

**O'zbekstan Respublikasi joqari ha'm orta arnawli
bilim ministrliqi**

**Berdaq atindag'i
Qaraqalpaq ma'mleketlik universiteti**

Uluwma fizika kafedrası

B.A.Abdikamalov

ELEKTR HA'M MAGNETİZM

pa'ni boyınsha lektsiyalar tekstleri

**Ma'mleketlik universitetlerdin' fizika qa'nigeliginin'
1-kurs studentleri ushin du'zilgen**

İnternettegi adresi www.abdikamalov.narod.ru

No'kis 2008

Mazmunı

1-§. Kirisiw. Elektr ha'm magnetizm pa'ni. Pa'nin' maqseti. Pa'nin' wazıypası, metodikalıq ko'rsetpeler, bahalaw kriteriyleri. Pa'nin' qa'nigeler tayarlawda tutqan ornı. Predmetler aralıq baylanısı. Elektr ha'm magnetizmge tiyisli ulıwmalıq mag'lıwmatlar.	4
2-§. Elektrostatika. Elektr zaryadların' o'z-ara ta'sirlesiw nızamı. Kulon nızamı. Noqatlıq zaryad haqqında tu'sinik. Zaryadların' xalıq aralıq SI ha'm SGS birlikler sistemasındg'ı o'lsheem birlikleri. Elektr maydanı. Elektr maydanı kernewligi. Superpozitsiya printsipti. Zaryadların' sızıqlı, betlik ha'm ko'lemlik tıg'ızlıqları.	6
3-§. Elektr maydanın grafikalıq ta'riplew. Ku'sh sızıqları. Elektrostatikalıq maydanın' induktsiya vektorı ha'm onın' ag'ısı. Elektr maydanın esaplaw. Ostrogradskiy-Gauss teoreması. Ostrogradskiy-Gauss teoremasın' differentsial ko'rinisi. Elektrostatikalıq maydanda islengen jumıs. Elektr dipoli.	13
4-§. Potentsial. Potentsiallar ayırması. Potentsiallar gradienti. Ekvipotentsial betler. Elektrostatikanın' ulıwmalıq ma'selesı. Puasson ha'm Laplas ten'lemeleri.	22
5-§. Elektr maydanındag'ı o'tkizgishler. Elektr sıyımlıg'ı. Sıyımlıq birlikleri. Kondensatorların' sıyımlıg'ı. Elektr maydanı energiyası ha'm onın' tıg'ızlıg'ı.	27
6-§. Elektr maydanındag'ı dielektrikler. Dielektriklerdi polyarizatsiyalaw. Polyarizatsiya vektorı. Ortalıqtın' dielektriklik sin'irgishligi ha'm qabıllawshılıg'ı. Eki dielektrik ortalıq shegarasındag'ı polyarizatsiya ha'm induktsiya vektorları ha'm elektr maydanı kernewligi vektorının' u'zilisi. Dielektriklik kristallardıń elektrlik qa'siyetleri.	34
7-§. Turaqlı elektr tog'ı. Elektr tog'mın' xarakteristikaları. O'tkizgishlik elektr tog'ı. Qarsılıq ha'm onın' temperaturag'a g'a'rezlıligi. Om nızamının' differentsial ko'rinisi. Tuyıq shınjır ushın Om nızamı. Kirxgof qag'ıydaları.	40
8-§. Elektr qozg'awshı ku'sh. Turaqlı elektr tog'mın' jumısı, quwatı ha'm jıllılıq ta'sirleri. Djoul-Lents nızamı. Galvanikalıq elementler. Toq dereginin' paydalı jumıs koeffitsenti	48
9-§. Elektr o'tkizgishlerdin' ta'biyatı. Metallardag'ı elektr o'tkizgishlik. Rike, Mandelshtam-Papaleksi ha'm Stoaart-Tolmen ta'jiriybeleri. Metallardag'ı elektr o'tkizgishlikтин' klassikalıq elektron teoriyası tiykarında Om ha'm Djoul-Lents, Videman-Frants nızamların tu'sindiriw. Yarım o'tkizgishler. Yarım o'tkizgishlerdin' elektr o'tkizgishligi. Taza ha'm aralaspalı elektr o'tkizgishlik. Asa o'tkizgishlik ha'm onın' tiykarg'ı qa'siyetleri.	52
10-§. Vakuumdag'ı elektr tog'ı. Termoelektronlıq emissiya. Volt-amperlik xarakteristikası. Toyınıw tog'mın' temperaturag'a baylanıslı ekenligi.	65
11-§. Suyıqlıqlardag'ı ha'm gazlerdegi elektr tog'ı. Suyıqlıqlardag'ı ha'm gazlerdegi elektr tog'mın' ta'biyatı. Elektroliz ha'm elektrolitlik dissotsiatsiya. Faradeydin' elektroliz nızamları ha'm elementar zaryad. Galvanikalıq elementler ha'm akkumulyatrolar. Ionizatsiya ha'm rekombinatsiya. Plazma.	67
12-§. Toqlardıń magnit maydanı. Toqlardıń o'z-ara magnitlik ta'siri. Magnit maydanın' induktsiya vektorı. Toq elementi. Bio-Savara-Laplas nızamı. Magnit maydanın' kernewligi. Tuwrı toq ha'm aylanbalı toqlardıń magnit maydanların' kernewliklerin esaplaw. Solenoidtin' ko'sheri boyınsha magnit maydanın' kernewliginin' tarqalıwı. Parallel toqlardıń o'z-ara magnitlik ta'sirlesiwı.	75
13-§. Magnit ag'ısı. Magnit maydanındag'ı toqlı kontur. Magnit maydanı kernewliginin' tsirkulyatsiyası. Magnit maydanındag'ı toq o'tip turg'an o'tkizgish. Amper ku'shi. Magnit maydanında qozg'alıwshı zaryadlang'an bo'lekshege ta'sir etiwshı ku'sh. Qozg'alıstıg'ı zaryadlang'an bo'lekshenin' magnit maydanı.	84
14-§. Magnetikler. Zatların' magnitlik qa'siyetleri. Molekulalıq toqlar. Magnitleniw vektorı. Diamagnetikler, paramagnetikler, ferromagnetiklar. Para- ha'm diamagnetizmdi tu'sindiriw.	85

15-§. Ferromagnetikler. Ferromagnetiklerdi magnitlew protsessi. Gisterezis qurıg'ı. Qaldıq magnitleniw ha'm koertsitiv ku'sh. Ferromagnetizmdi tu'sindiriw. Ferromagnitlik domenlar haqqında tu'sinik.	92
16-§. Elektromagnitlik induksiya qubılısı. Elektromagnitlik induksiya. Faradey ta'jiriybeleri. Lents nızamı. Elektromagnit induktsiyanın' tiykarg'ı nızamı. O'zlik induksiya qubılısı.	96
17-§. Induktivlik. Solenoidtın' induktivligi. O'zlik induksiya na'tiyjesinde shınjırdag'ı toqtın' jog'alıwı ha'm tikleniwı. Magnit maydanının' energiyası. O'z-ara induksiya.	99
18-§. Elektr terbelisleri ha'm tolqlar. Menshikli elektr terbelisleri. So'niwshi elektr terbelisleri. Menshikli elektr terbelislerinin' ten'lemesi. So'niw bolmag'andag'ı elektr terbelisleri. Ma'jbu'riy elektr terbelisleri.	104
19-§. O'zgermeli toq. O'zgermeli elektr tog'ı shınjırındag'ı aktiv qarsılıq, sıyımlıq ha'm induktivlik. Vektorlıq diagrammalar usılı. O'zgermeli toqlar ushın Om nızamı. O'zgermeli toqtın' quwatı ha'm jumısı. Toq ha'm kernewdin' effektivlik ma'nisleri. Kernew ha'm toqlar rezonansı.	115
20-§. Maksvell postulatları. Awısıw tog'ı. Maksvell ten'lemeleri ha'm olardıń ta'jiriybelerden kelip shıg'atug'ın tiykarları. Maksvell ten'lemelerinin' fizika ilimindegi tutqan ornı. Elektromagnit tolqlar. Elektromagnit tolqlardıń qa'siyetleri, olardıń ko'ldenen' tolqın ekenligi. Tolqın energiyası. Poynting vektori. Elektromagnit tolqlardı payda etiw. Gerts ta'jiriybeleri.	121
Sabaqlarg'a mo'lsherlengen oqıw programması, basqa da metodikalıq materiallar.	129

1-§. Kirisiw

Elektr ha'm magnetizm pa'ni. Pa'nnin' maqseti. Pa'nnin' wazıypası, metodikalıq ko'rsetpeler, bahalaw kriteriyeleri. Pa'nnin' qa'nigeler tayarlawda tutqan ornı. Predmetler aralıq baylanısı. Elektr ha'm magnetizmge tiyisli ulıwmalıq mag'lıwmatlar.

En' da'slep elektr zaryadlarına tiyisli bolg'an bazı bir elementar faktlerdi eske tu'siremiz.

A'yyem zamanlardın' o'zinde ju'nge su'ykelgen yantardın' jen'il denelerdi o'zine tartatug'inlig'ı ma'lim edi. Al XVI a'sirdin' aqırında Angliyalı shıpkar Džilbert bul qubılıstı tolıg'ıraq izertledi ha'm tap sonday qa'siyetke basqa da ko'plegen denelerdin' iye bolatug'inlig'in taptı. Yantarg'a usap su'ykelisten keyin basqa denelerdi tarta alatug'in denelerdi Džilbert elektrlengen dep atadı, Al grek so'zi bolg'an elektron yantar degen ma'nini an'latadı. Biz ha'zirgi waqıtları bizler usınday hallardag'ı denelerde elektr zaryadları bar dep esaplaymız, al denelerdin' o'zlerin zaryadlang'an dep ataymız.

«Su'ykelistin' ja'rdemindegi elektrlew» degi su'ykelis qanday da bir printsiptiallıq orındı iyelemeydi. Elektr zaryadları ha'r qıylı denelerdi bir biri menen tiygizgende derlik barlıq waqıtları payda boladı. Qattı denelerdi bir birine jaqınlatqanda usı denelerdin' betlerinde barqulla bar bolatug'in mikroskopiyalıq oyıs-do'n'esler olardın' tıg'ız betlesiwine kesent beredi. Denelerdi bir birine qısıw yamasa su'ykew arqalı biz eki benenin' betlerin bir birine jaqsıraq jaqınlatamız. Bul denelerdi bir birine su'ykemegenimizde olardın' betleri tek ayırım jag'daylarda g'ana bir biri menen jaqsı tiyisken bolar edi.

Ayırım denelerde elektr zaryadları erkin tu'rde usı denege bir orınnan ekinshi orıng'a ko'ship o'te aladı, al ayırım denelerde bolsa bunday qubılıs orın almaydı. Elektr zaryadları bir bo'liminen ekinshi bo'limine erkin tu'rde o'te alatug'in denelerdi *o'tkizgishler* dep ataydı. Al elektr zaryadları bir bo'liminen ekinshi bo'limine o'te almaytug'in denelerdi *izolyatorlar* yamasa *dielektrikler* dep ataydı. Qattı ha'm suyıq hallardag'ı barlıq metallar, duzlar menen kislotalardın' suwdag'ı eritpeleri ha'm basqa da ko'plegen zatlar o'tkizgishler bolıp tabıladı. İzolyatorlarga mısıl retinde yantardı, kvartstı, ebonitti ha'm a'dettegi sharayatlardıg'ı barlıq gazlerdi ko'rsetiwge boladı.

Denelerdi o'tkizgishler menen izolyatorlag'a a'dette sha'rtli tu'rde bo'ledi. Barlıq zatlar ma'lim da'rejede elektrdi o'tkeredi. Biz berilgen deneni izolyator dep esaplaytug'in bolsaq, onda bul jag'day usı ta'jiriybenin' barısında dene arqalı o'tken elektr zaryadının' usı qubılıstı qarag'anımızda qatnasqan zaryadrag'a salıstırğ'anda ju'da' az ekenligin bildiredi.

Ta'jiriybeler eki zaryadlang'an denenin' birin biri tartatug'inlig'in yamasa birin biri iytaretug'inlig'in ko'rsetedi. Ju'da' jen'il bolg'an sabaqqa ildirilgen eki deneni jipekke su'ykelgen shiyshe tayaqshanı tiydiriw arqalı zaryadlasaq, onda bul eki dene bir biri menen iytarisedi. Usı eki deneni terige su'ykelgen ebonit arqalı zaryadlasaq ta tap usınday qubılıstı ko'remiz. Biraq sol eki denenin' birin shiyshe tiydiriw arqalı, al ekinshisin ebonitti tiydiriw arqalı zaryadlasaq, onda olar bir biri menen tartıadı. Bul jag'day shiyshe menen ebonittin' zaryadlarının' sapaşı boyınsha bir birinen ayırılatus'ınlig'in bildiredi.

Ta'biyatta zatlardın' tu'ri og'ada ko'p bolsa da, elektr zaryadlarının' tek eki a'wladı bar. Olardın' biri jipekke su'ykelgen shiyshege zaryadlar, al ekinshisi terige su'ykelgen ebonittegi zaryadlar. Jipekke su'ykelgen shiyshege zaryadları *on' zaryadlar*, al terige su'ykelgen

ebonittegı zaryadlardı *teris zaryadlar* dep ataydı. Demek birdey attag'ı zaryadlar bir biri menen iyerisedi, al ha'r qıylı attag'ı zaryadlar bir biri menen tartısadı eken.

Magnitlik qubılıslar (magnetizm) dep atalatug'ın qubılıslar da a'yyem zamanlardan belgili. Ta'biyyi (ruda) ha'm jasalma (polattan sog'ılg'an) magnitler bazı bir denelerdi tartadı, al bazı bir denelerdi iyteredi. Ha'r bir magnite eki tu'rli magnitleniwge iye bolamız ha'm olardıń birin arqa, ekinshisin tu'slik dep ataymız. Sonın' menen birge ha'r bir magnite eki polıos bolıp, birdey attag'ı polıosler bir birinen iyerisedi, al ha'r qıylı attag'ı polıosler tartısadı. Magnitlerge jaqın jaylastırılǵ'an ko'plegen denelerdin' o'zleri magnitke aylanadı, yag'nıy eki magnit polıosına iye boladı. Magnitti bo'leklerge bo'lse, onda sol bo'leklerdin' barlıǵ'ı da eki polıoske iye magnit bolıp shıǵ'adı. Bir polıoske iye magnit ta'biyatta joq.

1789-jılı Galvani elektr tog'ının' fiziologiyalıq ta'sirin ashtı. Ol qurbaqanın' bulshıq etlerinin' eki ushına zaryadlang'an deneni tutastırǵ'anda bulshıq ettin' kısıqaratug'ınlıǵ'ın anıqladı. Sol waqıtları bunday kısıqarıwdın' sebebinin' zaryadlang'an denelerdin' usı bulshıq ettin' toqtı o'tkiziwine baylanıslı razryadlanıwının' aqıbeti ekenligi belgili bolǵ'an bolsa da elektr qubılıslarının' birden bir ekenligi tastıyıqlangan joq. Sonlıqtan ko'p waqıtlarǵ'a shekem «Galvanikalıq elektr» menen «su'ykelisten payda bolǵ'an elektr» bir biri menen baylanıssız qarap kelindi. Tek XIX a'sirdin' basında elektrlik qubılıslardıń og'ada ko'p tu'rleri ashıldı. Mısalı 1820-jılı Kopengagenli fizika professorı Ersted toq o'tip turg'an o'tkizgishtin' magnit strelkasına ta'sir etetug'ınlıǵ'ın, usıǵ'an baylanıslı elektr tog'ının' magnit maydanın payda etetug'ınlıǵ'ın taptı. Solay etip elektr tog'ının' zaryadlang'an bo'lekshelerdin' bag'ıtlang'an qozǵ'alısı ekenligin na'zerde tutsaq, onda bul jerde biz qozǵ'alıstıǵ'ı elektr zaryadlarınan' magnit maydanının' deregi bolatug'ınlıǵ'ına ko'z jetkeremiz. Demek magnit maydanının' deregi magnitler menen elektr tog'ı bolıp tabıladı eken. Sonın' menen birge elektr tog'ının' payda bolıw sha'rtlerinin', toqtın' jıllılıq ha'm magnitlik ta'sirlerinin', dielektriklerdin' tutqan ornının' ha'm tag'ı basqalardıń ashılǵ'anlıǵ'ın ko'rsetiwge boladı. XIX a'sirdin' ekinshi yarımı elektr haqqındag'ı ta'limattın' jedel tu'rde rawajlanıwı menen ta'riplenedi. Faradey menen maksveldin' jumısları elektromagnit qubılıslardıń birligin ko'rsetti, elektromagnit toqınları ashıldı, jaqtılıqtın' elektromagnit teoriyası do'retildi. Usıǵ'an baylanıslı elektr menen magnetizmnin' fizikanın' bir birinen ayrılmaytug'ın bir bo'limi ekenligi anıq boladı.

Elektr haqqındag'ı ta'limattın' rawajlanıwının' printsipiiallıq a'hmiyeti og'ada ullı: birinshiden elektrlik qubılıslardıń mexanikalıq qubılıslar emes ekenligi, ekinshiden elektrlik qubılıslardıń fizikanın' basqa protsessleri menen teren' baylanısınan' bar ekenligi ayqın boldı.

Joqarıda ayılǵ'anlarǵ'a baylanıslı «Elektr ha'm magnetizm» fizikada oraylıq orındı iyeleydi ja'ne elektrodinamika, atom ha'm kvant mexanikası, yadrolıq fizika, optika, qattı deneler fizikası, dielektrikler ha'm yarım o'tkizgishler fizikası sıyaqlı bo'limlerdin' tiykarında turadı.

Elektr ha'm magnetizm haqqındag'ı ta'limat o'z ishine ma'selelerdin' u'sh tu'rli toparın aladı. Birinshi toparg'a elektrlik ha'm magnitlik qubılıslardı basqaratug'ın tiykarǵ'ı tu'sinikler menen ulıwmalıq printsipier kiredi. Ekinshi topar zatlardın' elektrlik ha'm magnitlik qa'siyetlerin qamtıydı. U'shinshi topar o'z ishine elektr ha'm magnetizmnin' texnikalıq ha'm a'meliy qollanıwın aladı.

Universitetlerdin' fizika fakultetlerinin' studentleri ushın a'dette joqarıda ga'p etilgen u'sh topardın' birinshisine tiykarǵ'ı dıqqat awdarıladı. Sonlıqtan leksiyalar barısında tiykarınan elektrlik ha'm magnitlik qubılıslardı basqaratug'ın tiykarǵ'ı tu'sinikler menen ulıwmalıq printsiplerge itibar beriledi.

2-§. Elektrostatika

Elektr zaryadlarının o'z-ara ta'sirlesiw nızamı. Kulon nızamı. Noqatlıq zaryad haqqında tu'sinik. Zaryadların xalıq aralıq Sİ ha'm SGS birlikler sistemasındg'ı o'lishem birlikleri. Elektr maydanı. Elektr maydanı kernewligi. Superpozitsiya printsipi. Zaryadların sızıqlı, betlik ha'm ko'lemlik tıg'ızlıqları.

Elektr ha'm magnetizm ta'limatında elektr zaryadı ha'm elektr maydanının kernewligi tu'siniklari tiykarg'ı tu'sinikler qatarına jatadı. Sonlıqtan biz da'slep elektr zaryadların alıp ju'riwshilerge ha'm olardıń klassifikatsiyasına itibar beremiz. Biz elektr zaryadı dep atalatug'ın denelerdin' ta'biyatta joq ekenligin, al zaryadlang'an bo'leksheler menen denelerdin' bar ekenligin na'zerde tutamız. Bunday bo'leksheler menen denelerdi zaryadları alıp ju'riwshiler dep ataymız.

Zaryadların mikroskopiyalıq alıp ju'riwshileri dep zaryadlang'an bo'leksheler menen ionlarg'a aytamız. Olar on' yamasa teris zaryadı alıp ju'riwi mu'mkin. Sanlıq ma'nisi boyınsha zaryadın' mug'darı $|e| = 1,6021892(46) \cdot 10^{-19} \text{ Kl} = 4,80 \cdot 10^{-10} \text{ SGSE}$ shamasına yamasa usı shamadan pu'tin san eselengen ma'niske ten'. Usı waqıtqa shekem ta'jiriybelerde $|e|$ den kishi bolg'an elektr zaryadının' ma'nisi tabılmadı.

Ha'zirgi waqıtları 200 dey bo'leksheler ha'm og'ada ko'p sanlı atomlar, ionlar, molekular belgili. Bo'lekshelerdin' ko'pshiligi payda bolg'annan keyin ju'da' kishi waqıt dawamında jasaydı ha'm basqa bo'lekshelerge ıdırıp ketedi. Basqa so'z benen aytqanda bo'lekshelerdin' jasaw waqıtı og'ada qısqa (sekundtın' og'ada kishi bo'legi). ***Jasaw waqıtı sheksiz u'lken bolg'an az sandag'ı zaryadlang'an bo'lekshelerdin' tu'rleri bar.*** Olar elektronlar, protonlar ha'm olardıń antibo'leksheleri¹. Atomların' yadrolarının' quramına protonlar, al atomların' elektronlıq qabıqlarına (qatlamlarına) elektronlar kiredi. Usı bo'leksheler elektr ha'm magnetizm bo'liminde u'yreniletug'ın barlıq qubılıslardı boldıradı. Atomların' yadrolarının' quramına protonlar menen bir qatarda neytronlar da kiredi. Biraq neytronlar elektr zaryadına iye emes ha'm olardıń yadronın' ishindegı jasaw waqıtı sheksiz ko'p. Biraq yadronın' sırtında (erkin halda) neytron ortasha 15 minut g'ana jasaydı ha'm proton, elektron ha'm antineytrinog'a ıdırıp ketedi.

Ionların' (ionlar dep zaryadlang'an atomlardı yamasa molekularlardı aytamız) zaryadı atomdag'ı yamasa molekuladag'ı elektronlıq qabıqtı bir yamasa bir neshe elektronların' kemisliginen (bunday jag'dayda ionnıń za'radının' ma'nisi on' boladı) yamasa artıqlıg'ınan (artıq elektronlar ionların' zaryadının' teris bolıwın ta'miynleydi) ibarat. Sonlıqtan ionların' elektr zaryadların alıp ju'riwshileri haqqındag'ı ma'sele elektronlar menen protonların' zaryadları haqqındag'ı ma'selege alıp kelinedi.

Elektron elementar teris ma'nisli zaryadı alıp ju'riwshi bolıp tabılardı. Ha'zirgi waqıtları elektrondı ishki qurılısqa iye emes noqatlıq bo'lekshe dep qabıl etedi. Sonlıqtan elektronnın' barlıq zaryadı bir noqatta toplanıg'an dep esaplaymız. Bunday ko'z-qaras a'lbette durıs emes. Sebebi noqatlıq zaryad ta'repinen payda etilgen elektr maydanının' energiyası ha'm massası sheksiz u'lken bolıwı sha'rt. Al elektronnın' massası bolsa $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg} = 9,1 \cdot 10^{-28} \text{ g}$. Biraq a'piwayılıq ushın bunday qarama-qarsılıqtı itibarg'a almaymız.

Proton on' elementar zaryadı alıp ju'riwshi bolıp tabılardı. Onı noqatlıq bo'lekshe dep qarawg'a bolmaydı. Protonnıń ishindegı elektr zaryadının' tarqalıwı eksperimente izertlengen.

¹ Ha'zirgi waqıtları protonların' jasaw waqıtı 10^{31} jıl degen teoriyalıq boljawlar bar. Biraq bul boljawdın' durıslıg'ı ta'jiriybede tastıyqlanbadı.

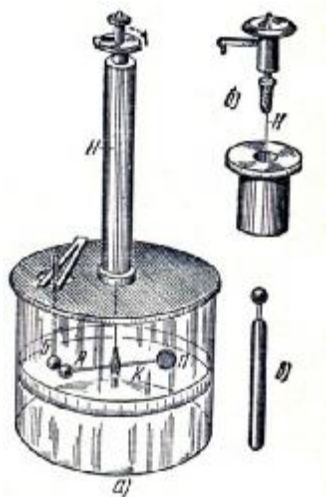
Elektr zaryadlarının bir biri menen ta'sirleskeninde (ta'sirlesiw tartısıw yamasa iyterisiwden turadı) birinshi gezekte usı tartısıwdın ha'm iyterisiwdın qalay jetkerip beriletug'ınlıg'ı dıqqat orayında turadı. Sonın menen birge mına soraw da u'lken a'hmiyetke iye: mexanikalıq ku'shler (tartısıw menen iyterisiw) tek eki zaryad bolg'anda g'ana ju'zege keledi, al tek g'ana bir zaryad bolg'anda qorshag'an ortalıqta qanday da bir o'zgerisler ju'zege keleme?

Bul sorawg'a juwap beriwde fizikada bir biri menen qarama-qarsı bolg'an eki tu'rli ko'z-qaras orın aldı. Birinshi ko'z-qaras boyınsha denelerge bir biri menen hesh qanday ortalıqsız, birden ta'sir etiw ta'n dep esaplandı. Demek ta'sir boslıq arqalı bir zamatta alıp beriledi degen so'z (uzaqtan ta'sir etisiw teoriyası). Usınday ko'z-qarasta bir zaryad ortalıqqa hesh qanday ta'sir jasmaydı.

Ekinshi ko'z-qaras boyınsha ha'r qanday deneler arasındag'ı ta'sirlesiw usı denelerdi qorshap turg'an qanday da bir ortalıqlar arqalı usı ortalıqtın ha'r qıylı bo'limleri boyınsha izbe-iz shekli tezlik penen alıp beriledi (jaqınnan ta'sir etisiw teoriyası). Demek tek bir zaryadlang'an dene bolsa da qorshap turg'an ortalıqta qanday da bir o'zgeris boladı degen so'z.

Ha'zirgi zaman fizikası uzaqtan ta'sirlesiw ideyasın biykarlaydı ha'm tek jaqınnan ta'sirlesiw teoriyasın saqlap qaladı.

Solay etip tınıshlıqta turg'an ha'r qıylı zaryadlang'an bo'leksheler arasındag'ı ta'sirlesiw ku'shlerinin payda bolıwın tu'siniw ushın usı ta'sirlesiwdi ju'zege keltiretug'ın zaryadlar ortasında qanday da bir ortalıqtın orın alatug'ınlıg'ın na'zerde tutıwımız kerek eken. Usı ortalıq elektr maydanı bolıp tabıladı. Elektr zaryadı bir orında payda bolsa, onın a'tirapında elektr maydanı da payda boladı. Elektr maydanının tiykarg'ı qa'siyeti sonnan ibarat, usı maydanda jaylasqan qa'legen zaryadlang'an deneg'e ku'sh ta'sir etedi. Al usı elektr maydanın sanlıq jaqtan ta'riplew ushın elektr maydanının kernewligi dep atalatug'ın arnawlı fizikalıq shama xızmet etedi.



1-su'wret.

Kulonnnın aylanıwshı ta'rezisi.

a) a'sbaptın ulıwmalıq ko'rinisi, b) a'sbaptın golovkası, v) A ha'm V shariklerin zaryadlaw ushın qollanılg'an o'tkizgish.

Endi Kulon (Coulomb, 1736-1806) nızamı haqqında ga'p etemiz. Kulon o'zinin 1-su'wrette ko'rsetilgen aylanıwshı ta'rezinin ja'rdeminde 1785-jılı zaryadlardın ta'sir etisiw nızamın ashtı (ju'da kishi ku'shlerdi o'lsheytug'ın tap usınday ta'rezinin ja'rdeminde Kavendishtin gravitatsiyalıq turaqlı G nı anıqlag'anın eske tu'siremiz). Bul ta'rezide H jin'ishke metall sabaqqa izolyatordan islengen gorizont bag'ıtındag'ı K denesi bekitilgen. Bul denenin bir ushına A sharigi, al ekinshi ushına ten' selmaqlıqtı uslap turıw ushın P denesi ildirilgen. Metall sabaqtın joqarg'ı ushı a'sbaptın aylanıwshı golovkasına bekitilgen bolıp, ol sabaqtın burılıw mu'yeshin da'l anıqlawg'a mu'mkinshilik beredi. A'sbaptın ishine A sharigi usag'an B sharigin

a'sbaptın' ishine kirgiziw mu'mkin. Sırtqı u'ken shiyshe tsilindr a'sbaptın' sezgir bo'limlerin hawanın' qozg'alısınan saqlaydı.

Zaryadlar arasındag'ı ta'sir etisiw ku'shinin' usı zaryadlar arasındag'ı qashıqlıqqa g'a'rezliligin anıqlaw ushın A ha'm B shariklerine izolyator rushkag'a bekitilgen u'shinshi sharik qollanılǵ'an (1-v su'wret). Birdey belgige iye zaryadlar menen zaryadlang'an A ha'm B sharikleri bir biri menen iyterisedi ha'm bazı bir qashıqlıqqa barıp toqtaydı. Bul qashıqlıqtı golovkanın' shkalası ja'rdeminde anıqlaydı. Bunnan keyin a'sbaptın' golovkasın buraydı ha'm usının' saldarınan metall sabaqtı buraydı. Mexanikadan serpimli buralıw deformatsiyasında buralıw mu'yeshinin' buraw ku'shinin' momentine tuwrı proporsional ekenligi belgili. Bul jag'day gorizont bag'ıtındıǵ'ı K denesinin' ushındag'ı sharike qanday shamadag'ı ku'shtin' ta'sir etetug'inlig'in anıqlawg'a mu'mkinshilik beredi. Usınday ta'jiriybelerdin' na'tiyjesinde Kulon eki noqatlıq zaryad arasındag'ı o'z-ara ta'sirlesiw ku'shi usı eki noqattı tutastırıwshı tuwrı bag'ıtında ha'm bul ku'shtin' sol eki noqat arasındag'ı qashıqlıqtın' kvadratına kerı proporsional ekenligin taptı. Yag'nıy

$$F \sim 1/r^2 \quad (1)$$

ekenligi anıqlandı.

Ta'sirlesiw ku'shi zaryadlardın' mug'darına da baylanıslı. Bunday g'a'rezlikti mınaday ta'jiriybenin' ja'rdeminde anıqlaw mu'mkin:

Eger zaryadlang'an A yamasa B sharigine o'lshepleri tap sonday, biraq zaryadlanbag'an sharikti tiygizsek, onda shariklerdin' birdey ekenligine baylanıslı A yamasa B sharigindegi zaryadtın' ten' yarımı zaryadlanbag'an sharike o'tedi. Eger zaryadlanbag'an sharik zaryadlang'an sharike ja'ne bir reet tiygizilse, onda da'slepki zaryadtın' mug'darı to'rt ese kemeyedi. Usının' na'tiyjesinde ta'sirlesiw ku'shinin' zaryadlardın' mug'darına tuwrı proporsional o'zgeretug'inlig'ı anıqlang'an. Usı aling'an na'tiyjelerden eki noqatlıq zaryad arasındag'ı o'z-ara ta'sirlesiw ku'shinin' zaryadlardın' mug'darına tuwrı, al sol zaryadlar arasındag'ı qashıqlıqtın' kvadratına kerı proporsional ekenligi ashıldı. Bul jag'day bilayınsha jazıladı:

$$F = f \frac{q_1 q_2}{r^2}. \quad (2)$$

Bul formulada f arqalı zaryadtın', kashıqlıqtın' ha'm ku'shtin' o'lshep birliklerine baylanıslı bolǵ'an proporsionallıq koeffitsienti belgilengen. Endi ku'shtin' tek shamasın emes, al bag'ıtın da ko'rsetetug'in formulanı bilayınsha jazamız:

$$\mathbf{F}_{12} = f \frac{q_1 q_2}{r^3} \mathbf{r}_{12}. \quad (3)$$

Bul an'latpada \mathbf{F}_{12} arqalı 2-zaryad ta'repinen 1-zaryadqa ta'sir etetug'in ku'sh, al \mathbf{r}_{12} arqalı 1-zaryadtan 2-zaryadqa qaray bag'ıtlang'an radius-vektor belgilengen.

Ha'zirgi waqıtları o'tkerilgen eksperimentler Kulon nızamının' og'ada da'l orınlanatug'inlig'in (ha'tte 10^{-13} sm qashıqlıqlarda da) da'lilledi.

Ku'shtin', zaryadtın' ha'm qashıqlıqtın' o'lshep birliklerin saylap alıw arqalı (2)- ha'm (3)-formulalardag'ı f proporsionallıq koeffitsientin 1 ge ten' etip alıw mu'mkin. Usıǵan sa'ykes keliwshi zaryadtın' birligi *zaryadtın' absolot elektrostatikalıq birligi* dep ataladı (qısqasha tu'rde SGSE-zaryad birligi). Bunday shama vakuumde bir birinen 1 sm kashıqlıqta turg'an ha'm bir biri menen 1 dina ku'sh penen ta'sir etisetug'in zaryadtın' mug'darına ten'.

Og'ada da'l o'lshevlar elementar zaryadtin'

$$e = 4,80 \cdot 10^{-10} \text{ SGSE-zaryad birligi} \quad (4)$$

ekenligin ko'rsetti.

Uzunliqtin', massanın', waqittin' ha'm zaryadtin' birliklerin tiykarg'i etip alıp elektrlik ha'm magnitlik shamalardin' birliklerinin' sistemasin du'ziw mu'mkin. Tiykarında santimetr, gramm, sekunda ha'm SGSE-zaryad birligi jatqan sistemani birliklerdin' absolyot elektrostikalıq sisteması (SGSE-sistema) dep ataydı. Usı sistemasnıń tiykarında Kulon nızamı, yag'nıy tınıshlıqta turg'an zaryadlar arasındag'ı o'z-ara ta'sirlesiw nızamı tur. Keyinirek biz birliklerdin' absolyot elektromagnit sisteması (SGSM-sistema) menen tanısamız. Bunday sistemanın' tiykarında elektr tog'ı o'tip turg'an o'tkizgishler arasındag'ı o'z-ara ta'sirlesiw nızamı turadı. Birliklerdin' Gauss sisteması da absolyot sistema bolıp tabıladı. Bul sistemadag'ı elektrlik shamalardin' birlikleri SGSE-sistemanın' birlikleri menen birdey, al magnitlik shamalardin' birlikleri SGSM-sistemanın' birlikleri menen birdey.

SGSE-sistemasında Kulon nızamı bilayınsha jazıladı:

$$F = \frac{|q_1 q_2|}{r^2} \quad (5)$$

Bul formula zaryadlar vakuumde jaylasqan jag'dayda g'ana durıs ornınalanadı. Eger zaryadlar basqa artalıqlarda jaylassa, onda formulag'a qosımsha ko'beytiwshiler kirgiziledi.

Sİ sistemasındag'ı zaryadtin' birligi kulon bolıp tabıladı. Bul sistemada elementar zaryadtin' shaması (1998-jılı qabıl etilgen fundamentallıq fizikalıq turaqlılardan aling'an)

$$e = 1,602176462 (63) \cdot 10^{-19} \text{ Kl}. \quad (6)$$

Ta'jiriybelerde

$$1 \text{ Kl} = 2,998 \cdot 10^9 \text{ SGSE-zaryad birligi} \quad (7)$$

ekenligi anıqlang'an.

Eger elektrdinamikanın' ko'p formulaların SGS sistemasında (dara jag'dayda Gauss sistemasında) jazatug'ın bolsaq, onda bul formulalarg'a 4π , san ma'nisi jaqtılıqtın' vakuumdegi tezligine ten' elektrodinamikalıq turaqlı c kiredi. A'meliy jaqtan a'hmiyetli bolg'an formulalardag'ı usı shamalardan qutılıw ushın Kulon nızamındag'ı proporsionallıq koeffitsienti $\frac{1}{4\pi\epsilon_0}$ ge ten' etip aladı. Bunday jag'dayda vakuumde jaylasqan zaryadlar ushın an'latpa

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q_1 q_2|}{r^2} \quad (8)$$

tu'rine iye boladı. Usıg'an sa'ykes basqa formulalar da o'zgeredi. Usınday jollar menen o'zgeretilgen formulalardin' jazılıwı ***ratsionallastırılğan jazılıw*** dep ataladı. Ratsionallastırılğan formulalardı qollanıw arqalı du'zilgen birlikler sisteması ***ratsionallastırılğan birlikler sisteması*** dep ataladı. Bunday sistemalar ishine Sİ sisteması da kiredi.

ε_0 shamasın *elektr turaqlısı* dep ataydı. Ol uzınlıqqa bo'lingen elektr sıyımlıg'ının' o'lshe birliğine iye. Usıg'an sa'ykes onın' shamasın farada bo'lingen metr birliğinde an'latadı. ε_0 shamasın anıqlaw ushın (8)-formuladag'ı bir birinen 1 m qashıqlıqta jaylasqan mug'darı 1 kulonnan bolg'an eki nokatlıq zaryad arasındag'ı ku'shti esaplaymız.

$$F = \frac{3 \cdot 10^9 \cdot 3 \cdot 10^9}{100^2} \text{ SGSE} = 9 \cdot 10^{14} \text{ din} = 9 \cdot 10^9 \text{ N} \approx 10^9 \text{ kgs.} \quad (9)$$

Ku'shtin' usı ma'nisin, $q_1 = q_2 = 1 \text{ Kl}$ ha'm $r = 1 \text{ m}$ di (8)-formulag'a qoyıp, bunnan keyin

$$9 \cdot 10^9 = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{1 \cdot 1}{1^2}$$

ekenligine ko'z jetkerip $\varepsilon_0 = 0,885 \cdot 10^{-11} \text{ F/m}$ shamasın alamız.

Ma'selenin' tu'sinikli bolıwı ushın misallar keltiremiz. Vodorod atomının' yadrosı tek bir protonnan turadı. Onın' zaryadı $q_1 = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Kl} = 4,80 \cdot 10^{-10} \text{ SGSE}$. Vodorod atomındag'ı yadro menen onın' do'gereginde aylanıp ju'riwshi elektron arasındag'ı kashıqlıq $r = 0,5 \cdot 10^{-10} \text{ m} = 0,5 \cdot 10^{-8} \text{ sm}$. SGSE birlikler sistemasında (5-formula boyınsha) $F = \frac{|q_1 q_2|}{r^2} = 9,2 \cdot 10^{-3} \text{ dina} = 9,2 \cdot 10^{-8} \text{ N}$. Al SI sistemasında esaplaytug'ın bolsaq, onda $F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{|q_1 q_2|}{r^2}$ formulasın paydalanamız ha'm $\varepsilon_0 = 0,885 \cdot 10^{-11} \text{ F/m}$ ekenligin esapqa alamız. Bunday jag'dayda $F = 9,2 \cdot 10^{-8} \text{ N}$ shamasın alamız.

Endi ku'sh F shamasının' belgisine itibar beremiz ha'm birdey belgige iye (atlas) zaryadların' iyerisetug'inlig'in, al belgileri qarama-qarsı bolg'an zaryadların' tartısatug'inlig'in na'zerde tutamız. Birdey belgige iye zaryadlar ushın ku'sh F tin' belgisi on', al ha'r qıylı belgige iye zaryadlar ushın ku'sh F tin' belgisi teris. Demek on' ma'nisli ku'sh iyerisiw ku'shi, al teris ma'niske iye ku'shtin' tartısıw ku'shi ekenligine ko'z jetkeremiz. Olay bolatug'ın bolsa tartısıw ku'shi bolg'an gravitatsiya ku'shinin' de $\left(F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}\right)$ teris ma'niske iye bolıwının' kerek ekenligin atap o'temiz.

Endi elektr maydanının' kernewligi tu'sinigene qaytıp kelemiz. Shaması q g'a ten' noqatlıq elektr zaryadın alamız ha'm bul zaryad payda etken ortalıqqa shaması q_1 ge ten' bolg'an sınap ko'riwetug'ın (rus tilinde «probnıy zaryad») noqatlıq elektr zaryadın alıp kelemiz. Bul q_1 zaryadına Kulon nızamına sa'ykes usı zaryadtın' shamasına tuwrı proporsional bolg'an F ku'shi ta'sir etedi. Sonlıqtan bul ku'shtin' sınap ko'riliwshi q_1 zaryadına qatnası F/q_1 sınap ko'riliwshi zaryadtı saylap alıw'g'a baylanıssız ha'm sınap ko'riliwshi bo'lekshe turg'an orıng'a g'a rezli bolg'an shama bolıp tabıladı. Usı F/q_1 shaması elektr maydanının' kernewligi atamasın aldı.

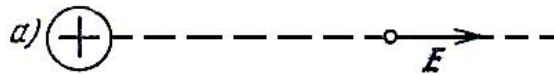
Solay etip mug'darı q bolg'an nokatlıq zaryadtın' usı zaryadın r qashıqlıg'ındag'ı elektr maydanının' kernewligin E arqalı belgilep

$$E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{q}{r^2} \quad (10)$$

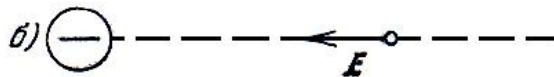
formulasın alamız. Bul formula boyınsha maydanning' kernewligi qashıqlıqtın' kvadratına kerı proporsional o'zgeretug'inlig'in ko'remiz.

Elektr zaryadı skalyar shama, al ku'sh bolsa vektor. Sonlıqtan vektordı skalyarg'a bo'liw arqalı alınatug'ın maydanning' kerewliligi vektor bolıp tabıladı. Bul vektordın' bag'ıtı maydanda

jaylastırılǵ'an on' belgige iye zaryadqa ta'sir etetug'ın ku'shtin' bag'ıtında etip alınadı. Demek on' zaryad ta'repinen payda etilgen elektr maydanının' kernewligi vektorının' bag'ıtı zaryadtan sırtqı ken'islikke bag'ıtlang'an radius-vektori menen bag'ıtlas boladı (sınap ko'riletug'ın on' zaryadtın' iyeriliw bag'ıtı). Eger elektr maydanı teris zaryad ta'repinen payda etiletug'ın bolsa, onda maydan zaryadtın' o'zine qaray bag'ıtlang'an. Biz bul jerde elektr maydanının' bag'ıtı tu'sinigi menen usı maydannın' kernewliginin' bag'ıtının' tu'siniginin' birdey ma'niske iye ekenligin an'g'aramız ha'm buni 2-su'wrette sxema tu'rinde ko'rsetemiz.



3-su'wret.



On' (a) ha'm teris (b) zaryadlar ta'repinen payda etilgen elektr maydanların' kernewliklerinin' bag'ıtları.

Joqarıda aytlılǵ'anlardan elektr maydanının' kernewligi E bolg'an noqatında turg'an zaryadı q g'a ten' bo'lekshege ta'sir etetug'ın ku'sh

$$F = qE$$

ge ten'.

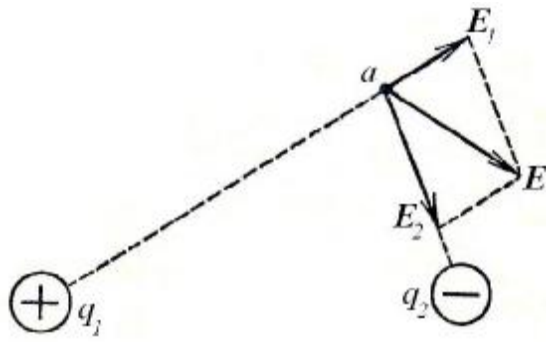
Edi misal retinde vakuumde jaylasqan zaryadı $+e$ ge ten' noqatlıq deneden (vodorod atomının' yadrosınan) $r = 0,5 \cdot 10^{-10}$ m qashıqlıqta turg'an noqattag'ı elektr maydanının' kernewligin esaplaymız. Bunın' ushın mına formuladan paydalanamız: $E = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2} = 36 \text{ GV/m}$ shamasın alamız. Eger SGSE sistemasınan paydalansaq, onda

$$E = \frac{q}{r^2} = \frac{4,8 \cdot 10^{-10}}{(0,5 \cdot 10^{-8})^2} \text{ SGSE birliğı} = 1,92 \cdot 10^7 \text{ SGSE birliğı}.$$

Endi elektr maydanların qosıw ma'selesini menen shug'ıllanamız. Usı maqsette q_1 ha'm q_2 noqatlıq zaryadların alamız. Meyli q_1 zaryadı ta'repinen a noqatında payda etilgen maydannın' kernewligi E_1 (q_2 zaryadı pu'tkilley joq bolg'an jag'daydag'ı), al E_2 bolsa q_2 zaryadı ta'repinen a noqatında payda etilgen maydannın' kernewligi (q_1 zaryadı pu'tkilley joq bolg'an jag'daydag'ı) belgilengen bolsın. Ta'jiriybeler eki maydannın' qosılıwınan payda bolg'an maydannın' kernewligi E nin' vektorlardı qosıw qag'ıydası ja'rdeminde anıqlanatug'ınlig'in ko'rsetedi (4-su'wret). Bunday bolatug'ın bolsa $E = E_1 + E_2$ formulası orınlı boladı. Al elektr maydanı ko'p sanlı (k dana) noqatlıq zaryadlar ta'repinen payda etiletug'ın bolsa, onda

$$E = E_1 + E_2 + E_3 + \dots = \sum_k E_k \quad (11)$$

an'latpası orınlı boladı. (11)-an'latpa elektr maydanların qosıw printsipin (superpozitsiya printsipin) an'latadı ha'm elektr maydanının' en' a'hmiyetli qa'siyetlerinin' birin sa'wlelendiredi.



4-su'wret.

Elektr maydanların qosıw

Elektromagnit maydanlarının' superpozitsiya printsipin sa'wlelendiriwshi (11)-formulanın' durıslıg'ın o'z-o'zinen ayqın dep juwmaq shıg'arıwg'a bolmaydı. Bul formulanın' durıs ekenligin tek ta'jiriybeler tastıyıqlaydı.

Biz usı waqıtlarg'a shekem nokatlıq zaryadlar xaqqında aytıp keldik. Eger zaryadlang'an dene u'iken o'lishemlerge iye bolsa, onda ol deneni noqatlıq dene dep qarawg'a bolmaydı. Bunday jag'dayda denenin' ishindegı zaryadtın' tarqalıwın biliw kerek boladı.

Zaryadlang'an denenin' ishnen $\Delta\tau$ ko'lemın bo'lip alamız ha'm usı ko'lemnin' ishindegı zaryad mug'darın Δq arqalı belgıleyміz. $\frac{\Delta q}{\Delta\tau}$ qatnasının' ma'nisin sheksiz kishireytkenimizdegı bul katnastın' shegi **elektr zaryadların' berilgen noqattag'ı ko'lemlik tıg'ızlıg'ı** dep ataladı. Bul shamanı ρ arqalı belgılese, onda

$$\rho = \lim_{\Delta\tau \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta\tau} \quad (12)$$

formulasına iye bolamız. Solay etip **zaryadtın' ko'lemlik tıg'ızlıg'ı degenimiz ko'lem birligindegı zaryadtın' mug'darı** bolıp tabıladı eken. $\Delta\tau$ ko'lemindegı zaryadtın' mug'darı $\rho\Delta\tau$ g'a ten'.

Geypara denelerde zaryadlar denenin' betine tiyip turg'an ju'da' juqa bolg'an qatlamlarda jaylasadı. Bunday jag'daylarda zaryadların' betlik tıg'ızlıg'ınan paydalang'an qolaylı. Zaryadların' betlik tıg'ızlıg'ı

$$\sigma = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta S} \quad (13)$$

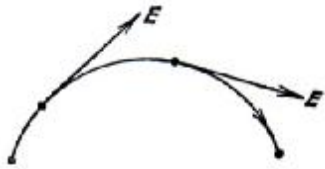
formulası ja'rdeminde esaplanadı. Bul formuladag'ı Δq shaması bettin' ΔS ushastkasındag'ı mug'darı. Basqa so'z benen aytqanda **zaryadların' betlik tıg'ızlıg'ı degenimiz bettin' bir birligindegı zaryadların' mug'darı bolıp tabıladı**. Bettin' ΔS bo'limindegı zaryadların' mug'darı $\sigma\Delta q$ ko'beymesine ten' boladı.

3-§. Elektr maydanın grafikaliq ta'riplew

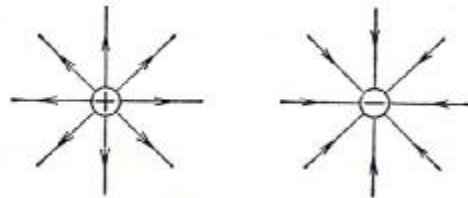
Ku'sh sızıqları. Elektrostatikalıq maydanın' induktsiya vektorı ha'm onın' ag'ısı. Elektr maydanın esaplaw. Ostrogradskiy-Gauss teoreması. Ostrogradskiy-Gauss teoremasın' differentsial ko'rinisi. Elektrostatikalıq maydanda islengen jumıs. Elektr dipoli.

Elektr maydanın ta'riplew ushın maydannın' ha'r bir noqatındag'ı kernewlik vektorın beriw kerek. Bunday ma'seleni analitikalıq usıllar tiykarında formulalardıń ja'rdeminde maydannın' kernewliginin' koordinatalardan g'a'rezliligin esaplaw jolı menen sheshiw mu'mkin. Bmraq bunday g'a'rezlilikti ku'sh sızıqların paydalanıw arqalı grafikaliq jollar menen de anıqlaw mu'mkin.

Ku'sh sızıg'ı yamasa maydan kernewliginin' vektorının' sızıg'ı dep elektr maydanında ju'rgizilgen qa'legen noqattag'ı urınbasının' bag'ıtı maydan kernewligi vektorının' bag'ıtını sa'ykes keletug'in sızıqqa aytamız (5-su'wret). Urınba basqa da qa'legen tuwrı sızıq sıyaqlı bir birine qarama-qarsı bolg'an eki bag'ıttı anıqlaytug'ın bolg'anlıqtan ku'sh sızıg'ına belgili bir bag'ıttı strelka menen belgilep qoyadı.



5-su'wret. Ku'sh sızıqların anıqlaw ushın arnalg'an sxema.

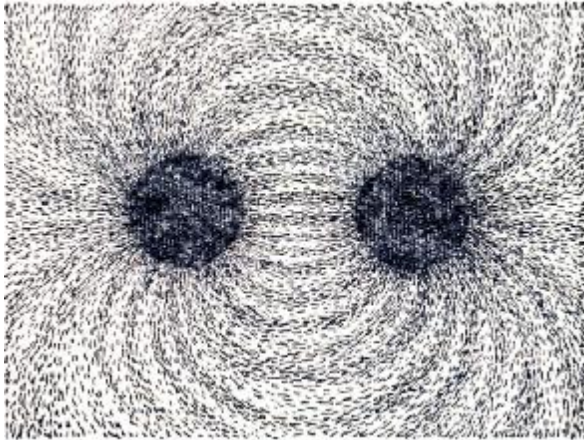


6-su'wret. Noqatlıq zaryadlardın' ku'sh sızıqları.

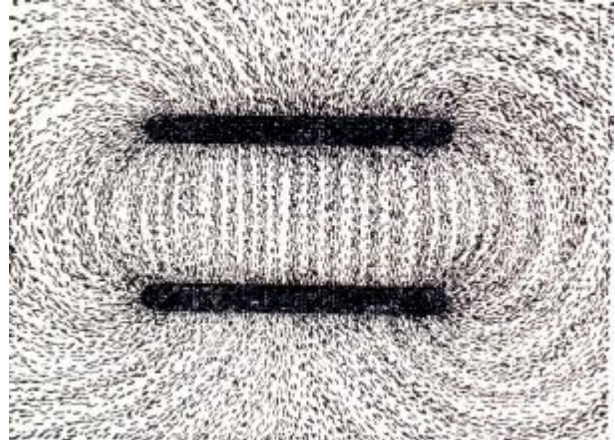
Ku'sh sızıqlarının' ja'rdeminde maydannın' kernewliginin' tek bag'ıtın g'ana emes, al shamasın da sa'wlelendiriw ushın maydannın' grafiginde ku'sh sızıqların ha'r qıylı jiyilikte qoyıw kelisilip alıng'an. Atap aytqanda maydang'a perpendikulyar etip alıng'an bettin' bir birliginen o'tiwshi ku'sh sızıqlarının' sanı usı orındag'ı maydannın' kernewligine ten' etip alınadı.

Maydan ku'sh sızıqlarının' su'wretin salıw arqalı biz maydannın' o'zine ta'n grafiklerine yamasa kartalarına iye bolamız. Olar maydannın' ha'r qıylı bo'limlerindeki kernewliktin' nege ten' ekenligin, maydannın' ken'islikte qalay o'zgeretug'inligin anıq ko'rsetedi. Bul usıldın' u'lken ko'rgizbelikke iye bolg'anlıg'ı sebepli elektrotexnikada ken'nen qollanıladı.

Joqarıda aytilg'anlardan ku'sh sızıqların maydannın' qa'legen noqatı arqalı o'tkeriwge bolatug'inlig'in kelip shıg'adı. Sonın' menen birge maydannın' ha'r bir noqatında kernewlik vektorı anıq ma'niske iye bolatug'ın bolg'anlıqtan ku'sh sızıqları hesh bir orında bir biri menen kesilispeytug'inlig'ı kelip shıg'adı.



7-su'wret. Ha'r qiyli zaryadlar menen zaryadlang'an eki sharik arasındag'ı ku'sh sızıqları.



8-su'wret. Tegis kondensatordın' elektr maydanı.

6-su'wrette misal retinde noqatlıq zaryadtın' ku'sh sızıqları berilgen. Zaryadtan qanday da bir r qashıqlıg'ındag'ı ku'sh sızıqlarının' jiyiligi ku'sh sızıqlarının' tolıq sanı bolg'an N nin' radiusı r bolg'an sferanın' betine qatnasına, yag'nıy $N/4\pi r^2$ shamasına ten' boladı. Bul shama maydannın' kernewligi sıyaqlı r din' kvadratına keri proporsional kemeyedi.

7-su'wrette ha'r qiyli zaryadlar menen zaryadlang'an eki sharik arasındag'ı elektr maydanı, al 8-su'wrette bolsa tegis kondensatordın' elektr maydanı ko'rsetilgen. Tegis kondensatorda plastinalar arasındag'ı qashıqlıq plastinkalardıń o'lsheplerinen a'dewir kishi bolg'anda bir plastinkadan shıqqan ku'sh sızıqlarının' derlik barlıg'ı ekinshi plastinkada tamam boladı. Bunday jag'dayda bir plastinkanı ekinshi plastinkada razryadlasaq (yag'nıy eki plastinkanı bir birinen o'tkizgish penen tutastırsaq), onda eki plastinka da bir birine ten'dey mug'dardag'ı induktsiyalıq zaryad payda boladı (zaryadı joq denegе basqa dene ta'repinen berilgen zaryadtı alıp kelingен yamasa induktsiyalıq zaryad dep ataymız). Sonın' menen birge tegis kondensatordın' ishindegi maydannın' kernewligi maydannın' barlıq noqatlarında da birdey ma'niske iye. Bunday maydan en' a'piwayı maydan bolıp tabıladı ha'm onı bir tekli maydan dep ataydı. **Demek bir tekli maydan dep kernewligi barlıq noqatlarda birdey bolatug'ın maydang'a aytadı ekenbiz.** 8-su'wrette kondensator plastikalarının' shetinde ku'sh sızıqlarının' qıysayatug'ınlıg'ı, yag'nıy maydannın' bir tekli emes ekenligi ko'rinip tur.

Joqarıda ayılğ'anlar menen bir qatarda ku'sh sızıqlarının' metall (o'tkizgish) elektrodlardın' betine barlıq waqıtta perpendikulyar bolatug'ınlıg'ın atap o'temiz. Bul jag'day o'z-o'zinen tu'sinikli. Eger ku'sh sızıqları betke perpendikulyar bolmag'anda maydannın' usı betke urınba bag'ıtlang'an qurawshısı bar bolg'an bolar edi. Usınday qurawshının' ta'sirinde metaldın' o'tkizgishlik elektronları bet boyınsha qozg'alısqa kelgen bolar edi. Bunday jag'dayda biz elektr zaryadların' ten' salmaqlıg'ına iye bolmag'an bolar edik. Al ta'jiriyelerde baqlanatug'ın elektr zaryadların' ten' salmaqlıg'ı ku'sh sızıqlarının' metall betine perpendikulyar bolatug'ınlıg'ın ko'rsetedi.

Ko'p jag'daylardag'ı elektr maydanın esaplaw Ostrogadskiy-Gauss teoremasın paydalanıw jolı menen an'satlasadı. Bul teorema M.V.Ostrogadskiy ta'repinen bazı bir ulıwmalıq teorema sıpatında, al Gauss ta'repinen elektr maydanına qollanıw barısında keltirilip shıg'arıldı.

Bul teoremanı bayanlaw ushın **elektr awısıwı** yamasa **elektr induktsiyası** dep atalatug'ın tu'sinikler menen tanısamız. Vakuum ushın anıqlaması boyınsha elektr awısıwı

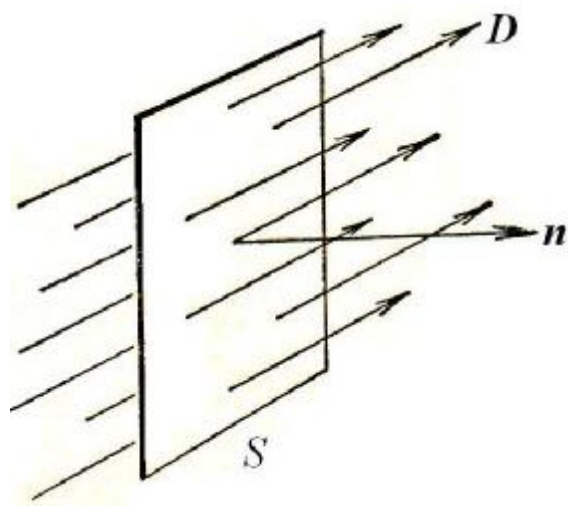
$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E} \quad (14)$$

an'latpası menen beriledi. Eger elektr maydanı tek bir noqatlıq zaryad ta'repinen payda etiletug'ın bolsa, onda usı zaryadtan r kashıqlıg'ındag'ı elektr awısıwının shaması

$$D = \frac{1}{4\pi} \frac{q}{r^2} \quad (15)$$

formulası menen esaplanadı, al \mathbf{D} vektorının bag'ıtı maydannın bag'ıtı \mathbf{E} menen bag'ıtlas. Sonın menen birge SGSE sistemasında maydannın kernewligi menen elektr awısıwı bir birine ten', al SI birlikler sistemasında olar o'z-ara ten' emes.

Ku'sh sızıqları sıyaqlı ken'isliktegi elektr awısıwının tarqalıwın grafikalıq su'wretlew ushın elektr awısıwı sızıqlarınan paydalanamız. Usı sızıqlardıń ken'isliktin ha'r bir noqatındag'ı bag'ıtı elektr awısıwı vektorının bag'ıtı menen bag'ıtlas, al onın jiyiligi elektr awısıwının shamasına ten'.



9-su'wret.

Elektr awısıwının berilgen bet boyınsha ag'ısı.

