



Projekts

Fizikas bakalaura studiju attīstība Latvijas Universitātē

Projekta līguma Nr.

2005/0110/VPD1/ESF/PIAA/04/APK/3.2.3.2/0029/0063

LU reģistrācijas Nr.

ESS 2005/6

Latvijas Universitāte
Fizikas un matemātikas fakultāte
SPEKTROSKOPIJAS LABORATORIJA
V.Rēvalds

Laboratorijas darbs



KVALITATĪVĀ EMISIJAS SPEKTRĀLĀ ANALĪZE

KVALITATĪVĀ EMISIJAS SPEKTRĀLĀ ANALĪZE

1. Darba mērķi

Spektrālanalīze ir viena no pētniecības metodēm, ar kuras starpniecību var iegūt informāciju par materiālu objektu sastāvu un fizikālo stāvokli. Spektrālanalīzi plaši izmanto dažādās zinātņu un prakses jomās: astronomijā, fizikā, ķīmijā, ekoloģijā, tehnikā u.c. darbības nozarēs.

Darba mērķis ir iepazīstināt ar optiskās spektrālanalīzes pamatiem: spektru ierosināšanu, spektru raksturu un likumībām, spektrālo aparatūru un spektru atšifrēšanas paņēmieniem. Spektrālanalīzes pamatu apgūšana nepieciešama turpmākajā mācību programmas izpildē. Darba procesā iegūtās iemaņas atvieglos kvantitatīvās analīzes, lāzerfizikas un to priekšmetu apguvi, kur izmanto spektrālās metodes. Spektroskopijas darbu izpilde veicina arī kvantu priekšstatu nostiprināšanu.

2. Pārskata daļa

2.1. Ievads

Līdz 20. gadsimta vidum atkarībā no optisko parādību skaidrojuma optika bija sazarojusies ģeometriskajā jeb staru optikā, viļņu un kvantu optikā. Kā patstāvīga nozare bija izveidojusies tehniskā optika, kas nodarbojas ar optisko instrumentu aprēķiniem un to konstrukcijas izstrādēm, kā arī spektroskopija, kas plaši tika izmantota spektrālanalīzē, gāzizlādes pētījumos un astrofizikā. Uzskata, ka spektroskopija ir radusies 1666. gadā, kad Nūtons veica savus eksperimentus ar prizmu un novēroja baltās gaismas sadalīšanu krāsu gaismā. Taču vajadzēja paitet 200 gadiem, lai spektroskopija kļūtu par svarīgu fizikālu metodi pētījumu veikšanai, un vēl 50 gadiem, lai tiktu izprasti spektri.

Arnolds Zommerfelds sava klasiskā darba "Atomu uzbūve un spektri" pirmā izdevuma priekšvārdā 1919. gadā rakstīja: "Kopš spektrālanalīzes atklāšanas brīža neviens speciālists nešaubījās, ka atoma uzbūves problēma tiks atrisināta, ja iemācīsimies saprast spektru valodu. Milzīgais materiāls, kas sakrājies spektroskopijas praktikas 60 gados, sākumā šķita pilnīgi haotisks, kas nepakļaujas sistematizācijai savas daudzveidības dēļ. Lielu ieguldījumu šā uzdevuma risināšanā deva rentgenspektroskopijas attīstības septiņi gadi, jo šajā laikā radās iespēja ieskatīties atoma iekšējā uzbūvē. Tas, ko mēs šodien dzirdam spektra valodā, ir īsta atoma simfonija, veselu skaitļu attiecību harmonija, nepārtraukti pilnveidotās kārtības un harmonijas iemiesojums visā parādību daudzveidībā. Visos laikos spektrāllīniju teorija nesīs Bora vārdu. Taču ar šo teoriju vienmēr būs saistīts arī cits vārds – Planka vārds. Visi spektrāllīniju un atomistikas veselu skaitļu likumi izriet no kvantu teorijas. Tās ir noslēpumainās ērģeles, uz kurām daba spēlē spektrālo mūziku atbilstoši ritmam, ko nosaka atomu un kodolu uzbūve."

Ar rentgenspektroskopijas attīstības septiņiem gadiem Zommerfelds domāja laika periodu kopš 1912. gada, kad vācu fiziķis Makss Laue (1879-1960) paredzēja rentgenstaru difrakciju kristālos. Ja atomi kristālos ir izvietoti periodiski, tad kristālus var izmantot par rentgenstaru difrakcijas režģiem. Laues paredzējumu šajā pašā gadā eksperimentāli realizēja viņa tautieši Valters Frīdrihs (1883-1968) un Pauls Knipings (1883-1936).

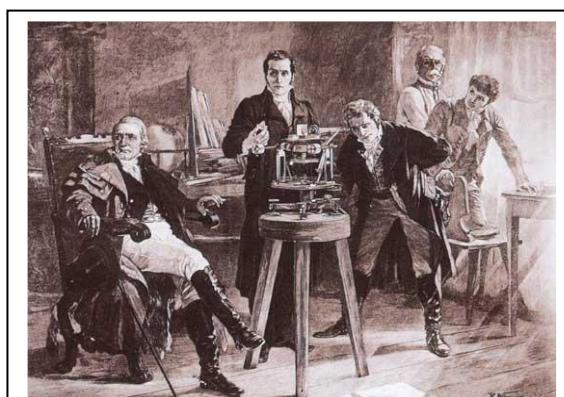
2. 2. Atskats uz spektroskopijas vēsturi

Atcerēsimies dažus ar spektroskopiju saistītus vēstures faktus. Ilgu laiku pēc Nūtona nekādi jauni atklājumi spektroskopijā netika veikti. Manāmas aktivitātes aizsākās 1801. gadā, kad anglis Viljams Volastons (1766-1828) neatkarīgi no vācu fiziķa Johana Ritera (1776-1810) atklāja ultravioletos starus pēc to fotoķīmiskās iedarbības uz sudraba hlorīda (AgCl) kristāliem. Nākamajā, t.i., 1802. gadā Volastons atkārtoja Nūtona Saules gaismas spektrālās sadalīšanas eksperimentu, izmantojot gaismas stara ceļā apālas diafragmas vietā šauru spraugu. Tādējādi dažādu krāsu stari nepārklājas un varēja izdalīt šaurus spektra rajonus. Šo gadu uzskata par spektrālaparāta rašanās laiku. Uzlabojums Volastonam ļāva novērot Saules spektrā četras tumšas līnijas, kuras viņš interpretēja kā sarkanās, dzeltenzaļās, debesziņas un violetās krāsas robežas, tādēļ par šo jautājumu vairāk nedomāja. Šo līniju rūpīgu izpēti vēlāk (1814-1815. gadā) veica vācu fiziķis Jozefs Fraunhofers.

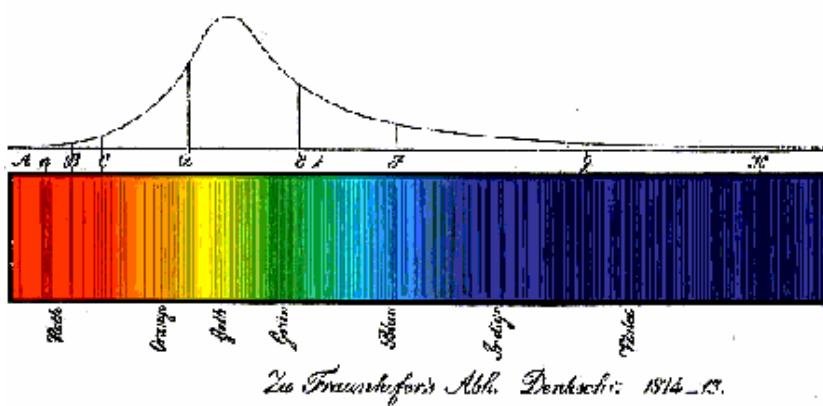
Fraunhofers veikt spektrālus pētījumus pavedināja grūtības, kas radās ahromatisku objektīvu izgatavošanā. Prakse parādīja, ka objektīvu ahromatisko īpašību uzlabošanai nepieciešama rūpīga dispersijas izpēte. Šādā nolūkā Fraunhofers sāka mērīt spektrālā rajona, ko ieguva ar dažādu stikla šķirņu prizmām, izmērus. Eksperimentos viņš pārliecinājās, ka nosacītā spektra krāsu gradācija, ko izmantoja Nūtons, neļauj iegūt noteiktus kvantitatīvus rezultātus. Tam par iemeslu bija spektra nepārtrauktais raksturs, kur viena krāsa pakāpeniski pāriet otrā. Tāpēc bija grūti orientēties uz noteiktu spektra vietu. Fraunhofers ievēroja, ka spirta lampiņas liesmā, ja tajā ievada nedaudz sāli, parādās asi izdalīta gaiša līnija spektra dzeltenajā daļā. Šo līniju viņš izmantoja spektra dažādo daļu izvietojuma noteikšanai un dispersijas mērīšanai. Fraunhofers konstatēja, ka dzeltenās līnijas stāvoklis nātrijs spektrā sakrita ar tumšās D līnijas stāvokli Saules spektrā. Gaišas līnijas viņš novēroja arī dzirksteles spektrā, taču nepievērsa tām sevišķu uzmanību.



Jozefs Fraunhofers darbnīcā



Fraunhofers demonstrē savu spektroskopu



Fragments no Fraunhofera Saules spektra atlanta

Fraunhofers izgatavoja difrakcijas režģus, kuru periods bija 0,0001223 collas. Ar šiem režģiem iegva platus difrakcijas spektrus, kuros varēja izmērīt atsevišķu līniju viļņu garumus. Fraunhofers uzlaboja spektru novērošanas procedūru. Viņš spektru neprojicēja uz ekrāna, bet gan novēroja to tālskatī. Tas ļāva veikt precīzus viļņu garumu mērījumus.

1814. gadā, novērojot Saules spektru ar uzlabotu spektroskopu (spektru aiz prizmas aplūkoja speciālā tālskatī), Fraunhofers izmērīja laušanas leņķus prizmā katrai tumšajai līnijai. Līnijas tika numurētas. Vēlāk tumšās līnijas, ko novēroja Saules spektrā, nosauca par Fraunhofera līnijām.

Svarīgākās Fraunhofera absorbcijas līnijas			
Apzīmējums	λ , nm	Krāsa	Elements
A	761	sarkana	O
B	687	sarkana	O
C	656	oranža	H α
D	589	dzeltena	Na
E	527	zaļa	Fe
F	486	debeszila	H β
G	431	zila	Ca
H	397	violeta	Ca
H ₁	393	violeta	Ca

Saules redzamā spektra daļā Fraunhofers atklāja ap 700 tumšu līniju, no kurām 574 atzīmēja kartēs. Intensīvākās no tām Fraunhofers apzīmēja ar latīnu burtiem. Šos apzīmējumus izmanto vēl šobrīd.

Fraunhofera uzsākto darbu turpināja Dž. Heršels, V. Talbots, D. Brūsters un citi. Heršels novērojumos, kas publicēti 1822.-1829. gadā, aprakstīja spektrus, kuri iegūti dažādās liesmās. Talbots 1834. gadā norādīja, ka spektri liesmām, kurās ievadīts litijs un stroncijs, viens no otra atšķiras. Talbots secināja: "Tāpēc es nesvārstoties apgalvoju, ka optiskā analīze dod iespēju atšķirt šo vielu mazus daudzumus ar tādu pašu precīzitāti kā jebkurš no zināmiem panēmieniem." Brūsters 1832. gadā pierādīja, ka Fraunhofera tumšās līnijas var iegūt mākslīgi, laižot gaismu cauri slāpeklīskābes tvaikiem. Angļu fiziķis Čārlzs Vitstons (1802-1875) 1835. gadā konstatēja, ka elektriskās dzirksteles izlādē spektrs atkarīgs no elektrodu materiāla. Gaišas dubultlīnijas novērošana liesmā, kur ievadīta vārāmā sāls, un intensīvas tumšās D līnijas klātbūtne Saules spektrā vedināja V. Tomsonu sarunā ar Dž. Stoksu norādīt uz sakarību starp gaismas emisiju un absorbēšanu. Taču šīs domas nav publicētas un par tām kļuva zināms tikai no Tomsona vēstules G. Kirhofam pēc spektrāanalīzes atklāšanas.

1839. gadā Ž. Babinē spektroskopa ieejā izmantoja kolimatora lēcu, kuras fokusā novietoja ieejas spraugu. Šādai spektroskopa konstrukcijai uzlabojās gaismas spēja un spektra kvalitāte. Izšķirtspējas palielināšanai izmantoja spektroskopus ar daudzām prizmām. Bagātīgu materiālu deva spektru ierosināšana elektriskajā izlādē gāzēs un metālu tvaikos. 1849. gadā Fuko atklāja gaišu dubultu līniju elektriskā lokā, kas sakrita ar D līniju. 1855. gadā Angstrēms, pētot metālu spektrus, konstatēja, ka metālu ķīmiskie savienojumi dod tās pašas spektrālīnijas kā tīri metāli. 1857. gadā Jūliuss Plukers (1801-1868), strādājot ar izgudrotāja Heinriha Geislera (1815-1879) gāzizlādes caurulēm, atklāja, ka elektriskās izlādes spektrs neapšaubāmi raksturo caurulē iepildītās gāzes dabu. Plukers arī atklāja pirmās trīs ūdeņraža Balmera sērijas līnijas.

Neraugoties uz šīm norādēm, spektrāanalīzes laiks vēl nebija pienācis. Franču filozofs Ogists Komte (1798-1857) rakstīja, ka cilvēcei nav nekādas iespējas uzzināt, no kā sastāv Saule un zvaigznes. Taču pēc nedaudziem gadiem Kirhofs un Bunzens paveica, pēc Komta

domām, neiespējamo, atklājot kvalitatīvo spektrāanalīzi. Šis atklājums atstāja dziļu iespaidu uz laikabiedriem un tam bija milzīga nozīme uzskatu attīstībā par apkārtējo pasauli. Turklāt spektrāanalīzes atklāšana pierādīja zinātnieku savstarpējās sadarbības lielo nozīmi. Sevišķi auglīga tā klūst, ja tiek apvienots eksperiments un teorija.

1859. gadā vācu fizikis Gustavs Kirhofs (1824-1887) formulēja termiskā starojuma likumu un izvirzīja uzdevumu par enerģijas sadalījumu absolūti melna ķermeņa spektrā. Termiskā starojuma likums nosaka, ka jebkuram ķermenim emisijas spējas attiecība pret absorbcijas spēju dotajā temperatūrā un vilņu garumā ir konstants lielums, kas ir vienāds ar absolūti melna ķermeņa emisijas spēju šajā temperatūrā un vilņu garumā:

$$e(\lambda, T)/a(\lambda, T) = E(\lambda, T).$$

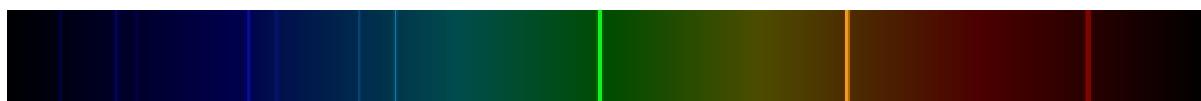
Tajā pašā laikā Kirhofs kopā ar savu tautieti ķīmiķi Robertu Bunzenu (1811-1899) izstrādāja spektrāanalīzes metodi ķīmisko elementu noteikšanai starojuma avotos.

Bunzens 1850. gadā izgudroja gāzes degli, kas spektrāanalīzes agrīnajās attīstības stadijās kalpoja spektru ierosināšanai. Nedaudz vēlāk – 1858. gadā – vācu izgudrotājs Henrihs Geislers izveidoja caurulītes ar kapilāru un diviem elektrodiem retināto gāzu spektra iegūšanai, ja caur gāzi plūst ektriskā strāva. Geislers pierādīja, ka mirdzuma krāsa ir atkarīga no gāzes dabas, kā arī izteica domu, ka gāzes ķīmisko sastāvu var noteikt pēc izlādes krāsas.

Bunzens, savukārt ievēroja, ka viņa izgudrotā gāzes degļa liesmā vielas pārvēršas tvaikos un arī tvaiki iekrāso liesmu noteiktā tonī. Varš liesmu iekrāsoja zaļā krāsā, vārāmā sāls – dzeltenā, stroncijs – aveņsarkanā. Sākumā šķita, ka atliek tikai ievadīt vielu degļa liesmā un tad pēc liesmas krāsas noteikt vielas sastāvu. Taču Bunzens drīz vien pārliecinājās, ka dažas atšķirīgas vielas liesmu iekrāso vienādi. Kirhofs ieteica eksperimentā izmantot spektroskopu. Jau 1854. gadā Kirhofs sāka pētīt liesmu spektrus, iekrāsojot liesmu ar metālu tvaikiem, un atklāja saistību starp spektrāliniju novietojumu un vielu.

Aplūkojot ar aci liesmu, kurā ievadīts litijs vai stroncijs, tā ir vienādā aveņsarkanā krāsā, bet to spektros novēroja atšķirības. Litija gadījumā spektrā redzama spoža zaļa oranža un tai blakus sarkana līnija. Stroncijs dod zilu, zaļu un divas sarkanas līnijas.

Litijs



Stroncijs

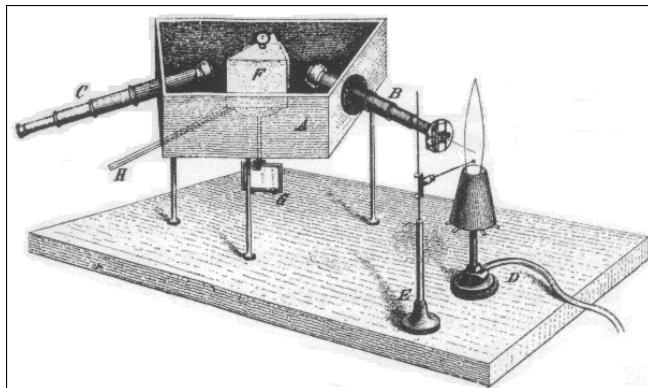


1860. gadā tika atklāts spektru apgriešanās princips. Kirhofs un Bunzens pirmie pareizi izskaidroja tumšo līniju rašanos Saules spektrā.

Tā tika pierādīts, ka Saules atmosfērā ir nātrijs tvaiki. Vēlāk Saules atmosfērā atklāja vēl septiņu elementu (Mg, Ca, Cr, Cu, Zn, Ba, Ni) līnijas. 1861. gadā, izmantojot spektrālo aparātu ar okulāru, kurš palielināja četrdesmit reižu, tika sastādīts Saules absorbcijas līniju atlants. Šīs līnijas tika identificētas ar to elementu līnijām, kas sastopami uz Zemes. Kirhofs un Bunzens noskaidroja Talbota izteiktās idejas pareizību, ka katras emisijas līnija spektrā ir raksturīga elementam, kas to izstaro. Šī atziņa un secinājums, ka visas gāzes absorbē tieši tās pašas līnijas, ko izstaro, ir spektrāanalīzes pamatā. Ar spektrālo metožu palīdzību izdevās atklāt daudzus vēl nezināmus elementus.

Šos pētījumus Kirhofs un Bunzens 1860. gadā publicēja savā ievērojamajā darbā "Ķīmiskā analīze ar spektra novērošanas starpniecību". Reizē ar to dabaspētnieki ieguva jutīgu metodi vielas ķīmiskā sastāva noteikšanai. Dažas šīs metodes idejas jau agrāk tika minētas Frauhofera, Heršela, Talbota, Plukera u. c. zinātnieku darbos. Kirhofs un Bunzena nopolns ir tas, ka viņi pierādīja trīs ļoti svarīgus faktus.

- Sakarsēti cieti un šķidri ķermēji izstaro nepārtrauktu spektru.
- Sakarsētas gāzes izstaro līnijspektru. Katram elementam neatkarīgi no savienojuma sastāva, kurā tas ietilpst, spektrālīniju raksturs un izvietojums ir stingri noteikts un atšķiras no citu elementu spektra.
- Gāzes vai tvaiku absorbcijas spektrs sastāv no tumšām absorbcijas līnijām, kuru vilņu garumi sakrīt ar sakarsētas gāzes vai tvaiku emisijas līniju vilņu garumiem.
-

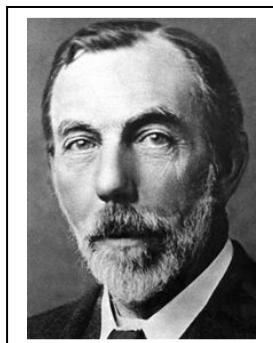


Spektroskops, ar kuru Kirhofs pētīja Saules spektru, attēls. Spektroskops atrodas Potsdamas astrofizikas observatorijā

Pateicoties spektrāanalīzei, turpmākajos gados tika atklāta virkne elementu: tā 1860. gadā Kirhofs un Bunzens atklāja 55. elementu cēziju (Cs), kuru identificēja pēc tā zilajām līnijām ("caesies" – debeszils).

1861. gadā Kirhofs un Bunzens atklāja 37. elementu rubīdiju (Rb), kura nosaukums aizgūts no latīņu vārda "rubidus" – sarkans. Rubīdija spektrā ir redzamas sarkanās līnijas. Cēziju un rubīdiju atklāja minerālūdenī.

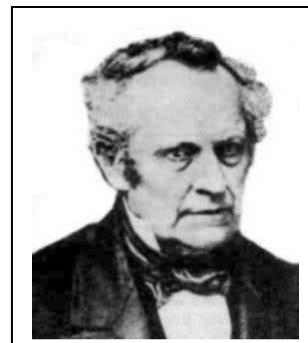
1861. gadā angļu fiziķis un ķīmiķis Viljams Krukss (1832-1919), spektrāli pētot selēna rūdu, ievēroja smaragdzajās krāsas spektrālīniju, kāda vēl nebija novērota. 1862. gadā viņam izdevās no rūdas atdalīt tīrā veidā svinam līdzīgu metālu, kuram redzamajā spektra daļā ir tikai viena zaļa līnija. Tā tika atklāts 81. elements tallijs (Tl).



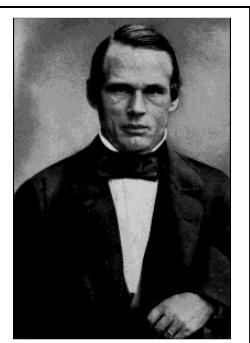
Viljams Ramzejs(1852-1916)



Džons Strets-Relejs (1842-1919)



Jūliuss Plukers(1801-1868))



Anderss Angstrēms (1814-1874)

1863. gadā F. Reihs un T. Rihters, pētot cinka mānekli, novēroja divas līdz tam nepazīstamas zilas spektrāllīnijas. Tika atklāts 49. elements indijs (In), kura nosaukums atvasināts no latīnu vārda "*indicum*". 1894.–1898. gadā angļu fiziķis un ķīmiķis Viljams Ramzejs (1852–1916) atklāja un pētīja inertās gāzes: argonu (1894. gadā, kopā ar Dž. Releju), hēliju (1859. gadā), neonu, kriptonu un ksenonu (1898. gadā, kopā ar M. Traversu).

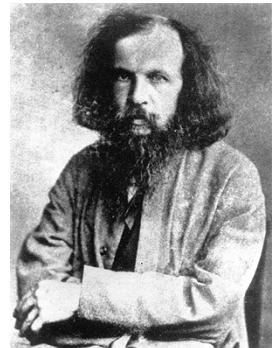
Džozefs Lokjērs, kuram pieder doma, ka līnijspektrus dod brīvi atomi, bet joslu spektrus – molekulās, šādi aprakstīja spektrālanalīzes pirmos solus:

"1860. gadā Kirhofs un Bunzens spektroskopā, pētot minerālūdens nogulsnes, atklāja dažas līnijas, kuras viņi līdz šim nebija redzējuši, kaut arī rūpīgi mērīja un atzīmēja visu tajā laikā zināmo ķermeņu (elementu) spektrus. Ar pacietību, kāda ir ķīmiķiem, kas tic savam instrumentam, viņi iztvaicēja ne mazāk par 44 200 kilogramiem minerālūdens un ieguva nedaudz vairāk par 1 g jaunā metāla, kuru viņi nosauca par cēziju, hlora savienojuma. Drīz sekoja cita līdz tam nepazīstama elementa atklāšana, kuru nosauca par rubīdiju. Tad sekoja tallija atklāšana, ko izdarīja Krukss. Viņš spektrālī pētīja selēna rūdu, kas iegūta Harcā, un atklāja ļoti raksturīgu smaragdzaļu līniju, kāda līdz tam brīdim vēl nebija novērota. Šī svinam līdzīgā metāla spektrs redzamā daļā satur tikai vienu spilgti zaļu līniju, un Krukss jaunajam elementam deva nosaukumu no grieķu vārda *thallos*, ar ko apzīmē krāšņu jaunas un spēcīgas augu valsts krāsu. Un beidzot spektrālanalīzei mēs esam pateicību parādā arī par ceturtā elementa – tā sauktā indija – atklāšanu. Divi vācu ķīmiķi, profesori Reihs un Rihters Freibergā, pētot cinka mānekli, novēroja divas līdz tam nezināmas gaiši zilas spektrāllīnijas. Tai pašā laikā viņiem izdevās iegūt jaunu ķermenī (elementu) tīrā veidā, kaut arī nelielā daudzumā."

Laikā no 1861. gada līdz 1923. gadam, izmantojot spektrālanalīzi, noteica 25 ķīmiskos elementus.

1869. gadā krievu zinātnieks Dmitrijs Mendeļjevs (1834–1907) konstatēja elementu īpašību periodiskumu un uz tā pamata izveidoja ķīmisko elementu periodisko tabulu.

Dmitrijs Mendeļjevs (1834–907)



Viņš arī paredzēja vēl trīs neatklātu elementu (ekaalumīnija, ekabora, ekasilīcija) īpašības. Šo elementu atklāšanu lielā mērā noteica nejaušība.

Pirma no tiem franču ķīmiķis Pauls Lekoks de Buabodrāns (1838 – 1912), pētot ar spektroskopu cinka rūdu, atklāja ekaalumīniju. Atklājuma autors rakstīja: "1875. gada 27. augustā starp pulkstens trim un četriem naktī es pamaniju pirmās pazīmes par jauna elementa eksistenci, kuru es nosaucu par galiju, godinot Franciju (*Gallia*)."
Un tālāk: "Kad iegūtais šķīdums tika pakļauts dzirksteles iedarbībai, spektroskops uzrādīja daudzas pazīstamas līnijas un līdzās ļoti vāju violetu līniju 417,0 viļņu garumu skalā. Šāda līnija nebija nevienā no maniem spektru uzņēmumiem. Es nešaubījos, ka esmu sastapies ar jaunu elementu un nekavējoties sagādāju tam apliecinājumu, uzlabojot novērojumu precizitāti." Palielinot jaunatklātā elementa koncentrāciju paraugā, Lekoks de Buabodrāns ieguva vēl citas galija spektrāllīnijas.

Nedaudz vēlāk – 1879. gadā zviedru ķīmiķis Larss Nilsons (1840 – 1899), pētot Skandināvijā iegūtus retzemju minerālus, konstatēja iterbija oksīda (YbO), kas iegūts no dažādiem paraugiem, molekulsvara atšķirības: 127,6 un 131. Nilsons rakstīja: "Es nolēmu, ka analizētais paraugs satur kādu piemaisījumu, kura molekulvars ir mazāks par 131. Talēns, kurš pārbaudīja parauga spektru, konstatēja šī piemaisījuma hlorīdā starojumu, kāds nebija

pazīstamiem elementiem.” Jaunatklāto elementu nosauca par skandiju. Tā ekabors kļuva par skandiju, godinot vietu, kur šis elements tika atklāts un iegūts.

Pēdējo no Mendeļjeva paredzētajiem elementiem – ekasiliciju – 1886. gadā atklāja vācu ķīmiķis Klemenss Vinklers (1838 – 1904) un nosauca to par germāniju. 1885. gada vasarā rūdas raktuvēs Freiburgas tuvumā atklāja sudrabu saturošu minerālu argiroditu (*argyrodite*). Orientējoša analīze, ko veica viens no Indija atklājējiem Freiburgas profesors Teodors Rihters (1824 – 1898) liecināja, ka minerāla galvenās komponentes ir sudrabs un sērs, kā arī neliels dzīvsudraba, dzels un arsēna piejaukums. Vinklera veiktā rūpīgā kvantitatīvā analīze liecināja, ka minerāls satur 74-75% sudraba, 17-18% sēra, 0,21% dzīvsudraba, kā arī neievērojamu dzels un arsēna piemaisījumu. 6-7% sastāva neizdevās atklāt ar zināmajām metodēm. Izrādījās, ka argirodis satur vēl nepazīstamu elementu, kurš bija Mendeļjeva paredzētais ekasilicijs.

Spektrāanalīzes pirmie 50 gadi vainagojās ar vislielākajiem panākumiem. Pēc tam, kad bija noskaidrots, ka katram ķīmiskajam elementam ir savs spektrs, kurš ir tikpat viennozīmīgs elementa raksturojums kā daktiloskopiskais nos piedums ir konkrēta cilvēka pazīme, sākās sava veida sacensība spektru iegūšanā. Tika noskaidrots, ka vājie gaismas stari, kas nonāk pie mums no tālām zvaigznēm un miglājiem pēc tūkstošiem un miljoniem gadu, satur milzīgu informāciju par šīm pasaulem. Šo objektu spektru pētījumi mūs informē ne tikai par sastāvu, bet arī par šo objektu fizikālo stāvokli, temperatūru un kustību.

Vēršot spektroskopu pret Sauli, Kirhofs 1861. gadā veica milzīgu darbu, kas viņam izraisīja gandrīz pilnīgu aklumu. Viņš izveidoja pirmo Saules spektra atlantu. Salīdzinot Saules spektru ar daudzu elementu spektriem, Kirhofs pierādīja, ka Saules hromosfērā ir tādi elementi kā dzelzs, kalcijs, magnijs, nātrijs, niķelis un hroms. Viņš pieļāva arī kobalta, bārija, vara un cinka klātbūtni. To visu Kirhofs veica ar vienkāršu spektroskopu un ierobežotām tā laika eksperimenta iespējām. Tā tika iegūta pirmā informācija par Saules sastāvu. Vēlāk tika pētīti zvaigžņu un miglāju spektri. 19. gadsimta beigās, kad Ramzejs un Relejs atklāja argonu un Ramzejs ar Traversu – arī citas inertās gāzes: neonu, kriptonu un ksenonu, sekoja retzemju elementu atklāšana. P. Lekoks de Buabodrāns, Ž. Mariņaks, E. Demarsē, Ž. Urbēns, P. Klēve u. c., pateicoties spektroskopijai, atklāja 14 elementus retzemju elementu grupā. Ja visiem iepriekš minētajiem pievieno vēl 1923. gadā atklāto hafniju (pēdējais tika atklāts pēc rentgenspektra), tad spektroskopiski pavisam tika atklāti 25 elementi.

Spektrāanalīze guva plašas izmantošanas iespējas ne tikai jau pazīstamu vielu pētīšanā un jaunu elementu atklāšanā uz Zemes, bet arī kļuva par vienīgo spēcīgo ieroci kosmisko objektu ķīmiskā sastāva noskaidrošanai.

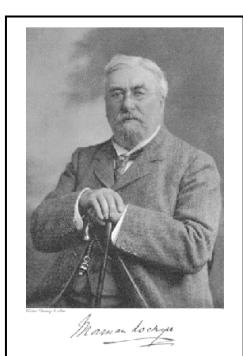
Ievērojami panākumi bija arī jaunas spektrālās aparatūras izveidē un spektrālo metožu ieviešanā. 1855. gadā vācu zinātnieks Jūliuss Plukers (1801-1868) konstruēja caurulītes gāzu spektru pētīšanai un, pētot elektrisko izlādi, atklāja katodstarus. Plukers spektrus iedalīja līnijspektros un joslu spektros. 1861. gadā kopā Johānu Hitrofu (1824-1914) Plukers pētīja ūdeņraža, slāpekļa, skābekļa, joda un sēra tvaiku spektrus.

