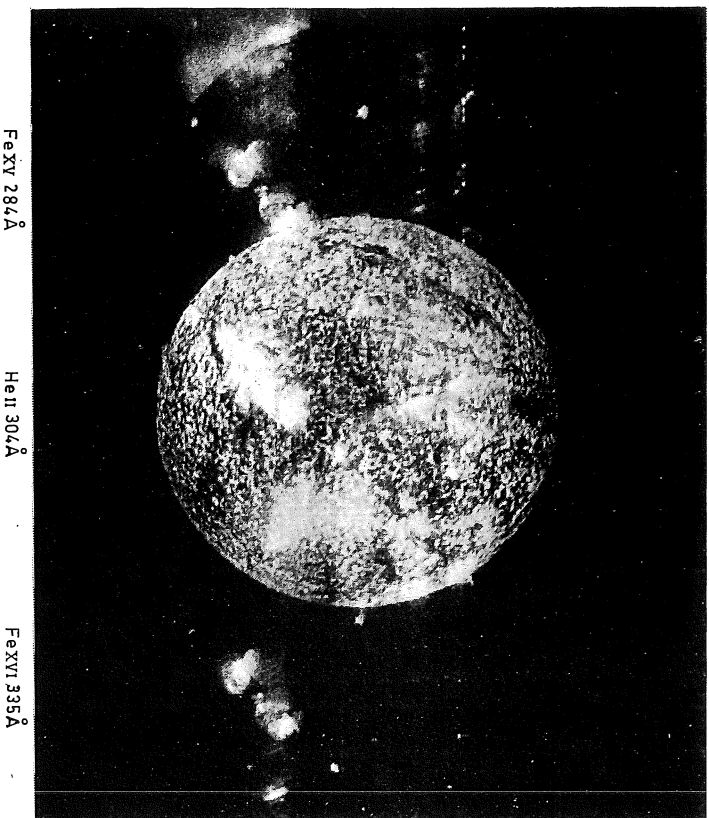


Fig. 11. En bild av samma slag som fig. 10 men med mycket större avbildnings-skärpa, tagen av R. Tousey och medarbetare den 4.11 1969.



av 5 000 grader, avlar hastigt mot kortare våglängder och är helt försvunnet vid ca 1 500 Å. Det enda ljus som då finns kvar är det som ut-sändes av atomerna i solatmosfärens yttre skikt, kromosfären och koronan. Eftersom absorptionen i dessa skikt är obetydlig och temperaturen dessutom ökar utåt består spektrum enbart av ljusa linjer. Den ojämförligt starkaste av dessa är väteets resonanslinje vid 1 215 Å.

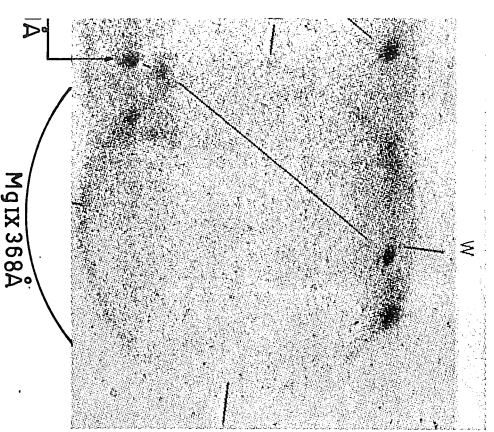
Några intressanta drag i detta emissionslinjespektrum visar fotometerkurvorna för området från 900 Å till 300 Å i fig. 9. Vi lägger märke till en serie av analoga linje-par från Ne VIII, Mg X och Si XII, alltså från atomer som bara har tre elektroner kvar och är isoelektroniska med en neutral litiumatom. Observera att alla tre elementen har jämna atomnummer, 10, 12 och 14. Resonanslinjen av joniserat helium vid 304 Å är mycket stark, som man kunde vänta. Vidare ser vi en stark linje vid 284 Å, som tillhör 14 gånger joniserat järn, och ett linje-par vid 335 och 360 Å,