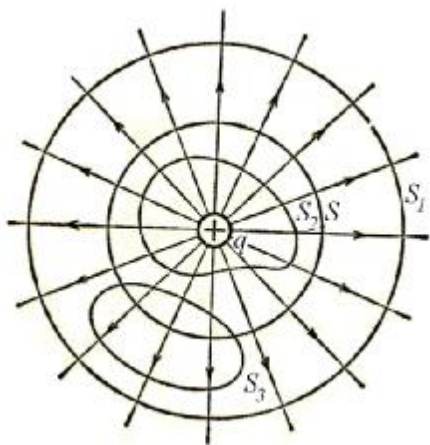
Endi elektr awısıwı vektorının ag'ısı degen tu'sinik kirgizemiz. Elektr maydanında jaylastırılǵan tegis S betin qaraymız ha'm og'an tu'sirilgen normal \mathbf{n} nin bag'ıtın saylap alamız (9-su'wret). Da'slep maydandı bir tekli ha'm normal menen ıqtıyarlı α mu'yeshin jasaydı dep qabıl etemiz.

$$N = SD \cos \alpha = SD_n \quad (16)$$

shamasın berilgen bet arqalı elektr awısıwının ag'ısı dep ataydı. Bul formulada D_n arqalı \mathbf{D} vektorının normal \mathbf{n} nin bag'ıtına tu'sirilgen proektsiyası belgilengen. Elektr awısıwının sızıqlarının jiyiligi D g'a ten' bolg'anlıqtan berilgen bet arqalı elektr awısıwının ag'ısı usı bet arqalı o'tetug'ın elektr awısıwı sızıqlarının tolıq sanına ten' boladı.

O'tiwshi awısıw sızıqlarının sinan anıqlawshı awısıw ag'ısı skalyar shama bolıp tabıladı.

(16)-formuladan ag'ıstın on' ma'niske de, teris ma'niske de iye bola alatug'ınlıg'ı ko'rinip tur. Eger awısıw sızıqları menen normal arasındag'ı mu'yesh su'yir bolsa ($\cos \alpha > 0$), onda ag'ıs on' ma'niske iye, al mu'yesh dog'al bolsa ($\cos \alpha < 0$), onda ag'ıs teris.



10-su'wret.

Ostrogradskiy-Gauss teoremasın tu'sindiriwge arnalg'an sxema.

Endi nokatlıq on' q zaryadın alamız ha'm usı zaryad orayında turg'an tuyıq sferalıq S beti arqalı o'tetug'in elektr awısıwı ag'ısın qaraymız (10-su'wret). Normaldın' on' bag'ıtı retinde sırtqı normaldın' bag'ıtın qabıl etemiz. Bunday jag'dayda D sferanın' barlıq noqatlarında birdey ha'm sonın' menen birge barlıq orınlarda $\cos\alpha = 1$. Sonlıqtan

$$N = \frac{1}{4\pi} \frac{q}{R^2} 4\pi R^2 = q.$$

Bul na'tiyjenin' tek sferalıq bet ushın emes, al zaryad ishinde iqtıyarlı tu'rde jaylasqan qa'legen formadag'ı tuyıq bet ushın da durıs ekenligin an'sat ko'riwge boladı.

Joqarıdag'ı formuladan awısıwdın' sferalıq bet boyınsha ag'ısının' sferanın' radiusınan g'a'rezli emes ekenligi ko'rinip tur (10-su'wrettegi kontsentrlik sferalar). Bul jag'day S penen S_1 sferaları arasında (usı aralıqta basqa zaryadlar bolmag'an jag'dayda) awısıw sızıqlarının' u'zliksiz ekenligin bildiredi. Elektr awısıwının' sızıqları tek zaryadlarda baslanadı ha'm zaryadlarda tamam boladı.

Awısıw ag'ısının' u'zliksizliginen iqtıyarlı tu'rde alıng'an zaryadtı qorshap turg'an S_2 beti arqalı o'tetug'in awısıw sızıqlarının' sanının' (yag'nıy awısıw ag'ısının') S_1 ha'm S_2 sferaları ushın da birdey ekenligi kelip shıg'adı, yag'nıy

$$N = \oint (\mathbf{D} d\mathbf{S}) = \oint D_n dS = q. \quad (17)$$

Kerisinshe, eger tuyıq bet zaryadtı qaplap turmasa (zaryadtı o'z ishine almasa degen so'z), onda bul bet arqalı awısıw ag'ısı nolge ten'. Sebebi usı bet arqalı kiretug'in sızıqlar sanı bete shıg'atug'in sızıqlar sanına ten' (10-su'wrettegi S_3 beti).

(17)-formula Ostrogradskiy-Gauss teoremasın an'latadı: **tuyıq bet arqalı o'tiwshi elektr awısıwının' ag'ısı usı bettin' ishinde jaylasqan barlıq zaryadların' algebralıq qosındısına ten'.**

A'dette $\mathbf{D} d\mathbf{S}$ yamasa $\oint (\mathbf{D} d\mathbf{S})$ tu'rindegi an'latpalar fizika menen matematikanın' ko'p sandag'ı ha'r qıylı ma'selelerinde gezlesedi. Bul an'latpalar \mathbf{D} vektorının' aykın fizikalıq ma'nisinen g'a'rezsiz ma'niske iye boladı. Da'slepki $\mathbf{D} d\mathbf{S}$ an'latpası \mathbf{D} vektorının' sheksiz kishi bolg'an $d\mathbf{S}$ beti arqalı ag'ısı, al $\oint (\mathbf{D} d\mathbf{S})$ an'latpası bolsa \mathbf{D} vektorının' shekli S beti arqalı ag'ısı dep ataladı. $N = \oint (\mathbf{D} d\mathbf{S})$ integralın elektr awısıwı \mathbf{D} vektorının' ag'ısı dep ataydı (biraq bul tu'sinik qanday da bir haqıyqıy ag'ıstı bildirmese de).

(17)-an'latpanı elektr maydanının' kernewligin paydalanıp basqasha da jazıw mu'mkin:

$$N = \oint (\mathbf{E} d\mathbf{S}) = 4\pi q. \quad (17-1)$$

(Sİ sistemasında $N = \oint (\mathbf{E} d\mathbf{S}) = \frac{1}{\varepsilon_0} q$ jazıwı orın aladı). Bul an'latpa Ostrogradskiy-Gauss teoremasının' differentsial formadag'ı jazılıwı bolıp tabıladı. Ko'lem birligindegi elektr zaryadların' mug'darın (joqarıda ayılıp o'tilgenindey) **elektr zaryadının' ko'lemlik tıg'ızlıg'ı** dep ataymız ha'm onı ρ arqalı belgileymiz. Bunday jag'dayda dV ko'lemindegi zaryadtın' mug'darı $dq = \rho dV$ g'a ten' boladı. Tıg'ızlıq ρ nı ken'isliklik koordinatalardıń u'zliksiz funktsiyası dep esaplaymız (a'llette bunday sha'rt tek makroskopiyalıq fizikada orınlanadı).

Ken'islikte ta'repleri dx, dy, dz bolg'an sheksiz kishi tuwrı mu'yeshli paralelopiped alamız (11-su'wret). 1-qaptalda sırtqı \mathbf{n} normalı \mathbf{X} ko'sherinin' bag'ıtına qarama-qarsı bag'ıtlang'an. Sonlıqtan qanday da bir \mathbf{E} vektorının' usı qaptal bet boyınsha ag'ısı $-E_x(x)dydz$ ke ten'. Al qarama-qarsı jaylasqan 2 qaptalında sırtqı normaldın' bag'ıtı \mathbf{X} ko'sherinin' bag'ıtı menen bag'ıtlas ha'm sonlıqtan usı qaptal bet araqalı ag'ıs ushın $E_x(x+dx)dydz$ an'latpasın jaza alamız. Eki ag'ıstın' qosındısı

$$[E_x(x+dx) - E_x(x)]dydz = \frac{\partial E_x}{\partial x} dx dy dz = \frac{\partial E_x}{\partial x} dV.$$

Bul an'latpada $dV \equiv dx dy dz$ arqalı paralelopipedtin' ko'lemi belgilengen. Tap usınday jollar menen qarg'an eki qaptal arqalı ag'ıs anıqlanadı. Parallelopipedtin' barlıq betleri arqalı o'tetug'in tolıq ag'ıs

$$dN = \left(\frac{\partial E_x}{\partial x} + \frac{\partial E_y}{\partial y} + \frac{\partial E_z}{\partial z} \right) dV$$

shamasına ten' boladı. Eger $\frac{\partial E_x}{\partial x} + \frac{\partial E_y}{\partial y} + \frac{\partial E_z}{\partial z} = \text{div} \mathbf{E}$ dep belgilesek, onda joqarıdag'ı tolıq ag'ıs ushın jazılg'an formula

$$dN = \text{div} \mathbf{E} dV$$

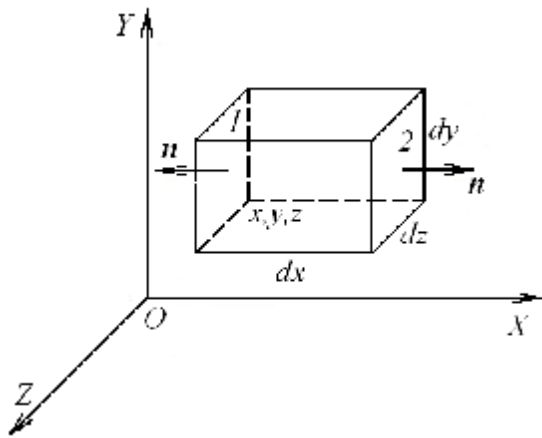
tu'rine enedi. Ostrogradskiy-Gauss teoreması boyınsha $4\pi q = 4\pi \rho dV$. Bul an'latpalardı bir birine ten'ew arqalı mına formulag'a iye bolamız:

$$\text{div} \mathbf{E} = 4\pi \rho.$$

Bul formula **Ostrogradskiy-Gauss teoremasın differentsial formada an'latadı** ha'm elektrodinamikanın' tiykarg'ı formulaların' biri bolıp tabıladı.

$\text{div} \mathbf{E} = 4\pi \rho$ an'latpası menen anıqlanatug'in shama \mathbf{E} vektorının' ayqın fizikalıq yamasa geometriyalıq ma'nisinen g'a'rezli emes. Bul an'latpa \mathbf{E} vektorının' divergentsiyası dep ataladı. Al divergentsiya menen matematika menen fizikanın' og'ada ko'p sanlı ha'r tu'rli bo'limlerinde ushırasıw mu'mkin.

Biz joqarıda Ostrogradskiy-Gauss teoremasın da'lillewde biz Kulon nızamın paydalang'anımızdı atap o'temiz. Sebebi Ostrogradskiy-Gauss teoreması Kulon nızamının' na'tiyjesi bolıp tabıladı.



11-su'wret.

Ko'lemi $dx dy dz$ bolg'an sheksiz kishi tuwrı mu'yeshli paralelopipedtin' betleri arqalı qa'legen vektorlıq shamanın' ag'ısın anıqlawg'a arnalg'an su'wret.

Endi Ostrogradskiy-Gauss teoreması ja'rdeminde bazı bir dara jag'daylar ushın maydandı esaplaymız.

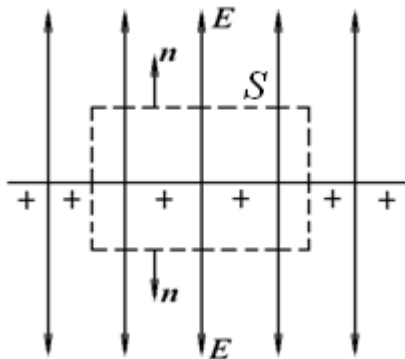
1-mısal. Ten' o'lsheqli zaryadlang'an tegislik (12-su'wret). Meyli zaryadının' betlik tıg'ızlıg'ı σ g'a ten' sheksiz tegislik berilgen bolsın. Simmetriya ko'z-qarasınan awısıw sızıqlarının' betke tek perpendikulyar bag'ıtta bolatug'ınlg'ı belgili. Bul jag'dayda Ostrogradskiy-Gauss teoremasındag'ı tuyıq bet sıpatında zaryadlang'an betke perpendikulyar tuwrı tsilindrdi saylap alg'an qolaylı. Bul tsilindr eki tegis ultang'a iye ha'm bul ultanlardın' ku'sh sızıqlarına perpendikulyar bolıwı kerek (12-su'wrettegi S beti). TSilindrdin' qaptal beti awısıw sızıqlarına parallel bolg'anlıqtan ($\cos\alpha = 0$) bul bet araqalı awısıw ag'ısı nolge ten' ha'm sonlıqtan tsilindr arqalı o'tetug'ın tolıq ag'ısı onın' ultanları arqalı o'tiwshi ag'ıslardın' qosındısına ten': $N = 2DS$. TSilindr ishindegı tolıq zaryad σS ke ten'. Sonlıqtan Ostrogradskiy-Gauss teoremasın qollanıp minag'an iye bolamız:

$$2DS = \sigma S.$$

Bunnan $D = \frac{1}{2}\sigma$. Bir tekli zaryadlang'an tegisliktin' vakuumdegı kernewligi

$$E = \frac{1}{2\varepsilon_0}\sigma \quad (18)$$

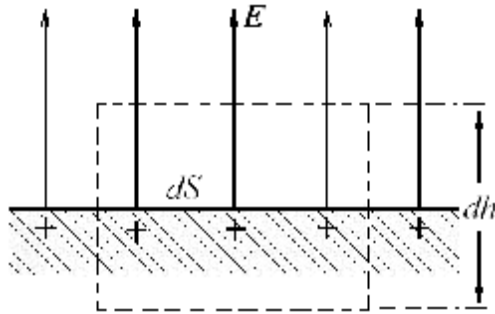
shamasına ten'.



12-su'wret.

Ten' o'lsheqli zaryadlang'an tegisliktin' elektr maydanı.

2-mısal. Zaryadlang'an o'tkizgishtin' beti. Meyli iqtıyarlı zaryadlang'an metall o'tkizgish berilgen bolsın. Bunday o'tkizgishte zaryadlar a'dette ten' salmaqlıqta jaylasadı.



13-su'wret.

Zaryadlang'an o'tkizgishtin' betinin' qasindag'i elektr maydanı.

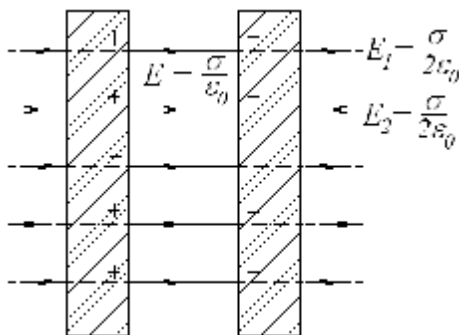
Bul ma'seleni sheshiw ushin elektr tog'ı bolmag'an jag'daylarda ku'sh sızıqlarının o'tkizgishtin' betine perpendikulyar bolatug'ınlıg'ın esapqa alamız. Al o'tkizgishtin' ishindegı maydannın' kernewliginin' barqulla nolge ten' bolatug'ınlıg'ı o'z-o'zinen tu'sinikli (eger o'tkizgishtin' ishinde elektr maydannın' kernewligi nolge ten' bolmag'anda metaldın' o'tkizgishlik elektronları qozg'alışqa kelgen bolar edi, yag'nıy elektr tog'ı payda bolg'an bolar edi).

O'tkizgishtin' betinde sheksiz kishi dS bet elementin' alamız (13-su'wret) ha'm zaryadtın' betlik tıg'ızlıg'ın σ arqalı belgıleyміz. Tuyıq bet sıpatında bul jag'dayda da ultanının' maydanı dS , al biyikligi sheksiz kishi dh bolg'an tuwrı tsilindr alamız. Bul jag'dayda o'tkizgishtin' betinin' sheksiz kishi elementin' alıwımız kerek. Sebebi ulıwma jag'dayda σ bettin' bir noqatınan ekinshi noqatına o'tkende o'zgeriske ushıraydı. TSilindirdin' biyikligi de sheksiz kishi bolıwı sha'rt. Bunın' sebebi ıqtıyarlı formag'a iye o'tkizgish jag'dayında awısıw sızıqları tek tikkeley jaqın orınlarda g'ana betke perpendikulyar boladı. Bul jag'dayda awısıwdın' tolıq ag'ısı tek bir ultan arqalı o'tiwshi ag'ısqa ten' ha'm

$$D dS = \sigma dS.$$

Bunnan $D = \sigma$ ha'm $E = \sigma/\varepsilon_0$ qatnasların' alamız.

Solay etip o'tkizgishtin' betinin' tikkeley qasında D nın' ma'nisi zaryadtın' betlik tıg'ızlıg'ına, yag'nıy o'tkizgishtin' ishindegı bir birlik maydanda jaylasqan zaryadtın' mug'darına ten'. «Elektr awısıwı» termininin' payda bolıwı da usı jag'dayg'a baylanıslı. Bul na'tiyjedegı en' a'hmiyetlisi sonnan ibarat, bettin' biz qarap atırg'an noqatı a'tırapındag'ı maydannın' kernewligi ha'm elektr awısıwı o'tkizgishtin' formasınan, ondag'ı zaryadların' tarqalıwınan ha'm usı o'tkizgishtin' a'tırapında basqa o'tkizgishlerdin' bar yamasa joqlıg'ınan g'a'rezli emes eken.



14-su'wret.

Tegis kondensatordın' ishindegı elektr maydanı. Bul jerde elektr maydanı kondensatordın' zaryadlang'an eki astarı payda etken maydanlardın' qosındısına ten' boladı.

İrnshou teoreması. Noqatlıq elektr zaryadları sistemasının' ortıqlı ten' salmaqlıqta turıwı ushin sistemadag'ı ha'r bir zaryadqa ta'sir etiwshi ku'shtin' nolge ten' bolıwı za'ru'rli ha'm jetkilikli. Biraq «qozg'almay turg'an zaryadlar sistemasında usınday sharayattı do'retiwge bolama?» degen sorawdın' qoyılıwı ta'biyiy na'rse. Biz ta'biyatta ko'rip ju'rgen zaryadlang'an

bo'lekshelelerden turatug'in ornıqlı ten' salmaqlıq sistemalardıń derlik barlıg'ı da qozg'alısta boladı. Mısal retinde vodorod atomın ko'rsetiwge boladı. Bul atomda protonnan turatug'in yadro menen onın' a'tırapında aylanıp ju'riwshi elektronnın' ten' salmaqta turıwın ha'm usı atomnın' ornıqlılıg'ın yadro menen elektron arasındag'ı elektrostatalıq tartısıw ku'shi $\frac{e^2}{r^2}$ shamasının' $\frac{m_e v^2}{r}$ orayg'a umtılwshı ku'shine ten'ligi ta'miynleydi (demek bul jerdegi ten' salmaqlıqtın', ornıqlılıqtın' ornawı ushın $\frac{e^2}{r^2}$ elektr ku'shi menen mexanikalıq $\frac{m_e v^2}{r}$ ku'shi o'z-ara ten' bolıwı sha'rt). Noqatlıq elektr zaryadları sistemasının' ten' salmaqlıqta turıwı haqqındag'ı ma'selege **İrnshou teoreması** juwap beredi. Bul teorema boyınsha **eger sistemag'a tek tartısıw yamasa iyterisiw bolg'an Kulon ku'shi ta'sir etetug'in tınıshlıqta turg'an noqatlıq elektr zaryadların' qa'legen ten' salmaqlıq konfiguratsiyası ornıqlı emes**. Bul teorema gravitatsiyalıq maydanlar ushın da orınlanadı (yag'nıy Quyash ha'm planetalardıń ornıqlı ten' salmaqlıq konfiguratsiyası payda etiwı ushın gravitatsiyalıq ku'shler menen bir qatarda orayg'a umtılwshı ku'shler de, yag'nıy inertsiya ku'shleri de orın alıwı sha'rt).

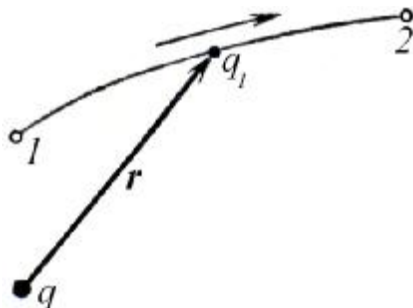
Endi elektrostatalıq maydanda islengen jumıs ha'm elektr maydanının' potentsiallıg'ı haqqında ga'p etemiz. Tınıshlıqta turg'an q zaryadı vakuumde $\mathbf{E} = \frac{q}{r^2} \mathbf{r}$ elektr maydanın payda etedi («kernewligi $\mathbf{E} = \frac{q}{r^2} \mathbf{r}$ bolg'an elektr maydanı» yamasa « $\mathbf{E} = \frac{q}{r^2} \mathbf{r}$ elektr maydanı» so'zleri bir ma'niste qollanıladı). Meyli bul maydanda basqa q_1 zaryadı baslang'ısh 1 noqatınan aqırg'ı 2 noqatına 12 ıqtıyarlı iymek sızıqlı traektoriya boyınsha qozg'alatug'ın bolsın (15-su'wret). Bunday qozg'alısta maydan ku'shleri ta'repinen islengen A_{12} jumısı to'mendegidey iymek sızıqlı integral menen an'latıladı:

$$A_{12} = \int_{12} q_1 (\mathbf{E} d\mathbf{r}) = q_1 q \int_{12} \frac{r dr}{r^3}$$

Biraq $\mathbf{r} d\mathbf{r} = r dr$ (bunı tu'siniw ushın $r^2 = r^2$ ten'ligin differentsiallaw kerek). Sonın' saldarınan iymek sızıqlı integral anıq integralg'a aylanadı:

$$A_{12} = q_1 q \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r^2} = q_1 q \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right).$$

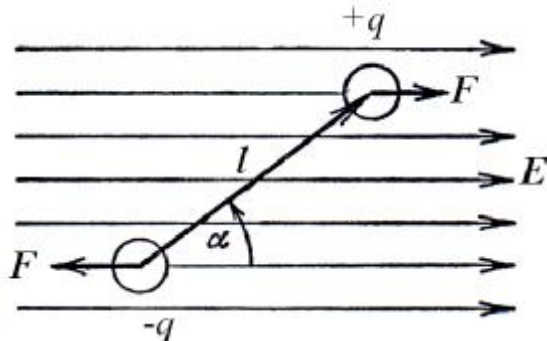
Solay etip da'slepki ha'm aqırg'ı 1 ha'm 2 noqatların qanday etip saylap alsa da A_{12} jumısının joldın' formasınan g'a'rezli emes bolıp shıg'adı. Al zaryadlangan bo'leksheni tuyıq kontur boyınsha qozg'asaq islengen jumıs nolge ten' boladı. Bul sha'rtlerdi qanaatlandıratug'ın ku'sh sızıqları (bul sha'rtlerdi qanaatlandıratug'ın maydan) **potentsial** yamasa **konservativlik** dep ataladı. Demek **noqatlıq zaryadtın' elektrostatalıq maydanı potentsial maydan bolıp tabıladı**.



15-su'wret.

Kernewligi $\mathbf{E} = \frac{q}{r^2} \mathbf{r}$ bolg'an elektr maydanında q_1 zaryadının' baslang'ısh 1 noqatınan aqırg'ı 2 noqatına 12 ıqtıyarlı iymek sızıqlı traektoriya boyınsha qozg'alıwı.

Endi elektr dipoli haqqında ga'p etemiz (16-su'wret). Bunın' ushın bir birinen l qashıqlıqta bekkem baylanıstırılğ'an zaryadları $+q$ ha'm $-q$ bolğ'an eki noqatlıq zaryadtı qaraymız. Eki zaryadtın' da awısıwın teris zaryadtan on' zaryadqa karay bag'ıtlang'an l vektorının' ja'rdeminde ta'ripleymiz. Zaryadların' usınday jubın *qos elektr polosı* yamasa *elektr dipoli* dep ataydı (grek tilinen di(s) – eki, eki ret ha'm polos – polos).



16-su'wret.

Bir tekli maydandag'ı elektr dipoli (bir tekli maydandag'ı dipol)

Elektr maydanında dipolge ta'sir etetug'in ku'shti tabamız. Maydandı bir tekli dep esaplaymız. Dipoldin' ushlarına shamaları boyınsha ten'ley bolğ'an $F = qE$ ku'shi tasir etedi (E arqalı maydannın' kernewligi belgilengen). Bul ku'shler qarama-qarsı ta'replerge qaray bag'ıtlang'an ha'm ku'shler jubın payda etedi. Bul qos ku'shlerdin' momenti M mınag'an ten':

$$M = qEl \sin \alpha. \quad (19)$$

Bul an'latpada α arqalı l vektorı menen maydannın' kernewligi E arasındag'ı muyesh belgilengen.

Biz qos ku'shlerdin' momentinin' q zaryadı menen l din' ko'beymesinen g'arezli ekenligin ko'remiz. Bul ko'beymeni *dipoldin' momenti* (dipoldin' elektr momenti) dep ataydı. Dipol momenti

$$p = ql \quad (20)$$

shamasına ten' bolğ'an vektor bolıp tabıladı. Bul moment l vektorı sıyaqlı teris zaryadtan on' zaryadqa qaray bag'ıtlang'an.

(19)-an'latpanı vektorlıq tu'rde bılay da jaza alamız:

$$M = [pE] \quad (21)$$

Bul an'latpada M arqalı ku'sh momenti vektorı belgilengen. Bul moment dipoldin' ko'sherin E maydannın' bag'ıtında burıwg'a tırısadı. Dipoldin' ten' salmaqlıg'ının' eki awhalı bar: dipol maydang'a parallel, dipol maydang'a antiparallel. Birinshi awhal ortıqlı, ekinshisi ornıqlı emes. Sonın' menen birge (21)-formula bir tekli emes maydandag'ı noqatlıq dipol ushın da durıs.

Sı sistemasındag'ı dipol momentinin' o'lishem birligi kulon · metr bolıp tabıladı.

4-§. Potentsial

Potentsiallar ayırması. Potentsiallar gradienti. Ekvipotentsial betler. Matematikalıq elektrostatikanın' ulıwmalıq ma'selesı. Puasson ha'm Laplas ten'lemeleri.

Elektr maydanının' berilgen nokatının' potentsialı dep usı noqatqa bir birlik on' zaryadtı sheksiz qashıqlıqtan ıqtıyarlı formag'a iye jol menen alıp kelgende islengen jumıstı tu'sinemiz. Al eki noqattın' potentsialların' ayırması (potentsiallar ayırması) dep bir birlik on' zaryadlang'an bo'leksheni bir noqattan ekinshi noqatqa ıqtıyarlı traektoriya boyınsha ko'shırgende islengen jumısqa ten'. Bul anıqlamalarda'ı «ıqtıyarlı traektoriya boyınsha ko'shırgende» degen so'zler elektr maydanında islengen jumıstın' joldın' formasınan g'a'rezsizliginen kelip shıqqan. «bir birlik on' zaryadtı sheksiz qashıqlıqtan ıqtıyarlı formag'a iye jol menen» degen so'zler potentsialdı anıqlawda qolaysızlıqlardı tuwdıradı. Sonlıqtan a'dette maydannın' qanday da bir ıqtıyarlı O noqatının' potentsialı dep qa'legen shamada'ı φ_0 potentsialın alıw mu'mkin. Bunday jag'dayda maydannın' barlıq noqatların' potentsialı bir ma'nisli anıqlanadı. Eger O noqatının' potentsialı bolg'an φ_0 potentsialının' shamasın bazı bir turaqlı shamag'a o'zgerssek, onda maydannın' barlıq noqatlarındag'ı potentsialları tap sol shamag'a o'zgeredi. Solay etip **potentsial additiv turaqlı shama da'lliginde anıqlang'an** degen juwmaqqa kelemiz. Bul turaqlınnın' ma'nisi a'hmiyetke iye emes. Sebebi fizikalıq qubılıslar elektr maydanların' kernewliginen g'a'rezli. Elektr maydanları bolsa potentsialdardın' absolyot ma'nisleri menen baylanıslı emes, al olardın' ken'isliktin' ha'r qıylı noqatları arasındag'ı ayırması menen g'a'na baylanıslı. Teoriyalıq fizikada ken'isliktin' sheksiz qashıqlatıl'g'an noqatının' potentsialı nolik potentsial dep qabıl etilgen (usı paragraftın' basındag'ı berilgen birinshi anıqlama usı jag'dayg'a baylanıslı). A'melde bolsa nolik potentsial retinde Jerdin' potentsialın qollanadı.

Maydan ku'shlerinin' q zaryadın baslang'ısh 1 noqatınan aqır'ı 2 noqatına ıqtıyarlı traektoriya boyınsha ko'shırgendegi jumıs

$$A_{12} = q(\varphi_1 - \varphi_2) \quad (22)$$

formulası ja'rdeminde esaplanadı. Bul formulada φ_1 ha'm φ_2 arqalı 1 ha'm 2 nokatların' potentsialları belgilengen.

Gauss ha'm SGSE sistemalarında potentsialdın' birliği retinde usı sistamadag'ı bir birlik zaryadtı ko'shırgende 1 erg jumıs islenetug'in eki noqat arasındag'ı potentsiallar ayırması qabıl etilgen. Bul birlik arnawlı atamag'a iye emes. Potentsialdın' a'meliy birliği **volt** bolıp tabıladı. Volt degenimiz bir kulon zaryadtı ko'shırgende bir djoul jumıs islenetug'in noqatlar arasındag'ı potentsiallar ayırması bolıp tabıladı. Shama menen mınaday qatnaslar ornlı boladı:

$$1 V = \frac{1 Dj}{1 K} = \frac{10^7 erg}{3 \cdot 10^9 SGSE zaryad birliği} = \frac{1}{300} SGSE potentsial birliği.$$

Potentsial menen elektr maydanı arasındag'ı baylanıstı tabamız. Meyli 1 ha'm 2 noqatları X ko'sherinin' boyınsha jaylasqan bir birine sheksiz jaqın noqatlar bolsın. Sonlıqtan $x_2 - x_1 = dx$. Bir birlik zaryadtı 1 noqatınan 2 noqatına ko'shırgendegi islengen jumıs $E_x dx$ qa ten'. Ekinshi ta'repten usı jumıs $\varphi_1 - \varphi_2 = -d\varphi$ ge ten'. Usı eki an'latpanı bir birine ten'ew arqalı $d\varphi = -E_x dx$ an'latpasın alamız. Tap usınday talqılawlar Y ha'm Z ko'sherleri ushın da ornlı boladı. Usının' na'tiydjesinde u'sh an'latpa alınadı:

$$E_x = -\frac{\partial \varphi}{\partial x}, \quad E_y = -\frac{\partial \varphi}{\partial y}, \quad E_z = -\frac{\partial \varphi}{\partial z}. \quad (23)$$

Bul an'latpalardı to'mendegidey vektorlıq formag'a biriktiriw mu'mkin:

$$\mathbf{E} = -\left(\frac{\partial\varphi}{\partial x}\mathbf{i} + \frac{\partial\varphi}{\partial y}\mathbf{j} + \frac{\partial\varphi}{\partial z}\mathbf{k}\right). \quad (24)$$

\mathbf{E} vektorlıq shama, sonlıqtan qawsırma ishinde turg'an shama da vektorlıq shama bolıp tabıladı. Bul shama φ *skalyarının' gradienti* dep ataladı ha'm $\text{grad}\varphi$ yamasa $\nabla\varphi$ arqalı belgilenedi (∇ shaması «nabla» operatori yamasa Gamilton² operatori dep ataladı ha'm $\nabla = \mathbf{i}\frac{\partial}{\partial x} + \mathbf{j}\frac{\partial}{\partial y} + \mathbf{k}\frac{\partial}{\partial z}$). Colay etip

$$\text{grad}\varphi \equiv \nabla\varphi = \frac{\partial\varphi}{\partial x}\mathbf{i} + \frac{\partial\varphi}{\partial y}\mathbf{j} + \frac{\partial\varphi}{\partial z}\mathbf{k}. \quad (25)$$

Endi (24)-formulanı qıska tu'rde bilayınsha jazamız:

$$\mathbf{E} = -\text{grad}\varphi = -\nabla\varphi. \quad (26)$$

A'melde elektr maydanların santimetrdegi volt yamasa metrdegi voltlerde an'latadı. Usıg'an sa'ykes to'mendegidey juwıq qatnaslar orınlı boladı:

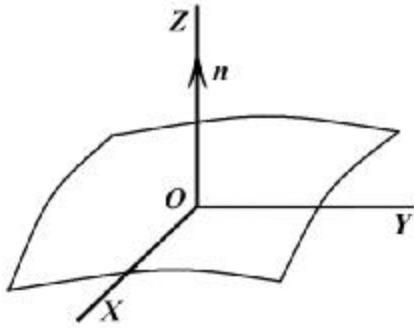
$$1 \frac{V}{\text{sm}} \approx \frac{1}{300} \text{ SGSE birlikleri}, \quad 1 \frac{V}{m} \approx \frac{1}{30\,000} \text{ SGSE birlikleri}$$

Gradienttin' geometriyalıq ma'nisin anıqlaw ushın **ekvipotentsial betler** yamasa **birdey potentsiallar betleri** tu'sinigin kirgizemiz. Ekvipotentsial bet dep barlıq noqatlarının' potentsialları birdey ma'niske iye bolg'an betti aytamız. Potentsialdın' ma'nisi bir ekvipotentsial betten ekinshi ekvipotentsial betke o'tkende g'ana o'zgeredi. Ekvipotentsial bete iqtıyarlı tu'rde O noqatın alamız ha'm bası usı noqatta jaylasqan koordinata sistemasın kirgizemiz (17-su'wret). Z ko'sherin \mathbf{n} normalı bag'ıtına parallel ha'm φ potentsialdın' o'siw bag'ıtı menen bag'ıtlas etip alamız. Usı bag'ıtı \mathbf{n} normalının' on' bag'ıtı etip qabıl etemiz. Bunday jag'dayda XY koordinata tegisligi ekvipotentsial betke tu'sirilgen urınba tegislik penen betlesedi. Bunday jag'dayda O noqatında $\frac{\partial\varphi}{\partial x} = \frac{\partial\varphi}{\partial y} = 0$. Sonın' menen birge $\mathbf{n} = \mathbf{k}$, $\frac{\partial\varphi}{\partial z} = \frac{\partial\varphi}{\partial n}$. Bunday jag'dayda (25)-formula

$$\text{grad}\varphi = \frac{\partial\varphi}{\partial n}\mathbf{n}. \quad (27)$$

Demek φ funktsiyası \mathbf{n} normalının' bag'ıtında en' tez o'sedi eken. Sonlıqtan mınaday anıqlama beriwge boladı: $\varphi(x, y, z)$ *funktsiyasının' gradienti bul funktsiyanın' maksimalıq o'siw bag'ıtındag'ı vektor bolıp tabıladı, al onın' uzınlıg'ı sol $\varphi(x, y, z)$ funktsiyasının' sol bag'ıttag'ı tuwındısına ten'*. Bul anıqlamanın' artıqmashlıg'ı sonnan ibarat, bul anıqlama *invariantlıq xarakterge* iye ha'm qanday da bir koordinatalar sistemasın saylap alıwdan g'a'rezli emes.

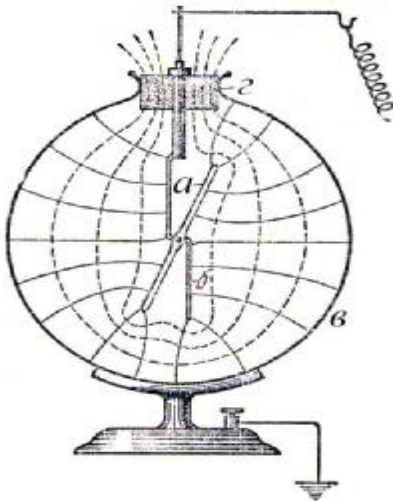
² Gamilton (1805-1865) Angliyanın' belgili fizigi bolıp tabıladı.



17-su'wret.

Gradienttin' geometriyalıq ma'nisin tu'sindiriwge arnalg'an su'wret.

E vektorı φ potentsialının' gradientine qarama-qarsı bag'ıtlang'an. Solay etip elektrlik ku'sh sıziqları φ en' tez o'setug'ın bag'ıttag'ı sıziqlar bolıp tabıladı eken. Bul sıziqlar ekvipotentsial betlerge perpendikulyar. Sonlıqtan ekvipotentsial betler maydandı ko'rgizbeli etip su'wretlew ushın qolaylı betler bolıp tabıladı. Bul jag'day mısıl retinde 18-su'wrette berilgen ko'rsetilgen (haqıyqatında 18-su'wrette strelkalı elektrometr ha'm elektrometr ishindegi ekvipotentsial betler menen elektr maydanının' ku'sh sıziqları sa'wlelendirilgen).



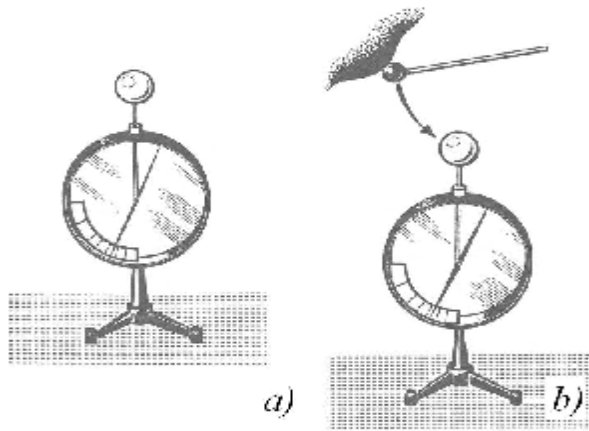
18-su'wret.

Strelkalı elektrometr.

Punktir sıziqlar ja'rdeminde ekvipotentsial betlerdin' sızilma tegisligi menen kesilisiw sıziqları sa'wlelendirilgen. Al tutas sıziqlar elektr maydanının' ku'sh sıziqları bolıp tabıladı. Ekvipotentsial betlerge ku'sh sıziqlardın' perpendikulyarlıg'ı bul su'wrette anıq ko'rsetilgen.

Elektr zaryadların tabıw ushın arnalg'an en' a'piwayı a'sbap jen'il o'tkizgish folga yamasa strelka bekitilgen vertikal bag'ıttag'a metall sterjen yamasa strelka xızmet etedi (18-a su'wret). Zaryad joq bolg'anda folga yamasa strelka vertikal bag'ıtta sterjenge parallel bolıp turadı Zaryad bar bolg'anda birdey zaryadlar arasındag'ı iyteriw ku'shleri folganı yamasa strelkanı bazı bir mu'yeshke buradı. Solay etip a'sbap zaryadtın' bar yamasa joq ekenligin anıqlaytug'ın asbap retinde xızmet etedi. Bunday a'sbaptı **elektroskop** dep ataymız. Zaryadtın' mug'dları ko'p bolsa strelkanın' vertikal bag'ıttan awısıw mu'yeshi de u'lken boladı. Bul jag'day elektroskoptın' strelkasının' burılıw mu'yeshi boyınsha graduırovkalaw mu'mkinshiligin beredi. Usınday jollar menen zaryadtın' mug'darın anıqlaw mu'mkin. Elektr zaryadının' mug'darın sanlıq jaqtan anıqlawg'a mu'mkinshilik beretug'ın graduırovkalang'an elektroskoptı **elektrometr** dep ataydı.

Endi matematikalıq elektrostıkanın' ulıwmalıq ma'selesı menen tanısıwdı baslaymız. Ken'isliktegi koordinatalardıń funksiya sıpatında potentsial φ berilgen bolsa, onda (26)-formula ja'rdeminde elektr maydanının' kernewligin esaplaw mu'mkin. Ma'selenin' tu'sinikli bolıwı ushın biz da'slep dielektriklerdin' polyarizatsiya ha'm dielektrikler ushın Ostrogradskiy-Gauss teoreması menen qısqasha tanısamız. Biraq bul ma'sele keyingi lektsiyalarda tolıq bayanlanadı.



18-a su'wret.

Elektroskop penen elektrometrin' sxeması (a) ha'm o'tkizgishtin' betindegi zaryadtın' tıg'ızlıg'ının' bettin' iymekligine g'a'rezligin elektrometrin' ja'rdeminde u'yreniw sxeması (b).

Biz (17-1) formulasın eske tu'siremiz ($N = \oint (\mathbf{E} d\mathbf{S}) = 4\pi q$). Bul formuladag'ı q vakuumde jaylasqan noqatlıq zaryadtın' mug'darı edi. Eger dielektriklerde polyarizitsiyanın' saldarınan q_{pol} polyarizatsiyalıq zaryadların' payda bolatug'ınlıg'ın esapqa alsaq, onda (17-1) formulasın bılayınsha ko'shirip jazamız:

$$\oint E_n dS = 4\pi(q + q_{pol}). \quad (28)$$

Biz to'mende

$$q_{pol} = - \oint P_n dS = - \oint (\mathbf{P} d\mathbf{S}) \quad (29)$$

ekenligin ko'remiz. Bul formulada \mathbf{P} arqalı dielektriktin' (izolyatordın') polyarizatsiya vektori belgilengen. **Polyarizatsiya vektori dep polyarizatsiyalang'an dielektriktin' ko'lem birliginin' dipol momentine aytamız.** (28)-formulag'a (29)-formuladan q_{pol} dı qoyıw arqalı

$$\oint (E_n + 4\pi P_n) dS = 4\pi q. \quad (30)$$

formulasına iye bolamız. Eger

$$\mathbf{D} = \mathbf{E} + 4\pi \mathbf{P} \quad (31)$$

An'latpası ja'rdeminde anıqlanatug'ın elektr induktsiyası (awısıwı) vektorın kirigzetug'ın bolsaq, onda

$$\oint D_n dS = 4\pi q \quad (32)$$

an'latpasın alamız. Bul dielektriklerdegi elektr maydanı ushın jazılğ'an Ostrogradskiy-Gauss teoreması bolıp tabıladı. Bul formulada tuyıq bet araqalı \mathbf{D} vektorının' ag'ısınını **tek erkin zaryadlar ta'repinen anıqlanatug'ınlıg'ı** ko'rinip tur. Bul jag'day \mathbf{D} vektorınının' kirgiziliwinin' sebebin tu'sindiredi. Al vakuumde bolsa \mathbf{D} vektori menen \mathbf{E} vektori birdey ma'niske iye boladı.

Differentsial formada (32)-an'latpa

$$\operatorname{div} \mathbf{D} = 4\pi\rho \quad (33)$$

tu'rine iye boladı. Bul an'latpada ρ arqalı erkin zaryadların' ko'lemlik tıg'ızlıg'ı belgilengen. (32) menen (33)-an'latpalar tek elektrostatikada g'ana durıs bolıp qoymastan, olar barlıq waqıtka g'a'rezli bolg'an maydanlar ushın da qollanıladı. Bul teoremlar Maksveldin' fundamentallıq elektrodinamikalıq ten'lemeler sistemasının' quramına kiredi.

Joqarıda ayılğ'anlardan elektrostatikanın' tiykarg'ı ma'selesı elektr potentsialı φ , elektr maydanının' kernewligi vektorı \mathbf{E} menen induksiya vektorı \mathbf{D} arasındag'ı baylanıslardı tabıw bolıp tabıladı. Bul ma'seleni sheshiw barısında bir qansha qıyınshılıqlarg'a ushırasıw mu'mkin. Mısalı baylanısqa zaryadlar, o'tkizgishlerdin' betindegi erkin elektr zaryadların' tarqalıwı barlıq waqıtta belgili bola bermeydi, ha'tte olardıń o'zlerin anıqlawg'a tuwrı keledi. Sonlıqtan matematikalıq elektrostatikanın' ulıwmalıq ma'selesı to'mendegidey etip du'ziledi.

Dielektriklik ortalıqta barlıq o'tkizgishlerdin' jaylasıwları ha'm formaları berilgen. Ortalıqtın' o'tkizgishler arasındag'ı dielektriklik sin'irgishligi ε ha'm dielektriklin' barlıq noqatlarındag'ı erkin elektr zaryadların' ko'lemlik tıg'ızlıg'ı belgili bolıwı kerek. Usının' menen bir qatar to'mendegilerdin' birewi belgili bolıwı kerek: a) barlıq o'tkizgishlerdin' potentsialları, b) barlıq o'tkizgishlerdin' zaryadları, v) bazı bir o'tkizgishlerdin' zaryadları ha'm basqa o'tkizgishlerdin' potentsialları. Usı ayılğ'anlar tiykarında ken'isliktin' barlıq noqatlarındag'ı elektr maydanının' kernewligin ha'm barlıq o'tkizgishlerdin' betindegi elektr zaryadların' tarqalıwın anıqlaw kerek.

Ma'seleni sheshiw ken'isliktegi koordinatalar x, y, z lerdin' funktsiyası sıpatında potentsial φ di anıqlawg'a alıp klinedi. Usı funktsiyanı qanaatlandırıtug'ın differentsial ten'lemenı tabamız. Onın' ushın (33)-ten'leme bolg'an $\operatorname{div} \mathbf{D} = 4\pi\rho$ ten'lemesin bılayınsha jazamız:

$$\operatorname{div}(\varepsilon \operatorname{grad} \varphi) = -4\pi\rho \quad (34)$$

yamasa koordinatalıq formada

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) = -4\pi\rho. \quad (35)$$

Eger dielektrik bir tekli bolsa (ε koordinatalardan g'a'rezsiz), onda

$$\operatorname{div} \operatorname{grad} \varphi = -\frac{4\pi\rho}{\varepsilon} \quad (36)$$

yamasa

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = -\frac{4\pi\rho}{\varepsilon}. \quad (37)$$

Endi **Laplas operatori** yamasa **laplasian** dep atalatug'ın operator kirgizemiz:

$$\Delta \equiv \nabla^2 \equiv \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}. \quad (38)$$

Bunday jag'dayda

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} \equiv \Delta \varphi \equiv \nabla^2 \varphi. \quad (39)$$

ha'm (37)-an'latpa qisqa tu'rde bilaynsha jaziladi:

$$\Delta \varphi = -\frac{4\pi\rho}{\varepsilon}. \quad (40)$$

Bul ten'leme Puasson ten'lemesi dep ataladi. Erkin zaryadlar bolmag'an jag'dayda ($\rho = 0$) bul ten'leme Laplas ten'lemesine aylanadi:

$$\Delta \varphi = 0. \quad (41)$$

Uliwmaliq elektrostatikaliq ma'seleni sheshiw joqarida keltirilgen barliq sha'rtlerdi qanaatlandiratuqin (34)-ten'lemeni sheshiwge alip klinedi. Bunday ma'selenin' bir sheshimnen ko'p sheshimge iye bolmaytug'inlig'in ko'rsetiwge boladi.

5-§. Elektr maydanindag'i o'tkizgishler

Elektr siyimlig'i. Siyimliq birlikleri. Kondensatorlardin' siyimlig'i. Elektr maydanı energiyası ha'm onin' tıg'izlig'i.

Biz da'slep barliq zatlardag'i elektr maydanı haqqında ulıwma tu'rde ga'p etemiz. Keyin elektr maydanindag'i o'tkizgishlerge o'temiz.

Atom yadrolarınin' ha'm elektronlardın' o'lshepleri atomlardın' o'zlerinin' o'lsheplerinen shama menen ju'z min'day ese kishi. Dene iyelep turg'an ken'isliktin' og'ada kishi bo'legin (shama menen 10^{-15} bo'legin) zaryadlang'an bo'leksheler iyeleydi. Denenin' basqa bo'limlerin vakuum iyeleydi. Bul ken'islikte atom yadroları menen elektronlar elektromagnit maydanların qoziradı (payda etedi). Atomlar yadroları menen elektronlar ortasında, sonın' menen usı bo'leksheler ishinde maydan ken'islik boyınsha da, waqıt boyınsha da og'ada quramalı ha'm u'lken o'zgerislerge ushıraydı. Bunday maydandı **mikroskopiya**lıq maydan yamasa **mikromaydan** dep ataydı. Elektr zaryadlarınin' tıg'izlig'i da usınday u'lken o'zgerislerge ushıraydı. Tıg'izliqtin' ma'nisi yadrolar menen elektronlardın' ishinde og'ada u'lken, al olar arasındag'i ortalıqlarda nolge ten'. Zaryadlardın' usınday tıg'izlig'i **mikroskopiya**lıq tıg'izliq yamasa **mikro**tıg'izliq dep ataladı. Mikroskopiya liq shamalar E_{mikro} , ρ_{mikro} ha'm tag'i basqa shamalar menen anıqlanadı. Bul shamalardı zatlarg'a sinap ko'riletug'in zaryadtı kirgiziw arqalı o'lshepw mu'mkin emes. Zaryadlardın' en' kishisi elektronnın' zaryadı bolg'an e elementar zaryadı bolıp tabıladı. Al bunday zaryad payda etken elektr maydanı mikromaydandı ha'm atomdag'i elektronlardın' jaylasıwların ku'shli o'zgetken bolar edi. Sonlıqtan elektr ha'm magnetizmdi u'yreniwde E_{mikro} , ρ_{mikro} ha'm tag'i basqa da mikroskopiya liq shamalardı paydalanıw bazı bir qıyınshılıqlardı payda etken bolar edi. Ha'tte sol E_{mikro} , ρ_{mikro} ha'm tag'i basqa da mikroskopiya liq shamalardı ja'rdeminde maydandı ta'riplew mu'mkinshiliginin' printsipliı jaqtan mu'mkin ekenligi de gu'ma'n payda etedi. Biraq G.A.Lorentts (1853-1928) o'z jumıslarında mikromaydanlar haqqındag'i ko'z-qaraslardan shıg'ıp denelerdegi makroskopiya liq protsesslerdi ta'riplewge mu'mkinshilik beretug'in ten'lemelerge keliwge bolatug'inlig'in ko'rsetti.

Biz endigiden bilay mikroskopiya liq maydanlardı paydalanbaymız. Sonlıqtan da'slep makroskopiya liq maydan bolg'an E ge da'lirek sanlıq anıqlama beremiz. Endigiden bilay E

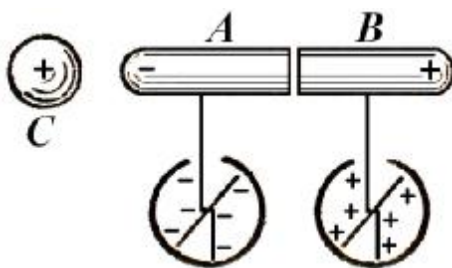
haqqında ga'p etkenimizde ken'isliktin' sheksiz kishi ko'lemleri boyınsha ortashalang'an E_{mikro} mikromaydandı na'zerde tutamız. Ken'isliktin' bazı bir noqatındag'ı makroskopiyalıq E maydandı esaplag'anımızdı usı noqat ishinde jaylasqan sheksiz kishi V ko'lemin alıwımız kerek. Bunnan keyin E_{mikro} mikromaydandı usı ken'islik boyınsha integrallaymız ha'm tabılg'an shamanı V ko'lemine bo'lemiz, yag'nıy

$$E = \frac{1}{V} \int_V E_{mikro} dV \quad (42)$$

Makroskopiyalıq tıg'ızlıq ta, basqa da makroskopiyalıq shamalar da tap usınday jollar menen anıqlanadı.

Endi elektr maydanıdag'ı o'tkizgishlerdi qarawımızg'a boladı.

O'tkizgishlerde (elektr tog'ın o'tkizgishlerde) erkin qozg'ala alatug'ın elektronlar bolıp (bunday elektronlardı erkin elektronlar dep ataydı), olar usı o'tkizgish iyelep turg'an ko'lem sheklerinde qa'legen aralıqlarg'a qozg'ala aladı. Sonlıqtan elektr maydanı ta'repinen payda etilgen induktsiyalıq zaryadlar denenin' qarama-qarsı ta'replerinde bir birinen mexanikalıq tu'rde ayırıp alınıwı mu'mkin. Mısal retinde izolyator uslag'ıshlarga bekıtilgen ja'ne elektroskoplar menen tutastırılğ'an eki A ha'm B tsilindrin alamız (19-su'wret). Usı eki tsilindrı bir birine tiygenshe jaqınlatamız. Eger C zaryadlang'an sharın tsilindrlerge alıp kelip tiygizsek, onda eki elektroskoptın' strelkaları awısadı. C sharın alıp ketkende strelkalardıń awısıwı jog'aladı. A ha'm B tsilindrlerin C sharı bar jag'dayda bir birinen ajıratamız ha'm bunnan keyin C sharın alıp ketemiz. A ha'm B dag'ı, sonday-aq tsilindrı uslap turg'ıshlarda ha'm elektroskoptın' strelkalardıng'ı elektr zaryadları saqlanadı. Eger C sharı on' zaryadlang'an bolsa, onda A tsilindri teris zaryadlang'an, al B tsilindri on' zaryadlang'an bolıp shıg'adı. Bunın' durısılg'ına terige su'ykelgen shiyshe tayaqshanı alıp tekserip ko'riwge boladı (bunday tayaqshanın' on' zaryad penen zaryadlanatug'ınlıg'ın eske tu'siremez). Eger shiyshe tayaqshanı A tsilindrine tiygizsek, onda elektroskoptın' strelkasının' awısıwı kishireydi. Al shiyshe tayaqshanı B tsilindrine tiygizsek, onda elektroskoptın' strelkası ja'ne de ko'birek shamag'a awısadı.



19-su'wret.

A ha'm B tsilindrlerinin' on' zaryad penen zaryadlang'an C sharının' ta'sirinde zaryadlanıwın demonstratsiyalaytug'ın su'wret.

Eger bir tekli o'tkizgishtin' ishinde makroskopiyalıq elektr maydanı bar bolg'anda, onda bunday maydan elektronlardın' qozg'alısın ju'zege keltirgen bolar edi. Usının' saldarınan o'tkizgishte elektr tog'ı payda bolg'an ha'm zaryadlardın' ten' salmaqlıg'ı buzılğ'an bolar edi. Ten' salmaqlıq haldın' orın alıwı ushın (bir tekli) o'tkizgishtin' ishindegi barlıq noqatlarda makroskopiyalıq maydan E nin' nolge ten' bolıwı sha'rt. Usının' saldarınan o'tkizgish ishinde E vektorının' divergentsiyası da, usıg'an sa'ykes Ostrogradskiy-Gauss teoreması boyınsha o'tkizgish ishindegi ortasha ko'lemlik zaryad ta nolge ten' boladı. ***Solay etip ten' salmaqlıq halda bir tekli o'tkizgish ishindegi elektr zaryadların' ko'lemlik tıg'ızlıg'ı nolge ten'. Elektr zaryadları o'tkizgishtin' tek betinde g'ana (al ishinde emes) jaylasadı.***

A'llette elektr zaryadlarının' o'tkizgishtin' tek betinde g'ana jaylasıw sebebi zaryadlar arasında tartısıw yamasa iyterisiw ku'shinin' ta'sir etiwiniń sebebi bolıp tabıladı. Meyli o'tkizgishtin' ishinde elektr zaryadları payda bolg'an bolsın. İrnshou teoremasına sa'ykes olardıń o'tkizgish ishindegi statikalıq konfiguratsiyasınıń hesh qaysısı da ornıqlı bola almaydı. Ha'r qıylı belgige iye zaryadlar arasındag'ı tartılıs ku'shleri olardıń bir birine jaqınlasıwına ha'm neytralizatsiyasına (elektrlik jaqtan neytral halg'a o'tiwine) alıp keledi. Al zaryadlar arasındag'ı tartılıs ku'shleri olardıń bir birinen mu'mkin bolg'anınsha u'lken qashıqlıqlarg'a tarqalıwına, usınıń aqıbetinde o'tkizgishlerdin' betlerinde jaynalıwına alıp keledi. Demek o'tkizgish betindegi zaryadlardın' tıg'ızlıg'ı o'tkizgishtin' en' qashıqtag'ı o'tkirlengen ushlarında u'lken boladı degen so'z. Bul jag'daydı an'sat tekserip ko'riwge boladı.

Solay etip o'tkizgishtegi elektr zaryadlarının' ten' salmaqlıg'ı ushın to'mendegidey sha'rtlerdin' orınlanıwı kerek:

1. O'tkizgishtin' ishindegi barlıq noqatlarda elektr maydanının' kernewligi nolge ten' boladı, yag'nıy $E = 0$. (26)-an'latpadag'ı $E = -\nabla\varphi$ ten'ligine sa'ykes o'tkizgish ishinde potentsial φ turaqlı ma'niske iye boladı, yag'nıy $\varphi = const$.
2. O'tkizgishtin' betinde elektr maydanının' kernewligi E barlıq noqatlarda betke perpendikulyar bag'ıtlang'an boladı, yag'nıy $E = E_n$. Demek zaryadlardın' ten' salmaqlıq jag'dayında o'tkizgishtin' beti ekvipotentsial bet bolıp tabıladı.

Elektr sıyımlıg'ı. O'tkizgishke berilgen elektr zaryadı usı o'tkizgishtin' ishinde elektr maydanının' kernewligi nolge ten' bolatug'ınday bolıp onın' betinde tarqaladı. Eger zaryadlang'an o'tkizgishke ja'ne de bazı bir mug'dardag'ı elektr zaryadları beriletug'ın bolsa, onda bul zaryad ta o'tkizgishtin' betinde o'tkizgishtin' ishindegi barlıq noqatlarında elektr maydanı nolge ten' bolatug'ınday bolıp tarqaladı. Usı jag'day tiykarında o'tkizgishtin' potentsialı og'an berilgen zaryadtın' mug'darına tuwrı proporsional degen juwmaq shıg'aramız. Haqıykatında da zaryad mug'darının' bazı bir shamag'a ko'beytiliwi o'tkizgishtin' a'tirapındag'ı noqatlardag'ı elektr maydanının' kerewliginin' de tap sonday shamag'a o'siwin ju'zege keltiredi. Usıg'an sa'ykes birlik zaryadtı sheksizlikten usı o'tkizgishke alıp kelgende islengen jumıs – potentsial da tap sonday shamag'a artadı. Solay etip o'tkizgish ushın (a'llette basqa o'tkizgishlerden u'lken qashıqlıqlarda jaylasqan o'tkizgish na'zerde tutılmaqta):

$$q = C\varphi. \quad (43)$$

Potentsial menen zaryad mug'darı arasındag'ı proporsionallıq koeffitsienti C o'tkizgishtin' elektr sıyımlıg'ı (qısqa tu'rde tek sıyımlıg'ı) dep ataladı. (43)-an'latpadan

$$C = \frac{q}{\varphi} \quad (44)$$

ekenligine iye bolamız. Solay etip *o'tkizgishtin' sıyımlıg'ı dep onın' potentsialın bir birlikke arttıratug'ın zaryadtın' mug'darın tu'sinedi ekenbiz*. Vakuumde C koeffitsientinin' ma'nisi o'tkizgishtin' tek o'lshepleri menen formasınan g'ana g'a'rezli boladı. Sonlıqtan (44)-formula menen anıqlang'an sıyımlıqtı *basqa denelerden ayırıp alıng'an o'tkizgishtin' sıyımlıg'ı* dep ataymız. Al bir tekli dielektrikte jaylasqan radiusı r ge ten' shardın' sıyımlıg'ı $\varphi = q/\varepsilon r$ shamasına ten' boladı, sonlıqtan

$$C = \varepsilon r. \quad (45)$$

Bul an'latpada ε arqalı dielektriktin' dielektrik sin'irgishligi belgilengen.