Zviedru fiziķis un astronoms Anderss Jonass Angstrēms (1814-1874) nodarbojās ar spektrāanalīzi, siltuma un magnētisma pētījumiem. Angstrēms ir pētījis liesmu, elektriskā loka, Saules un planētu spektrus. 1868. gadā Saules atmosfēras – hromosfēras – pētīšanai izmantojis spektroskopu, izveidojis Saules spektra atlantu. Angstrēms rūpīgi izmērīja Saules spektra līniju vilņu garumus, ko izteica garuma vienībās. Par vienību pieņēma 0,0001 mm. Vēlāk šo vienību nosauca par angstrēmu: $1\text{Å} = 10^{-8}$ cm. 1862. gadā Angstrēms Saules spektrā atklāja ūdeņradi.

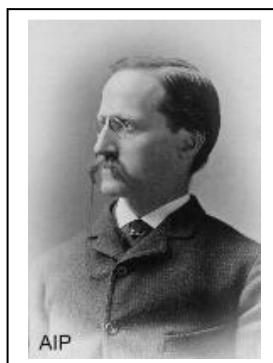
1882. gadā G. Kirhofs izveidoja difrakcijas teoriju. Šajā laikā pieauga interese par difrakcijas režījiem, lai iegūtu lielas dispersijas spektrālaparātus. Prizmas aparātos to var panākt, palielinot prizmu skaitu. Jau Kirhofs savos pētījumos izmantoja spektrālaparātus ar četrām prizmām, taču tas ievērojami palielināja izkliedēto gaismu un zudumus absorbcijā.

1882. gadā amerikāņu fiziķis Henrijs Roulends (1848-1901) izgatavoja ieliektu sfērisku atstarojošu difrakcijas režģi. Laikā no 1886. līdz 1889. gadam ar spektrālaparātu, kura režģim bija 800 svītras milimetrs, Roulends izveidoja Saules spektra atlantu. Fraunhofera līniju viļņu garumus noteica ar 0,01 Å precizitāti. Atlanta kopējais garums bija 20 m. Roulends savāca vispilnīgākos datus par spektrālām līnijām un 1889. gadā publicēja atlantu, kas saturēja 20 000 spektrāllīniju. Ilgu laiku šis atlants kalpoja par Starptautisku spektroskopijas standartu.

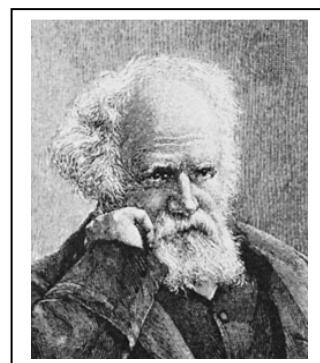
1872.-1873. gadā Džozefs Lokjērs novēroja saistību starp elementa koncentrāciju paraugā un spektrāllīniju spožumu. Viņš paredzēja kvantitatīvās spektrālanalīzes iespējamību. Franču astronoms Pjērs Žansēns (1824-1907) 1868. gada 18. augustā Saules aptumsuma laikā neatkarīgi no Lokjēra atklāja Saules atmosfēras spektrā spožu oranži dzeltenu līniju, kas nepiederēja nevienam no zināmajiem elementiem. Tā tika atklāts Hēlijs vispirms uz Saules un tikai tad uz Zemes.



Džozefs Lokjērs(1836-1920)



Henrijs Roulends(1848-1901)



Pjērs Žansēns (1824-1907)

2.3. Ūdeņraža atoma spektrs

Visvienkāršākā spektra struktūra ir ūdeņradim. Ūdeņraža spektra redzamās līnijas pirmais izmērija J. Fraunhofers, novērojot tās kā absorbcijas līnijas Saules spektrā. Fraunhofers tās apzīmēja ar burtiem C, F, f, h. Tagad tās apzīmē ar H_α , H_β , H_γ un H_δ . Šo līniju attālums spektrā citai no citas, izteikts viļņu skaitlī, pakļaujas vienkāršai likumībai, kuru ūdeņraža spektros atklāja Bāzeles universitātes pasniedzējs J. Balmers. Viņš šo sakarību izteica tik vienkāršā formā, ka vēlāk tika izdarīti tikai nelieli precizējumi. Balmers atklāja, ka līniju H_α , H_β , H_γ , H_δ viļņu garumus var izteikt šādi:

$$\lambda = 3645,6 \cdot m^2/(m^2 - n^2).$$

Šajā formulā lielumi m un n ir veseli skaitļi: n = 2, m = 3; 4; 5; 6, atbilstoši līnijām H_α , H_β , H_γ un H_δ , ja viļņu garums izmērīts angstrēmos.

Rīdbergs šo formulu nedaudz pārveidoja kā divu lielumu (termu) starpību:

$$1/\lambda = v = R_H (1/2^2 - 1/m^2),$$

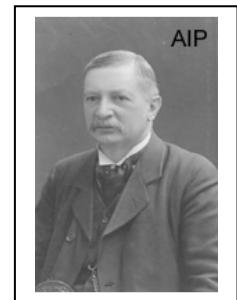
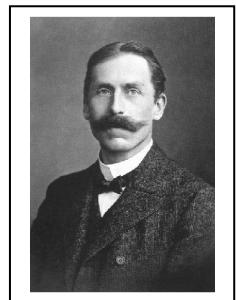
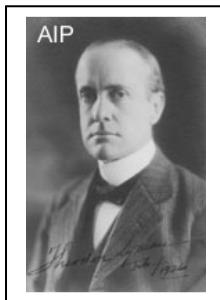
kur v – frekvence, izteikta viļņu skaitlīs (cm^{-1}), R – Rīdberga konstante,

ūdeņradim: $R_H = 109\,677,8\,cm^{-1}$.

Savu atklājumu Balmers publicēja 1885. gadā. Redzamajā spektra daļā atrodas jau minētās četras līnijas, kuru viļņu garumi ir 6562,8; 4861,33; 4340,47 un 4101,74 Å. Sākotnēji laboratorijas apstākļos ieguva 9 šīs sērijas līnijas. Nedaudz vēlāk Viljams Haginiš Sīriusa spektrā atklāja vēl 5 līnijas. Visu šo līniju viļņu garumi atbilda Balmera formulai:

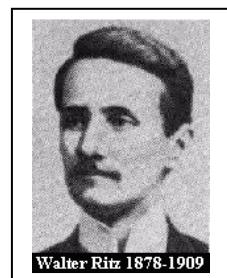
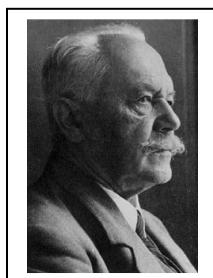
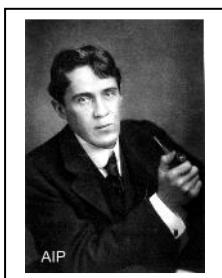
$$\lambda = 3645,6 \cdot m^2/(m^2 - 4), \text{ kur } m = 3; 4; 5; 6\dots$$

Konstante 3645,6 tika aprēķināta pēc pirmām četrām Balmera sērijas līnijām, un tā izsaka sērijas robežas viļņa garumu angstrēmos. Nilss Bors sērijas tālo līniju iztrūkumu spektrā skaidroja ar to, ka tālajām orbītām nav vietas izlādes caurulē, ja atomu diametri ir lielāki par attālumu starp atomiem. Lai novērotu sērijas tālos locekļus, ir jāpanāk ļoti zems spiediens. Izmantojot garas izlādes caurules, Roberts Vuds 1920. gadānofotografēja 22 šīs sērijas līnijas laboratorijas apstākļos. Dažu zvaigžņu spektros ir novērotas 33 Balmera sērijas līnijas. Saules hromosfērā un protuberanču spektros ir izmērītas 37 līnijas.



Johans Balmers (1825-1898) Teodors Laimans (1874-1954) Frīdrihs Pašens (1865-1947) Johannes Rīdbergs (1854-1919)

Balmera formulai turpmāk izrādījās ļoti svarīga loma. Viens no spektroskopijas kvantu teorijas pamatlīcējiem vācu fiziķis Arnolds Zommerfelds (1868-1951) uzskata, ka svarīgākais Balmera atklājums ir spektrālīniju viļņu skaitļu pieraksts ar divu termu starpību. No šejienes izriet, ka kvanta energiju var izteikt kā divu līmeņu energiju starpību. Valters Rics vispārināja Balmera ideju. Viņš 1908. gadā ieviesa kombinācijas principu. Rics rakstīja: "Ja ir dotas sēriju formulas un ir zināmas tajās ietilpst ošās konstantes, tad, kombinējot summas vai starpības, var iegūt jaunu līniju no jau agrāk zināmām."



Roberts Vuds (1868-1955)

Arnolds Zommerfelds (1868-1951)

Valters Rics (1878-1909)

Rics, pamatojoties uz kombinācijas principu, paredzēja tādu līniju eksistenci, kuru viļņu skaitlus aprēķina saskaņā ar formulu

$$v = R(1/3^2 - 1/4^2); v = R(1/3^2 - 1/5^2); v = R(1/3^2 - 1/6^2) \text{ u.t.t.}$$

Drīz pēc tam, 1908. gadā, Frīdrihs Pašens atklāja šīs sērijas pirmās divas līnijas, kuru viļņu garumi ir 18751,3 Å un 12817,5 Å. Kļuva skaidrs, ka Balmera formula jāraksta šādā vispārīgā veidā:

$$v = R(1/n^2 - 1/m^2).$$

1924. gadā amerikāņu fiziķis Augusts Pfunds (1879-1949) atklāja IS rajonā ūdeņraža līniju $\lambda = 7,40 \mu\text{m}$ ($n = 5$; $m = 6$), kas ir Pfunda sērijas pirmsais loceklis. Pēdējo Richards Hamfrijs atklāja sēriju, kurai $n = 6$, $m = 7; 8; 9\dots$. Šīs sērijas atrodas spektra IS daļā.

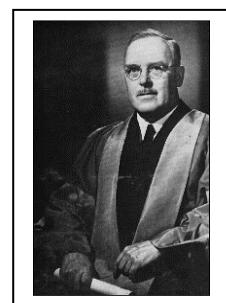
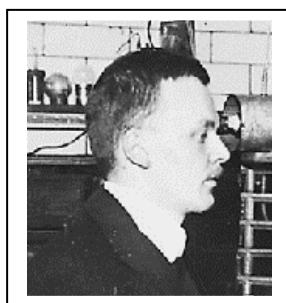
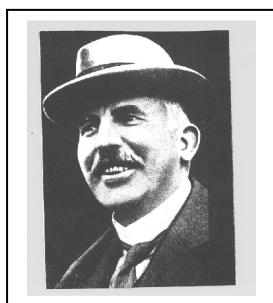
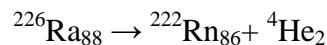
1906. gadā amerikāņu fiziķis Teodors Laimans (1874-1954) atklāja spektrālo sēriju, kuras pirmā līnija $\lambda = 1215,7 \text{ Å}$ atrodas tālajā UV rajonā. Tās viļņu skaitlis $v = R(1/1^2 - 1/2^2)$.

Balmera formulai bija izšķiroša loma atoma modeļa izveidē. Lieli nopelni šeit bija Rezerfordam, Boram, Zommerfeldam un u.c. fiziķiem.

2.4. Rezerforda – Bora atoma modelis

Ernests Rezerfords (1871-1937), kurš uzaudzis un izglītību ieguvis Jaunzēlandē, kļuva pasaulē slavens ar atoma uzbūves pētījumiem..

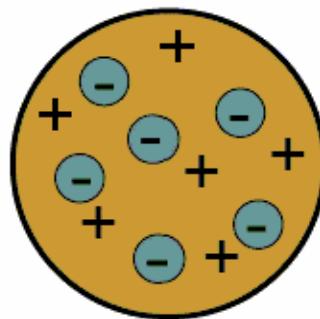
Rezerfords Mančestras universitātē izveidoja aparatūru α daļiņu pētījumiem. Pētījumi tika uzsākti 1908. gadā. Alfa daļiņas ieguva Rādija radioaktīvās sabrukšanas procesā. Šo kodola reakciju var uzrakstīt šādi:



Ernests Rezerfords (1871-1937) Hans Geigers (1882-1945) Ernests Mārsdens (1889-1970) Frederiks Sodi (1877-1956)

Reiz Rezerfords palūdz savu līdzstrādnieku Ernestu Mārsdenu (1889-1970) skaitīt tās α daļiņas, kas iziet cauri dažādām metāla plāksnītēm. Izpildot Rezerforda lūgumu, Mārsdens ievietoja plāksnītes vienkāršā ierīcē α daļiņu skaitīšanai starp starotāju un cinka sulfīda ekrānu. Ja Tomsona atoma modelis ir pareizs, tad α daļiņām ir viegli jāiet cauri plāksnītēm. Tajā laikā nekādas šaubas par Tomsona atoma modeļa pareizību vēl nebija. Mārsdenu šajos vienkāršajos eksperimentos pārsteidza fakts, ka α daļiņu izkliede nebija tāda, kādai tai vajadzēja būt, ja pareizs ir Tomsona modelis. Dažas α daļiņas uzvedās neparasti, tās atstarojās no plāksnītes atpakaļ virzienā uz starotāju. Daļiņu skaits, kas izkliežējās leņķī, kurš lielāks par 90° , pieauga, ja Mārsdens α daļiņu ceļā novietoja biezākas plāksnītes.

Tomsona atoma modelis

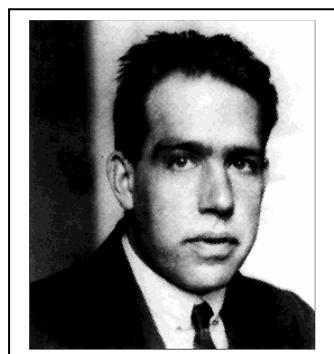


Rezerfordam piemita tēlaina domāšana. Viņš saprata, ka spēki, kas spējīgi novirzīt α daļiņas lielos izkliedes leņķos, var rasties tikai tad, ja pozitīvais elektriskais lādiņš ir koncentrēts ļoti mazā tilpumā. Pēc Tomsona modeļa, pozitīvais lādiņš sadalīts visā atomā, bet elektrons, kuram ir negatīvs lādiņš un ar kuru varētu sadurties α daļiņa, ir ar ļoti mazu masu. Tādēļ nav iespējams, ka α daļiņa varētu atstaroties. Šo eksperimentu iespaidā Rezerfordam radās ideja par citu atoma modeli. Trīs nedēļas pēc sarunas ar Mārsdenu Rezerfords izskaitloja, ka α daļiņu izkliedi var izskaidrot, ja pieņem, ka atomā ir masīvs kodols (*nucleus*). Rezerforda ieteiktajā modelī atoma kodols ir neliela masīva atoma daļa, kas atrodas sistēmas centrā. Lielā attālumā no kodola pa orbītām kustas viegli elektroni. Pēc Rezerforda domām, atoms ir līdzīgs miniatūrai Saules sistēmai. Pozitīvi lādētais kodols ir Saules lomā, bet

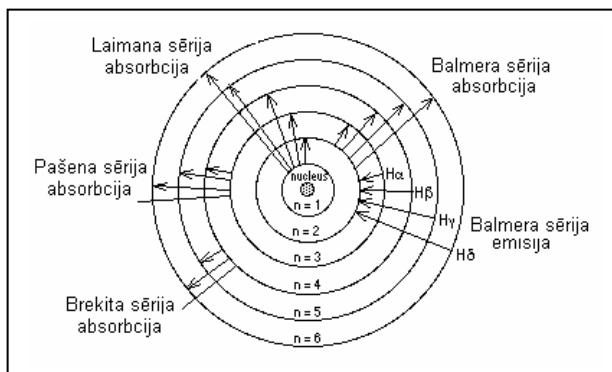
negatīvi lādētie elektroni ir planētas, kas aprīnko kodolu – Sauli – Kulona pievilkšanas spēka iespaidā. Rezerfords secināja: "Tagad es zinu, kā izskatās atoms."

Tā 1911. gadā Rezerforda un viņa līdzstrādnieku pūļu rezultātā radās planetārais atoma modelis. Atoma izmēri ir 10^{-8} cm, bet kodola diametrs ir daudz mazāks – 10^{-12} cm.

1913. gadā dāņu fiziķis Nilss Bors (1885-1962), izmantojot Rezerforda atoma modeli, izstrādāja ūdeņraža atoma teoriju. Pēc Bora teorijas, elektrons aprīnko kodolu pa noslēgtām orbītām. Atoms neizstaro un neabsorbē enerģiju, ja elektrons atrodas stacionārā orbītā. Enerģija tiek izstarota, ja elektrons pāriet no stāvokļa ar lielāku enerģiju E_2 stāvoklī ar mazāku enerģiju E_1 . Izstarotā kvanta enerģija ir $h\nu = E_2 - E_1$. Absorbcijā elektrona pāreja notiek pretējā virzienā. Taču ceļš uz šādu starošanas un absorbcijas procesu skaidrošanu nebija viegls.



Nilss Bors (1885-1962)



Ūdeņraža atoma enerģijas līmeņi saskaņā ar Bora teoriju

Bors nonāca pie domas, ka Rezerforda atoma modeli var izmantot, lai radītu atoma teoriju. Viņš pieņēma, ka radioaktivitāte ir atkarīga no kodola uzbūves, bet elementu fizikālās un ļīmiskās īpašības atkarīgas no elektronu un kodola saites rakstura. Atbilstoši Rezerforda idejām, Bors uzskatīja, ka visa atoma masa ir koncentrēta kodolā, kas ir pozitīvi lādēts. Bet atoms nevar būt līdzsvarā, ja elektroni, kuriem ir negatīvs lādiņš un kuri apņem kodolu, nekustas. Kustībai jānotiek pa stabilām orbītām. Bors izskaitloja, ka orbītā jeb čaulā var atrasties no 1 līdz 8 elektroniem, kad to ir vairāk par 8, tad veidojas jauna čaula. Jaunu elektronu pievienošana ir līdzvērtīga jauna elementa veidošanai. Jaunas čaulas veidošanās dod jaunu elementu grupu.

Taču kodola un elektronu sistēmas stabilitātes problēmu neizdodas atrisināt, izmantojot klasiskās mehānikas un elektrodinamikas principus. Bors rakstīja: "Tiešām saskaņā ar Nūtona mehāniku nekāda statiska punktveida lādiņu sistēma nevar atrasties stabilā līdzsvarā, bet jebkura kustība ap kodolu saskaņā ar Maksvela elektrodinamiku saistīta ar lielu enerģijas disipāciju izstarošanā. Enerģijas disipācija savukārt izraisa sistēmas izmēru samazināšanos. Beigu beigās tas novēd pie kodola un elektronu satuvināšanos apgabalā, kura izmēri ievērojami mazāki nekā paša atoma izmēri."

Bors nonāca pie pārliecības, ka akcijas kvantu, ko 1900. gadā ieviesa Makss Planks, lai izskaidrotu absolūti melna ķermeņa starojuma raksturu, var izmantot elektronu ātruma un attāluma aprēķināšanai atomā. Viņš arī saprata, cik šis darbs ir grūts, un viņam kādu laiku neizdevās iegūt apmierinošu rezultātu. 1913. gadā februāra sākumā Bora draugs Hansens ieteica pievērst uzmanību Balmera formulai, kas bija pazīstama jau kopš 19. gadsimta beigām. "Līdzko es ieraudzīju Balmera formulu, man tūlīt viss kļuva skaidrs," rakstīja Bors. Pēc tam darbs strauji virzījās uz priekšu.

1913. gada martā raksts "Elektronu piesaistīšana pozitīvam kodolam" bija pabeigts. Bors rakstu un pavadvēstuli adresēja Rezerfordam, izsakot lūgumu nosūtīt to publicēšanai

žurnālam "Philosophical Magazine". Vēstules beigās Bors jautā Rezerfordam, kā viņš (Bors) tīcīs galā ar "delikāto uzdevumu".

Interesanta ir Rezerforda atbilde, kas datēta ar 1913. gada 20. martu. "Jūsu domas par ūdeņraža spektra rašanos cēloņiem ir ļoti asprātīgas un ir labi pārdomātas, taču Planka ideju apvienošana ar veco mehāniku rada ievērojamas grūtības, lai saprastu, kas galu galā ir par pamatu tādai pieejai... Jūs, bez šaubām, pilnīgi apzināties šīs grūtības; tās ir šādas: kā elektrons var zināt, ar kādu frekvenci tam jāsvārstās, kad tas pāriet no viena stacionāra stāvokļa otrā? Man šķiet, ka jūs esat spiests pieņemt, ka elektrons zina jau iepriekš, kur tas gatavojas apstāties."

Šī ironija, kas raksturīga Rezerfordam, Boru nesamulsināja, un viņš devās uz Mančestru, lai Rezerfordu pārliecinātu. Pēc tam Bors rakstīja: "Kaut arī Rezerfords bija, kā vienmēr, ļoti aizņemts, viņš izrādīja gandrīz vai eņģeļa pacietību un pēc ilgām pārrunām, kas notika vairākus vakarus (starp citu, viņš toreiz sacīja, ka nekad neesot domājis, ka es izrādīšos tik stūrgalvīgs), piekrita atstāt visus vecos un jaunos jautājumus raksta galējā variantā." Rezerfords pēc tam vēl ilgi atcerējās, kā delikātais dānis viņu "dzinis stūrī".

Bora domas par atoma diskrētiem stacionāriem enerģijas stāvokļiem tika formulētas divu postulātu veidā.

- Eksistē stacionāri atoma stāvokļi, kuru enerģija var pieņemt tikai diskrētas vērtības E_1 , E_2 , E_3 ... Pāreja no viena enerģijas stāvokļa otrā notiek lēcieniem.
- Pārejā tiek izstaroti noteiktas frekvences elektromagnētiskā lauka kvanti, kas nav saistīti ar elektronu periodiskās kustības frekvenci, bet gan ar līmeņu enerģiju starpību $h\nu = E_n - E_m$. Šo sakarību sauc par Bora nosacījumu frekvencēm.

Bors noskaidroja, ka viens no nosacījumiem, kas norāda uz stacionāru stāvokli, ir šāds: elektrona kustības daudzuma moments stacionārā stāvoklī ir $nh/2\pi$. Šis nosacījums Bora teorijas pirmajā redakcijā bija trešais postulāts. Tādā gadījumā $m_e v r = nh/2\pi$, kur $n = 1; 2; 3; \dots$ ir kvantu skaitlis, r – elektrona orbītas rādiuss.

$$r = nh/2\pi m_e v.$$

Ar Rezerforda–Bora atoma modeļa palīdzību varēja labi izskaidrot ūdeņraža spektrālo sēriju rašanos un ūdeņražveidīgo jonus spektrus. Bora teorijas pareizību apstiprināja arī citi eksperimenti. Vācu fiziķi Džeimss Franks (1882-1964) un Gustavs Hercs (1887-1975) 1914. gadā pierādīja enerģijas līmeņu diskrēto raksturu mijiedarbībās starp dzīvsudraba atomiem un elektroniem: elektrons savu enerģiju var atdot atomam tikai tad, ja tā nav mazāka par atoma ierosināšanas enerģiju. Speciālas konstrukcijas caurulē elektroni elektriskā laukā tiek paātrināti līdz noteiktai enerģijai. Ja tā ir mazāka par dzīvsudraba ierosināšanas enerģijas vērtību, tad var notikt elastīga sadursme ar dzīvsudraba atomu, kuras dēļ elektrons savu enerģiju nezaudē. Ja elektrona enerģija ir pietiekami liela, tas sadursmē ar dzīvsudraba atomu var zaudēt 4,9 eV lielu enerģiju. Tad rodas dzīvsudraba rezonances starojuma UV kvants (2537Å), kura enerģija arī ir 4,9 eV.

Arnolds Zommerfelds (1868-1951) >>



Jau pirms Bora Balmera formulu mēģināja izskaidrot Arnolds Zommerfelds. Arī 1914. gadā, kad šo uzdevumu bija veicis Bors, Zommerfelds nebija zaudējis interesi par ūdeņraža spektru. Bija virkne faktu, kurus Bora teorija nespēja izskaidrot.

- 1891. gadā A. Maikelsons novēroja ūdeņraža līniju sīkstruktūru.
- 1896. gadā P. Zēmanis konstatēja spektrāllīniju sašķelšanos ārējā magnētiskajā laukā.
- Izvirzījās jautājums par relatīvistisko efektu iespaidu uz spektra struktūru.

- 1913. gadā J. Štarks atklāja spektrālīniju sašķelšanos elektriskajā laukā.

Zommerfelds izvirzīja jautājumus:

- kāpēc elektroniem jāriņķo pa riņķa orbītām, bet planētām ir atlautas eliptiskas orbītas,
- kā uzlabot Bora modeli, izmantojot relativitātes teoriju?

Bija skaidri redzams, ka ar viena kvantu skaitļa palīdzību šo uzdevumu nevar atrisināt. 1916. gadā Bora teorija tika attīstīta tālāk Zommerfelda darbos. Ievērojot, ka elektrona kustība kodola Kulona laukā var notikt pa elipsēm, Zommerfelds pētīja Bora postulātu izmantošanas iespējas vispārīgākā eliptisku orbītu gadījumā. Lai atrisinātu jautājumu, kuras no elipsēm realizējas atomā, Zommerfelds viena kvantu skaitļa vietā izmantoja divus kvantēšanas nosacījumus. Tas nepieciešams tādēļ, ka kustību pa elipsi apraksta divas polārās koordinātas: rādiuss–vektors \mathbf{r} un pagrieziena leņķis (azimuts) ϕ .

Stacionāru eliptisku orbītu nosaka divi kvantēšanas nosacījumi:

$$\int p_\phi d\phi = n_\phi h; \int p_r dr = n_r h, \text{ kur } p - \text{vispārinātais impulss.}$$

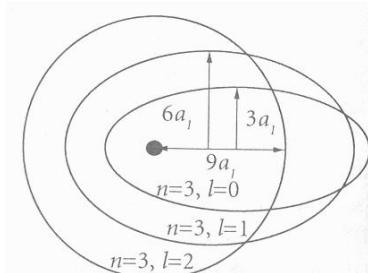
Veselie skaitļi n_ϕ un n_r atbilstoši ir azimutālais un radiālais kvantu skaitlis. Pirmais Zommerfelda nosacījums atbilst Bora teorijas pirmās redakcijas trešajam postulātam, jo arī kustībā pa elipsi elektrona kustības daudzuma moments paliek nemainīgs: $p_\phi = p = \text{const.}$

$$\int pd\phi = 2\pi p = nh, p = nh/2\pi.$$

Skaitļi n_ϕ un n_r nosaka elapses elementus: lielo pusasi un ekscentritāti.

Zommerfelds pierādīja, ka ūdeņraža un ūdeņražveidīgo jonu spektros veidojas sīkstruktūra, ko izraisa eliptiskās orbītas precesija ap fokusu. Tās cēlonis ir elektrona masas atkarība no ātruma. Šā faktora iespaidā elektrons apriņķo kodolu pa nenoslēgtu līniju, kam ir rozetes forma.

Taču ar Zommerfelda ieviestajām korekcijām nepatikšanas nebeidzās. Ja ūdeņraža un ūdeņražveidīgo jonu spektros sakrišana ar teoriju bija apmierinoša, tad pārējo elementu spektru skaidrošana sastapās ar būtiskām grūtībām. Piemēram, sārmu metālu (Li, K, Na, Rb, Cs) spektros kvantu skaitlim $l = 0$ atbilst viens energijas līmenis, turpretī kvantu skaitļiem $l = 1, 2, 3, \dots$ ir divi energijas līmeņi p_1 un p_2 , d_1 un d_2 , f_1 un $f_2 \dots$ Šo faktu nevar izskaidrot Bora-Zommerfelda teorijas ietvaros.



<< Elektronu orbītas Zommerfelda atoma modelī. Kvantu mehānikā elektronu orbītas raksturo ar azimutālo kvantu skaitli l , kur l pieņem vērtības $0; 1; 2; \dots n - 1$. Ja galvenais kvantu skaitlis $n = 3$, tad $l = 0; 1, 2$

Vienam un tam pašam galvenajam kvantu skaitlim n var būt vairākas eliptiskās orbītas ar atšķirīgu ekscentritāti. Elektroniem uz šīm orbītām ir vienāda pilnā energija. Šādus stāvokļus sauc par deģenerētiem. Stāvokļu deģenerāciju var novērst ārējais lauks vai arī paša atoma lauks, ja tam čaulā ir vairāk par vienu elektronu. Šīs apstāklis atspoguļojas arī spektrā. Piemēram, sārmu metālu spektros veidojas vairākas spektrālīniju sērijas atkarībā no kvantu skaitļa l vērtības.

2.5. Atoma energijas stāvokli

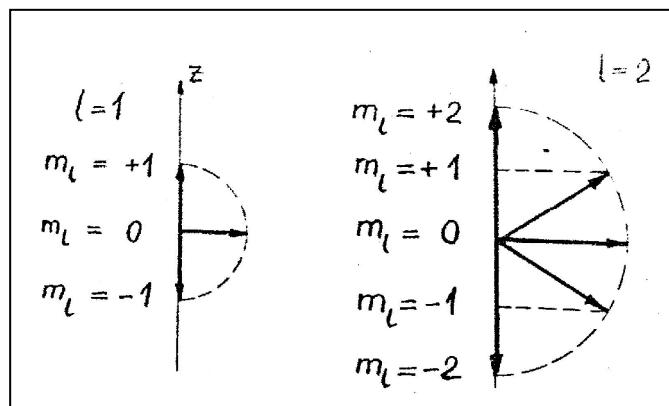
Kā jau redzējām ūdeņražā gadījumā, atoms izstaro energijas kvantu (fotonu) tad, ja elektrons pāriet no stacionāra stāvokļa, kura energija ir E_k uz citu stacionāru stāvokli ar mazāku energiju E_i . Izstarotā kvanta energija vienāda ar šo energiju starpību:

$$h\nu_{ki} = E_k - E_i \quad (1)$$

Atoma energijas stāvokļus sistematizē un raksturo saskaņā ar kvantu mehānikas likumiem. Stāvokļu energija ir tieši saistīta ar parametriem, kas nosaka atoma elektronu

čaulas uzbūvi. Lai pilnīgi raksturotu elektrona enerģijas stāvokli, nepieciešams tik daudz kvantu skaitļu, cik brīvības pakāpju ir elektronam atomā. Parasti izmanto piecus kvantu skaitļus: n , l , m_l , s un m_s .