C III	977
O VI	1032
C III	1175
H I	1216
C II	1335
Si IV	1394
C IV	1548
He II	1640

1238	Fe X
1242	Ne X
1350	Fe XII
1446	Si VIII
1467	Fe XI
1624	O VII

Fig. 12. Solspektra i området 1 000-2 200 Å ordnade i tidsföljd omkring den andra kontakten vid den tota a sol-förmörkelsen den 7 mars 1970. Spektrogrammen togs upp på den amerikanska ostkusten av en grupp forskare från Harvard College Observatory (USA), York University (Canada), Culham Laboratory och Imperial College (England).

som isoelektroniska dubletten, från höga jonisationskoronan. Om man tar spektrograf utan bild (fig. 10). I en serie bilder som visar hur sol-ljus av enbart de helium lysar frö ojämnt, medan och 15 gånger i enstaka beta p solen inte bara visar en av de slag. Liksom de



grader, avtar hastigt mot kortare våglängder och är helt försvunnet vid ca 1 500 Å. Ljus som då finns kvar är det som utgår från atomerna i solatmosfärens yttersta skikt i denna skikt är obetydlig och temperaturen ökar utåt består spektrumet av ett stort antal linjer. Den ojämförligt starkaste linjen är väteets resonanslinje vid 1 215 Å. Övriga linjer i detta emissionslinjespektrum visar fotometriskt att de är av betydelse för studiet av solens fysik. Vi lägger märke till att det finns linjer från Ne VIII, Mg X och Fe I, alltså från atomer som bara har tre elektroner kvar och är isoelektroniska med en heliumatom. Observera att alla tre linjerna är jämnt atomnummer, 10, 12 och 14. Linjen av joniserat helium vid 304 Å är av betydelse för studiet av solens fysik, som man kunde vänta. Vidare ser man linjer vid 284 Å, som tillhör 14 gånger joniserat järn, och ett linjepaar vid 335 och 360 Å,

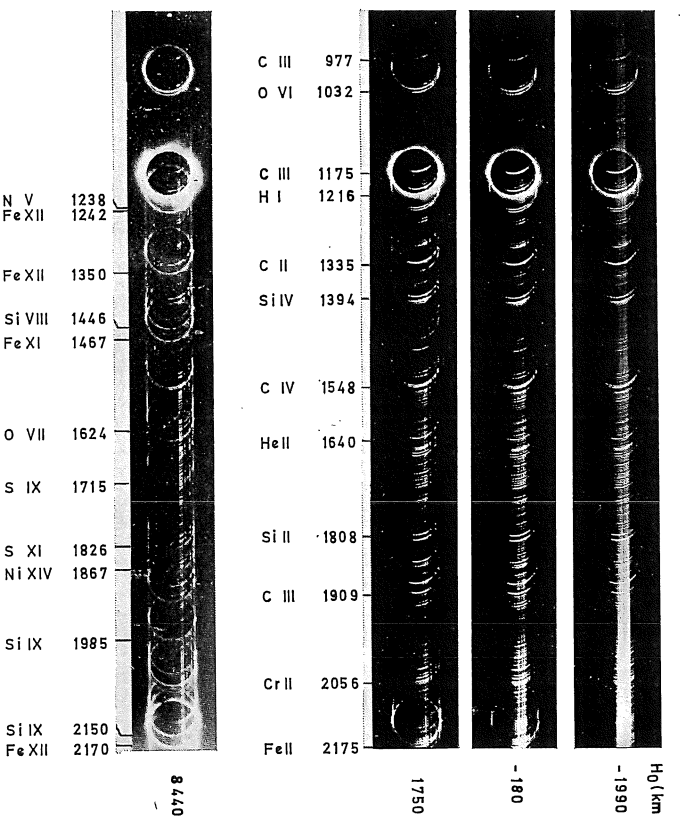


Fig. 12. Solspektra i området 1 000-2 200 Å ordnade i tidsföljd omkring den andra kontakten vid den totala solförmörkelsen den 7 mars 1970. Spektrogrammen togs upp med raketburen spektrograf på raketburen vid den amerikanska ostkusten av en grupp forskare från Harvard College Observatory (USA), York University (Canada), Culham Laboratory och Imperial College (England).