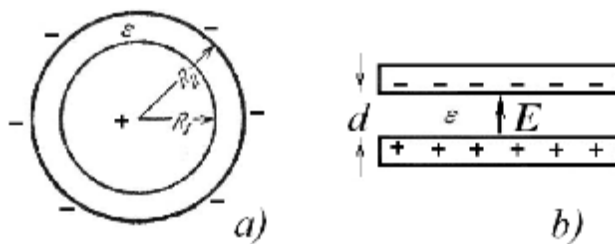
Sıymılıqtın' birligi retinde 1 Kl zaryad berilgende potentsialı 1 V ke o'zgeretug'in o'tkizgishtin' sıymılıg'ı qabil etilgen. Sıymılıqtın' usınday birligi **farada** dep ataladı.

Gauss sistemasında o'tkizgish shardın' sıymılıg'ı $C = \varepsilon R$ tu'rine iye. Bul formuladag'ı ε o'lshe m birligi joq shama bolganlıqtan sıymılıq uzınlıqtın' birligindey birlikke iye (sm). usıg'an baylanıslı sıymılıq birligi retinde vakuumde jaylasqan radiusı 1 sm bolg'an shardın' sıymılıg'ı alıng'an. Sıymılıqtın' bul birligin santimetr dep ataydı. (44)-formulag'a sa'ykes

$$1 F = \frac{1 Kl}{1 V} = \frac{3 \cdot 10^9}{1/300} SGSE - \text{sıymılıq birligi} = 9 \cdot 10^{11} sm.$$

Demek 1 F sıymılıqqa radiusı $9 \cdot 10^{11} sm = 9 \cdot 10^9 metr$ bolg'an shar iye bolg'an bolar edi. Bul shama Jerdin' radiusınan 1500 ese u'lken. Demek farada og'ada u'lken shama. Sonlıqtan a'melde faradanın' u'leslerinin' birine ten' shamalar qollanıladı. Olar millifarada ($1 mF = 10^{-3} F$), mikrofarada ($1 mkF = 10^{-6} F$), nanofarada ($1 nF = 10^{-9} F$) ha'm pikofarada ($1 pF = 10^{-12} F$).

Kondensatorlar. Basqa denelerden qashıqlatılğ'an o'tkizgishler ju'da' kishi sıymılıqqa iye. Mısalı radiusı Jerdin' radiusına ten' bolg'an o'tkizgish 700 mkF g'a ten' sıymılıqqa iye bolg'an bolar edi (Demek Jerdin' potentsialın 1 V ke joqarılatıw ushın kerek bolg'an zaryadtın' mug'darı $q = C\varphi = 7 \cdot 10^{-6} F \cdot 1 V = 7 \cdot 10^{-6} Kl$ elektr zaryadı g'ana kerek boladı. Bul shama menen $\frac{(7 \cdot 10^{-6} Kl)}{(1,6 \cdot 10^{-19} Kl)} = 4,4 \cdot 10^{13}$ protonnıń zaryadı. Al usı protonlardın' massası $1,67 \cdot 10^{-24} \cdot 4,4 \cdot 10^{13} gramm = 7,3 \cdot 10^{-11} gramm$ g'ana bolar edi. Usıg'an baylanıslı basqa denelerden baylanıssız alıng'an jeke deninin' elektr sıymılıg'ı og'ada kishi boladı eken, al elektr sıymılıg'ı u'lken bolg'an o'tkizgishti alıw ushın onı basqa denelerden alısqa alıp ketpew kerek eken degen juwmaq shıg'aramız. **Kondensatorlar** dep atalatug'ın du'zilislardin' tiykarında o'tkizgishlerdin' basqa deneler menen jaqınlasqanda sıymılıg'ının' artıw fakti jatadı. A'dette **kondensator dep bir birinen ajratılğan (izolyatsiyalang'an) eki o'tkizgishke aytamız.** Sol o'tkizgishlerdin' formasına baylanıslı shar ta'rizli, tegis ha'm basqa da kondensatorlardın' bolıwı mu'mkin (20-su'wret).



20-su'wret. Shar ta'rizli ha'm tegis kondensator dın' su'wretleniwi.

Kondensator dı payda etiwshi o'tkizgishlerdi kondensator dın' astarları dep ataydı. Arasında bir tekli elektr maydanın payda etiw ushın astarlardı arnawlı formag'a iye etip sog'adı. 8-su'wrette tegis kondensator dın' elektr maydanı, al 14-su'wrette tegis kondensator dın' ishindegi elektr maydanın' kondensator dın' zaryadlang'an eki astarı payda etken maydanlardın' qosındısına ten' bolatug'ınıg'ı ko'rsetilgen edi. Bir tekli maydanlardı a'dette bir birine jaqın turg'an tegis eki plastinka, eki kontsentrlik sfera (orayları bir noqatta jaylasqan eki sfera), eki koaksiallıq tsilindr (ko'sherleri bir bolg'an eki tsilindr) payda ete aladı. Usıg'an sa'ykes tegis, sferalıq ha'm tsilindrlik kondensatorlar boladı.

Kondensatordın' tiykarg'ı xarakteristikası bolıp onın' sıyımlıg'ı bolıp tabıladı. **Kondensatordın' sıyımlıg'ı dep onın' astarları arasındag'ı potentsiallar ayırmasın bir birlikke arttırıw ushın kerek bolg'an elektr zaryadlarının' mug'darına aytadı.** Yag'nıy

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2}. \quad (46)$$

A'dette potentsiallar ayırması $\varphi_1 - \varphi_2$ bolg'an **shamanı sa'ykes noqatlar arasındag'ı kernew dep ataydı.** Biz kernewdi U ha'ripi menen belgileyemiz. Demek kondensatordın' sıyımlıg'ı dep

$$C = \frac{q}{U} \quad (47)$$

shamasın da aytadı ekenbiz.

Tegis kondensatordın' sıyımlıg'ı:

$$C = \frac{\varepsilon S}{4\pi d} \quad (48)$$

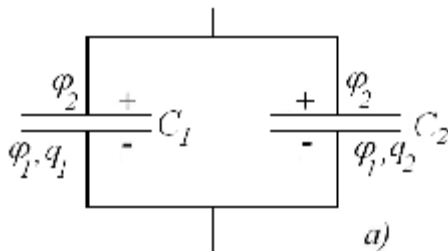
formulası menen an'latıladı. Bul an'latpada S arqalı kondensator astarının' maydanı, d arqalı olar arasındag'ı qashıqlıq, ε arqalı astarlar arasındag'ı ortalıqtın' dielektriklik sin'irgishligi belgilengen.

Shar ta'rizli kondensatordın' sıyımlıg'ı bolsa

$$C = \varepsilon \frac{R_1 R_2}{R_2 - R_1} \quad (49)$$

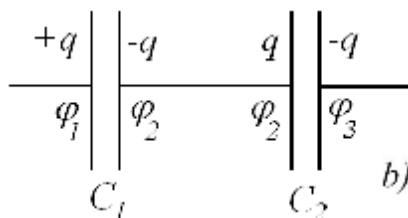
shamasına ten'. Bul an'latpada R_1 ha'm R_2 ler arqalı eki kontsentrlik sferanın' radiusları belgilengen. Bul radiuslardı shama menen o'z-ara ten' ha'm $R_2 - R_1 = d$ dep belgilesek, onda $S \approx 4\pi R_1^2 \approx 4\pi R_2^2 \approx 4\pi R_1 R_2$. Na'tiyjede (49)- formula (48)-formulag'a aylanadı.

Endi kondensatorlardı o'z-ara jalg'aw ma'selesı menen tanısamız. Kondensatorlardı bir biri menen parallel ha'm izbe-iz jalg'aw mu'mkin (21-su'wret). Geypara jag'daylarda parallel ha'm izbe-iz jalg'awdın' kombinatsiyaları da qollanıladı.



21-su'wret.

Kondensatorlardı bir biri menen parallel (a) ha'm izbe-iz (b) tutastırıw.



O'z ara parallel etip tutastirilg'anda kondensatorlardin' sıyımlıqları qosıladı. Cebebi bul jag'dayda eki kontensatordın' astarları arasındag'ı potentsiallar ayırması birdey, al birdey astarlardın' zaryadları qosıladı: $q = q_1 + q_2$. Bul shamanı potentsiallar ayırmasına bo'liw arqalı $C = C_1 + C_2$ formulasın alamız.

Al sıyımlıqları C_1 ha'm C_2 bolg'an kondensatorlardı izbe-iz tutastırısq, onda ortada jaylasqan bir biri menen tutastirilg'an astarlar ta'sir arqalı zaryadlanadı ha'm sonlıqtan olardın' zaryadları birdey, al belgileri qarama-qarsı. Usının' saldarınan eki kondensatordın' zaryadları birdey. Potentsiallar ayırması qosıladı $\varphi_1 - \varphi_3 = (\varphi_1 - \varphi_2) + (\varphi_2 - \varphi_3)$. Al

$$\varphi_1 - \varphi_3 = \frac{q}{C}, \quad \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{q}{C_1}, \quad \varphi_2 - \varphi_3 = q/C_2$$

bolg'anlıqtan

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$

Formulası alınadı. Bunnan $C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$ an'latpası alınadı. Demek izbe-iz tutastirilg'anda sıyımlıq kemeyedi eken. Eger $C_1 = C_2$ bolsa, onda $C = \frac{C_1}{2}$. Sıyımlıqları ha'r qıylı u'sh kondensatordı izbe-iz jalg'asaq, onda $C = \frac{C_1 C_2 C_3}{C_1 C_2 + C_2 C_3 + C_1 C_3}$. Eger kondensatorlardın' sıyımlıqları o'z-ara ten' bolsa, onda $C = \frac{C_1}{3}$.

Zaryadlar sistemasının' ta'sirlesiw energiyası. q_1 ha'm q_2 noqatlıq zaryadları arasındag'ı ta'sir etiw ku'sh Kulon nızamına sa'ykes $F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2}$ shamasına ten' (2-formula). Eger usı ku'shtin' shamasın r ge ko'beytsek, onda eki zaryad arasındag'ı tu'sirlesiw energiyası (potentsial energiya) ushın an'latpa alamız, yag'nıy

$$E_p = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r} \quad (50)$$

shaması q_1 ha'm q_2 noqatlıq zaryadları arasındag'ı potentsial energiya E_p bolıp tabıladı. Endi N dana noqatlıq zaryadtan turatug'ın sistemanı qaraymız. Bunday sistemadag'ı ta'sirlesiw energiyası jup-juptan aling'an zarıdlardın' o'z-ara tasirlesiw energiyaların' qosındısınan turadı:

$$E_p = \frac{1}{2} \sum_{i \neq k} E_{pik}(r_{ik}). \quad (51)$$

(50)-formulag'a sa'ykes

$$E_{pik} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_i q_k}{r_{ik}}. \quad (52)$$

Bul an'latpanı (51) ge qoyıp

$$E_p = \frac{1}{2} \sum_{i \neq k} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_i q_k}{r_{ik}} \quad (53)$$

an'latpasına iye bolamız ha'm Gauss sistemasında 4π ko'beytiwshisinin' bolmaytug'inlig'in atap o'temiz.

(53)-formulada summalaw barlıq i ha'm k indeksleri boyınsha ju'rgiziledi. Eki indekste 1 den baslap N ge shekemgi ma'nislardi qabil etedi. A'lbette i ha'm k indeksleri birdey bolatug'in qosılıwshılar itibarg'a alınbaydı (bul bir zaryadtın' o'zi menen o'zi arasındag'ı ta'sirlesiwge sa'ykes keledi). (53)-formulag'a mınaday tu'r beremiz:

$$E_p = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N q_i \sum_{\substack{k=1 \\ (k \neq i)}}^N \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_k}{r_{ik}} \quad (54)$$

Bunday jag'dayda

$$\varphi_i = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{\substack{k=1 \\ (k \neq i)}}^N \frac{q_k}{r_{ik}} \quad (55)$$

shaması q_i zaryadı turg'an noqattag'ı usı q_i zaryadının' basqa barlıq zaryadlar payda etken potentsial bolıp tabıladı. Bul jag'daydı itibarg'a alıp ta'sirlesiw energiyası ushın

$$E_p = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N q_i \varphi_i \quad (56)$$

an'latpasın alamız. Usı an'latpalardan paydalang'an halda **zaryadlang'an o'tkizgishtin' energiyasın** esaplawdı baslaymız.

O'tkizgishtin' beti ekvipotentsial bet bolıp tabıladı. Sonlıqtan Δq zaryadına iye bettin' barlıq noqatların' potentsialları birdey ma'niske iye ha'm ol o'tkizgishtin' o'zinin' potentsialına ten'. (56)-formuladan paydalanıp zaryadlang'an o'tkizgishtin' energiyası ushın

$$E_p = \frac{1}{2} \sum \varphi \Delta q = \frac{1}{2} \varphi \sum \Delta q = \frac{1}{2} \varphi q \quad (57)$$

an'latpasın jaza alamız. Endi (44)-formulanı esapqa alsaq ($C = \frac{q}{\varphi}$), onda

$$E_p = \frac{\varphi q}{2} = \frac{q^2}{2C} = \frac{C\varphi^2}{2} \quad (58)$$

formulası zaryadlang'an o'tkizgishtin' energiyasın beredi.

Zaryadlang'an kondensatordın' energiyası. A'piwayı talqılawlar astarları arasındag'ı potentsiallar ayırması (astarlar arasındag'ı kernew) $\varphi_1 - \varphi_2 = U$ bolg'an kondensatordın' energiyasının'

$$E_p = \frac{1}{2} q(\varphi_1 - \varphi_2) = \frac{1}{2} qU = \frac{q^2}{2C} = \frac{CU^2}{2} \quad (59)$$

shamasına ten' ekenligin ko'rsetedi.

Zaryadlang'an kondensatordın' energiyasını onın' astarları arasındag'ı elektr maydanın ta'ripleytug'ın shamalar arqalı an'latıw mu'mkin. Usı ma'sele menen shug'ıllanamız.

(48)-formula boyınsha kondensatordın' sıyımlıg'ı $C = \frac{\varepsilon S}{4\pi d}$ an'latpası ja'rdeminde anıqlanadı. Ekinshi ta'repten $E_p = \frac{CU^2}{2}$. Usı eki an'latpadan C nı jog'altıp

$$E_p = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S U^2}{2d} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon}{2} \left(\frac{U}{d}\right)^2 Sd \quad (60)$$

formulasın alamız. $\frac{U}{d}$ qatnası astarlar arasındag'ı ken'isliktegi maydannın' kernewligine, al Sd ko'beymesi bolsa astarlar arasındag'ı V ko'lemge ten'. Demek energiya ushın

$$E_p = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon E^2}{2} V \quad (61)$$

formulasın, al onın' ken'isliktegi tıg'ızlıg'ı ushın

$$\omega = \frac{E_p}{V} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon E^2}{2} \quad (62)$$

an'latpasın alamız.

E_p energiyasının' kondensatordın' astarları arasındag'ı elektr maydanının' energiyası ekenligin, usıg'an baylanıslı elektr maydanının' energiyag'a iye bolatug'ınlg'ın, sonın' menen birge elektr maydanının' energiyasının' elektr maydanının' kernewliginin' kvadratına proporsional ekenligin atap o'temiz.

6-§. Elektr maydanındag'ı dielektrikler

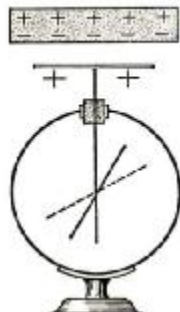
Dielektriklerdi polyarizatsiyalaw. Polyarizatsiya vektori. Ortalıqtın' dielektriklik sin'irgishligi ha'm qabıllawshılıg'ı. Eki dielektrik ortalıq shegarasındag'ı polyarizatsiya ha'm induktsiya vektorları ha'm elektr maydanı kernewligi vektorının' u'zilisi. Dielektriklik kristallardın' elektrlik qa'siyetleri.

A'dette elektr maydanına qanday da bir dielektrik alıp kelingende elektr maydanı o'zgeredi. Biz endi dielektrik alıp kelingende elektr maydanının' qalay o'zgeretug'ınlg'ın ha'm bul qubılıstın' sebepleri menen tanısamız.

Bul ma'seleni ayqın qılıwımız ushın ta'jiriybelerdi ko'rip o'temiz. Elektrometrdi zaryadlaymız ha'm onın' ko'rsetiwin belgilep alamız. Elektrometrge zaryadlanbag'an qanday da bir dielektrikti jaqınlatamız (mısalı shiyshe plastinkanı jaqınlatıw mu'mkin, 22-su'wret). Biz dielektrikti elektrometrge jaqınlatqanımızda elektrometrдің ko'rsetiwinin' kishireyetug'ınlg'ın bayqaymız. Al dielektrikti alıp ketsek elektrometrдің ko'rsetiwi o'zinin' da'slepki qa'lpine keledi.

Tap usınday qubılıstı zaryadlang'an elektrometrge o'tkizgishti alıp kelgende de baqlaw mu'mkin. Bul jag'dayda o'tkizgishte induktsiyalang'an zaryadlardın' payda bolatug'ınlg'ın, sol

zaryadların' elektr maydanın o'zgertetug'inlig'in bilemiz. Usig'an baylanisli dielektrik jag'dayinda minaday juwmaq shig'ariv mu'mkin: elektr maydanında dielektrikte de zaryadlar payda boladi, dielektriktin' elektrometrge jaqin turg'an bo'liminde belgisi boyinsha elektrometrnin' zaryadina qarma-qarsi zaryadlar, al ekinshi ta'repinde belgisi elektrometrnin' zaryadinday zaryadlar payda boladi. Bul jag'day 22-su'wrette ko'rsetilgen.



22-su'wret.

Zaryadlanbag'an dielektrikti elektrometrge alıp kelgende elektrometrnin' ko'rsetiwi kishireyedi.

Dielektriklerde zaryadların' payda bolıwı (dielektrik da'slep zaryadlanbag'an bolsa da) usı dielektriklerdin' o'zlerine ta'sir etetug'in ku'shtin' payda bolıwına alıp keledi. Jin'ishke sabaqqa shiyshe yamasa parafin tayaqshanı ildiremiz ha'm onı zaryadlang'an sharg'a jaqınlatawız (zaryadlang'an shardın' o'zin jaqınlatsaqta boladı, 23-su'wret). Tayaqsha burıla baslaydı ha'm o'zinin' ko'sheri boyinsha ku'sh sıziqlarına parallel bolıp jaylasadı (yag'nıy tayaqsha shardın' orayına qarap burıladı). Bul ta'jiriybeden de sharg'a jaqın jaylasqan tayaqshanın' ushında shardın' zaryadına qarama-qarsi zaryadlar (atlas emes zaryadlar), al ekinshi ushında atlas zaryadlar toplanadı degen so'z.



23-su'wret.

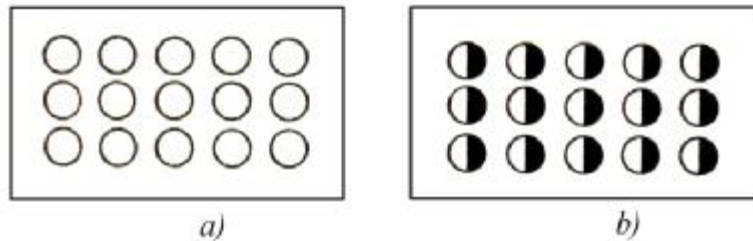
Elektr maydanında jaylasqan dielektrik tayaqshı burıladı ha'm maydan sıziqları boylap jaylasadı.

Bul ta'jiriybe da'slep zaryadlanbag'an dielektrikti elektr maydanına alıp kelgende elektr zaryadlarınin' payda bolatug'inlig'in ko'rsetedi. Dielektrikte elektr polıosı payda boladı ha'm sonlıqtan bul qubılıs ***dielektriklerdin' polyarizatsiyası*** degen attı alg'an. Elektr maydanında dielektriklerde payda bolatug'in elektr zaryadların ***polyarizatsiyalıq zaryadlar*** dep ataydı.

Dielektriklerdin' polyarizatsiya qubılısı menen o'tkizgishlerdegi induktsiya qubılısı bazı bir uqsaslıqlarg'a iye. Biraq ekewi arasında a'hmiyetli ayırma da bar. Elektr maydanında o'tkizgishti bo'leklerge bo'liw arqalı induktsiyalıq zaryadları da bo'liw mu'mkin. Sonlıqtan elektr maydanı joq bolg'annan keyin de sol bo'limler zaryadlang'an bolıp qaladı. Al elektr maydanında dielektriklerdi bo'limlerge ajratsaq sol bo'limler zaryadlanbag'an bolıp qala beredi. Polyarizatsiyalıq zaryadları bir birinen ayırıw mu'mkin emes.

Bunday ayırmanın' orın alıwı bilayınsha tu'sindiriledi: metallardag'ı teris belgige iye zaryad o'tkizgishlik elektronları bolıp tabıladi. Olar o'tkizgish boyinsha u'lken qashıqlıqlarg'a qozg'ala aladı. Al dielektriklerde bolsa eki belgige iye zaryadlar da bir biri menen tıg'ız baylanisqan ha'm olar bir birine salıstırg'anda bir molekulanın' sheklerinde g'ana qozg'ala aladı.

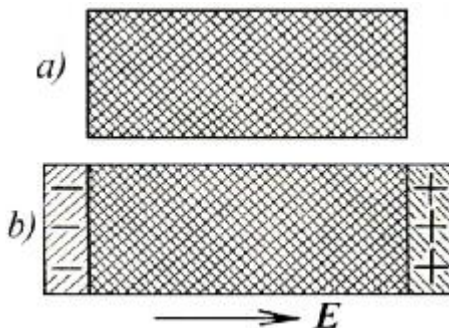
Polyarizatsiyalanbag'an dielektrikti sırtqı elektr maydanı bolmag'an jag'dayda molekulalardıń jıynag'ı dep qarawg'a boladı. Bul molekulalardag'ı on' ha'm teris belgige iye zaryadlar molekulanın' barlıq ko'lemi boyınsha ten' o'lsheuli tarqalg'an (24-a su'wret). Dielektrikti polyarizatsiyalang'anda molekuladag'ı ha'r qıylı belgige iye zaryadlar qarama-qarsı ta'replerge qaray awısadı – molekulanın' bir shetinde on' zaryadlar, al ekinshi ta'repinde teris zaryadlar payda boladı (24-b su'wret). Usının' aqıbetinde ha'r bir molekula elektr dipoline aylanadı.



24-su'wret.

Polyarizatsiyalanbag'an (a) ha'm polyarizatsiyalang'an (b) dielektriktin' modelleri.

Molekulalar ishindegi zaryadlardın' awısıwı dielektrikte bazı bir zaryadlardın' payda bolıwı sıyaqlı bolıp ko'rinedi. Haqıyqatında da polyarizatsiyalanbag'an dielektrikti ha'r qaysısı on' ha'm teris zaryad penen ten' o'lsheuli toltrılǵ'an bir biri menen birdey bolǵ'an ha'm birinin' u'stinde biri ornalasqan eki ko'lem sıpatında qarawg'a boladı (25-a su'wret). Dielektriktin' polyarizatsiyasın usı eki ko'lemnin' bir birine salıstırǵ'andag'ı kishi qarama-qarsı aralıqqa (molekulanın' o'lshemindey aralıqqa) awısıwı dep qaraw mu'mkin (25-b su'wret). Usının' menen birge dielektriktin' ishinde on' zaryadlardın' mug'darı burıng'ısınsha teris zaryadlardın' mug'darına ten' bolıp qala beredi. Biraq dielektriktin' bir ta'repinde kompensatsiyalanbag'an on' zaryadlardın' juqa qatlamı, al ekinshi (qarama-qarsı) ta'repinde kompensatsiyalanbag'an teris zaryadlardın' juqa qatlamı, yag'nıy polyarizatsiyalıq zaryadlar payda boladı.



25-su'wret.

Dielektriktin' polyarizatsiyası zaryadlardın' awısıwı sıpatında.

a) polyarizatsiyalanbag'an dielektrik, b) polyarizatsiyalang'an dielektrik

Polyarizatsiya vektori. Joqarıda ayılǵ'anınday dielektrik polyarizatsiyalang'anda onın' ha'r bir molekulası elektr dipoline aylanadı ha'm usıǵ'an sa'ykes ha'r bir molekula elektr momentine iye boladı. Elektr momenti mınag'an ten'

$$p = ql.$$

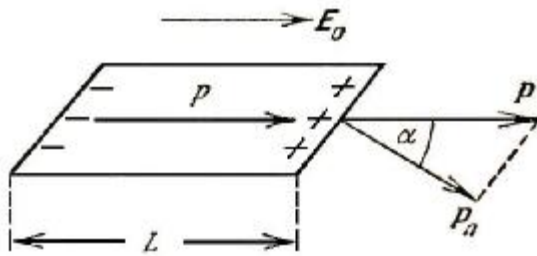
l awısıw vektori teris zaryadtan on' zaryad ta'repke bag'ıtlang'an dep esaplanadı.

Dielektriktin' polyarizatsiyasının' sanlıq xarakteristikası retinde **polyarizatsiya vektori** dep atalatuǵ'ın fizikalıq shama xızmet etedi. **Polyarizatsiya vektori dielektriktin' ko'lem birligindegi barlıq molekulalardıń elektr momentlerinin' vektorlıq qosındısına ten':**

$$P = \frac{1}{\tau} \sum p_i \quad (63)$$

Eger dielektrik bir tekli bolsa, onda zaryadların' awısıwı l barlıq noqatlarda da birdey ha'm usıg'na sa'ykes \mathbf{P} vektorı dielektrik boyınsha birdey ma'niske iye boladı. **Bunday polarizatsiyanı bir tekli polarizatsiya dep ataymız.**

26-su'wret.



Polyarizatsiya vektorı \mathbf{P} nın' bag'ıtın anıqlawdı tu'sindiriwge arnalg'an su'wret.

Polyarizatsiya vektorı \mathbf{P} nın' ma'nisin biletug'ın bolsaq, onda polarizatsiyalıq zaryadlardı anıqlaw mu'mkin (kerisinshe polarizatsiyalıq zaryadlardı biliw arqalı polarizatsiya vektorın anıqlawg'a boladı). Polyarizatsiyanı bir tekli dep esaplaymız ha'm elektr maydanına jaylastırılǵ'an dielektrikti qaraymız. Bul dielektrik ultanı S ha'm qabırǵ'ası \mathbf{P} vektorına parallel L uzınlıǵ'ına ten', al qıya prizma tu'rine iye bolsın (26-su'wret). Prizmanın' ultanların' birinde betlik tıǵ'ızlıǵ'ı $-\sigma'$ bolg'an teris zaryadlar, al ekinshi ultanında betlik tıǵ'ızlıǵ'ı $+\sigma'$ bolg'an on' zaryadlar payda boladı. Usıǵ'an baylanışlı prizma

$$p = \sigma' DL \quad (64)$$

elektr momentine iye boladı. Eger α arqalı \mathbf{P} vektorı menen prizmanın' ultanına tu'sirilgen normal arasındag'ı mu'yesh belgilengen bolsa, onda prizmanın' ko'lemi τ mınag'an ten':

$$\tau = SL \cos \alpha \quad (65)$$

Sonlıqtan

$$p = \frac{\sigma' \tau}{\cos \alpha}.$$

Ekinshi ta'repten tap usı shamanı ko'lem birligindegi elektr momenti arqalı an'latıwǵ'a da boladı:

$$p = P \tau.$$

Usı an'latpalardı bir biri menen salıstırıw arqalı mına an'latpag'a iye bolamız:

$$\sigma' = P \cos \alpha = P_n \quad (66)$$

Bul an'lapada P_n arqalı \mathbf{P} vektorının' biz qarap atırǵ'an betke normal bag'ıtına tu'sirilgen proektsiyası belgilengen. 26-su'wrettegi on' qaptalı ushın α mu'yeshi su'yir ($\cos \alpha > 0$) ha'm σ' on' ma'niske iye. Al shep ta'reptegi qaptal ushın α dog'al $\alpha u'yesh$ ($\cos \alpha < 0$) ha'm usıǵ'an sa'ykes σ' teris ma'niske iye.

Alıng'an na'tiyje polarizatsiyalıq zaryadların' betlik tıǵ'ızlıǵ'ının' bettin' usı noqatındag'ı polarizatsiya vektorının' normal qurawshısına, al zaryadların' awısıwına perpendikulyar etip alıng'an bettin' bir birligi arqalı o'tiwshi zaryad mug'darının' polarizatsiya vektorının' shamasına ten' ekenligin ko'rsetedi.

Eger \mathbf{P} vektorının' shaması ha'r qıylı noqatlarda ha'r qıylı ma'nislerge iye bolsa (bir tekli emes polyarizatsiya), onda dielektrikte ko'lemlik zaryadların' payda bolıwı mu'mkin.

Dielektrik ishindegi elektr maydanının' kernewligi. Biz joqarıda vakuumdegi elektr maydanının' kernewliginin' bir birlik maydang'a ta'sir etiwshi ku'sh ekenligin ko'rgen edik. Dielektriklerge o'tetug'ın bolsaq, onda bul anıqlamag'a bazı bir da'llik engiziwimiz sha'rt.

Sınap ko'riletug'ın zaryadtın' o'lshepleri dielektriktegi molekularlar arasındag'ı qashıqlıqtan kishi dep ko'z aldımızg'a elesleteyik. Bunday jag'dayda dielektrik ishindegi elektr maydanı ha'r qıylı noqatlarda pu'tkilley ha'r qıylı boladı. A'sirese molekularların' zaryadlang'an ushlarında elektr maydanının' kernewliginin' shaması u'lken ma'nislerge iye boladı. Bunday o'zgerisler ju'da' kishi mikroskopiyaalıq o'lsheplerde orın alıp, bizlerdin' bunday maydanlardı ta'jiriybelerde tikkeley baqlawımız mu'mkin emes. Usınday jollar menen anıqlangan maydandı **mikroskopiyaalıq maydan** dep ataymız (bul xaqında joqarıda ga'p etilgenligin atap o'temiz) ha'm onın' kernewligin \mathbf{E}_m arqalı belgileyemiz.

Biraq biz barlıq ta'jiriybelerde o'lshepleri atomlar arasındag'ı qashıqlıqlardan (yamasa molekularların' o'lsheplerinen) a'dewir u'lken deneler menen is alıp baramız. Bunday jag'dayda bizdi ko'lem boyınsha ortashalang'an \mathbf{E}_m mikroskopiyaalıq maydanı qızıqtıradı. Bunday maydandı biz **makroskopiyaalıq maydan** dep atadıq. **Elektr maydanının' ortasha ma'nisin dielektriktin' ishindegi elektr maydanının' kernewligi dep ataymız.** Usı anıqlama boyınsha dielektrik ishindegi elektr maydanının' kernewligi

$$\mathbf{E} = \bar{\mathbf{E}}_m = \frac{1}{\tau} \int_{\tau} \mathbf{E}_m d\tau \quad (67)$$

formulası ja'rdeminde anıqlanadı. Bul formuladag'ı τ ko'lemi mikroskopiyaalıq jaqtan u'lken bolıwı kerek, yag'niy bunday ko'lemde ko'p sandag'ı molekula jayg'asıwı kerek. Biraq bul ko'lem usı ko'lemnin' ishinde makroskopiyaalıq elektr maydanının' kernewliginin' ma'nisi a'meliy jaqtan turaqlı bolıp qalatug'ın da'rejede mikroskopiyaalıq jaqtan kishi bolıwı da kerek. Usınday talaplardı qanaatlandırıtug'ın kishi ko'lemler fizikalıq jaqtan sheksiz kishi ko'lem dep ataladı (matematikalıq sheksiz kishi ko'lemnin' ma'nisinin' basqasha ekenligin atap o'temiz).

Joqarıda ayılğ'an sıyaqlı dielektriktin' ishindegi potentsial dep makroskopiyaalıq potentsialdı, yag'niy bazı bir fizikalıq kishi ko'lem boyınsha ortashalang'an potentsialdı tu'sinemiz. Maydan \mathbf{E} nin' ha'm potentsial φ din' makroskopiyaalıq ma'nisleri vakuum ushın alıng'an an'latpa arqalı baylanısadı. Tegis kondensator jag'dayında iye bolamız:

$$E = \frac{\varphi}{a}. \quad (68)$$

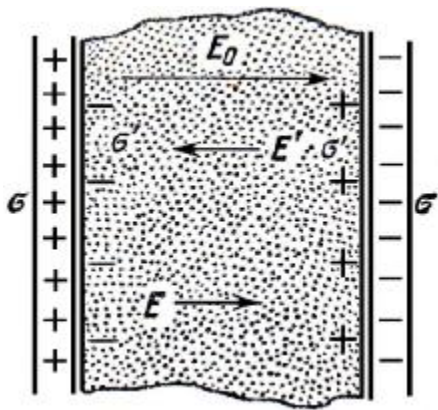
Bul an'latpada a arqalı astarlar arasındag'ı qashıqlıq belgilengen.

Bir tekli dielektrik penen toltrılğ'an tegis kondensatordı (bir tekli maydandı) qarap o'temiz (27-su'wret). Dielektriktin' ishindegi maydannın' kernewligi \mathbf{E}_0 kondensatordın' metall astarları ha'm polyarizatsiyalang'an dielektrik payda etken \mathbf{E}' eki maydanının' qosındısınan turadı. $E_0 = \sigma / \varepsilon_0$, al σ bolsa metal astarlardag'ı zaryadların' betlik tıg'ızlıg'ı. Polyarizatsiyalang'an dielektriktin' ta'sirin onın' betindegi polyarizatsiyalang'an zaryadlar arqalı an'latıwıg'a boladı.

Sonlıqtan $E' = -\sigma'/\varepsilon_0$. Bul an'latpada σ' arqalı polyarizatsiyalang'an zaryadların' betlik tıg'ızlıg'ı belgilengen. Demek

$$E = \sigma/\varepsilon_0 - \sigma'/\varepsilon_0 = \frac{\sigma - \sigma'}{\varepsilon_0}.$$

Dielektriktin' ishindegi elektr maydanının' kernewligi kondensatordın' astarlarındag'ı ha'm dielektriktegi polyarizatsiyalang'an zaryadların' betlik tıg'ızlıg'ının' ayırmasına ($\sigma - \sigma'$) ten' bolg'anda vakuumdegi elektr maydanının' kernewligine ten' boladı. $\sigma - \sigma'$ ayırmasın ko'pshilik jag'daylarda *erkin zaryad* dep ataydı.



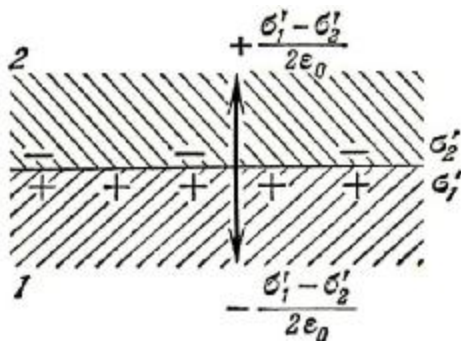
27-su'wret.

Dielektrik ishindegi elektr maydanının' kernewligi E kondensatorlardın' astarlarındag'ı zaryadlar payda etken elektr maydanının' kernewligi (E_0) menen polyarizatsiyalıq zaryadlar payda etken maydannın' (E') ayırmasına ten'.

Joqarıda aytilg'anlarg'a baylanışlı dielektriktin' ishindegi zaryadı q g'a ten' bolg'an makroskopiyaq denegge ulıwma jag'dayda qE ku'shinin' ta'sir etpeytug'ınlıg'ın atap o'tiw za'ru'r.

Elektr awısıwı vektori. Endi bir tekli polyarizatsiyalang'an 1 ha'm 2 bir tekli dielektrikler arasındag'ı shegaranı qaraymız. Ha'r bir dielektriktin' bir birine tiyip turg'an betinde belgileri qarama-qarsı bolg'an betlik tıg'ızlıqları σ'_1 ha'm σ'_2 bolg'an zaryadlar payda boladı. Usının' saldarınan eki dielektrikti bir birinen ajratıp turg'an shegaralıq bette betlik tıg'ızlıg'ı $\sigma'_1 - \sigma'_2$ bolg'an bet ha'm sa'ykes kernewligi $(\sigma'_1 - \sigma'_2)/2\varepsilon_0$ bolg'an qosımsha elektr maydanı payda

boladı. Bul maydan eki dielektrik arasındag'ı betke perpendikulyar ha'm ha'r bir dielektrikte qarama-karsı ta'replerge karay bag'darlang'an (28-su'wret).



28-su'wret.

Eki dielektrik shegarasındag'ı polyarizatsiyalıq zaryadlar ha'm olar payda etken elektr maydanı.

Ha'r bir dielektriktegi elektr maydanlarının' kernewliklerin E_1 ha'm E_2 arqalı belgileymiz. Usı eki maydandı da eki qurawshıg'a jikleymiz: birinshisi ayırıw shegarasına (eki dielektrik arasındag'ı shegaranı usılay ataymız) urınba bag'ıtlang'an (E_{t1} ha'm E_{t2}), ekinshisi ayırıw

shegarasına perpendikulyar (E_{n1} ha'm E_{n2}). Normaldı 1 dielektrikten 2 dielektrikke qaray bag'itlang'an dep esaplaymız. Ayırıw tegisliginin' zaryadları payda etken elektr maydanı usı betke perpendikulyar bolg'anlıqtan maydanning' urınba qurawshısı o'zgermeydi ha'm eki dielektrikte de birdey ma'niske iye boladı, yag'nıy

$$E_{t1} = E_{t2}.$$

Al elektr maydanının' normal qurawshıları ha'r qıylı ma'nislerge iye bolıp, olardıń ayırması mınag'an ten'

$$E_{n1} - E_{n2} = (\sigma'_1 - \sigma'_2)/\varepsilon_0 = (P_{n1} - P_{n2})/\varepsilon_0.$$

P_{n1} ha'm P_{n2} ler arqalı ha'r bir dielektriktegi polyarizatsiya vektorının' normal qurawshıları belgilengen. Biz joqarıda kernewliktin' normal qurawshısının' bettin' bir birligi arqalı o'tetug'ın ku'sh sızıqlardıń ag'ısı ekenligin ko'rgen edik. Demek ayırıw betinin' bir birligi arqalı o'tiwshi ku'sh sızıqlarının' sanı 1 ha'm 2 dielektriklerinde bir birine ten' emes, yag'nıy ku'sh sızıqlarının' bazı bir bo'legi ayırıw betinde u'ziliske tu'sedi degen so'z.

Biz joqarıda vakuum ushın elektr awısıwının' (14)-formula boyınsha anıqlanatug'ınlıg'ın ko'rdik ($\mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E}$). Bul tu'sinikti endi iqtıyarlı tu'rde alıng'an dielektrik ushın ulıwmalastıramız ha'm dielektriktegi elektr awısıwı vektorın

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P} \quad (69)$$

tu'rinde anıqlaymız. Usıg'an baylanışlı elektr awısıwının' eki dielektriktin' ayırılıw shegarasında u'zliksiz ekenligi kelip shıg'adı, yag'nıy

$$D_{n1} = D_{n2}.$$

Demek elektr awısıwı sızıqları eki dielektriktin' shegarasında u'ziliske tu'speydi degen so'z. Sonlıqtan bir tekli emes dielektriklerdegi elektr maydanın ta'riplew ushın elektr maydanının' kernewligi \mathbf{E} vektorın paydalanıwdan elektr awısıwı \mathbf{D} vektorın paydalang'an qolaylıraq. Usı sebep awısıw vektorın elektr ha'm magnetizm ilimine kirgiziwdin' tiykarg'ı sebebi bolıp tabıladı.

7-§. Turaqlı elektr tog'ı

Elektr tog'ının' xarakteristikaları. O'tkizgishlik elektr tog'ı. Qarsılıq ha'm onın' temperaturag'a g'a'rezliligi. Om nızamının' differentsial ko'rinisi. Tuyıq shınjır ushın Om nızamı. Kirxgof qag'ıydaları.

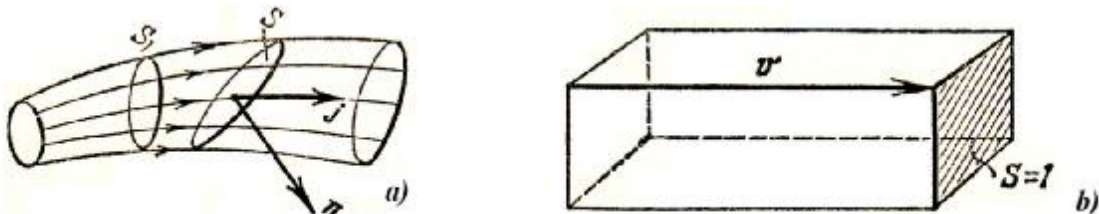
Elektr zaryadlarının' qa'legen tu'rdegi qozg'alısın biz **elektr tog'ı** dep ataymız. Biraq ko'pshilik jag'daylarda elektr tog'ı dep zaryadlang'an bolekshelelerin' bag'itlang'an qozg'alısına aytadı.

Metallarda tek elektronlar erkin tu'rde qozg'ala aladı (orınların o'zgerte aladı). Sonlıqtan metallardag'ı elektr tog'ı dep o'tkizgishlik elektronların' qozg'alısına aytadı. Biz to'mende elektr tog'ın o'tkiziwdi eritpelerde (elektrolitlerde) erkin elektronların' joq ekenligin ko'remiz. Bunday o'tkizgishlerde ionlar erkin qozg'alıwdı bo'leksheler bolıp tabıladı. Gazlerde bolsa erkin halda ionlar ha'm elektronlar toqtı tasıwg'a qatnasa aladı (toqtı o'tkiziwdi qatnasatug'ın zaryadlang'an bo'lekshelerdi endigiden bılay toq tasıwshılar dep te ataymız).

Toqtın' bag'ıtı retinde on' zaryadlang'an bo'lekshelerdin' qozg'alıs bag'ıtı qabıl etilgen. Sonlıqtan metallardag'ı toqtın' bag'ıtı elektronlardın' qozg'alıs bag'ıtına qarama-qarsı.

Toq tasıwshı zaryadlang'an bo'leksheler a'dette bazı bir sızıqlar (traektoriyalar) boyınsha qozg'aladı. Bunday sızıqlardı **toq sızıqları** dep ataydı. Sızıqlardıń bag'ıtı sıpatında on' zaryadlang'an bo'lekshelerdin' qozg'alısınan' bag'ıtı alınadı. Toq sızıqlarınan' su'wretlerin salıw arqalı biz toqtı payda etiwshi elektronlardın', ionlardın' qozg'alısı haqqında ayqın tu'sinik ala alamız.

Eger toq o'tip turg'na o'tkizgishtin' ishinde qaptal beti toq sızıqlarınan turatug'ın trubkanı oyımızda ayırıp alsaq, onda zaryadlang'an bo'leksheler qozg'alısınan' barısında qaptal bet arqalı sırttan trubkanın' ishine kire almaydı, al trubkanın' ishindegi zaryadlang'an bo'leksheler qaptal bet arqalı trubkanın' ishinen trubkanın' sırtına shıg'a almaydı (yag'nıy zaryadlang'an bo'leksheler usınday trubkanın' qaptal betin kesip o'te almaydı). Bunday trubkanın' toq trubkası dep ataymız (29-a su'wret). İzolyator ishindegi metall sımnın' beti toq trubkasına misal bola aladı.



29-su'wret.

Toq trubkası (a) ha'm toqtın' tıg'ızlıg'ın anıqlaw ushın du'zilgen sxema (b).

Elektr tog'ının' sanlıq xarakteristikası sıpatında **toqtın' tıg'ızlıg'ı** ha'm **toq ku'shi** dep atalatug'ın eki tiykarg'ı fizikalıq shama xızmet etedi.

Elektr tog'ının' tıg'ızlıg'ı dep toq sızıqlarına perpendikulyar jaylasqan bettin' bir birliginen waqt birliginde o'tken elektr zaryadlarınan' mug'darına ten' shamag'a aytamız. (29-b su'wret). O'tkizgishtin' ishinde toq sızıg'ına perpendikulyar, yag'nıy zaryadlang'an bo'lekshelerdin' tezligi vektori v g'a perpendikulyar maydanı bir birlikke ten' bolg'an bet alamız. Usı maydanda uzınlıg'ı bo'lekshelerdin' qozg'alıw tezligi v g'a ten' tuwrı mu'yeshli paralelopiped du'zemiz. Bunday jag'dayda biz qarap atırg'an betten waqt birliginde ag'ıp o'tetug'ın zaryadlang'an bo'lekshelerdin' sanı usı paralelopiped ishinde jaylasqan bo'lekshelerdin' sanına ten' boladı. Eger n arqalı zaryadlang'an bo'lekshelerdin' kontsentratsiyası belgilengen bolsa, onda paralelopipedtin' ishindegi bo'lekshelerdin' sanı nv g'a, al sol bo'leksheler alıp o'tken zaryad mug'darı nve ge ten'. Bul jerde e arqalı bir bolekshenin' (misalı elektronnın') zaryadı belgilengen. Sonlıqtan toqtın' tıg'ızlıg'ının' mug'darı

$$j = nev. \quad (70)$$

Bul an'latpadag'ı n menen e ma'nisi boyınsha skalyar shamalar, al tezlik v vektorlıq bolg'anlıqtan

$$j = nev \quad (71)$$

vektorin kirgiziw mu'mkin. Tezlik \mathbf{v} berilgen noqattag'ı zaryadlang'an bo'lekshelerdin' qozg'alısın ta'ripleytug'in bolg'anlıqtan toqtın' tıg'ızlıg'ı vektorı \mathbf{j} o'tkizgishtin' berilgen noqatındag'ı toqtın' ku'shin ta'ripleydi.

Qanday da bir o'tkizgishtegi *toqtın' ku'shi dep usı o'tkizgishtin' tolıq kese-kesimi arqalı waqt birliginde ag'ıp o'tken elektr zaryadlarının' mug'darına aytamız*. Eger o'tkizgishtin' kese-kesimi arqalı dt waqtı ishinde ag'ıp o'tken zaryadların' mug'darı dq bolsa, onda toq ku'shi minag'an ten':

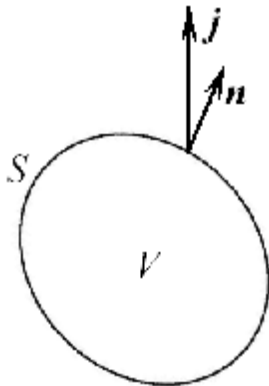
$$i = \frac{dq}{dt}. \quad (72)$$

Bul an'latpadag'ı zaryad mug'darı da, waqt ta skalyar shamalar bolg'anlıqtan toq ku'shi de skalyar shama boladı.

Toqtın' tıg'ızlıg'ı vektorı \mathbf{j} tın' shaması o'tkizgishtin' ha'r bir noqatında belgili bolsa, onda toq ku'shinin' shamasın da to'mendegi an'latpa tiykarında anıqlaw mu'mkin:

$$i = \int_S j_n dS. \quad (73)$$

Bul an'latpada integrallaw o'tkizgishtin' barlıq kese-kesimi S boyınsha alınadı (29-a su'wret).



30-su'wret.

V ko'lemi, onı qorshap turg'an S beti, usı betke tu'sirilgen \mathbf{n} ha'm toq ku'shinin' tıg'ızlıg'ı \mathbf{j} shamaları.

U'zliksizlik ten'lemesi. Elektr zaryadlarının' saqlanıw nızamı. Elektr zaryadlarının' saqlanıw nızamı fizikanın' fundamentallıq nızamlarının' biri bolıp tabılardı. Biz bul nızamdı makroskopiyalıq shamalar bolg'an zaryadların' tıg'ızlıgı ρ , toq ku'shinin' tıg'ızlıg'ı \mathbf{j} arqalı an'latamız. Qanday da bir ortalıqta V ko'lemin shegaralap turg'an S betin alamız (30-su'wret). V ko'leminen ha'r sekunda S beti arqalı o'tıp atırg'an elektr zaryadlarının' mug'darı $\oint j_n dS$ integralı menen beriledi. Tap usı shamanı $-\frac{\partial q}{\partial t}$ arqalı beriwge de boladı. Bul jerde q arqalı V ko'lemindegi zaryad mug'darı belgilengen. Eki shamanı bir birine ten'ep mına an'latpanı alamız:

$$\frac{\partial q}{\partial t} = - \oint j_n dS. \quad (74)$$

Biz bul jerde $\frac{\partial}{\partial t}$ belgisin qollanamız, sebebi S beti o'zgerissiz qalıwı kerek. A'llette $q = \int \rho dV$. Usı jag'daydı esapqa alamız ha'm bet boyınsha alıng'an integraldı $\int \text{div } \mathbf{j} dV$ ko'lem boyınsha alıng'an integralına aylandıramız. Na'tiyjede

$$\frac{\partial}{\partial t} \int \rho dV = - \int \operatorname{div} \mathbf{j} dV \quad (75)$$

an'latpasına iye bolamız. Bul an'latpanın' ıqtıyarlı V ko'lemi ushın orınlanıwı kerek. Sonlıqtan

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div} \mathbf{j} = 0 \quad (76)$$

ten'lemesin alamız. (74)- ha'm (76)-an'latpalar **makroskopiyalıq elektrodinamikadag'ı zarıdlardıń saqlanıw nızamı dep ataladı**. (76)-an'latpa bolsa ja'ne **u'zlıksızlıq ten'lemesi** dep te ataladı. Bul ten'lemeler Maksveldin' tiykarg'ı ten'lemeleri sistemasına kiredi.

Eger toqlar statsionar bolsa, yag'nıy waqıttan g'a'rebsiz bolsa, onda (74)- ha'm (76)-an'latpalar to'mendegidey an'latpalarg'a aylanadı:

$$\oint j_n dS = 0, \quad (77)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{j} = 0. \quad (78)$$

Biz to'mende tiykarınan statsionar toqlardı u'yrenemiz.

Om nızamı. Elektr tog'ın payda etiwidin' en' baslı usılların' biri deneler ishinde elektr maydanın payda etiw ha'm usı maydandı uslap turıw bolıp tabıladı. Ta'jiriybeler ko'pshilik denelerde (mısalı metallarda) elektr tog'ın' tıg'ızlıg'ı \mathbf{j} shamasının' ken' intervallarda elektr maydanın' kernewligi \mathbf{E} ge proporsional bolatug'ınlıg'ın ko'rsetedi. Bul elektrodnamikanın' en' a'hmiyetli (biraq fundamentallıq emes) nızamların' biri bolıp esaplanatug'ın nızamdı Om nızamı dep ataymız. Matematikalıq tilde Om nızamı bilayınsha jazıladı (differentsial formada):

$$\mathbf{j} = \lambda \mathbf{E}. \quad (79)$$

Bul an'latpada λ arqalı berilgen zat (o'tkizgish) ushın turaqlı bolg'an proporsionallıq koeffitsienti belgilengen. Bul shamanı zattın' **salıstırmalı o'tkizgishligi** yamasa **elektr o'tkizgishligi** dep ataydı. Om nızamı **fizikalıq jaqtan bir tekli zatlar** ushın orınlanadı. Elektr o'tkizgishlikke keri bolg'an shamanı materialdın' (denenin') **salıstırmalı qarsılıg'ı** dep ataydı:

$$\rho = \frac{1}{\lambda}. \quad (80)$$

Gauss sistemasında (elektrostatikalıq sistemada da) elektr o'tkizgishlik λ waqıtqa keri bolg'an o'lshe birlikke iye (yag'nıy keri sekund s^{-1}). Salıstırmalı qarsılıq ρ sekundlarda o'lsheledi (s). Salıstırmalı qarsılıq penen waqıttın' o'lshe birliklerinin' birdey ekenligi olardıń fizikalıq ta'biyatı da birdey degen juwmaq kelip shıqpaydı. Bunday sa'ykeslik tek Gauss sistemasında ha'm SGSE sistemasında orın aladı. Basqa birlikler sistemalarında bul shamalar ha'r qıylı o'lshe birliklerge iye.

Eger toq statsionar bolsa, onda bir tekli o'tkizgishtegi elektr zaryadların' ko'lemlik tıg'ızlıg'ı nolge ten'. Haqıyqatında da statsionar toqlar ushın (78)-an'latpa ($\operatorname{div} \mathbf{j} = 0$) orın aladı. Bul an'latpanı $\operatorname{div} \lambda \mathbf{E} = 0$ yamasa $\operatorname{div}(\frac{\lambda}{\varepsilon} \mathbf{D}) = 0$ tu'rinde ko'shirip jazamız. Biz ortalıqtı bir tekli dep qarap atırmız. Sonlıqtan $\lambda = \text{const}$ ha'm $\varepsilon = \text{const}$ ha'm biz karap atırg'an ten'leme $\operatorname{div} \mathbf{D} = 0$ ten'lemesine aylanadı. Bunnan Ostrogradskiy-Gauss teoreması boyınsha $\rho = 0$.

Solay etip *statsionar toqlar jag'dayında makroskopiyalıq elektr zaryadları tek o'tkizgishtin' betinde yamasa bir o'tkizgishtin' bir tekli emes ushastkalarında g'ana jaylastıwı mu'mkin*. Bunday ko'z-qarastan statsionar toqlardıń elektr maydanları elektrostatikalıq elektr maydanınday. Usınday eki maydan arasındag'ı uqsaslıq ja'ne de bir katar juwmaqlarga alıp keledi. Eger toqlar statsionar bolsa, onda ken'isliktin' ha'r bir noqatındag'ı tıg'ızlıg'ı waqıttın' o'tiwı menen o'zgerissiz qaladı (waqıtqa baylanıslı o'zgermeydi). Ta'jiriybeler usınday qozg'alıwshı zaryadlardın' tap sonday tıg'ızlıqqa iye qozgalmaytug'ın zaryadlar sıyaqlı elektr maydanın payda etetug'ınlıgın ko'rsetedi. Bunnan *statsionar toqlardıń elektr maydanının' potentsial maydan ekenligin ko'remiz*.

Qalay degen menen statsionar toqlardıń elektr maydanı elektrostatikalıq maydannan u'iken ayırmag'a iye. Elektrostatikalıq maydan tınıshlıqta turg'an zaryadlardın' maydanı bolıp tabıladı (bunday elektr maydanın a'dette Kulon maydanı dep te ataydı). Zaryadlardın' ten' salmaqlıg'ı saqlang'anda o'tkizgishtin' ishinde bunday maydan nolge ten'. Statsionar toqlardıń elektr maydanı da Kulon maydanı bolıp tabıladı. Biraq bul maydandı qozdıratug'ın (payda etetug'ın) zaryadlar qozg'alısta boladı. Sonlıqtan statsionar toqlardıń maydanı o'tkizgishtin' ishinde de boladı. Eger usınday awhal orınlanbag'anda o'tkizgishtin' ishinde elektr tog'ı bolmag'an bolar edi (Om nızamı boyınsha elektr maydanı nolge ten' bolsa toqtın' tıg'ızlıg'ı da nolge ten' boladı, 79-formula). Elektrostatikalıq maydannın' ku'sh sızıqları barlıq waqıtta da o'tkizgishtin' betine perpendikulyar. Al statsionar toqlardıń elektr maydanı ushın bunday perpendikulyarlıqtın' orınlanıwı sha'rt emes.

(79)-formula differentsial formada jazılğ'an Om nızamı dep ataladı. A'llette Om o'z nızamın ashqan da'wirde (1827-jılı) bunday differentsial formadag'ı jazıwlar qabıl etilmegen edi. Sonlıqtan biz ha'zir 1827-jılı ashılğ'an Om nızamın bayanlawg'a qaytıp kelemiz.

Biz jin'ishke o'tkizgish arqalı o'tiwshı toqtı qaraymız. Eger toqtın' tıg'ızlıg'ı bolğ'an ρ shamasın o'tkizgishtin' kese-kesiminin' maydanı S ke ko'beytsek o'tkizgish arqalı o'tıp atırg'an tolıq toqtın' ma'nisin (toq ku'shinin' ma'nisin) alamız:

$$I = \rho S. \quad (81)$$

Om nızamına sa'ykes *o'tkizgishten o'tıp atırg'an I toqtın' shaması o'tkizgishtin' ushlarına tu'sken kernewge (potentsiallar ayırmasına) tuwrı proporsional, al o'tkizgishtin' qarsılıgına kerı proporsional*. Yag'nıy

$$I = \frac{U}{R} = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R}. \quad (82)$$

Bul formulada $U = \varphi_1 - \varphi_2$ arqalı kernew (kernewlik penen shatastırmaw kerek) belgilengen (joqarıda keltirilip o'tilgen «A'dette potentsiallar ayırması $\varphi_1 - \varphi_2$ bolğ'an *shamanı sa'ykes noqatlar arasındag'ı kernew dep ataydı*» degen anıqlamanı eske tu'sireyik). O'tkizgishtin' karsılıg'ı R dep (elektr qarsılıg'ı) o'tkizgishtin' uzınlıg'ına tuwrı proporsional, al onın' kese-kesiminin' maydanına kerı proporsional shamanı aytamız:

$$R = \rho \frac{l}{S}. \quad (83)$$

Bul an'latpada ρ arqalı o'tkizgishtin' salıstırmalı karsılıg'ı (elektr zaryadların' tıg'ızlıg'ı menen shatastırmaw kerek), S arqalı kese-kesiminin' maydanı belgilengen.

(82)-formula a'dette shınjır (elektr shınjır) ushastkası ushın Om nızamı dep ataladı.

(82)-formula boyınsha toqtın' ma'nisinin' turaqlı tu'rde saqlanıwı ushın kernew turaqlı ma'niske iye bolıwı sha'rt (basqa so'z benen aytqanda o'tkizgishtin' ushlarına turaqlı kernewdin' tu'siwi kerek). Al tegis kondensator ushın kernew menen kernewlik arasındag'ı mınaday baylanıstın' bar ekenligin eske tu'sirip o'temiz:

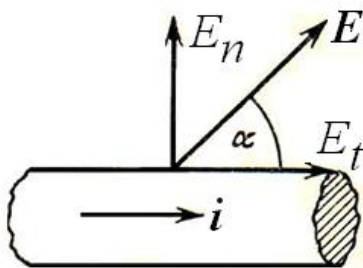
$$E = \frac{U}{d}.$$

Bul qatnastı elektr maydanının' kernewliginin' o'lsheem birligin anıqlaw ushın da qollanatug'ınlıg'ın eske tu'siremiz. Kernewlik birligi sonday shama, uzınlıg'ı 1 metr bolg'an ku'sh sızıqlarının' ushlarındag'ı kernew 1 voltke ten' bolıwı kerek. Bunday birlikti metrdegi volt dep ataydı.

Joqarıdag'ı an'latpadan o'tkizgishtin' beti boyınsha maydan kernewliginin' qurawshısı E_t bar boladı degen so'z. Bul toq o'tip turg'an o'tkizgishtin' betindegi kernewlikti bildiredi. Demek bul jag'dayda ku'sh sızıqları o'tkizgishtin' betine perpendikulyar bolmaydı degen so'z. Ha'm olar (ku'sh sızıqları) toq bag'ıtına qaray α mu'yeshine qiyalang'an. Qala berse $\operatorname{tg} \alpha = E_n/E_t$ (31-su'wret).