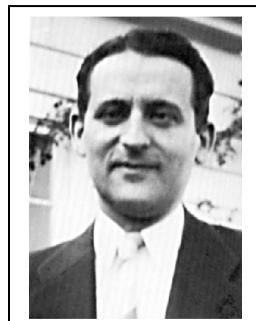
1. Galvenais kvantu skaitlis n nosaka dotā stacionārā stāvokļa enerģiju. Tas var pieņemt vērtības $n = 1, 2, 3, \dots$. Visi iespējamie elektronu stāvokļi, ko raksturo ar vienu un to pašu galvenā skaitļa vērtību, veido t.s. elektrona čaulu. Kvantu skaitlis n norāda čaulas kārtas skaitli.
2. Orbitālais kvantu skaitlis l nosaka elektrona kustības daudzuma momentu. Šis moments arī ir kvantēts lielums, t.i., pie dotā galvenā kvantu skaitļa n pieņem virkni diskrētu vērtību: $l = 0, 1, 2, \dots, n-1$. Elektrona stāvokļus, kur $l = 0, 1, 2, 3, \dots$, pieņemts atzīmēt ar burtiem s , p , d , f , ... Atbilstošos elektrona stāvokļus sauc attiecīgi par s -stāvokļiem utt. Šo apzīmējumu izcelsme saistīta ar spektrālīniju sēriju nosaukumiem sārmu metālu spektros: "sharp", "principale", "diffuse", "fundamental".
3. Orbitālais magnētiskais kvantu skaitlis m_l nosaka orbitālā kustības daudzuma momenta l projekciju uz kādu izvēlētu virzienu telpā (piemēram, ārējā magnētiskā lauka virzienu). Citiem vārdiem sakot, skaitlis m_l raksturo elektronu orbītu telpisko orientāciju. Pie dotās l vērtības $m_l = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm l$.



1. att. Kvantu skaitlis m_l nosaka orbitālā kustības daudzuma momenta l projekciju uz kādu izvēlētu virzienu telpā

Bet kādēļ kvantu skaitļiem $l = 1, 2, 3, \dots$ ir divi enerģijas līmeņi p_1 un p_2 , d_1 un d_2 , f_1 un $f_2 \dots$?

Enerģijas līmeņu sašķelšanās cēloņus izdevās atklāt tikai 1925. gadā. Un to izdarīja amerikāņu fiziķi Džordžs Judžins Ulenbeks (1900-1988) un Semjuels Abrahams Gaudsmits (1902-1979), kuri izvirzīja elektrona kustības daudzuma momenta un tam atbilstoša magnētiskā momenta hipotēzi. Viņi parādīja, ka grūtības var pārvarēt, ja elektronam bez masas un lādiņa piedēvē vēl vienu specifisku īpašību – spinu, kuru raksturo kvantu skaitlis $s = 1/2$. Nosaukums cēlies no angļu vārda *spin* – griezties. Spīnu var iedomāties kā kustības daudzuma momentu, kas saistīts ar elektrona rotāciju ap savu asi. Elektrona rotācija savukārt izraisa spīna magnētisko lauku. Spīna magnētiskais laiks mijiedarbojās ar elektrona orbitālās kustības izraisīto magnētisko lauku. Tās rezultātā spīna moments var pieņemt divus stāvokļus attiecībā pret orbitālās kustības magnētisko lauku: paralēli un antiparalēli tam. Tā ir kvantu fizikas specifika. (Atcerēsimies, ka kompasa magnētadatā Zemes magnētiskajā laukā var ienemt tikai vienu stāvokli). Pateicoties divām magnētiskā momenta orientācijām, arī mehāniskais moments pieņem divas skaitliskās vērtības: $sh/2\pi$ un $-sh/2\pi$.



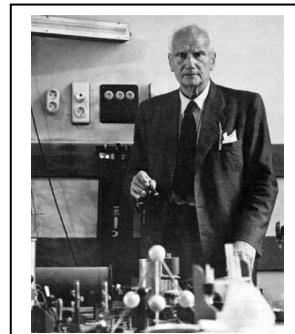
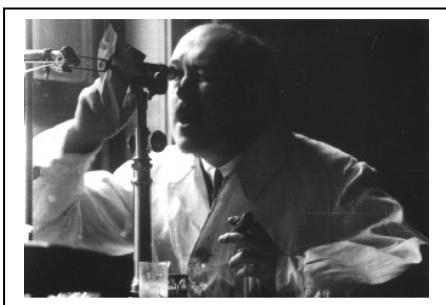
Dzordzs Ulenbeks (1900-1988) Semjuels Gaudsmits (1902-1979), Nils Bors un Otto Šterns (1888-1969)

Spina hipotēze pavēra iespējas noskaidrot ļoti daudzus faktus. Tajā skaitā pirmās grupas elementu spektrālo līniju dubulto struktūru. Piemēram, nātrijs dzeltenā rezonances līnija sašķelas divās komponentēs ($5889,953 \text{ Å}$ un $5895,930 \text{ Å}$), kuru viļņu garuma starpība ir 6 Å . Pieaugot masas skaitlim, sašķelšanās palielinās. Cēzija rezonances līnija sašķelas komponentēs, kuru viļņu garumu starpība jau ir 422 Å .

Šo sašķelšanos var uzskatami izskaidrot no Ulenbeka un Gaudsmita hipotēzes viedokļa. Kvantu stāvokļiem, kuriem $l > 0$, spina moments vektoriāli summējās ar orbitālo momentu. Tā rezultātā enerģijas līmeņi sašķelas divos apakšlīmeņos, kurus raksturo iekšējais kvantu skaitlis j , un tas var pieņemt divas vērtības: $l + s$ un $l - s$. Gadījumā, kad $l = 1$, iegūstam $j = 1/2, 3/2$. Šie kvantu skaitli raksturo p līmeņus. Ja $l = 2$, tad $j = 3/2, 5/2$ (d līmeņi) u.t.t. Izņēmums ir gadījums, kad $l = 0$, tad enerģijas līmeņi nav sašķelti (s līmeņi), jo neveidojas elektrona orbitālais lauks, attiecībā pret kuru varētu orientēties elektrona rotācijas (spina) izraisītais magnētiskais lauks.

4. Tātad spina kvantu skaitlis tiek interpretēts kā elektrona pašmoments, kas nav atkarīgs no orbitālās vērtības. Spinu var uzskatīt kā daļīnas jaunu, iekšēju kustības brīvības pakāpi. Tas pieņem tikai vienu vērtību $s = \frac{1}{2}$.
5. Spina projekcijas kvantu skaitlim m_s arī ir kvantēts lielums un var pieņemt divas vērtības: $m_s = -s$ un $m_s = +s$. Tātad, $m_s = \pm 1/2$. Tas nozīmē, ka spins var orientēties tikai paralēli un antiparalēli dotajam izvēlētajam virzienam. Citas spina orientācijas nav iespējamas.

Enerģijas līmeņi, kuri veidojās, ja spina un orbitālais magnētiskais lauks vērsti vienā virzienā, novietoti augstāk; savukārt, ja lauku orientācija ir pretēja, enerģijas līmeņi novietoti zemāk. Ulenbeka-Gaudsmita hipotēze labi izskaidro arī to elementu atomu spektrus, kuru elektronu konfigurācija ir komplikētāka. Šie atomi dod tripletu, kvadrupletu un augstākas multiplicitātes spektrus.



Eksperimentāli spina esamību pierādīja vācu zinātnieki Otto Šterns (1888-1969) un Valters Gerlhs (1889-1979), novērojot atomu kūlīša sašķelšanos nehomogēnā magnētiskā laukā.

2.6. Atoma vektoriālais modelis

Saskaņā ar Pauli principu, atomā nevar būt divu vai vairāk elektronu ar vienādām skaitļu n, l, m_l, m_s vērtībām. Tādējādi, pie $l = 1$ – ne vairāk kā seši p -elektroni, pie $l = 2$ – ne vairāk kā desmit d -elektroni, utt. (1. tab.).

1. tabula

l	m_l	m_s		Maksimālais elektronu skaits
0	0	+1/2	-1/2	2
1	+1	+1/2	-1/2	6
	0	+1/2	-1/2	
	-1	+1/2	-1/2	
2	+2	+1/2	-1/2	10
	+1	+1/2	-1/2	
	0	+1/2	-1/2	
	-1	+1/2	-1/2	
	-2	+1/2	-1/2	

Elektronu stāvokļu kopums pie dotā galvenā kvantu skaitļa n un atļautajām l, m_l, s un m_s vērtībām veido elektronu čaulu. Ja čaulā ir maksimāli iespējamais elektronu skaits, tad to sauc par aizpildītu.

Atomi lielākoties ir daudzelektronu sistēmas. Katrs elektrons šādos atomos atrodas vidējotā elektriskā laukā, ko rada kodols un pārējie elektroni. Tāpēc elektronu konfigurāciju daudzelektronu atomos raksturo summārie kvantu skaitļi, kas atkarīgi no elektronu savstarpējām mijiedarbībām jeb t.s. saites veida. Izšķir divus šādu saišu veidus: Rasela-Sondersa jeb L-S saiti un j-j saiti. Ar pirmo var raksturot elektronu mijiedarbību vieglajos atomos (piemēram, He un sārmu metālu atomos), turpretī j-j saite tīrā veidā nav sastopama. Ar to parasti raksturo smago atomu ierosinātos stāvokļus. Lielākoties atomos pastāv abu šo saišu veidu starpstāvokļi.

Rasela-Sondersa saites gadījumā visas elektronu čaulas kopējais orbitālais kustības daudzuma moments \vec{L} veidojas no atsevišķo elektronu impulsu momentiem: $\vec{L} = \sum_i l_i$. Pilnais spins \vec{S} , savukārt, veidojas no atsevišķo elektronu spiniem: $\vec{S} = \sum_i \vec{s}_i$. Pilnais jeb kopējais elektronu čaulas kustības daudzuma moments $\vec{\Sigma}$ summējas no \vec{L} un \vec{S} šādi: $\vec{\Sigma} = \vec{L} + \vec{S}$.

Jebkurai noslēgtai elektronu čaulai kopējais orbitālais impulsa moments vienāds ar nulli: $\vec{L} = 0$. Atoma dažādos enerģijas stāvokļus ar dažādām \vec{L} vērtībām $L = 0, 1, 2, 3, \dots$ apzīmē ar lielajiem burtiem S, P, D, F, \dots .

Kvantu skaitlis J var pieņemt šādas vērtības:

$$J = |L + S|, |L + S - 1|, \dots, |L - S|$$

Absolūtās vērtības jāņem tāpēc, ka negatīvam kopējam kustības daudzuma momentam nav fizikālas jēgas.

Ja $L \geq S$, tad $J = L + S, L + S - 1, \dots, L - S$. Tātad, J pieņem pavism $2S + 1$ vērtību. Šo J vērtību skaitu sauc par multiplicitāti: $\alpha = 2S + 1$.

Ja $L \leq S$, tad $J = S + L, S + L - 1, \dots$; tātad, J pieņem pavism $2L + 1$ vērtību.

J vērtību skaitam un multiplicitātei ir būtiska nozīme, aplūkojot atomu enerģijas līmeņu sīkstruktūru.

j-j saites gadījumā katra elektrona orbitālais un spina moments summējas rezultējošā kustības daudzuma momentā: $\vec{j}_i = \vec{\ell}_i + \vec{s}_i$. Atoma pilnais moments \vec{J} ir šo elektronu rezultējošo momentu summa: $\vec{J} = \sum_{\ell} \vec{j}_i$.

Kvantu skaitļi L un J pilnībā raksturo atoma stāvokli. Simboliski to pieraksta t.s. terma veidā: $n^{\alpha} L_J$, kur $L = S, P, D, F, \dots$, t.i., norāda L vērtību, $\alpha=2S+1$ – multiplicitāte, no kuras var noteikt S vērtību, n galvenais kvantu skaitlis.

Tā, piemēram, terms $3^2 D_{5/2}$ norāda, ka tiek aplūkota elektronu čaula ar kārtas numuru 3 ($n=3$), kurai $L = 2$ un $S = 1/2$. $J=5/2$ nozīmē, ka tiek apskatīts enerģijas stāvoklis, kuram $J=L+S$.

Visu iespējamo atoma enerģijas stāvokļu kopums vēl nedod priekšstatu par reālo spektru. Tas ir tāpēc, ka realizējas ne visas pārejas no viena enerģijas stāvokļa uz citu. Pārejas iedala atļautajās un aizliegtajās. Atļauto pāreju varbūtība ir ar kārtu $10^7 - 10^8 \text{ s}^{-1}$, aizliegtajām – vismaz par kārtu mazāka. Kvantu mehānika dod iespēju atrast t.s. izvēles likumus, respektīvi, noteikt, kādas pārejas ir atļautas, kādas – aizliegtas. Izrādās, ka starp diviem dažādiem atoma stāvokļiem, kuri raksturojas ar kvantu skaitļiem n_1, L_1, J_1, S_1 un n_2, L_2, J_2, S_2 , iespējamas tikai tās pārejas, kurām kvantu skaitļi:

$$\Delta n = 0, 1, 2, 3, \dots$$

$$\Delta L = \pm 1$$

$$\Delta J = 0, \pm 1 \text{ (izņemot gadījumu } J_1 = 0 \rightarrow J_2 = 0 \text{)}$$

$$\Delta S = 0 \text{ (Rasela-Sondersa saites gadījumā)}$$

Šie tad arī ir tā saucamie izvēles likumi.

Visus iespējamos atoma stacionāros stāvokļus pieņemts attēlot grafiski enerģijas līmeņu diagrammas veidā. Šāda diagramma ir zīmējums, kurā vertikālā virzienā ar horizontālām līnijām parādītas enerģijas vērtības, kādas var būt atomam. Šie enerģijas līmeņi un attālumi starp tiem ir atšķirīgi dažādiem ķīmiskajiem elementiem, bet vienādi visiem viena elementa atomiem. Līnijas, kas savieno atsevišķus līmeņus, attēlo atļautās pārejas.

Visvienkāršāk sēriju likumības izpaužas ūdeņraža atomā:

$$\tilde{v}_{ik} = \frac{1}{\lambda_{ik}} = R \left[\frac{1}{n_i^2} - \frac{1}{n_k^2} \right]$$

kur \tilde{v}_{ik} - viļņu skaitlis pārejai starp enerģijas līmeņiem I un k ,

λ_{ik} - šīs pārejas viļņu garums,

R - Rīdberga konstante,

n_i un n_k - galvenie kvantu skaitļi, kas raksturo atoma stacionāros stāvokļus.

Ūdeņraža atoma enerģija nav atkarīga no pārējiem kvantu skaitļiem. Ūdeņraža enerģijas stāvokļi ir degenerēti, t.i., stāvokļiem ar doto kvanta skaitļa n vērtību enerģijas ir vienādas neatkarīgi no kvantu skaitļu ℓ un m_s vērtībām.

2.7. sārmu metālu atomu spektra struktūra

Ūdeņraža gadījumā redzējām, ka eksistē tādas līniju grupas, kuras raksturojas ar aizvien pieaugošām galvenā kvantu skaitļa n vērtībām. Šādu spektrāllīniju secību sauc par spektrālo sēriju.. Visu vienas sērijas līniju viļņu garumi ir savstarpēji saistīti. Sērijas rodas, elektronam pārejot no $n_k = n_i + 1, n_i + 2, \dots$, uz stāvokli ar kvantu skaitli $n_i = \text{const}$.

Sārmu metālu atoms ir sarežģīta sistēma, kura sastāv no kodola, iekšējām elektronu čaulām un viena ārējā elektrona. Šo elektronu sauc arī par optisko jev valences elektronu. Tieši šī elektrona stāvokļa izmaiņas nosaka sārmu metālu atomu optiskās īpašības un spektrus. Pārējie atoma $Z=1$ elektroni kopā ar kodolu veido t.s. atoma serdi. Pieņemot, ka ārējais elektrons atrodas pietiekami lielā attālumā no kodola, sārmu metāla atomu var aprakstīt kā “ūdeņražveidīgu” sistēmu, kurā efektīvā lādiņa $z_{\text{ef}} e$ laukā kustas ar kodolu vāji saistīts elektrons.

Arī sārmu metālu spektros var izšķirt vairākas spektrāllīniju sērijas. Taču tās vairs nevar izteikt ar tik vienkāršu formulu kā ūdeņraža atomos. Bet visos gadījumos no empīriskām formulām izriet, ka spektra līniju vilņu skaitli \tilde{v} vienmēr var izteikt kā divu termu $T(n_i) = R/(n_i - \Delta_i)^{-2}$ un $T(n_k) = R/(n_k - \Delta_k)^{-2}$:

$$\nu_{ik} = R \left[\frac{1}{(n_i - \Delta_i)^2} - \frac{1}{(n_k - \Delta_k)^2} \right],$$

kur n_i un n_k - galvenie kvantu skaitļi,

R - Rīdberga konstante,

Δ_i un Δ_k - t.s. kvantu defekti – korekcijas, kas nav vienādas ar veselu skaitli. Tās nav atkarīgas no galvenā kvantu skaitļa n , bet ir atkarīgas no kvantu skaitļa ℓ .

Šādu korekciju jeb kvantu defektu nepieciešams ievest tāpēc, ka optiskais elektrons polarizē atoma serdi, pievelkot kodolu un atgrūzot elektronus. Tā rezultātā Kulona mijiedarbības potenciālajai energijai starp diviem punktveida lādiņiem vēl jāpievieno loceklis, kas vienāds ar elektrona un inducētā dipola momenta mijiedarbības energiju. Ievērojot šo mijiedarbības energiju, Šrēdingera stacionārā vienādojuma atrisinājums atšķiras no ūdeņraža atoma energijas ar to, ka sārmu metālu atomu energija klūst atkarīga ne tikai no galvenā kvantu skaitļa n , bet arī no orbitālā kvantu skaitļa ℓ . Līdz ar to ūdeņraža atoma viena energijas līmeņa vietā sārmu metālu atomam ir n energijas līmeņi (jo ℓ var pieņemt n dažādas vērtības).

1. Galvenā (“principale”) sērija, ko veido pārejas no P līmeņiem uz līmeni $3^2S_{1/2}$. Šo sēriju var uzrakstīt šādi:

$$\tilde{v} = R \left[\frac{1}{(3 - \Delta_s)^2} - \frac{1}{(n - \Delta_p)^2} \right] \quad /1a/$$

Šīs sērijas līnijas sastāv no divām komponentēm

$$\begin{aligned} &3^2S_{1/2} - n^2P_{1/2} \\ &3^2S_{1/2} - n^2P_{3/2} \quad (n=3, 4, 5, \dots) \end{aligned}$$

2. Pirmā blakus sērija jeb difūzā (“diffuse”) sērija ar izplūdušām līnijām. To veido pārejas no D -līmeņiem uz visdzīlāko P -līmeni $3^2P_{1/2, 3/2}$.

$$\tilde{v} = R \left[\frac{1}{(3 - \Delta_p)^2} - \frac{1}{(n - \Delta_d)^2} \right] \quad /1b/$$

Šīs sērijas līnijas sastāv no trim komponentēm:

$$\begin{aligned} &3^2P_{1/2} - n^2D_{3/2} \\ &3^2P_{3/2} - n^2D_{3/2} \\ &3^2P_{3/2} - n^2D_{5/2} \quad (n=3, 4, 5, \dots) \end{aligned}$$

3. Otrā blakus sērija jeb asā (“sharp”) sērija ar šaurām līnijām. To veido pārejas no S -līmeņiem uz visdzīlāko P -līmeni $3^2P_{1/2, 3/2}$.

$$\tilde{\nu} = R \left[\frac{1}{(3 - \Delta p)^2} - \frac{1}{(n - \Delta s)^2} \right] \quad (n=4, 5, 6, \dots) \quad /1c/$$

Šīs sērijas līnijas veido dubletus:

$$3^2P_{1/2} - n^2S_{1/2}$$

$$3^2P_{3/2} - n^2S_{1/2}$$

4. Bergmana sērija jeb fundamentālā ("fundamental") sērija. To veido pārejas no F -līmeniem uz visdzīlāko D -līmeni $3^2D_{3/2, 5/2}$. Bergmana sērija atrodas spektra infrasarkanajā daļā.

$$\tilde{\nu} = R \left[\frac{1}{(3 - \Delta d)^2} - \frac{1}{(n - \Delta f)^2} \right] \quad (n=4, 5, 6, \dots) \quad /1d/$$

Šīs sērijas līnijas veido trīs komponentes.

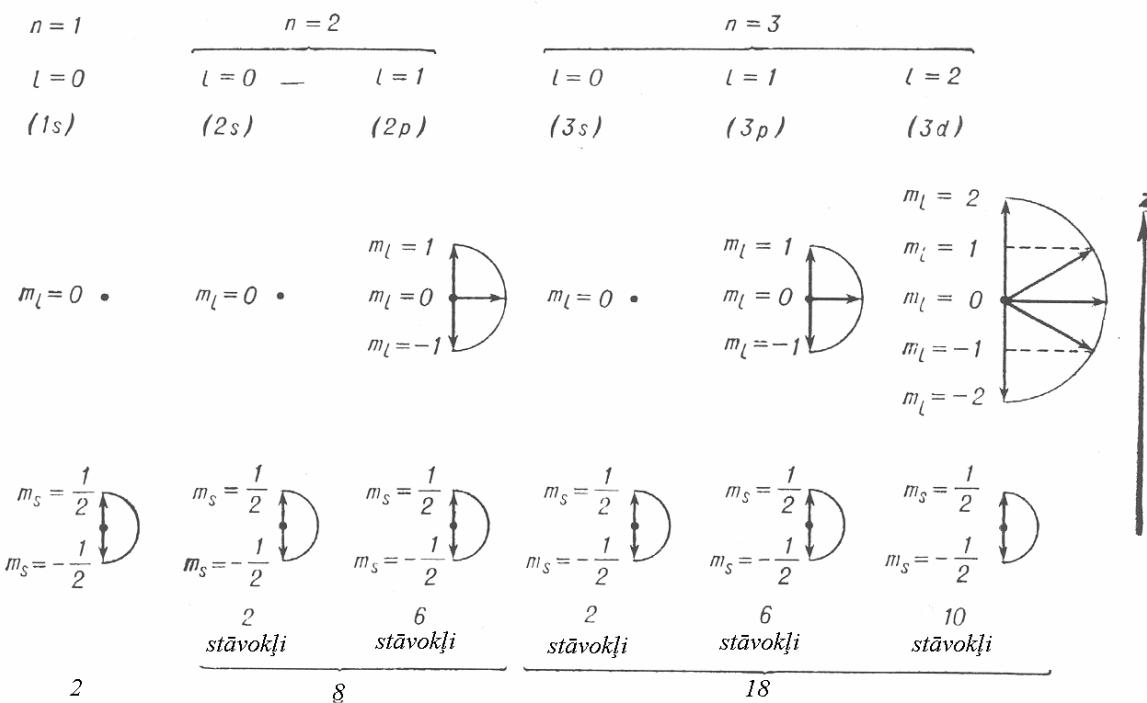
$$3^2D_{3/2} - n^2F_{5/2}$$

$$3^2D_{5/2} - n^2F_{5/2}$$

$$3^2D_{5/2} - n^2F_{7/2}$$

2. 8. Pauli princips un elementu periodiskā sistēma

Pauli princips paredz, ka atoma nevar būt divi vai vairāki elektroni ar vienādiem kvantu skaitļiem. Pirmajā čaulā $n = 1$, $l = 0$, $m_s = \pm 1/2$ un tajā var novietoties tikai divi elektroni. Otrajā čaulā ir vietas diviem elektroniem $2s$ apakščaulā un sešiem elektroniem $2p$ apakščaulā, u.t.t.



ELEMENTU PERIODISKĀ SISTĒMA

IA																VIIA O			
1 H 1.0079	3 Li 6.941	11A															1 H 1.0079	2 He 4.00260	
11 Na 22.98977	12 Mg 24.305	19 K 39.0983	20 Ca 40.08	21 Sc 44.9559	22 Ti 47.90	23 V 50.9415	24 Cr 51.986	25 Mn 54.9380	26 Fe 55.847	27 Co 58.9332	28 Ni 58.70	29 Cu 63.548	30 Zn 65.38	31 Ga 69.72	32 Ge 72.59	33 As 74.3218	34 Se 78.98	35 Br 79.904	36 Kr 83.80
37 Rb 85.4678	38 Sr 87.82	39 Y 88.9059	40 Zr 91.22	41 Nb 92.9064	42 Mo 95.94	43 Tc (98)	44 Ru 101.07	45 Rh 102.9055	46 Pd 106.4	47 Ag 107.868	48 Cd 112.41	49 In 114.82	50 Sn 118.69	51 Sb 121.75	52 Te 127.80	53 I 128.9045	54 Xe 131.30		
55 Cs 132.9054	56 Ba 137.33	57 *La 138.9055	72 Hf 178.49	73 Ta 180.9479	74 W 183.85	75 Re 186.207	76 Os 190.2	77 Ir 192.22	78 Pt 195.09	79 Au 196.9665	80 Hg 200.59	81 Tl 204.37	82 Pb 207.2	83 Bi 208.9804	84 Po (209)	85 At (210)	86 Rn (222)		
87 Fr (223)	88 Ra 226.0254	89 'Ac 227.0278	104 Unq (261)	105 Unp (262)	106 Unh (263)	107 Uns		109											
Lantanīdi																			
Aktinīdi																			
58 Ce 140.12	59 Pr 140.9077	60 Nd 144.24	61 Pm (145)	62 Sm 150.4	63 Eu 151.96	64 Gd 157.25	65 Tb 158.9254	66 Dy 162.50	67 Ho 164.9304	68 Er 167.26	69 Tm 168.9342	70 Yb 173.04	71 Lu 174.957						
90 Th 232.0361	91 Pa 231.0369	92 U 238.029	93 Np 237.0482	94 Pu (244)	95 Am (249)	96 Cm (247)	97 Bk (247)	98 Cf (251)	99 Es (252)	100 Fm (257)	101 Md (258)	102 No (259)	103 Lr (260)						

2. 9. Spektru ierosināšana

Kvalitatīvās spektrālās analīzes galvenais uzdevums ir noteikt, kādi elementi ietilpst parauga sastāvā. Sevišķi svarīgi ir noteikt to elementus, kuri paraugā ir ļoti nedaudz un, kuru analīzei ķīmiskās metodes nav izmantojamas. Spektrālanalīzi 1860. gadā atklāja vācu zinātnieki Gustavs Kirhofs (1824-1887) un Roberts Bunzens (1811-1899). Spektrālās analīzes pamatā ir divi likumi:

- Katra elementa atomus raksturo noteiktas spektrālās līnijas;
- Katras spektrālās līnijas spožums ir atkarīgs no atomu koncentrācijas izlādes plazmā.

Lai pierādītu, ka elements ietilpst parauga sastāvā, var izmantot dažādas šī elementa līnijas, izņemot tās, kurām ir iespējams pārklāties ar cita elementa līnijām. Ja turpretī ir jānosaka elements, kurš ietilpst paraugā tik mazā koncentrācijā, ka tā sasniedz analīzes jutības robežu, tad izmanto visintensīvākās līnijas, tā sauktās pēdējās, kuras atrodas pieejamos spektra rajonos. Šāds nosaukums ir radies tādēļ, ka, samazinot elementa koncentrāciju, minētās līnijas pazūd no spektra pēdējās. Visintensīvākās spektrā ir rezonances līnijas, taču daļa no tām atrodas grūti pieejamos spektra rajonos un analīzēm nav izlietojamas, tādēļ ne vienmēr pēdējo līniju skaitā ietilpst rezonances līnijas. Šis apstāklis samazina analīzes jutību.

Jāatzīmē, ka līnijas, kas ir pēdējās, ne vienmēr ir visintensīvākās spektrā pie lielām dotā elementa koncentrācijām, jo to intensitāti stipri vājina reabsorbcija.

Spektra reģistrēšanai izmanto fotogrāfiskās un fotoelektriskās metodes. Fotoplatēm ir ievērojamas priekšrocības kvalitatīvajā analīzē, jo ar tām vienlaicīgi var reģistrēt lielu spektra

rajonu, kuru pēc tam var detalizēti atšifrēt. Turpretī kvantitatīvajā analīzē zināmas priekšrocības ir fotoelektriskajai metodei, jo ir iespējams ekonomēt laiku.

Ļoti bieži kvalitatīvo spektrālo analīzi lieto metālu un to sakausējumu tīrības vai sastāva noteikšanai. Metālu paraugus visērtāk analizēt, izmantojot tos par loka vai dzirksts elektrodiem. Ja paraugs ir pulveris, tad to iepilda viena (parasti ogles) elektroda krāterī. Šādu metodi plaši izmanto dažādu dabas produktu (rūdu, augsnēs, pārtikas produktu u.c. paraugu analīzei). Spektrālanalīzi var izmantot arī šķīdumu analīzei, tos iepriekš iztvaicējot vai iepildot apakšējā elektroda krāterī.

Gaismas avoti, kurus izmanto spektrālajā analīzē, izpilda divējādas funkcijas: pārvērš paraugu no kondensēta stāvokļa gāzveidīgā un ierosina gāzes spīdēšanu, t. i., pārvērš to plazmā. Šim nolūkam nepieciešamas temperatūras, kas pārsniedz 1000 grādus.

Novēro triju tipu spektrus:

1) Līniju spektri. Tie parādās pie elektronu pārejām dažādu elementu atomos un jonus. Līniju spektrus izstaro sakarsētas atomārās gāzes.

2) Joslu spektri. Tie ir raksturīgi molekulām un parādās, izmainoties molekulu elektronu, svārstību un rotācijas enerģijai.

3) Nepārtraukts spektrs. To izstaro sakarsētas cietas vielas un šķidrumi. Tas rodas arī rekombinācijas dēļ. Spektrālajā analīzē nepārtrauktais spektrs ir nevēlama parādība, to cenšas pēc iespējas novērst.

Lai atomus un jonus ierosinātu, tiem nepieciešams pievadīt enerģiju, kas vienāda vai pārsniedz attiecīgā līmeņa ierosmes enerģiju. Spektrālajā analīzē ierosināšanai parasti izmanto elektriskā loka vai dzirksts izlādes. Atomu un jonu ierosme izlādē pārsvarā notiek sadursmēs ar elektroniem. Elektronu enerģiju nosaka elektronu temperatūra T_e , kura vispārējā gadījumā atšķiras no atomu temperatūras T_a . Parasti $T_e > T_a$. Tas izskaidrojams tādējādi, ka elektroni saņem enerģiju no elektriskā lauka un sadursmju rezultātā to nodod smagajām daļiņām.

Atmosfēras spiedienā $T_e \approx T_a$ un var runāt par līdzsvarotu (termisku) ierosmi. Termiskas ierosmes gadījumā pirmā veida sadursmju skaits, t. i., ierosinošo sadursmju skaits starp atomu pamatstāvoklī un ātru elektronu ir vienāds ar otrā veida sadursmju skaitu. Otrā veida sadursmju gadījumā notiek mijiedarbība starp ierosinātu atomu un lēnu atomu vai lēnu elektronu, kurā atoma ierosmes potenciālā enerģija pāriet elektrona kustības enerģijā.

Šajā gadījumā ierosinātu atomu koncentrāciju n_m kādā ierosinātā stāvoklī m apraksta Boltmaņa formula:

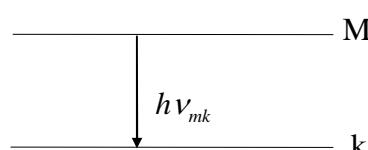
$$n_m = n_0 \frac{g_m}{g_0} e^{-\frac{E_m}{kT}}, \quad /2/$$

kur n_0 - atomu koncentrācija pamatlīmenī,

$g_0; g_m$ - pamatlīmeņa un ierosinātā līmeņa statistiskie svari,

E_m - līmeņa m ierosmes enerģija,

T - plazmas temperatūra.



2. att.