som isoelektroniskt motsvarar den gula natriumdubletten, från 15 gånger joniserat järn. Dessa höga jonisationsstradier är lokaliserade till själva koronan. Om man tar ett spektrum av solen med en spektrograf utan spalt framkommer en intressant bild (fig. 10). I stället för spektrallinjer får man en serie bilder av solen ordnade efter våglängd, som visar hur solen skulle se ut om man såg den i riktning av enbart den våglängden. Vi ser att joniserat helium lyser från hela solskivan, om än något ojämnt, medan ljuset från sådana joner som 14 och 15 gånger joniserat järn bara kommer från enstaka heta punkter. Det visar sig alltså att solen inte bara har mörka utan också ljusa fläckar (Observera att fig. 10 är ett negativ). Fig. 11 visar en av de senaste upptäckningarna av detta slag. Liksom den föregående har den tagits med

raketburen spektrograf av Touseys grupp vid Naval Research Laboratory i Washington. Det är samma linjer av helium och järn som vi nyss såg, men nu med mycket tydligare framträdande morfologiska detaljer hos de områden som utstrålar de olika spektrallinjerna. Det är en fantastisk mängd information som innehålls i en sådan bild.

Till slut vill jag visa en sammanställning (fig. 12) av några solspektra tagna med en raketburen spektrograf som uppsändes från amerikanska ostkusten vid den totala solförmörkelsen i mars 1970. Spektrogrammen täcker området från 1 000 till 2 200 Å och är ordnade i tidsföljd kring den andra kontakten. Vid den första exponeringen (översta speketret på bilden) är solskivan ännu inte helt avskärmad av månen, så man ser den kortvågiga svansen av den Planckska strålningen från fotosfären. Den har helt försvunnit på den tredje upptäckningen, och kvar står strålningen från kromosfären, som består av emissionslinjer från relativt lågt joniserade atomer. Koronan lyser så mycket svagare att dess bidrag knappast märks ännu. Det nedersta speketret i raden är exponerat längre än de övriga, och här är även kromosfären avskärmad av månskivan upp till en höjd av drygt 8 000 km över solranden. Vad man nu ser är nästan enbart koronans ljus. Det består som vi ser av ett antal emissionslinjer, och eftersom man använt en spaltlös spektrograf framträder var och en som en avbildning av koronan. De flesta av linjerna har man kunnat identifiera med förbiordna övergångar mellan djupa nivåer i högt joniserade atomer av Mg, Si, S, Fe och Ni. Det är samma typ av övergångar som vi känner från det synliga koronaspektret, och liksom där svarar järnet för några av de starkaste linjerna. Identifieringen grundar sig på atomspektroskopiska undersökningar, både teoretiska och experimentella, som gjorts bl. a. här i Lund, delvis just med syfte

att tolka dessa märkliga observationer från fjol-
årets solförmörkelse. Samtidigt har de obser-
verade koronalinjernas uppmätta våglängder
givit ytterst värdefulla och på annat sätt oät-
komliga upplysningar om de djupa energi-
nivåernas lägen i ifrågakvarande joner. Det visar
återigen den starka växelverkan som känne-
tecknar studierna av atomer och stjärnor.

Planeten Ma
rymdsonden 1
tilldra sig astr
flutna året.

Det var fö
oppositionen
kanske astron
observatoriet
av två månar
under mer än
månarna helt
sambet. Detta
små, Jussvags
sig mycket nä
des man foto
till Phobos (»
efter krigsgud
Även i de ;

som Jussvags
tuden. Phobo
båda månarna
från planeten
planetan)
medan den i
på ett avstråm
har en omlo
omloppstid in
Mars' rotatio
systemet som
tiden. För er
Phobos att gå
ha en skenba