Joqarıda aytilg'anlardı esapqa alg'an halda biz to'mendegidey a'hmiyetli juwmaqlar shıg'aramız:

1. *Elektrostatikalıq ten' salmaqlıq halında o'tkizgishtin' ishinde elektr maydanı bolmaydı.*
2. *Elektrostatikalıq ten' salmaqlıq halında o'tkizgishtin' ishinde ko'lemlik zaryadlar da bolmaydı.*



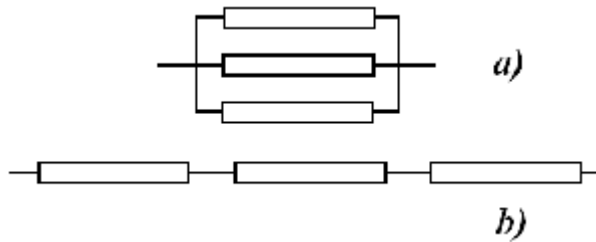
31-su'wret.

Toq o'tip turg'an o'tkizgishtegi elektr maydanı (30-su'wret penen salıstırıw kerek).

Toq ku'shinin' o'lsheem birligi retinde Amper (A) qabıl etilgen. $1 \text{ amper} = \frac{1 \text{ Kulon}}{1 \text{ sekund}}.$

Qarsılıqtın' o'lsheem birligi retinde Om shaması xızmet etedi. Ushlarına 1 volt kernew tu'skende 1 A toq o'tetug'ın o'tkizgishtin' qarsılıg'ı 1 Om bolıp tabıladı, yag'nıy $1 \text{ Om} = 1 \frac{B}{A} = \frac{1/300}{3 \cdot 10^9} = \frac{1}{9} \cdot 10^{-11} \text{ SGSE}$ qarsılıq birligi..

Qarsılıqlardı bir biri menen ha'r qanday usılda jalg'aw mu'mkin. Solardın' ishinde qarsılıqlardı parallel jalg'aw menen izbe-iz jalg'aw ko'p qollanıladı (32-su'wret). İzbe-iz jalg'ang'anda karsılıqtar qosıladı, yag'nıy $R = R_1 + R_2 + R_3 + \dots$. Al parallel jalg'ang'anda ulıwmalıq qarsılıq mına ta'qlette kemeyedi: $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots$ (kondensatorlardı bir biri menen jalg'awdı, bul jag'dayda ulıwmalıq sıyımlıqtın' basqasha nızam boyınsha o'zgeretug'ınlıg'ın eske tu'siremiz).



32-su'wret.

O'tkizgishlerdi bir biri menen parallel (a)
ha'm izbe-iz jalg'aw (b)

O'tkizgishtin' salıstırmalı qarsılıg'ının' temperaturag'ap g'a'rezliligin berilgen zattın' qarsılıg'ının' temperaturalıq koeffitsienti menen ta'riplewge boladı:

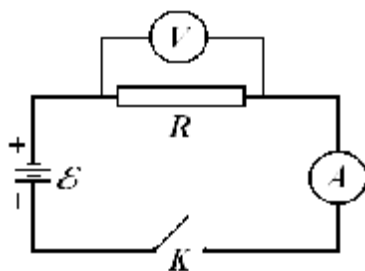
$$\alpha = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT}. \quad (84)$$

Bul shama temperatura bir gradusqa joqarılag'andag'ı qarsılıqtıqtın' salıstırmalı o'simine ten' (mısalı mıs ushın $\alpha = 40 \cdot 10^{-4} 1/K$ g'a ten'). Al salıstırmalı karsılıqtın' TSelsiya shkalasındag'ı temperaturag'a g'a'rezliligi bilayınsha jazıladı:

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha t) \quad (85)$$

Metal o'tkizgishlerdin' qarsılıg'ı temperaturanın' o'siwine baylanıslı o'sedi ($\alpha > 0$). Al yarım o'tkizgishler menen dielektriklerdin' qarsılıg'ı temperaturanın' joqarılawı menen kishireyedi ($\alpha < 0$). Demek temperaturanın' joqarılawı menen karsılıg'ı artatug'ın materiallardı metallar (metallıq qa'siyetke iye o'tkizgishler) dep ataymız, al temperaturanın' joqarılawı menen karsılıg'ı kemeyetug'ın denelerdi yarım o'tkizgishler yamasa dielektrikler dep ataymız.

A'piwayı elektr shınjırının' sxeması 33-su'wrette keltirilgen. Bul shınjır toqtın' dereginen, R qarsılıqtan, shınjır arqalı o'tıp atırğ'an toqtın' ku'shin o'lsheuwshi a'sbap A ampermetrden, qarsılıqqa tu'sken kernewdi o'lsheuwshi asbap voltmetrden V turadı (33-su'wret). Elektr tog'mın' turaqlı tu'rde o'tıp turıwı ushın shınjırdın' (elektr shınjırının') tuyıq bolıwı sha'rt. Toqtın' o'tiwin toqtatıw ushın K gilti qollanıladı. E arqalı toq dereginin' **elektr qozg'awshı ku'shi** belgilengen. Shınjırdag'ı tutastırıwshı o'tkizgish simlardın' qarsılıg'ın a'dette esapqa almaydı (qarsılıg'ı ju'da' kishi dep esaplanadı).



33-su'wret.

A'piwayı elektr shınjır.

Tolıq shınjır ushın Om nızamı bilayınsha jazıladı:

$$I = \frac{E}{R+r}. \quad (85)$$

Bul an'latpada E arqalı toq dereginin' elektr qozg'awshı ku'shi, r arqalı toq dereginin' ishki qarsılıg'ı (toq dereginin' qarsılıg'ı), R arqalı shınjırdag'ı karsılıq (33-su'wret) belgilengen.

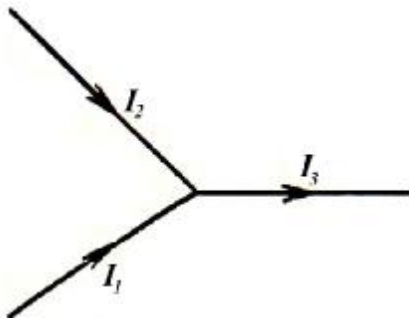
Kirxgof qag'ıydaları. O'tkizgishlerdin' ıqtıyarlı tu'rde tarmaqlang'an, onın' ha'r qıylı ushastkalarında galvanikalıq elementler yamasa toqtın' basqa da derekleri bar quramalı shınjırdı

qaraymız. Bul dereklerden' elektr qozg'awshı ku'shleri turaqlı ha'm belgili dep boljaymız. Bunday shınjırdın' ha'r qıylı ushastkasındag'ı toqlar menen potentsiallar ayırmasın Om nızamı (82-formula) ha'm elektr zaryadların' saqlanıw nızamı tiykarında anıqlaw mu'mkin. Biraq ma'seleni **Kirxgoftın' eki qag'ıydası ja'rdeminde** an'sat sheshiw mu'mkin. Olardıń birinshisi **sızıqlı o'tkizgishler ushın elektr zaryadların' saqlanıw nızamının' ko'rinisi**, al ekinshisi Om nızamının' saldarı bolıp tabıladı. Bul kag'ıydalar menen tanısamız.

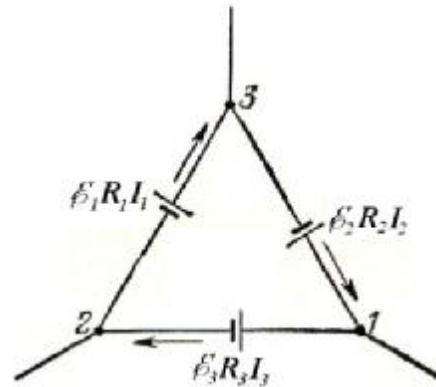
Kirxgoftın' birinshi qag'ıydası. Sımlar (o'tkizgishler) tarmaqlang'an orındag'ı ha'r bir noqattag'ı toq ku'shlerinin' algebralıq qosındısı nolge ten' (34-su'wret). Mısalı 34-su'wret ushın Kirxgoftın' birinshi qag'ıydası bılayınsha jazıladı:

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0.$$

Eger bul sha'rt orınlanbag'anda sımlar tarmaqlanatug'ın orınlarda waqıttın' o'tiwi menen o'zgeretug'ın elektr zaryadları toplanıp qalg'an bolar edi. Usının' saldarınan elektr maydanı da waqıtka baylanısı o'zgergen ha'm toqlar turaqlı bolıp kala almag'an bolar edi.



34-su'wret. Sımlar (o'tkizgishler) tarmaqlang'an orındag'ı ha'r bir noqattag'ı toq ku'shlerinin' algebralıq qosındısı nolge ten'.



35-su'wret. U'sh ushastkadan turatug'ın a'piwayı shınjır.

Kirxgoftın' ekinshi qag'ıydası. Tarmaqta sımlardan turatug'ın tuyıq konturdı ayırıp alamız. Bul konturdag'ı elektr qozg'awshı ku'shlerinin' qosındısı usı konturdın' ayırım ushastkalarındag'ı elektr qozg'awshı ku'shler menen usı ushastkalarındag'ı qarsılıqlardıń ko'beymesinin' qosındısına turadı. Bunı da'lillew ushın kontr u'sh ushastkadan turatug'ın shınjırdı qaraw jetkilikli (35-su'wret). Bul jag'day ushın tolıq shınjır ushın jazılğ'an Om nızamın qollanamız ($\varphi_1 - \varphi_2 + \mathring{A} = IR$):

$$\begin{aligned}\varphi_2 - \varphi_3 + \mathring{A}_1 &= I_1 R_1, \\ \varphi_3 - \varphi_1 + \mathring{A}_2 &= I_2 R_2, \\ \varphi_1 - \varphi_2 + \mathring{A}_3 &= I_3 R_3.\end{aligned}$$

Bul ten'liklerdi qosıw arqalı mınanı alamız:

$$\mathring{A}_1 + \mathring{A}_2 + \mathring{A}_3 = I_1 R_1 + I_2 R_2 + I_3 R_3.$$

Bul Kirxgoftın' u'shinshi qa'desi bolıp tabıladı.

Kirxgof qag'ıydaları ha'r bir ayqın jag'dayda belgisiz bolg'an barlıq toqlardı tabıwg'a mu'mkinshilik beretug'ın *sızıqlı ten'lemelerdin' tolıq sistemasın* jazıwg'a mu'mkinshilik beredi. Bul ten'lemelerge ma'nisleri belgisiz bolg'an potentsiallar ayırmaları pu'tkilley kirmeydi.

8-§. Elektr qozg'awshı ku'sh

Turaqlı elektr tog'mın' jumısı, quwatı ha'm jıllılıq ta'sirleri. Djoul-Lents nızamı. Galvanikalıq elementler. Toq dereginin' paydalı jumıs koeffitsenti

Djoul-Lents nızamı. Toq o'tip turg'an o'tkizgish qızadı (demek o'tkizgishtin' ishki energiyası artadı, bul qubılıstı toqtın' jıllılıq ta'siri dep ataymız) ha'm onnan belgili bir jıllılıq bo'linip shıg'adı. O'tkizgishten toq o'tkende t waqıtı ishinde

$$Q = UIt \quad (86)$$

jıllılıg'ı bo'linip shıg'adı dep esaplaw qabil etilgen. Om nızamı tiykarında joqarıdag'ı an'latpag'a o'tkizgishtin' qarsılıg'ı R di kirgizemiz. Bunday jag'dayda

$$Q = I^2 Rt \quad (87)$$

Bul nızam ta'jiriybede u'yreniw jolı menen Djoul ha'm Peterburg universitetinin' professorı E.X.Lents ta'repinen (bir birinen g'a'rezsiz bir waqıtta) ashılǵ'an ha'm Djoul-Lents nızamı dep ataladı.

O'tkizgishten bo'linip shıqqan jıllılıqtın' mug'darın esaplayıq. Toq ku'shi I amperlerde, al o'tkizgishtin' ushlarındag'ı potentsiallar ayırması U voltlerde berilgen bolsın. Onda (86)-formula jıllılıq ushın djoullerdegi ma'nistei beredi (sebebi $1 \text{ volt} \cdot 1 \text{ amper} \cdot 1 \text{ sekund} = 1 \text{ djoul}$). 1 djoul $0,24 \text{ kaloriyag'a}$ ten'. Sonlıqtan (87)-an'latpanın' ornına

$$Q = 0,24 I^2 Rt$$

an'latpasın da jazıwımızg'a boladı. Bul an'latpada toq amperlerde, karsılıq omlarda, waqıt sekundlarda o'lshenetug'ın bolsa, onda jıllılıq mug'darı kaloriyada alınadı.

(86)-formuladan toqtın' quwatlıg'ı, yag'nıy waqıt birliginde islengen jumıs mınag'an ten':

$$P = \frac{A}{t} = UI.$$

Bul formulanı Sİ sistemasında kernewdin' birigin anıqlaw ushın qollanadı. Kernewdin' birligi volt

$$1 \text{ V} = 1 \frac{Vt}{A}$$

shamasına ten' birlik bolıp tabıladı. Demek 1 volt degenimiz elektr shınjırındag'g'ı quwatlıq 1 Vt bolg'anda 1 A turaqlı toqtın' payda etetug'ın kernewi bolıp tabıladı.

Bir tekli ku'sh maydanında v tezliginda qozg'alıwshı elektron u'stinde ha'r sekunda $vF = (u + v_t)F$ jumısı islenedi (waqıt birligindegi islengen jumıstın' quwatlılıq ekenligin eske tu'siremisiz, bul formulada v_t arqalı elektronlardın' ta'rtipsiz qozgalısının', al u arqalı elektr tog'ın payda etiwdegi dreyflik tezlikleri, al arqalı F elektrong'an ta'sir etiwshı ku'sh belgilengen.). Barlıq elektronlar boyınsha qosındı alg'anda $v_t F$ ag'zaları nolge aylanadı. Sonlıqtan elektronlardın' tek dreyflik qozgalısında islengen jumıs g'ana saqlanıp qaladı. Metaldın' ko'lem birligindegi elektronlar u'stinen islengen bul jumıs $nuF = jF/e$ shamasına ten'. Metallarda bul jumıs ishki (jıllılıq) energiyasının' o'siwi ushın islenedi. Sebebi elektr tog'ının' o'tiwi metaldın' ishki kurılısının' o'zgerisine alıp kelmeydi. Solay etip metaldın' (o'tkizgishtin') ko'lem birligindegi jıllılıqtın' quwatı mına an'latpa menen beriledi:

$$Q = \frac{1}{e} (jF) = \frac{\lambda}{e^2} F^2 \quad (88)$$

yamasa

$$Q = \frac{1}{\lambda} j^2 \quad (89)$$

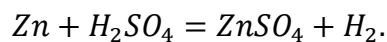
formulası menen beriledi. (88)-an'latpa Djoul-Lents nızamının' lokallıq (differentzial) formadag'ı jazılıwı bolıp tabıladı. Bul nızam boyınsha *ko'lem birligindegi jıllılıqtın' quwatı Q elektr tog'ının' kvadratına tuwrı proporsional, al ortalıqtın' elektr o'tkizgishligine kerı proporsional*. Usınday formada Djoul-Lents nızamı ulıwmalıq xarakterge iye, sebebi toqtı payda etiwshı ku'shlerdin' ta'biyatınan g'a'rezli emes.

Eger F ku'shi ta'biyatı boyınsha elektr ku'shi bolıp tabılatug'ın bolsa, onda $F = eE$ ha'm

$$Q = (jE) = \lambda E^2. \quad (90)$$

Joqarıda aytılg'anlarga baylanışlı (90)-an'latpag'a qarag'anda (89)-an'latpa ulıwmalıq xarakterge iye boladı.

Galvanikalıq elemente bo'linip shıg'atug'ın energiya. Qanday da bir galvanikalıq element shıjırda toq payda etetug'ın bolsa, onda usı elementtin' ishinde ximiyalıq reaksiyalar ju'redi. Ko'pshilik galvanikalıq elementlerde tiykarg'ı reaksiya elementtin' katodı ornın iyeleytug'ın tsink elementinin' elektrolit penen qosılıw reaksiyası ju'zege keledi. Sonlıqtan jumıs islewde barısında metall tsink jumsaladı, al eritpede reaksiyanın' o'nimi bolg'an jan'a zat payda boladı. Voltanın' en' a'piwayı elementinde reaksiya mınaday tu'rge iye:



Ta'jiriybeler qa'legen ximiyalıq reaksiyanın' belgili bir energiyanın' bo'linip shıg'ıwı yamasa jutılıwı menen ju'retug'ınlıg'ın ko'rsetedi. Bunnan bılay biz ximiyalıq reaksiyanı turaqlı sırtqı basımda ju'redi dep esaplaymız. Bunday jag'dayda

$$Q_x = pm$$

mug'darındag'ı energiya bo'linip shıg'adı. Keyingi formulada m arqalı reaksiyag'a kirisiwshı zatlardın' massası, al p arqalı ximiyalıq reaksiyanın' jıllılıq effekti belgilengen (massanın' bir birligine tiyisli bo'ltinip shıg'atug'ın jıllılıq mug'darı). Eger reaksiya jıllılıqtın' bo'linip shıg'ıwı menen ju'retug'ın bolsa, onda p an' shama, al reaksiya barısında jıllılıq jutılatug'ın bolsa, onda

p teris ma'niske iye. Mısalı joqarıda formulası jazılğ'an ximiyalıq reaksiyada massası 1 g tsink ku'kirt kislotası menen ta'sir etiskende 6900 Dj energiya bo'linip shıg'adı. Sonlıqtan reaksiyanın' tsink boyınsha jıllılıq effekti $p = 6,9 \cdot 10^6$ Dj/kg.

Galvanikalıq elementlerde bo'linip shıqqan energiya ximiyalıq reaksiyalardıń energiyası bolıp tabıladı. Reaksiyanın' jıllılıq effekti onın' o'lsheıi bolıp tabıladı.

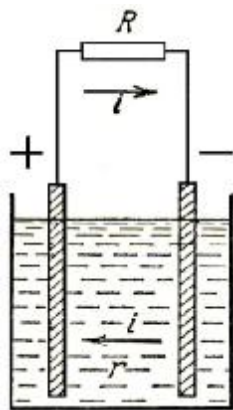
Galvanikalıq elementtin' elektr qozg'awshı ku'shi. 36-su'wrette R qarsılıg'ı menen tuyıqlang'an galvanikalıq element ko'rsetilgen. Toq bolmag'nada elemente hesh qanday ximiyalıq reaksiya ju'rmeıdı dep esaplaymız. Biraq bul jag'day metallardıń elektrolitler menen bolg'an barlıq kombinatsiyalarında orın almaydı. Mısalı Volta elementinde tsink ku'kirt kislotası menen ajratılğan shınjır jag'dayında da kishirek da'rejede bolsa da reaksiyag'a kirise beredi. Toq o'tip turg'anda elektrolitke o'tken elektrodtnıń massası

$$m = Kq$$

g'a ten'. Bul an'latpada K arqalı elektrod metallılın' elektroximiyalıq ekvivalenti, al q arqalı element arqalı o'tken tolıq zaryadtın' mug'darı belgilengen. Usıg'an baylanıslı eki elektrodtnan ximiyalıq reaksiyanın' saldarında bo'linip shıqqan energiya ushın mına an'latpag'a iye bolamız:

$$Q_x = (p_1 K_1 + p_2 K_2)q.$$

Tuyıq element jag'dayında shınjırda jumıs islenip, ol jumıs Djoul-Lents jıllılıg'ına aylanadı. Bunday jag'dayda biz elektr zaryadları shınjırdań hesh jerinde de toplanıp qalmaydı, demek toq tek sırtqı shınjırda g'ana emes, al elementtin' ishinde de ju'redi degen juwmaqqa kelemiz. Galvanikalıq elementtin' o'zi bolsa toqqa belgili bir qarsılıq ko'rsetedi. Bunday karsılıqtı biz **galvanikalıq elementtin' ishki karsılıg'ı (toq dereginin' ishki karsılıg'ı)** dep atadıq. Bul karsılıq elektrolit penen elektrodlardın' karsılıqlarınan turadı. Galvanikalıq elementtin' ishindegi temperaturanı turaqlı ha'm galvanikalıq elementtin' barlıq noqatlarında birdey dep esaplaymız. Elementin' jumıs islewiniń usınday rejimin **kvizistatikalıq rejim** dep ataymız.



36-su'wret.

Galvanikalıq elementi bar elektr shınjırı.

Biz qarap atırg'an tuyıq shınjır ushın termodinamikanın' birinshi baslamasın (energiyanın' ulıwmalıq saqlanıw nızamın) qollanamız. Bunday jag'dayda

$$Q_x = A + Q_T.$$

Bul an'latpada A arqalı toqtın' jumısı belgilengen. Demek kvazistatikalıq rejimde ximiyalıq reaksiyanın' barlıq energiyası jumısqa aylanbay, al tek mına bo'legi g'ana jumısqa aylanadı eken:

$$A = Q_x - Q_T.$$

Kvazistatikalıq protsess ushın A jumısı ximiyalıq reaktsiyanın' **maksimallıq jumısı** dep ataladı. Al berilgen temperaturadag'ı maksimallıq jumıs bolsa Q_x energiyasın' belgili bil bo'limi bolıp tabıladı. Bul jumıstın' mug'darı da Q_x tın' mug'darı sıyaqlı shınjır arqalı o'tken zaryadtın' mug'darına proporsional. Usıg'an baylanısı

$$A = \dot{A} q$$

dep boljawg'a boladı. Bul an'latpadag'ı \dot{A} arqalı bir birlik zaryadqa tuwrı keliwshi berilgen ximiyalıq reaktsiyanın' maksimallıq jumısı bolıp tabıladı. Bul shama **galvanikalıq elementtin' elektr qozg'awshı ku'shi** degen attı aldı.

A nı toqtın' islegen tolıq jumısına ten'lestirip mınag'an iye bolamız:

$$\dot{A} q = RI^2 t + rI^2 t.$$

Bul an'latpada r arqalı galvanikalıq elementtin' ishki qarsılıg'ı belgilengen. Ten'liktin' eki ta'repin de $Q = It$ shamasına bo'lip tolıq shınjır (tuyıq shınjır) ushın Om nızamına iye bolamız:

$$I = \frac{\dot{A}}{R + r}.$$

$R + r$ qosındısı shınjırdın' tolıq qarsılıg'ı dep ataladı.

Demek qa'legen galvanikalıq element ushın ta'n bolg'an shamanı kirgiziwge boladı eken. Bul shama galvanikalıq elementtin' elektr qozg'awshı ku'shi bolıp tabıladı.

$I = \frac{\dot{A}}{R+r}$ formulasınan elektr qozgawshı ku'shtin' o'lsheń birligigin' kernewdin' o'lsheń birligindey bolatug'inlig'ı ko'rinip tur. Sonlıqtan elektr qozgawshı ku'shti ko'psilik jag'daylarda voltlerde beremiz.

Toq dereginin' paydalı ta'sir koeffitsienti. Meyli qanday da bir derek \dot{A} elektr qozg'awshı ku'shine, r ishki qarsılıg'ına iye bolıp, ol qarsılıg'ı R bolg'an shınjır menen tuyıqlangan bolsın. Sırtqı shınjırda

$$P_a = UI = RI^2 = \dot{A}^2 \frac{R}{(R + r)^2}$$

shamasına ten' quwatlıq bo'linip shıg'adı. Sırtqı shınjırda berilgen toq deregine sa'ykes keliwshi maksimallıq quwatlıq bolg'an $(P_a)_{maks}$ shamasın alıw kerek bolsın. Bunday jag'dayda a'dette qarap atırg'an funktsiyadan tuwındı alıp, usı tuwındını nolge ten'lestiriw kerek boladı (funktsiyanın' maksimumında tuwındı nolge ten' boladı degen so'z). Tap usınday jol menen maksimallıq quwatlıqqa sa'ykes keliwshi qarsılıqtın' ma'nisi $R = R_m$ shamasın P_a dan R boyınsha tuwındı alıp, onı nolge ten'lestiriw arqalı alamız:

$$\frac{dP_a}{dR} = \dot{A}^2 \frac{r^2 - R_m^2}{(r + R_m)^4} = 0.$$

Endi r menen R di barlıq waqıtta da on' ma'niske iye boladı dep esaplap

$$R_m = r$$

ekenligine iye bolamiz. Demek en' u'lken kuwatlıq sırtqı karsılıq galvanikalıq elementtin' ishki qarsılıg'ına ten' bolg'an jag'dayda alınadı eken. Bunday jag'dayda shınjırdag'ı toqtın' shaması $\dot{A}/2r$ ge, yag'nıy shınjırdı qısqa tuyıqlag'andag'ı toqtın' yarımına ten' (sırtqı karsılıq nolge ten' bolg'an jag'day shınjırdı kısqa tuyıqlaw dep ataladı). Al quwatlıqtın' mu'mkin bolg'an en' u'lken ma'nisi

$$(P_a)_{maks} = \frac{\dot{A}^2}{4r}.$$

Biraq toq dereklerin a'meliy paydalang'anda ko'pshilik jag'daylarda paydalı ta'sir koeffitsientlerin biliw kerek boladı. Derek sırtqı shınjır ushın jumıs islegende toq derektin' ishinen de o'tedi ha'm usıg'an baylanıslı derektin' o'zinen jıllılıq bo'linip shıg'adı. Sonlıqtan quwatlıqtın' bazı bir mug'darı paydasız derektin' ishinde jıllılıqtın' bo'linip shıg'ıwı ushın jumsaladı. Bul quwatlıqtın' ma'nisi

$$P_i = rI^2,$$

al derektin' tolıq quwatı

$$P = RI^2 + rI^2$$

shamasına ten' boladı. Sonlıqtan toq dereginin' paydalı ta'sir koeffitsienti mınag'an ten':

$$\eta = \frac{P_a}{P} = \frac{U}{\dot{A}}.$$

Barlıq waqıtta $U < \dot{A}$ bolg'anlıqtan $\eta \leq 1$.

9-§. Elektr o'tkizgishlerdin' ta'biyatı

Metallardag'ı elektr o'tkizgishlik. Rike, Mandelshtam-Papaleksi ha'm Stroart-Tolmen ta'jiriybeleri. Metallardag'ı elektr o'tkizgishliktin' klassikalıq elektron teoriyası tiykarında Om ha'm Djoul-Lents, Videman-Frants nızamların tu'sindiriw. Yarım o'tkizgishler. Yarım o'tkizgishlerdin' elektr o'tkizgishligi. Taza ha'm aralaspalı elektr o'tkizgishlik. Asa o'tkizgishlik ha'm onın' tiykarg'ı qa'siyetleri

Joqarıda bir neshe ret ayılğ'anday, metallardag'ı toq alıp ju'riwshiler erkin elektronlar bolıp tabıladı. Bunday erkin elektronlar metaldın' ionları menen a'zzi baylanısқан. Elektr tog'ın o'tkeriwge metallardag'ı ionlar qatnaspaydı. Eger toqtı tasıwg'a ionlar qatnasatug'ın bolg'anda, onda elektr tog'ının' metall arqalı o'tiwi elektroliz ha'm usıg'an baylanıslı metaldın' bir bo'liminen ekinshi bo'limine zattın' ko'shiwi menen birge ju'rgen bolar edi. Al ta'jiriybelerde bunday qubılıs baqlanbaydı. Fizik **Rike** jıl dawamında bir birine kiydirilgen mıs, alominiy ha'm ja'ne mıs tsilindrleri arqalı toqtın' o'tiwin baqlag'an. Usı tsilindr arqalı bir jıl dawamında 3,5 million kulon mug'darında elektr zaryadı o'tkerilgen (bul og'ada u'lken zaryad). Biraq ta'jiriybeler metallardın' bir birine sin'iwinin' (aralasıwının') orın almaytug'ınlg'ın ko'rsetti.

Metallardag'ı toqtı alıp ju'riwshilerdin' ta'biyatı boyınsha bir qatar juwmaqlar shıg'arıwg'a *inertsia ku'shlerin'in* ta'sirinde elektr tog'ın qozdaraw boyınsha islengen ta'jiriybelerdin' juwmaqları mu'mkinshilik berdi. Usınday ta'jiriybelerdin' ideyasın tu'siniw ushın o'zinin' geometriyalıq ko'sheri do'gereginde ten' o'lsheuli emes qozgalatug'ın jin'ishke sım saqıynanı qaraymız. Tezleniwshi aylanıwda erkin elektronlar sakıynanın' kristallıq pa'njeresinen artta qaladı, al a'steleniwshi qozg'alısta erkin elektronlar sakıynanın' kristallıq pa'njeresinen ozıp ketedi. Usının' saldarınan kristallıq pa'njerege salıstırğ'anda elektronlardın' qozg'alısı, yag'nıy toqtın' payda bolıw qubılısı orın aladı. Usı qubılıstı sanlıq jaqtan ta'riplew ushın saqıyna menen birge qozg'alatug'ın esaplaw sistemasına o'temiz. Bul sistemada ha'r bir erkin elektrong'a ta'sir etiwshi inertsia ku'shi F_{in} payda boladı. Onın' shamasın elektronnın' zaryadına bo'lip elektr tog'ın qozdırıwshi *ta'replik maydan* dep atalıwshi elektr maydanın alamız $E^{ta'rep} = F_{in}/e$. Qozg'an toq o'zgeriwshi bolg'anlıqtan Om nızamın bilayınsha jazamız:

$$j + \tau_{in} \frac{dj}{dt} = \lambda(E^{ta'rep} + E). \quad (91)$$

Bul an'latpada E arqalı elektronlardın' ionlarg'a salıstırğ'anda awısıwının' saldarınan payda bolatug'ın maydannın' kernewligi belgilengen. Al τ_{in} arqalı metaldag'ı elektronnın' inertsialıq waqıtı dep atalatug'ın waqıt belgilengen (usınday waqıt ishinde elektronnın' tezligi e ese kemeydi)³.

Bul ten'lemeni integral formag'a alıp kelemiz:

$$R \left(I + \tau_{in} \frac{dI}{dt} \right) = \oint (E^{ta'rep} + E) dl.$$

Bul an'latpada R arqalı saqıynanın' qarsılıgı belgilengen, al integrallaw saqıynanın' konturi boyınsha alınadı. Birinshi integral $\oint E^{ta'rep} dl$ ta'replik maydan ta'repinen payda etiletug'ın elektr qozg'awshı ku'sh \dot{A} . Ekinshi interval $\oint E dl$ bolsa $-L \frac{dI}{dt}$ shamasına ten'. L shamasın saqıynanın' (o'tkizgishtin') induktivligi dep ataymız ha'm ol haqqında keyinirek tolıq tu'rde ga'p etemiz. Solay etip

$$(L + R\tau_{in}) \frac{dI}{dt} + RI = \dot{A}. \quad (92)$$

Biz qarap atırğ'an jag'dayda \dot{A} elektr qozg'awshı ku'shi inertsia ku'shleri ta'repinen ju'zege keltiriledi. O'tkishtin' ko'sherine perpendikulyar bolg'an inertsia ku'shleri I toqtın' shamasına ta'sir jasamaydı. Biz qarap atırğ'an jag'dayda o'tkizgishtin' tek ko'sheri bag'ıtındag'ı inertsia ku'shleri g'ana a'hmiyetke iye. Bul ku'sh aylanıstın' ten' o'lsheuli emesliginin' saldarınan payda boladı ha'm $F_{in} = -m\dot{v}$ shamasına ten'. Bul an'latpada m arqalı massa, al \dot{v} arqalı tezleniw (tezlikten waqıt boyınsha alıng'an tuwindı) belgilengen. Joqarıda ayılğ'anlardın' barlıg'ın esapqa alıp (92)-ten'lemeni bilayınsha ko'shirip jazamız:

$$(L + R\tau_{in}) \frac{dI}{dt} + RI = -\frac{m}{e} l \dot{v}.$$

Bul an'latpada l arqalı saqıynanın' uzınlıg'ı belgilengen. Bul ten'lemeni waqıt boyınsha $t = t_1$ den $t = t_2$ ge shekem integrallasaq, onda

³ Metaldag'ı elektronnın' inertsialıq waqıtı haqqında tolıg'ıraq mına oqıw qollanbasında bar:

D.V.Sivuxin. Elektrishestvo. Ushebnoe posobie. 2-e izdanie, ispravlennoe. Izdatelstvo «Nauka». Moskva. 1983. 688 s. (180-bet 42.2- ha'm 42.3-formulalar).

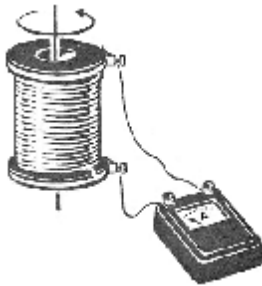
$$(L + R\tau_{in})(I_2 - I_1) + Rq = -\frac{m}{e}l(v_1 - v_2).$$

Bul an'latpada $q = \int I dt$ (ag'ıp o'tken elektr zaryadlarının' mug'darı). I_1 , I_2 , v_1 , v_2 ler toqtın' ha'm elektronlardın' tezliklerinin' sa'ykes t_1 ha'm t_2 waqıt momentlerindeki ma'nisleri. Meyli t_1 waqıt momentinde saqıyna $v_1 = v$ tezligi menen bir tekli aylanıp turg'an bolsın, al t_2 waqıt momentinde v nolge ten' bolsın. Usı waqıtqa shekem saqıynadag'ı toqtın' anıq bir bir ma'niske kelip jetiw protsessi tamamlang'an dep esaplayıq. Bunday jag'dayda $I_2 = I_1$ ha'm

$$q = \frac{mlv}{eR}. \quad (93)$$

Ballastikalıq galvanometrдин' ja'rdeminde q dı o'lshep (93)-formulanın' ja'rdeminde salıstırmalı zaryad $\frac{m}{e}$ ni, al galvanometrдин' strelkasının' awısıwının' bag'ıtına qarap zaryadtın' belgisin anıqlaw mu'mkin.

Usınday ta'jiriybelerdin' ideyası 1913-jılı L.İ.Mandelshtam (1879-1944) ha'm N.D.Papaleksi (1880-1947) ta'repinen usınıldı ha'm bul boyınsha sapalıq ta'jiriybeler o'tkerdi. Olar sim oralg'an tu'teni onın' ko'sheri do'gereginde tez aylanbalı qozg'alısqa keltirgen. Al toqtın' payda bolg'anlıg'ın yamasa payda bolmag'anlıg'ın seziw ushın tu'tenin' simlarının' ushına telefon jalg'ag'an. Toq impulsı payda bolg'anda telefonnan ses shıqqan. Strasburg qalasında o'tkerilgen bul sapalıq ta'jiriybeler haqıyqatında da o'zgermeli toqtın' payda bolatug'ınlıg'ın ko'rsete alg'an. Jaqınlap kiyatır'ın birinshi Jer ju'zlik urıs olardıń jumıslarına kesent bergen. Al sanlıq na'tiyje beretug'ın ta'jiriybeler G.A.Lorentts (1853-1928), Tolmen (1881-1948) ha'm Stıuart ta'repinen 1916-jılı dawam ettirilgen. Bul ta'jiriybelerdin' barlıg'ı da metallardag'ı toqtı tasıwshılardıń elektronlar ekenligin da'lilledi.



Tolmen ha'm Stıuart ta'jiriybesi.

Metallardag'ı elektr tog'ı og'ada kishi potentsiallar ayırması tu'sirilgende de payda boladı Bul jag'day metallardag'ı erkin elektronlardın' metall boyınsha derlik erkin qozg'alatug'ınlıg'ınan derek beredi. Tolmen ha'm Stıuart ta'jiriybelerinin' juwmaqları da usı jag'daydı tolıq da'lilleydi.

Metallardag'ı erkin elektronlardın' kontsentratsiyası $n = 10^{22} - 10^{23} \text{ cm}^{-3}$ shamasında (mısalı mıs, gu'mis, altın, alıminiy sıyaqlı metallar jag'dayında ha'r bir atomg'a shama menen bir erkin elektronnan sa'ykes keledi degen so'z).

Erkin elektronlar ko'z-qarası tiykarında Drude (1863-1906) metallardıń klassikalıq teoriyasın do'retti. Bul teoriya keyinirek G.A.Lorentts ta'repinen jetilistirildi. Drude metallardag'ı erkin elektronlardı ideal gazdin' molekulları sıpatında qaradı (demek erkin elektronlardı **elektron gazi** dep ataymız). Bir soqlıg'ısıwdan ekinshi soqlıg'ısıwg'a shekem olar (erkin elektronlar) pu'tkilley erkin qozg'aladı ha'm bazı bir λ aralıg'ın o'tedi (bul jerde mına jag'daydı eske alıw kerek: gazda molekullar tek bir biri menen soqlıg'ısadı, al metaldın' ishinde bolsa erkin elektronlar bir biri menen de, ko'birek metaldag'ı ionlar menen de soqlıg'ısadı). Bul

soqlıǵ'ısıwlar elektron gazı menen kristallıq pa'njere arasındag'ı jıllılıq ten' salmaqlıǵ'ının' ornawına alıp keledi.

Maksvell bo'listiriliwi tiykarında elektronlardın' tezliklerinin' absolt shamasının' ortasha ma'nisin

$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}} \quad (94)$$

formulası menen anıqlaymız. O'jire temperaturaları ushın (shama menen 300 K) tezliklin' mınaday ma'nisin alamız:

$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{3,14 \cdot 0,91 \cdot 10^{-30}}} \frac{m}{sek} \approx 10^5 \frac{m}{sek} = 10^2 \frac{km}{sek}.$$

Elektr maydanı tu'sirilgende $\langle v \rangle$ ortasha tezligi menen bolatug'ın ta'rtipsiz jıllılıq qozg'alıslarına elektronlardın' bazı bir ortasha $\langle u \rangle$ tezligi menen ta'rtiplesken (dreyflik) qozg'alısı da qosıladı. Sa'ykes elektr tog'ının' ma'nisi

$$j = ne\langle u \rangle \quad (95)$$

formulası menen anıqlanadı. Mıstan sog'ılg'an sımalar ushın texnikalıq normalar tiykarında ruqsat beriletug'ın toqtın' tıǵ'ızlıǵ'ı $10^7 \frac{A}{m^2} = 10 \frac{A}{mm^2}$ shamasına ten'. n ushın $10^{29} m^3 = 10^{23} sm^3$ shamasın alsaq, onda

$$\langle u \rangle = \frac{j}{en} \approx \frac{10^7}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{29}} \approx 10^{-3} \frac{m}{sek} = 1 \frac{mm}{sek}$$

shamasına iye bolamız. Solay etip toqtın' en' u'lken shamalarında da elektronlardın' ta'rtiplesken qozg'alısının' tezligi $\langle u \rangle$ sol elektronlardın' jıllılıq qozg'alısındag'ı ortasha tezligi $\langle v \rangle$ dan shama menen 100 million ese kishi boladı eken. Sonlıqtan jıllılıq qozg'alıslarındag'ı tezlik penen dreyflik qozg'alısının' tezliklerin qosqanımda $|\mathbf{v} + \mathbf{u}|$ qosındısın jıllılıq qozg'alısındag'ı tezliklin' moduli $|\mathbf{v}|$ menen almasırwg'a boladı.

Elektr maydanının' ta'sirinde elektronnın' ortasha kinetikalıq energiyasının' o'simin esaplaymız. Qosındı tezliklin' ortasha kvadratı mınag'an ten'

$$\langle (\mathbf{v} + \mathbf{u})^2 \rangle = \langle v^2 + 2\mathbf{vu} + u^2 \rangle = \langle v^2 \rangle + 2\langle \mathbf{vu} \rangle + \langle u^2 \rangle \quad (96)$$

Jıllılıq qozg'alısındag'ı tezliklin' \mathbf{v} ma'nisine, dreyflik tezliklin' ma'nisinin' \mathbf{u} shamasına ten' bolıwı statistikalıq jaqtan bir birinen g'a'rezsiz waqıyalar bolıp tabıladı. Sonlıqtan itimallıqlardı bir birine ko'beytiw qag'ıydası boyınsha (molekulalıq fizika kursında o'tildi) $\langle \mathbf{vu} \rangle = \langle \mathbf{v} \rangle \langle \mathbf{u} \rangle$. Biraq $\langle \mathbf{v} \rangle$ nolge ten', sonlıqtan (96) dag'ı ekinshi qosılıwshı jog'aladı ha'm formula mına tu'rge iye boladı:

$$\langle (\mathbf{v} + \mathbf{u})^2 \rangle = \langle v^2 \rangle + \langle u^2 \rangle$$

Bunnan ta'rtiplesken qozg'alıstın' (dreyflik qozg'alıstın' yamasa toqtı tasıwshı elektronlardın' ta'rtiplesken qozg'alısının') saldarınan elektronlardın' kinetikalıq energiyası

$$\langle \Delta \varepsilon_k \rangle = \frac{m \langle u^2 \rangle}{2} \quad (97)$$

shamasına artadı eken (biz joqarıda $\langle u^2 \rangle$ shamasının' ju'da' kishi shama ekenligin ko'rdik, sonlıqtan $\langle \Delta \varepsilon_k \rangle$ shamasının' ma'nisi de ju'da' kishi boladı).

Om nızamı. Drude toqtı tasıwshı erkin elektron pa'njerenin' ionı menen soqlıg'ısqanda (97)-formula menen anıqlang'an kinetikalıq energiyanın' barlıg'ı da sol iong'a beriledi, al elektron o'zinin' ta'rtiplesken qozg'alısının' tezligin tolıg'ı menen joytadı dep esapladı. Elektrong'an tezleniw beriwshi elektr maydanın turaqlı dep esaplaymız. Bunday jag'dayda maydannın' ta'sirinde elektron bir soqlıg'ısıw aktinen ekinshi soqlıg'ısıw aktine shekem eE/m tezleniwi menen qozg'aladı ha'm soqlıg'ısaman degen she onın' tezliginin' ma'nisi

$$u_{max} = \frac{eE}{m} \tau \quad (98)$$

shamasına shekem o'sedi. Bul an'latpada τ arqalı pa'njerenin' ionı menen birinshi soqlıg'ısıwdan ekinshi soqlıg'ısıwg'a shekemgi ortasha waqıt belgilengen.

Drude elektronlardın' tezlikler boyınsha tarqalıwın esapqa almadı ha'm barlıq elektronlarg'a birdey v tezligin berdi. Bunday jaqınlasıwda $\tau = \lambda/v$ ($|\mathbf{v} + \mathbf{u}|$ shamasının' $|\mathbf{v}|$ shamasına ten' ekenligin eske salamız). τ dın' bul ma'nisin (98)-formulag'a qoysaq, onda

$$u_{max} = \frac{eE}{mv} \lambda \quad (99)$$

an'latpasın alamız. Qozg'alıwdın' barısında u tezligi sıızqlı o'zgeredi. Sonlıqtan bir soqlıg'ısıwdan ekinshi soqlıg'ısıwg'a shekem ju'rip o'tken joldın' shaması joldın' maksimallıq ma'nisinin' yarımına ten', yag'nıy

$$\langle u \rangle = \frac{1}{2} u_{max} = \frac{eE}{2mv} \lambda.$$

Bul an'latpanı (95)-an'latpag'a qoysaq, onda

$$j = \frac{ne^2 \lambda}{2mv} E$$

formulasına iye bolamız. Toqtın' tıg'ızlıg'ı elektr maydanının' kernewligine proporsional bolıp shıqtı. **Bul Om nızamı bolıp tabıladı.** Toqtın' tıg'ızlıg'ı menen elektr maydanının' kernewligi arasındag'ı proporsionallıq koeffitsienti

$$\sigma = \frac{ne^2 \lambda}{2mv}$$

o'tkizgishlik bolıp tabıladı.

Eger elektronlar ionlar menen soqlıg'ıspag'anda elektronlardın' erkin ju'riw jolının' uzınlıg'ı sheksiz u'lken bolg'an bolar edi. Bunday jag'dayda o'tkizgishlik σ nın' da ma'nisi sheksiz u'lken boladı. Solay etip klassikalıq ko'z-qaraslar boyınsha metallardın' qarsılıg'ı metaldın' kristallıq pa'njeresinin' tu'yinlerinde jaylasqan ionlar menen soqlıg'ısıwının' na'tiyjesi eken. Bul teoriyanın' qanday da'rejede durıs yamasa qa'te ekenligi keyinirek anıqlanadı.

Djoul-Lents nızamı. Biz joqarıda erkin ju'riw jolının' en' aqırında elektronnıń' ortasha ma'nisi

$$\langle \Delta \varepsilon_k \rangle = \frac{mu_{max}^2}{2} = \frac{e^2 \lambda}{2mv^2} E^2 \quad (100)$$

shamasına ten' bolg'an kinetikalıq energiyag'a iye bolatug'ınlıg'ın ko'rdik. İonlar menen soqlıg'ısıwdın' na'tiyjesinde usınday kinetikalıq energiya iong'a beriledi. Bul energiya bolsa metaldın' ishki energiyasınıń' o'siwin ta'miyinleydi. Al ishki energiyanın' o'siwin metaldın' temperaturasınıń' joqarılawınan bilemiz.

Ha'r bir elektron bir sekund ishinde metaldın' ionı menen ortasha $\frac{1}{\tau} = v/\lambda$ ret soqlıg'ısadı. Ha'r bir soqlıg'ısqanda (100)-an'latpadag'ıday energiyanı kristallıq pa'njerege beredi. Demek toq o'tip turg'an metaldın' ko'leminin' bir birliginen bir sekund waqıt ishinde

$$Q_{sal} = n \frac{1}{\tau} \langle \Delta \varepsilon_k \rangle = \frac{ne^2 \lambda}{2mv} E^2$$

shamasındag'ı jıllıqtı bo'lip shıg'aradı (n arqalı ko'lem birligindegi o'tkizgishlik elektronların' sanı belgilengen)⁴. Q_{sal} shaması toqtın' salıstırmalı jıllılıq quwatı bolıp tabıladı ha'm (90)-formulag'a sa'ykes keledi. Sonlıqtan alıng'an barlıq an'latpalardı tallap an'sat tu'rde Djoul-Lents nızamın an'latatug'ın $Q_{sal} = \rho j^2$ formulasına kelemiz.

Videman-Frants nızamı. Ta'jiriybeler metallardıń' joqarı elektr o'tkizgishlik penen bir qatarda joqarı jıllılıq o'tkizgishlikke de iye bolatug'ınlıg'ın ko'rsetedi. 1853-jılı Videman ha'm Frants ta'jiriybede jıllılıq o'tkizgishlik koeffitsienti κ nın' elektr o'tkizgishlik koeffitsienti σ g'a qatnasının' barlıq metallar ushın shama menen birdey ekenligin ha'm usı qatnastın' absoliot temperaturag'a tuwrı proporsional o'setug'ınlıg'ın ko'rsetti. Mısalı o'jire temperaturalarında alominiy ushın bul qatnas $5,8 \cdot 10^{-6}$ g'a, mis ushın $64,4 \cdot 10^{-6}$ g'a ha'm qorg'asın ushın $7 \cdot 10^{-6} \frac{Dj \cdot Om}{s \cdot K}$ g'a ten' bolatug'ınlıg'ın ko'rsetti.

A'lbette metall emes deneler de jıllılıq o'tkizedi. Biraq metallardıń' jıllılıq o'tkizgishlik qa'biletligi dielektriklerdin' jıllılıq o'tkizgishlik qa'biletliginen a'dewir u'lken. Bul mag'lıwmatlar metallardag'ı jıllılıq o'tkizgishlikke kristallıq pa'njere menen bir qatarda o'tkizgishlik elektronların' da qatnasatug'ınlıg'ın ko'rsetedi. Bul elektronlardı bir atomlı gaz dep esaplap gazlerdin' kinetikalıq teoriyasınan jıllılıq o'tkizgishlik koeffitsientinin' formulasın paydalanıwımızg'a boladı:

$$\chi = \frac{1}{3} nmv\lambda c_V.$$

Bul an'latpada gazdın' tıg'ızlıg'ı ρ nın' ornına nm ko'beymesi, al ortasha tezlik $\langle v \rangle$ nın' ornına v alıng'an. Bir atomlı gazdın' salıstırmalı jıllılıq sıyımlıg'ı $c_V = \frac{3}{2} \frac{k}{m}$ ge ten'. Bul an'latpanı joqarıdag'ı an'latpag'a qoyıp, mınanı alamız:

$$\chi = \frac{1}{2} nk v \lambda.$$

⁴ «O'tkizgishlik elektronları», «erkin elektronlar», «toq tasıwshı elektronlar» so'zleri bir ma'niste qollanımaqta.

Biz joqarıda $\sigma = \frac{ne^2\lambda}{2mv}$ ekenligine iye bolg'an edik. Endi $\frac{mv^2}{2}$ nin' ortasha ma'nisinin' $\frac{3}{2}kT$ shamasına ten' ekenligin esapqa alamız. Usının' na'tiyjesinde

$$\frac{\chi}{\sigma} = \frac{kmv^2}{e^2} = 3 \left(\frac{k}{e}\right)^2 T \quad (101)$$

an'latpasına iye bolamız. Bul an'latpa Videman-Frants nızamın an'g'artadı. Eger (101)-formulag'a elementar zaryad penen Boltsman turaqlılarının' ma'nisin qoysaq, onda

$$\frac{\chi}{\sigma} = 2,23 \cdot 10^{-8} T$$

formulasın alamız. O'jire temperaturalarında ($T = 300 K$) $\frac{\chi}{\sigma} = 6,7 \cdot 10^{-6} \frac{Dj \cdot Om}{s \cdot K}$ shamasına iye bolamız. Bul shama ta'jiriybede alıng'an shamalarg'a sa'ykes keledi. Biraq keyinirek bunday sa'ykesliktin' tosınnan bolg'an sa'ykeslik ekenligi da'lillendi. Lorents elektronlardın' tezlikler boyınsha tarqalıwın inabatqa alıw jolı menen esaplawlar ju'rgizgende $\frac{\chi}{\sigma} = 2 \left(\frac{k}{e}\right)^2 T$ bolıp shıqtı. Bul na'tiyje ta'jiriybeler juwmaqları menen «jamanıraq» sa'ykes keledi.

Solay etip klassikalıq teoriya Om, Djoul-Lents nızamların tabıslı tu'rde tu'sindire aldı, al Videman-Frants nızamın tek sapalıq jaqtan g'ana tu'sindirdi. Bul klassikalıq teoriyanın' bazı bir kemshiliklerinin' bar ekenliginin' aqıbeti bolıp tabıladı. Usının' saldarınan klassikalıq teoriya ko'p ma'selelerge durıs juwap bere almadı. Bul ma'seleler xaqında o'z aldına ga'p etiledi.

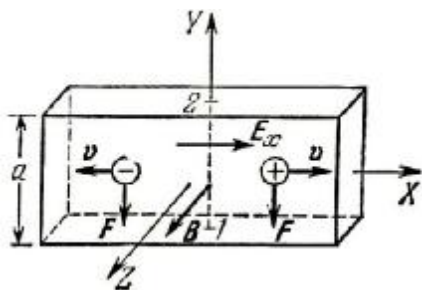
Xoll effekti. Biz joqarıda metallardın' elektr o'tkizgishliginin' o'tkizgishlik elektronların' n kontsentratsiyasınan g'a'rezli ekenligin ko'rdik. Haqıyqatında da toqtın' tıg'ızlıg'ı

$$\mathbf{j} = enb\mathbf{E}. \quad (102)$$

Bul formulada b arqalı elektronlardın' jılısqaqlıg'ı (podvijnost) belgilengen. Eger $e > 0$ bolsa toqtın' tıg'ızlıg'ı elektr maydanı bag'ıtında, al $e < 0$ bolg'anda toqtın' tıg'ızlıg'ı menen elektr maydanının' kernewligi o'z-ara antiparallel. Usı jag'dayg'a baylanıslı n ha'm b shamaların anıqlaw ushın (102)-an'latpanın' qasına ja'ne bir ten'leme kerek boladı. Usı maqsette biz Xoll effektinen paydalanamız.

Meyli uzın ha'm juqa metall lenta boylap tıg'ızlıg'ı \mathbf{j} shamasına ten' toq o'tip turg'an bolsın (37-su'wret). Toqtın' bag'ıtın X ko'sherinin' bag'ıtı sıpatında qabıl etemiz. Meyli lenta tegisligine perpendikulyar, Z ko'sherinin' bag'ıtı menen bag'ıtlas \mathbf{B} magnit maydanı tu'sirilgen bolsın. Eger toqtı tasıwshılar on' zaryadlang'an bo'leksheler bolsa, onda olar toq penen birge on' ta'repke qaray qozg'alg'an bolar edi ha'm Lorents ku'shi $\frac{e}{c}[\mathbf{vB}]$ zaryadlang'an bo'lekshelerdin' to'menge qaray awısıwın boldırg'an bolar edi. Usının' aqıbetinde lentanın' to'mengi ushı on' zaryadlar menen, al joqarg'ı ushı teris zaryadlar menen zaryadlanadı. Payda bolg'an E_y elektr maydanı magnit maydanı ta'repinen zaryadlang'an bo'lekshelerdin' to'menge qaray awısıwına qarsılıq jasag'an bolar edi. Lentanın' to'mengi ha'm joqarg'ı ushlarında g'ı zaryadların' jıynalıw protsessi zaryadların' lentanın' kese-kesimi arqalı o'tiwi tamamlanıp bolg'ansha ju'redi. Usınnan keyin lentag'a ko'ldenen' bag'ıtta bir birine qarama-qarsı bolg'an 1 ha'm 2 noqatları arasında $V_1 - V_2$ on' potentsiallar ayırması payda boladı. Eger toqtı tasıwshılar teris zaryadlar bolıp tabılatur'ın bolsa, onda olar toq penen birge shep ta'repke qaray qozg'aladı. Lorents ku'shi $\mathbf{F} = \frac{e}{c}[\mathbf{vB}]$ bunday bo'lekshelerdi to'menge qaray da awıstıradı. Sonlıqtan endi lentanın' to'mengi ushı teris zaryadlanadı, al jokarg'ı ushı on' zaryadlanadı. Bul jag'dayda $V_1 - V_2$

potentsiallar ayırmasinin' ma'nisi teris boladi. Magnit maydanidag'i ko'ldenen' potentsiallar ayırmasinin' payda bolıwı ta'jiriybede 1879-jılı Xoll ta'repinen ashıldı, al qubılıstın' o'zi Xoll effekti dep ataladı.



37-su'wret.

Xoll effektin tu'sindiriwge arnalg'an su'wret.

Ta'jiriybeler a'zzi magnit maydanidag'i payda bolg'an lentanın' uzınlıg'ına ko'ldenen' potentsiallar ayırması U dın' magnit induktsiyası B g'a, toqtın' tıg'ızlıg'ı j g'a ja'ne 1 ha'm 2 noqatları arasındag'i qashıqlıqqa proporsional bolatug'ınlg'ın ko'rsetedi:

$$U = RdjB. \quad (103)$$

Biz joqarıda lentanın' to'mendegi ha'm joqarıdag'i ushlarının' zaryadlanıwının' saldarınan lentanın' uzınlıg'ına ko'ldenen' bag'ıtta E_y elektr maydanının' payda bolatug'ınlg'ın eske alıp o'tip edik. Ten' salmaqlıq sha'rti orınlang'anda $eE_y = evB$. Sonlıqtan ko'ldenen' bag'ıttag'i potentsiallar ayırması

$$U = Ed = vBd.$$

Bul an'latpada elektronnın' ortasha tezligi v nı toqtın' tıg'ızlıg'ı j arqalı bılayınsha an'latamız:

$$j = nev.$$

Sonlıqtan

$$U = \frac{1}{ne}djB.$$

Bul an'latpa (103)-an'latpag'a sa'ykes keledi. Na'tiyjede Xoll turaqlısının' mınag'an ten' ekenligine iye bolamız:

$$R = \frac{1}{ne} \quad (104)$$

Demek Xoll turaqlısının' ma'nisi toqtı tasıwshılardıń kontsentratsiyasınan g'a'rezli eken. Ta'jiriybede R dın' ma'nisin anıqlap kontsentratsiya n di anıqlaydı. Al payda bolg'an ko'ldenen' potentsiallar ayırmasinin' belgisi boyınsha toq tasıwshı elektr zaryadlarının' belgisi de anıqlanadı.

Yarım o'tkizgishler ha'm izolyatorlar. Biz joqarıda o'tkizgishlerdegi toqtı tasıwshılardıń qalay payda bolatug'ınlg'ı jo'ninde hesh na'rse aytpadıq. Bul ma'seleni ayqınlastırıw ushın toqtı tasıwshılardıń kontsentratsiyasının' temperaturag'a g'a'rezliligin anıqlaw u'lken a'hmiyetke iye bolg'an bolar edi. Bunday ma'seleni ha'r tu'rli temperaturalarda Xoll turaqlısın anıqlaw arqalı sheshiwge boladı.

Ta'jiriybeler metallardag'ı erkin elektronlardın' konsentratsiyasın' temperaturadan derlik g'a'rezsiz ekenligin ko'rsetedi. Ha'tte ju'da' kishi temperaturalarda da metallarda og'ada ko'p sandag'ı erkin qozg'alıwshı elektronlar boladı. Bul jag'day metallardag'ı o'tkizgishlik elektronların' payda bolıwında temperaturanın' a'hmiyetli orındı iyelemeytug'inlig'in ko'rsetedi.

A'dettegi metallardın' ha'r bir atomı yadrosı menen a'zzi baylanısqa bir yamasa bir neshe elektronlardın' bar ekenligi menen ta'riplenedi. Metaldın' atomları bir birine jaqınlasqanda (yag'niy atomlar jıynalıp metall payda bolg'anda) qon'ısilas atomlar arasındag'ı o'z-ara ta'sirlesiw ku'shlerinin' ta'sirinde yadrolar menen a'zzi baylanısqa bunday elektronlar o'z atomları menen baylanısın u'zedi. Endi bunday elektronlar ayırım atomg'a tiyisli emes, al pu'tkil metalg'a tiyisli bolıp qaladı da, metall boyınsha erkin qozg'aladı. Atomları menen baylanıstı u'zgen usınday elektronlar o'tkizgishlik elektronlarına aylanadı.

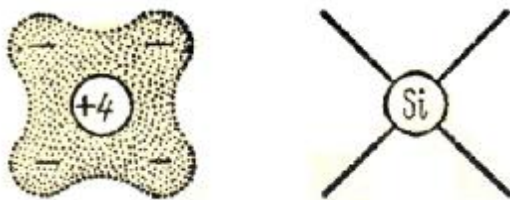
Metallar menen bir katar biz o'tkizgishlerdin' basqa da tipleri menen gezlesemiz. Bul o'tkizgishler metallar sıyaqlı elektronlıq o'tkizgishler bolıp tabıladı (bunday o'tkizgishlerdi a'dette birinshi klass o'tkizgishler dep ataladı) ha'm bunday o'tkizgishlerdegi toqtın' o'tiwi hesh qanday ximiyalıq o'zgerislerge alıp kelmeydi. Biraq o'tkizgishlik elektronların' konsentratsiyası temperaturanın' o'siwi menen keskin tu'rde o'sedi. Bunday o'tkizgishler to'mengi temperaturalarda ju'da' u'lken bolg'an salıstırmalı qarsılıqlarg'a iye bolıp, olardı izolyator dep atawg'a boladı. Biraq temperaturanın' o'siwi menen olardıñ salıstırmalı qarsılıg'ı kishireyip ketedi. ***Bunday tiptegi o'tkizgishler yarım o'tkizgishler degen attı aldı.***

Ko'p elementler (kremniy, germaniy, selen ha'm basqalar) mıstın' zakisi Cu_2O , ku'kirtli qorg'asın PbS ha'm basqa da ko'plegen birikpeler yarım o'tkizgishler bolıp tabıladı. Mısalı ta'jiriybelerdin' na'tiyjeleri o'jire temperaturalarındag'ı taza kremniyde elektronlardın' konsentratsiyasın' $10^{17} m^{-3}$ shamasınan kishi, al onın' salıstırmalı qarsılıg'ın' $10^3 Om \cdot m$ den u'lken bolatug'inlig'in ko'rsetedi. Al temperatura $700^\circ C$ g'a joqarılaga anda ondag'ı elektronlardın' konsentratsiyası $10^{24} m^{-3}$ ke shekem ko'beyedi, al salıstırmalı qarsılıg'ı $0,001 Om \cdot m$ ge shekem to'menleydi (yag'niy millionlag'an ese kemeyedi).