Plazmas temperatūrai pieaugot, arvien vairāk atomu ierosinās augšējos enerģētiskajos līmeņos. Palielinās spektrālo līniju intensitāte ar augstiem ierosmes potenciāliem. Ja absorbciju gaismas avotā var neievērot, tad spektrālīnijas ar frekvenci ν starojuma jaudu no tilpuma vienības var izteikt ar šādu formulu:

$$I_{mk} = n_m A_{mk} h \nu_{mk}, \quad /3/$$

kur A_{mk} - spontānās pārejas varbūtība no ierosinātā stāvokļa m uz stāvokli k . Pārejas

$$\text{varbūtības apgrieztais lielums } \frac{1}{A_{mk}} = \tau_m \text{ raksturo ierosinātā stāvokļa } m \text{ dzīves laiku.}$$

Ja iespējamas pārejas uz vairākiem apakšējiem līmeņiem, tad $\tau_m = \frac{1}{\sum_k A_{mk}}$. Skaitliski $\tau_m \sim 10^{-7} \div 10^{-8} \text{ s.}$

Pārejot no līmeņa m uz līmeni k , atoms izstaro gaismas kvantu, kura enerģija ir $h \nu_{mk} = E_m - E_k$.

Saskaņā ar izteiksmēm /1/ un /2/

$$I_{mk} = n_0 \frac{g_m}{g_0} A_{mk} e^{-\frac{E_m}{kT}} h \nu_{mk} \quad /3a/$$

Pie relatīvi nelielām temperatūrām, kādas realizējas elektriskajā lokā ($T \leq 4000 \div 7000 \text{ } ^\circ\text{K}$), ierosinātu atomu un jonu koncentrācijas nav lielas un var pieņemt, ka atomu koncentrācija pamatstāvoklī ir vienāda ar pilno dotā elementa atomu koncentrāciju. Tad saskaņā ar /3/:

$$I_{mk} = c_1 \cdot e^{-\frac{c_2}{T}}. \quad /4/$$

Palielinot temperatūru, līnijas intensitāte sasniedz piesātinājumu. Minētā sakarība būs novērojama tikai pie relatīvi zemām temperatūrām, kad jonizācijas pakāpe ir maza un spektrā galvenokārt novēro atomu līnijas. Šādu spektru parasti dēvē par loka spektru.

Ja temperatūra ir augsta ($T \sim 10000 \text{ } ^\circ\text{K}$), kas realizējas dzirksts izlādē, tad jonizācijas pakāpe palielinās un neitrālo atomu spektrs kļūst vājāks, toties spožākas kļūst jonu līnijas. Šādu spektru sauc par dzirksts spektru.

Pie lielām plazmas temperatūrām atomu koncentrācija pamatstāvoklī samazinās:

$$n_0 = n_a - \sum_i n_i, \quad /5/$$

kur n_a - sākotnējā neitrālo daļiņu koncentrācija,

n_i - daļiņu koncentrācija ierosinātajos un jonizācijas stāvokļos.

Pie augstām temperatūrām atšķirībā no izteiksmes /3/ intensitāti raksturo šāda izteiksme:

$$I_{mk} = (n_a - \sum_i n_i) \frac{g_m}{g_0} A_{mk} e^{-\frac{E_m}{kT}} h \nu_{mk} \quad /6/$$

Līnijas intensitāti nosaka divi reizinātāji. Viens no tiem ($e^{-\frac{E_m}{kT}}$) pieaug līdz ar temperatūras augšanu, otrs – ($n_a - \sum_i n_i$) samazinās. Rezultātā atoma līnijas intensitāte sasniedz maksimumu pie noteiktas temperatūras.

Atomu skaita samazināšanās pamatstāvoklī notiek galvenokārt jonizācijas dēļ. Vienkārtējas jonizācijas gadījumā ($n_e = n_i$) jonu vai elektronu koncentrāciju termiskā izlādē apraksta Saha formula:

$$\frac{n_e n^+}{n_a} = \frac{g_e g^+}{g_a} \frac{(2\pi m kT)^{3/2}}{h^3} e^{-\frac{U}{kT}}, \quad /7/$$

kur n_e, n^+, n_a - atbilstoši elektronu, jonu un neitrālo daļiņu koncentrācija,

g_e, g^+, g_a - elektronu, jonu un atomu stāvokļu statistiskie svari,

T - plazmas temperatūra,

U - ionizācijas enerģija.

Termiskās ierosmes gadījumā ierosinātu jonu sadalījums pa līmeņiem pakļaujas Boltcmaņa formulai:

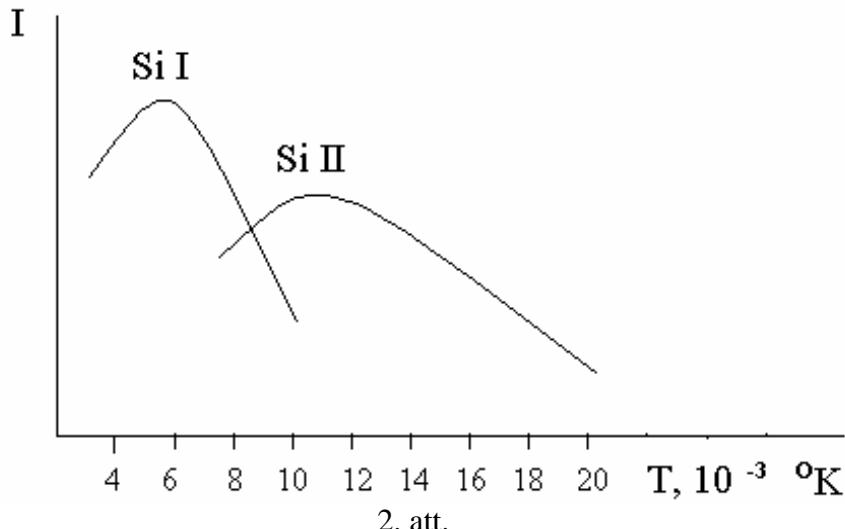
$$n_\ell^+ = n^+ \frac{g_e^+}{g^+} e^{-\frac{E_\ell}{kT}}. \quad /8/$$

Saskaņā ar izteiksmi /7/ jonu koncentrācija līmenī ℓ ir:

$$n_\ell^+ = \frac{n_a}{n_e} \frac{g_e g_\ell^+}{g_a} \frac{(2\pi m)^{3/2}}{h^3} (kT)^{3/2} e^{-\frac{U}{kT}} e^{-\frac{E_\ell}{kT}}, \quad /9/$$

un jonu līnijas intensitātē būs atkarīga no pārejas varbūtības /2/.

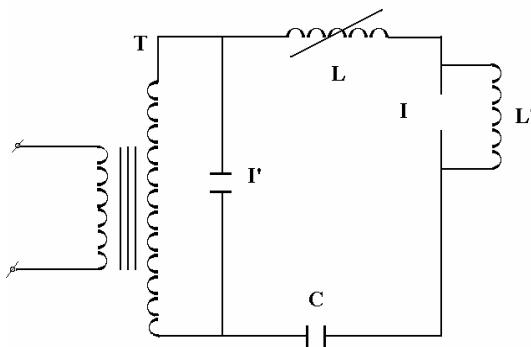
2. zīmējumā attēlotas loka līnijas Si I ($\lambda = 3905 \text{ Å}$) un dzirksts līnijas Si II ($\lambda = 4128 \text{ Å}$) intensitāšu atkarības no temperatūras. Redzams, ka atoma līnijas dzirksts spektrā ($T \sim 10000^0 \text{ K}$) kļūst relatīvi vājas, toties pieaug jonu līniju intensitātes.



Mainot dzirksts vai loka izlādes režīmus, var iegūt spektrus ar dažādām atomu un jonu līniju intensitātēm. Gaismas avota režīmu, kurā ir pastiprināta atomu līniju intensitāte, sauc par "mīkstu" režīmu. "Cietā" režīmā pastiprinās jonu līniju intensitāte.

Elektriskās izlādes gaismas avoti

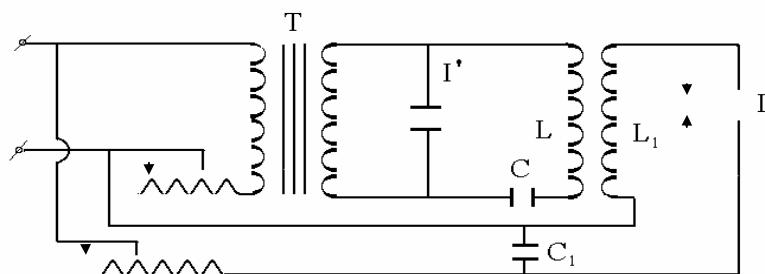
Spektrālās analīzes praksē visbiežāk izmanto maiņstrāvas elektriskā loka un kondensētas augstsprieguma dzirksts izlādes. Dzirksts ģeneratori ИГ-2 un ИГ-3 saslēgti pēc S. Raiska shēmas (3.a att.).



3.a att.

Transformatora T sekundārajā ķēdē ieslēgta papildus izlādes sprauga Γ . Kondensatora C uzlādēšanās notiek caur papildus induktivitāti L' , kura ieslēgta paralēli analītiskajai izlādes spraugai I. Induktivitātei L' ir liela pretestība augstfrekvences strāvai, bet neievērojama - parastajai 50 Hz maiņstrāvai. Vienlaicīgi ar kondensatora C uzlādēšanos rodas potenciālu starpība uz dzirksteļspraugu Γ ; uz analītisko dzirksteļspraugu I potenciālu starpības nav. Kad potenciāls uz kondensatora sasniedz spraugas Γ caursites potenciālu, tajā notiek izlāde, rodas augstfrekvences svārstību process ķēdē Γ CIL, jo Γ nelaiž cauri šīs svārstības. Izlāde notiek caur analītisko izlādes spraugu I, kura tiek caursista. Tādā veidā kondensatora uzlādes procesā analītiskā sprauga nedarbojas. Dzirksts izlādes rašanos šajā spraugā nosaka tikai papildus izlādes spraugas Γ caursite, kuru var uzturēt pietiekami stabili ilgstošu laiku; tas nodrošina analīzēm pietiekami lielu precizitāti. Mainot induktivitāti L un kapacitāti C, mainās strāvas stiprums un dzirksts izlādes temperatūra.

Mainīstrāvas loka ģeneratora $\Delta\Gamma$ -2 saslēgts pēc K. Sventicka shēmas (3.b att.).



3.b att.

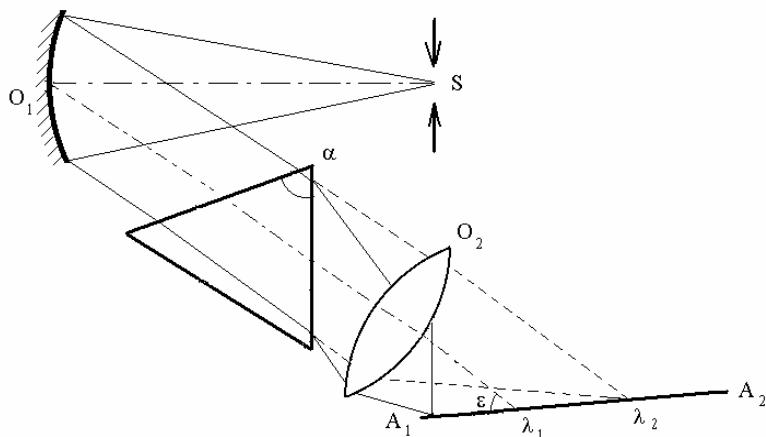
Shēmai ir divi kontūri: augstfrekvences (Γ CL) ar mazu jaudu un parastās maiņstrāvas kontūrs (C , L , I). Transformators paaugstina spriegumu līdz 3,5 ÷ 3 kV. Γ - papildus izlādes sprauga, I - analītiskā izlādes sprauga. Darbinot transformatoru T, augstfrekvences kontūrā rodas strāvas ar frekvenci 10^5 Hz. Tā kā pastāv induktīvā saite starp spolēm L un L_1 , tad augstfrekvences svārstības inducējas otrā kontūrā (C , L , I), kur tās brīvi cirkulē, izsaucot izlādes spraugas I caursiti. Kapacitāte C_1 aizsargā tīklu no augstfrekvences strāvas. Ja uz kontūra C , L , I vienlaicīgi padod 50 Hz maiņspriegumu, radīsies loka izlāde. Taču tā dziest, ejot spriegumam caur nulli. Pārtraukuma brīžos metāla elektrodi atdziest tik stipri, ka termoelektronu emisija tiek pārtraukta. Augstfrekvences izlāde loku aizdedzina katrā pusperiodā.

Uzmanību darbā ar ģeneratoru, lauka intensitāte izlādē starp elektrodiem sasniedz 30 000 V/cm !!!

2. 10. Prizmas spektrālo aparātu raksturojošie parametri

a) Optiskā shēma

Spektrālajā analīzē spektru fotogrāfiskai reģistrēšanai parasti izmanto kvarca prizmu spektrogrāfus. Šie aparāti atļauj reģistrēt spektru viļņu garumu intervālā no $2000\div7000$ Å. Disperģējošais elements ir Korni prizma ar 60° lielu lauzējlenķi (4. att.). Spektrālā aparāta ieejas spraugas S atrodas kolimatora objektīva O



4. att.

fokālajā plaknē, tādēļ aiz objektīva stari izplatās paralēlā kūlī. Dažādu viļņu garumu stari, izejot cauri prizmai, veido dažādus nolieces leņķus prizmas pamatnes virzienā. Spraugas attēlu iegūst kameras objektīva O₂ fokālajā plaknē. Spektrogrāfa optiskā sistēma dod apgrieztu spraugas attēlu.

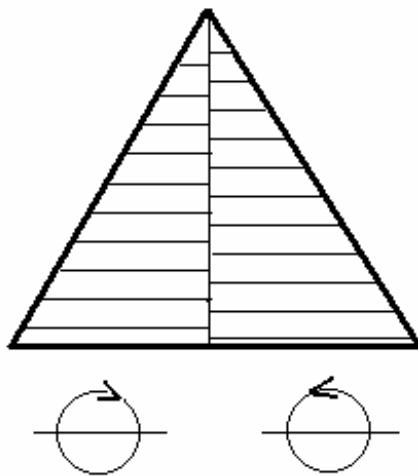
Apgaismojot spektrogrāfa ieejas spraugu ar monohromatisku gaismu, kameras objektīva fokālajā plaknē iegūst spektrālo līniju, kura ir spraugas attēls. Ja uz spraugu krīt sakarsēta cieta vai šķidra ķermeņa starojums (ietilpst visi viļņu garumi), kasetes plaknē iegūst nepārtraukto spektru, jo atsevišķu viļņu garumu monohromatiskie attēli pārklājas.

b) Kasetes nolieces leņķis

Parastai lēcāi ir raksturīga hromatiskā aberācija. Tās rezultātā dažādu viļņu garumu stari fokusēsies atšķirīgos attālumos no kameras objektīva. Kasete jānovieto tā, lai ūso viļņu daļā tā būtu tuvāk objektīvam nekā garo viļņu daļā. Spektrogrāfā ИСП-28 (ИСП-30) kasetes nolieces leņķis attiecībā pret optisko asi ir $\epsilon = 41^\circ 40'$.

c) Korni prizma

Prizma, kas patvalīgā veidā izgriezta no kvarca kristāla, dod dubultas līnijas. Tās rodas dubultlaušanas un polarizācijas plaknes griešanas dēļ. Franču fiziķis Korni (1841- 1902) ieteica prizmu izveidošanai izmantot abas dabā sastopamās kvarca kristālu modifikācijas. Šīs modifikācijas atšķiras ar polarizācijas plaknes griešanas virzienu. Korni prizmu izgatavo no divām simetriskām daļām. Viena daļa izgriezta no pa labi griezošā kvarca, otra - no pa kreisi griezošā kvarca. Kristālu optiskā ass novietota paralēli staru gaitai prizmā. Ar šādas prizmas palīdzību var iegūt asas spektrāllīnijas ar simetrisku kontūru.



5. att.

d) Leņķiskā dispersija

Leņķiskā dispersija ir spektrālo prizmu raksturojošs lielums. Tas ir leņķisks attālums starp diviem stariem, kuru viļņu garumi atšķiras par vienu viļņu garuma vienību. Prizmas leņķiskā dispersija ir attiecība $\frac{d\varphi}{d\lambda}$ un simetriska stara gadījumā

$$\frac{d\varphi}{d\lambda} = \frac{2 \sin \frac{\alpha}{2}}{\sqrt{1 - n^2 \sin^2 \frac{\alpha}{2}}} \cdot \frac{dn}{d\lambda}, \quad /10/$$

kur α - prizmas lauzējleņķis,
 n - prizmas vielas laušanas koeficients.

Formula rāda, ka prizmas leņķiskā dispersija ir atkarīga no prizmas vielas dispersijas $\frac{dn}{d\lambda}$ un no lauzējleņķa α .

e) Lineārā dispersija

Lineāro dispersiju nosaka attiecība $\frac{d\ell}{d\lambda}$. Lielums $d\ell$ ir attālums starp divām spektrālām līnijām, kuras atšķiras pēc viļņu garumiem par $d\lambda$:

$$\frac{d\ell}{d\lambda} = \frac{d\varphi}{d\lambda} \cdot \frac{f_2}{\sin \varepsilon}, \quad /10a/$$

kur f_2 - kameras objektīva fokusa attālums,
 ε - kasetes nolieces leņķis.

No formulas redzams, ka spektrogrāfa lineārā dispersija ir atkarīga no prizmas leņķiskās dispersijas, no kameras objektīva fokusa attāluma un no kasetes nolieces leņķa.

Praktiski spektrogrāfa lineāro dispersiju raksturo apgriezts lielums $\frac{d\lambda}{d\ell}$: tas ir viļņa garuma intervāla lielums uz spektra garuma vienību (parasti Å/mm). Grafiski attēlo $\frac{d\lambda}{d\ell} = f(\lambda)$.

Saka, ka spektrogrāfa dispersija ir jo lielāka, jo mazāk viļņu garuma vienību ietilpst spektra garuma vienībā.

f) Lineārais palielinājums

Lineārais palielinājums spraugas virzienā β_1 ir vienāds

$$\beta_1 = \frac{f_2}{f_1},$$

kur f_1 - kolimatora objektīva fokusa attālums,
 f_2 - kameras objektīva fokusa attālums.

Palielinoties viļņu garumam, kvarca spektrogrāfa lineārais palielinājums pieaug tāpēc, ka neahromatizēta objektīva fokusa attālums ir viļņu garuma funkcija: jo lielāks viļņa garums, jo lielāks f_2 .

Aparāta lineārais palielinājums dispersijas virzienā β_2 ir vienāds ar

$$\beta_2 = \frac{f_2}{f_1 \cdot \sin \varepsilon}.$$

Tas atkarīgs no fokālās plaknes nolieces leņķa.

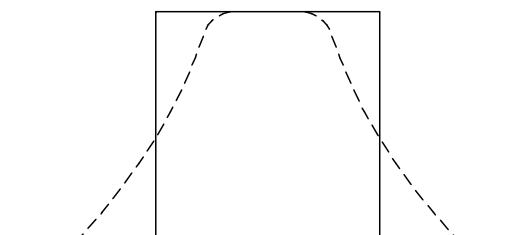
g) Spektrālo līniju platums. Izšķirspēja. Releja kritērijs

No ģeometriskās optikas viedokļa spektrālās līnijas platumu a' var izteikt šādā veidā:

$$a' = a\beta_2 = a \cdot \frac{f_2}{f_1 \cdot \sin \varepsilon},$$

kur a - ieejas spraugas platum.

Tad spektrālās līnijas kontūrai vajadzētu būt taisnstūrim, kā tas attēlots 6. zīmējumā ar nepārtrauktu līniju. Taču, pateicoties gaismas difrakcijai apertūras diafragmā un



6. att.

izkliedei fotoemulsijā, rodas specifisks intensitātes sadalījums spektrālajā līnijā, kas vairs precīzi neatainino spraugas ģeometrisko formu (6. att. punktētā līnija).

Lai noteiktu spektrālā aparāta izšķiršanas spēju, pieņemsim, ka ieejas sprauga ir ļoti šaura (bezgalīgi šaura). Tad difrakcijas ainas minimums, kas veidojas fokālajā plaknē, novēro virzienos φ , kur

$$d \sin \varphi = k\lambda, \quad /11/$$

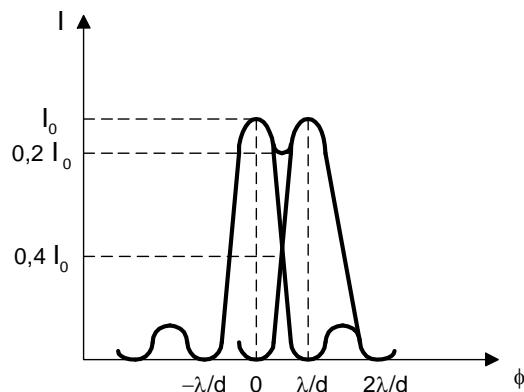
kur d - gaismas kūļa platums (prizmas apertūra),
 $k = \pm 1; \pm 2; \dots$ utt.

Mazu leņķu gadījumā $\sin \varphi = \varphi$ un $\varphi = k \frac{\lambda}{d}$.

Pirmais minimums ($k = 1$) novērojams leņķī

$$\varphi_1 = \frac{\lambda}{d}. \quad /11a/$$

Tātad spektrogrāfa spēju izšķirt divas ļoti tuvas līnijas nosaka nevis spraugas platums, kuru var pēc vajadzības samazināt, bet difrakcijas centrālā maksimuma platums. Divas līnijas ar viļņa garumu atšķirību $\delta\lambda$ var izšķirt tad, ja centrālais difrakcijas maksimums ($k = 0$) vienai līnijai novietojas otras līnijas pirmā minimuma vietā (Releja nosacījums). Tādā gadījumā abas difrakcijas maksimumu kontūras krustojas vietā, kas ir 0,4 no maksimālā apgaismojuma, un intensitāšu starpība sastāda 20% (7. att.).



7. att.

Par spektrālā aparāta izšķiršanas spēju R sauc attiecību $\lambda / \delta\lambda$. /12/

Ja $\delta\varphi$ ir leņķiskais attālums starp divām spektrālām līnijām, kuru viļņu garumi atšķiras par $\delta\lambda$, kas apmierina Releja kritēriju, tad saskaņā ar formulu /11a/

$$\delta\varphi = \varphi_1 = \frac{\lambda}{d} \quad /11b/$$

$\delta\varphi$ var izteikt, izmantojot leņķisko dispersiju:

$$\delta\varphi = \frac{d\varphi}{d\lambda} \cdot \delta\lambda \quad /11c/$$

Pielīdzinot izteiksmes /11b/ un /11c/:

$$\begin{aligned} \frac{\lambda}{d} &= \frac{d\varphi}{d\lambda} \cdot \delta\lambda \\ R &= \frac{\lambda}{\delta\lambda} = d \frac{d\varphi}{d\lambda}, \end{aligned} \quad /13/$$

iegūstam

$$R = d \frac{d\varphi}{d\lambda} = \frac{2d \sin \alpha/2}{\sqrt{1 - n^2 \sin^2 \alpha/2}} \cdot \frac{dn}{d\lambda} \quad /13a/$$

Reālā izšķiršanas spēja ir mazāka nekā teorētiskā. To samazina fotomateriālu izšķiršanas spēja un spektrogrāfa optiskās sistēmas aberācijas. Fotogrāfisko plānu izšķiršanas spēju parasti nosaka līniju skaits uz 1 mm, kuras fotoplāte attēlo atsevišķi. Piemēram, ja fotoplātes izšķiršanas spēja ir 50 līniju uz 1 mm, tas nozīmē, ka uz plates var redzēt atsevišķi divas līnijas, starp kurām attālums ir 0,02 mm.

Pie $\varphi = 0,5 \frac{\lambda}{d}$ intensitāte centrālajā maksimumā samazinās līdz $0,4 I_0$. Centrālā difrakcijas maksima platums šajā vietā ir $\delta\varphi = \frac{\lambda}{d}$, bet lineārais platums kasetes plaknē ir

$$s = \delta\varphi \frac{f_2}{\sin \varepsilon} = f_2 \frac{\lambda}{d \sin \varepsilon}. \quad /14/$$

Šīs sakarības ir spēkā tikai bezgalīgi šauras ieejas spraugas gadījumā. Tā kā spektrālā līnija ir ieejas spraugas attēls un ieejas spraugas platums ir galīgs, tad, neņemot vērā difrakciju, spektrālās līnijas platums ir vienāds:

h) Ieejas spraugas normālais platums

$$a' = a \cdot \beta_2 = a \cdot \frac{f_2}{f_1 \sin \varepsilon}$$

Daudzos gadījumos mērķtiecīgi izvēlēties tādu ieejas spraugas platumu, lai $a' = s$:

$$f_2 \cdot \frac{\lambda}{d \sin \varepsilon} = \frac{a}{\sin \varepsilon} \cdot \frac{f_2}{f_1}; \quad a = a_n = \lambda \cdot \frac{f_1}{d} \quad /15/$$

a_n sauc par normālo ieejas spraugas platumu.

i) Spektrālaparāta gaismas spēja

Gaismasspēja raksturo spektrālā aparāta ieejošās gaismas plūsmas izmantošanas efektivitāti. Pieņemsim, ka gaismas avots, kurš izstaro monohromatisku gaismu ar viļņu garumu λ un kura starojuma spožums ir B_λ , fokusējas uz ieejas spraugu. Ja gaismas kūlītis aizpilda prizmas vai objektīva apertūru, tad gaismas plūsma Φ_λ , kas nonāk spektrālā aparātā, ir vienāda

$$\Phi_\lambda = \tau B_\lambda \frac{\pi d^2}{4f_1^2} \cdot ah, \quad /16/$$

kur $\frac{\pi d^2}{4f_1^2}$ - telpas leņķis, kas balstās uz kolimatora objektīva atvērumu ar diametru d ,

a, h - ieejas spraugas platums un augstums,

τ - raksturo to gaismas enerģijas daļu, kura zūd aparāta optiskajā sistēmā (atstarošanās, absorbācija).

Šī gaismas plūsma krīt uz laukumu $a'h'$, kur

$$a' = a \cdot \frac{f_2}{f_1 \sin \varepsilon} \text{ un } h' = h \cdot \frac{f_2}{f_1}.$$

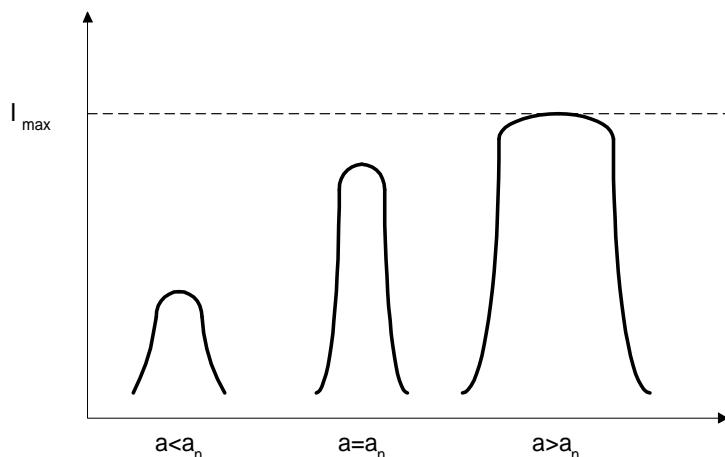
Ja difrakciju neievēro (ieejas sprauga platāka par normālo), tad apgaismojums spektrālās līnijas robežās ir:

$$E_\lambda = \frac{\Phi_\lambda}{a'h'} = \tau \cdot B_\lambda \frac{\pi}{4} \left(\frac{d}{f_2}\right)^2 \sin \varepsilon. \quad /17/$$

Tādā veidā fotogrāfiskās plates apgaismojums monohromatiskās spektrālās līnijas robežās, t. i., spektrogrāfa gaismasspēja proporcionāla kameras objektīva relatīvajam atvērumam. Spektrogrāfa gaismasspēja dažādiem vilņa garumiem būs dažāda, jo fokusa attālums mainās atkarībā no vilņu garuma.

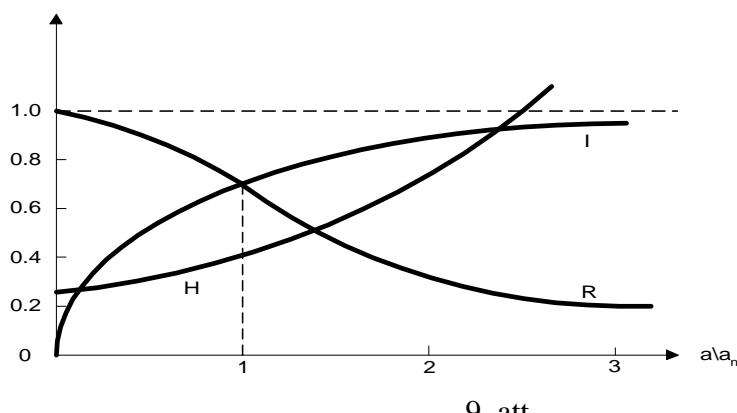
2. 11. Spektrālās līnijas kontūras un spožuma atkarība no ieejas spraugas platuma

Spektrālās līnijas intensitātes sadalījuma izmaiņu, palielinot spraugas platumu, var attēlot grafiski. Šauras spraugas gadījumā spraugas platura palielināšana rada spektrālās līnijas intensitātes pieaugumu. Pieaugums izbeidzas, sasniedzot ieejas spraugas platumu, kas nedaudz lielāks par normālo; tālāk palielinot spraugas platumu, līnijas intensitāte kontūras maksimumā paliek nemainīga (8. att.).



8. att.

Grafikā (9. att.) attēlots, kā mainās līniju intensitāte I , izšķiršanas spēja R un spektrālās līnijas platoms H atkarībā no spektrālā aparāta spraugas platumā (a_n - normālais spraugas platus)



9. att.

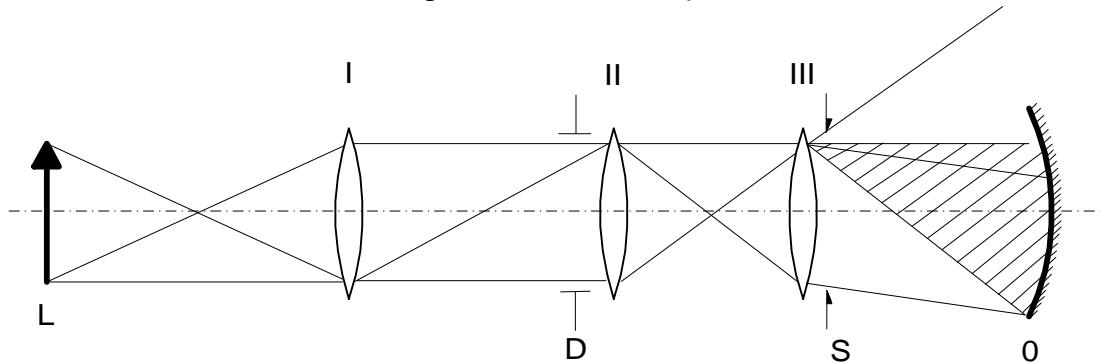
3. Darba eksperimentālā daļa

3.1. Spektrogrāfa iejas spraugas apgaismojuma ieregulēšana

Lai pēc iespējas pilnīgāk izmantotu spektrālā aparāta gaismasspēju, tai pašā laikā nodrošinot vienmērīgu spraugas apgaismojumu, un novērstu vinjetēšanos, lieto **kondensoru** sistēmu. Vislabāk minētie nosacījumi realizējas, izmantojot 3-lēcu **kondensoru** sistēmu ar starpattēlu (10. att.).

Lēca I fokusē avota L attēlu lēcas II plaknē. Lēca II fokusē lēcas I plakni spraugas S plaknē. Tādējādi katrs spraugas punkts arī ir apgaismots vienmērīgi.