Yarım o'tkizgishlerdegi zaryad alıp ju'riwshilerdin' konsentratsiyasın' temperaturadan ku'shli tu'rdegi g'a'rezligi o'tkizgishlik elektronların' jıllılıq qozg'alısların' ta'sirinde payda bolatug'inlig'in ko'rsetedi. Yarım o'tkizgishlerde atomlar arasındag'ı o'z-ara ta'sirlesiwler elektronlardın' atomlardan ajralıp shıg'ıp o'tkizgishlik elektronlarına aylanıwı ushın jetkilikli emes. Al olardıñ o'tkizgishlik elektronlarına aylanıwı ushın yadroları menen en' a'zzi baylanısqa elektronlarga jıllılıqtın' esabınan qosımsha energiya beriw talap etiledi. Temperatura qanshama joqarı bolsa yarım o'tkizgilerde toqtı tasıwshı erkin elektronlardın' da konsentratsiyası sonshama u'lken boladı.

Endi yarım o'tkizgishlerdegi o'tkizgishlik elektronların' payda bolıw protsessi menen tanısamız. Anıqlıq ushın en' ko'p tarkalg'an yarım o'tkizgishlerdin' biri bolg'an kremniydi (Si) qaraymız.

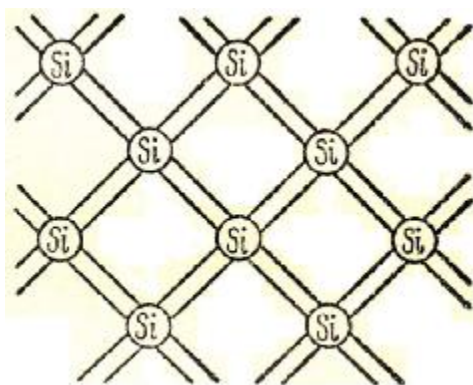
Kremniy atomı D.İ.Mendeleevtin' da'wirlik sistemasında 14-orındı iyeleydi (demek $Z = 14$). Sonlıqtan kremniy atomın' yadrosın' zaryadı $+14e$ te ten'. Atomnıñ quramına 14 elektron kiredi. Olardıñ to'rtewi yadro menen a'zzi baylanısqa. Usı to'rt elektron ximiyalıq reaksiyalarg'a qatnasadı, kremniydin' valentligin' 4 ke ten' ekenligin ta'miyinleydi, sonlıqtan bul elektronlar valentli elektronlar dep ataladı (38-su'wrette ko'rsetilgen). Qalg'an on elektron yadro menen birlikte atomnıñ zaryadı $+14e - 10e = +4e$ bolg'an o'zgermey qalatug'in ishki bo'limin payda etedi



38-su'wret.

Kremniy atomı ha'm onın' to'rt valentli baylanısı.

Kremniy kristallında atomlardın' ornalasıwı mınaday taqlette sho'lkemlestirilgen: ha'r bir atom to'rt jaqın qon'ısı atomg'a iye boladı (kristallografiyada kremniydin' atomlıq-kristallıq qurılısın sfalerit dep ataydı, bunday qurılısqa germaniy, almaz, ZnS , $ZnSe$ ha'm basqa da ko'p sanlı ximiyalıq birikpeler iye, olardıń barlıg'ı yarım o'tkizgishler bolıp tabıladı). Kremniydegi atomlardın' a'piwayılastırılğ'an jaylasıwı 39-su'wrette keltirilgen. Qon'ısılas eki atom arasındag'ı baylanıs juplıq-elektronlıq yamasa valentlik baylanıs du'ziwshi eki elektron arqalı du'ziledi.

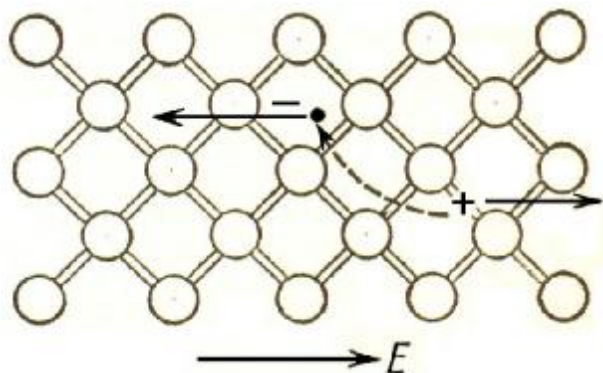


39-su'wret.

Kremniy kristallındag'ı juplıq-elektronlıq baylanıslar.

39-su'wrette ko'rsetilgen jag'day taza kremniyge ha'm ju'da' to'mengi temperaturalarğ'a sa'ykes keledi. Bul jag'dayda barlıq valentli elektronlar atomlar arasındag'ı baylanıstı ta'miyinlewge qatnasadı, olar strukturalıq elementler bolıp tabıladı ha'm toqtı o'tkiziwge qatnaspaydı.

Temperatura joqarılğ'anda jıllılıq terbelisleri bazı bir valentli baylanıslardı u'zedi. Usının' na'tiyjesinde burın valentli baylanıslardı do'retiwge qatnaskan elektronlardın' bir qanshası atomlardan u'ziledi ha'm o'tkizgishlik elektronlarına aylanadı. Elektr maydanı bar bolsa olar maydang'a qarama-qarsı bag'ıtta qozğ'aladı ha'm elektr tog'ın payda etedi.



40-su'wret.

Kremniy pa'njeresinde o'tkizgishlik elektronı menen tesikshenin' payda bolıwı.

Biraq biz qarap atırğ'an jag'dayda elektr o'tkizgishliktin' basqa da bir mexanizminin' bar ekenligi ko'zge ko'rinedi. Valentli baylanıstın' u'zilisi baylanıs joq vakant (bos) orınnın' payda bolıwına alıp keledi (yag'nıy elektron baylanıstı u'zip erkin elektrong'a aylanıp kristall boyınsha basqa orınlarg'a ketip qalğ'an, al onın' ornı bos, vakant orıng'a aylang'an). Usınday elektronı

joq bos orinlar **tesiksheler** degen attı alg'an (40-su'wret). Tesiksheler payda bolg'anda yarım o'tkizgishlerde elektr zaryadların o'tkiziwdin' jan'a mu'mkinshiliklerinin' payda bolatug'inlig'in an'sat ko'riwge boladı. Haqıyqatında da, eger kristalda tesikshe bar bolsa, onda qon'ısı elektronların' birewi onın' ornın iyelewi mu'mkin. Usının' na'tiyjesinde atomlar arasındag'ı a'dettegidey baylanıs qayta tiklenedi, biraq tesikshe basqa orında payda boladı. Bul jan'a tesiksheni baska bir elektron iyeley aladı. Sonın' saldarınan tesikshe basqa, u'shinshi orında payda boladı. Bunday protsess ko'p ret qaytalanadı ha'm na'tiyjede toqtı tasıwg'a tek erkin elektronlar g'ana emes, al baylanısı ta'miyinlep turg'an (erkin emes) valentli elektronlar da qatnasadı. Bul elektronlar elektr maydanının' kernewligi vektorının' bag'ıtına qarama-qarsı bag'ıtta a'stelik penen bir vakant orınnan ekinshi, bunnan keyin u'shinshi ha'm basqa da orınlarg'a qozg'aladı. Al bos orınlar, tesiksheler qarama-qarsı bag'ıtta elektr maydanının' bag'ıtında zaryadı on' belgige iye bo'lekshedeı bolıp qozg'aladı.

Joqarıda qarap o'tilgen protsess **tesikshelik o'tkizgishlik** atın aldı. Demek yarım o'tkizgishlerde elektr o'tkiziwsiliklikin' ha'r qanday bolg'an eki protsessi orın aladı eken: birinshisi elektronlıq o'tkizgishlik (bul protsess o'tkizgishlik elektronları ta'repinen a'melge asırıladı), ekinshi tesikshelik o'tkizgishlik (tesikshelerdin' on' zaryadlı bo'lekshelerdeı bolıp qozg'alıwı menen a'melge asırıladı).

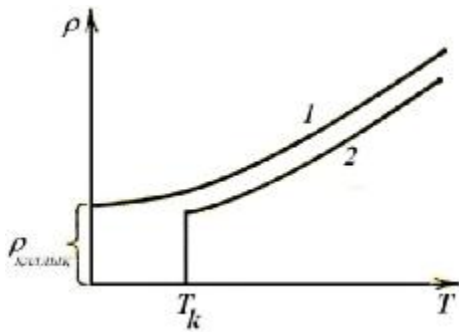
Ayırım jag'daylarda o'tkizgishlik elektroni bazı bir tesikshe ta'repinen tutup qalınıwı mu'mkin. Usının' saldarınan bir tesikshe ha'm bir o'tkizgishlik elektroni jog'aladı. Bul protsess **elektron menen tesikshenin' rekombinatsiyası** dep ataladı. Biraq temperaturanın' berilgen ma'nisinde rekombinatsiya ha'm tesikshe menen o'tkizgishlik elektronının' payda bolıwı (bul protsessi **generatsiya** protsessi dep ataydı) protsessleri arasında ten' salmaqlıq ornaydı. Na'tiyjede kristaldag'ı (denedegi) tesiksheler menen o'tkizgishlik elektronların' kontsentratsiyası turaqlı bolıp qaladı.

Joqarıda qarap o'tilgen taza yarım o'tkizgishlerdegi o'tkizgishlik protsessi **menshikli o'tkizgishlik** degen attı aldı.

Eger kremniydin' quramına basqa sorttag'ı atomlar kirgizilse, onda eki tu'rli jag'daydın' orın alıwı mu'mkin. Birinshisinde kirgizilgen atomlar kremniyge qosımsha o'tkizgishlik elektronların beredi. Na'tiyjede kremniy n tipindegi yarım o'tkizgishke aylanadı. Mısalı to'rt valentli kremniyge bes valentli mıshyak kirgiziletug'in bolsa, onda mıshyaktag'ı to'rt valentli kremniy atomları menen baylanıs du'ziwden bos qalg'an besinshi elektron o'tkizgishlik elektronları aylanadı. O'zinen elektron beretug'in qosındı atomlardı **donorlar** dep ataydı. Donorlar kirgizilgen yarım o'tkizgishlerde elektr o'tkizgishlik tiykarınan o'tkizgishlik elektronları ta'repinen ta'miyinlenedi. Ekinshisinde sırttan kirgizilgen basqa sorttag'ı atom kremniydin' erkin elektronların' birin o'zine qosıp aladı (mısalı kremniydin' quramına kirgizilgen u'sh valentli bor). Bunday atomlardı **aktseptorlar** dep ataydı, al quramına aktseptorlar kirgizilgen yarım o'tkizgishlerdi p tipindegi yarım o'tkizgishler dep ataydı. Aktseptorlar kirgizilgen yarım o'tkizgishlerdegi tiykarg'ı toq tasıwsılalar tesiksheler bolıp tabıladı. Sonlıqtan aralaspalı (taza emes) yarım o'tkizgishlerde elektronlıq ha'm tesikshelik o'tkizgishliklerdin' orın alıwı mu'mkin.

Asa o'tkizgishlik. Metallardın' elektr tog'ına qarsılıg'ı temperaturanın' to'menlewi menen kemeyedi. Al elektr tog'ına qarsılıqtın' payda bolıwının' eki sebebi bar: birinshisi metallardag'ı atomların' jıllılıq qozg'alısı, ekinshisi metallarg'a sırttan kirgen yamasa kirgizilgen ha'r qıylı aralaspalar (basqa sorttag'ı atomlar menen molekulalar) bolıp tabıladı. Jıllılıq terbelisleri to'mengi temperaturalarda (absolyot nolge jaqınlasqanda) so'nedi ha'm sa'ykes qarsılıqtın' jog'alıwı kerek. Sırttan kirgizilgen atomların' ta'sirinde ju'zege keletug'in $\rho_{qaldıq}$ qarsılıqtı taza metaldı paydalanıw (yamasa metaldı jaqsılap tazalaw) arqalı azaytıwg'a boladı. Demek

metallardın' elektr tog'ına qarsılıg'ın minimumg'a alıp keliwdin' mu'mkinshiligi bar eken. 41-su'wrette metallardın' salıstırmalı qarsılıg'ının' temperaturag'a g'a'rezligi ko'rsetilgen.



41-su'wret.

Metallardın' salıstırmalı qarsılıg'ının' absoliot temperaturag'a g'a'rezligi, 1- a'dettegidey (normal) metallar, al 2 bolsa T_k temperaturada asa o'tkizgishlik halına o'tetug'in metallar ushin.

Kamerling-Onnes (Kammerling-Onnes, 1853-1926) taza metallardın' elektr o'tkizgishliginin' temperaturag'a g'a'rezligin izertlegen en' da'slepki ilimpazlardan bolıp tabıladı. 1908-jılı suyıq geliydi alıwg'a eristi (onın' qaynaw temperaturası 4,44 K) ha'm bul jag'day og'an to'mengi temperaturalarda izertlew jumısların ju'rgiziwge mu'mkinshilik berdi. Taza sınapın' qarsılıg'ının' temperaturag'a baylanısın izertlewın' barısında (sınaptı tazalaw an'satıraq ha'm sog'an sa'ykes $\rho_{qaldıq}$ shamasın ju'da' kemeytiw mu'mkinshiligi bar) 1911-jılı temperatura 4,15 K shekem to'menlegende elektr tog'ına qarsılıqtın' birden joq bolıp ketetug'inlig'ı baqlandı. Keyin o'tkerilgen izertlewler basqa da ko'plegen metallardın', quymalardın' bazı bir to'mengi temperaturalarda elektr tog'ına qarsılıg'ının' birden jog'alatug'inlig'in ko'rsetti. Bunday zatlardın' (metallardın' basqa elementler menen aralaspaları, quymaları) sanı ha'zirgi ku'nde mın'nan asıp ketti. Bunday qubılıs **asa o'tkizgishlik** dep, al asa o'tkizgishlik halına o'tken zatlar **asa o'tkizgishler** dep ataladı. Elektr tog'ına qarsılıq birden jog'alatug'in temperaturanı T_k arqalı belgileymiz ha'm onı **asa o'tkizgishlik halına o'tiw temperaturası** yamasa **kritikalıq temperatura** dep ataydı. Asa o'tkizgishtin' kritikalıq temperaturadan joqarı temperaturalarda g'ı halın normal hal, al to'mengi temperaturalarda g'ı halın asa o'tkizgishlik halı dep ataymız.

41-su'wretten T_k temperaturada a'dettegi haldan asa o'tkizgishlik halg'a o'tiw fazalıq o'tiw bolatug'inlig'ı ko'rinip tur («Molekulalıq fizika» kursındag'ı I ha'm II a'wlad fazalıq o'tiwlerin eske tu'siremez). Asa o'tkizgishlik halg'a o'tiw (sırtta magnit maydanı bolmag'an jag'dayda) II a'wlad fazalıq o'tiwi bolıp tabıladı ha'm jıllılıqtın' jutılıwı yamasa bo'lip shag'arılıwı orın almaydı. Bunday fazalıq o'tiwde metaldın' halı u'zliksiz tu'rde o'zgeredi, atomlıq-kristallıq qurılısı o'zgermeydi, al erkin elektronlar arasında jan'a baylanıslar payda boladı (asa o'tkizgishlerdegi qarsılıqsız qozg'alatug'in ha'm asa o'tkizgishlik toqların payda etiwshi Kuper juplarının' payda bolıwı haqqında fizikanın' basqa bo'limlerinde ga'p etiledi).

1986-jılı joqarı temperaturalı asa o'tkizgishlik qubılısı ashıldı (joqarı temperaturalı asa o'tkizgishlik dep a'dette azottın' qaynaw temperaturası bolg'an 195,8 °C shamasına jaqın temperaturalarda asa o'tkizgishlik halına o'tiw qubılısın aytadı). Joqarı temperaturalı asa o'tkizgishlik halına metallar emes, al tiykarınan yarım o'tkizgishler o'tetug'inlig'in anıqlandı.

Asa o'tkizgishlerdin' qa'siyetleri, olardıg'ı toqtı tasıwshılardıń ta'biyatı fizikanın' basqa kurslarında aytıladı.

1914-jılı asa o'tkizgishlik haldın' magnit maydanının' ta'sirinde jog'alatug'inlig'in anıqladı. Magnit induktsiyasının' ma'nisi berilgen asa o'tkizgish ushin anıq ma'niske iye kritikalıq shama dep atalatug'in ma'niske jetkende asa o'tkizgishlik halı normal halga o'tedi. Induktsiyanın' kritikalıq ma'nisi asa o'tkizgishtin' materialına ha'm temperaturag'a baylanıslı.

1933-jılı bolsa Meyssner ha'm Oksenfeldler o'zlerinin' izertlewlerinin' barısında asa o'tkizgishlerdin' ishinde magnit maydanının' bolmaytuginlig'ın o'tkerilgen eksperimentlerinde taptı (o'tkizgishlerdin' ishinde elektr maydanının' bolmaytug'ınlig'ın eske tu'siremiz). Eger to'mengi temperaturalarda asa o'tkizgishlik halına o'tetug'ın deneni magnit maydanında jaylastırıp salqınlatısaq, onda asa o'tkizgishlik halına o'tiw barısında (T_k temperaturada) denenin' ishindegi magnit maydanı tolıg'ı menen asa o'tkizgish denenin' ko'lemnen tolıq qısıp shıg'arıladı. Bul effekti Meyssner effekti dep ataymız. Bul effekt tek asa o'tkizgishlerde g'ana baqlanadı ha'm bul qa'siyeti boyınsha olardıń ideal diamagnetiklerdin' ornın iyeleytug'ınlig'ın ko'rsetedi. Biraq asa o'tkizgishlerdin' diamagnetikler emes ekenligin atap o'temiz. Sebebi asa o'tkizgishlerdin' ishindegi magnitlengenlik nolge ten'.

Meyssner effekti menen elektr tog'ına qarsılıqtın' joqlıg'ı asa o'tkizgishlerdin' en' tiykarg'ı qa'siyetlerinin' biri bolıp tabıladı.

O'tkizgishtin' ishinde magnit maydanının' bolmawı magnit maydanlarının' ulıwmalıq nızamları tiykarında (bul nızamlar keyinirek u'yreniledi) to'mendegidey a'hmiyetli juwmaq shıg'arıwg'a mu'mkinshilik beredi: asa o'tkizgishler arqalı tek betlik toqlar g'ana o'tedi (bunday toqlar asa o'tkizgishtin' betindegi ju'da' juqa qatlam arqalı o'tedi).

Keyinirek asa o'tkizgishlerdin' I ha'm II a'wladlarının' bar ekenligi ashıldı. Asa o'tkizgishlik baqlanatug'ın taza zatlardın' sanı ko'p emes. Asa o'tkizgishlik qa'siyet quymalarda ko'birek gezlesedi. Taza zatlarda tolıq Meyssner effekti orın aladı. Al quymalarda bolsa magnit maydanının' ko'lemnen tolıq qısıp shıg'arılıwı baqlanbaydı (Meyssnerdin' tolıq emes effekti). Meyssner effekti tolıq baqlanatug'ın zatlardı birinshi a'wlad asa o'tkizgishler, al tolıq emes baqlanatug'ın zatlar ekinshi a'wlad asa o'tkizgishler dep ataydı.

Asa o'tkizgishlikti tolıq tu'sindiriw fizikanın' basqa bo'limlerinde a'melge asırıladı.

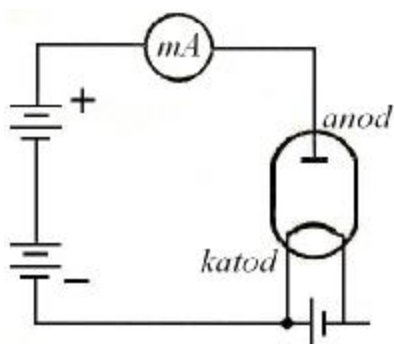
10-§. Vakuumdegi elektr tog'ı

Termoelektronlıq emissiya. Volt-amperlik xarakteristikası. Toyınıw tog'ının' temperaturag'a baylanışlı ekenligi.

Biz joqarıda metallarda o'tkizgishlik elektronlarının' bar ekenligin, olardıń jıllılıq qozg'alıslarına qatnasatug'ınlig'ın ko'rdik. Erkin elektronlar a'dettegi jag'daylarda metallardı taslap ketpeydi. Bul jag'day metallardıń betlerine jaqın orınlarda elektronlarg'a ta'sir etetug'ın ku'shlerdin' bar ekenligin ha'm bul ku'shlerdin' metallardıń ishine qaray bag'ıtlang'anlıg'ın an'latadı. Bul ku'shler elektronlar menen metallardıg'ı on' ionlar arasındag'ı tartılıstın' saldarıman payda boladı. Usınday ta'sirlesiw metallardıń betlik qatlamında elektr maydanının' payda bolıwına alıp keledi, al sol maydannın' potentsialı bolsa sırtqı ken'islikte metaldın' ishine o'tkende bazı bir φ shamasına o'sedi. Usıg'an sa'ykes elektronnın' potentsial energiyası $e\varphi$ shamasına kemeyedi. Basqa so'z benen aytqanda metal menen baylanıspag'an, metaldan sırta jaylasqan elektronnın' energiyası metaldın' ishindegi o'tkizgishlik elektronının' energiyasınan shama menen $e\varphi$ shamasına u'lken boladı eken. Sonlıqtan metaldan elektrondı sırtqa shıg'arıw ushın og'an $e\varphi$ shamasınan u'lkenirek energiya beriwimiz kerek. A'dette o'jire temperaturalarında jıllılıq terbelislerinin' energiyası kT (juwıq tu'rde aldındag'ı koeffitsient 1 ge ten' dep esaplaymız) $e\varphi$ din' ma'nisinen a'dewir kishi, yag'nıy $e\varphi > kT$. Sonlıqtan bunday sharayatlarda metallardag'ı erkin elektronlar metallardı taslap kete almaydı. Biraq sol elektronlarg'a ha'r qıylı usıllar menen energiya beriw mu'mkin. Bunday jag'dayda ayırım

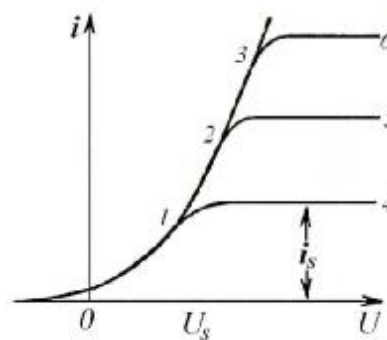
elektronlar ushın metaldı taslap shıg'ıw mu'mkinshiligi payda boladı. Usının' saldarınan elektronlardın' metallardan shıg'ıw qubılısı orın aladı ha'm onı **elektronlıq emissiya** dep ataymız.

Elektronlarga qanday usıl menen energiyanın' beriliwine baylanıslı elektronlıq emissiyanın' ha'r qıylı tu'rleri bar. Eger elektronlar energiyanı denenin' jıllılıq energiyanın' esabınan alatug'ın bolsa, onda biz **termoelektronlıq emissiya**, al elektron energiyanı denegge kelip tu'sken jaqtılıq fotonın' esabınan alatug'ın bolsa, onda fotoemissiya yamasa fotoelektrlik effekt haqqında ga'p etemiz. Deneni sırttan basqa elektronlar yamasa ionlar menen bombalag'anda da elektronlardın' metallardı taslap shıg'ıwı mu'mkin. Bunday qubılıstı **ekinshi elektronlıq emissiya** dep ataydı. 42-su'wrette termoelektronlıq emissiyanı baqlaw ushın arnalg'an sxema ko'rsetilgen. Deneler qızg'anda uship shıg'atug'ın elektronlardı **termoelektronlar** dep te ataydı.



42-su'wret.

Termoelektronlıq emissiyanı baqlaw ushın arnalg'an sxema.



43-swu'ret. Katodtın' temperaturası ha'r qıylı bolg'anda alıng'an diodtın' volt-ampereklik xarakteristikası.

Termoelektronlıq emissiyanı baqlaw ushın 42-su'wrettegi elektr shınjırının' quramına kiretug'ın eki elektrodı bar ishinen hawası sorıp alıng'an shıra xızmet etedi. Eki elektrodıń birinshi toq o'tkende qızatug'ın volframnan yamasa molibdennen islengen sım ta'rizli katod, al ekinshisi salqın ha'm termoelektronlardı jıynaıtug'ın anod bolıp tabıladı. Bunday shıralar 1980-jıllarg'a shekem a'sirese radioteknikada o'zgermeli toqlardı tuwrılawda ken'nen qollanıldı ha'm olardı vakuumlı **diod** dep atadı⁵. Shıranın' anodın ko'psilik jag'daylarda tsilindr ta'rizli etip sog'ıldı. Bunday tsilindrdin' ishine ko'sheri boylap qızatug'ın katod ornalastırıldı.

Eger vakuum diodınan kernew deregi ha'm milliampermetri bar elektr shınjırın jıynasaq (42-su'wret), onda katod salqın bolg'an jag'dayda shınjır arqalı toq o'tpeytug'ınlıg'ın ko'remiz. Sebebi diodtın' ishindegi ku'shli siyrekletilgen gaz (vakuum) zaryadlang'an bo'lekshelerge iye emes ha'm sonlıqtan diodtın' elektr tog'ın sezilerliktey da'rejede o'tkermeydi. Eger katodtın' materialının' temperaturasını qosımsha toq dereginin' ja'rdeminde joqarı temperaturalarg'a shekem ko'tersek, onda shınjırdag'ı milliampermetr toqtın' payda bolg'anlıg'ın ko'rsetedi. Sonın' menen birge diodtın' shınjırında eger toq dereginin' teris polıosı katod penen, al on' polıosi anod penen jalgang'anda g'ana toq payda boladı. Eger potentsiallar ayırmasın' belgisin o'zgartsek katodtı jokarı temperaturalarg'a shekem qızdırsaq ta shınjırda toq baqlanbaydı. Bul jag'day katodtın' teris zaryadlang'an bo'lekshelerdi, yag'nıy elektronlardı shıg'aratug'ınlıg'ın, al on' zaryadlang'an ionlardın' katodtan sezilerliktey da'rejede bo'linip shıqqayıtlıg'ın ko'rsetedi.

Diodtag'ı termoelektronlıq toqtın' ku'shi katodtın' potentsialına salıstırg'andag'ı anodtın' potentsialının' shamasına g'a'rezli. Diod arqalı o'tiwshi toqtın' shamasının' anod kernewine

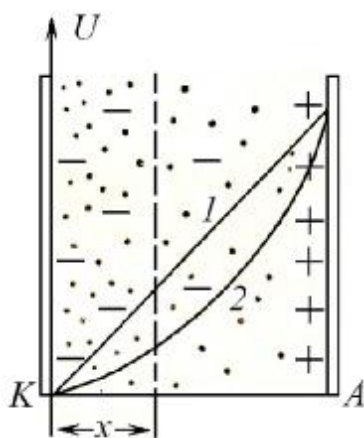
⁵ Eki elektrodı bar elektronlıq qurılıstı a'dette diod, u'sh elektrodı bolsa triod, to'rt elektrodı bolg'an jag'dayda tetod, al bek elektrodı bolg'an jag'dayda pentod dep ataydı.

g'a'rezligi (diodtin' volt-amperlik xarakteristikasi) 43-su'wrette keltirilgen (014-sızıq). Potentsial az waqıtta diod arqalı o'tip turg'an toqtın' ma'nisi ju'da' kishi (bul toqtın' qalay payda bolatug'inlig'ı keyinirek tu'sindiriledi). Anodtin' on' potentsialının' o'siwi menen toq ku'shi 01-sızıg'ı boyınsha u'lkeyedi. Anod kernewinin' bunnan keyingi o'siwinde toq ku'shi bazı bir maksimalıq ma'nisi i_s shamasına shekem ko'teriledi. Toqtın' bul ma'nisin **toyınıw tog'ı** dep ataydı ha'm bunnan ılay anod tog'ının' ma'nisi derlik turaqlı bolıp saqlanadı (14-sızıq).

Katodtin' temperaturası ko'terse, onda vol-amperlik xarakteristikalar 0125, 01236 ha'm tag'ı basqa sızıqlar tu'rine iye boladı. Demek ha'r kıylı temperaturalarda toyınıw tog'ı i_s tin' ma'nisleri ha'r kıylı boladı eken (temperaturanın' o'siwi menen toyınıw tog'ının' ma'nisi de o'sedi eken). Usının' menen birge toyınıw tog'ı baqlanatug'in anod kernewinin' de ma'nisi artadı.

Biz elektronlıq shıranın' volt-amperlik xarakteristikasının' sızıqlı emes ekenligin ko'remiz (yag'nıy anod tog'ı menen anod kernewi arasında sızıqlı baylanıs joq). Demek elektron sharısı Om nızamına bag'ınbaytug'in o'tkizgishlerdin' qatarına kiredi degen so'z.

Diod arqalı o'tiwshi toqtın' (bul toqtı ha'zir g'ana anod tog'ı dep atadıq) kernewden (bunday kernewdi anod kernewi dep te atadıq) g'a'rezligin a'piwayı tu'rde tu'sindiriw mu'mkin. Tormoelektronlıq emissiya orın alg'anda qa'legen waqıt momentinde katod penen anod ortasındag'ı kenislikte katodta anodqa qaray qozg'alıwshı elektronlar boladı. Bunday elektronlar teris zaryad bultın payda etedi (**ken'isliktegi zaryad**). Bul ken'isliktegi zaryad diodtag'ı potentsialdın' bo'listiriliwin o'zgertedi. Eger katod penen anod bir birine parallal jaylastırılğan tegis materialdan sog'ılğan bolsa ha'm katod qızdırılmaq'an halda katod penen anod arasındag'ı potentsialtın' tarqalıwı tuwrı sızıq penen sa'wlelendiriledi (44-su'wrettegi 1-sızıq). Termoelektron toq bar bolg'anda (yag'nıy katod qızdırılmaq'an bolsa) katod penen anod arasında ken'isliklik zaryad payda boladı ha'm potentsialdın' tarqalıwı o'zgeredi (44-su'wrettegi 2-iyemeklik). Usının' menen birge qa'legen x tegisligindegi potentsialdın' shaması ken'isliklik zaryad bolmaq'an jag'daydag'ıdan kishirek boladı. Demek ken'isliklik zaryadlar bar bolsa elektronlardın' tezligi de kemeyedi eken. Anod kernewi u'lkeygende ken'isliklik zaryad bultındagı elektronlardın' kontsentratsiyası kishireyedi. Sonlıqtan ken'isliklik zaryadlardın' tormozlawshı ta'siri de kishireyedi ha'm usıg'an sa'ykes anod tog'ı u'lkeyedi.



44-su'wret. Diodtag'ı ken'isliklik zaryad ha'm onın' potentsialdın' tarqlıwın o'zgertiwi.

1 – potentsialdın' ken'isliklik zaryadlar bolmaq'an jag'daydag'ı tarqalıy, 2 – ken'isliklik zaryad bolg'an jag'daydag'ı potentsialdın' tarqalıwı.

Diod arqalı o'tip atırg'an I toqtın' anodtin' potentsialı U dan g'a'rezligi mına tu'rge iye boladı:

$$I = CU^{\frac{3}{2}}. \quad (105)$$

Bul an'latpada C arqalı elektrodtn' formasına ha'm o'lishemlerine baylanisli bolg'an proporsionallıq koeffitsient belgilengen.

Tegis diod ushın

$$C = \frac{4}{9} \varepsilon_0 \frac{S}{d^2} \sqrt{\frac{2e}{m}}. \quad (106)$$

Bul an'latpada $\frac{e}{m}$ arqalı elektronnıń salıstırmalı zaryadı, S arqalı katodtn' betinin' maydanı, d arqalı katod penen anod arasındag'ı qashıqlıq, ε_0 arqalı elektr turaqlısı belgilengen.

(106)-formula 43-su'wrettegi 0123 iymekliginin' ten'lemesi bolıp tabıladı. Bul formula Boguslovskiy-Dengmıor ten'lemesi yamasa « $\frac{3}{2}$ nızamı» dep ataladı.

Anodtn' potentsialı katod ta'repinen ha'r bir sekundta shıg'arılǵ'an barlıq elektronlar anodqa barıp jetetug'ınday da'rejede u'lken bolsa, toq o'zinin' maksimalıq ma'nisine (toynıw) jetedi ha'm anod kernewine g'a'rezli bolmay qaladı. Toynıw tog'ının' tıǵ'ızlıǵ'ı i_s (bul shama katodtn' maydanının' ha'r birliğine sa'ykes keliwshi toynıw tog'ının' ma'nisi bolıp tabıladı) katodtn' emissiyalıq qa'biletligin ta'ripleydi. Al katodtn' emissiyalıq qa'biletligi bolsa katodtn' ta'biyatı menen temperaturasına baylanisli.

11-§. Suyıqlıqlardag'ı ha'm gazlerdegi elektr tog'ı

Suyıqlıqlardag'ı ha'm gazlerdegi elektr tog'ının' ta'biyatı. Elektroliz ha'm elektrolitik dissotsiatsiya. Faradeydn' elektroliz nızamları ha'm elementar zaryad. Galvanikalıq elementler ha'm akkumulyatrolar. İonizatsiya ha'm rekombinatsiya. Plazma.

Endi biz ekinshi klass o'tkizgishler qatarına kiriwshi elektrolitlerdegi elektr tog'ın u'yreniwdi baslaymız. Keyinirek gazlerdegi elektr tog'ı haqqında ga'p etemiz.

Biz joqarıda elektrolitler arqalı o'tiwshi toqtın' barlıq waqıtta elektrodlarda elektrolittin' quramına kiriwshi ayırım zatların' bo'linip shıǵ'ıwı menen ju'retug'ınlıǵ'ın atap o'tken edik. Bul qubılıs Faradey ta'repinen tolıq izertlengen. Usının' na'tiyjesinde ol elektrolizdin' tiykarg'ı eki nızamın ashtı.

Faradeydn' birinshi nızamı boyınsha (elektrolizdin' birinshi nızamı boyınsha) qanday da bir elektrodta (eki elektrodtn' birinin') bo'linip shıqqan zattın' massası m elektrolit arqalı o'tiwshi zaryad mug'darına tuwrı proporsional:

$$m = Kq. \quad (107)$$

Bul formulada K arqalı ha'r qıylı zatlar ushın ha'r qıylı ma'niske iye bolatug'ın elektroximiyalıq ekvivalent belgilengen. Onın' sanlıq ma'nisi elektrolit arqalı bir birlik zaryad o'tkende ($q = 1$ bolg'anda) bo'linip shıqqan zattın' massasına ten'.

A'dette K shaması kulong'a sa'ykes keliwshi grammlarda (yamasa milligrammlarda) belgileydi. Elektroximiyalıq ekvivalenttin' ha'r qıylı zatlar ushın ma'nisleri to'mendegi keste de berilgen:

Zat	Atomlıq massa A	Valentligi Z	Elektroximiyalıq ekvivalent, g/Kl
Gu'mis	107,9	1	$1,1180 \cdot 10^{-3}$
Mıs	63,57	2	$3,294 \cdot 10^{-4}$
Vodorod	1,008	1	$1,045 \cdot 10^{-5}$
Kislorod	16,000	2	$0,8293 \cdot 10^{-4}$
Xlor	35,46	1	$3,674 \cdot 10^{-4}$

Faradeydin' ekinshi nızamı elektroximiyalıq ekvivalenttin' shamasın anıqlawg'a tiyisli. Faradey ha'r qıylı zatlar ushın K shamasının' salıstırmalı atomlıq massa A g'a tuwrı proporsional, al zattın' valentligi Z ke kerı proporsional ekenligine itibar berdi (kestegı qaran'ız). Ximiyada A/Z shaması zattın' *ximiyalıq ekvivalenti* dep ataladı. Ekinshi nızam boyınsha *elektroximiyalıq ekvivalent berilgen zattın' ximiyalıq ekvivalentine proporsional*:

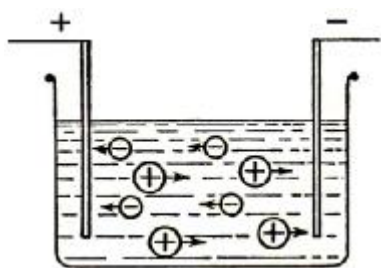
$$K = C \frac{A}{Z}. \quad (108)$$

Bul formuladag'ı proporsionallıq koeffitsienti C barlıq zatlar ushın birdey ma'niske iye.

Faradeydin' eki nızamın da bir formulanın' ja'rdeminde an'latıw mu'mkin. Biz da'slep $1/C$ shamasın F shamasına ten' dep alayıq ha'm bul shamanı Faradey sanı dep atayıq. O'lshe birliğı boyınsha Faradey sanı zaryad mug'darına ten'. Usını esapqa alg'an xalda (108)-formuladag'ı K nın' ma'nisin (107)-formulag'a qoysaq mına formulag'a iye bolamız:

$$m = \frac{A q}{Z F}. \quad (109)$$

Eger $q = F$ bolsa $m = \frac{A}{Z}$ ekenligine isenemiz. Usınnan grammlardag'ı massası ximiyalıq ekvivalentke ten' zattın' mug'darı *grammekvivalent* (g-ekv) dep ataladı. Basqa so'z benen aytqanda elektrolit arqalı Faradey sanına ten' mug'dardag'ı zaryad o'tkende ha'r bir elektrodta 1 g-ekv mug'darındag'ı zat bo'linip shıg'adı.



45-su'wret.

İonlıq o'tkizgishliktin' sxeması.

Eger m massanı gramm-ekvivalentlerde an'latsaq, onda

$$F = 96\,484,5 \frac{Kl}{g - ekv} \approx 96\,500 \frac{Kl}{g - ekv}.$$

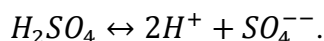
Elektroliz qubılısı elektrolitlerdegi erigen zatların' on' ha'm teris zaryadlang'an ionlar tu'rinde bolatug'mlıg'ın ko'rsetedı. Duzların', kislotaların', siltelerdin' molekulları suwda on' ha'm teris zaryadlang'an ionlarg'a ajraladı. Bunday qubılıstı *molekulalardın' dissotsiatsiyası* dep ataydı. Eger eriwde molekulların' dissotsiatsiyası ju'rmeytug'ın bolsa, onda eritpe elektr

tog'in o'tkizbeydi. Mısalı eger suwda xlorlı natriydi (as duzin yamasa $NaCl$) eritse, onda $NaCl$ molekularının to'mendegidey ta'rtipte ionlarga ajraladı:



Bunday ximiyalıq birikpelerdin' suw ishinde ionlarga ajralıp ketiwinin' sebebi natriy ha'm xlor ionları arasındag'ı tartılıs ku'shinin' ($F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \frac{q_1q_2}{r^2}$ formulası menen anıqlanatug'ın Kulon ku'shi haqqında ga'p ayılıp atır) suwda $\epsilon = 81$ ese kemeyiwinde bolıp tabıladı (suw ushın salıstırmalı dielektriklik sin'irgishliktin' $\epsilon = 81$ ekenligi esapqa alındı).

Basqa da mısallar keltiremiz. H_2SO_4 ku'kirt kislotası suwda bılayınsha dissotsiatsiyanadı:



Elektrolitlerdegi ha'r qıylı zaryadlar elektr maydanının' ta'sirinde ha'r qıylı bag'ıtlarga qaray qozg'aladı: on' zapryadlang'an ionlar katodqa, al teris zaryadlang'an ionlar anodqa qaray qozg'aladı (45-su'wrette ko'rsetilgen). Anodqa jetip barg'an teris ion anodqa o'zinin' teris zaryadın beredi, usının' saldarınan bir yamasa bir neshe (SO_4^{--} ionı eki elektron, al Cl^- bolsa bir elektron beredi) elektronın berip, bul elektronlar sırtqı shınjır arqalı o'tedi. Al ionnıń o'zi anodta bo'linip shıg'atug'ın neytral atomga yamasa molekulaga aylanadı. On' ion katodtan bir yamasa bir neshe elektron alıp neytrallanadı ha'm katodta bo'linip shıg'adı.

Anodta bo'linip shıg'atug'ın teris zaryadlı ionlardı Faradey **anionlar**, al katodta bo'linip shıg'atug'ın on' zaryadlang'an ionlardı kationlar dep atadı. Mısalı KBr eritpesinin' elektrolizinde katodta kaliy K , anodta Br bo'linip shıg'adı. Demek Br^- ionları anionlar, al K^+ ionları kationlar bolıp tabıladı.

Elementar zaryad. Meyli elektrodta elektrizdin' na'tiyjesinde n dana ion bo'linip shıqqan bolsın. Olardıń zaryadının' absolt ma'nisi nve ge ten' boladı (v arqalı sa'ykes ximiyalıq elementtin' yamasa birikpenin' valentligi belgilengen). Eger bul ionlar katodta bo'linip shıqqan bolsa, onda olardıń zaryadları katodqa sırtqı shınjır arqalı kelgen elektronlar ta'repinen neytrallanadı. Eger ionlar anodta bo'linip shıqqan bolsa, onda tap sonday mug'dardag'ı elektr zaryadları sımalar arqalı anodtan ketedi. Eki jag'dayda da shınjır arqalı $q = nve$ mug'darındag'ı elektr zaryadları shınjır arqalı o'tedi. Meyli elektrodta bo'linip shıqqan zattın' massası M , al ionnıń (atomnıń yamasa molekulanın') massası m bolsın. Bunday jag'dayda $n = M/m$ ha'm usıg'an sa'ykes $M = mq/(ve)$. Bun an'latpannıń alımın da, bo'limin de Avagadro sanı N ge ko'beytsek

$$M = \frac{Aq}{vF} \quad (110)$$

an'latpasın alamız. Bul an'latpada $A = Nm$ atomlıq salmaqqa sa'ykes keledi. Al F bolsa joqarıda atı atalg'an ha'm ma'nisi ko'rsetilgen Faradey sanı bolıp tabıladı. Onnıń (110)-formuladag'ı ma'nisi $F = eN$ shamasına ten'. Demek Faradey sanının' ma'nisi anıqlang'an bolsa (biz onnıń $\approx 96\,500 \frac{Kl}{g-ekv}$ ekenligin ko'rdik), onda elementar zaryadtın' mug'darının' $e = F/N$ ekenligine iye bolamız. Haqıyqatında da elementar zaryadtın' ma'nisi birinshi ret 1881-jılı Angliyada tap usınday jollar menen anıqlandı

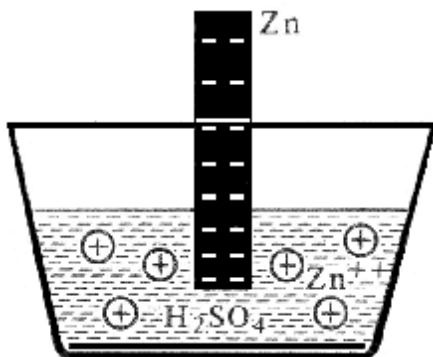
Ta'replik elektr qozg'awshı ku'shler. Biz 9-paragrafta inertiya ku'shleri payda etetug'ın ta'replik elektr maydanı haqqında ga'p ettik ($E^{tarep} = F_{in}/e$). Usınday maydannın' ta'sirinde

elektr qozg'awshı ku'shleri payda boladı (sol paragrafta $\dot{A} = (L + R\tau_{in}) \frac{dI}{dt} + RI$ formulası menen berilgen, 92-formula). Bul elektr qozg'awshı ku'sh elektrostatikalıq maydannın' ta'sirinde kelip shıqpaydı. **Elektrostatikalıq emes sebeplerge baylanıslı payda bolatug'ın elektr qozg'awshı ku'shlerdi ta'replik elektr qozg'awshı ku'shleri dep ataydı⁶.**

Ta'replik elektr qozg'awshı ku'shi dara jag'dayda mexaikalıq yamasa elektr ku'shi bolıwı mu'mkin, biraq elektrostatikalıq ku'shtin' bolıwı mu'mkin emes. Mısal retinde Faradeydin' elektromagnitlik induksiya nızamı boyınsha payda bolatug'ın elektr maydanında zaryadqa ta'sir etetug'ın ku'shti keltiriwge boladı. Ta'replik elektr qozg'awshı ku'shlerin payda etiwshi turaqlı toq dereginin' en' ko'p tarqalg'an tu'ri galvanikalıq elementler ha'm akkumulyatorlar bolıp tabıladı.

Elektr tog'ı 1791-jılı L.Galvani (1737-1798) ta'repinen ashıldı. Biraq ol o'tkeren ta'jiriybelerinin' na'tiyjelerin durıs tallay almadı. Bunı 1792-jılı A.Volta (1745-1827) durıs tu'sindirdi. Endigiden bılay ga'p etileyin dep atırg'an turaqlı toq elementleri Galvanidin' atı menen ataladı.

A'dette ha'r qıylı ta'biyatqa iye denelerdi bir birine tiygizgende (eki dene kontaktqa keltirilgende degen so'z) olar arasında potentsiallar ayırması payda boladı (bir qattı deneni ekinshi qattı dene menen, qattı deneni suyıqlıq penen ha'm tag'ı basqalar). Payda bolg'an **bunday potentsiallar ayırmasın kontaktlıq potentsiallar ayırması dep ataymız**. Biz ha'zir qattı deneler menen suyıqlıqlar arasındag'ı kontaktlıq potentsiallar ayırması haqqında ga'p etemiz.

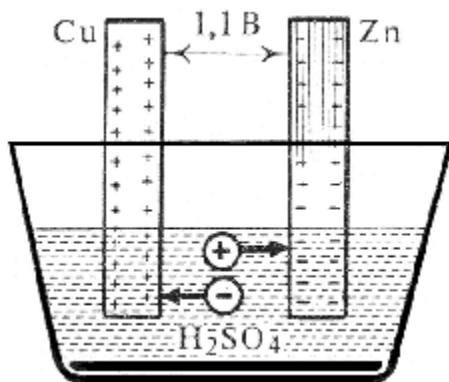


46-su'wret.

Qattı dene (Zn) menen suyıqlıq (H_2SO_4 eritpesi) arasında potentsiallar ayırmasın' payda bolıwı.

Qattı denelerdi suyıqlıqlarg'a (kislotaların', duzlardıń', siltilderin' eritpelerine) batırg'anda ximiyalıq reaksiyalardıń' ju'riwi mu'mkin. Mısalı eger tsink plastinkasın ku'kert kislotası H_2SO_4 tin' eritpesine tu'sirsek tsink Zn eriydi (46-su'wret). Biraq eritpege tsinktin' neytral atomları emes, al onın' eki valentli on' ionları (Zn^{++}) ketedi. Usının' na'tiyjesinde eritpe on' zaryadlanadı, al tsink plastinkası teris zaryad penen zaryadlanadı. Usının' saldarınan eritpe menen tsink plastinkası arasında potentsiallar ayırması payda boladı. Metaldın' eritpege salıstırg'andag'ı potentsialı bazı bir ma'iske jetkende (potentsialdın' bul ma'nisin **elektroximiyalıq potentsial** dep ataymız) tsinktin' eritpege o'tiwi toqtaydı. Elektroximiyalıq potentsialdın' ma'nisi metaldın', eritpenin', eritpedegi metaldın' kontsentratsiyasınan qa'siyetinen g'a'rezli. Eger eritpede ionlardın' u'lken kontsentratsiyası orın alsa, onda kerı protsesstin' ju'riwi (on' ionlar metaldın' betine barıp otıradı ha'm sonın' na'tiyjesinde metal on' zaryad penen zaryadlanadı) mu'mkin. **Solay etip metallardıń', suyıqlıqlardıń' ha'm eritpedegi ionlardın' kontsentratsiyasınan' ha'r qıylı kombinatsiyalarında eritpelerde ha'r qıylı elektroximiyalıq potentsiallardın' payda bolıwı mu'mkin.**

⁶ Rus tilindegi fizika iliminde ken'nen qollanılatug'ın «storonnie» so'zin qaraqalpaq tiline awdarıwda usı waqıtlarga shekem birden-bir sheshimge kelinggen joq. Sonlıqtan bul lektsiyalar tekstlerinde «storonnie» so'zinin' ornına «ta'replik» so'zi qollanılg'an.



47-su'wret.

Volta elementi.

Eger ha'r qıylı bolg'an eki metall eritpege tu'sirilgen bolsa, onda olar arasında olardıń elektroximiyalıq potentsiallarınń ayırmasına ten' bolg'an potentsiallar ayırması payda boladı. *Eki metall tu'sirilgen eritpe galvanikalıq element, al sol metallar arasındag'ı potentsiallar ayırması elementtin' elektr qozg'awshı ku'shi dep ataladı.*

Volta elementi. Bunday element ku'kert kislotasına tu'sirilgen mıs ha'm tsink plastinkalarınan turadı (47-su'wret). TSink penen mıstın' elektroximiyalıq potentsialları sa'ykes $-0,5\text{ V}$ ha'm $+0,6\text{ V}$ ekenligin esapqa alsaq, onda Volta elementinin' elektr qozg'awshı ku'shi $[0,6 - (-0,5)]\text{ V} = 1,1\text{ V}$.

Akkumulyatorlar. Akkumulyatorlar galvanikalıq elementler bolıp tabıladı, Akkumulyatordın' jumıs islewinin' barısında usı akkumulyatordın' toq deregi sıpatında sarıplanatug'ın zatları sırtqı turaqlı toq deregi ta'repinen akkumulyator arqalı toq o'tkende qaytadan jıynaladı (orınlarına keledi).

Akkumulyatordın' en' ko'p paydalanılatug'ın tu'ri qorg'asın akkumulyator bolıp tabıladı. Bunday akkumulyatorda PbO birikpesinin' pastası sin'dirilgen eki qorg'asın plastinka (ko'pshilik jag'daylarda qorg'asınnan islengen tor) 30 protsentlik ku'kert kislotasına batırılğ'an boladı (tıg'ızlıg'ı $1,2\text{ g/sm}^3$). Usının' saldarınan $PbO + H_2SO_4 = PbSO_4 + H_2O$ reaksiyası ju'redi ha'm plastinkalarda qıyın penen eriytug'ın ku'kert kışqıl qorg'asın $PbSO_4$ duzı ha'm onın' toying'an eritpesi payda boladı. Akkumulyatordın' jumıs islewi ushın onı zaryadlaw kerek. Bunın' ushın akkumulyator arqalı turaqlı toq o'tkeriledi. **Zaryadlaw (zaryadlanıw protsessi)** protsessi:

H^+ ionları katodqa qaray qozg'alıp katodta neytrallanadı ha'm $PbSO_4 + 2H = Pb + H_2SO_4$ reaksiyası ju'redi. SO_4^{--} ionları anodqa jetip barıp neytrallanadı ha'm da'slep $PbSO_4 + SO_4 = Pb(SO_4)_2$, al bunnan keyin qaytımlı bolg'an $Pb(SO_4)_2 + 2H_2O \rightarrow 2PbO_2 + 2H_2SO_4$. Zaryadlawdın' barısında ku'kert kislotasının' kontsentratsiyası joqarılaydı. Solay etip zaryadlang'an akkumulyator mınalardan turadı:

Birinshi elektrod: qorg'asın perekisi PbO_2 birikpesine iye bir plastinka (yamasa tor);

Ekinshi elektrod: taza qorg'ansın plastinka (yamasa qorg'asın tor);

Elektrolit: ku'kert kislotası H_2SO_4 tegi ku'kert qışqıl qorg'asın $PbSO_4$ tin' toying'an eritpesi.

Eger sırtqı turaqlı toq deregin ajıratsaq, onda akkumulyator anodı PbO_2 , katodı Pb bolg'an galvanikalıq elementke aylanadı. Eger bunday element tuyıqlanbag'an bolsa, onda ol zaryadlang'an halın ko'p waqıtlar dawamında uslap turadı.

Zaryadlang'an akkumulyatordın' polıosların o'tkizgish arqalı tuyıqlasaq, onda shınjır arqalı toq o'te baslaydı. Bul toqtın' bag'ıtı akkumulyatordı zaryadlag'anda o'tken toqtın' bag'ıtına qarama-

qarsı. Akkumulyator zaryadsızlana baslaydı. Na'tiyjede minaday ximiyalıq protsessler ju'redi (*jumis islew protsessi*):

Eritpedegi SO_4^{--} ionları eritpeden qorg'asın katodqa o'tedi, neytrallanadı ha'm $Pb + SO_4 = PbSO_4$ reaksiyası ju'redi. Anodtın' qasında qaytımlı bolg'an $PbO_2 + 2H_2SO_4 \rightarrow Pb(SO_4)_2 + 2H_2O$ reaksiyası ju'redi. On' zaryadlang'an H^+ ionları eritpeden anodqa o'tedi (anodtın' PbO_2 ekenligin umıtpaymız), neytrallanadı ha'm $Pb(SO_4)_2 + 2H = PbSO_4 + H_2SO_4$ reaksiyasına kirisedi. Ku'kirt kislotasının' kontsentratsiyası to'menleydi. Aqır-ayag'ında akkumulyator o'zinin' da'slepki halına qaytıp keledi: eki plastinka da (eki tor da) $PbSO_4$ birikpesine aylanadı, al ku'kirt kislotası H_2SO_4 tin' kontsentratsiyası o'zinin' da'slepki ma'nisine qaytıp keledi. Akkumulyatordın' toq beriwi ushın onı qaytadan zaryadlaw kerek.

Qorg'asın akkumulyatordın' elektr qozg'awshı ku'shin maksimal zaryadlag'anda 2,7 voltke jetkeriw mu'mkin. Biraq azmaz razryadlawda (zaryadsızlawda) onın' shaması 2,2 voltke shekem to'menleydi ha'm usı awhalda uziq waqıt saqlanadı. Akkumulyatordın' zaryadın tolıq qa'lpine keltiriw ushın za'ru'r bolg'an en' kishi (minimallıq) elektr qozgawshı ku'shinin' ma'nisi 1,85 volt dep esaplanadı. Bunnan da kishi elektr qozgawshı ku'shlerge shekem zaryadsızlang'anda akkumulyator buzıladı.

Akkumulyatordın' en' a'hmiyetli xarakteristikası bolıp onın' sıyımlıg'ı xızmet etedi. *Akkumulyatordın' sıyımlıg'ı dep zaryadsızlanıwdın' barısında bere alatug'ın tolıq elektr zaryadının' mug'darın aytamız.* Bul shama amper-saatlarda o'lishenedi.

Gazlerdegi elektr tog'ı. Gazler ta'biyiy xalda elektr tog'ın o'tkermeydi. Mısalı, eger qurg'aq atmosferalıq hawada zaryadlang'an ha'm jaqsı izolyatsiyalang'an elektrometrđi, onda elektrometrđin' zaryadının' ko'p waqıtlar dawamında o'zgerissiz kalatug'inlig'in ko'remiz.

Biraq gazge ha'r qıylı sıtrqı ta'sirler tu'siriw arqalı gaz arqalı toqtın' o'tiwin a'melge asırıwg'a boladı. Mısalı zaryadlang'an elektrometrđin' qasına janıp turg'an zattı alıp barsaq (mısalı shırpını jag'atug'ın bolsaq), onda elektrometrđin' ko'rsetiwiniñ tezden kishireyetug'inlig'in an'lawg'a boladı. Bul jag'dayda bir gazde joqarı temperatura beriw jolı menen elektr o'tkizgishlik payda ettik. Eger biz elektrometrđin' qasına ultrafiolet nurlar shıg'arwshı elektr shırasın jaylastırsaq ta hawada elektr o'tkizgishlikti payda ete alamız (basqa so'z benen aytqanda elektrometrđin' zaryadının' jog'alıwın boldıramız). Gazge tap usınday ta'sirdi rentgen nurları da, radioaktiv preparatlardıñ nurları da tiygize aladı.

Bul jag'daylardın' barlıg'ı da joqarı temperaturalırdın' ha'm ha'r qıylı nurlanıwlardın' ta'sirinde gazlerde zaryadlang'an bo'lekshelerdin' payda bolatug'inlig'in ko'rsetedi. Sıtrqı ta'sirlerdin' saldarınan gazdin' atomlarınan bir yamasa bir neshe elektronlar bo'linip shıg'adı. Usının' saldarınan neytral atomnıñ ornında on' zaryadlang'an ion ha'm erkin elektronlar payda boladı. Al payda bolg'an erkin elektronlardın' ayırımları basqa neytral atomlar ta'repinen tutup alınıwı mu'mkin. Bunday jag'dayda teris zaryadlang'an ionlar payda boladı.

Solay etip *a'dettegi jag'daylarda gazler elektr tog'ın o'tkizbeydi eken. Gazdin' elektr tog'ın o'tkiziwi ushın ionlastıw protsessin a'melge asırıwımız kerek (joqarı temperaturalırg'a shekem qızdırıw, ultrafiolet, rentgen, gamma nurları menen nurlandıırıw ha'm basqalar). Biz to'mende elektr maydanınıñ kernewligi u'lken bolg'anda maydannın' ta'sirinde de ionizatsiyanın' orın alatug'inlig'in ko'remiz. Gazlerdegi elektr tog'ı ionlar menen elektronlardın' ta'riplesken kozg'alısı bolıp tabıladı.*

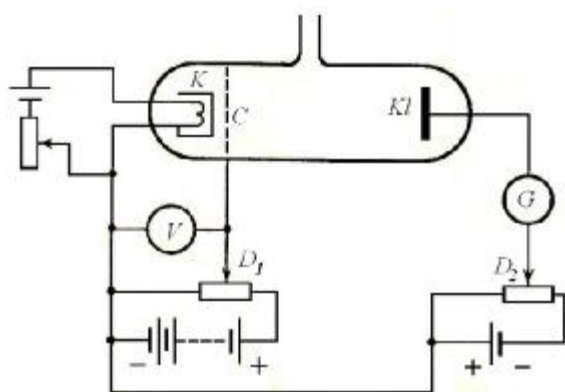
Elektrondı atomnan ayırıp alıw (bul qubılıstı atomlın' ionizatsiyası dep ataymız) bazı bir energiyanın' jumsalıwın talap etedi. Bunday energiyanı *ionizatsiya energiyası (atomdı iong'a*

aylandırıw energiyası) dep ataymız. İonizatsiya energiyasının' ma'nisi atomnıń' qurılısınan g'a' rezli. Sonlıqtan ol ha'r qanday atom ushın ha'r qıylı.

Atomlardı ionlarg'an aylandırıwshı du'zilisti ionizator dep atayıq. İonizatordıń' ta'siri jog'algannan keyin gazdegi ionlardın' sanı waqıttın' o'tiwi menen kishireyedi ha'm aqır-ayag'ında ionlar pu'tkilley jog'aladı. İonlardın' jogalıwının' sebebi ionlar menen elektronlardın' jılılıq qozg'alıslarına qatnasıwında, usının' saldarınan olar bir biri menen soqlıg'ısadı. On' zaryadlang'an ion menen elektron soqlıg'ısqanda bir biri menen qaytadan qosıladı ha'm neytral atom payda boladı. On' zaryadlang'an ion menen teris zaryadlang'an ion soqlıg'ısqanda teris zaryadlang'an ion o'zinin' artıq elektronın on' zaryadlang'an iong'a berip, eki ion da neytral atomg'a aylanadı. İonlardın' o'z-ara neytrallanıwın **ionlardın' rekombinatsiyası** dep ataydı.

On' ion menen elektronnıń' yamasa eki ionnıń' rekombinatsiyasında ionizatsiya ushın jumsalg'an energiyag'a ten' energiya, ko'pshilik jag'dayda bunday energiya jaqtılıq tu'rinde bo'linip shıg'adı. Sonlıqtan ionlardın' rekombinatsiyası a'dette jaqtılıq shıg'arıw (orısshası sveshenie) menen birge ju'redi. Eger on' ha'm teris zaryadlang'an ionlardın' kontsentratsiyası ju'da' u'lken bolsa, onda ha'r bir sekunda bolıp o'tken rekombinatsiya aktlerinin' sanı da ko'p ha'm usıg'an sa'ykes rekombinatsiyanın' jaqtılıq shıg'arıwı da ju'da' ku'shli boladı. Rekombinatsiyanın' saldarınan jaqtılıqtın' nurlanıwı Gaz razryadının' ko'p sanlı formalarındag'ı jaqtılıqtın' nurlanıwının' sebebi bolıp tabıladı.

Elektronlardın' urılıwı menen ju'retug'in ionlasıw⁷. Gazlerdegi elektr razryadı qubılıslarında atomlardın' elektronlardın' urılıwı na'tiyjesindegi ionizatsiyası u'lken orındı iyeleydi. Jetkilikli kinetikalıq energiyası bar elektron neytral atomg'a kelip urılğ'anda atomnıń' bir yamasa bir neshe elektronın julıp shıg'aradı. Na'tiyjede neytral atom on' iong'a aylanadı, al gazde jan'a elektronlar payda boladı. Elektronlıq urılıwlar ta'sirinde payda bolatug'in ionizatsiyanı u'yreniw ushın arnalg'an ta'jiriybenin' sxeması 48-su'wrette keltirilgen. Bunday ta'jiriybeni birinshi ret Frank ha'm Gertsler o'tkergen ha'm sonlıqtan bunday ta'jiriybeni olardıń' hu'rmetine Frank ha'm Gerts ta'jiriybesi dep ataydı.



48-su'wret.

Frank ha'm Gerts ta'jiriybesinin' sxeması.

Basımı shama menen 0,1-0,01 mm snap bag'anasının' basımınday bolğ'an gaz shiyshe trubag'a kirgiziledi (da'slep shiyshe trubanın' hawası sorıp aling'an bolıwı kerek). Trubka qızdırılatus'ın K katodına, C torına ha'm indlar kollektori Kl g'a iye bolıwı kerek. Torg'a katodqa salıstırg'anda on' potentsial beriledi, bul potentsialdın' ma'nisin kernewdi bo'liwshi D_1 menen o'zgeritedi ha'm V voltmetri menen o'lsheydi. İonlar kollektorına katodtın' potentsialına qarag'anda 0,5 – 1,0 V ke u'lkenirek teris potentsial beriledi. Bul u'lken emes potentsiallar ayırması D_2 bo'liwshisi arqalı alınadı. Onnıń' on' ushı katod penen jalğ'ang'an.

⁷ «İonizatsiya» ha'm «ionlasıw» so'zleri bir ma'niste qollanıladı.

Usınday ta'jiriybelerde katod a'dette katodtin' ishine joylastirilg'an ja'rdemshi spiral ta'repinen qızdırıladi. Usınday jag'dayda qızdırıwshı toq ta'repinen payda etiletug'in katod boylap potentsialdin' o'zgerisi joq etiledi (bunday katodlardı ekvipotentsial katodlar dep te ataydı).

Trubalardag'ı katod-tor arasındag'ı qashıqlıq tor-kollektor arasındag'ı qashıqlıqtan a'dewir kishi etip islenedi. Sonın' menen birge gaz molekularının' erkin qozg'alıwının' uzınlıg'ı tor menen katod arasındag'ı qashıqlıqtan u'lken bolarlıqtay etip gazdın' basımı saylap alınadı. Sonlıqtan katod ta'repinen shıg'arılğan elektronlar katod-tor ken'isliginde hesh soqlıgıspay qozgaladı. Eger katod penen tor arasındag'ı potentsiallar ayırması U g'a ten' bolsa, onda ha'r bir elektron

$$\frac{mv^2}{2} = eU \quad (111)$$

kinetikalıq energiyasına iye boladı (e arqalı elektronnıń zaryadı belgilengen). Tor ta'repinen tezlenen elektronlar tor menen kollektor arasındag'ı ken'islikte gaz atomları menen soqlıg'ısadı.

Kollektordın' potentsialı katodtin' potentsialnan kishi bolg'anlıqtan ionizatsiya bolmag'anda barlıq elektronlar tormozlanadı ha'm kollektorg'a jetpeydi. Sonlıqtan galvanometr arqalı o'tiwshi toq nolge ten'. Biraq, eger tor menen katod arasındag'ı U potentsiallar ayırmasın a'stelik penen ko'tersek, onda elektronlardın' kinetikalıq energiyaları da artadı ha'm onın' ma'nisi ionizatsiya energiyasının' ma'nisine jetkende tor-kollektor arasındag'ı ken'islikte on' zaryadlang'an ionlar payda boladı. Bul ionlar kollektorg'a qaray qozg'aladı ha'm na'tiyjede galvanometr toqtın' payda bolg'anlıg'ın ko'rsetedi. Sonlıqtan tordın' en' kishi potentsialı bolg'an U dı o'lshep (U dın' usınday ma'nisinde kollektor tog'ı payda boladı) izertlenip atırg'an gazdın' ionizatsiya energiyasının' ma'nisin anıqlaw mu'mkin.

Frank ha'm Gerts ta'jiriybesi ionizatsiya energiyasın anıqlay alatug'ın birden bir ta'jiriybe emes.

Kestede bazı bir atomlardın' ioniztsiya energiyası berilgen:

Element	He	Ne	Ar	Hg	Na	K	Rb
İonizatsiya energiyası, eV	24,5	21,5	13,9	10,4	5,12	4,32	4,68

Plazma. Gaz razryadının' ha'r qıylı formalarında, joqarı temperaturalarda elektronlardın' kontsentratsiyası shama menen ionlardın' kontsentratsiyasın ten' bolatug'ın ku'shli ionlastirilg'an gaz payda boladı. *Birdey kontsentratsiyag'a iye elektronlar menen ionlardan turatug'ın sistema elektronlıq-ionlıq plazma yamasa plazma dep ataladı.*

Plazmada elektronlar menen ionlardın' kontsentratsiyaları shama menen birdey bolg'anlıqtan ondag'ı ko'lemlik zaryad nolge ten' (metallarda usınday jag'daydın' orın alatug'ınlıg'ın eske tu'siremez). Usının' menen bir qatar gaz a'dewir ionlasqanda plazmanın' elektr o'tkizgishligi u'lken ma'niske iye boladı. Sonlıqtan o'zinin' elektr o'tkizgishliginin' xarakteri boyınsha plazma metallarg'a jaqınlasadı.

Eger plazma elektr maydanında joylasqan bolsa, onda elektr tog'ı o'tedi ha'm plazma qızadı. Bunday jag'dayda elektr maydanınan energiyanı da'slep qozg'alg'ısh bo'leksheler bolg'an elektronlar aladı, olar keyin soqlıg'ısıwıların' na'tiyjesinde alg'an energiyaların ionlarg'a beredi. Biraq ionlardın' massaları elektronlardın' massalarınan ko'p shamalarg'a u'lken bolg'anlıqtan elektronlar energiyaların ionlarg'a tolıq bere almaydı. Kishi basımlarda soqlıg'ısıwıların' sanı salıstırmalı tu'rde joqarı bolmaydı. Sonlıqtan elektronlardın' ortasha kinetikalıq energiyaları

ionlardın' ortasha kinetikalıq energiyalarınan joqarı boladı. Basqa so'zler menen aytqanda elektronlardın' temperaturası ionlardın' temperaturasınan joqarı boladı (bunday plazmanı **izotermalıq emes plazma** dep ataymız ja'ne tumperaturanın' anıqlaması boyınsha $\langle \frac{mv^2}{2} \rangle = \frac{3}{2} kT$ formulası menen anıqlanatuǵ'ınlıǵ'ın eske tu'siremiz). Bul temperaturalar dı tuwrıdan-tuwrı o'lshew mu'mkin emes. O'tkerilgen basqa izertlewler 0,1 millimetr sınap bag'anasın' basımında basım dıǵ'ı plazmada elektronlardın' temperaturasın' 10^5 K, al ionlardın' temperaturasın' bir neshe ju'z gradus g'ana ekenligin ko'rsetti (yag'nıy mın' ese u'lken).

Basım u'lkeygende elektronlar menen ionlar arasındıǵ'ı soqlıǵısıwlar jiyilenedi. Sonlıqtan olardı' temperaturaları arasındıǵ'ı ayırma kishireyedi. Jetkilikli da'rejedegi joqarı temperaturalı plazmada ionlardın' temperaturası menen elektronlardın' temperaturası birdey ma'niske iye boladı (**izotermalıq plazma**). İzotermalıq plazmanı alıw ushın (mısal retinde) joqarı temperaturalar kerek. Joqarı temperaturalarda alıng'an plazmanı joqarı **temperaturalı plazma** yamasa **izotermalıq plazma** dep ataydı.

Plazma kosmoslıq denelerde ko'birek ushırasadı. Mısalı Quyash tolıǵ'ı menen plazmadan turadı. Jerdın' atmosferasın' joqarǵ'ı ionlasqan qabatı da plazma bolıp tabıladı.

Plazma ku'shli ionlasqan gaz sıpatında a'dettegi gazler menen bir katar uqsaslıqlarǵ'a iye. Sonlıqtan plazma da bazı bir gaz nızamlarına bag'ınadı. Biraq plazma menen a'dettegi gazler arasında ju'da' u'lken ayırmalar da bar. Bul ayırma magnit maydanı bar jag'daylarda anıq ko'rinedi. Magnit maydanı ta'repinen plazmanın' bo'lekshelerine (ionlarg'a ha'm elektronlarg'a) a'dettegi gazlerde orın almaytuǵ'ın Lorentts ku'shi dep atalatuǵ'ın ku'shler ta'sir etedi (bul xaqında endigi lektsiyalarda tolıq ga'p etiledi). Bo'leksheler magnit maydanı boylap qozg'alg'anda bunday ku'shler nolge ten'. Eger ionlar menen elektronlar magnit maydanına ko'ldenen' bag'ıtta qozg'alsa Lorentts ku'shinin' shaması o'zinin' maksimum ma'nisine jetedi ha'm qozg'alısqa kesent jasaydı. Usı eki jag'day ha'm ku'shli ionlasqan plazmanın' joqarı elektr o'tkizgishligi plazmanın' a'dettegi gazlerden u'lken parqın'ın bar ekenligin an'g'artadı. Plazmanın' (joqarı elektr o'tkizgishlikke iye ayırıqsha suyıqlıq dep karawg'a bolatuǵ'ın obyektin') qozg'alısın u'yreniw plazmanın' magnit gidrodinamikasın'ın predmetin quraydı. Onın' na'tiyjeleri ko'plegen astrofizikalıq protsesslerdi tu'siniwge mu'mkinshilik beredi.

Sonın' menen birge plazmanın' qa'siyetlerin u'yreniw a'meliy jaqtan og'ada ullı a'hmiyetke iye. Sebebi plazmanı paydalanıw arqalı basqarılatuǵın termoyadrolıq reaksiyalardı a'melge asırıw mu'mkinshiligi payda boladı.

12-§. Toqlardı' magnit maydanı

Toqlardı' o'z-ara magnitlik ta'siri. Magnit maydanın'ın induktsiya vektori. Toq elementi. Bio-Savara-Laplas nızamı. Magnit maydanın'ın kernewligi. Tuwrı toq ha'm aylanbalı toqlardı' magnit maydanların'ın kernewliklerin esaplaw. Solenoidtin' ko'sheri boyınsha magnit maydanın'ın kernewliginin' tarqalıwı. Parallel toqlardı' o'z-ara magnitlik ta'sirlesiwı

Magnitlik qubılıslar en' da'slep ta'biyiy ha'm jasalma tu'rde alıng'an magnitlerde tabıldı ha'm u'yrenildi. Ha'zir de bul qubılıs penen baslang'ısh tanısıwdı magniten baslaymız. Biraq magnite orın alatug'ın protsesslerdi tu'siniw a'piwayıraq, sonın' menen birge fundamentallıq qubılıslardı u'yreniwdi talap etedi. Sonlıqtan ha'zirgi waqıttaǵ'ı magnetizm haqqındaǵ'ı ta'limattı u'yreniw ushın tariyxıy jol menen ju're almaymız. Biz u'yreniw dı'ın tiykarına XIX a'sirde ashılǵ'an eki eksperimentallıq faktti alamız:

1. Magnit maydanı qozg'alıwshı zaryadlarg'a ta'sir etedi (demek magnit maydanı elektr tog'ına ta'sir etedi).
2. Qozg'alıwshı zaryadlar magnit maydanın payda etedi (demek elektr tog'ı magnit maydanın payda etedi).

Joqarıda keltirilgen punktler tiykarında biz elektr tog'ı o'tip turg'an o'tkizgishler bir biri menen sol toqlar payda etken magnit maydanları arqalı ta'sir etisedi dep juwmaq shıg'aramız. Ta'jiriybeler bir bag'ıttag'ı (o'z-ara parallel) elektr toqlarının o'z-ara tartısatug'ınlıg'ın, al qarma-qarsı bag'ıttag'ı toqlardı (bunday toqlardı antiparallel toqlar dep ataymız) iytirisetug'ınlıg'ı ko'rsetedi. Magnitlik ta'sirlesiw dep atalatug'ın bunday qubılıslar 1820-jılları Amper ta'repinen teren' tu'rde izertlendi.

Biz qozg'alıwshı zaryadlar haqqında ga'p etkenimizde elektr tog'ının' zaryadlardın' qozg'alısın'ın' dara jag'dayı (ta'rıptlesken qozg'alıs) ekenligin atap o'temiz. Elektrostatikadag'ı sıyaqlı biz da'slep vakuumdegi magnit maydanın, keyinirek zatlardag'ı magnit maydanın u'yrenemiz.

Magnitlik ta'sirlesiwdin' elektrlik ta'sirlesiwden u'lken parqı bar. Elektr ta'sirlesiwı bolıwı ushın o'tkizgishlerde elektr zaryadların'ın' bolıwı sha'rt ha'm ta'sirlesiw zaryadlardın' mug'darına g'a'rezli. Magnit ta'sirlesiwı bolsa o'tkizgishlerdegi elektr zaryadınan g'a'rezli emes, al bunday ta'sirlesiw tek toq bolg'anda g'ana ju'zege keledi ha'm toqtın' shamasınan g'a'rezli.

Magnitlik ta'sirlesiwdin' ju'zege keliwi ushın *magnit maydanının'* bolıwı sha'rt. Elektr tog'ı magnit maydanın payda etedi, al toq o'tip turg'an o'tkizgishler bolsa sol payda etken magnit maydanları arqalı bir biri menen ta'sirlesedi.

Basqa so'z benen aytqanda (turaqlı) magnit maydanı qozg'alıwshı zaryadqa g'ana ta'sir etedi eken (tınıshlıqta turg'an elektr zaryadına turaqlı magnit maydanı ta'sir etpeydi). Demek qozg'alıstıg'ı elektr zaryadı a'tırıpında magnit maydanın payda etedi degen so'z ha'm usı magnit maydanı arqalı basqa magnit maydanları menen ta'sirlesedi. Eger biz qozg'alıstın' salıstırmalı ekenligin esapqa alatug'ın bolsaq, onda bir noqatlıq zaryadtın' payda etken magnit maydanı usı zaryad penen birge qozg'alıwshı esaplaw sistemasında baqlanbaydı, al zaryad qozg'alatug'ın esaplaw sistemalarında (yamasa zaryadqa salıstırg'anda qozg'alatug'ın esaplaw sistemalarında) bar boladı. Sonlıqtan bir esaplaw sistemasındag'ı baqlawshı ken'isliktin' biz belgilep alg'an bir noqatında magnit maydanının' bar dep juwmaq shıg'arsa, zaryad penen birge qozg'alatug'ın ekinshi bir esaplaw sistemasındag'ı baqlawshı ken'isliktin' tap sol noqatında magnit maydanın joq dep juwmaq shıg'aradı. Turaqlı elektr maydanı haqqında bunday juwmaqlardı shıg'arıw mu'mkin emes.

Ta'jiriybeler magnit maydanında qozg'alıwshı nokatlıq q elektr zaryadına ta'sir etiwshi F_m ku'shtin' mına formula boyınsha esaplanatug'ınlıg'ın ko'rsetedi:

$$F_m = \frac{q}{c} [\mathbf{vB}]. \quad (112)$$

Bul formuladag'ı \mathbf{B} vektorı q zaryadınan ha'm onın' qozg'alısınan g'a'rezli emes. Bul vektor sol q zaryadı qozg'alatug'ın magnit maydanın ta'rıpleydi. \mathbf{B} vektorın *magnit induktsiyası* vektorı (durısırag'ı psevdovektorı) dep ataydı. \mathbf{v} arqalı noqatlıq q zaryadın'ın' tezligi belgilengen. (112)-formuladan F_m ku'shinin' \mathbf{v} ha'm \mathbf{B} vektorları jatqan tegislikke perpendikulyar, al ku'shtin' shamasın'ın' usı eki vektor arasındag'ı mu'yeshtin' sinusına proporsional ekenligin ko'remiz. Eger \mathbf{v} ha'm \mathbf{B} vektorları o'z ara kollinear (parallel yamasa antiparallel) bolsa, onda ku'shtin'

shaması nolge ten' boladı. (112)-formula tek turaqlı magnit maydanı ushın g'ana emes, al o'zgermeli magnit maydanları ushın da durıs.

(112)-formuladag'ı c turaqlısın ıqtıyarlı tu'rde saylap alıwg'a boladı. Bul turaqlınnın' san shamasın ha'm o'lsheń birliklerin saylap alıw arqalı **birlikler sisteması** anıqlanadı. Sol ıqtıyarlı tu'rde saylap alıwların' ishinde c turaqlısına tezliklin' birigin bergende elektr ha'm magnit maydanların' o'lsheńleri birdey bolıp shıg'adı. Birliklerdin' **Gauss sistemasında** c turaqlısı ushın tap usınday birliktegi shamalı qabıl etedi. Onın' sanlıq ma'nisin tallawdı ha'zirshe keyinge qaldıramız.

Biz tınıshlıqta turg'an elektr zaryadına magnit maydanının' ta'sir etpeytug'ınlıg'ın ja'ne bir ret atap o'temiz. Magnit maydaanının' elektr maydanınan birinshi tiykarg'ı parqı usınnan ibarat. **Elektr maydanının' indikatori bolıp tınıshlıqta turg'an elektr zaryadı, al magnit maydanının' indikatori bolıp qozg'alıstıg'ı elektr zaryadı xızmet etedi.**

(112)-formula qozg'alıwshı zaryadka ta'sir etiw ku'shi boyınsha \mathbf{B} magnit maydanın o'lshewdin' printsipiallıq mu'mkinshiligin beredi. Bunnan keyin tınıshlıqta turg'an elektr zaryadının' ja'rdeminde elektr maydanının' joq ekenligin anıqlap alıw za'ru'r. Bunnan keyin \mathbf{F}_m vektorı nolge aylanatug'ın tezlik \mathbf{v} nın' bag'ıtın anıqlap aladı (bunın' ushın \mathbf{v} vektorı \mathbf{F}_m vektorına parallel yamasa antiparallel bolıwı kerekligi joqarıda ayıldı). Usınday jollar menen \mathbf{B} magnit maydanının' bag'ıtı anıqlawshının' belgisi da'lliginde anıqlanadı. En' aqırında elektr zaryadı \mathbf{B} vektorına perpendikulyar bag'ıtta qanday da bir \mathbf{v}_\perp tezligi menen qozg'alğan jag'daydag'ı \mathbf{F}_m ku'shin o'lshew kerek boladı. Bunday jag'dayda

$$\mathbf{F}_m = \frac{q}{c} [\mathbf{v}_\perp \mathbf{B}] \quad (113)$$

ekenligi anıq. Endi bul katnastın' eki ta'repin de \mathbf{v}_\perp shamasına vektorlıq ko'beytemiz. Bunday jag'dayda vektorlıq algebranın' $\mathbf{a} \times [\mathbf{b} \times \mathbf{c}] = \mathbf{b}(\mathbf{a}\mathbf{c}) - \mathbf{c}(\mathbf{a}\mathbf{b})$ formulasınan paydalanamız (bul formulada \times belgisi arqalı vektorlıq ko'beytme ekenligin belgiledik). Demek $[\mathbf{v}_\perp \mathbf{F}_m] = \frac{q}{c} [\mathbf{v}_\perp [\mathbf{v}_\perp \mathbf{B}]] = \frac{q}{c} \{ \mathbf{v}_\perp (\mathbf{v}_\perp \mathbf{B}) - \mathbf{B} (\mathbf{v}_\perp \mathbf{v}_\perp) \} = \frac{q}{c} \mathbf{B} v_\perp^2$. Endi $(\mathbf{v}_\perp \mathbf{B}) = 0$ ekenligin esapqa alamız. Na'tiyjede mınag'an iye bolamız:

$$\mathbf{B} = -\frac{c}{qv_\perp^2} [\mathbf{v}_\perp \mathbf{F}_m] = \frac{c}{qv_\perp^2} [\mathbf{F}_m \mathbf{v}_\perp]. \quad (114)$$

Bul formulanın' ja'rdeminde \mathbf{B} vektorı shaması boyınsha da, bag'ıtı boyınsha da bir ma'nisli anıqlanadı. \mathbf{B} shamasının' vektor ekenligi (da'liregi psevdovektor ekenligi) eki polyar vektordın' ko'beymesi bolg'an (114)-formuladan anıq ko'rinip tur.

\mathbf{E} elektr maydanında q zaryadına $\mathbf{E}_e = q\mathbf{E}$ ku'shi ta'sir etedi. Eger elektr ha'm magnit maydanları bir birinen g'a'rezsiz ta'sir etetug'ın bolsa (bunday boljawdın' durıs ekenligin ta'jiriybeler ko'rsetedi), onda eki maydan ta'repinen zaryadqa ta'sir etiwshi ku'sh $\mathbf{F} = \mathbf{F}_e + \mathbf{F}_m$, yag'nıy

$$\mathbf{F} = q \left(\mathbf{E} + \frac{1}{c} [\mathbf{v} \mathbf{B}] \right). \quad (115)$$

Bul ku'shti **Lorentts ku'shi** dep ataymız.

Relyativistlik emes jaqınlasıwlarda qa'legen basqa ku'sh sıyaqlı Lorentts ku'shi \mathbf{F} esaplaw sistemasın (inertsial esaplaw sistemasın) saylap alıwdan g'a'rezli emes. Biraq (115)-

an'latpadag'ı ekinshi qosılıwshı bolg'an $\frac{1}{c}[\mathbf{vB}]$ shamasının' ma'nisi bir esaplaw sistemasınan ekinshi esaplaw sistemasına o'tkende o'zgeriske ushıraydı. Sonlıqtan birinshi qosılıwshınan' da ma'nisinin' o'zgeriwi kerek. Solay etip tolıq ku'sh \mathbf{F} ti elektr ha'm magnit ku'shine ajratıw esaplaw sistemasın saylap alıwdan g'a'rezli. Esaplaw sisteması ko'rsetilmese eki ku'shke ajratıw ma'niske iye bolmaydı.

Magnit maydanının' qozg'alıwshı zaryadlarga ta'sirin u'yreniwde magnit maydanının' qozg'alıwshı ayırım zaryadlarga emes, al elektr toqlarına (bunday jag'daylarda qozg'alısqa ko'p sandag'ı bo'leksheler tartıladı) ta'sirin u'yreniw jolı menen a'melge asırıw qolaylıraq. Meyli toq kontsentratsiyası n , zaryadı e ten' birdey bo'leksheler ta'repinen payda etiletug'ın bolsın. Bunday jag'dayda $\mathbf{j} = nev$. dV ko'lemindegi bo'leksheler sanı $dN = n dV$, al magnit maydanındag'ı denenin' ko'leminin' dV elementine ta'sir etetug'ın ku'sh

$$dF = \frac{e}{c}[\mathbf{vB}]dN = \frac{ne}{c}[\mathbf{vB}]dV$$

yamasa

$$d\mathbf{F} = \frac{1}{c}[\mathbf{jB}]dV. \quad (116)$$

A'l'bette bul an'latpa toq alıp ju'riwshiler ha'r qıylı zaryadlar bolg'an ulıwma jag'day ushın da durıs.

Endi dara jag'daydı karayıq. Meyli \mathcal{J} tog'ı kese-kesiminin' maydanı S ke ten' ju'da' jin'ishke sim arqalı o'tetug'ın bolsın. Uzunlıg'ı dl bolg'an sımnnın' kishi ushastkasın alamız ha'm usı ushastkag'a ta'sir etiwshi ku'shtin' shaması bolg'an $d\mathbf{F}$ shamasın esaplayıq. Eger usı ushastkanın' ko'lemi $dV = S dl$ bolsa, onda $\mathbf{j}dV = \mathcal{J}dl$ yamasa

$$\mathbf{j}dV = \mathcal{J}dl. \quad (117)$$

Bul an'latpada $d\mathbf{l}$ vektorının' bag'ıtı toqtın' bag'ıtı menen sa'ykes keledi. $\mathbf{j}dV$ vektorı toqtın' **ko'lemlik**, al $\mathcal{J}dl$ shaması toqtın' **sızıqlı elementi** dep ataladı. (116)- ha'm (117)-an'latpalardan mınanı alamız (bunın' ushın da'slep $\mathbf{j} = \frac{\mathcal{J}d\mathbf{l}}{av}$ ekenligin itibarg'a alamız ha'm onı (116)-an'latpag'a qoyamız):

$$d\mathbf{F} = \frac{1}{c}[\mathbf{dl B}]. \quad (118)$$

Toqtın' sızıqlı elementine magnit maydanında ta'sir etiwshi ku'shti anıqlaytugın (118)-formulanı Amper ta'repinen alıng'an edi ha'm sonlıqtan onı Amper nızamı dep ataydı. Al shekli uzunlıqqa iye o'tkizgishke magnit maydanında ta'sir etetug'ın ku'shtin' shaması (118) di integrallaw jolı menen alınadı:

$$\mathbf{F} = \frac{1}{c} \int [\mathbf{dl B}]. \quad (119)$$

Magnit maydanındag'ı toqlarga ta'sir etiwshi ku'shlerdi **Amper ku'shleri** dep ataydı.

Ten' o'lsheuli qozg'alatug'ın zaryadtın' magnit maydanı. Endi qozg'alıwshı noqatlıq q zaryadı payda etken magnit maydanın anıqlawshı nızamdı keltirip shıg'arıw menen shug'ıllanamız. Kishi tezlikke iye ten' o'lsheuli qozg'alıstı qaraw menen sheklenemiz ha'm

«kishi tezlik» haqqında aytqanımızda qanday tezliklerdi na'zerde tutatug'ınımızdı keyinirek ga'p etemiz.

Biz keltirip shıg'arayın dep atırg'an nızam ta'jiriybede alıng'an faktlerdi ulıwmalastırıw jolı menen anıqlang'an ha'm mına formula menen beriledi:

$$\mathbf{B} = \frac{q}{c' r^3} [\mathbf{v} \mathbf{r}]. \quad (120)$$

Bul formulada \mathbf{r} arqalı q zaryadınan baqlaw noqatına tu'sirilgen radius-vektor belgilengen, al c' bolsa birliklerdi saylap alıwg'a baylanıslı bolg'an proporsionallıq koeffitsienti.

Sol noqatlıq zaryadtın' baqlaw noqatında payda etken elektr maydanı

$$\mathbf{E} = \frac{q}{r^3} \mathbf{r}. \quad (121)$$

formulası menen beriledi. Bul an'latpanı paydalansaq, onda (120)-an'latpa $\mathbf{B} = \frac{1}{c'} [\mathbf{v} \mathbf{E}]$ tu'rinde jazıladı. Gauss sistemasında \mathbf{B} ha'm \mathbf{E} vektorları birdey o'lshege iye. Sonlıqtan c' tezliktin' birligine iye bolıwı kerek (c' penen tezlik \mathbf{v} nın' o'lshe birliklerinin' kısıqarıp ketiwi ushın). A'piwayılıq ushın bul turaqlınnı' ma'nisi joqarıdag'ı paragraftag'ı c g'a ten' etip alınadı. Usıg'an baylanıslı $c' = c$ sha'rti tiykarında c nın' da sanlıq ma'nisi anıqlanadı. Usınday jollar menen anıqlangan c *elektrodinamikalıq turaqlı* dep ataladı. O'lsheuler c nın' *vakuumdegi jaqtılıqtın' tezligine* ten' ekenligin ko'rsetedi. Joqarıda ayılğ'an «kishi tezlik» jaqtılıqtın' tezligine salıstırg'anda ju'da' kishi bolıwı kerek (yag'nıy $v \ll c$).

Solay etip

$$\mathbf{B} = \frac{q}{c r^3} [\mathbf{v} \mathbf{r}] \quad (122)$$

yamasa

$$\mathbf{B} = \frac{1}{c} [\mathbf{v} \mathbf{E}] \quad (123)$$

Joqarıda keltirilgen formulalardı eki qozg'alıwshı noqatlıq q_1 ha'm q_2 zaryadları arasındag'ı o'z-ara ta'sir etiw ku'shin esaplaw ushın paydalanamız. Bul ta'sirlesiw ku'shi elektrlik (Kulon nızamı boyınsha) ha'm magnitlik ku'shlerdin' qosındısınan turadı. A'piwayılıq ushın da'slep tek magnit ta'sirlesiwın ta'ripleytug'ın an'latpanı keltirip shıg'aramız. Meyli \mathbf{v}_1 ha'm \mathbf{v}_2 arqalı qozg'alıwshı zaryadlardın' tezlikleri belgilengen bolsın. q_1 zaryadı ta'repinen q_2 zaryadı turg'an noqattag'ı magnit maydanının' kernewligi

$$\mathbf{B}_1 = \frac{q_1}{c r_{12}^3} [\mathbf{v}_1 \mathbf{r}_{12}] \quad (124)$$

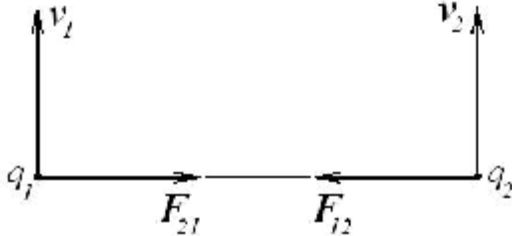
formulası menen beriledi. Bul formulada \mathbf{r}_{12} arqalı birinshi zaryadtan ekinshi zaryadqa tu'sirilgen radius-vektor belgilengen. q_2 zaryadına magnit maydanı

$$\mathbf{F}_{12} = \frac{q_2}{c} [\mathbf{v}_2 \mathbf{B}_1] = \frac{q_1 q_2}{c^2 r_{12}^3} [\mathbf{v}_2 [\mathbf{v}_1 \mathbf{r}_{12}]] \quad (125)$$

ku'shi menen ta'sir etedi. Tap usı sıyaqlı q_2 zaryadı q_1 zaryadına

$$\mathbf{F}_{21} = \frac{q_1 q_2}{c^2 r_{12}^3} [\mathbf{v}_1 [\mathbf{v}_2 \mathbf{r}_{21}]] \quad (126)$$

ku'shi menen ta'sir etedi. Bul an'latpadag'ı \mathbf{r}_{21} radius-vektori ekinshi zaryadtan birinshi zaryadqa tu'sirilgen.



49-su'wret.

Bir bag'ıtta qozg'alıwshı birdey belgige iye noqatlıq q_1 ha'm q_2 zaryadları bir biri menen tartısıadı.

Eger \mathbf{v}_1 ha'm \mathbf{v}_2 tezlikleri o'z ara parallel ha'm \mathbf{r}_{12} vektorına perpendikulyar bag'ıtlangan bolsa (49-su'wret), onda atlas zaryadlar (birdey belgige iye zaryadlar) ushın \mathbf{F}_{12} ha'm \mathbf{F}_{21} ku'shleri tartılıs ku'shleri, al zaryadlardın' belgileri ha'r qıylı bolsa \mathbf{F}_{12} ha'm \mathbf{F}_{21} ku'shleri iyteriw ku'shleri bolıp tabıladı. Ku'shlerdin' sanlıq shamaları mına an'latpa ja'rdeminde esaplanadı:

$$F_{12} = F_{21} = F = \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} \left(\frac{v_1 v_2}{c^2} \right). \quad (127)$$

Biz bul jerde joqarıda ayılğ'an toq o'tip turg'an o'tkizgishlerdin' o'z-ara ta'sirlesiwine qaytıp kelemiz ha'm (125)- ha'm (126)-formulalardan parallel toqlardın' bir biri menen tartısatug'inlıg'ın, al antiparallel toqlardın' bir birinen iyterisetug'inlıg'ın ja'ne bir ret ko'remiz.

Zaryadlardın' tezlikleri birdey bolg'an dara jag'daydı qarayıq. Bunday jag'dayda

$$F = \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} \left(\frac{v}{c} \right)^2. \quad (128)$$

(127)- ha'm (128)-formulalarg'a magnit maydanı kirmeydi. Biraq elektr maydanı arqalı ta'sirlesiw ku'shinin' $F_e = \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2}$ ekenligin bilemiz. Demek qozg'alıwshı birdey belgige iye (atlas) zaryadlar arasındag'ı magnit maydanı arqalı tartısıw ku'shinin' elektrostatikalıq iyterisiw

ku'shine qatnası bolg'an $\frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} \left(\frac{v}{c} \right)^2 / \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2}$ shamasının' $\left(\frac{v}{c} \right)^2$ qa ten' ekenligin ko'remiz. Yag'nıy

$$\frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} \left(\frac{v}{c} \right)^2 / \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} = \left(\frac{v}{c} \right)^2.$$

Biz joqarıda metallardag'ı toq tasıwshı elektronlardın' ta'rtiplesken tezliginin' sekundına bir neshe santimetrden aspaytug'inlıg'ın, al elektrolitlerde bolsa tezliktin' bunnan da kishi bolatug'inlıg'ın ko'rgen edik. Demek metallardag'ı ha'm basqa da o'tkizgishlerdegi toqtı

o'tkeriwge qatnasıp atırǵ'an elektronlar ushın joqarıdag'ı $\left(\frac{v}{c}\right)^2$ qatnasımın' shaması og'ada kishi ha'm 10^{-20} dan aspaydı.

Ayırım toq elementinin' magnit maydanı. Elektrostatikadag'ı sıyaqlı *superpozitsiya printsiplin* paydalanımız ha'm ta'jiriybenin' juwmaqlarına su'yenemiz. Bul printsiip boyınsha ha'r bir kozǵ'alıwshı zaryadtın' magnit maydanı vektorday bolıp qosıladı, ha'r bir zaryad maydandı basqa zaryadlardan g'a'rezsiz qozıradı (basqa zaryadlardın' bar yaki joqlıǵ'ınan g'a'rezsiz).

(122)-an'latpanı eske tu'siremiz. Eger sol an'latpanı paydalansaq, onda toqtın' ko'lemlik elementi ushın superpozitsiya printsiipi mına an'latpag'a alıp keledi:

$$d\mathbf{B} = \frac{1}{c} \frac{[\mathbf{j} \mathbf{r}]}{r^3} dV. \quad (129)$$

Tap usı sıyaqlı toqtın' sızıqlı elementi ushın mına an'latpanı alamız:

$$d\mathbf{B} = \frac{J}{c} \frac{[d\mathbf{l} \mathbf{r}]}{r^3}. \quad (130)$$

Bul formulalar Bio ha'm Savara nızamların an'g'artadı (Bio 1774-jılı tuwılıp, 1862-jılı qaytı bolǵ'an, al Savara bolsa 1791-jılı tuwılıp, 1841-jılı qaytı bolǵ'an). Toliq maydan (129)- ha'm (130)- an'latpalardı barlıq toqlar boyınsha integrallaw arqalı alınadı, yag'nıy:

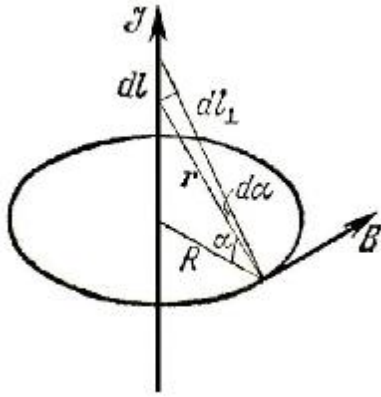
$$\mathbf{B} = \frac{1}{c} \int \frac{[\mathbf{j} \mathbf{r}]}{r^3} dV \quad (131)$$

yamasa

$$\mathbf{B} = \oint \frac{J}{c} \frac{[d\mathbf{l} \mathbf{r}]}{r^3}. \quad (132)$$

Bul an'latpalardıń ekewi de tek *turaqlı toqlar ushın* durıs. *Al turaqlı toqlar bolsa barlıq waqıtta da tuyıqlang'an.* Eger (130)-an'latpanın' on' ta'repine iqtıyarlı tu'rdegi qosındını qosqanda barlıq baqlanatug'ın shamalar o'zgermegen bolar edi. Sebebi qa'legen tuyıq kontur boyınsha alıng'an integral nolge ten' bolıp shıǵ'a bergen bolar edi. Sonlıqtan turaqlı toqlar haqqındag'ı ta'limattın' sheklerinde (131)- ha'm (132)- tu'rdegi Bio ha'm Savaranın' elementar nızamın ta'jiriybede sinap ko'riw printsiipiallıq jaqtan mu'mkin bolmag'an bolar edi. Sebebi turaqlı toqlardıń ayırım elementlerin izolyatsiyalaw (toq elementlerin bo'lip alıw) ha'm olar u'stinen eksperimentler o'tkeriw pu'tkilley mu'mkin emes. Usıǵ'an baylanıslı turaqlı toqlardıń magnit maydanı haqqındag'ı ta'limattın' tiykarına biz qozǵalıwshı zaryadtın' payda etken maydanın anıqlawshı nızamdı jatqaramız. *Qozǵalıwshı zaryadtın' maydanın ta'jiriybede barlıq waqıtta o'lshew printsiipiallıq jaqtan mu'mkin.*

Uzun, tuwrı sızıqlı o'tkizgishtin' magnit maydanı. Da'slep ju'da' uzun bolǵ'an ha'm l tog'ı o'tip turg'an o'tkizgishti qaraymız. O'tkizgishti toq deregi menen tutastırıwshı o'tkizgishter bir birinen alısta tur dep esaplanadı. Bunday jag'dayda tuwrı sızıqlı o'tkizgishti sheksiz uzun o'tkizgish dep qaraw mu'mkin.



50-su'wret.

Tuwrı sızılı sheksiz uzun toqtın' magnit maydanın esaplawg'a arnalg'an su'wret.

$J dl$ toq elementinin' magnit maydanı (50-su'wret)

$$dB = \frac{J}{cr^3} [dl \mathbf{r}] = \frac{J}{cr^3} [dl \wedge \mathbf{r}]$$

formulası ja'rdeminde esaplanadı. Bul an'latpada $dl \wedge$ arqalı dl din' \mathbf{r} ge perpendikulyar bolg'an qurawshısı belgilengen. Magnit ku'sh sızıqları orayı o'tkizgishtin' orayında jaylasqan shen'berler bolıp tabıladı. Skalyar formada jokarıdag'ı an'latpanı bilayınsha ko'shirip jazamız:

$$dB = \frac{J}{cr^2} dl \wedge = \frac{J}{cr} d\alpha.$$

Bul an'latpada $d\alpha$ arqalı baqlaw noqatınan dl vektorı ko'rinetug'ın mu'yesh (50-su'wrette ko'rsetilgen). O'tkizgishke shekemgi qashıqlıqtı $R = r \cos \alpha$ arqalı belgilep

$$dB = J \cos \alpha d\alpha / (cR)$$

an'latpasın alamız. Bul an'latpanı $\alpha = -\pi/2$ den $\alpha = +\pi/2$ ge shekem integrallaw biz izlep atırg'an na'tiyjeni beredi:

$$B = \frac{2J}{cR}. \quad (133)$$

Endi bir birine parallel bolg'an tuwrı sızılı sheksiz uzun eki toq arasındag'ı ta'sirlesiw ku'shin esaplawg'a boladı. Birinshi toq ekinshi toq o'tip turg'an orında $B_1 = \frac{2J_1}{cR}$ maydanın payda etedi. Bul maydan ekinshi toqtın' uzınlıg'ı l bolg'an ushastkasına $F = J_2 l B_1 / c$ ku'shi menen ta'sir etedi. Demek biz esaplayın dep atırg'an ku'shtin' ma'nisi

$$F = \frac{2}{Rc^2} J_1 J_2 l. \quad (134)$$

Ta'jiriybede F tin' shamasın o'lshep elektrodinamikalıq turaqlı c nın' san ma'nisin esaplaw mu'mkin. Birinshi ret baskasharaq jollar menen bunday o'lshepler ha'm esaplawlar Vilgelm Veber (1804-1891) ha'm Rudolf Kolraush (1809-1858) ta'repnen 1856-jılı a'melge asırıldı ha'm tan' qalarlıqtay na'tiyjelerdi aldı. Olar o'tkergen ta'jiriybelerinin' da'lligi sheklerinde ***c nın' san ma'nisinin' jaqtılıqtın' vakuumdag'ı tezligine ten' ekenligin taptı.*** Bunnan keyingi o'tkerilgen ta'jiriybelerdin' na'tiyjeleri de c nın' jaqtılıqtın' vakuumdegi tezligine ten' ekenligin tastıyıqladı. ***Solay etip elektrodinamikalıq turaqlı menen jaqtılıqtın' vakuumdegi tezligi bir fizikalıq turaqlı***

bolıp shıqtı. Maksveldin' teoriyalıq izertlewleri bul fundamentallıq na'tiyjenin' **jaqtılıqtın' elektromagnitlik ta'biyatının' an'latılıwı** ekenligin ko'rsetti.

Birlikler sisteması. Elektrodinamikalıq turaqlınnıń ma'nisin biliw elektr ha'm magnit maydanları haqqındag'ı ta'limattın' birlikler sistemasın du'ziwge mu'mkinshilik beredi. Eger $q^{(m)} = q/c$ tu'rindagi belgilewdi qabıl etsek, onda (112)- ha'm (122)- formulalar c ko'beytiwshisiz jazıladı:

$$\mathbf{F} = q^{(m)}[\mathbf{v}\mathbf{B}] \quad (135)$$

$$\mathbf{B} = \frac{q^{(m)}}{r^3}[\mathbf{v}\mathbf{r}] \quad (136)$$

Usınday jollar menen zaryadtın' (toqtın') jan'a birlikleri kirgiziledi. Bul birlikler sa'ykes elektrostatikalıq birliklerden c ese u'lken ha'm olardan o'lsheń birlikleri menen ajıraladı. Usınday jag'dayg'a SGS tin' magnitlik sisteması tiykarlang'an (qısqaşa SGSM dep belgilenedi). SGSM-zaryad mug'darının' onnan bir bo'limi **kulon** dep, al toq ku'shi **amper** dep ataladı. Bul **amper menen kulonnın' da'l anıqlaması** bolıp tabıladı.

Endi magnit maydanının' kernewliginin' birligine anıqlama bere alamız. Bul birlik **gauss** (Gs) dep ataladı. Meyli \mathbf{v} ha'm \mathbf{B} vektorları o'z-ara perpendikulyar ha'm $q^{(m)} = 1$ SGSM-birligi bolsın. $v = 1$ sm/s, $B = 1$ Gs. Bunday jag'dayda (135)-formula $F = 1$ din shamasın beredi. Bun mınaday anıqlamag'a alıp keledi:

Magnit maydanına perpendikulyar bag'ıtta 1 sm/s tezlik penen qozg'alıp baratırǵ'an 1 SGSM-zaryad birligi zaryadqa 1 dina ku'sh penen ta'sir etetug'ın magnit maydanının' kernewliginin' ma'nisi 1 gausqa ten' boladı.

Gauss haqqında ayqın ko'z-qarasqa iye bolıw ushın mına jag'daydı ata o'temiz: Jerdin' magnit maydanının' kernewligi ekvatorıda 0,4 Gs, al polıoslarda 0,7 Gs.

SGSE sisteması tek elektrlik shamalardı o'lshew ushın qollanıladı. Olar mına shamalar: zaryad mug'darı, elektr maydanının' kernewligi ha'm induktsiyası, elektr potentsialı, sıyımlıq, elektr qozg'awshı ku'sh, elektr o'tkizgishlik, elektr qarsılıǵ'ı ha'm basqalar.

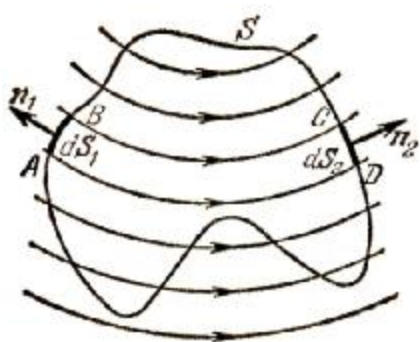
SGSM sisteması tek magnitlik shamalardı o'lshew ushın g'ana qollanıladı. Olar mına shamalar: magnit maydanının' kernewligi ha'm induktsiyası, magnit ag'ısı, o'zinshe ha'm o'zlik induktsiya koeffitsientleri, magnit momentleri, magnitleniw vektorı ha'm basqalar.

Biz paydalanıp ju'rgen Gauss sisteması kombinatsiyalang'an sistema bolıp tabılıp, bul sistemadag'ı elektrlik shamalardıń birlikleri SGSE sistemasının' birlikleri menen, al magnitlik shamalardıń birlikleri SGSM sistemasının' birlikleri menen birdey.

13-§. Magnit ag'ısı

Magnit maydanındag'ı toqli kontur. Magnit maydanı kernewliginin' tsirkulyatsiyası. Magnit maydanındag'ı toq o'tip turg'an o'tkizgish. Amper ku'shi. Magnit maydanında qozg'alıwshı zaryadlang'an bo'lekshege ta'sir etiwshi ku'sh. Qozg'alıstagh'ı zaryadlang'an bo'lekshenin' magnit maydanı

Magnit maydanları ushın Gauss teoreması. Elektr maydanın biz u'yrenenimizde qozgalmaytugın nokatlıq zaryadtın' elektr maydanının' kernewligin anıqlaytugın elementar nızam menen tanısıwdan basladıq. Bul elementar nızamnan eki integrallıq teorema keltirilip shıg'arıldı: birinshisi \mathbf{E} vektorının' tuyıq bet arqalı ag'ısı haqqında, ekinshisi sol \mathbf{E} vektormın' tuyıq kontur boyınsha tsirkulyatsiyası haqqında. Bunnan keyni bul teoremlar differentsial formalarg'a alıp kelindi. Bul jag'daylardin' barlıg'ı da maydan teoriyasının' tiykarg'ı ko'z-qarasları menen sa'ykes keletug'inlıg'ın da'lillewge boladı.



51-su'wret.

Qa'legen tuyıq S beti arqalı o'tiwshi magnit ag'ımı nolge ten' (qansha ku'sh sızıqları betke kirse, sonsha ku'sh sızıqları bet arqalı shıg'ıp ketedi).

Magnit maydanın u'yrengende de tap usınday jollar menen ju'remiz. Magnit maydanı usınday zaryadlar ta'repinen qozdırıladı degen boljaw tiykarında \mathbf{B} vektorının' tuyıq bet arqalı ag'ısın tabamız (qıskalıq maqsetinde **magnit ag'ısı** dep ataladı). Keyin sol vektordın' tuyıq kontur boyınsha tsirkulyatsiyasın esaplaymız.

Biz ıqtıyarlı alıng'an tuyıq S beti arqalı o'tetug'ın magnit ag'ısının' nolge ten' bolatug'inlıg'ın da'lillewimiz kerek (51-su'wret). Bul ushın zaryad su'wret tegisligine perpendikulyar bag'ıtta ten' o'lshewli qozg'aladı dep esaplaymız. 51-su'wrette sonday zaryadtın' qozg'alısının' saldarınan qozg'an magnit maydanının' ku'sh sızıqları koaksial shen'berler tu'rinde ko'rsetilgen. Su'wrette keltirilgen jag'dayga itibar berip qaraytug'ın bolsaq, onda S betine kiriwshi ku'sh sızıqlarının' usı betten shıg'ıwshı ku'sh sızıqlarına ten' ekenligin an'sat seziwge boladı. Demek usınday bet arqalı o'tiwshi tolıq (qosındı) ag'ıs nolge ten' degen so'z (bert arqalı kirgen ku'sh sızıqlarının' barlıg'ı da sol betten shıg'ıp ketedi). Demek teorema da'lillendi. Solay etip

$$\oint (\mathbf{B} d\mathbf{S}) = 0. \quad (137)$$

Bul formula differentsial formada bılayınsha jazıladı:

$$\text{div } \mathbf{B} = 0. \quad (138)$$

Endi biz bul an'latpalardı elektr maydanın u'yrenenimizde alıng'an an'latpalar menen salıstıramız. Biz

$$\oint (\mathbf{E} d\mathbf{S}) = 0, \quad \text{div } \mathbf{E} = 4\pi\rho$$

an'latpaların alg'an edik.

Endi biz magnetizm ta'limatının' rawajlanıwının' en' baslang'ış basqışlarındag'ıday ko'z-qarasta turıp magnit maydanının' deregi **magnit zaryadları** degen ideyanı usınamız. Bunday jag'dayda magnit zaryadları ha'm olar payda etken magnit maydanları arqalı Kulon nızamındag'ıday ta'sirlesiwidin' ornı alıwı kerek. Biraq bunday boljaw (137)-formulag'a qayshı keledi. Bul formula **magnit zaryadlarının' joq ekenligin** an'g'artadı. Bunday fundamentallıq na'tiyjenin' durıslıg'ı tek turaqlı magnit maydanları haqqındag'ı ta'limat penen sheklenbeydi. Sonlıqtan (137)-ten'leme ha'm og'an ekvivalent bolg'an (138)-ten'leme qa'legen magnit maydanı ushın durıs dep juwmaq shıg'aramız. Ta'jiriyelerde aling'an barlıq juwmaqlar usı juwmaqtın' durıs ekenligin tastıyıqlaydı. (137)- ha'm (138)-ten'lemeler Maksvell ten'lemeler sistemasına usı sistemanın' quramlıq bo'limleri sıpatında kiredi.

Divergentsiyası barlıq waqıtta nolge ten' bolatıg'ın ku'sh maydanları divergentsiz yamasa solenoidallıq maydanlar dep ataladı. Demek magnit maydanı solenoidallıq maydan eken. Magnit maydanının' deregi magnit zaryadları emes, al elektr toqları bolıp tabıladı.

14-§. Magnetikler

Zatlardıñ magnitlik qa'siyetleri. Molekulalıq toqlar. Magnitleniw vektori. Diamagnetikler, paramagnetikler, ferromagnetikler. Para- ha'm diamagnetizmdi tu'sindiriw.

O'zlerinin' magnitlik qa'siyetleri boyınsha barlıq zatlardı a'zzi magnitlik ha'm ku'shli magnitlik zatlar dep ekige bo'ledi. Bul tu'sinikler olardıñ sırttan tu'sirilgen magnit maydanındag'ı magnitlengishlik qa'siyetlerine baylanıslı. A'llette sırttan tu'sirilgen magnit maydanı denelerge ta'sir jasaydı – zatlar magnitlenedi. Basqa so'z benen aytqanda magnit maydanı tu'sirilgende zatlardıñ o'zleri qanday da bir magnitke aylanadı. Bul ha'r bir zattın' o'zine ta'n magnitlik qa'siyetlerinin' bar ekenligin ko'rsetedi ha'm bul ma'seleni tallawg'a o'temiz.

Zatlardag'ı magnit maydanı. Zatlarda magnit maydanı tek o'tkizgish arqalı o'tiwshi toqlardıñ ta'sirinde g'ana emes, al atomlar menen molekulalardıñ ishindegi zaryadlang'an bo'lekshelerdin' qozg'alısının' na'tiyjesinde de qozdırıladı. Bordın' yarım klasslıq teoriyası boyınsha elektronlar atom yadrolarının' do'geresinde tuyıq orbitalar boyınsha qozg'aladı (planetalardıñ Quyashtın' do'geresinde aylanğanlıg'ı sıyaqlı). Usının' menen bir qatarda elektronlar planetalar sıyaqlı o'z ko'sherleri do'geresinde de aylanadı (mısalı Jerdin' 24 saat ishinde o'z ko'sheri do'geresinde bir ret aylanatug'ınlıg'ı sıyaqlı). Usınday ishki aylanıw menen bazı bir qozg'alıs mug'darı momenti (impuls momenti) baylanısqa bolıp, bunday qozgalıstı **elektronnıñ spini** dep ataydı. Spinge tek elektronlar emes, al atom yadroları da iye boladı. Zaryadlang'an bo'lekshelerdin' orbitalıq ha'm spinlik aylanısları toqlarg'a sa'ykes keledi ha'm magnit maydanların qozdıradı. Elektronlardıñ klassikalıq orbitalar boyınsha ha'm o'zlerinin' menshikli ko'sherleri do'geresindegi aylanıwshı qozg'alısları keyinirek kvant mexanikası ta'repinen qozg'alıstın' ulıwmalıraq ha'm abstraktlıq **kartinası** menen almasırıldı. Bul **kartinada** bo'lekshenin' traektoriyası degen tu'sinik joq. «Orbitalıq qozg'alıs» tu'sinigi saqlanıp qaldı, biraq bul tu'sinik haqqında aytqanda ayqın orbitalıq qozg'alıs na'zerde tutilmaydı. Biraq magnetizm haqqındag'ı ta'limatta qozg'alıstın' ko'rgizbeliligi a'hmiyetke iye emes, al usı qozg'alıs penen baylanısqa bo'lekshelerdin' mexanikalıq ha'm magnit momentleri a'hmiyetke iye. Solay etip ha'zirgi waqıtlardag'ı ko'z-qaraslar boyınsha magnetizm to'mendegidey u'sh sebeptin' saldarıman payda boladı:

- 1) elektronlardıñ yadrolar do'geresindegi orbitatıq qozg'alıslarının' sebebinen;
- 2) elektronlardıñ menshikli aylanıslarının' (spininin') sebebinen;

3) atom yadrolarının' menshikli aylanıslarının' (spininin') sebebinen.

Biz joqarıda bo'lekshelerdin' «menschikli aylanıslar» dep aytqanımızda olardıń o'z ko'sherleri do'geregindegi aylanısların (yag'nıy spinin) na'zerde tuttıq.

Atom yadrolarının' salmag'ı elektronlardın' salmag'ınan mın'lag'ın ese u'iken. Sonlıqtan salmaqlı atom yadroları elektronlarg'a salıstırğ'anda a'dewir a'ste qozğ'aladı ha'm atom yadrolarının' magnit momentleri elektronlardın' spinlik magnit momentlerinen mın'lag'an ese kishi. Yadrolıq magnetizm ju'da' to'men temperaturalarda (absolot nolge jaqın temperaturalarda) ha'm elektronlardın' orbitalıq ha'm spinlik magnit momentleri bir birin tolıq kompensatsiya qılğ'an jag'daylarda g'ana sezile baslaydı.

Zatlardıń atomların' magnit momentlerinen' bag'ıtları sırtqı magnit maydanı bolmag'an jag'daylarda ta'rtipsiz jıllılıq qozğ'alıslardıń ta'sirinde pu'tkilley ha'r qıylı bolıp bag'ıtlang'an boladı Olar ta'repinen qozdırılğan magnit maydanları bir birin kompensatsiyalaydı. Sırtqı magnit maydanı tu'sirilgen jag'daylarda atomlar usı maydannın' bag'ıtına qaray burıladı (tolıq yamasa tolıq emes burıladı). Usnıń na'tiyjesinde kompensatsiya buzıladı. Usınday jag'daylarda **denelerdi magnitlengen** dep ataymız. Magnitleniw qa'biletligine iye **denelerdi magnetikler dep ataydı**. Zatlardıń ko'pshiligi sırttan magnit maydanı alıp kelingende a'zzi tu'rde magnitlenedi. Ku'shli magnitlik qa'siyetke tek **ferromagnitlik zatlar** iye (temir, nikel, kobalt, ko'plegen quymalar, siyrek jer elementleri ferromagnetikler bolıp tabıladı). Polattan, basqa da magnitlik quymalardan sog'ılğ'an turaqlı magnitler sırtqı magnit maydanı bolmasa da magnitlengen bolıp tabıladı. Polattan sog'ılğ'an sterjendi Jerdin' magnit maydanının' ta'sirinde de magnitlewge boladı (a'libette bunday magnitleniw ju'da' a'zzi boladı). Bunıń ushın polat sterjendi meridian bag'ıtında uslap turıp sho'kkish penen a'ste-aqırın urıw kerek (soqqı beriw kerek). Sterjennin' Jerdin' tu'silik magnit polıosine qarag'an ta'repinde arqa polıos, al sterjennin' qarama-qarsı ushında tu'slik polıos payda boladı. Eger sterjendi qarama-karsı bag'ıtqa bursaq (yag'nıy sterjennin' arqa polıosın Jerdin' arqa polıosı ta'repke, al sterjennin' tu'slik polıosın Jerdin' tu'slik polıosı ta'repke qaratsaq), bunnan keyin sho'kkish penen qaytadan soqqı bersek, onda sterjennin' polıoslardı orın almasadı.