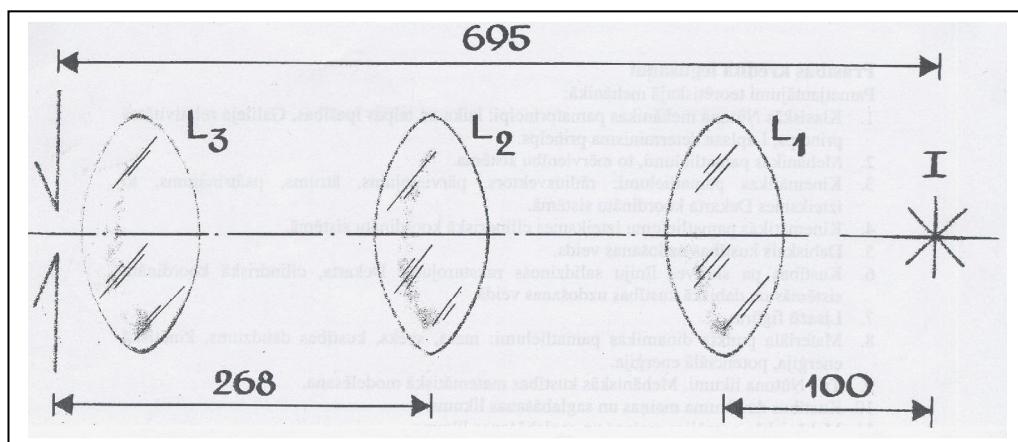
Lēca III, kura novietota tieši pirms spraugas, novērš vinjetēšanos, tā fokusē lēcas II plakni un attiecīgi avota attēlu kolimatora objektīva O plaknē. Pateicoties šai lēcai, gaismas stari, kas apgaismo spraugas galus, noliecas kolimatora ass virzienā un kolimatora objektīvs tos pilnībā savāc (10. zīm. iesvītrotais kūlītis). Diafragma D izdala no gaismas avota attēla nepieciešamo avota daļu.



10. att.

Tad ir kondensors
vai konensators?

Strādājot ultravioletajā spektra daļā, parasti **kondensatoru** rastās neahromatizētās lēcas, kuru fokusa attālumi ir atkarīgi no viļņu garuma. Tāpēc attālumi starp lēcām trīslēcu apgaismošanas sistēmā ultravioletajā spektra daļā uzrādīti aparāta aprakstā. Spektrālaparātam ИСП – 28 (30) attālumi mm doti 10.a zīmējumā.



11.a att.

Ļoti svarīgi ir rūpīgi iecentrēt apgaismošanas sistēmu uz spektrālā aparāta optisko asi. Ja sprauga apgaismota slīpi, gaisma no avota nokļūst uz kolimatora objektīva malām, spektra attēla kvalitāte būs sliktāka nekā strādājot objektīva centrālajā daļā. Slīpi apgaismojot spraugu, samazinās arī spektra spožums.

3. 2. Apgaismošanas sistēmas centrēšana

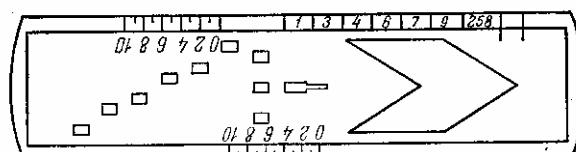
1. Vispirms jāuzstāda visi apgaismošanas sistēmas elementi spektrogrāfa spraugas līmenī (gaismas avots, kondensori). To var izdarīt, vai nu pa kārtai pietuvinot visus sistēmas elementus pie spraugas, vai arī ar lineālu nomērot augstumu no sliedes virsmas.
2. Jānovieto spektra avots paredzētā vietā un jāaizdedzina loks. Pēc tam jāuzstāda viena no lēcām uz sliedes un jāpārvieto tā, kamēr uz spraugas vāciņa parādās ass, pamazināts avota attēls. Jāuzstāda lēca pēc augstuma tā, lai attēls atrastos vāciņa centrā. Pēc tam jāpārvieto lēca pie avota, kamēr uz vāciņa parādās ass, palielināts avota attēls. Attēla centram jāpaliek uz vietas. Ja attēla centrs pārvietojas, tad atkārtoti jāuzstāda avots un lēca vajadzīgajā augstumā, kamēr attēla un vāciņa centri sakrīt.
3. Jānoņem pirmā lēca, jāuzliek otrā un jāatkārto minētā operācija, šoreiz nepārvietojot avotu, bet tikai lēcu.
4. Jāuzstāda visa apgaismošanas sistēma saskaņā ar instrukcijā uzrādītiem attālumiem. Pie kam uz otrā kondensora ekrāna jāparādās asam loka attēlam, bet aplītim uz vāciņa jābūt vienmērīgi izgaismotam.

2. 3. Spraugas nulles stāvokļa noregulēšana

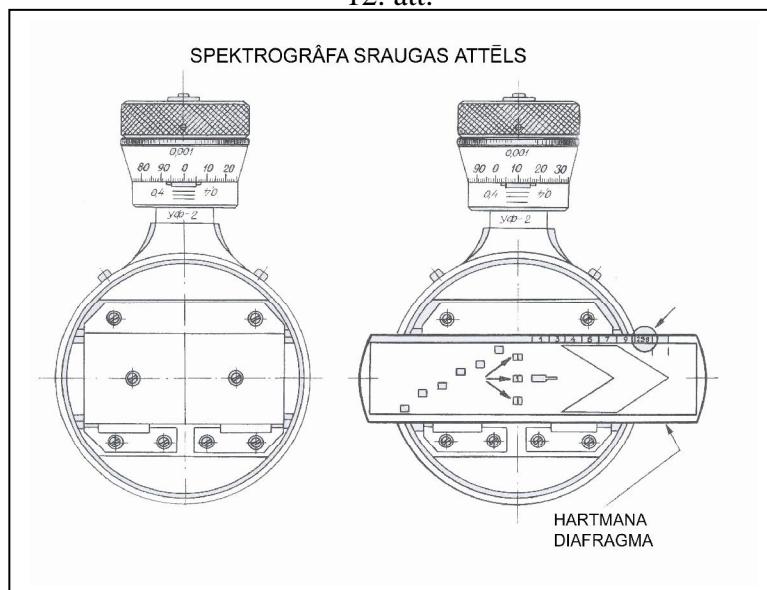
Jānoņem kasete. Jāaizdedzina loks. Jāatver sprauga. Skatoties kasetes izgriezumā, ir jānovēro spektra redzamā daļa. Pakāpeniski jāaizver sprauga. Jāatzīmē spraugas mikrometriskās skrūves stāvoklis spektra pazušanas momentā. Lēni jāatver sprauga un atkal jāatzīmē spraugas mikrometriskās skrūves stāvoklis momentā, kad parādās spektrs. Minēto operāciju atkārto vairākas reizes, pieejot arvien tuvāk īstajam nulles stāvoklim. Spraugas platumu atliek pēc atrastās nulles punkta.

2. 4. Spektru fotogrāfēšana kvalitatīvai analīzei

Kvalitatīvajā analīzē ir jālieto Hartmana diafragma, t. i., spraugai priekšā jānovieto metāla plāksnīte ar izgriezumiem (12. att.).



12. att.



12.a att.

Atkarībā no tās stāvokļa izmanto dažādus spraugas rajonus. Tas ļaujnofotografēt vairākus spektrus, nemainot kasetes stāvokli; kasetes stāvokļa maiņa var radīt spektru nobīdi vienam attiecībā pret otru.

Hartmana diafragmā ir deviņi izgriezumi. Diafragmas izgriezumu numerācija sākas no apakšējās. Izgriezumi ar kārtas numuriem 2., 5. un 8. izvietoti cita zem citas, pārējās novietotas slīpi. Izgriezumu numerācija redzama diafragmas augšējā malā.

Ar Hartmana diafragmas palīdzību vispirms fotografē dzelzs elektrodu spektru, izmantojot diafragmas 2., 5. un 8. izgriezums (11.a zīm) un tam blakus parauga spektrs. Tadejādi vienlaikus iegūst trīs dzelzs spektrus un pārbīdot diafragmu, stāvokļos 1., 3., 4., 6., 7. un 9. sešu paraugu spektrs. **Fotografējot šo spektru sēriju nepārvietot un aizvērt tikai tad, kad uzņemšana nobeigta!** Kaseti var pārvietot, uzņemot jaunu spektru sēriju. Dzelzs elektrodu spektrs ir nepieciešams atšifrēšanai.

Kvalitatīvās analīzes jutība sasniedz $10^{-5} \div 10^6 \%$.

Atšifrējot spektrogrammu, lieto kvarca spektrogrāfa spektrālo līniju atlantu. Mūsdienās ir atšifrētas ap pusmiljons līniju. Šī atlanta pamatā ir dzelzs spektrs, kurš ierosināts maiņstrāvas lokā. No pārējo elementu kopējā spektrālo līniju skaita ir atzīmētas intensīvākās, kuras lieto gan kvalitatīvajā, gan kvantitatīvajā analīzē. Šo līniju stāvoklis attiecībā pret dzelzs spektru ir atzīmēts ar svītrām uz atlanta kartēm. Katrai līnijai blakus elementa simbolam ir norādīts viļņu garums, noapaļots līdz 0,1 Å, norādīta piederība neitrāla (I) vai jonizēta (II) atoma spektram, bet pa labi augšā - jutība relatīvās vienībās. Piemēram, Mg_{II}^{9} apzīmē

_{02,7}

magnija jona līniju 2802,7 Å ar relatīvo jutību 9. Atlanta vizuālais noformējums attēlots 12. zīmējumā. Skala dota Å.

Vadoties pēc jutības indeksa, var veikt puskvantitatīvo analīzi. Jutības indeksiem atbilstošās aptuvenās koncentrācijas dotas 2. tabulā.

2. tabula

Jutība	Elemeta koncentrācija, pie kuras etalona spektrā parādās līnija
1	10%
2-3	10 - 1%
3-5	1 - 0,1 %
5-7	0,1 - 0,01 %
7-9	0,01 - 0,001 %
10	0,001%

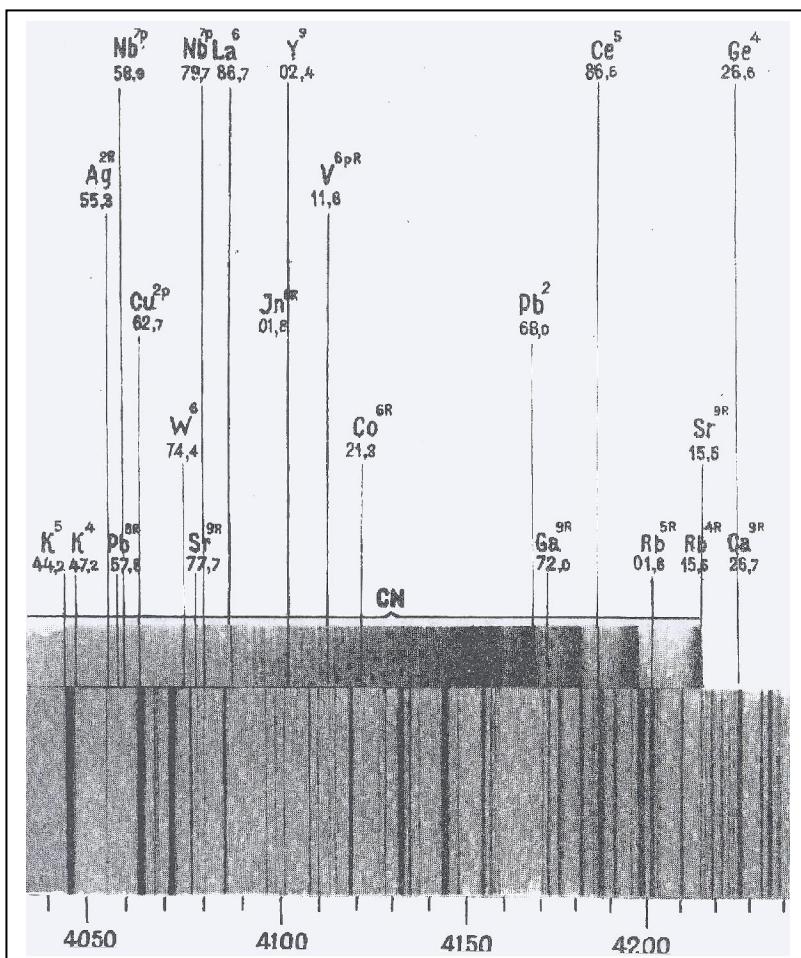
Atlanta pielikumā ir spektrālo līniju tabulas (3. tabula), kurās atzīmētas jutīgākās spekrāllīnijas, to relatīvās intensitātes loka un dzirksts izlādē, kā arī ierosināšanas potenciāls un jutības indekss.

3. tabula

λ (Å)	Intensitāte relatīvās vienībās		Jutība	Ierosmes potenciāls
	Lokā	Dzirkstī		
2789,06 II	30	80	4	8,86
2802,695 II	150	300	9	4,42
2848,42 I	20	-	4	7,05
2852,129 II	300	100	10	4,34

3. 5. Spektru atšifrēšana

Ķīmiski apstrādātu, tekošā ūdenī labi izskalotu fotoplati žāvē. Kad emulsija sausa, var uzsākt spektra atšifrēšanu. Šim nolūkam izmanto spektra projektoru un spktrāllīniju atlantu. Ja fotoplati novieto uz speciāla spektra projektorā plašu turētāja, tad uz projektorā ekrāna (galdiņa) iegūst 20 reizes palielinātu spektra attēlu. Mainot objektīva stāvokli dzels spektra attēlu var precīzi savietot ar atlanta attiecīgā spektrālā rajona dzelzs spektru. Parauga spektrālo līniju izvietojums attiecībā pret dzelzs spektru atļauj identificēt to piederību kādam no periodiskās sistēmas elementiem.



13. att.

Bieži vien analizējamā parauga spektrs var būt visai sarežģīts, ja paraugs satur vairākus ķīmiskos elementus. Ja kāda elementa koncentrācija paraugā ir pietiekami liela, tad fiksēto līniju skaits var būt ievērojams. Ir iespējama dažādu elementu atsevišķu līniju sakrišana, ja to vilņu garumi ir līdzīgi. Tad atšifrēšanas procesā var ieviesties kļūdas. Tādēļ galīgo slēdzienu var izdarīt, pārbaudot pēdējās līnijas klātbūtni. **Pēdējā līnija, samazinot elementa koncentrāciju paraugā, no spektra izzūd pati pēdējā.** Bieži nākas izmantot arī priekšpēdējo līniju. Tā ir līnija, kura izzūd no spektra pirms pēdējās līnijas izzušanas. Šo līniju jutības indeksi parasti ir 9 vai 10. Ja šīs līnijas neatrodas reģistrētajā spektra rajonā, tad dažkārt nākas izmantot līnijas ar mazākiem jutības indeksiem – 7 vai 8 (sk. pielikumu).

Spektra atšifrēšanu ieteicams veikt divos etapos. Pirmajā etapā caurlūko visu parauga spektru un protokolā fiksē to spektrāllīniju ķīmiskos simbolus, vilņu garumus un jutības indeksus, kurām novēro sakritību ar atlanta atzīmēm. Otrajā etapā jāpārlūko fiksētās līnijas un jāizvērtē to ticamība. Izvērtēšanas procesā var vadīties pēc vairākām pazīmēm:

- gāzu spektri elektriskajā lokā netiek ierosināti,
- ja paraugā nekonstatē lantānu, tad paraugā visticamāk nebūs arī pārējie retzemju elementi,
- ja spektrā konstatēta kāda elementa līnija ar mazu jutības indeksu, piemēram, 2, tad noteikti spektrā jābūt arī līnijām ar lielākiem jutības indeksiem – 3, 4, 5 u.c. Tas nozīmē, ka šī elementa koncentrācija ir liela (1. tabula) un spektrā var būt daudzas šī elementa līnijas,
- ja spektrā atrod tikai nedaudzas kāda elementa līnijas ar lieliem jutības indeksiem, tad starp tām jābūt arī pēdējai līnijai. Var gadīties arī tikai viena kāda elementa līnija, tad tai noteikti jābūt pēdējai (priekšpēdējai), ja atšifrēšana veikta pareizi. Tad šī elementa koncentrācija paraugā ir neliela.
- Ja pēdējā līnija ir ārpus reģistrētā intervāla, tad var izmantot, t.s., priekšpēdējās līnijas, kuras dotas pielikumā.

Uzmanību! Vēsturiski ieviesies, ka pēdējo līniju tabulā līniju numerācija atšķiras no jutības indeksiem. Pēdējās līnijas apzīmējums ir 1, priekšpēdējās – 2, priekšpriekšpēdējās – 3 utt.

Piemērs: Aplūkosim konkrētu kvalitatīvas analīzes gadījumu. Pieņemsim, ka parauga spektrā atrasta līnija 4172 angstrēmu rajonā (13. att.). Vadoties pēc spektrālo līniju atlanta, tā varētu piederēt gallijam. Lai izslēgtu kļūdas, izmantosim spektrāllīniju sakrišanas tabulas, kur dotas citu elementu līdzīgu vilņa garumu līnijas (4. tabula)

4. tabula

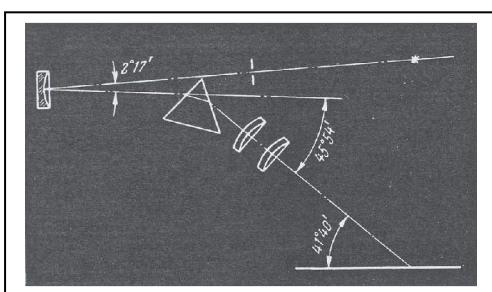
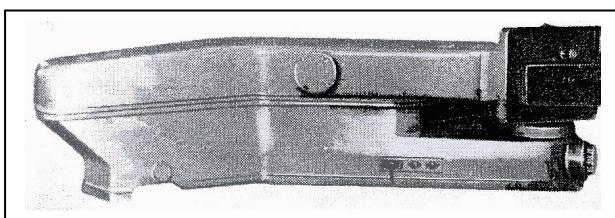
Vilņa garums λ , Å	Elementa ķīmiskais simbols	Intensitāte relatīvās vienībās	Elementa klātbūtnē
4172,61	Ti I	5	?
4172,59	Tb	12	-
4172,57	Os	60	?
4172,56	Ir	150	?
4172,51	Kr II	-	-
4172,32	La I	8	-
4172,27	Pr	75	-
4172,23	Ho	2	-
4172,23	Yb	2	-
4172,18	U	3	-
4172,16	Ce II	18	-
4172,13	Fe	80	?
4172,05	Ga I	2000	?
4171,99	Dy	15	-
4171,96	Ce	2	-
4171,93	Dy	4	-
4171,90	Ti II	15	?
4171,85	Cu II	-	-
4171,82	Pr	75	-
4171,80	Tb	8	-
4171,77	Ce	2	-
4171,71	Gd	25	-
4171,71	Er	15	-
4171,63	N	-	-
4171,56	I	-	-

No 4. tabulā minētajiem elementiem varam svītrot gāzes - kriptonu un slāpekli. Pieņemsim, ka spektrā nekonstatējām lantānu, tādā gadījumā varam atmest arī citus retzemju

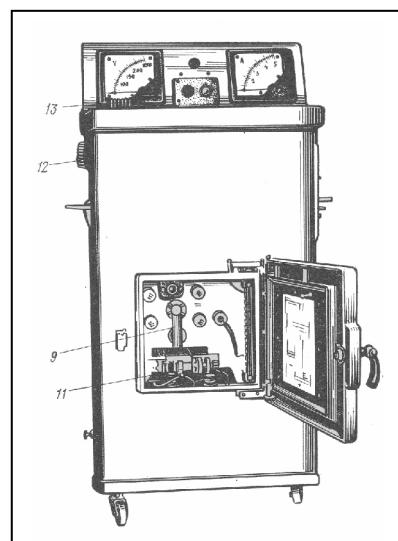
elementus: Tb, Pr, Ho, Yb, Ce, Dy, Gd un Er. Urāna līnija ir ļoti vāja un urāna klātbūtnē paraugos var būt tikai specifiskos gadījumos. Jods lokā ļoti slikti ierosinās, tādēļ arī to varam svītrot. Vara jona līnijas ierosināšanai nepieciešama liela enerģija, tā ir vāja. Izvēle jāizdara starp titānu, osmiju, irīdiju, dzelzi un galliju. Titāna dzels un osmija līniju intensitātes ir nelielas, tādēļ tās varētu parādīties pie samērā lielām koncentrācijām. Tas nozīmē, ka spektrā jābūt arī citām šo elementu līnijām. Ja tās nav konstatētas, tad vēl jānoskaidro irīdija esamība. Irīdija pēdējā 3220,78 Å un priekšpēdējā 3513,65 Å līnija ir labi pieejamā spektra rajonā. Ja šīs līnijas netiek konstatētas, tad var svītrot arī irīdiju. Ja minētās līnijas spektrā parādās, tas vēl nenozīmē, ka spektrā jābūt arī irīdija līnijai 4172,56 Å, jo tā ir vājāka. Galīgai atbildei jāmeklē citas intensīvākas gallija līnijas: priekšpēdējā (4032,98 Å), priekšpriekšpēdējā (2943,64 Å) u.c.

Analīzei izmantot jutības indeksus un relatīvās intensitātes !

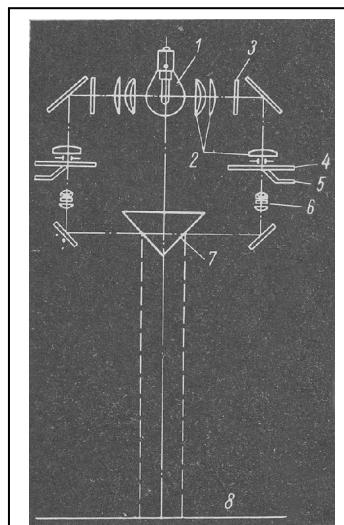
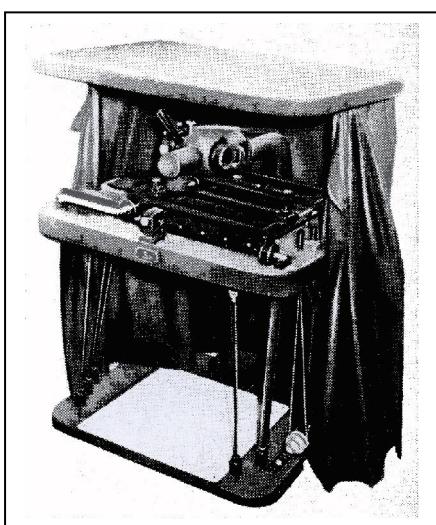
3. 6. Darbā izmantojamā aparatūra



Spektrogrāfa ИСП – 28 kopskats un optiskā shēma



Loka ģenerators ДГ – 2



Spektra projektorā ДСП-1 kopskats un optiskā shēma

Aparatūras apraksti un parametru dati pieejami darba vietā.

3. 7. Protokola paraugs

N p.k.	Elektrodu tips	Iejas spraugas platumis, mm	Kasetes stāvoklis	Hartmana diafragmas stāvoklis	Gaismošanas laiks, s	Strāvas stiprums, A
1.	Fe – Fe	0,08	10	2, 5, 8	150	4
2.	Fe – Fe	10	1	150	4
3.	Paraugs – paraugs	10	3	30	4
4.	Paraugs – paraugs	10	4	60	4
5.	Paraugs – paraugs	10	6	120	4
6.	Paraugs – paraugs	10	7	180	4
7.	10	9	240

Ja ir divi identiski paraugi, tad tos var izmantot par elektrodiem. Ja tikai viens, tad par augšējo elektrodu parasti izvēlās spektrālī tīru ogli.

Gaismošanas laiks ir atkarīgs no fotomateriālu jutības. Konsultēties ar darba vadītāju! Kasetes stāvokli drīgst mainīt tikai uzsāket jaunu mērījumu sēriju.

3. 8. Derīgi padomi:

Dažu elementu jutīgāko spektrālīniju izvietojums spektrā

Ultra violetais rajons			Spektra redzamā daļa 4000—7200 Å	Infrasarka -nais rajons 7200—9000 Å
2000—2500 Å	2500—3500 Å	3500—4000 Å		
As, Au, B, Be, C, Cd, Se, Te, Zn	Ag, Au, Bi, Co, Cu, (Ga), Ge, Hf, Hg, (In), Ir, Mg, Mn, Mo, Ni, Os, P, (Pb), Pd, Pt, Re, Rh, Ru, Sb, (Sc), Si, Sn, Ta, Th, Ti, V, W, (Zr)	Al, Ca, Fe, La, Mo, Sc, (Tl), (Y), Yb, Zr	Ba, Ce, Cr, (Cs), Ga, In, (K), Li, Mn, Na, Nb, Pb, Pr, (Rb), Sr, Ti, Tl, U, V, W, Y	Cs, K, Rb

Dažu elementu noteikšanas jutība lokizlādes plazmā

0,0001%	0,001%	0,01%	0,1%	1%
Ag, Cu, Mg, Na, Be	Al, Au, B, Ba, Bi, Ca, Cd, Co, Cr, Fe, Ga, Ge, Hg, In, Li, Mn, Mo, Ni, Pb, Pt, Sc, Si, Sn, Sr, Ti, Tl, V, Y, Yb, Zr	As, C, Hf, La, Nb, Re, Rh, Sb, Th, Te, W, Zn	Cs, Ir, K, Os, P, Pd, Rb, Ru, Se, Ta, U	Ce, Pr

4. Darba uzdevumi

1. Darba uzdevums

Spektrogrāfa ИСП-28 (ИСП-30) dispersijas līknes $\left(\frac{d\ell}{d\lambda} = f(\lambda) \right)$ konstruēšana.

- Darba gaita:
1. Iestādīt apgaismojumu pēc 3 lēcu sistēmas.
 2. Pārbaudīt ieejas spraugas nulles stāvokli.
 3. Iestādīt ieejas spraugas platumu 0,008÷0,010 mm.
 4. Iestādīt Hartmana diafragmu.
 5. Fotografēt dzelzs spektru.
 6. Izmantojot spektrāllīniju atlantu, atšifrēt dzelzs spektru.
 7. Ar mērmikroskopu izmērīt lineāro intervālu starp šauru dzelzs līniju pāriem dažādos spektrālajos rajonos. Izvēlēties apmēram 20 līniju pārus. Attālumu starp līnijām atkarībā no spektrālā rajona izvēlēties dažus Å vai dažus 10 Å.

Atrast attiecību $\frac{\Delta\ell}{\Delta\lambda}$ un attēlot grafiski $\frac{\Delta\ell}{\Delta\lambda} = f(\lambda)$.

2. darba uzdevums

Dotā parauga kvalitatīvā analīze.

- Darba gaita:
1. Iestādīt apgaismojumu pēc 3 lēcu sistēmas.
 2. Pārbaudīt spraugas nulles stāvokli.
 3. Iestādīt ieejas spraugas platumu 0,008÷0,010 mm.
 4. Fotografēt dzelzs spektru caur Hartmana diafragmu (stāvoklis 2,5,8).
 5. Viena dzelzs elektroda vietā ievietot analizējamā materiāla elektrodu, otru dzelzs elektrodu apmainīt ar pretelektrodu. Par pretelektrodu parasti izmanto spektrāli tīras ogles elektrodu. Elektrodus apmaina secīgi, saglabājot izlādes spraugas stāvokli.
 6. Fotografēt parauga spektru vairākkārt, mainot ekspozīcijas. Kaseti nepārvietot, mainīt Hartmana diafragmas stāvokli (1,3,4,6,7,9).
 7. Izmantojot spektrāllīniju atlantu, atšifrēt spektrogrammu un noteikt parauga ķīmisko sastāvu.

3. darba uzdevums

Dotā parauga puskvalitatīvā analīze.

- Darba gaita:
1. Izpildīt 2. darba 1. - 7. punkta prasības.
 2. Veikt dotā parauga orientējošu kvantitatīvu analīzi, izmantojot jutības indeksus.

5. Kontroljautājumi

1. Atomi izstaro
 - a) joslu spektru,
 - b) līniju spektru,
 - c) nepārtrauktu spektru.
2. Saha formula apraksta
 - a) Ierisinātu atomu enerģētisko sadalījumu,
 - b) jonu sadalījumu pa energijām,
 - c) jonu koncentrācijas atkarību no temperatūras.
3. Atomu spektrālīnijas intensitāte
 - a) nav atkarīga no plazmas temperatūras,
 - b) palielinās, pieaugot temperatūrai,
 - c) sasniedz maksimālo vērtību pie noteiktas temperatūras.
4. Spektrālaparāta prizmu šķērso
 - a) paralēlu staru kūlis,
 - b) saejošu staru kūlis,
 - c) izklīstošu staru kūlis.
5. Prizmas leņķiskā dispersija
 - a) nav atkarīga no prizmas lauzējleņķa lieluma,
 - b) samazinās, palielinoties lauzējleņķim,
 - c) samazinās, samazinot lauzējleņķi.
6. Prizmas spektrālaparāta izšķirtspēja
 - a) nav atkarīga no prizmas izmēriem,
 - b) samazinās, palielinot prizmu,
 - c) palielinās, palielinot prizmu.
7. Spraugas normālais platums
 - a) nav atkarīgs no prizmas apertūras,
 - b) palielinās pieaugot gaismas vilņa garumam,
 - c) samazinās palielinot vilņa garumu.
8. Pēdējā līnija
 - a) ir spektra malā novietotā līnija,
 - b) līnija ar vislielāko vilņa garumu,
 - c) līnija, kura izzūd pēdējā, samazinot elementa koncentrāciju.
9. Kā rīkoties, ja analizējamā parauga spektrā atklāta tikai viena (iespējams pēdējā) kāda elementa spektrālīnija:
 - a) uzskatīt, ka šis elements ir paraugā,
 - b) tā ir gadījuma sakrišana,
 - c) izmantot spektrālīniju sakrišanas tabulas un turpināt analīzi.

6. Pielikumi

6.1. Ķīmisko elementu pēdējo līniju tabulas

Vilņa garums λ , Å	Jona kārta	Līniju izzušanas kārtība	Līnijas ierosmes enerģija, eV	Vilņa garums λ , Å	Jona kārta	Līniju izzušanas kārtība	Līnijas ierosmes enerģija, eV
Ac (aktīnijs) 89							
4183.12	I	–	3.0	2802.06	II	1	13.4
4179.98	I	–	3.0	2675.95	I	2	4.6
4088.44	II	–	4.0	2427.95	I	1	5.1
2626.44	III	–	4.7	B (bors) 5			
Ag (sudrabs) 47				3451.41	II	1	12.7
5465.49	I	4	6.0	24.97.73	I	1	5.0
5209.07	I	3	6.0	2496.78	I	2	5.0
3382.89	I	2	3.7	Ba (bārijs) 56			
3280.69	I	1	3.8	5777.62	I	2	3.8
2437.79	II	1	9.9	5535.48	I	1	2.2
2246.41	II	2	10.4	5519.05	I	3	3.8
Al (alumīnijs) 13				5424.55	I	4	3.8
6243.36	II	3	15.1	4934.09	II	2	2.5
6231.76	II	–	15.1	4554.04	II	1	2.7
3961.53	I	1	3.1	4130.66	II	3	5.7
3944.09	I	2	3.1	3891.79	II	4	5.7
3092.71	I	3	4.0	3071.58	I	5	4.0
3082.16	I	4	4.0	2335.27	II	–	6.0
2816.18	II	2	11.8	2304.24	II	–	6.0
2669.17	II	1	4.6	Be (berilijs) 4			
2631.55	II	–	15.3	5321.34	I	2	6.4
Am (americijs) 95				3321.09	I	3	6.4
2969.29	II	2	4.5	3321.01	I	4	6.4
2832.26	II	1	4.4	3131.07	II	2	4.0
Ar (argons) 18				3130.42	II	1	4.0
8115.31	I	2	13.1	2650.78	I	5	7.4
7503.87	I	4	13.5	2348.61	I	1	5.3
7067.22	I	3	13.3	Bi (bismuts) 83			
6965.43	I	3	13.3	4722.37	I	–	4.0
1066.66	I	2	11.6	3067.72	I	1	4.0
1048.22	I	1	11.8	2989.03	I	–	5.6
As (arsēns) 33				2938.30	I	–	6.1
2898.71	I	–	6.6	2897.98	I	2	5.7
2860.44	I	–	6.6	2809.63	I	–	6.3
2780.22	I	–	6.8	2780.52	I	–	5.9
2456.53	I	–	6.4	2276.58	I	–	5.4
2370.77	I	–	7.6	2061.70	I	–	6.0
2369.67	I	–	7.6	Br (broms) 35			
2349.84	I	–	6.6	4816.71	II	–	14.2
2288.12	I	–	6.8	4785.50	II	–	14.2
2003.34	I	–	7.6	4704.86	II	–	14.3

Viļna garums $\lambda, \text{\AA}$	Jona kārta	Līniju izzušanas kārtība	Līnijas ierosmes enerģija, eV	Viļna garums $\lambda, \text{\AA}$	Jona kārta	Līniju izzušanas kārtība	Līnijas ierosmes enerģija, eV
C (ogleklis) 6				Co (kobalts) 27			
6582.85	II	—	16.3	4121.32	I	—	3.9
6578.03	II	—	16.3	4118.77	I	—	4.1
4267.27	II	2	20.9	3995.31	I	—	4.0
4267.02	II	3	20.9	3529.81	I	3	4.0
2837.60	II	5	16.3	3502.28	I	—	4.0
2836.71	II	4	16.3	3465.80	I	2	3.6
2478.57	I	2	7.7	3453.51	I	1	4.0
2296.99	III	—	18.2	3412.34	I	—	4.2
Ca (kalcijs) 20				3405.12	I	—	4.1
4454.78	I	2	4.7	2519.82	II	—	6.2
4434.96	I	3	4.7	2388.92	II	—	5.6
4425.44	I	4	4.7	2378.62	II	—	5.6
4226.73	I	1	2.9	2363.79	II	—	5.7
3968.47	II	2	3.1	2286.16	II	1	5.8
3933.67	II	—	3.2	Cr (hroms) 24			
3179.33	II	3	7.1	5208.42	I	7	3.3
3158.87	II	4	7.1	5206.02	I	8	3.3
Cd (kadmijs) 48				5204.51	I	9	3.3
6438.47	I	—	7.3	4289.73	I	6	2.9
4799.91	I	—	6.4	4274.81	I	5	2.9
3610.51	I	—	7.4	4254.33	I	4	2.9
3466.20	I	—	7.4	3605.32	I	3	3.4
3403.65	I	—	7.4	3593.48	I	2	3.4
3261.05	I	—	3.8	3578.68	I	1	3.5
2748.58	II	—	10.3	2860.92	II	5	5.8
2572.93	II	—	10.3	2855.67	II	4	5.8
2312.77	II	—	11.1	2849.83	II	3	5.9
2288.02	I	1	5.4	2843.24	II	2	5.9
2265.02	II	2	5.5	2835.63	II	1	5.9
2144.41	II	1	5.8	Cs (cēzījs) 55			
Ce (cerijs) 58				8943.50	I	2	1.4
4186.60	II	—	3.8	8521.10	I	1	1.5
4165.61	II	—	3.9	4593.18	I	4	2.7
4137.65	II	—	3.5	4555.36	I	3	2.7
413380	II	—	3.9	Cu (varš) 29			
4040.76	II	—	3.5	5218.20	I	3	6.2
4012.39	II	—	3.7	5153.24	I	4	6.2
3801.53	II	—	4.2	5105.54	I	5	3.8
3560.80	II	—	4.2	3273.96	I	2	3.8
Cl (hlors) 17				3247.54	I	1	3.8
4819.46	II	4	15.9	2247.00	II	3	8.2
4810.06	II	3	15.9	2192.26	II	2	8.5
4794.54	II	2	15.9	2135.98	II	1	8.5

Viļna garums λ, Å	Jona kārta	Līniju izzušanas kārtība	Līnijas ierosmes enerģija, eV	Viļna garums λ, Å	Jona kārta	Līniju izzušanas kārtība	Līnijas ierosmes enerģija, eV
Er (erbijs) 68				Ge (germānijs) 32			
4007.97	I	—	—	4226.57	I	—	5.0
3906.34	II	—	—	3269.49	I	3	4.7
3692.64	II	—	3.4	3039.06	I	2	5.0
3499.11	II	—	3.6	2754.59	I	—	4.7
Eu (eiropijs) 63				2709.63	I	—	4.6
4205.05	II	—	3.0	2651.58	I	—	4.7
4129.73	II	—	3.0	2651.18	I	—	4.9
3971.99	II	—	3.3	2592.54	I	—	4.9
3907.11	II	—	3.4	H (ūdenrādis) 1			
Fe (dzelzs) 26				6562.80	I	2	12.1
3748.26	I	4	3.4	4861.33	I	3	12.7
3745.90	I	5	3.4	1215.67	I	1	10.2
3745.56	I	3	3.4	He (hēlijs) 2			
3737.13	I	2	3.4	5875.97	I	2	23.1
3719.94	I	1	3.3	5875.62	I	3	23.1
2413.31	II	5	5.3	4685.75	II	—	51.0
2410.52	II	4	5.3	3888.65	I	2	23.0
2404.88	II	3	5.2	Hf (hafnijs) 72			
2395.63	II	2	5.2	4093.16	II	—	3.5
2382.04	II	1	5.2	3134.72	II	—	4.3
Dy (disprozijs) 66				3072.88	I	—	4.0
4211.75	I	—	—	2940.76	I	—	4.2
4186.78	I	—	—	2916.48	I	—	4.8
4167.99	I	—	—	2904.41	I	—	4.8
4103.34	II	—	3.1	2898.26	I	—	4.6
4077.98	II	—	3.1	2820.22	II	—	4.8
4045.99	I	—	—	2773.36	II	—	5.3
4000.48	II	—	3.2	2641.41	II	—	5.7
F (fluors) 9				2516.88	II	—	5.3
6902.46	I	—	14.5	2513.03	II	—	5.7
6856.02	I	—	14.5	Hg (dzīvsudrabs) 80			
Ga (gallijs) 31				5460.73	I	—	7.7
4172.05	I	1	3.1	4358.33	I	—	7.7
4032.98	I	2	3.1	4046.56	I	—	7.7
2943.64	I	3	4.3	3663.28	I	5	8.9
2874.24	I	4	4.3	3654.83	I	4	8.8
Gd (gadolīnijs) 64				3650.15	I	3	8.9
4341.27	II	—	3.3	2536.52	I	2	4.9
4225.86	I	—	3.1	1849.50	I	1	6.7
3768.39	II	—	3.4	Ho (holmijs) 67			
3481.35	II	—	4.2	4045.44	II	—	—
3358.61	II	—	3.7	3891.02	II	—	—
3032.84	II	—	4.2	2936.77	II	—	—

3Vilņa garums λ, Å	Jona kārta	Līniju izzušanas kārtība	Līnijas ierosmes energija, eV	Vilņa garums λ, Å	Jona kārta	Līniju izzušanas kārtība	Līnijas ierosmes energija, eV				
In (indijs) 49											
4511.32	I	1	3.0	5183.62	I	—	5.1				
4101.77	I	2	3.0	5172.70	I	—	5.1				
3258.56	I	5	4.1	5167.34	I	—	5.1				
3256.09	I	3	4.1	3838.26	I	2	5.9				
3039.36	I	4	4.1	3832.31	I	3	5.9				
Ir (irīdijs) 77											
3513.65	I	2	3.5	2852.13	I	1	4.3				
3437.02	I	—	4.4	2802.70	II	2	4.4				
3220.78	I	1	4.2	2795.53	II	1	4.4				
2849.73	I	—	4.3	Mn (mangāns) 25							
2694.23	I	—	5.0	4034.49	I	6	3.1				
2543.97	I	—	5.2	4033.07	I	5	3.1				
J (jods) 53											
5464.62	II	—	12.3	4030.76	I	4	3.1				
5161.20	II	—	12.4	2801.08	I	3	4.4				
K (kālijs) 19											
7698.98	I	2	1.6	2798.27	I	2	4.4				
7664.91	I	1	1.6	2794.82	I	1	4.4				
4047.20	I	4	3.1	2605.69	II	3	4.8				
4044.14	I	3	3.1	2593.73	II	2	4.8				
Kr (kriptons) 36											
5870.92	I	2	12.1	2576.10	II	1	4.8				
5570.29	I	3	12.1	3902.96	I	3	3.2				
1235.82	I	1	10.0	3864.11	I	2	3.2				
1164.87	I	1	10.6	3798.25	I	1	3.3				
La (lantāns) 57											
6249.93	I	1	2.5	2909.11	II	5	5.7				
5930.68	I	2	2.1	2890.99	II	4	5.8				
5455.15	I	3	2.4	2871.51	II	3	5.9				
4204.04	II	—	3.6	2848.24	II	2	6.0				
4196.55	II	—	3.3	2816.15	II	1	6.1				
4123.23	II	4	3.3	N (slāpeklis) 7							
4077.35	II	3	3.3	5679.56	II	2	20.7				
3988.52	II	1	3.5	5676.02	II	4	20.6				
3949.10	II	2	3.5	5666.64	II	3	20.6				
Li (litijs) 3											
6707.64	I	1	1.9	4109.98	I	2	13.7				
6103.64	I	3	3.9	4099.94	I	3	13.7				
4602.86	I	4	4.5	Na (nātrijs) 11							
3232.61	I	2	3.8	5895.92	I	2	2.1				
Lu (lutēcijs) 71											
4518.56	I	—	2.7	5889.95	I	1	2.1				
3554.44	II	—	5.6	5688.22	I	—	4.3				
2969.82	II	—	5.6	5682.66	I	—	4.3				
2894.84	II	—	6.0	3302.99	I	—	3.7				
O (skābeklis) 8											
7775.43	I	4	10.7								
7774.14	I	3	10.7								
7771.93	I	2	10.7								
1217.62	I	1	14.4								

4Viļņa garums λ, Å	Jona kārta	Līniju izzušanas kārtība	Līnijas ierosmes energija, eV	Viļņa garums λ, Å	Jona kārta	Līniju izzušanas kārtība	Līnijas ierosmes energija, eV
Nb (niobijs) 41				Pb (svins) 82			
4137.09	I	5	3.0	5608.8	II	—	9.6
				4057.82	I	1	4.4
4123.81	I	4	3.0	3683.47	I	2	4.3
4100.92	I	3	3.1	3639.58	I	—	4.4
			4.6	2833.07	I	—	4.4
4079.73	I	2	3.1	2802.00	I	—	5.7
4058.93	I	1	3.2	2614.18	I	—	5.7
			4.3	2203.51	II	1	7.4
3580.28	I	—	3.6	2169.99	I	—	5.7
3225.48	II	—	4.1	Pd (pallādijs) 46			
3194.98	II	—	4.2	3634.70	I	3	4.2
3163.40	II	—	4.3	3609.55	I	—	4.4
3130.78	II	—	4.4	3516.94	I	—	4.5
3094.17	II	1	4.5	3421.24	I	2	4.6
Nd (neodīms) 60				3404.58	I	1	4.5
4303.57	II	—	2.9	3242.70	I	—	4.6
4177.32	II	—	3.0	2854.58	II	—	8.3
4012.25	II	—	3.7	2658.72	II	—	8.7
3951.15	II	—	3.3	2505.74	II	—	9.2
Ne (neons) 10				2498.78	II	—	9.0
6402.25	I	—	18.6	2488.92	II	—	8.1
5852.49	I	—	19.0	Pt (platīns) 78			
5400.56	I	—	19.0	3064.71	I	1	4.0
Ni (nikelis) 28				2997.97	I	—	4.2
3619.39	I	—	3.8	2830.30	I	—	4.4
3524.54	I	—	3.5	2733.96	I	—	4.6
3515.05	I	—	3.6	2659.45	I	2	4.7
3492.96	I	2	3.6	Ra (rādijs) 88			
3461.65	I	—	3.6	4825.91	I	1	2.6
3414.77	I	1	3.6	4682.28	II	2	2.7
3050.82	I	—	4.1	3814.42	II	1	3.3
3002.49	I	—	4.2	Rb (rubīdijs) 37			
2287.08	II	1	7.3	7947.60	I	2	1.6
2270.21	II	2	6.6	7800.23	I	1	1.6
2264.46	II	3	6.7	4215.56	I	4	2.9
2253.86	II	4	6.8	4201.85	I	3	2.9
Os (osmijs) 76				Re (rēnijs) 75			
4420.47	I	—	2.8	4889.14	I	2	2.5
3267.95	I	—	3.8	3464.73	I	—	3.6
P (fosfors) 15				3460.47	I	1	3.6
2554.90	I	—	7.2	3424.62	I	—	5.1
2553.25	I	3	7.2	Rh (rodijs) 45			
2535.61	I	2	7.2	4374.80	I	—	3.5
1782.87	I	1	7.0	3657.99	I	—	3.6
Pa (protaktīnijs) 9				3434.89	I	1	3.6
2743.9	—	1	—	3323.09	I	—	3.9

Viļna garums λ, Å	Jona kārta	Līniju izzušanas kārtība	Līnijas ierosmes enerģija, eV	Viļna garums λ, Å	Jona kārta	Līniju izzušanas kārtība	Līnijas ierosmes enerģija, eV
Rn (radons) 86				Sn (alva) 50			
7450.00	I	2	8.4	4524.74	I	—	4.9
7055.42	I	3	8.5	3262.34	I	3	4.9
1786.10	I	1	6.9	3175.05	I	—	4.3
1451.60	I	1	8.5	3034.12	I	—	4.3
Ru (rutēnijs) 44				3009.14	I	2	4.3
3598.18	I	3	3.7	2839.99	I	1	4.8
3498.94	I	1	3.5	Sr (stroncijs) 38			
3436.74	I	2	3.8	4962.26	I	4	4.3
S (sērs) 16				4872.49	I	3	4.3
9212.91	I	4	7.9	4832.08	I	2	4.3
4696.25	I	9	9.2	4607.33	I	1	2.7
4695.45	I	8	9.2	4305.45	II	—	5.9
4694.13	I	7	9.2	4215.52	II	2	2.9
1820.37	I	1	6.9	4077.71	II	1	3.0
Sb (antimons) 51				3474.89	II	—	6.6
3267.51	I	—	5.8	3464.46	II	—	6.6
2877.92	I	—	5.4	3380.71	II	—	6.6
2528.52	I	—	6.1	Ta (tantals) 73			
2311.47	I	—	5.4	3318.84	I	—	4.0
2175.88	I	2	5.7	3311.16	I	1	4.4
2068.33	I	1	6.0	2714.67	I	—	4.6
Sc (skandijs) 21				2675.90	II	—	5.2
4023.69	I	3	3.1	2653.27	I	—	4.9
4020.40	I	4	3.1	2647.47	I	—	4.7
3911.81	I	1	3.2	2635.93	I	—	5.0
3907.48	I	2	3.2	Te (tehnēcijs) 43			
3642.79	II	3	3.4	4297.06	I	—	2.9
3630.74	II	2	3.4	2647.02	II	—	4.7
3613.84	II	1	3.5	2610.00	II	—	4.8
3572.52	II	—	3.5	2543.24	II	—	4.9
Se (selēns) 34				Te (telūrs) 52			
4742.25	I	6	8.6	2769.67	I	—	5.8
4739.03	I	5	8.6	2530.70	I	—	5.5
4730.78	I	4	8.6	2385.76	I	2	5.8
2413.52	I	—	6.3	2383.25	I	3	5.8
2062.79	I	3	6.3	2142.75	I	—	5.8
2039.85	I	2	6.3	Th (torijs) 90			
Si (silīcijs) 14				4391.11	II	—	3.4
3905.53	I	—	5.1	4381.86	II	—	3.7
2881.58	I	1	5.1	4019.14	II	—	3.1
2528.52	I	2	4.9	3741.19	II	—	3.5
2524.12	I	—	4.9	3601.04	II	—	—
2516.12	I	3	4.9	3538.75	III	—	4.9
2506.90	I	4	4.9	2837.30	II	—	—

Viļna garums λ, Å	Jona kārta	Līniju izzušanas kārtība	Līnijas ierosmes enerģija, eV	Viļna garums λ, Å	Jona kārta	Līniju izzušanas kārtība	Līnijas ierosmes enerģija, eV
Ti (titāns) 22				W (volframs) 74			
5007.21	I	—	3.3	4302.11	I	1	3.2
4999.51	I	—	3.3	4294.61	I	2	3.2
4991.07	I	—	3.3	4074.36	I	—	3.4
4981.73	I	1	3.3	4008.75	I	3	3.4
4536.05	I	—	3.5	3613.79	II	—	5.2
4535.92	I	—	3.6	3215.56	I	—	4.6
4535.58	I	—	3.6	2946.98	I	—	4.6
4534.78	I	—	3.6	2944.40	I	—	4.6
4533.24	I	—	3.6	2589.17	II	—	5.6
4305.92	I	—	3.7	2398.09	II	—	5.6
3998.64	I	—	3.1	Xe (ksenons) 54			
3653.50	I	2	3.4	4671.23	I	2	11.0
3642.68	I	—	3.4	4624.28	I	3	11.0
3635.46	I	—	3.4	4500.98	I	4	11.1
3383.76	II	—	3.7	Y (itrijs) 39			
3372.80	II	3	3.7	4674.85	I	1	2.7
3361.21	II	2	3.7	4643.70	I	2	2.7
3349.04	II	1	4.3	3710.29	II	1	3.5
3234.52	II	—	3.9	Zn (cinks) 30			
Tl (tallijs) 81				6362.35	I	—	7.7
5350.46	I	1	3.3	4810.53	I	—	6.7
3775.72	I	2	3.3	4722.16	I	—	6.7
3519.24	I	3	4.5	4680.14	I	—	6.7
3229.75	I	—	4.8	3345.02	I	2	7.8
2918.32	I	—	5.2	3302.59	I	3	7.8
2767.87	I	—	4.5	3282.33	I	4	7.8
U (urāns) 92				2557.96	II	3	11.0
4241.67	II	—	3.5	2502.00	II	4	11.0
4090.14	II	—	3.2	2138.56	I	1	5.8
3859.58	II	—	3.2	2061.91	II	2	6.0
3670.07	II	—	3.5	2025.51	II	1	6.1
V (vanādijs) 23				Zr (cirkonijs) 40			
4408.51	I	—	3.1	4772.31	I	—	3.2
4389.97	I	—	3.1	4739.48	1	—	3.3
4384.72	I	—	3.0	4710.08	I	—	3.3
4379.24	I	1	3.1	4687.80	I	4	3.4
4111.79	I	—	3.3	3601.19	I	1	3.6
3185.40	I	2	4.0	3572.47	II	4	3.5
3183.98	I	—	3.9	3547.68	I	2	3.6
3125.28	II	—	4.3	3519.61	I	3	3.5
3118.38	II	4	4.3	3496.21	II	3	3.6
3110.71	II	3	4.3	3496.21	II	3	3.6
3102.30	II	2	4.4	3438.23	II	2	3.7
3093.11	II	1	4.4	3391.98	II	1	3.8

6.2. Dažu elementu redzamās daļas spektri

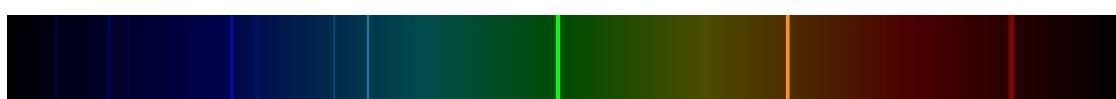
Ūdeņradis



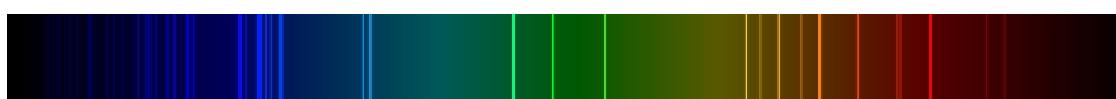
Hēlijs



Litijs



Skābeklis



Ogleklis



Slāpeklis



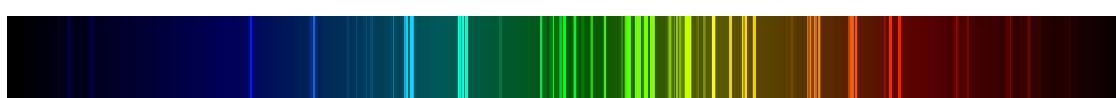
Neons



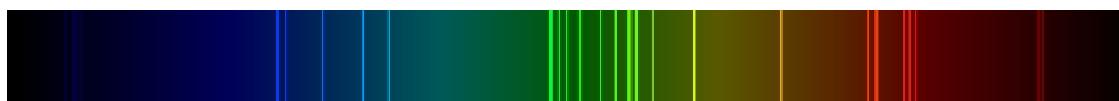
Magnijs



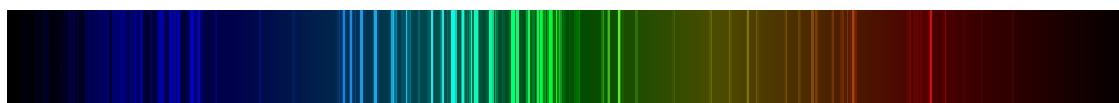
Silicijs



Sērs



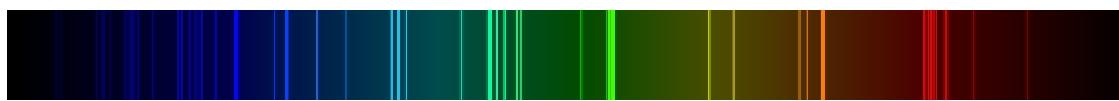
Dzelzs



Alumīnijs



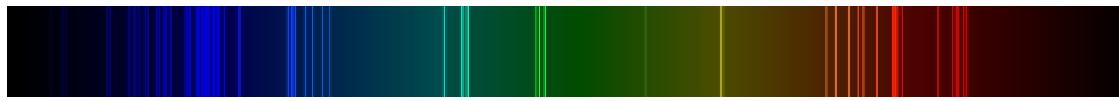
Kalcijs



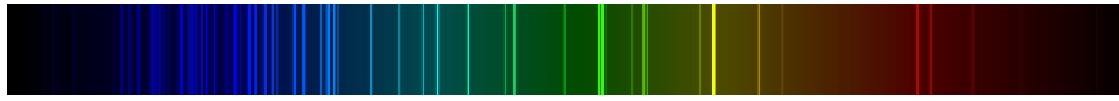
Argons



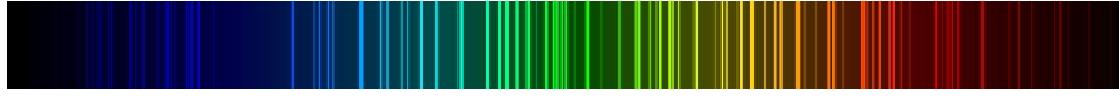
Nātrijs



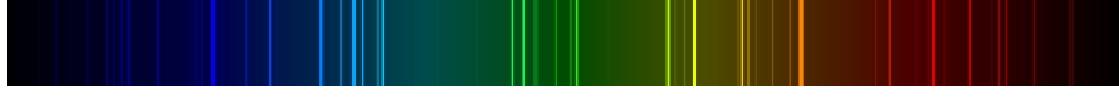
Kriptons



Ksenons



Bārijs

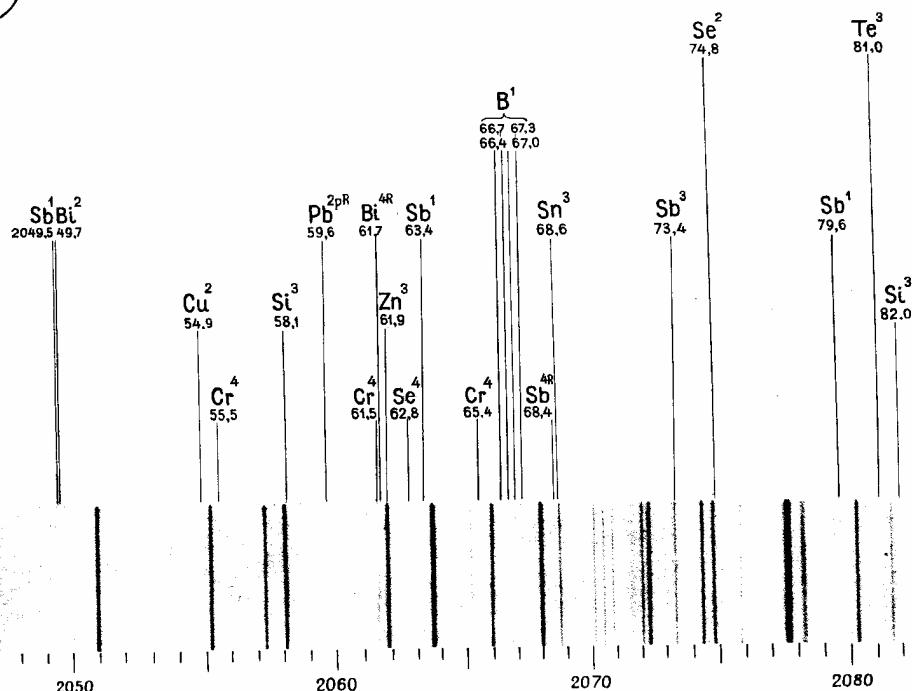


Stroncijs

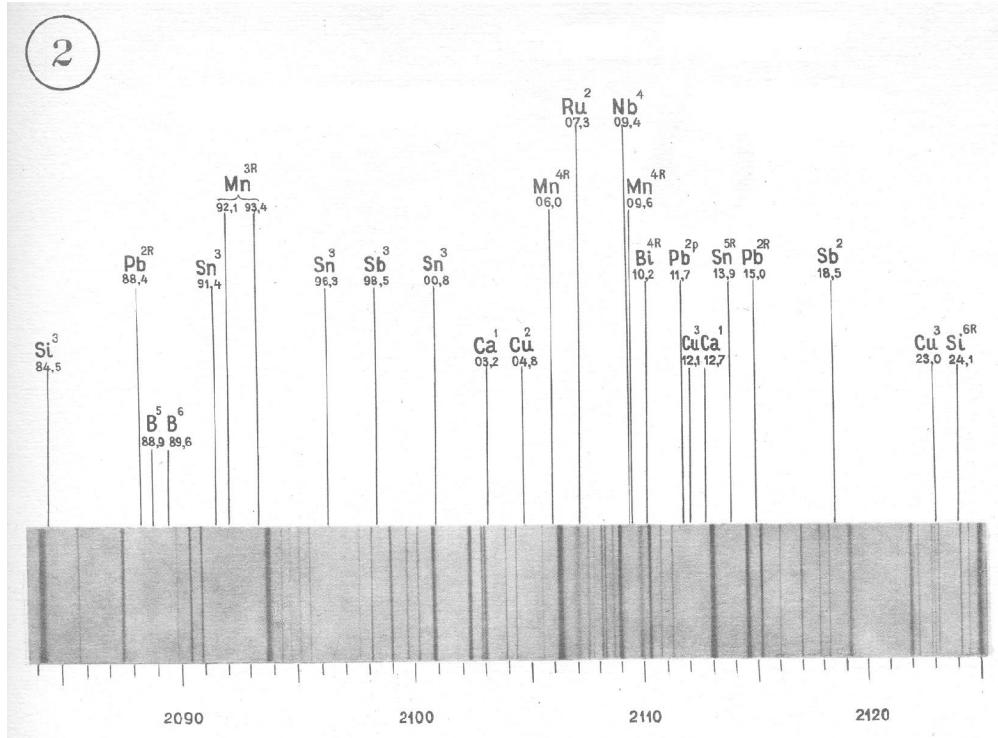


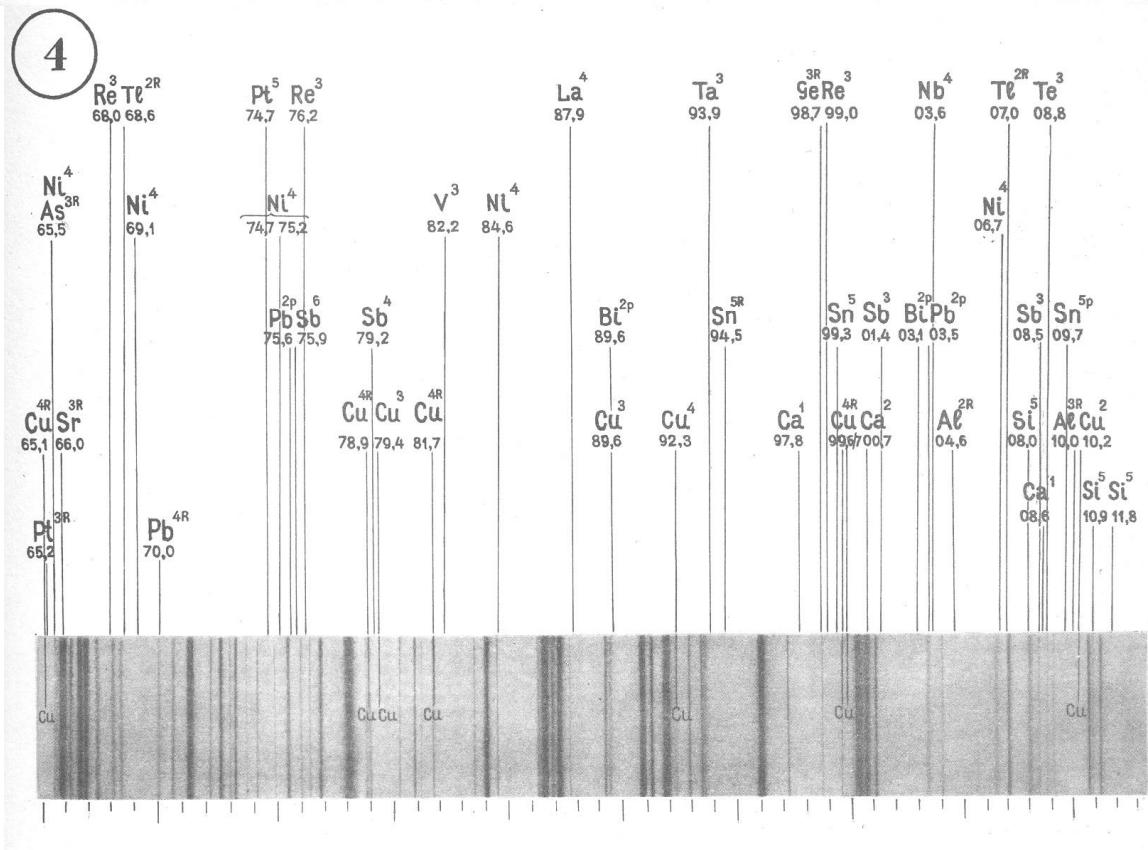
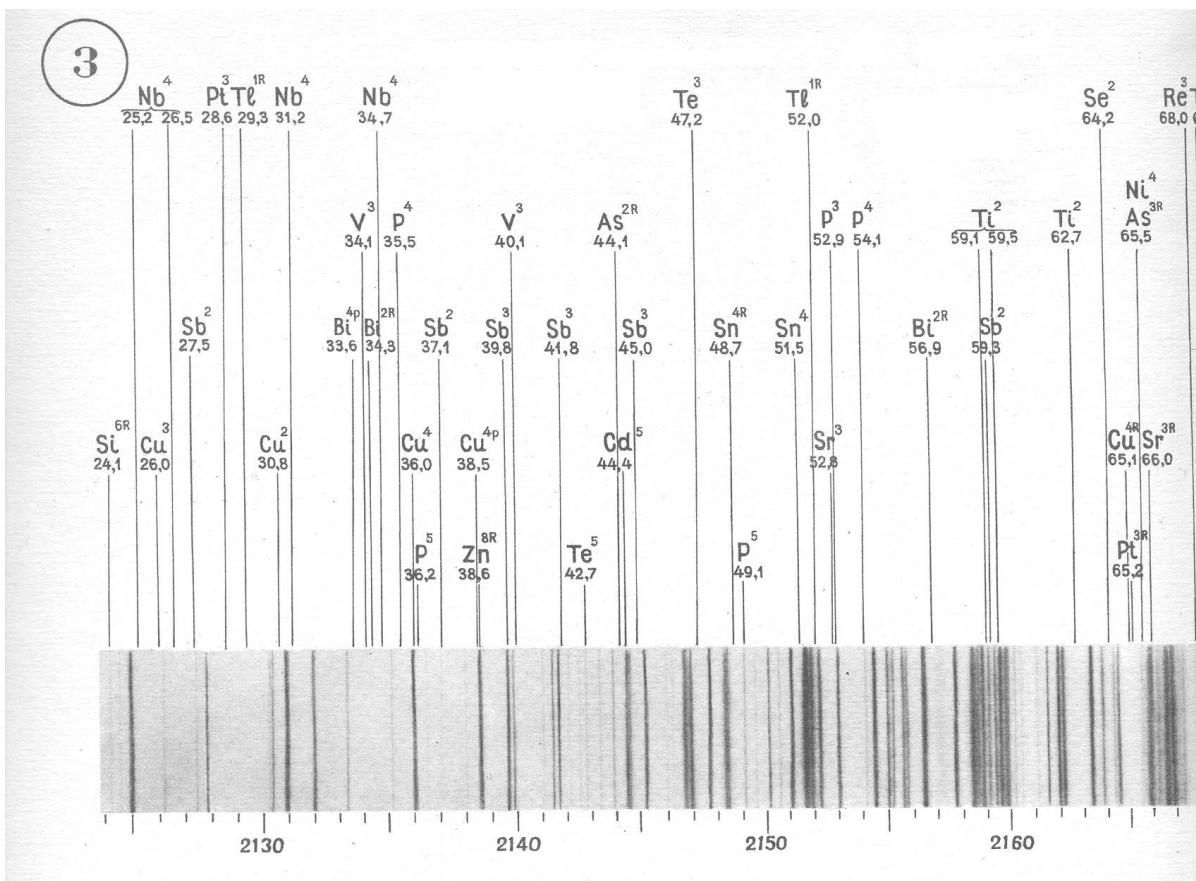
6. 3. Spektrāllīniju atlants