Elektr maydanı sıyaqlı magnit maydanı da **mikroskopiyaqlıq** ha'm **makroskopiyaqlıq** boladı. Mikroskopiyaqlıq maydan zattın' elementar zaryadları ta'repinen payda etilgen haqıyqıy maydan bolıp tabıladı⁸⁸. Bunday maydan atomlıq masshtablardıń o'zinde ku'shli o'zgeredi. Makroskopiyaqlıq maydan bolsa mikroskopiyaqlıq maydanlardı ken'isliktin' sheksiz kishi ko'lemli boyınsha ortashalawdın' ja'rdeminde alınadı. Makroskopiyaqlıq maydannın' kernewligi **B** ha'ripi menen belgilenedi. **B** vektorı zattag'ı makroskopiyaqlıq magnit maydanın ta'ripleytug'ın tiykarg'ı vektor bolıp tabıladı. Elektronlar menen yadrolardıń orbitalıq ha'm spinlik aylanısları zattıan' atomlarındağ'ı tsirkulyatsiyalanıwshı qanday da bir toqlarg'a ekvivalent. Olar **molekulalıq toqlar** degen ulıwmalıq atamanı aldı. **B** makroskopiyaqlıq maydanın esaplaw ushın mikroskopiyaqlıq toqlardı «tegislew» ha'm olardı ken'islikte u'zliksiz o'zgeretugın makroskopiyaqlıq toqlar menen almastırıw kerek. Usınday makroskopiyaqlıq **magnitleniw toqları** dep ataymız. Bunnan bılay magnitleniw toqların j_m arqalı belgileymiz. O'tkizgishler arqalı o'tiwshı a'dettegi toqlardı **j** arqalı belgileydi ha'm bunday toqlardı **o'tkizgishlik toqları** dep ataydı. Solay etip **B** maydanı **o'tkizgishlik toqları ha'm magnitleniw toqları ta'repinen qozdırıladı** eken. Ortalıqtın' magnit maydanına ta'siri magnitleniw toqlarının' ta'sirine alıp kelinedi. Eger o'tkizgishlik toqları ha'm magnitleniw toqları belgili bolsa, onda zattın' bar ekenligin umıtwg'a da boladı ha'm **B** nın' shaması vakuum ushın arnalğ'an formulalar boyınsha esaplanılardı.

⁸⁸ «Payda etilgen» degen so'zdin' ornına «qozdırılğ'an» so'zi qollanıladı

\mathbf{B} vektorı vakuimde qanday da bir toqlar ta'repinen qozdırılğ'an magnit maydanının' kernewligi bolg'anlıqtan onın' ushın mına ten'leme orınlı:

$$\oint (\mathbf{B} d\mathbf{S}) = 0. \quad (137)$$

Bul formula differentsial formada bılayınsha jazılatug'ın edi:

$$\text{div } \mathbf{B} = 0. \quad (138)$$

Bul ten'lemelerdin' ekewi de magnit zaryadların' joq ekenligin an'g'artadı (joqarıdag'ı pragraftın' akırındag'ı eki an'latpa ekenligine itibar beremiz).

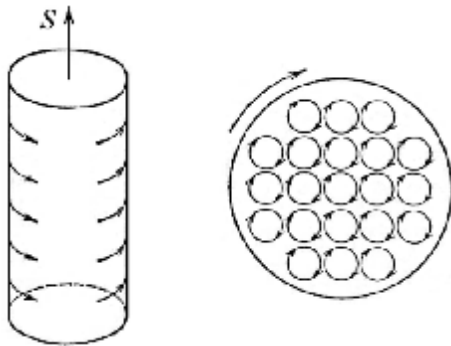
A'llette \mathbf{B} vektorı ushın tsirkulyatsiya haqqındag'ı teorema o'zb ku'shine iye. Ha'zirgi jag'dayda o'tkizgishlik tog'ı bolg'an \mathcal{J} shamasına magnitleniw tog'ı \mathcal{J}_m di qosıw kerek, yag'nıy

$$\oint (\mathbf{B} d\mathbf{l}) = \frac{4\pi}{c} (\mathcal{J} + \mathcal{J}_m) \quad (139)$$

Yamasa differentsial formada

$$\text{rot } \mathbf{B} = \frac{4\pi}{c} (\mathbf{j} + \mathbf{j}_m) \quad (140)$$

(139) formuladag'ı I ha'm I_m arqalı tuyıq L konturı arg'alı o'tetug'ın tolıq o'tkizgishlik ha'm magnitleniw toqları belgilengen.



52-su'wret.

TSilindr formasındag'ı magnitlengen magnetiktegi molekullıq toqlar. Qon'ıslas molekullardıń molekullıq toqları bir birine tiyip turg'an orınlarda qarama-qarsı bag'ıtqa iye boladı ha'm sonın' saldarınan olar bir birin kompensatsiyalaydı. Tek tsilindrdin' sırtqı qaptal betine shıg'ıwshı molekullıq toqlar g'ana kompensatsiya etilmey qaladı.

Ortalıqtın' magnitlengenligin magnitleniw toqları arqalı emes, al magnitleniw vektorı \mathbf{I} arqalı an'latıw qabıl etilgen. ***Molekulalıq toqlar ta'repinen magnetiktin' ko'leminin' bir birliginin' ortasha magnit momentin magnitleniw vektorı dep ataymız.*** Sonın' menen birge \mathbf{I} vektorı arqalı ortalıqtag'ı toqlardıń tıg'ızlıg'ın da an'g'artıw mu'mkin.

Meyli magnetik magnitlengen tsilindr ta'rizli formag'a iye ha'm magnit momenti usı tsilindrdin' ko'sheri boylap bag'ıtlang'an bolsın (52-su'wret). Magnitlengen magnetiktegi molekullıq toqlar bir biri menen kelisilgen halda ag'adı ha'm olar ta'repinen qozdırılğ'an magnit maydanları bir birin ku'sheytedi. Eger bir molekulanın' ortasha magnit momenti \mathfrak{M} ge ten' ha'm ko'lem birligindegi molekullardıń ortasha sanı n bolsa, onda

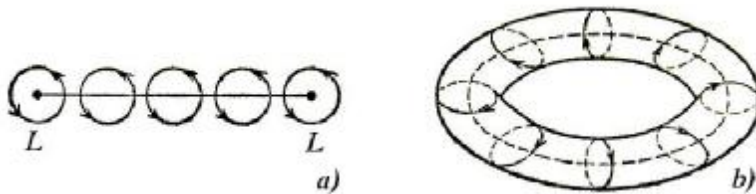
$$\mathbf{I} = n \mathfrak{M} \quad (141)$$

ekenligi o'z-o'zinen tu'sinikli. TSilindrdin' toliq magnit momenti VI ge ten'. Bul an'latpada $V = SL$ arqali tsilindrdin' ko'lemi belgilengen (S tsilindrdin' ultaninin' maydani, L uzunlig'i). Qon'isilas molekullardın' molekullıq toqları bir birine tiyip turg'an orınlarda bir birine qarama-qarsı bag'ıtqa iye boladı ha'm sonın' saldarınan olar makroskopiyaıq jaqtan bir birin kompensatsiyaıaydı. Tek tsilindrdin' sırtqı qaptal betine shıg'ıwshı molekullıq toqlar g'ana kompensatsiya etilmey qaladı. Bul toqlar tsilindrdin' qaptal beti boyınsha tsirkulyatsiyaıanıwshı I_m makroskopiyaıq betlik toqtı payda etedi. Sırtqı ken'islikte molekullıq toqlar payda etken maydanday makroskopiyaıq maydandı qozdıradı. **Bul toq magnitleniw tog'ı bolıp tabıladı.** Birinshi ta'repten onın' magnit momenti $J_m S/c$ ke ten'. Ekinshi ta'repten sol magnit momenti $VI = SLI$ ge ten'. Solay etip $\frac{J_m S}{c} = SLI$. S ha'm I vektorları birdey bolıp bag'ıtlang'anlıqtan $J_m = cLI$. Demek tsilindrdin' uzunlıq birligine sa'ykes keliwshı magnitleniw tog'ı

$$i_m = cJ \quad (142)$$

shamasına ten' boladı.

Zatlardag'ı magnit maydanının' tsirkulyatsiyası haqqındag'ı teorema. Endi B vektorının' qa'legen tuyıq kontur boyınsha tsirkulyatsiyasın tabamız. Bunın' ushın usı kontur arqalı o'tiwshı (tuyıq konturdı tesip o'tiwshı) J_m magnitleniw tog'ın esaplawımız kerek. L konturın ıqtıyarlı S beti menen keremiz. 53-a su'wrette su'wret tegisligi menen bul bettin' ha'm L konturının' kesilisiwinen alıng'an sxema berilgen. Bir molekullıq toqlar S betin eki orında kesedi: bir ret on', ekinshi ret teris bag'ıtta. Bunday toqlar S beti arqalı bolatug'ın magnitleniwge hesh qanday ta'sir tiygizbeydi. Basqa molekullıq toqlar L konturı do'gereginde aylanadı. Olardıń ha'r qaysısı betti tek bir ret kesedi. Molekuladag'ı qarama-qarsı bag'ıtlang'an toq S betinin' sheklerinén sırtqa ketedi. Usınday molekullıq toqlar S betin tesip o'tiwshı I_m molekullıq magnitleniw tog'ın payda etedi.



53-su'wret.

B vektorının' qa'legen tuyıq kontur boyınsha tsirkulyatsiyasın tabıwg'a arnalg'an sxema.

JI_m tog'ın magnitleniw vektorı I arqalı an'latamız. Usı maqsette L konturın sheksiz jin'ishke truba menen qorshaymız (53-b su'wret). (142)-formulag'a sa'ykes usınday trubanın' beti arqalı sıızılıq tıg'ızlıg'ı $i_m = cI_l$ formulası menen beriledi. Bul toq S betin tek bir ret kesip o'tedi. Trubanın' uzunlıq elementine sa'ykes keliwshı toq $i_m dl = cI_l dl = c(I dl)$. S betin tesip o'tiwshı tolıq magnitleniw tog'ı bul an'latpanı barlıq tuyıq L konturı boyınsha integrallaw jolı menen alınadı. Bul mınanı beredi:

$$I_m = c \oint_L (I dl). \quad (143)$$

Bul formulag'a (139)-formulanı alıp kelip qoysaq og'an mınaday tu'r beremiz:

$$\oint (B - 4\pi I) dl = \frac{4\pi}{c} I. \quad (144)$$

Differentsial formada mınaday formulag'a iye bolamız:

$$\operatorname{rot} \mathbf{B} = \frac{4\pi}{c} (\mathbf{j} + c \operatorname{rot} \mathbf{I}). \quad (145)$$

Bul an'latpanı (140)-an'latpa menen salıstırıp

$$\mathbf{j}_m = c \operatorname{rot} \mathbf{I} \quad (146)$$

an'latpasın alamız. Eger magnitleniw bir tekli bolsa, yag'nıy $\mathbf{I} = \text{const}$ bolsa, onda $\mathbf{j}_m = 0$. Eger magnitleniw bir tekli bolmasa, onda magnitleniw togının' ko'lemlik tıgızlıg'ı nolge ten' emes bolatug'ınlıgın ko'remiz.

Endi to'mendegidey qosımsha vektor kirgizemiz:

$$\mathbf{H} = \mathbf{B} - 4\pi\mathbf{I}. \quad (147)$$

Bunday jag'daylarda (144) penen (145) mına tu'rlerge enedi:

$$\oint \mathbf{H} d\mathbf{l} = \frac{4\pi}{c} \mathcal{J}, \quad (148)$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \frac{4\pi}{c} \mathbf{j}. \quad (149)$$

\mathbf{H} vektorın kirgiziw menen (148)- ha'm (149)-an'latpalardan magnitleniw toqları jog'aladı, tek o'tkizgishlik toqları g'ana qaladı. Demek usı \mathbf{H} vektorın kirgiziw din' ma'nisi de usınnan ibarat boladı (magnitleniw toqların joq etiw ushın kirgizilgen degen so'z). Eger dielektriklerdegi elektr maydanın karag'anımızda qosımsha kirgizilgen \mathbf{D} vektorı qanday orındı iyelegen bolsa, magnetizm haqqındag'ı ta'limatta \mathbf{H} vektorı tap sonday orındı iyeleydi. **\mathbf{B} vektorı tiykarg'ı vektor bolıp tabıladı.** Bul ku'shlik vektor ha'm sonlıqtan onı zattag'ı magnit maydanının' kernewligi dep ataw kerek. Biraq tariyxıy rawajlanıw barısında zatlardag'ı magnit maydanının' kernewligi dep \mathbf{H} vektorın qabıl etken, al \mathbf{B} vektorına sa'tsiz tu'rde **magnit induktsiyası degen atama bergen.** Tariyxıy jaqtan magnetizm haqqındag'ı ta'limattın' rawajlanıw barısı elektrostatiikanın' rawajlanıwında jollar menen ju'rgenlikten bunday ratsional emes terminologiyanın' qaliplesiwiniń sebebi bolıp qaldı. Da'slep magnit maydanının' deregi magnit zaryadları dep esaplandı. Biraq keyinirek magnit zaryadlarınan' joq ekenligi, al magnit maydanlarınan' dereginin' elektr tog'mı ekenligi anıqlandı. Usıg'an baylanıslı biz lektsiyalarda «magnit maydanının' kernewligi» yamasa «magnit induktsiyası» degen atamalar qollanbastan, tek « \mathbf{B} vektor» yamasa « \mathbf{H} vektorı» degen atamalar menen sheklenemiz. A'llette vakuumda sol \mathbf{B} vektorı menen \mathbf{H} vektorı o'z-ara ten'.

(147)-an'latpag'a (bul an'latpada $\mathbf{H} = \mathbf{B} - 4\pi\mathbf{I}$) sa'ykes \mathbf{H} ha'm \mathbf{B} vektorları birdey o'lshemlerge iye (eger $\mathbf{I} = 0$ bolsa $\mathbf{H} = \mathbf{B}$). Sonlıqtan olar ulıwmalıq birlikke de iye bolıwı kerek. Gauss sistemasındag'ı \mathbf{B} vektorının' birliги **gauss**. Tap usı birlik \mathbf{H} tı da o'lshew ushın qollanıladı. Biraq \mathbf{H} jag'dayında bul birlikti **ersted** dep ataydı. \mathbf{B} shamasın gausslarda, al \mathbf{H} shamasın erstedlerde o'lsheydi. Solay etip gauss penen erstedler bir birliktin' ha'r qıylı atamaları bolıp tabılardı eken.

A'dette \mathbf{I} vektorı menen \mathbf{H} vektorı arasındag'ı baylanıstı bılayınsha jazadı:

$$\mathbf{I} = \kappa \mathbf{H}.$$

Endi (147)-an'latpada $\mathbf{H} = \mathbf{B} - 4\pi\mathbf{I}$ ekenligin eske tu'sirsek, onda

$$B = \mu H$$

ekenligine isenemiz. Bul an'latpada $\mu = 1 + 4\pi\kappa$. κ shaması denenin' **magnitlik qabıllag'ıshlıg'ı**, al μ shaması denenin' **magnitlik sin'irgishligi** dep ataladı.

Diamagnetikler, paramagnetikler ha'm ferromagnetikler. Zatlardıń atomlar yamasa molekulalardan turatug'ınlıg'ın biz jaqsı bilemiz. Zattı quraytug'ın sol atomlar yamasa molekulalar sırttan magnit maydanı tu'sirilmegeń jag'daylarda magnit momentine iye bolmawı da, iye bolıwı da mu'mkin. Magnit momenti joq atomlarda barlıq orbitalıq qozg'alısar menen spinlerge baylanıslı bolg'an magnit momentleri (endigiden bılay bunday momentlerdi «menshikli momentler» dep te ataymız) bir birin tolıq kompensatsiyalaydı (momentlerdin' qosındısı nolge ten' boladı). Al ko'pshilik atomlarda orbitalıq ha'm menshikli momentler bir birin tolıq kompensatsiyalamaydı. Sonın' ushın atom (yamasa molekula) belgili bir mug'dardag'ı magnit momentine iye boladı.

Magnit momenti nolge ten' bolg'an zatlar diamagnetikler bolıp tabıladı ha'm bunday zatlarda magnit maydanı tu'sirilgende baqlanatug'ın magnitlik qubılıslardı **diamagnetizm** dep ataymız. Diamagnetizm haqqındag'ı ta'limat xaqqnda ga'p etkenimizde mına jag'dayg'a itibar beremiz:

Yadro do'gereginde aylanıwshı elektron balalar oynaytug'ın zırıldawıqqa usaydı. Sonlıqtan giroskop ushın mexanika kursında ayılğ'an jag'daylar atomlardag'ı elektronlar ushın da sa'ykes keledi. Eger atomg'a magnit maydanı tu'spegeń bolsa, onda atomdag'ı elektronlarga yadrolar ha'm basqa elektronlar ta'repinen ku'shler ta'sir etedi. Eger sırttan kernewligi **B** bolg'an magnit maydanı alıp kelinse, onda orbitasında **v** tezligi menen kozg'alıwshı elektrong'a qosımsha $\frac{e}{c}[\mathbf{vB}]$ ku'shi ta'sir ete baslaydı. Bul ku'shtin' ta'sirinde Ω mu'yeshlik tezligi menen ju'retug'ın pretsessiya qubılısı orın aladı (zırıldawıqtın' ko'sherin vertikal bag'ıtqa bazı bir mu'yesh jasap aylandırğ'an jag'daydag'ı aylanıwdı eske tu'siremiz). Sol Ω mu'yeshlik tezliginin' ma'nisi

$$\Omega = \frac{e}{2mc} B \quad (150)$$

formulası ja'rdeminde esaplanadı. Bul jiyilikti **Larmor** (1857-1942) **jiyiligi** dep ataymız. Solay etip **sırtqı turaqlı magnit maydanı bolg'anda atomdag'ı elektronlardın' ishki qozğalıstı o'zgermeydi. Biraq atom tutası menen (150)-an'latpadag'ı mu'yeshlik tezlikke iye qozğalısqı keledi. Bul na'tiyje Larmor teoreması dep ataydı.** Bunday qozğalıstın' saldarınan atom **p_m** magnit momentine iye boladı, al bul o'z gezeginde jan'a magnit maydanın qozdıradı. Bul magnit maydanının' ku'sh sızıqlarının' bag'ıtı sırtqı magnit maydanının' ku'sh sızıqlarının' bag'ıtına qarama-qarsı bag'ıtlang'an boladı.

Demek diamagnitlik zatlarda sırttan tu'sirilgen magnit maydanı atomlardın' pretsessiyasının' ju'zege keliwine alıp keledi. Al atomlardın' pretsessiyası jan'a magnit maydanın payda etedi⁹. Payda bolg'an magnit maydanı sırtqı magnit maydanına qarma-qarsı bag'ıtlang'anlıqtan sırtqı magnit maydanının' ha'lsirewi baqlanadı.

Demek sırtqı magnit maydanı tu'sirilgende diamagnetik magnitlenedi eken. Usının' saldarınan payda bolg'an magnit maydanının' bag'ıtı usı maydandı payda etken sırtqı magnit maydanının' bag'ıtına qarama-qarsı. Usınday ko'z-qaras penen qarag'anda diamagnetiklerdin' magnitleniwi dielektriklerdin' polarizatsiyasını eske tu'siredi. Sırttan tu'sirilgen elektr maydanı dielektrikti polarizatsiyalaydı. Al polarizatsiyanın' saldarınan payda bolg'an elektr maydanı sol polarizatsiyanı ju'zege keltiriwshı sırtqı elektr maydanının' bag'ıtına qarma-qarsı bag'ıtlang'an.

⁹ Bul jag'day elektromagnitlik induksiya qubılısı u'yrenilgende tolıq tu'sinikli boladı.

Biz asa o'tkizgishlerdin' magnitlik qa'siyetinin' ideal diamagnetiktin' qa'siyetine sa'ykes keletug'inlig'in, biraq olardın' diamegnetik emes ekenligin joqarida atap o'tken edik. Sebebi asa o'tkizgishtin' ishinde magnit maydanı bolmaydı (magnit maydanı asa o'tkizgishtin' ishinen toliq qısıp shıg'arıladi). Al diamagnetiktin' ishinde magnit maydanı boladı. Bul magnit maydanı **bir-birine qarama-qarsı bag'utlang'an** sırttan tu'sirilgen magnit maydanı menen magnitlengen diamagnetiktin' payda etken magnit maydanlarınin' qosındısınan turadı. Biz ha'zir o'tetug'in paramagnetiklerdin' ishindegi magnit maydanı bolsa **bir-biri menen parallel** sırttan tu'sirilgen magnit maydanı menen magnitlengen paramagnetiktin' payda etken magnit maydanlarınin' qosındısınan turadı. Demek diamagnetik sırttan magnit maydanı tu'sirilgende magnitlenip (magnitke aylanıp), o'zinin' magnitleniwden payda bolg'an magnit maydanı menen sırttan tu'sirilgen magnit maydanın ha'lsiretetug'in bolsa, paramagnit magnitlenip, o'zinin' magnitleniwden payda bolg'an magnit maydanı menen sırttan tu'sirilgen magnit maydanın ku'sheytedi. Bul qubılıslardın' barlıg'ı da ta'jiriybede bilayınsha ko'rinedi: diamagnetikler sırttan tu'sirilgen magnit maydanınan qashadı, al paramagnetikler sırttan tu'sirilgen magnit maydanı menen tartıladı.

Sonın' menen birge diamagnetikler ushın $\chi < 0$ ha'm $\mu < 0$, al paramagnetikler ushın $\chi > 0$ $\mu > 0$.

Paramagnitlik zatların' atomları nolge ten' emes p_m magnit momentine iye boladı. Sırttan tu'sirilgen magnit maydanı sol momentlerdi B vektorının' bag'ıtında burıwg'a tırıladı. Al jallılıq qozg'alısları bolsa p_m momentlerdi barlıq bag'ıtlar boyınsha ten' o'lshewli bagıtlawg'a tırıladı. Usının' na'tiyjesinde momentlerdin' maydan bag'ıtındağı bazı bir artıqmashlıqqa iye bag'ıtı payda boladı. Sonın' menen birge B maydanı qanshama u'lken bolsa momentlerdin' maydan ku'sh sızıqları bag'ıtındağı orientatsiyası da sonshama u'lken boladı.

Frantsuz ilimpazı (kristallofizigi) Per Kiori eksperimentler o'tkeriw jolı menen paramagnitlik qa'siyetke iye zatların' magnitlik qabıllag'ıshlıg'ının' (rus tilindegi «vospriimshivost» so'zi qaraqalpaq tiline «qabıllag'ıshlıq» dep awdarılğ'an) temperaturag'a g'a'rezliginin' minaday nızamg'a boysınatug'inlig'in ashtı:

$$\chi = \frac{S}{T}. \quad (151)$$

Bul an'latpada S arqalı zattın' ta'biyatına g'a'rezli bolg'an **Kiori turaqlısı**, al T arqalı absoliot temperatura belgilengen. Paramagnetizmnin' klassikalıq teoriyası Lanjeven ta'repinen 1905-jılı do'retildi. Ol paramagnetik ha'm to'mengi temperaturalar ushın ($p_m B \ll kT$) magnitlengenlik J menen magnit maydanınin' kernewligi B shamaların baylanıstıratug'in minaday an'latpanı aldı:

$$J = \frac{np_m^2}{3kT} B. \quad (152)$$

$\mu_0 = \frac{B}{H}$ dep esaplasaq ha'm n arqalı paramagnetiktin' ko'lem birligindegi atomlar sanı belgilesek, onda

$$\chi = \frac{\mu_0 np_m^2}{3kT}. \quad (153)$$

an'latpasın alamız. n di Avagadro sanı N_A menen almasırısaq, onda

$$\chi = \frac{\mu_0 N_A p_m^2}{3kT} \quad (154)$$

formulasın alamız. Endi (151)- ha'm (154)-an'latpalardı salıstırıp Kiori turaqlısının' ma'nisin alamız:

$$C = \frac{\mu_0 N_A p_m^2}{3k}. \quad (155)$$

Biz (154)-formulanın' $p_m B \ll kT$ sha'rtin qanaatlandırutug'ın to'mengi temperaturalar ushın aling'anlıg'ın aytıp o'tip edik. Ku'shli magnit maydanlarında ha'm to'mengi temperaturalarda J shaması menen B shamaları arasında proportsionallıq baqlanbay qaladı. Sebebi barlıq p_m momentleri maydan bag'ıtına tolıq burılıp boladı ha'm toynıw baslanadı. Sonlıqtan B nın' bunnan bılay o'siwi J shamasının' o'siwine alıp kelmeydi.

(154)-formula menen espalang'an magnit qabıllag'ıshlıq bir qatar jag'daylarda ta'jiriybede aling'an na'tiyjelerge jaqsı sa'ykes keledi.

Paramagnetizmnin' kvant teoriyası boyınsha atomnın' magnit momenti vektorının' sırttan tu'sirilgen magnit maydannın' bag'ıtına tu'sirilgen proektsiyaları diskret ma'nislerge iye boladı. Ko'pshilik jag'daylarda klassikalıq fizika kvant teoriyası menen u'lken ayırmag'a iye bolsa da (mısalı to'mengi temperaturalarda) kvant teoriyası boyınsha esaplang'an magnit qabıllag'ıshlıqtın' formulası (154)-formulag'a sa'ykes keledi.

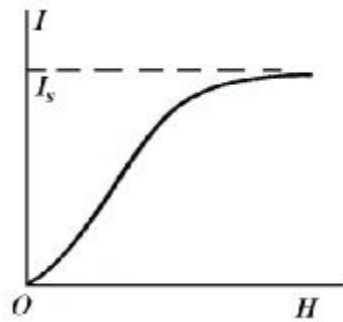
Endi ilim menen texnikada og'ada u'lken a'hmiyetke iye bolg'an ferromagnetizm qubılısı menen tanısamız. Ferromagnetizmnin' ferromagnetik dep atalatug'ın zatlarda baqlanatug'inlıg'ın atap o'temiz ha'm kelesi lektsiyanı ferromagnetiklerdin' fizikalıq qa'siyetlerin u'yreniwge bag'ıshlaymız.

15-§. Ferromagnetikler

Ferromagnetiklerdi magnitlew protsessi. Gisterezis qurıg'ı. Qaldıq magnitleniw ha'm koertsitiv ku'sh. Ferromagnetizmdi tu'sindiriw. Ferromagnitlik domenlar haqqında tu'sinik

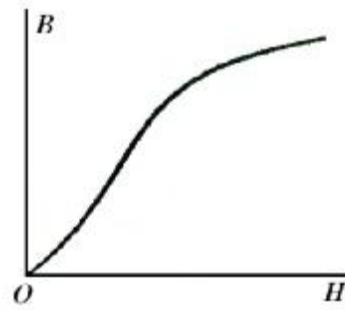
Sırttan tu'sirilgen magnit maydanı bolmasa da magnitlengen zatlar bar. Bunday magnitlengenlikti a'dette spontan magnitleniw dep ataydı. Bul zatlardın' en' ko'p tarqalg'anı ha'm turmista en' ko'p paydalanılatug'ını temir bolıp tabıladı (latınsha atı ferrum). Usıg'an baylanıslı bunday materiallar (zatlar) **ferromagnetikler** dep ataladı. Olardın' qatarına temir, nikel, kobalt, siyrek jer elementleri (gadoliniy, samariy ha'm basqalar), olardın' quymaları ha'm ximiyalıq birikpeleri kiredi. Joqarıda atları atalg'an zatlar tek kristallıq halda g'ana ferromagnitlik qa'siyetlerge iye boladı.

Ferromagnetiklerdin' magnitleniwi birinshi ret A.G.Stoletov (1839-1896) ta'repinen 1878-jılı izertlendi. Ol ferromagnetiktin' magnit sin'irgishligi iymekligin ta'jiriybede ala aldı (bunday iymeklikti Stoletov iymekligi dep ataydı). Ferromagnitlik gisterezis 1880-jılı Varburg (1846-1931) ta'repinen alındı.



54-su'wret.

Ferromagnetiktegi H penen magnitleniw vektorı I arasındag'ı baylanıs.



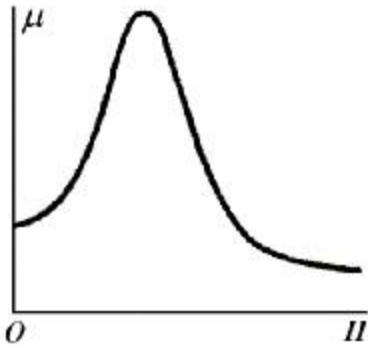
55-su'wret.

Ferromagnetiktegi B ha'm H vektoraları arasındag'ı baylanıs.

Ferromagnetikler ku'shli magnitlenetug'ın zatlar bolıp tabıladı. Olardıń magnitlengenligi diaha'm paramagnetiklerdin' magnitlengenligine salıstırǵanda og'ada u'lken. A'dette paramagenikler menen diamagnetiklerdi a'zzi magnitlik zatlar qatarına jatqaradı¹⁰. Biz keyinirek *antiferromagnetiklerdin'* de, *ferrimagnetiklerdin'* de ku'shli magnitlenetug'ın zatlar qatarına kiretuginlig'ın ko'remiz.

Ferromagnetikler ushın o'zine ta'n o'zgeshelik I ha'm H shamaları yamasa B ha'm H shamaları arasında quramalı sıızqlı emes baylanıstın' bar ekenliginde. Bunday baylanıs (bunday g'a'rezlik) 54-su'wrette keltirilgen. Dene da'slep magnitlenbegen dep esaplanadı. H tın' o'siwi menen I magnitlengenlik da'slep tez o'sedi, al keyninen $I = I_s$ shamasına ten' halda derlik turaqlı bolıp qaladı. Bunday qubılıstı *toynıw* dep ataymız ha'm usınıń saldarınan $I = I(H)$ iymekligi gorizont bag'ıtındag'ı tuwrı sıızıqqa aylanadı. $B = H + 4\pi I$ magnit induktsiyası da maydan H tın' o'siwi menen o'sedi, al toynıw halında $B = H + 4\pi I_s = H + const$, yag'nıy $B = B(H)$ iymekligi tuwrı sıızıqqa aylanadı. Bul tuwrı sıızıq H qa ha'm B g'a 45° lıq mu'yesh jasaydı (eger H penen B nı koordinata ko'sherlerine birdey masshtabta qoysaq). I ha'm H , sonday-aq B ha'm H shamaları arasında sıızqlı baylanıstın' joqlıg'ının' sebebinen ferromagnetikler ushın belgili bir ma'nislerge iye shamalar retinde magnit qabıllag'ıshlıq κ ha'm magnit sin'irgishlik χ shamaların kirgiziw mu'mkin emes. Bul jag'dayda da $I = \kappa H$ ha'm $B = \mu H$ dep jazıw mu'mkin. Biraq magnit qabıllag'ıshlıq κ menen magnit sin'irgishlik χ nı maydannın' kernewligi H tın' funktsiyası dep qaraw kerek. Bul funktsiyalar da'slep H penen birge o'sedi, bunnan keyin maksimum arqalı o'tedi, aqırında toynıw halı ornag'nada μ birge, al κ nolge umtıladı (56-su'wret). Ferromagnetiklerdin' ko'pshiliginde μ dın' maksimumdag'ı shaması a'dettegi temperaturalarda ju'zlegen ha'm mın'lag'an birlikke jetedi. Al bazı bir arnawlı tu'rde tayarlang'an quymalarda μ maksimumda milliong'a jetedi.

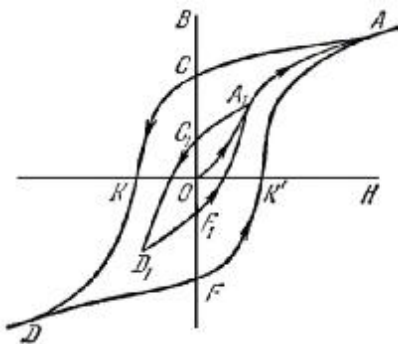
¹⁰ Biraq magnitlengenliktin' a'zziligin yamasa ku'shliligin paramagnetikler menen ferromagnetikler arasındag'ı o'zgeshelik dep qarawg'a bolmaydı. Sebebi a'zzi ferromagnetik zattın' ha'm ku'shli paramagnetik zattın' orın alıwı mu'mkin. Bunday jag'dayda paramagnetik penen ferromagnetikti magnitlengenliginin' ma'nisi boyınsha emes, al qalay magnitlenetuginlig'ı boyınsha ayıradı (ma'seleni tolıq tu'siniw ushın bul paragraftı tolıq oqip shıg'ıw kerek).



56-su'wret.

A'dettegi ferromagnetik ushın $\mu = \mu(H)$ funktsiyasının' grafigi (Stoletov iymekligi).

Ferromagnetiklerdin' ekinshi o'zgesheligi sonnan ibarat, olar ushın I ha'm H , sonday-aq B ha'm H shamaları arasındag'ı g'a'rezlik bir ma'nisli emes. Bul g'a'rezlik ferromagnetik zattın' burın magnitlengenligi yamasa magnitlenbegenligine baylanışlı. Bul qubılıs magnit gisterezisi dep ataladı (57-su'wret). Magnitlenbegen ferromagnetik materialdı alamız ha'm onı sırtqı magnit maydanının' ta'sirinde nolden baslap H_1 ma'nisine shekem magnitley baslaymız. $B = B(H)$ g'arezligi OA_1 iymekligi tu'rinde sa'wlelenedi. Bunnan keyin H tı $+H_1$ den $-H_1$ shamasına shekem kemeytemiz. Ta'jiriybeler magnitleniw iymekliginin' A_1O iymekligi menen ju'rmeı, joqarıraqtan $A_1C_1D_1$ jolı menen ju'retug'ınlıg'ın ko'rsetedi. Eger magnit maydanın $-H_1$ den $+H_1$ ge shekem ko'retsek, onda magnitleniw iymekligi to'mennen o'tedi ha'm da'slepki A_1 noqatına qayıtıp keledi. Na'tiyjede $A_1C_1D_1F_1A_1$ tuyıq sızıg'ı alınadı. Bul tuyıq sızıqtı gisterezis petlyası¹¹ («gisterezis qurıg'ı» yamasa «gisterezis gu'rmeı») dep aytamız. Eger en' da'slepki A_1 noqatın A noqatın shekem alıp kelsek, onda $ACDFA$ en' u'lken yamasa **sheklik** dep atalatug'ın gisterezis petlyası alınadı. Bul petlyadan $H = 0$ bolg'an jag'dayda induksiya B nın' nolge aylanbaytug'ınlıg'ı, al OC kesindisi menen su'wretlenetug'ınlıg'ı ko'rinip tur. Bul awhalg'a $I = \frac{B}{4\pi} = OC/(4\pi)$. Usınday kaldıq magnitleniw qubılısı turaqlı magnitlerdi sog'ıwdın' tiykarında jatadı. Materialdı tolıq magnitsizlew ushın magnitleniw iymekligin K yamasa K' noqatına shekem alıp keliw kerek. Bul noqatlarg'a $H_K = |OK|$ magnit maydanı sa'ykes keledi. Bul magnit maydanı **uslap turıwshı** yamasa **koertsitiv ku'sh** dep ataladı. Qaldıq magnitlengenlik penen koertsitiv ku'shlerdin' ma'nisleri ha'r qıylı ferromagnetikte ha'r qıylı. Jumsaq temir ushın gisterezis petlyası tar, al polat ha'm turaqlı magnitlerdi tayarlaw ushın qollanılatusın barlıq materiallarda ken' (koertsitiv ku'sh u'lken ma'niske iye) bolıp keledi.



57-su'wret.

Ferromagnetiklerde orın alatug'ın gisterezis petlyası.

Vertikal bag'ıtlang'an koordinata ko'sherine B nı emes, al magnitleniw I di qoysa da 57-su'wrette keltirilgen iymekliklerdey g'a'rezlilik alınadı.

¹¹ Rus tilindegi «petlya» so'zin karaqalpaq tiline «gu'rmeı» yamasa «qurıq» dep awdarıw mu'mkin. Sonlıqtan «gisterezis qurıg'ı» yamasa «gisterezis gu'rmeı» degen so'zdi qollanbay, onın' ornına «gisterezis petlyası» so'zi qollanılg'an.

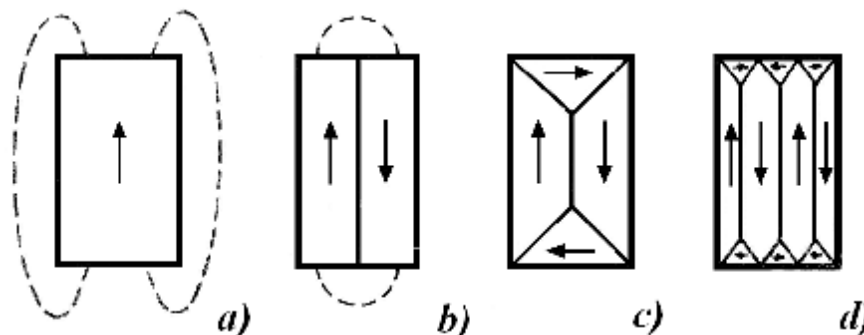
Ferromagnitlik materiallardın' klassifikatsiyası. Ferromagnit materiallardı eki toparg'a bo'liwge boladı.

- 1) magnitlik qa'siyetleri boyınsha jumsaq materiallar, u'lken magnit sin'irgishlikke iye, jen'il tu'rde (an'sat) magnitlenedi ha'm jen'il tu'rde (an'sat) magnitsizlenedi, kishi koertsitiv ku'shke iye.
- 2) Magnitlik qa'siyetleri boyınsha qattı materiallar, salıstırmalı kishi magnitlik sin'irgishlikke iye, qıyınshılıq penen magnitlenedi, magnitlengen material qıyınshılıq penen magnitsizlenedi, u'lken koertsitiv ku'shke iye.

Birinshi toparg'a kırıwshi ferromagnetikler tiykarınan o'zgermeli maydanlar paydalanılatug'ın elektrotexnikada, misalı transformatorlardı sog'ıw ushın paydalanıladı. Al ekinshi toparg'a kırıwshi ferromagnetikler turaqlı magnitlerdi sog'ıwda qollanıladı.

Kıori-Veyss nızamı. Ha'r bir ferromagnetik qızdırg'anda ekinshi a'wlad fazalıq o'tiwiniń saldarınan paramagnetik halg'a o'tedi. Fazalıq o'tiw bolatug'ın temperaturanı Kıori temperaturası (Kıori noqatı dep te) dep ataydı. Paramagnitlik oblastta magnitlik qabıllag'ıshlıq (151)-nızam boyınsha o'zgeredi. Ferromagnetizmdi izertlewshiler bul nızamdı Kıori-Veyss nızamı dep ataydı.

Domenler. Ferromagnitlik gisterezis ferromagnetiklerdin' magnitlik domenlerden turatug'ınıń sebebinen orın aladı (58-su'wret).



58-su'wret. Monokristallardag'ı ferromagnitlik domenlerdin' ideallastırılğ'an qurılısı.

Magnitlik domennin' ishinde atomlardın' magnit momentleri bir ta'repke qaray bag'ıtlang'an boladı. Eger ferromagnetik tek bir domennen turatug'ın bolsa, onda hesh qanday gisterezis alınbag'an bolar edi. Eger ferromagnetik ko'p sanlı domenlerden turatug'ın bolsa sırttan tu'sirilgen magnit maydanı domenlerdin' magnit momentlerinin' bag'ıtın o'z bag'ıtına qaray burıp sıziqlı emes magnitleniw protsessi ju'zege keledi.

Magnitlik domenlerdin' payda bolıwı magnit maydanının' energiyasın to'menletiw menen baylanıslı. 58-su'wrette sol jag'day sa'wlelendirilgen:

- a) domenlerdin' sanı birew, ferromagnetik ta'repinen sırtta payda etilgen magnit maydanının' induktsiyası u'lken;
- b) sırtqı maydan tiykarınan joqarıdag'ı ha'm to'mendegi betler a'tirapında jıynalg'an ha'm a) jag'dayındag'ıg'a qarag'anda a'dewir az energiyag'a iye;
- c) erkin polıosler joq ha'm maydan domenlerdin' sırtına shıqpaydı;
- d) bul situatsiya c) punktinde ko'rsetilgen situatsiyaday, biraq ferromagnetik mayda domenlerge bo'lingen.

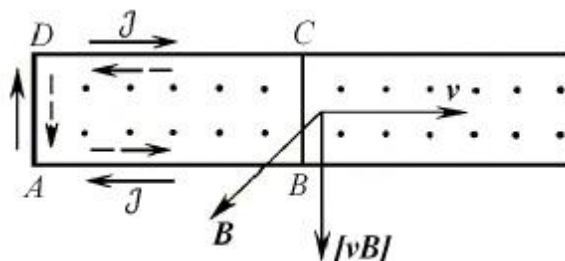
Ferromagnetik payda etken magnet maydanının' (ferromagnetiktin' menshikli magnet maydanının') energiyasın minimumg'a alıp keliw ushın domenlerdin' o'lshepleri maksimum tu'rde kishireytilgen bolıwı kerek.

16-§. Elektromagnetlik induksiya qubılısı

Elektromagnetlik induksiya. Faradey ta'jiriybeleri. Lents qa'desi. Elektromagnet induktsiyanın' tiykarg'ı nızamı. O'zlik induksiya qubılısı

Faradey (1791-1867) ta'repinen 1831-jılı elektromagnet induktsiyası qubılısının' ashılıwı elektrodinamikadag'ı en' a'hmiyetli fundamentallıq ashılıwlardın' biri boldı.

Elektromagnet induktsiyası qubılısın bilayınsha demonstratsiya qılıw mu'mkin: Tınıshlıqta turg'an magnitti ha'm ushları galvanometrge jalg'ang'an sım oralg'an tu'teni (katushkanı) alamız. Eger tu'teni magnittin' polıoslarının' birine jaqınlatsaq, onda jaqınlasıw barısında galvanometrдин' strelkası burıladı – tu'tede elektr tog'ı qozadı. Tu'teni qarama-qarsı ta'repke qaray qozg'asaq galvanometrдин' ko'rsetiwi de qarma-qarsı bag'ıtqa burıladı, yag'nıy bul jag'dayda da'slepkige qarama-qarsı bag'ıtlang'an toq payda boladı. Tap usınday qubılıstı magnitti 180° qa burıw ha'm tu'teni da'slepkidey etip qozg'aw arqalı da baqlaw mu'mkin. Magnittin' ornına toq o'tip turg'an tu'teni yamasa elektromagnitti alıw mu'mkin. Solay etip tu'teni turaqlı magnet maydanında qozg'ag'anda tu'te arqalı toqtın' o'tetug'ınlıg'ın ko'remiz. Bul toq tu'te toqtıg'anda jog'aladı. Bul toqtı **induksiya tog'ı** dep ataydı, al baqlang'an qubılıstı **elektromagnet induksiya** (elektromagnetlik induksiya) qubılısı dep ataymız.



59-su'wret.

Elektromagnetlik induksiya qubılısın tu'sindiriw ushın arnalg'an su'wret.

Magnet maydanında o'tkizgish qozg'alg'anda elektr tog'mın' qozıwın zaryadlang'an bo'leksheler qozg'alganda payda bolatug'ın Lorentts ku'shinin' ta'siri menen tu'sindiriledi. Da'slep 59-su'wrette keltirilgen a'piwayı jag'daydı qarap o'temiz. O'z-ara parallel AB ha'm CD o'tkizgishleri turaqlı magnet maydanında jaylasqan bolsın. Magnet maydanı su'wret tegisligine perpendikulyar ha'm bizge qarap bag'ıtlang'an bolsın. Shep ta'repte AB ha'm CD o'tkizgishleri tuyıqlang'an, al on' ta'repte tuyıqlanbag'an bolsın. O'tkizgishler u'stinde BC o'tkizgish ko'piri erkin jılıp qozg'alatug'ın bolsın. Ko'pir shep ta'repke qaray v tezligi menen qozg'alsa, onda usı ko'pir menen birlikte erkin elektronlar da, ionlar da qozg'aladı. Ha'r bir qozg'alıwshı zaryadqa magnet maydanında $\mathbf{F} = \frac{e}{c} [\mathbf{vB}]$ ku'shi (Lorentts ku'shi) ta'sir etedi. On' zaryadqa iye iong'a bul ku'sh to'men qaray, al teris zaryadlı elektrong'a joqarıg'a qaray ta'sir etedi. Na'tiyjede ko'pir arqalı elektronlar joqarıg'a qaray qozg'aladı, yag'nıy ko'pir arqalı to'menge bag'ıtlang'an toq o'tedi. **Bul toq induktsiyalang'an toq bolıp tabıladı.** Qaytadan tarqalg'an elektr zaryadları konturdın' qalg'an ABCD ushastkalarında toqtı payda etiwshi elektr maydanın qozdıradı. 59-su'wrette bul toqlar tutas strelkalar menen ko'rsetilgen.

Biz o'tkergen ta'jiriybede Lorentts ku'shi elektr tog'in qozdırıwshı ta'replik ku'shtin' ornın iyeleydi. Sa'ykes ta'replik maydannın' kernewligi $E^{tarep} = \frac{F}{e} = \frac{1}{c}[\mathbf{vB}]$. Bul maydan ta'repinen payda etilgen elektr qozg'awshı ku'shti **induktiyanın' elektr qozg'awshı ku'shi** dep ataydı ha'm ol $\mathcal{E}^{ind} = -\frac{v}{c}Bl$ shamasına ten' (l arqalı ko'pirdin' uzınlıg'ı belgilengen). Bul an'latpadag'ı minus belgisi $\frac{1}{c}[\mathbf{vB}]$ ta'replik maydanı on' burg'ı qag'ıydasına sa'ykes \mathbf{B} vektorı menen anıqlanatug'ın konturdı aylanıp shıg'ıw bag'ıtına qarama-qarsı ekenligin belgilew ushın qoyılǵ'an. 59-su'wrette bul bag'ıt punktir strelka ja'rdeminde ko'rsetilgen.

lv shaması $ABCD$ konturının' maydannın' bir birlik waqıt ishindegi o'simi bolıp tabıladı (yag'nıy bul maydannın' o'siw tezligi). Sonlıqtan lv shaması $\frac{d\Phi}{dx}$ shamasına, yag'nıy $ABCD$ konturın tesip o'tiwshı magnit ag'ısın' o'siminin' tezligine ten'. Solay etip

$$\mathcal{E}^{ind} = -\frac{1}{c} \frac{d\Phi}{dt}. \quad (156)$$

(156)-na'tiyje bir tekli magnit maydanı $ABCD$ konturı menen qa'legen mu'yesh jasap bag'ıtlang'an jag'day ushın da durıs.

(156)-formula elektromagnitlik induksiyanın' tiykarg'ı nızamın an'g'artadı. ***Bul formula magnit maydanında tuyıq o'tkizgish kontur qozg'alg'anda bul kontur arqalı o'tetug'ın magnit ag'ısın' o'siminin' tezligine proporsional bolǵ'an elektr qozg'awshı ku'shtin' payda bolatug'ınlıg'ın ko'rsetedi.***

(156)-formulag'a energıyanın' saqlanıw nızamı ja'rdeminde de keliwge boladı. Bunday jumıstı birinshi ret Gelmgolts (1821-1894) isledi. Elektr qozg'awshı ku'shi \mathcal{E} ge ten' bolǵ'an galvanikalıq element tutastrılǵ'an tuyıq konturdı (o'tkizgish oralǵ'an tu'teni) qarayıq. Tu'te turaqlı magnit maydanında qozg'alsın (maydannın' bir tekli bolıwı sha'rt emes). dt waqıtı ishinde Amper ku'shleri tu'te u'stinen $\frac{J}{c}d\Phi$ jumısın isleydi. Usın' saldarınan tu'teden RJ^2dt mug'darındag'ı jıllıq bo'linip shıg'adı. Bul shamalardıń qosındısı galvanikalıq elementtin' jumısı bolǵ'an $\mathcal{E}Jdt$ shamasına ten' boladı, yag'nıy

$$\frac{J}{c}d\Phi + RJ^2dt = \mathcal{E}Jdt. \quad (157)$$

Bunnan

$$J = \frac{\mathcal{E} - \frac{1}{c} \frac{d\Phi}{dt}}{R}. \quad (158)$$

Solay etip qozg'alıwshı tu'tedegi toqtın' shaması tek galvanikalıq elementtin' elektr qozgawshı ku'shine baylanıslı bolmay, bul elektr qozg'awshı ku'shke $-\frac{1}{c} \frac{d\Phi}{dt}$ qosındısı da qosıladı eken. Bul qosılwshı induksiyanın' elektr qozg'awshı ku'shi bolıp tabıladı.

Induksiyalıq toqlar tınısh turg'an o'tkizgishlerde de payda boladı. Biraq bunday jag'dayda magnittin' o'zin qozg'altıwǵ'a tuwrı keledi. Solay etip

qozg'alıwshı yamasa qozg'almaytug'ın tuyıq kontur arqalı o'tetug'ın magnit ag'ısı o'zgerse o'tkizgishte induksiyalıq toq payda boladı, al induksiyanın' elektr qozg'awshı ku'shi barlıq jag'dayda da (156)-formula menen anıqlanadı.

(156)-formula induktsiyalıq toqtın' tek shamasın emes, al bag'ıtın da anıqlaydı. Meyli magnit ag'ısı Φ o'setug'ın bolsın. Onda (156)-formulag'a sa'ykes \mathcal{E}^{ind} teris ma'niske (teris belgige iye ma'niske) iye boladı. Sonlıqtan usınday elektr qozg'awshı ku'shtin' ta'sirinde qozatug'ın (payda bolatug'ın) induktsiya tog'ı magnit ag'ısının' o'siwine tosqnıq qıladı. Endi magnit ag'ısı Φ kemeyetug'ın bolsın. Bunday jag'dayda \mathcal{E}^{ind} tin' ma'nisi teris belgige iye, payda bolg'an induktsiya tog'ı magnit maydanı menen magnit ag'ısının' ha'lsirewine tosqnıq jasaydı. Solay etip *barlıq waqıtta da induktsiya tog'ının' bag'ıtı usı toqtı qozdırıwshı sebepti ha'lsiretiwge qaray bag'ıtlang'an boladı.* Bul kag'ıyda (qa'de) en' da'slep Lents (1804-1865) ta'repinen ashıldı ha'm Lents qa'desi dep ataladı. Al Le Shatal (1850-1936) ha'm Braun (1850-1918) Lents kag'ıydasın ulıwmalastırdı ha'm onı barlıq fiizikalıq qubılıslar ushın tarqattı.

Elektromagnitlik induktsiya qubılısın Maksvell boyınsha tu'sindiriw. Maksvell boyınsha *qa'legen o'zgeriwshi magnit maydanı a'tırıpındag'ı ken'islikte elektr maydanın payda etedi.* Bul o'tkizgishtegi induktsiyalıq toqtın' payda bolıw sebebin tu'sindiredi. Elektromagnitlik induktsiyanın' to'mendegidey teren' formulirovkası Maksvelge tiyisli:

Magnit maydanının' waqıt boyınsha qa'legen o'zgerisi a'tırıpındag'ı ken'islikte elektr maydanın payda etedi. Bul elektr maydanının' kernewligi \mathbf{E} nin' qa'legen qozg'almaytug'ın tuyıq s konturı boyınsha tsirkulyatsiyası

$$\oint_s (\mathbf{E} d\mathbf{s}) = -\frac{1}{c} \frac{d\Phi}{dt}. \quad (159)$$

an'latpası menen beriledi. Bul an'latpada Φ arkalı tuyıq s konturı arqalı o'tetug'ın magnit maydanı belgilengen.

Elektromagnitlik induktsiyanı Faradey boyınsha ha'm Maksvell boyınsha tu'siniwler arasında u'lken ayırmalar bar. Faradey boyınsha elektromagnitlik induktsiyada elektr tog'ı qozdırılardı. Bunday toqtı baqlaw ushın tuyıq o'tkizgish kerek. Al Maksvell boyınsha elektromagnitlik induktsiyada elektr maydanı payda boladı. Sonlıqtan ken'islikte hesh qanday o'tkizgish bolmasa da elektromagnitlik induktsiya qubılısı orın aladı. Sonın' menen birge tuyıq o'tkizgishtegi induktsiyalıq toqtın' baqlanıwı magnit maydanı o'zgergendegi elektr maydanının' payda bolıwının' da'lillerinin' biri g'ana bolıp tabılardı. Bul ayılğ'an so'zler elektromagnitlik induktsiya qubılısın Maksveldin' Faradeyge salıstırğ'anda a'dewir teren' tu'singenliginen derek beredi.

Elektromagnitlik induktsiyada payda bolg'an elektr maydanının' elektr zaryadları payda etken elektr maydanlarınan u'lken parqının' bar ekenligin atap o'temiz. Elektromagnitlik induktsiyada tuyıq elektr maydanı payda boladı. Bunday maydannın' ku'sh sızıqları hesh jerde baslanbaydı ha'm hesh jerde tamam bolmaydı (maydan ku'sh sızıqları tuyıq degen so'z). Al elektr zaryadları payda etken elektr maydanının' on' zaryadta baslanatug'inlig'in ha'm teris zaryadta tamam bolatug'inlig'in eske tu'siremez.

Elektromagnitlik induktsiyanı differentsial formada bılay jazadı:

$$\text{rot } \mathbf{E} = -\frac{1}{c} \frac{d\mathbf{B}}{dt}. \quad (160)$$

Bul ten'leme elektromagnit maydanı teoriyasının' tiykarg'ı an'latpalarınan' biri bolıp, Maksvell ten'lemeleri sistemasına kiredi.

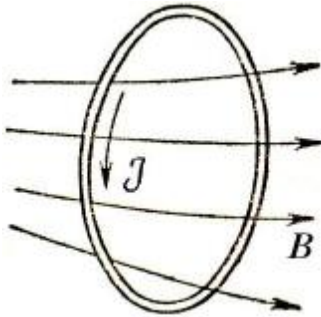
17-§. Induktivlik

Solenoidtın' induktivligi. O'zlik induksiya na'tiyjesinde shınjırdag'ı toqtın' jog'alıwı ha'm tikleniwi. Magnit maydanının' energiyası. O'z-ara induksiya

Meyli J tog'ı o'tip turg'an jin'ishke tuyıq o'tkizgish berilgen bolsın (60-su'wret). Usı toqtın' magnit maydanı B bolsın. O'tkizgishtin' ishinde onın' ko'sherine parallel etip ıqtıyarlı tu'rde s matematikalıq konturın ju'rgizemiz ha'm onın' on' bag'ıtın belgileymiz. Meyli B vektorı ta'repinen s konturı arqalı jiberiletug'ın magnit ag'ısı Φ bolsın. Eger biz qarap atırg'an ken'islikte ferromagnetikler bolmasa, onda B ha'm Φ shamaları toqtın' mug'darına proporsional boladı. Sonlıqtan ten'lik belgisine o'tkende L proporsionallıq koeffitsientin qabıl etip mınaday an'latpalardı jaza alamız:

$$\Phi = LJ^{(m)} = \frac{1}{c} LJ. \quad (161)$$

Bul an'latpalarda J arqalı Gauss birlikler sistemasındag'ı toq ku'shi, al $J^{(m)}$ arqalı SGSM sistemasındag'ı sol toq ku'shi belgilengen. L koeffitsienti toqtın' ku'shinen g'a'rezli emes. Bul koeffitsientin' ma'nisi o'tkizgishtin' konfiguratsiyasına ha'm o'lshemlerine baylanıslı bolıp bul ***o'tkizgishtin' induktivligi*** dep ataladı. Bul koeffitsienti o'tkizgishtin' ***o'zlik induksiya koeffitsienti*** yamasa a'piwayı tu'rde ***o'zlik induksiya*** dep te ataydı.



60-su'wret.

J tog'ı o'tip turg'an jin'ishke tuyıq o'tkizgish.

Mısal retinde solenoidtın' induktivligin esaplaymız (solenoidtın' shetlerindeki effektlerdi esapqa almaymız). Meyli l arqalı solenoidtın' uzınıg'ı, N arqalı oramlar sanı, al S arqalı bir oramnın' maydanı belgilengen bolsın. Solenoidtın' magnit maydanının' induktsiyası mınag'an ten':

$$B = \frac{4\pi}{c} \frac{JN\mu}{l}. \quad (162)$$

Bir oram arqalı o'tetug'ın magnit ag'ısı BS ke ten', al N oram arqalı o'tiwshi magnit ag'ısı BSN shamasına ten', yag'nıy

$$\Phi = \frac{4\pi}{c} \frac{SN^2\mu}{l} J. \quad (163)$$

Bul formulanı (161)-formula menen salıstırıp mınag'an iye bolamız:

$$L = \frac{4\pi SN^2\mu}{l}. \quad (164)$$

Birliklerdin' Gauss ha'm SGSM sistemalarında magnit ag'ısının' birliги retinde maksvell (Mks) qabıl etilgen. ***Maksvell dep bir Gauss magnit ag'ısı ta'repinen usı ag'ısqa perpendikulyar***

qoyilg'an bettin' bir kvadrat santimetri arqali o'tetug'in magnit ag'isina aytamiz. Bio ha'm Savara nizaminan

$$d\mathbf{B} = \frac{J}{cr^3} [d\mathbf{l} \mathbf{r}]$$

ekenligin esapqa alsaq (musalı J tog'ı o'tip turg'an uzun o'tkizgish ushın $B = \frac{2J}{cR}$ ekenligin eske tu'siremiz, bul an'latpadag'ı R uzunlıq), onda magnit ag'ısı Jl/c qatnasının' o'lshe birliğindey o'lshe birliğke iye boladı. Haqıyqatında da ag'ıs = magnit maydanının' kernewligi \times maydan ($\Phi = B \times S = \frac{2J}{cR} \times R^2 =$ zaryad mug'darı). Al (161)-an'latpadan zaryad mug'darı $= L \times$ zaryad mug'darı/uzunlıq). Onday bolatug'in bolsa (161)-formuladan Gauss sistemasında ha'm SGSM de o'zlik induksiya koeffitsientinin' o'lshe birliğinin' uzunlıqtın' o'lshe birliğindey bolatug'inlg'ına iye bolamız. Bunday sistemadag'ı uzunlıq birliği *santimetr* boladı. *Solay etip santimetr dep bir SGSM-birliğke ten' toq bir maksvell ag'ıs payda etetug'in oramnın' induktivligi eken.*

A'meliy (praktikalıq) birliklerde (volt, amper, om ha'm basqalar) elektromagnit induksiya nızamin ha'm (161)-formulanı bilayınsha jazadı:

$$\mathcal{E}'_{\text{ind}} = -\frac{d\Phi'}{dt}, \quad (165)$$

$$\Phi' = L' J'. \quad (166)$$

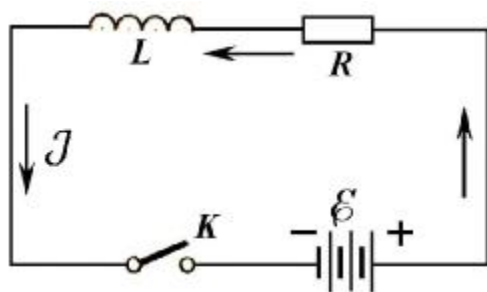
Shtrixlang'an shamalardıń barlıg'ı da a'meliy birliklerde jazılğ'an (sonlıqtan shtrixlar qoyılğ'an).

Magnit ag'ısı ushın **veber** (Vb) dep atalatug'in birlik te qollanıladı. $1 \text{ Vb} = 10^8 \text{ Mks}$.

A'melde induktivlik **genri** (G) o'lshe birliğinde beriledi. Bir amper toq o'tip turg'an o'tkizgish bir veber magnit ag'ısın payda etetug'in o'tkizgishin' induktivligi 1 genrige ten'. Olay bolsa

$$1 \text{ G} = \frac{1 \text{ Vb}}{1 \text{ A}} = \frac{10^8 \text{ Mks}}{\frac{1}{10} \text{ SGSM toq birliğı}} = 10^9 \text{ sm}.$$

Endi shınjırdın' induktivligine baylanışlı turaqlı toqtı tuyıqlag'anda ha'm ajratqanda baqlanatug'in qubılıslardı qarap shıg'amız¹².