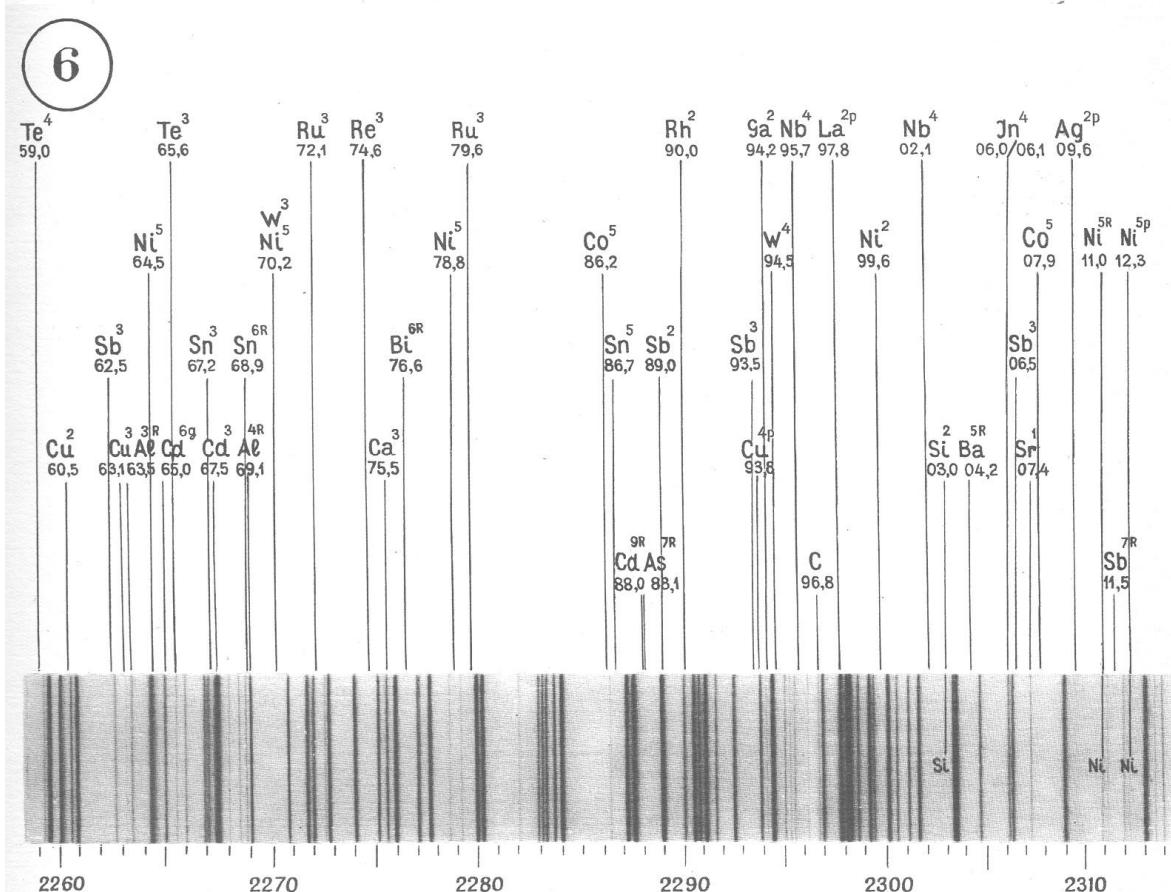
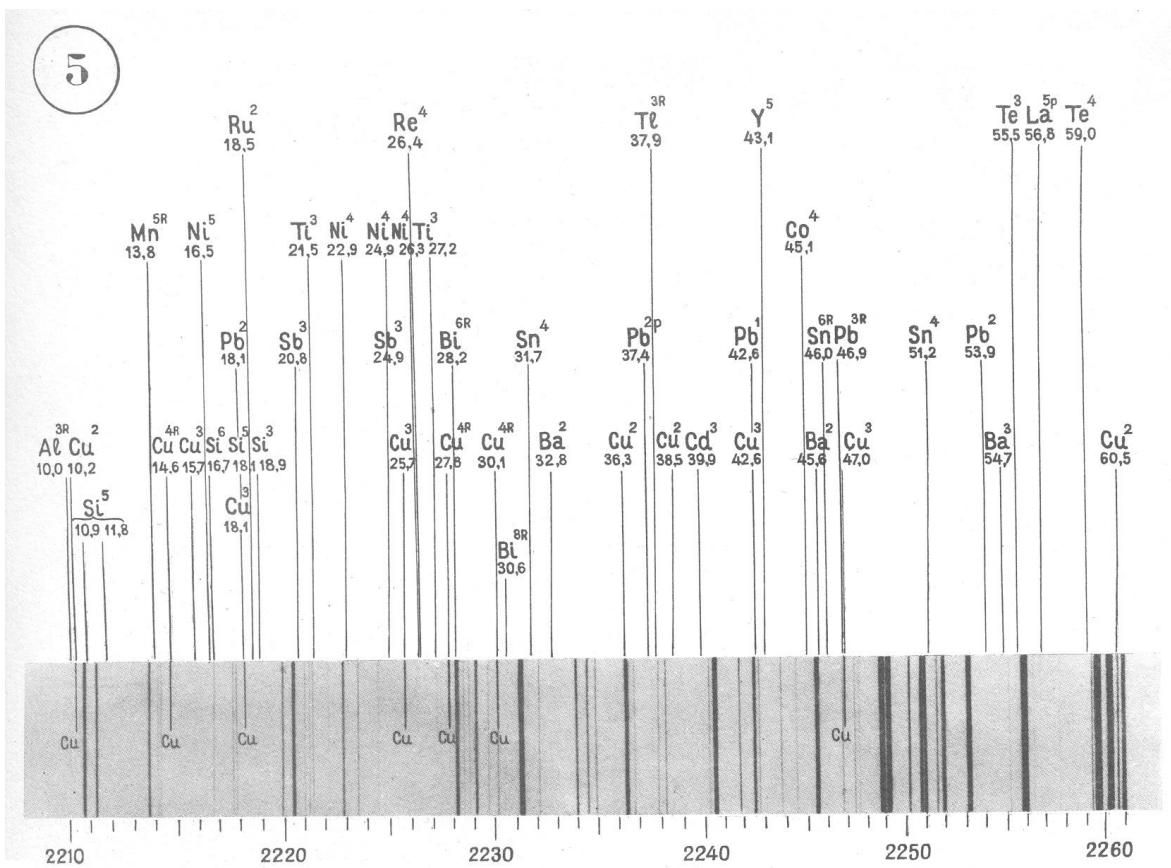
1

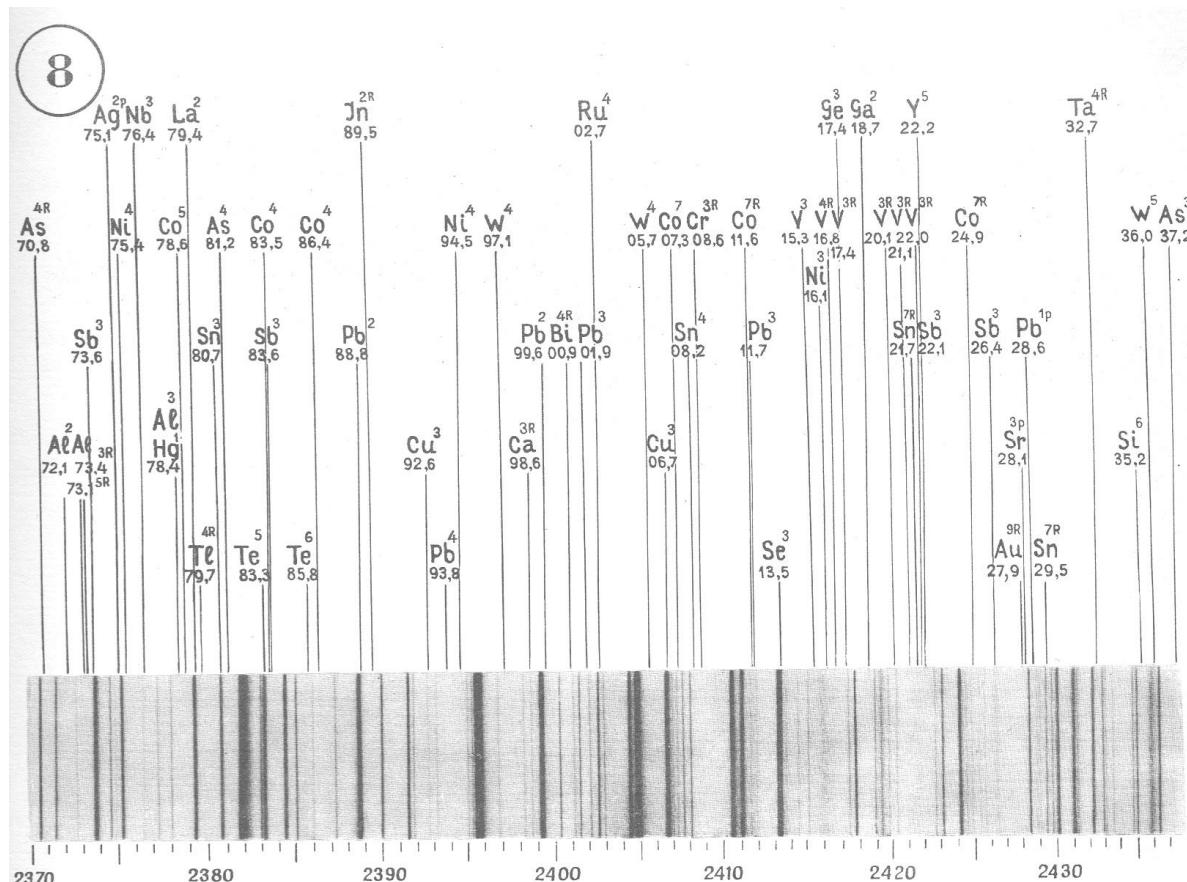
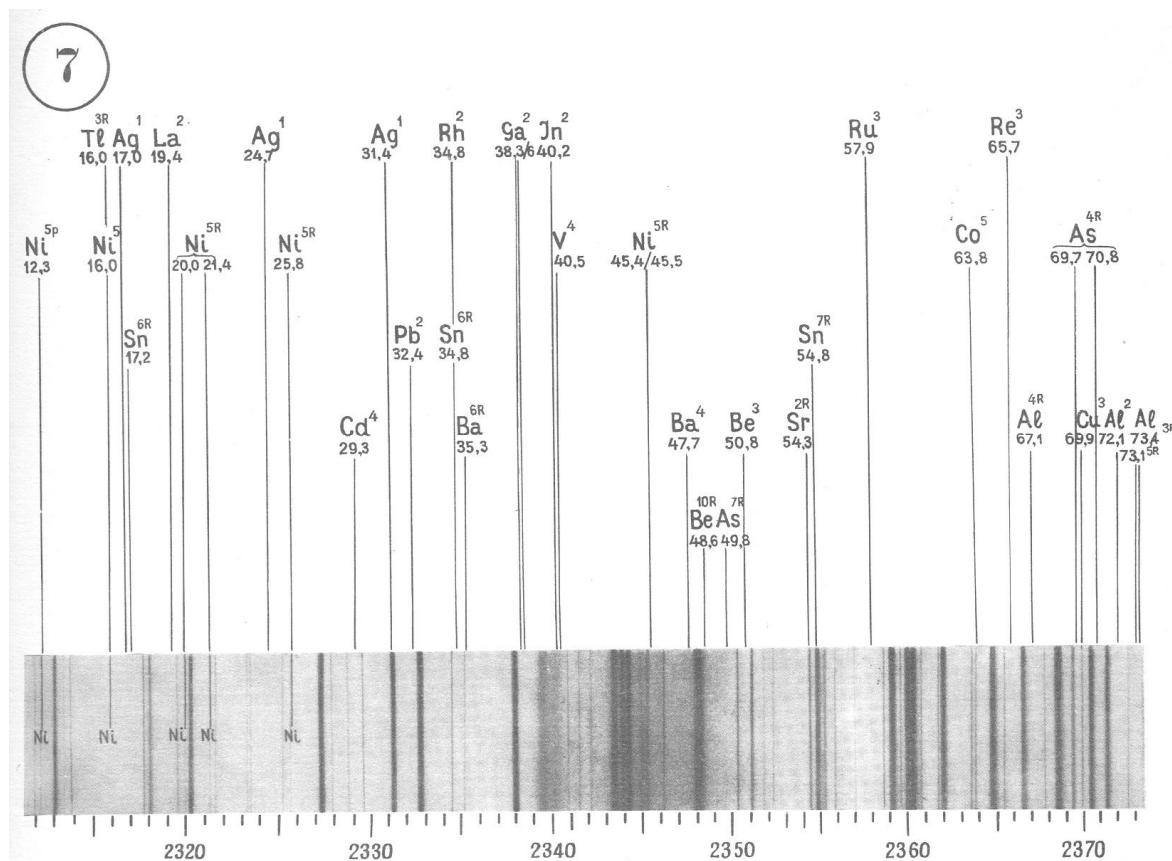


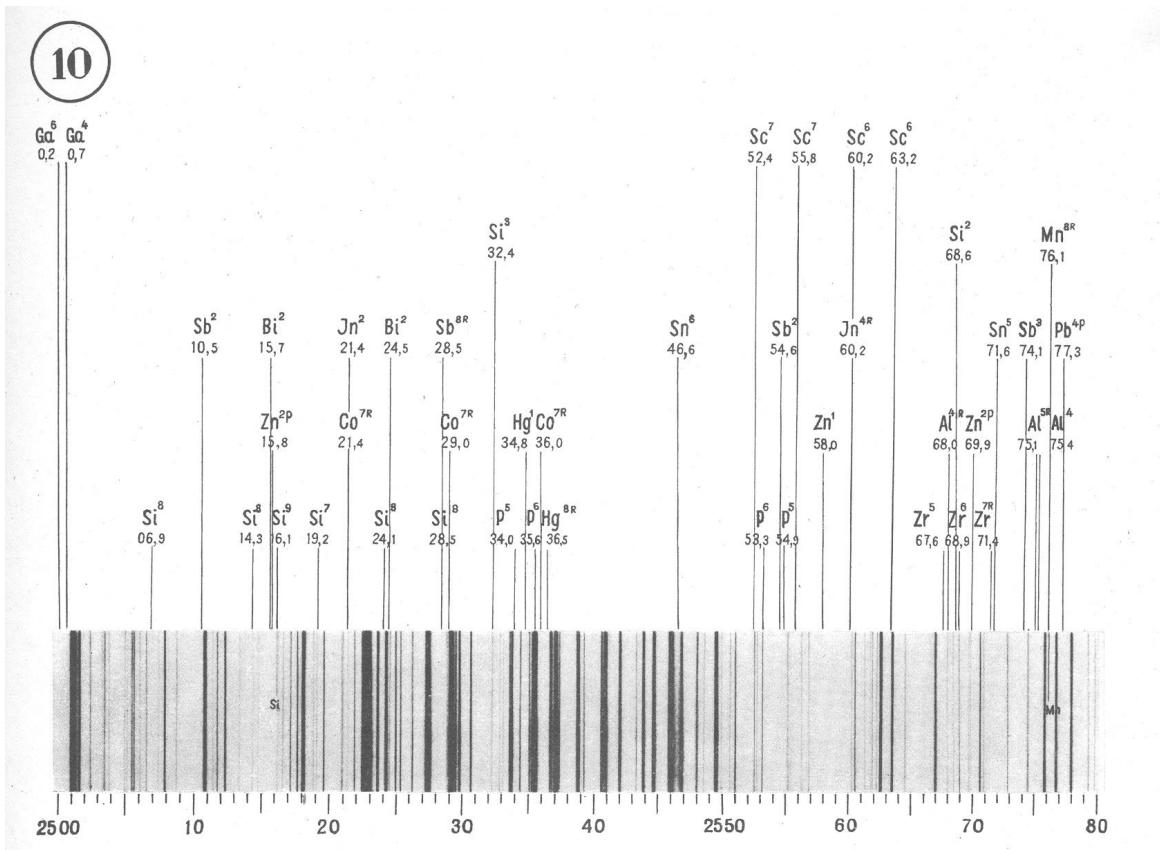
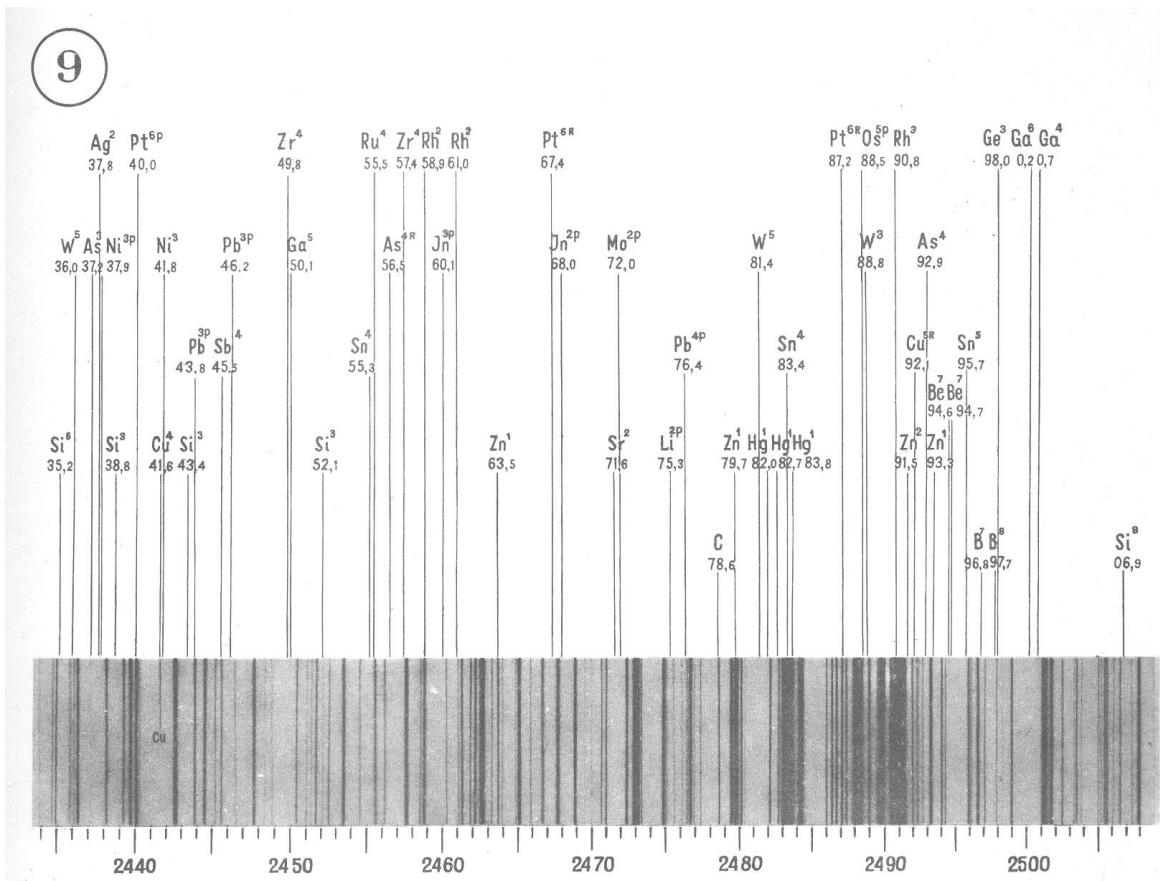
2



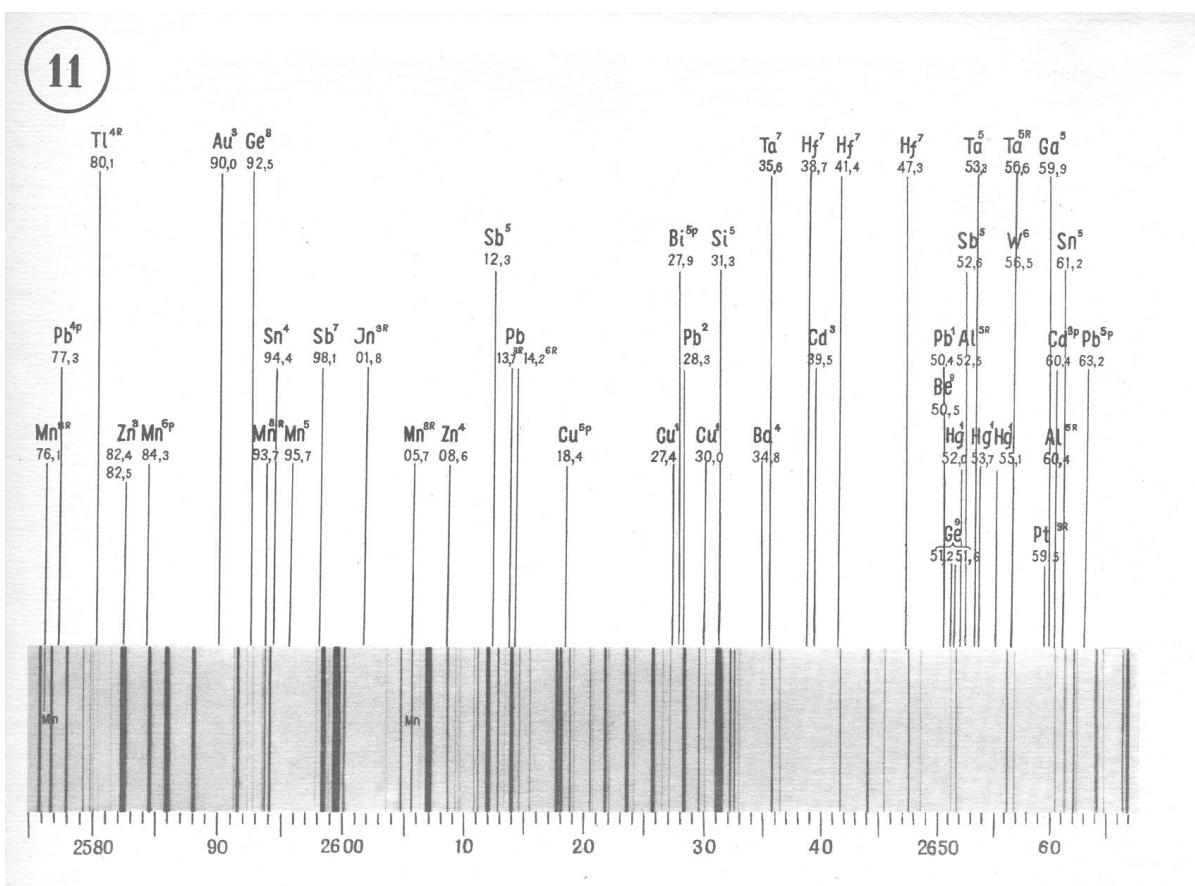




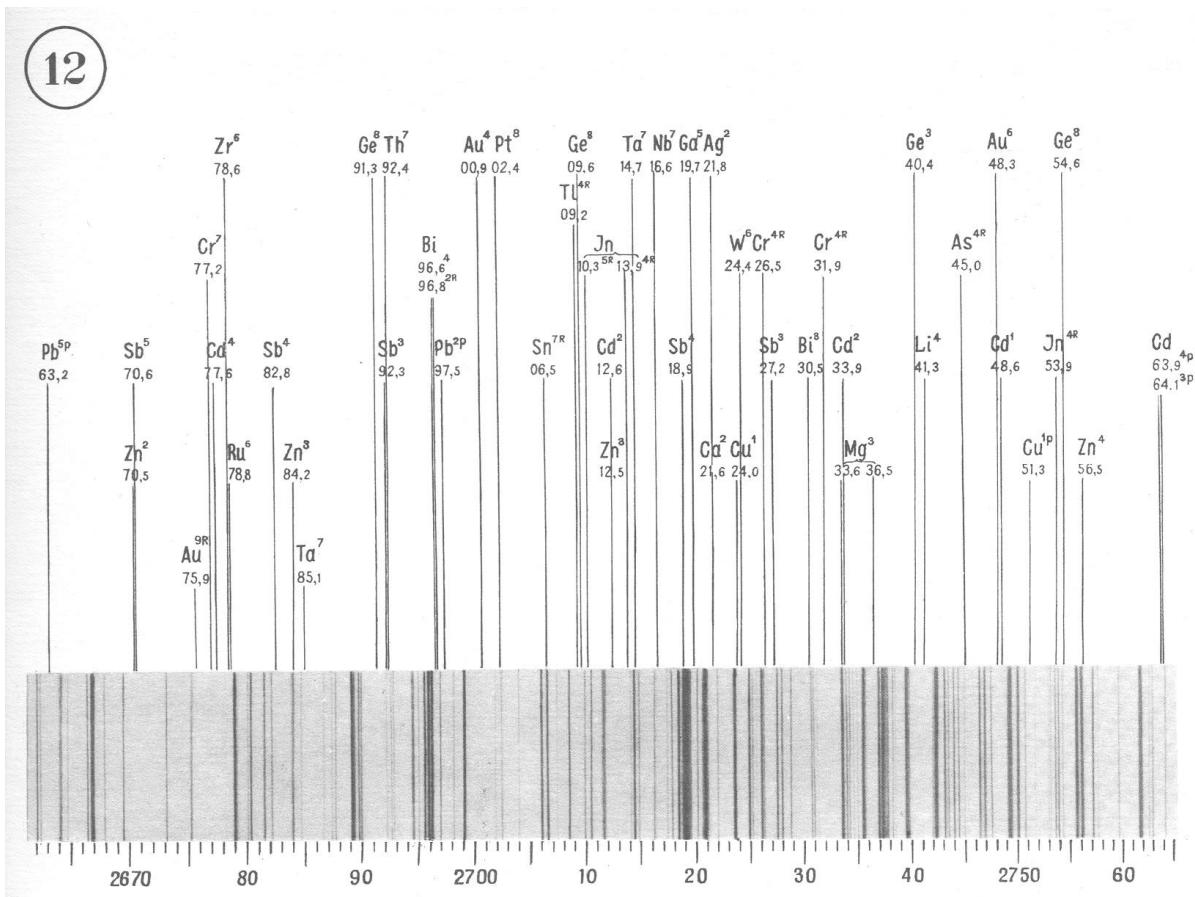




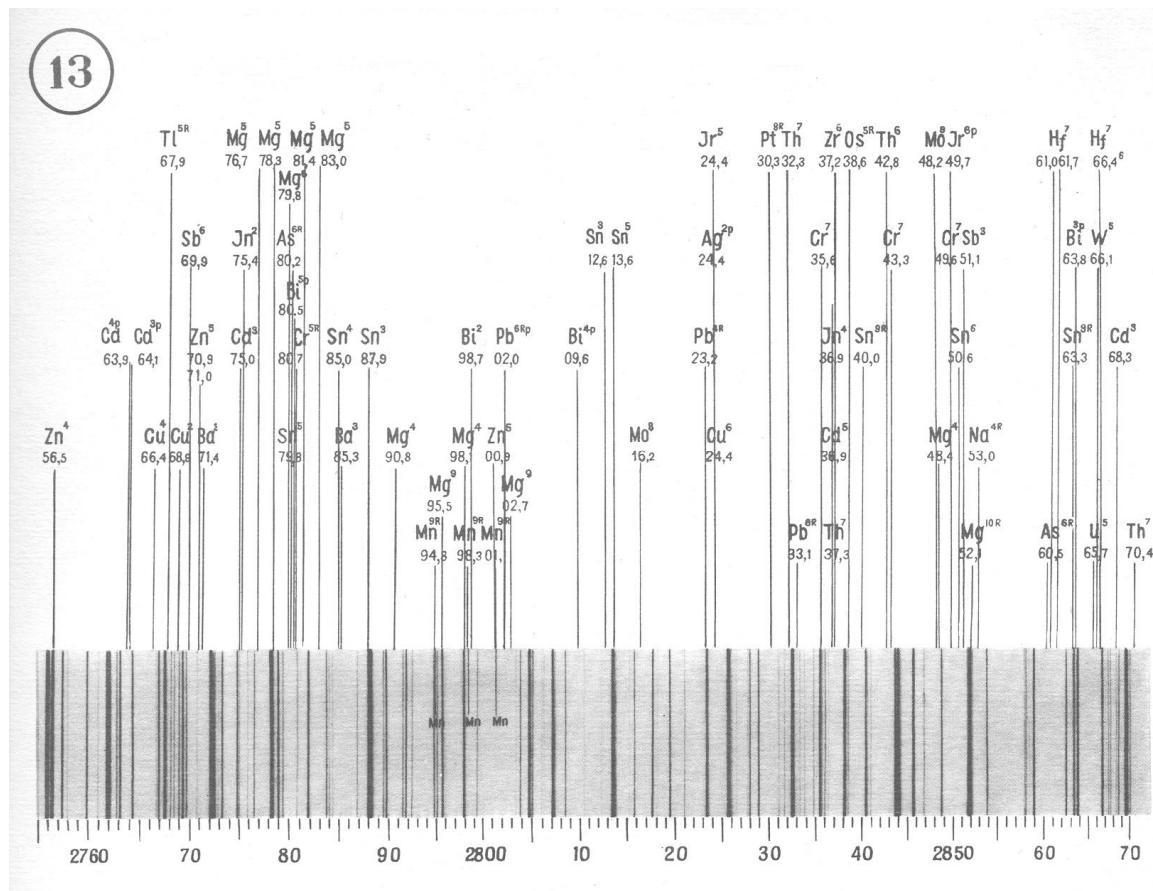
11



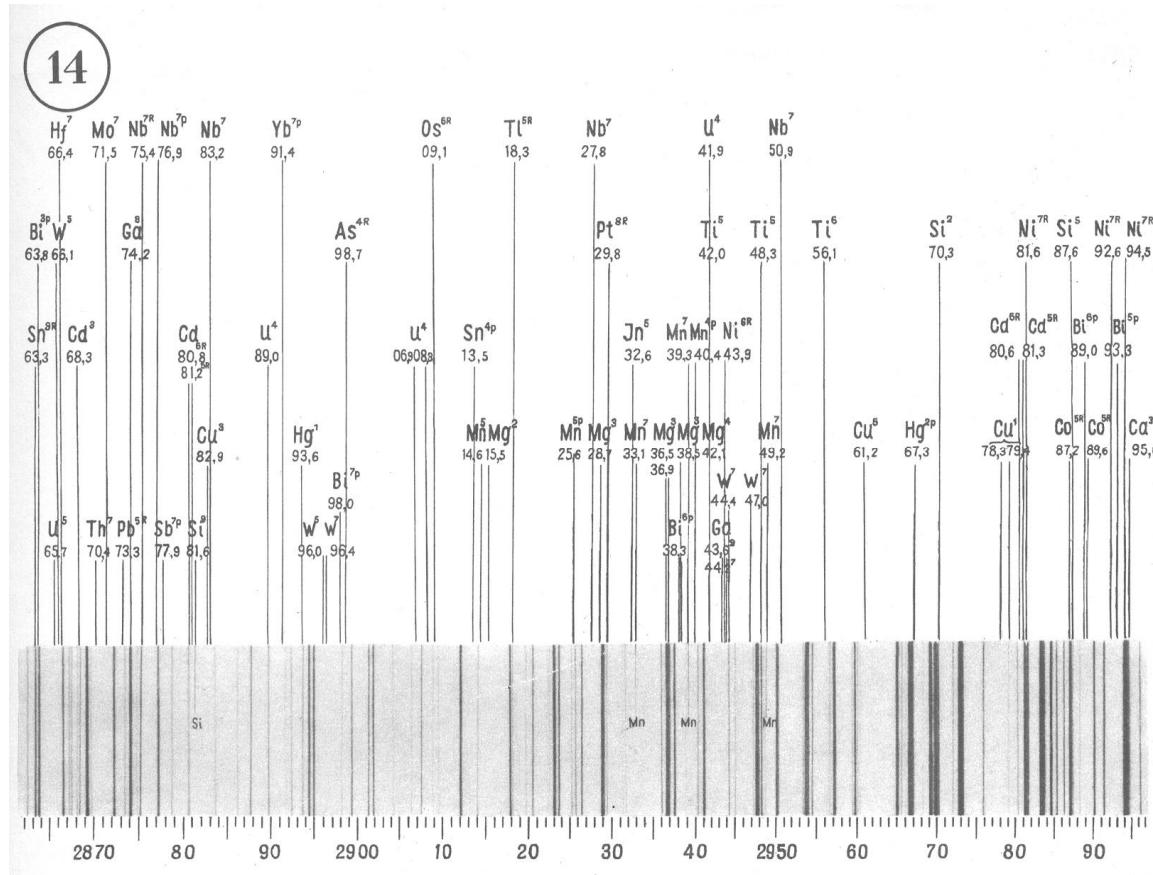
12



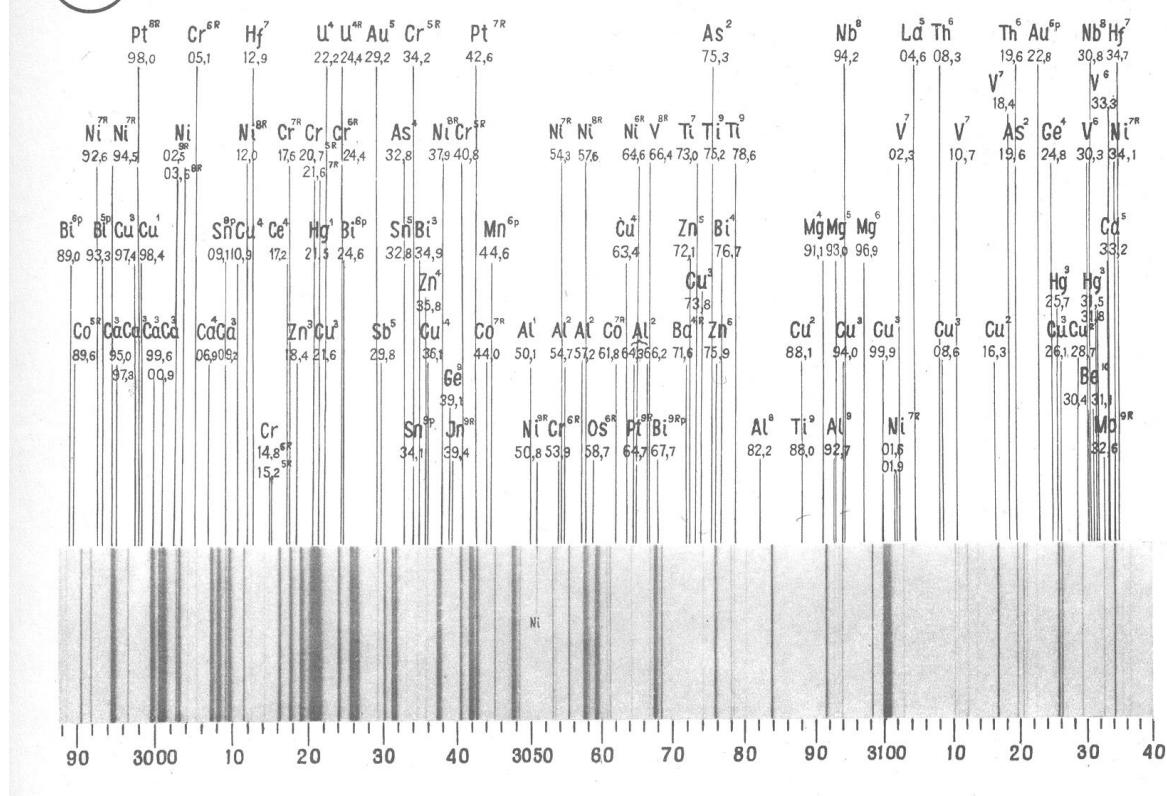
13



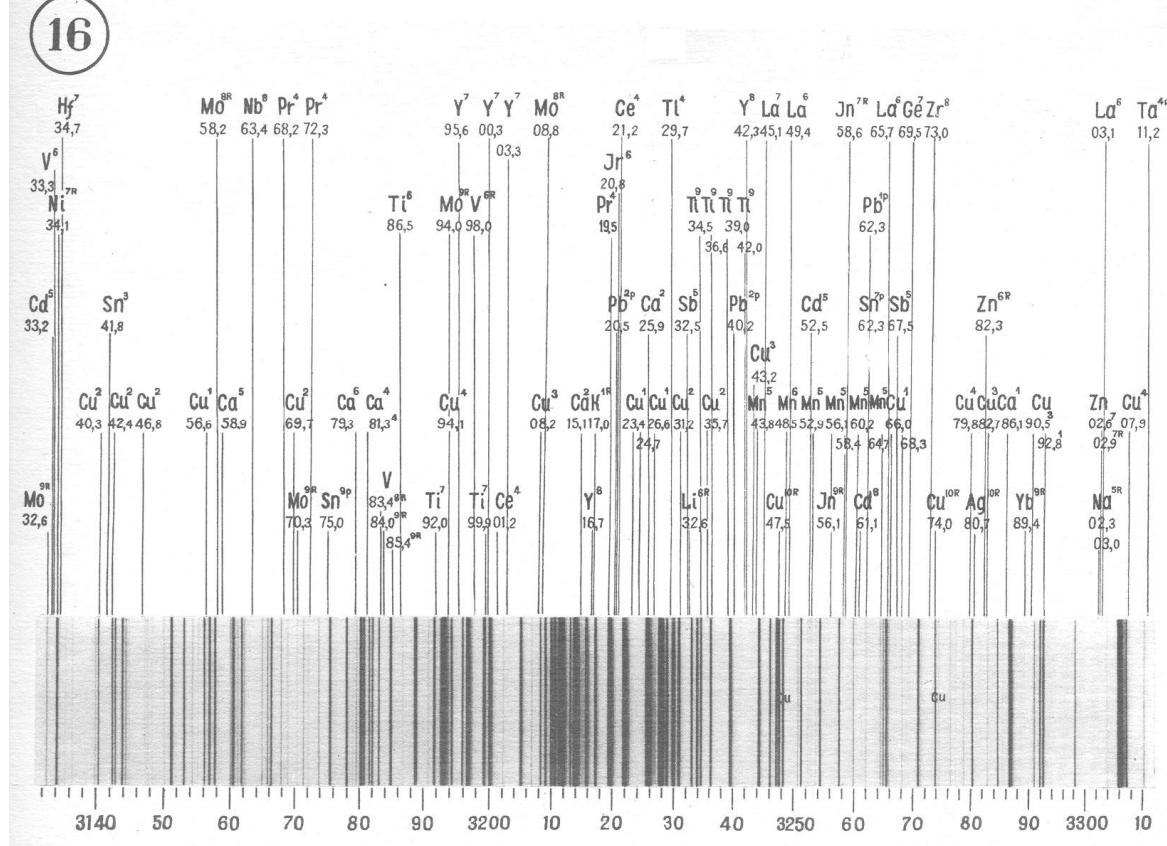
14



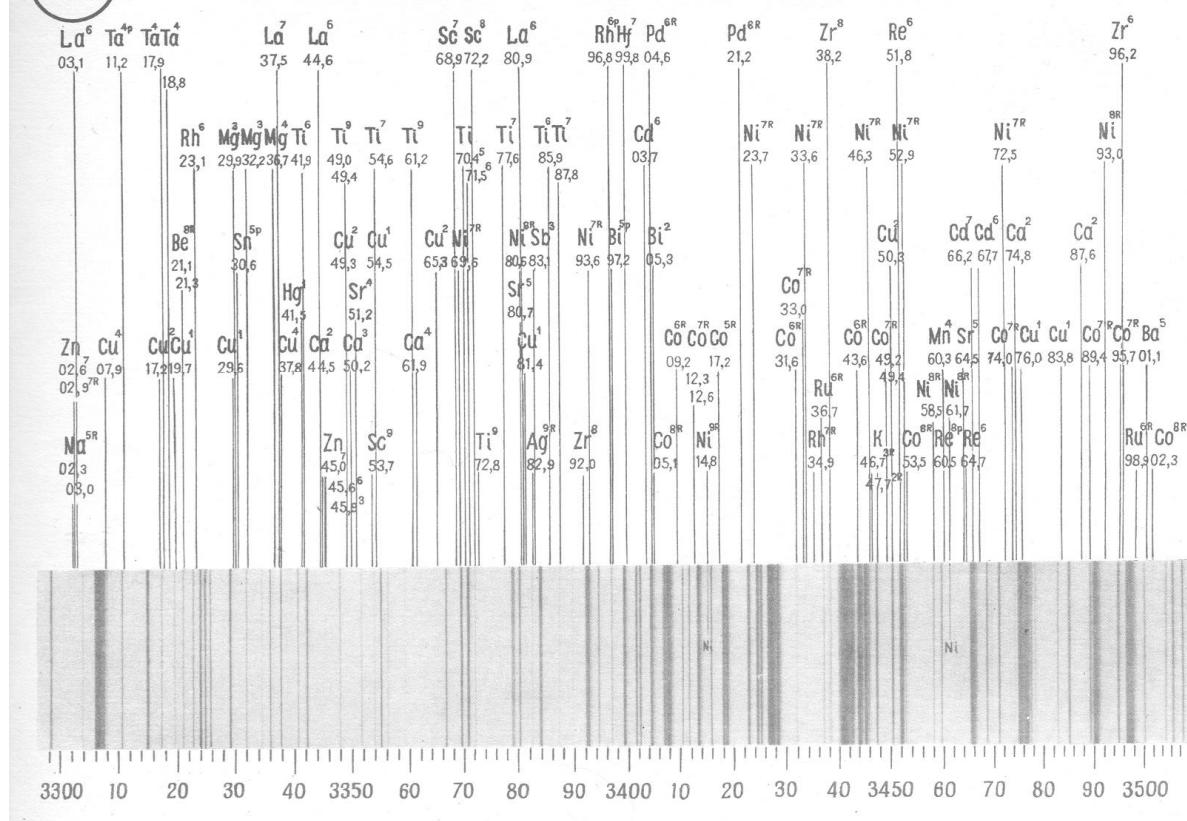
15



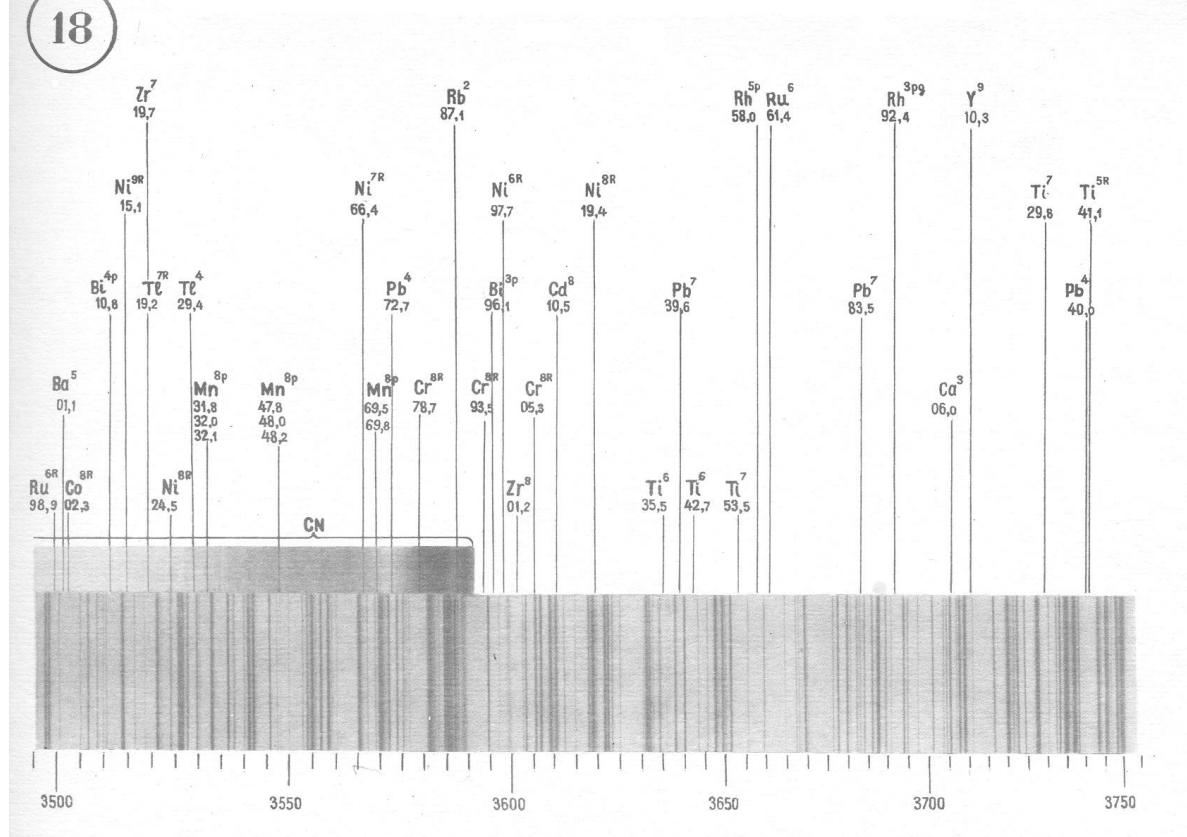
16



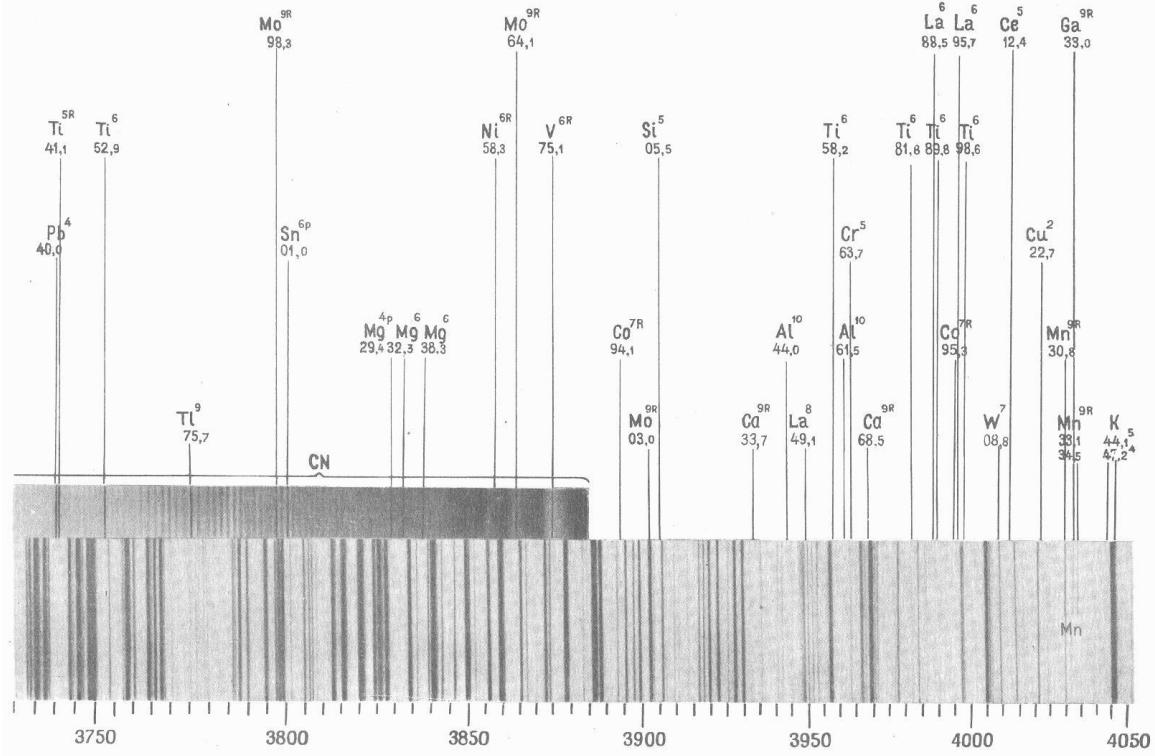
17



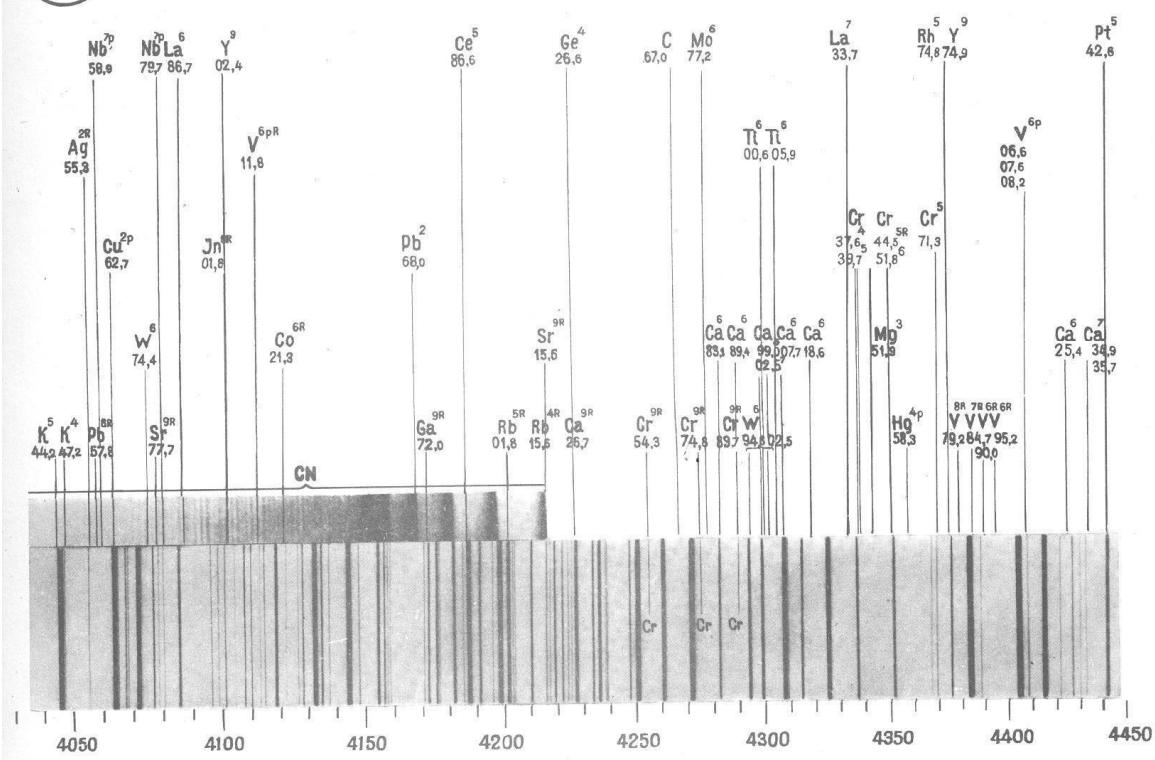
18



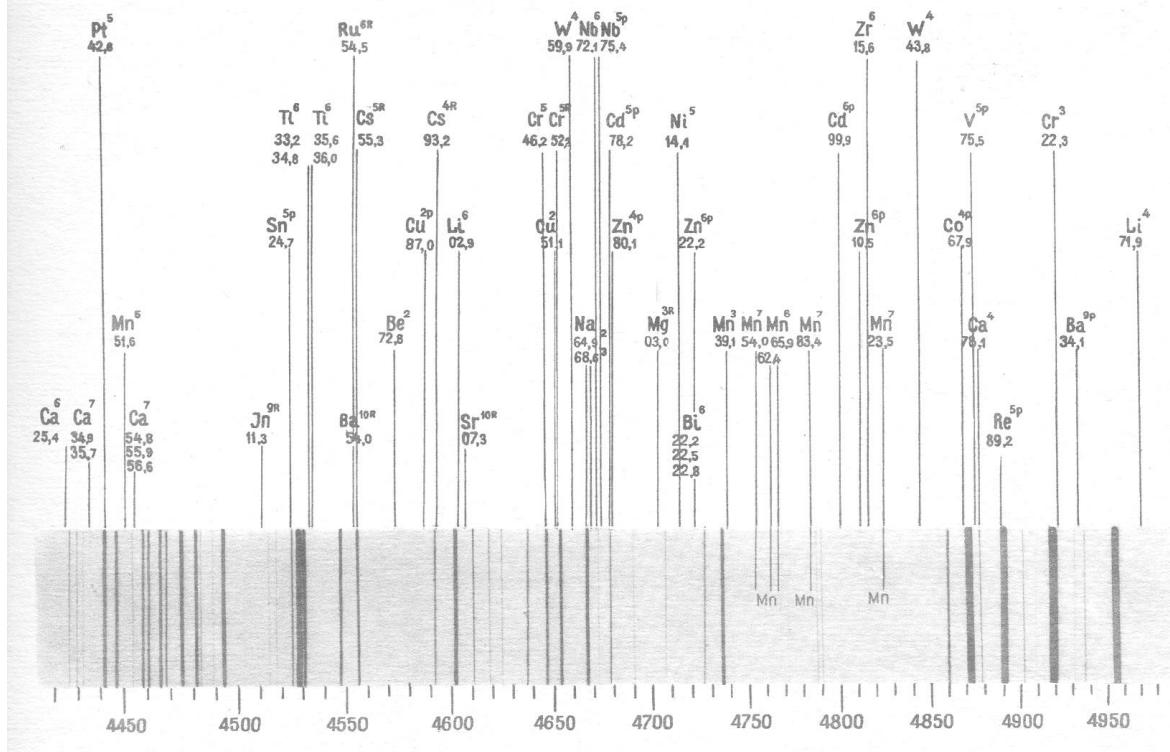
19



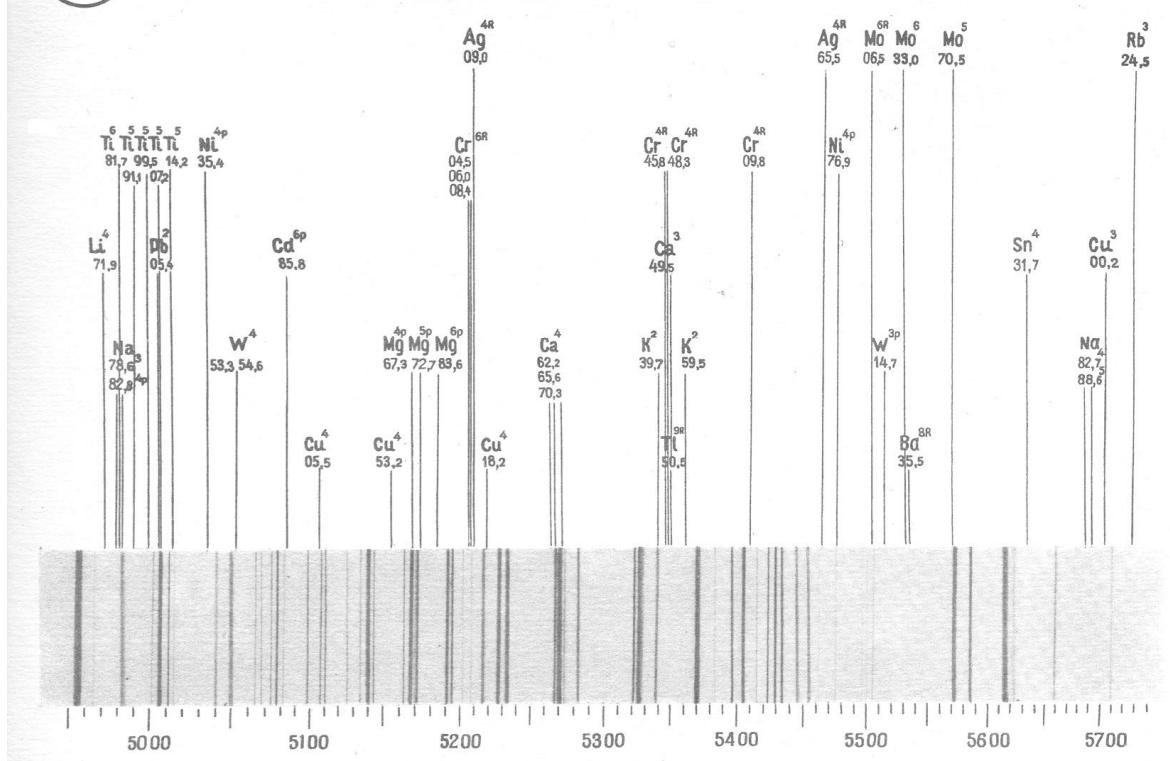
20

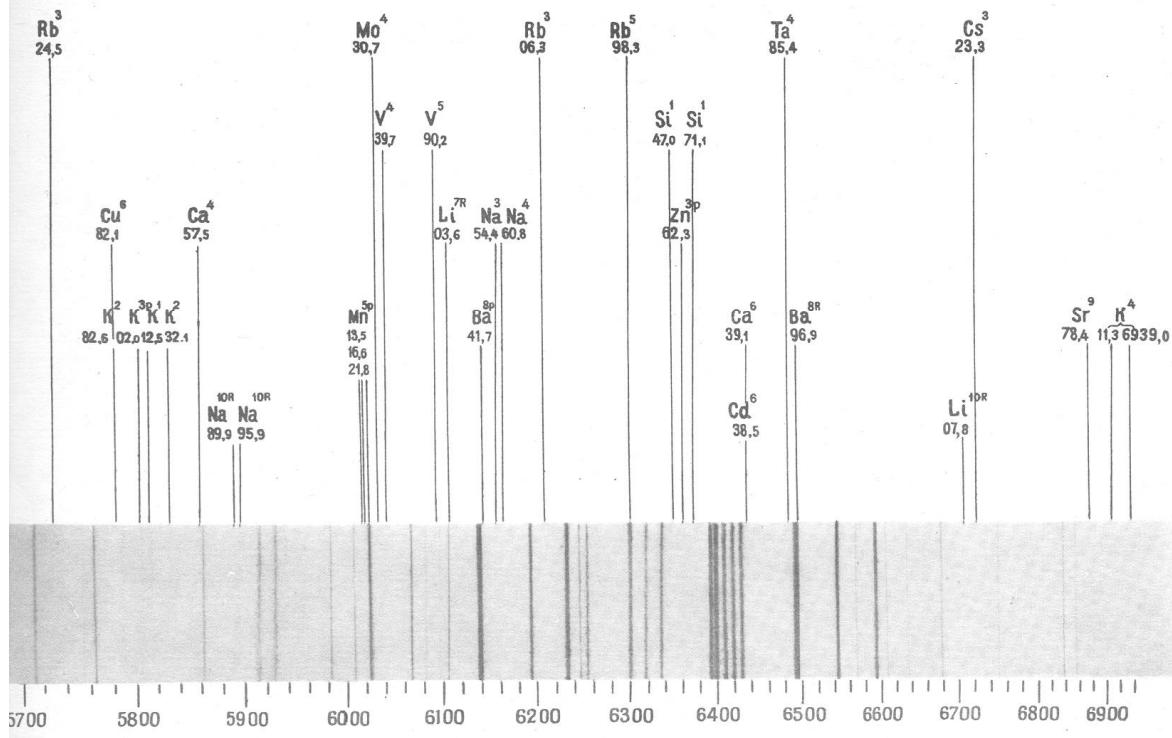


21



22





7. Literatūra

- [1] Практикум по спектроскопиию. Под ред. Л.В.Левшина. Из–во Московского университета, 1976., 320 с.
- [2] Методы спектрального анализа. Под. ред. В.Л.Левшина, 1962., 510 с.
- [3] Зайдель А. Н. Основы спектрального анализа., М., Наука, 1965., 322 с.
- [4] Зайдель А.Н., Калитеевский Н.И., Линис Л.В., Чайка М.И. Эмиссионный спектральный анализ атомных материалов. Л.-М., Физматгиз, 1960.686 с.
- [5] Таблицы совпадений по атомной спектроскопиию. Прага, 1964., 1136 с.
- [6] Зайдель А.Н и др. Таблицы спектральных линий. М., 1969., 782. с.
- [7] Heinrich Scheller., Einführung in die angewandte spektrochemische Analyse., Berlin, 1958., 160.
- [8] V. Rēvalds, V. Freimanis. Fizikas laboratorija, mikropasaules fizika. Rīga, 2000., 76.
- [9] V. Rēvalds. Optika no senatnes līdz mūsdienām. Rīga, "Mācību grāmata", 2001.
- [9] <http://jersey.uoregon.edu/elements/Elements.html> - elementu tabula un spektri.