61-su'wret.

L induktivligine iye elektr shınjırı.

¹² «Turaqlı toqtı tuyıqlaw» so'zi «shınjırdı tuyıqlaw» so'zine sa'ykes keledi. Shınjırdı tuyıqlasa shınjır arqalı toq o'te baslaydı. «Turaqlı toqtı ajratıw» so'zi «tuyıq shınjırdın' bir ushastkasın u'ziw» degen ma'nisti an'latadı. Bunday u'ziwde shınjır tuyıq emes bolıp qaladı ha'm o'tip turg'an toq toqtaydı.

Meyli shınjır E elektr qozg'awshı ku'shine, o'zlik induktsiya tu'tesine ha'm omliq qarsılıqqa iye bolsın (61-su'wret). Shınjırdın' tolıq induktivligin L , al tolıq qarsılıg'ın R arqalı belgileyemiz. K giltin tuyıqlag'anımızda toq da'rha'l Om nızamı menen anıqlanatug'ın E/R ma'nisine jetpeydi, al nolden baslap ko'terile baslaydı. Usının' menen birge tu'tedeni magnit ag'ısı da ku'sheydi. Usının' saldarınan induktsiyanın' elektr qozg'awshı ku'shi ha'm og'an sa'ykes keliwshi induktsiya tog'ı payda boladı. Bul toq **tuyıqlaw ekstratog'ı** dep ataladı. Lents qa'desi boyınsha tuyıqlaw ekstratog'ının' bag'ıtı tiykarg'ı toqtın' bag'ıtına qarama-qarsı.

Payda bolg'an o'zgermeli toqtın' ku'shinin' shınjırdın' barlıq ushastkalarında birdey bolıwı sha'rt emes. Sebebi ayırım orınlarda elektr zaryadlarınan' jıynalıwı mu'mkin. Biraq bir waqıttın' o'tiwı menen a'ste-aqırınlıq penen o'zgeretug'ın o'zgermeli toqlardı qaraymız. Bunday jag'dayda shınjırdın' barlıq ushastkalarındag'ı toqtın' bir zamatlıq ma'nisleri joqarı da'llikte birdey boladı, al o'tkizgishlerdin' ishindegi magnit maydanları turaqlı toqlar jag'dayındag'ı Bio ha'm Savara nızamı tiykarında esaplanadı. Bunday toqlardı a'dette **kvazistatsionar toqlar** dep ataydı. Bunday toqlar ushın joqarıdag'ı (165)- ha'm (166)-an'latpalar orınlı. Al toq ku'shi

$$J = \frac{\varepsilon_{\text{ind}} + \varepsilon}{R}.$$

A'meliy birliklerde

$$J' = \frac{\varepsilon' - \frac{d\Phi'}{dt}}{R} \quad (167)$$

Bul kvazistatsionar toqlar ushın jazılğ'an differentsial ten'leme bolıp tabıladı. Onı bılayınsha ko'shirip jazıw mu'mkin:

$$\frac{d}{dt}(L'J') + R'J' = \varepsilon'. \quad (168)$$

Eger toqtın' o'tiw barısında o'tkizgish simlar deformatsiyalanbaytug'ın bolsa (yag'nıy formalar o'zgerissiz qalsa), onda induktivlik L' turaqlı shama bolıp qaladı ha'm onı tuwındı belgisinin' aldına shıg'arıw mu'mkin:

$$L' \frac{dJ'}{dt} + R'J' = \varepsilon'. \quad (169)$$

ε' shaması turaqlı bolsa, onda (169)-ten'lemenin' ulıwmalıq sheshimi mına tu'rge iye boladı:

$$J' = C e^{-\frac{R'}{L'}t} + \frac{\varepsilon'}{R'}. \quad (170)$$

İntegrallaw turaqlısı C baslang'ısh sha'rtlerden anıqlanadı: tuyıqlaw momentinde (yag'nıy $t = 0$ waqıt momentinde) toq nolge ten'. Bul sha'rtti paydalanıp

$$J = \frac{\varepsilon}{R} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right). \quad (180)$$

Bul an'latpadag'ı $\tau = \frac{L'}{R'}$ shaması waqıttın' o'lshe birliğine iye turaqlı shama bolıp tabıladı. Bul shama **toqtın' qa'liplesiw waqtı** dep ataladı¹³. (180)-formulada shtrixlar jazılmag'an, sebebi bul formula birliklerdin' qa'legen sisteması ushın durıs bolıp tabıladı, al toqtın' qa'liplesiw waqtı ushın an'latpanın' tu'ri o'zgeredi. Birliklerdin' Gauss sistemasında

$$\tau = \frac{L}{c^2 R}. \quad (181)$$

\mathcal{J} tolıq tog'ı eki qosılıwshıdan turadı. Olardın' birinshisi a'dettegi toq $\frac{\varepsilon}{R}$, ekinshisi waqtıqa baylanıslı o'zgeretug'in $\frac{\varepsilon}{R} e^{-\frac{t}{\tau}}$ shamasına ten' ekstratoq bolıp tabıladı. Solay etip toqtın' shaması bazı bir waqt o'tkennen keyin qa'liplesedi eken. Qa'liplesiw tezligi τ waqtı menen anıqlanadı: τ waqtı ishinde ekstratoqtın' ku'shi e ese kemeyedi.

Endi \mathcal{J}_1 ha'm \mathcal{J}_2 turaqlı toqları o'tip turg'an eki oram (eki tu'te) alamız. Iqtıyarlı tu'rde bul oramlardag'ı toqlardın' aylanısın' on' bag'ıtın saylap alamız. Eger qorshap turg'an ken'islikte ferromagnetikler¹⁴ bolmasa, onda oramlar arqalı o'tiwshi magnit ag'ısları Φ_1 ha'm Φ_2 toqlarg'a proporsional boladı ha'm to'mendegi an'latpalar ja'rdeminde beriledi:

$$\begin{aligned} \Phi_1 &= \frac{1}{c} L_{11} \mathcal{J}_1 + \frac{1}{c} L_{12} \mathcal{J}_2, \\ \Phi_2 &= \frac{1}{c} L_{21} \mathcal{J}_1 + \frac{1}{c} L_{22} \mathcal{J}_2. \end{aligned} \quad (182)$$

L_{11} , L_{12} , L_{21} , L_{22} koeffitsentleri toqlardan g'a'rezli emes, al oramlardın' formalarınan, o'lshemlerinen, o'z-ara jaylasıwlarınan g'a'rezli. Bul koeffitsentler **induktivlik koeffitsientleri** dep ataladı. Eger $\mathcal{J}_2 = 0$ bolsa, onda $\Phi_1 = \frac{1}{c} L_{11} \mathcal{J}_1$. Eger $\mathcal{J}_1 = 0$ bolsa, onda $\Phi_2 = \frac{1}{c} L_{21} \mathcal{J}_1$. Sonlıqtan L_{11} birinshi oramnın' inluktivligi, al L_{21} bolsa ekinshi oramnın' induktivligi bolıp tabıladı. Sonlıqtan qalg'an L_{12} ha'm L_{22} koeffitsentleri **o'z-ara induktivlikler** yamasa **o'z-ara induktivlik koeffitsientleri** dep ataladı. Bul koeffitsentler de o'zlik induksiya koeffitsinetlerindey o'lshe birliklerge iye boladı.

Toqlardın' magnit energiyası. Biz salıstırıw maqsetinde da'slep pu'tkilley basqa ma'seleni qaraymız ha'm Jerdin' payda etken gravitatsiya maydanının' energiyasın esaplaymız. Jerdin' massası $m = 5,977 \cdot 10^{27}$ gramm, ekvatordag'ı radiusı $r = 6,37 \cdot 10^8$ sm. Olay bolsa mexanika kursı boyınsha lektsiyalar tekstlerindeki (24.27)-formulanı paydalansaq ($U_{gr} = -\frac{3}{5} \frac{GM^2}{R}$), onda $U = 2,24 \cdot 10^{39}$ erg shamasın alamız.

Endi radiusı Jerdin' radiusınday bolg'an sferanı elektr zaryadları menen zaryadlasaq, onda usı zaryadlar payda etken elektr maydanının' energiyasın esaplaymız. Bul energiya $U = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q^2}{R}$ formulası menen esaplanadı (Gauss sistemasında $U = \frac{q^2}{R}$). Bunnan $U = 2,24 \cdot 10^{39}$ erg energiyag'a iye bolıwshı zaryadtın' mug'darı $q = 1,2 \cdot 10^{24}$ SGSE-zaryad birliğine ten'. Bul $2,49 \cdot 10^{33}$ dana protonnın' zaryadı. Bul protonlardın' massası $M_p = 4,16 \cdot 10^9$ gramm = 416 000 tonna.

¹³ Orısshası «vremya ustanovleniya toka».

¹⁴ Ferromagnetiklerdin' magnitlik qa'siyetlerinin' magnit maydanına g'a'rezli ekenligin eske tu'siremiz. Sonlıqtan «ferromagnetikler bolmasa» degen so'z ortalıqtın' magnitlik qa'siyetinin' magnit maydanının' payda bolıwınan g'a'rezsiz o'zgerissiz qaladı degendi bildiredi.

Solay etip massası $m = 5,977 \cdot 10^{27}$ gramm bolg'an Jer payda etken gravitatsiyalıq maydannın' energiyasınday energiyag'a radiusı Jerdin' radiusınday bolg'an sferanın' betine bir tekli etip otirg'ızılq'an massası $4,16 \cdot 10^9$ gramm bolg'an protonlar payda etken elektr maydanı iye eken. Bul mag'lıwmatlar gravitatsiya maydanının' energiyasının' elektr maydanının' energiyasına salıstırg'anda og'ada kishi ekenliginen derek beredi. Endi biz magnit maydanının' energiyası haqqında ga'p etkenimizde bul shamalardı na'zerde tutıwımız kerek boladı.

Elektr tog'ın magnit maydanın payda etedi, al magnit maydanı sa'ykes energiyag'a iye boladı. Sonlıqtan elektr tog'ı **magnit energiyasına** da iye boladı eken degen juwmaq shıg'aramız. Biz magnit energiyasın esaplag'anımızda o'tkizgishlerdin' qarsılıg'ın esapqa almaymız (yag'nıy karsılıq nolge ten' ha'm energiya jıllılıqqa aylanbaydı dep esaplanadı). Bul na'tiyjelerdin' ulıwmalıq xarakterge iye bolıwına ta'sir jasamaydı. Sebebi **magnit energiyası toqtın' shaması menen tarqalıwınan ha'm ken'islikti iyelep turg'an ortalıqtın' magnitlik qa'siyetlerinen g'ana g'a'rezli**. O'tkizgishlerdin' qarsılıg'ın joq dep biz ma'seleni a'piwayılastıramız ha'm esaplawlarda jıllılıq ushın jumsalg'an energiyanı esapqa alıp otırıwdın' za'ru'rliğı bolmaydı.

Da'slep qozgalmaytugın o'tkizgishstin' bir oramın qaraymız. Meyli baslang'ısh momentte oram arqalı o'tip turg'an toqtın' shaması nolge ten' bolsın. Qanday da bir usıl menen oramda toq payda etemiz ha'm onın' shamasın \mathcal{J} ge shekem jetkeremiz. Bunday jag'dayda oram arqalı o'tetug'ın ag'ıs Φ te o'sedi. Induktsiyanın' elektr qozg'awshı ku'shi payda boladı. Elektr qozg'awshı ku'shke qarsı sıtrqı derek islegen elementar jumıs mınag'an ten' boladı:

$$\delta A^{sirtqi} = -\mathcal{E}^{ind} \mathcal{J} dt. \quad (183)$$

Eger (156)-formulanı esapqa alsaq ($\mathcal{E}^{ind} = -\frac{1}{c} \frac{d\Phi}{dt}$), onda

$$\delta A^{sirtqi} = \frac{1}{c} \mathcal{J} d\Phi \quad (184)$$

formulasın alamız. Alıng'an qatnas ulıwmalıq xarakterge iye boladı. Bul qatnas ferromagnitlik materiallar ushın da durıs boladı. Sebebi bul an'latpanı keltirip shıg'arg'anda ortalıqtın' magnitlik qa'siyetleri haqqında hesh qanday boljawlar kirgizilgen joq. Eger ortalıq gistereziske iye bolmasa (mısalı para- yamasa diamagnetik bolsa), onda δA^{sirtqi} jumısı tek magnit energiyası bolg'an W_m shamasın u'lkeytiw ushın g'ana jumsaladı:

$$dW_m = \frac{\mathcal{J}}{c} d\Phi. \quad (185)$$

Bizler qarap atırılq'an ortalıqta ferromagnetikler joq dep esaplaymız. Sonlıqtan $\Phi = \frac{L\mathcal{J}}{c}$, qala berse tınıshlıqta turg'an o'tkizgish ushın o'zlik induktsiya L turaqlı bolıp qaladı. Usı jag'daydı esapqa alıp ha'm (185)-an'latpanı integrallap mınanı alamız:

$$W_m = \frac{L}{2} \left(\frac{\mathcal{J}}{c} \right)^2 = \frac{1}{2c} \mathcal{J} \Phi = \frac{\Phi^2}{2L}. \quad (186)$$

(186)-an'latpanın' durıs ekenligi ushın oramnın' qozg'alısta bolg'anlıg'ı yamasa tınıshlıqta turg'anlıg'ı hesh qanday a'hmiyetke iye emes. Sebebi energiya tek **sistemanın' halman g'ana g'a'rezli**, al usı halg'a qalay jetip kelgenlikten g'a'rezli emes.

18-§. Elektr terbelisleri

Menshikli elektr terbelisleri. So'niwshi elektr terbelisleri. Menshikli elektr terbelislerinin ten'lemesi. So'niw bolmag'andag'ı elektr terbelisleri. Ma'jbu'riy elektr terbelisleri.

Elektr terbelislerin u'yreniw ushın en' qolaylı bolg'an elektr shınjırı terbelmeli kontur bolıp tabıladı (62-su'wret). Terbelmeli kontur bir biri menen izbe-iz jalg'ang'an kondensatordan, o'zlik induksiya tu'tesi L den ha'm Omlıq qarsılıg'ı R ge ten' o'tkizgishten turadı. Sırtqı elektr qozg'awshı ku'shi 1- ha'm 2-polıoslar arasında bazı bir E kernewin tu'siredi (ulıwma jag'dayda bul kernew waqıtqa g'a'rezli o'zgeriwi de mu'mkin). Kontur boyınsha ju'rip o'tiw bag'ıtının birin biz on' bag'ıt dep esaplaymız. Bul bag'ıt 62-su'wrette strelkalar menen belgilengen. Usı strelka bag'ıtında o'tiwshi toqtı on', al qarama-qarsı bag'ıtta o'tetug'ın toqtı teris toq dep esaplaymız. Kondensatordın' bir astarın q zaryadı menen zaryadlaymız Bul astardan ekinshi astarg'a ju'rgizilgen bag'ıt on' toqtın' bag'ıtı menen sa'ykes keletug'ın bolsın. Bul kontur ushın Maksvell ten'lemesin qollanamız:

$$\int E_l dl = -\frac{d\Phi}{dt}. \quad (187)$$

Biz a'meliy (praktikalıq) birliklerdi qollanamız. Sebebi bul birlikler terbelmeli konturda ju'retug'ın protsesslerdi izertlew ushın ju'da' qolaylı. Meyli kvazistatsionarlıq sha'rti orınlanatug'ın bolsın. Bunday jag'dayda 13 ushastkası ushın Om nızamın qollanıp

$$\int_{13} E_l dl = \int \frac{i}{\lambda} dl = J \int \frac{dl}{s\lambda} = RJ. \quad (188)$$

Bul an'latpada R arqalı o'tkizgishtin' omlıq qarsılıg'ı belgilengen. Eger 42 ushastkasındag'ı qarsılıq ju'da' az bolsa, onda 32 jolı menen aling'an integral kondensatordın' astarları arasındag'ı kernew V g'a ten'. Kvazistatsionar protsessler ushın $\int_{32} E_l dl = V = \frac{q}{c}$. Al $\int_{21} E_l dl = -\int_{12} E_l dl$ integralı bolsa $\int_{21} E_l dl = -E$ ge belgisi boyınsha qarama-karsı aling'an 1- ha'm 2-polıoslar arasındag'ı kernew bolıp tabıladı. Na'tiyjede (187)-an'latpa mına tu'rge enedi:

$$\frac{d\Phi}{dt} + RJ + \frac{q}{c} = E. \quad (189)$$

Kvazistatsionar toqlar ushın $\Phi = LI$. Usının' menen birge

$$J = \frac{dq}{dt}. \quad (190)$$

Sonlıqtan

$$\frac{d}{dt} \left(L \frac{dq}{dt} \right) + R \frac{dq}{dt} + \frac{q}{c} = E. \quad (191)$$

Bul an'latpa biz keltirip shıg'arayın dep atırg'an terbelmeli konturdın' ten'lemesi bolıp tabıladı. O'zlik induksiya tu'tesi deformatsiyalanbaytug'ın bolsa (L turaqlı degen so'z) joqarıdag'ı ten'leme

$$L \frac{d^2 q}{dt^2} + R \frac{dq}{dt} + \frac{q}{c} = E. \quad (192)$$

ten'lemesine o'tedi.

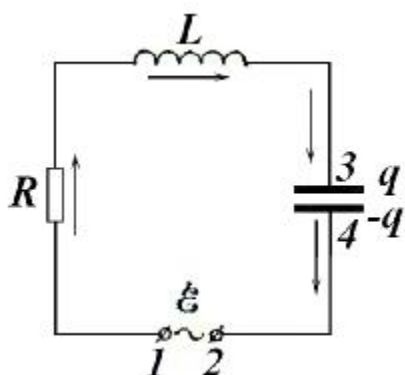
(192)-ten'lemenin' mexanikalıq analogı prujinag'a ilingen ju'ktin' qozg'alıs ten'lemesi bolıp tabıladı (63-su'wret). Eger Guk nızamı orınlanatug'ın bolsa, onda ju'ktin' qozg'alıw barısında tezlik \dot{x} qa proporsional bolg'an tormozlawshı ku'sh $-\alpha\dot{x}$ payda boladı ha'm qozg'alıs ten'lemesi mına tu'rge iye boladı:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = -kx - \alpha\dot{x} + F$$

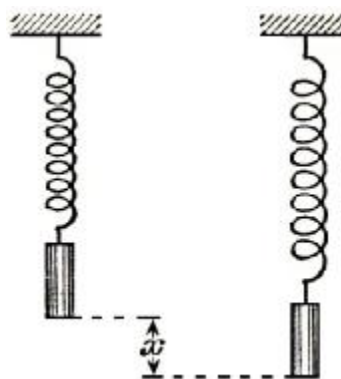
yamasa

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + \alpha\dot{x} + kx = F. \quad (193)$$

Bul an'latpadag'ı x ju'ktin' ten' salmaqlıq halınan awısıwı (eger ju'k to'menge karay awıssa bul shama on' belgige iye boladı dep esaplanadı), $-kx$ qaytarıwshı ku'sh (da'slepki halg'a qaytarıwshı ku'sh, bul ku'shtin' shaması prujinanın' keriw ku'shi menen denenin' salmag'mın' qosındısınan turadı). F bolsa ju'kke ta'sir etiwshi basqa barlıq ku'shlerdin' qosındısı.

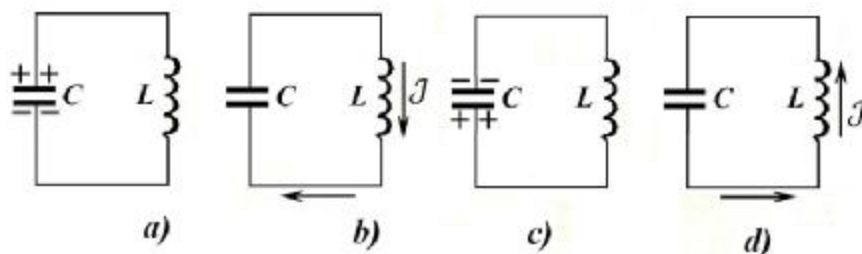


62-su'wret. Terbelmeli kontur.



63-su'wret. Terbelmeli konturdın' mexanikalıq analogı – prujinag'a ildirilgen ju'k.

(193)-ten'leme (192)-ten'lemeden tek belgilewleri boyınsha ha'm bul ten'lemege kiriwshi shamalardın' ma'nisi boyınsha g'ana ayrıladı. Matematikalıq jaqtan olar birdey. x awısıwdın' ornında (192) de zaryad mug'darı q , massa m nin' ornında o'zlik induksiya L , qarsılıq koeffitsienti α nin' ornında elektr karsılıg'ı R , sırtqı ku'shler F tin' ornında sırtqı elektr qozg'awshı ku'sh E tur. **Birdey ten'lemeler birdey sheshimge iye boladı.** (193)-ten'lemede $\alpha = 0$ ha'm $F = 0$ dep esaplasaq vertikal bag'ıttag'ı ju'ktin' terbelisinin' so'nbeytug'inlıg'ına iye bolamız. (192)- ha'm (193)-ten'lemelerdin' matematikalıq jaqtan birdey ekenligine baylanıslı zaryadlang'an kondensatordı o'zlik induksiya tu'tesi menen tuyıqlasaq **elektr terbelislerinin'** payda bolatug'inlıg'ına ko'z jetkeremiz. Bunday jag'dayda ju'k waqıtqa baylanıslı ten' salmaqlıq halı do'gereginde qanday nızam boyınsha awısatug'ın bolsa, kondensatordın' zaryadı q da waqıtqa baylanıslı tap sonday nızam boyınsha o'zgeredi. Eger Omliq kasılıq bolmasa, onda terbelmeli konturda so'nbeytug'in elektr terbelisleri payda boladı. Eger R qarsılıg'ı bolsa elektr terbelisleri tez so'nedi.



64-su'wret. Terbelmeli konturda elektr terbelislerinin' payda bolıwın tu'sindiriw ushın arnalg'an su'wret.

64-su'wret terbelmeli konturdag'ı elektr terbelislerinin' payda bolıwın mexaniklıq analogsız tu'sindiredi. A'piwayılıq ushın terbelmeli konturdın' elektr karsılıg'ı nolge ten' dep esaplaymız. Meyli waqıttın' baslang'ısh momentinde kondensatordın' joqarı plastinkası (astarı) on' belgige iye zaryad penen (qısqaılıq ushın on' zaryad penen), al to'mengi astarı zaryadlang'an dep esaplaymız. Bul momentte terbelmeli konturdın' barlıq energiyası kondensatorda toplang'an (64-a su'wret). Sırtqı elektr qozg'awshı ku'shleri bolmag'nada kondensator zaryadsızlana baslaydı ha'm usının' na'tiyjesinde tu'te arqalı toq o'te baslaydı. Bul protsess kondensatordın' astarının' zaryadı nolge ten' bolg'an waqıtta toqtaydı, al konturdan o'tip atırg'an toqtın' ma'nisi maksimumg'a jetedi (64-b su'wret). Usı waqıt momentinen baslap toq bag'ıtın o'zgerıpey kemeye baslaydı. Biraq toqtın' shaması birden nolge ten' bolıp qalmaydı, sebebi toqtın' kemeyiwine induktsiyanın' elektr qozg'awshı ku'shi kesent jasaydı. Na'tiyjede toq kondensatordın' to'mengi astarın on' zaryad penen, al joqarıdag'ı astarın teris zaryad penen zaryadlaydı. Toqtı kemeytiwge bag'ınlang'na elektr maydanı payda boladı. Aqır-ayag'ında toq nolge shekem kemeyedi, al kondensatordın' astarındag'ı zaryadtın' mug'darı maksimumge shekem ko'teriledi (64-c su'wret). Bunday jag'dayda kondensatordın' astarlarındag'ı zaryadların' absolt mug'ları 64-a su'wrettegi ko'rsetilgen, biraq belgileri qarma-qarsı awhalg'a keledi. Usı momentten baslap kondensator ja'ne zaryadsızlana baslaydı, kontur arqalı 64-b su'wrette ko'rsetilgendey, biraq qarama-karsı bag'ıtlang'an toq o'te baslaydı. Toqtın' maksimumı momentinde (64-d su'wret) kondensator zaryadsızlanadı ha'm keyin terbelmeli kontur o'zinin' da'slepki 64-a su'wrette keltirilgen halını qaytıp keledi. Bunnan keyin joqarıda ta'riplengen kondensatordın' zaryadlanıw ha'm zaryadsızlanıw tsikli qaytalanadı. Eger energiyanın' jog'alıwı orın almasa, onda joqarıdag'ı kondensatordın' zaryadlanıwı, zaryadsızlanıwı, qaytadan zaryadlanıwı sheksiz ko'p waqıt dawam ete bergen bolar edi. Na'tiyjede terbelmeli konturda anıq da'wirge iye so'nbeytugın elektr terbelisleri orın alg'an bolar edi.

(292)- ha'm (293)-ten'lemeler ekinshi ta'rıptıli differentsial ten'lemeler bolıp tabıladı. Eger «sırtqı ku'shler» bolg'an E yamasa F bolmasa, onda q yamasa x qa ha'm olardan waqıt boyınsha alıng'an tuwındılarg'a qarata ten'leme **sızıqlı** ha'm **bir tekli** ten'lemelerge aylanadı. Bunday ten'lemeler **erkin terbelisler** dep atalatug'ın terbelislerdi ta'ripleydi. Erkin terbelisleri sızıqlı ten'lemelerdin' ja'rdeminde ta'riplenetug'ın terbeliwshi sistemalardı **sızıqlı terbeliwshi sistemalar** dep ataymız.

To'mendegidey belgilewler kirgizemiz:

$$\omega_0^2 = \frac{1}{LC} \text{ yamasa } \omega_0^2 = \frac{k}{m}, \quad (194)$$

$$2\gamma = \frac{R}{L} \text{ yamasa } 2\gamma = \frac{\alpha}{m}, \quad (195)$$

$$X = \frac{E}{C} \text{ yamasa } X = \frac{F}{m}. \quad (196)$$

Bunday jag'dayda

$$\ddot{q} + 2\gamma\dot{q} + \omega_0^2 q = X, \quad (197)$$

$$x + 2\gamma\dot{x} + \omega_0^2 x = X. \quad (198)$$

ω_0 shamasın *terbeliwshi sistemanın' menshikli jiyiligi*, al γ shamasın *so'niw koeffitsienti* dep ataydı. Bul shamalardıń fizikalıq ma'nisin keyinirek tu'sindiremiz.

Garmonikalıq ostsillyatordın' erkin terbelisleri. Omlıq qarsılıq bolmasa terbelmeli konturdag'ı erkin terbelisler

$$\ddot{q} + \omega_0^2 q = 0 \quad (199)$$

ten'lemesi menen ta'riplenedi. Tap usınday ten'leme prujinag'a ildirilgen ju'ktin' erkin so'nbeıtuǵın terbelisin de ta'ripleydi. Terbelisi (199)-ten'lemege *bag'matug'ın qa'legen terbeliwshi sistemanı (mexanikalıq, elektr ha'm basqa da sistemalardı) garmonikalıq ostsillyator dep ataydı*. Eger terbeliwshi sistemada qarsılıq ku'shi $2\gamma\dot{q}$ bolsa, onda sistemanı *so'niwge iye gramonikalıq ostsillyator* dep ataymız.

(199)-ten'lemenı sheshiw ushın onın' eki ta'reipn de \dot{q} shamasına ko'beytemiz. Bul jag'dayda $\dot{q}\ddot{q} + \omega_0^2 \dot{q}q = 0$ ten'lemesin alamız. Basqashalap jazsaq $\frac{dq}{dt} \frac{d}{dt} \frac{dq}{dt} + \omega_0^2 \frac{d}{dt} qq = \frac{d}{dt} (\dot{q}^2 + \omega_0^2 q^2) = 0$. Solay etip (199)-ten'lemenin' ornına

$$\frac{d}{dt} (\dot{q}^2 + \omega_0^2 q^2) = 0$$

ten'lemesine iye bolamız. Bunnan $\dot{q}^2 + \omega_0^2 q^2$ shamasının' waqıtqa baylanıslı emes ekenligin bilemiz. Sonın' menen birge bul shama eki kvadrattın' qosındısınan turadı, sonlıqtan qawsırmanın' ishindegı shama on' ma'niske iye ha'm usıǵ'an baylanıslı onı

$$\dot{q}^2 + \omega_0^2 q^2 = \omega_0^2 q_0^2$$

tu'rinde jazıw mu'mkin. Bul an'latpada q_0 arqalı turaqlı shama belgilengen. Bul ten'lik energiyanın' saqlanıw nızamın an'latadı. Sebebi onı mına tu'rde jazıw mu'mkin

$$\frac{1}{2} L \dot{q}^2 + \frac{q^2}{2C} = \text{const.}$$

Ekinshi retki integrallawdı a'melge asırıw ushın o'zgeriwshilerdi ajratamız:

$$\frac{dq}{\sqrt{q_0^2 - q^2}} = \pm \omega_0 dt.$$

Bunnan

$$\arccos \frac{q}{q_0} = \pm \omega_0 t + \text{const}$$

Yamasa

$$q = q_0(\omega_0 t + \delta). \quad (200)$$

Integrallaw turaqlıları bolg'an q_0 ha'm δ shamaları baslangış sha'rtlerden anıqlanadı. Baslangış sha'rtler retinde $t = 0$ waqıt momentindegi zaryadtın' mug'darı q dı yamasa $J = \dot{q}$ toqtı alıw mu'mkin.

(200)-an'latpaday an'latpanın' ja'rdeminde kishi awısıwlardag'ı prujinag'a i ju'ktin', matematikalıq yamasa fizikalıq mayatniktin', ses shıg'arıp turg'an kamertonın' ayaqlarının' erkin terbelisi, qalalıq toq shınjırındag'ı toqtın' o'zgerisi ta'riplenedi. Eger qanday da bir shama (200)-nızam boyınsha terbeletug'ın bolsa, onda bul shamanın' terbelisi **garmonikalıq terbelis** dep ataladı. ω_0 shaması garmonikalıq terbelistın' **tsikllıq jiyiligi** (**aylanıw jiyiligi**) dep ataladı.

$$T_0 = 2\pi/\omega_0 \quad (201)$$

shaması terbelis da'wiri dep ataladı. Waqıt birligindegi terbelisler sanı

$$\nu_0 = 1/T_0 \quad (202)$$

terbelisler jiyiligi dep ataladı. Jiyiliktin' birliği retinde **gerts** qollanıladı. **Gerts dep bir sekund ishindegi terbelisler sanına aytadı.** q_0 shaması **terbelisler amplitudası**, $\omega_0 t + \delta$ shaması **terbelislerdin' fazası**, al δ shaması terbelislerdin' **da'slepki fazası** dep ataladı. Menshikli jiyilikler ω_0 , ν_0 terbeliwshi sistemanın' du'zilisinen g'a'rezli, al amplituda q_0 menen da'slepki faza δ terbeliwshi sistemanın' du'zilisine baylanıssız, al baslang'ış sha'rtler ja'rdeminde anıqlanadı.

Endi (194)-formulanı eske tu'siremiz ($\omega_0^2 = \frac{1}{LC}$). Bunnan $T_0 = 2\pi/\omega_0 = 2\pi\sqrt{LC}$. Yag'nıy

$$T_0 = 2\pi\sqrt{LC} . \quad (203)$$

Bul formula **Vilyam Tomson formulası** dep ataladı.

Eger abstsissa ko'sherine t waqtın, al ordinata ko'sherine terbeletug'ın q shamasının' ma'nisin qoyatugın bolsaq, onda **sinusoida** alınadı. Bul da'wirli iymeklik bolıp, onın' ordinatasının' ma'nisi T_0 da'wirinen keyin qaytalanadı. Amplituda q_0 bolsa q shamasının' nollik ma'nisinen en' maksimalıq awısıwı.

65-su'wret.

Waqıtqa baylanıslı da'wirli o'zgeretug'ın iymeklik.

(200)-an'latpanı differentsiallaw arqalı elektr terbelislerindegi toq alınadı:

$$J = \dot{q} = -\omega_0 q_0 \sin(\omega_0 t + \delta) = \omega_0 q_0 \cos\left(\omega_0 t + \delta + \frac{\pi}{2}\right).$$

Bul an'latpadan J toqtın' terbelisinin' q zaryadtın' terbelisin terbelis fazası boyınsha $\frac{\pi}{2}$ shamasına alda ju'redi eken (ozadı eken).

Elektr ha'm magnit energiyaları mına an'latpalar ja'rdeminde beriledi:

$$W_e = \frac{q^2}{2C} = \frac{q_0^2}{2C} \cos^2(\omega_0 t + \delta),$$

$$W_m = \frac{1}{2} L J^2 = \frac{1}{2} L \omega_0^2 q^2 \sin^2(\omega_0 t + \delta) = \frac{q_0^2}{2C} \sin^2(\omega_0 t + \delta).$$

Bul an'latpalardı mto'mendegidey tu'rde ko'rsetemiz:

$$W_e = \frac{q_0^2}{4C} + \frac{q_0^2}{4C} \cos(2\omega_0 t + \delta),$$

$$W_m = \frac{q_0^2}{4C} - \frac{q_0^2}{4C} \cos(2\omega_0 t + \delta).$$

Bul shamalardıń ortasha ma'nisi birdey ha'm mınag'an ten':

$$\overline{W_e} = \overline{W_m} = \frac{q_0^2}{4C} L J_0^2.$$

Usı ortasha shamalar a'tirapında W_e ha'm W_m shamaları $2\omega_0$ jiyiligi menen garmonikalıq terbelis jasaydı. Elektr energiyasınıń magnit energiyasına ha'm magnit energiyasınıń elektr energiyasına o'tiwi u'zliksiz tu'rde ju'redi. Elektr energiyası maksimum ma'nisine ko'terilgende magnit energiyası nolge ten' boladı. Toliq energiya

$$W = W_e + W_m = \frac{q_0^2}{2C} \quad (204)$$

shaması barlıq waqıtta da turaqlı bolıp qaladı (turaqlı bolıp qalıwı energiyanın' saqlanıw nızamınan kelip shıǵ'adı). (204)-formuladan tolıq energiyanın' **amplitudanın' kvadratına proporsional ekenligi** ko'rinip tur. Bunday jag'day mexanikalıq garmonikalıq terbelisler ushın da orınlı boladı.

So'niwshi terbelisler. Endi tormozlawshı ku'shlerdi de esapqa alamız. (197)-an'latpadan ($\ddot{q} + 2\gamma\dot{q} + \omega_0^2 q = X$ tu'rindegi an'latpa ekenligin eske tu'sireyik) $X = 0$ dep esaplayıq. Bul ten'lemenı sheshiw ushın

$$q = \xi e^{-\gamma t} \quad (205)$$

an'latpasın qanaatlandırıatug'ın ξ jan'a o'zgeriwshisin qabıl etemiz. Bunday jag'dayda mınaday ten'lemege iye bolamız:

$$\ddot{\xi} + (\omega_0^2 - \gamma^2)\xi = 0. \quad (206)$$

Bul ten'leme so'nbeytug'ın terbelislerdin' differentsial ten'lemesi bolg'an (199) benen sa'ykes keledi. Biraq $\omega_0^2 - \gamma^2$ koeffitsienti on' ma'niske de, teris ma'niske de iye bolıwı mu'mkin. Usıg'an baylanışlı a'dette u'sh jag'day orın aladı. Biz solardıń birewin, atap aytqanda $\omega_0^2 - \gamma^2 > 0$ sha'rti orınlanatug'ın jag'daydı qaraymız.

$$\omega_0^2 - \gamma^2 = \omega^2 \quad (207)$$

belgilewin qabıl etemiz. Bunday jag'dayda

$$\ddot{\xi} + \omega^2 \xi = 0. \quad (208)$$

Demek ξ o'zgeriwshisi ω jiyiligi menen garmonikalıq terbeledi eken:

$$\xi = a \cos(\omega t + \delta). \quad (209)$$

Demek

$$q = ae^{-\gamma t} \cos(\omega t + \delta). \quad (210)$$

Bul formula menen beriletug'in $q = q(t)$ funksiyaşının' grafigi da'wirli emes (66-su'wret). Biraq q shaması da'wirli tu'rde nol arqalı o'tedi ha'm ko'p ret maksimumg'a ha'm minimumg'a jetedi. Bunday ma'niste (210)-formula menen ta'riplenetug'in protsesslerdi **so'niwshi terbelisler** dep ataymız. q shamasının' nol arqalı eki o'tiwi arasındag'ı waqıt aralıg'ı π/ω g'a ten'. Onın' ekiletilgen ma'nisi

$$T = 2\pi/\omega = \frac{2\pi}{\sqrt{\omega_0^2 - \gamma^2}} = \frac{T_0}{\sqrt{1 - (\gamma/\omega)^2}} \quad (211)$$

terbelis da'wiri dep ataladı (protsess da'wirli emes bolganlıqtan «da'wir» so'zi bul jerde ornalı emes bolsa da). (211)-formuladan $T > T_0$ ekenligi ko'rinip tur, yag'nıy tormozlawshı ku'shler terbelis jiyiligin kemeytedi ha'm terbelis da'wirin u'lkeytedi.

$$A = ae^{-\gamma t} \quad (212)$$

Ko'beytiwshisi **so'niwshi terbelislerdin' amplitudası** dep ataladı. Amplituda waqıtın' o'tiwi menen eksponenta boyınsha kemeyedi. Amplituda e ese kemeyetug'in waqıt

$$\tau = 1/\gamma \quad (213)$$

so'niw waqıtı dep ataladı. τ waqıtı ishindegi tolıq terbelisler sanı

$$N = \tau/T = 1/\gamma T. \quad (214)$$

Terbeliwshi shamanın' maksimumlar menen minimumlar arasında izbe-iz o'tiw momentlerindegi amplitudaların' qatnası $A_1/A_2 = e^{-\gamma T}$. Bul katnastın' logarifmi

$$d = \ln \frac{A_1}{A_2} = \gamma T. \quad (215)$$

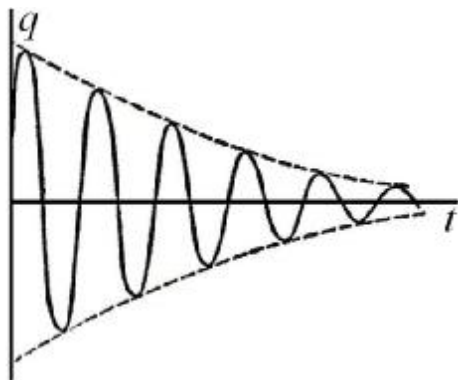
Bul shama **terbelislerdin' logarifmlik dekrementi** dep ataladı. Terbelislerdin' logarifmlik dekrementi terbelisler sanı N menen

$$N = \frac{1}{d} \quad (216)$$

tu'rinde baylanısqan. N (terbelisler) sanı terbelislerdin' logarifmlik dekrementine keri proporsional o'zgeretug'in shama eken.

$$Q = \pi N = \frac{\pi}{d} \quad (217)$$

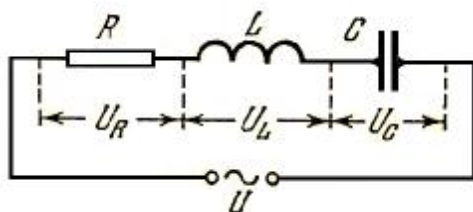
shaması terbelmeli konturdın' **dobrotlıq'ı** dep ataladı¹⁵. Demek dobrotlıq terbelisler amplitudası e ese kemeyemen degenshe orın alatug'ın terbelisler sanına tuwrı proporsional eken (terbelisler sanı qanshama ko'p bolsa dobrotlıq ta sonshama joqarı boladı). So'niw a'stelik penen bolatug'ın bolsa $Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$.



66-su'wret.

$q = q(t)$ funktsiyasının' grafigi

Ma'jbu'riy elektr terbelisleri. Ma'jbu'riy terbelislerdi qozdırıw ushın terbeliwshi sistemag'a sırttan da'wirli o'zgeretug'ın ta'sir tiygiziwimiz kerek. Mısalı 62-su'wrette keltirilgen konturdag'ı elektr qozg'awshı ku'shi deregi E sinus yamasa kosinus nızamı menen o'zgeretug'ın elektr qozg'awshı ku'shin beriwı kerek. Biz bul paragrafta 62-su'wretke tolıq sa'ykes keletug'ın, biraq belgilewleri menen ayrılatug'ın basqa su'wretti paydalanamız (67-su'wret).



67-su'wret.

Konturdın' ha'r bir elementine tu'sken kernewlerdin' qosındısı sırttan tu'sirilgen kernewdin' ma'nisine ten', yag'nıy
 $U = U_m \cos \omega t = U_R + U_C + U_L$.

Bul jag'dayda konturdag'ı kondensator ha'm induktivlik tu'tesi menen izbe-iz jalg'angan o'zgermeli elektr qozg'awshı ku'shi deregi

$$U = U_m \cos \omega t \quad (218)$$

kernewin beretug'ın bolsın. Biz omliq qarsılıqqa tu'setug'ın kernewdin' IR , kondensatorg'a tu'setug'ın kernewdin' $\frac{q}{C}$, al L induktivligine iye tu'tege tu'setug'ın kernewdin' $L \frac{dJ}{dt}$ ekenligin esapqa alıp, sol kernewlerdin' qosındısının' mına ten'likti qanaatlandırıtug'ınlıg'ın an'sat ko'z jetkeriwge boladı:

$$IR = -\frac{q}{C} - L \frac{dJ}{dt} + U_m \cos \omega t. \quad (219)$$

Elementar tu'rlendiriwler o'tkeriw arqalı biz mınag'an iye bolamız:

$$\ddot{q} + 2\beta\dot{q} + \omega_0^2 q = \frac{U_m}{L} \cos \omega t. \quad (220)$$

¹⁵ Orıs tilindegi «dobrotnost» so'zin sol tu'rinde «dobrotlıq» dep qabıl etemiz.

Bul an'latpada $\beta = \frac{R}{2L}$, $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$.

(220)-an'latpa ma'jbu'riy mexanikalıq terbelislerdin' differentsial ten'lemesine sa'ykes keledi (qaran'ız: «Mexanika» boyınsha lektsiyalar tekstleri, 29=paragraf). Bul ten'lemenin' dara sheshimi mına tu'rge iye boladı:

$$q = q_m \cos(\omega t - \delta). \quad (221)$$

Bul an'latpada $q_m = \frac{U_m/L}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2\omega^2}}$, $\tan \delta = \frac{2\beta\omega}{\omega_0^2 - \omega^2}$.

ω_0^2 penen β nın' ma'nislerin qoyıw arqalı mına an'latpalarg'a iye bolamız:

$$q_m = \frac{U_m}{\omega \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}, \quad (222)$$

$$\tan \delta = \frac{R}{\frac{1}{\omega C} - \omega L}. \quad (223)$$

(221)-an'latpanı t boyınsha differentsiallap konturdag'ı qa'liplesken terbelislerdegi toq tu'shin alamız.

$$\mathcal{J} = -\omega q_m \sin(\omega t - \delta) = \mathcal{J}_m \cos(\omega t - \delta + \frac{\pi}{2}).$$

Bul an'latpanı mına tu'rde jazamız:

$$\mathcal{J} = \mathcal{J}_m \cos(\omega t - \varphi). \quad (224)$$

Bul an'latpada φ shamasının' toq ushın da'slepki faza ekenligin (al potentsial emes ekenligin) atap o'temiz. Sonın' menen birge $\varphi = \delta - \frac{\pi}{2}$ shaması toq penen tu'sirilgen kernew arasındag'ı fazalar ayırması. (223) ke sa'ykes

$$\tan \varphi = \tan\left(\delta - \frac{\pi}{2}\right) = -\frac{1}{\tan \delta} = \frac{\frac{1}{\omega C} - \omega L}{R}. \quad (225)$$

Bul formuladan mına jag'daylı ko'remiz:

$\frac{1}{\omega C} > \omega L$	Toq fazası boyınsha kernewden artta qaladı ($\varphi > 0$)
$\frac{1}{\omega C} < \omega L$	Toq fazası boyınsha kernewden alda ju'redi ($\varphi < 0$)

(222)-an'latpag'a sa'ykes

$$\mathcal{J}_m = \omega q_m = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}. \quad (226)$$

(219)-an'latpanı

$$\mathcal{J}R + \frac{q}{c} + L \frac{d\mathcal{J}}{dt} = U_m \cos \omega t. \quad (227)$$

tu'rinde jazamız. $\mathcal{J}R$ ko'beymesi aktiv qarsılıqqa tu'sken U_R kernewge, $\frac{q}{c}$ bolsa kondensatordag'ı kernew U_C g'a ten'. $L \frac{d\mathcal{J}}{dt}$ shaması induktivliktegi kernew U_L ge ten'. Usını esapqa alıp bilayınsha jazamız:

$$U_R + U_C + U_L = U_m \cos \omega t. \quad (228)$$

Solay etip konturdın' barlıq elementlerindeki kernewdin' qosındısı sırttan tu'sirilgen kernewdin' ma'nisine ten' (67-su'wret).

(224) ke sa'ykes

$$U_R = R \mathcal{J}_m \cos(\omega t - \varphi). \quad (229)$$

(221) dı sıyımlıqqa bo'lip, kodensatordag'ı kernewdi tabamız:

$$U_C = \frac{q_m}{c} \cos(\omega t - \delta) = U_{Cm} \cos\left(\omega t - \varphi - \frac{\pi}{2}\right). \quad (230)$$

Bul jerde

$$U_{Cm} = \frac{q_m}{c} = q_m = \frac{U_m}{\omega C \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} = \frac{\mathcal{J}_m}{\omega C}. \quad (231)$$

(224)-funktseyasının' tuwındısın L ge ko'beytsek induktivliktegi kernewdi alamız:

$$U_L = L \frac{d\mathcal{J}}{dt} = -\omega L \mathcal{J}_m \sin(\omega t - \varphi) = U_{Lm} \cos(\omega t - \varphi + \frac{\pi}{2}). \quad (232)$$

Bul jerde

$$U_{Lm} = \omega L \mathcal{J}_m. \quad (233)$$

Eger (224)-, (229)-, (230)- ha'm (232)-an'latpalardı bir biri menen salıstırıp ko'rsek mınag'an iye bolamız:

- 1) kondensatordag'ı kernew fazası boyınsha toq ku'shinen $\frac{\pi}{2}$ ge artta qaladı.
- 2) induktivliktegi kernew fazası boyınsha toq ku'shinen $\frac{\pi}{2}$ ge aldıda ju'redi.
- 3) aktiv qarsılıqtag'ı (omlıq qarsılıqtag'ı) kernew fazası boyınsha toq ku'shinin' fazasında boladı.

Zaryad q ha'm kondensatordag'ı kernew U_C ushın rezonanslıq jiyilik mınag'an ten':

$$\omega_{q rez} = \omega_{U rez} = \sqrt{\omega_0^2 - 2\beta^2} = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{2L^2}} \leq \omega_0. \quad (234)$$

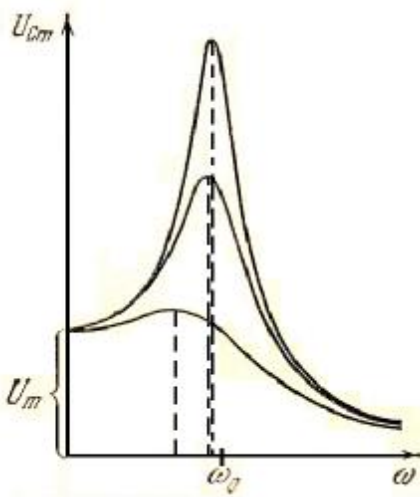
68-su'wrette U_C ushın rezonanslıq iymeklikler keltirilgen. q ushın da rezonanslıq iymeklikler tap usınday boladı. $\omega \rightarrow 0$ de olar ordinatası $U_{Cm} = U_m$ bolg'an bir noqattta kesilisedi. Al U_m bolsa kondensatordı turaqlı U_m kernew dereğine tutastırğ'andag'ı usı kondensatordın' ushlarındağ'ı

kernew. $\beta = \frac{R}{2L}$ shaması qanshama kishi bolsa rezonanstag'ı maksimum biyigirek ha'm ushlıraq boladı (β nın' kishi bolıwı ushın omalıq karsılıq R kishi, al induktivlik L u'lken bolıwı kerek).

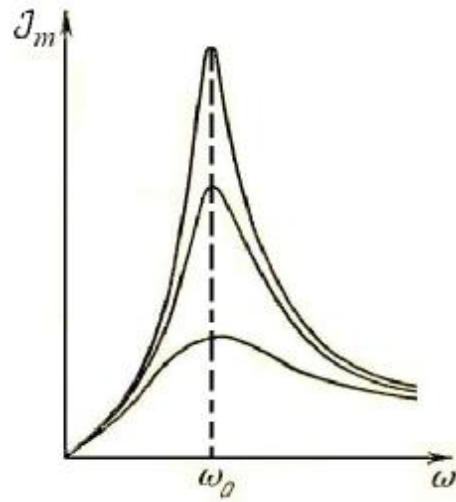
69-su'wrette toq ku'shi ushın alıng'an iymeklikler berilgen. Bul iymeklikler mexanikalıq terbelislerdegi tezlikler ushın sızılǵ'an iymekliklerge sa'ykes keledi. Toq ku'shinin' amplitudası $\omega L - \frac{1}{\omega C} = 0$ bolg'anda maksimumlıq ma'nisine jetedi (226-an'latpag'a qaraw kerek). Demek toq ku'shi ushın rezonanslıq jiyilik konturdın' menshikli jiyiligi ω_0 g'a ten' boladı:

$$\omega_{J rez} = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (235)$$

Rezonanslıq iymeklikler J_m ko'sherin nolde kesip o'tedi. Yag'nıy kondensator bar shınjır arqalı turaqlı toq o'te almaydı.



68-cu'wret. U_C ushın rezonanslıq iymeklikler. q ushın da rezonanslıq iymeklikler tap usınday boladı.



69-su'wret. J_m toq ku'shi ushın alıng'an rezonanslıq iymeklikler.

So'niw kishi bolg'anda ($\beta^2 \ll \omega_0^2$) kernew ushın rezonanslıq jiyiliktı konturdın' menshikli jiyiligi ω_0 shamasına ten' dep esaplawg'a boladı (234-an'latpag'a qaraw kerek). Usıg'an sa'ykes $\omega_{rez}L - \frac{1}{\omega_{rez}C} \approx 0$ dep esaplaw mu'mkin. (231)-an'latpag'a muwapıq rezonanstag'ı kondensatordın' ushlarındaǵı kernew amplitudası $U_{Cm rez}$ shamasının' sırtqı kernew amplitudası U_m ge qatnası bilayınsha esaplanadı:

$$\frac{U_{Cm rez}}{U_m} = \frac{1}{\omega_0 CR} = \frac{\sqrt{LC}}{CR} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} = Q. \quad (236)$$

[(217)-formulag'a karan'ız]. Bul an'latpada Q arqalı konturdın' dobrotlıg'ı belgilengen. Solay etip *konturdın' dobrotlıg'ı kondensatorg'a tu'sken kernewdin' sırttan tu'sirilgen kernewden qansha u'lken bolatug'ınlıg'ın ko'rsetedi eken.*

19-§. O'zgermeli toq

O'zgermeli elektr tog'ı shınjırındaǵı aktiv qarsılıq, sıyımlıq ha'm induktivlik. Vektorlıq diagrammalar usılı. O'zgermeli toqlar ushın Om nızamı. O'zgermeli toqtın' quwatı ha'm jumısı. Toq ha'm kernewdin' effektivlik ma'nisleri. Kernew ha'm toq rezonansı.

Biz 18-paragrafta bayanlag'an ma'jbu'riy terbelislerdi sıyımlıqtan, induktivlikten ha'm aktiv qarsılıqtan turatug'in shınjırdag'ı sırtqı derekten tu'sirigen

$$U = U_m \cos \omega t \quad (237)$$

o'zgermeli kernewinin' ta'sirinde payda bolg'an o'zgermeli toqtın' o'tiwi dep qaraw kerek¹⁶. Bul toq ku'shi

$$J = J_m \cos(\omega t - \varphi) \quad (238)$$

nızamı boyınsha o'zgeredi. Joqarıda toq amplitudası J_m shamasının' bılayınsha anıqlanatug'inlıg'in ko'rdik:

$$J_m = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}. \quad (226)$$

Toq fazası boyınsha kernewden φ shamasına keyin qaladı (mu'yeshine keyin qaladı) ha'm bul shama

$$\tan \varphi = \frac{\omega L - 1/\omega C}{R} \quad (239)$$

an'latpasının' ja'rdeminde anıqlanadı. (226)-formulanın' bo'liminde turg'an

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} \quad (240)$$

shaması ***tolıq elektr karsılıg'ı*** yamasa ***impedans*** dep ataladı.

Eger shınjır tek aktiv qarsılıqtan turatug'in bolsa, onda Om nızamı ten'lemesi mına tu'rge iye boladı:

$$JR = U_m \cos \omega t$$

Bul an'latpadan tek aktiv karsılıq bolg'an jag'dayda toq penen kernewdin' o'zgeriw fazası birdey bolatug'inlıgı ko'rinip tur, al toq ku'shinin' amplitudası

$$J_m = \frac{U_m}{R}.$$

Bul an'latpanı (226)-an'latpa menen salıstırıw arqalı kondensatordın' ornın tuyıqlawdın' sıyımlıqtı nolge ten'ew $C = 0$ menen emes, al sıyımlıqtı sheksiz u'lkeytiw, yag'nıy $C = \infty$ menen almasırwg'a sa'ykes keletug'inlıgın ko'rsetedi.

Qa'legen haqıyqıy shınjır shekli omliq qarsılıq R ge, induktivlik L ge ha'm sıyımlıq C g'a iye boladı. Biraq ayırım jag'daylarda olardıń ayırımların esapqa almawg'a boladı. Mısal retinde u'sh jag'daydı qarap o'teyik.

¹⁶ «Sıyımlıqtan, induktivlikten, aktiv qarsılıqtan» degen so'zler «kondensatordan, induktivlik tu'tesinen, aktiv karsılıqtan» degendi bildiredi.

1). $R = 0$ ha'm $C = \infty$ dep esaplaw mu'mkin (demek aktiv qarsılıq ta, kondensator da joq). Bunday jag'dayda (226)- ha'm (239)-an'latpalardan

$$J_m = \frac{U_m}{\omega L} \quad (241)$$

an'latpasın alamız ha'm $\tan \varphi = \infty$ ekenligine iye bolamız (yag'nıy $\varphi = \pi/2$). (241)-an'latpadag'ı

$$X_L = \omega L \quad (242)$$

shamasın shınjırdın' **reaktivlik induktivlik qarsılıg'ı** yamasa **induktivlik qarsılıg'ı** dep ataydı. Eger L di genrilerde, ω nı radian/sekundlarda o'lishense X_L shaması omlarda an'latıladı. Yag'nıy

$$1 \text{ genri} \times 1 \text{ radian/sekund} = 1 \text{ om.}$$

(242)-an'latpa induktivlik karsılıqtın' tsikllıq jiyilik ω nın' artıwı menen artatug'ınlıg'ın ko'rsetedi. Al turaqlı toq ushın $\omega = 0$, sonlıqtan turaqlı toqqa induktivlik qarsılıq jasamaydı.

İnduktivliktegi toq fazası boyınsha kernewden $\varphi = \pi/2$ shamasına artta qaladı. Usıg'an sa'ykes induktivlikke tu'sken kernew fazası boyınsha toqtan $\pi/2$ shamasına aldıda ju'redi.

2). Endi $R = 0$ ha'm $L = 0$ dep esaplayıq. Onda (226)- ha'm (239)-an'latpalarg'a sa'ykes

$$J_m = \frac{U_m}{1/\omega C}. \quad (243)$$

ha'm $\tan \varphi = -\infty$ ekenligine iye bolamız (yag'nıy $\varphi = -\pi/2$). Bul an'latpadag'ı

$$X_C = 1/\omega C \quad (244)$$

shamasın **reaktiv sıyımlıq qarsılıg'ı** yamasa **sıyımlıq qarsılıg'ı** dep ataydı. Eger sıyımlıq C nı faradalarda, tsikllıq jiyilik radian/sekundlarda o'lishesek, onda X_C omlarda an'latıladı. Yag'nıy

$$1 \text{ farada} \times 1 \text{ radian/sekund} = 1 \text{ om.}$$

(244)-an'latpadan jiyilikin' artıwı menen sıyımlıq qarsılıg'ının' kemeyetug'ınlıg'ı kelip shıg'adı. Turaqlı toq ushın $X_C = \infty$, yag'nıy turaqlı toq kondensator arqalı o'tpeydi

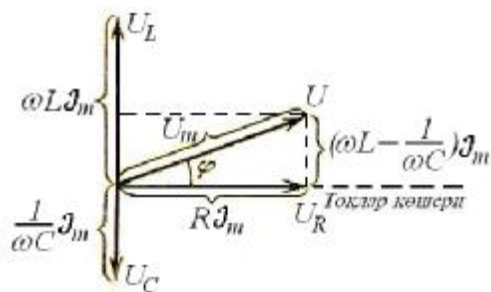
3). Endi tek $R = 0$ bolsın. Bunday jag'dayda (226)-formula mınanı beredi:

$$J_m = \frac{U_m}{\left| \omega L - \frac{1}{\omega C} \right|}. \quad (245)$$

Bul an'latpadag'ı $X = \omega L - \frac{1}{\omega C} = X_L - X_C$ shaması **reaktiv karsılıq** yamasa **reaktans** dep ataladı. Solay etip biz qarap atırg'an jag'daylar ushın (239)- ha'm (240)-an'latpalar to'mendegidey tu'rge enedi:

$$\tan \varphi = \frac{X}{R}, \quad Z = \sqrt{R^2 + X^2}.$$

Solay etip tuwrı mu'yeshli u'sh mu'yeshliktegi katetlerdin' uzınlıg'ın R ha'm X shamalarına ten' etip alsaq, onda Z gipotenuzanın' uzınlıg'ına ten' boladı. Bul jag'day 70-su'wrette keltirilgen.



70-su'wret.

U_C , U_R , U_L kernewleri ushın du'zilgen vektorlıq diagramma. Bul diagrammada tuwrı mu'yeshli u'sh mu'yeshliktin' katetleri R ha'm X shamalarına ten' bolg'anda gipotenuzanın' uzınlıg'ının' Z ke ten' bolatug'ınlıg'ı ko'rinip tur.

O'zgermeli toqtın' jumısı ha'm quwatı. O'zgermeli toq shınjırındag'ı ayrılıp shıg'atug'ın ku'watlıqtı tabamız. Quwatlıqtın' (quwattın') biz zamatlıq ma'nisi toq penen kernewdin' bir zamatlıq ma'nislerinin' ko'beymesine ten', yag'nıy

$$P(t) = U(t)J(t) = U_m \cos \omega t J_m \cos(\omega t - \varphi). \quad (246)$$

$$\cos \alpha \cos \beta = \frac{1}{2} \cos(\alpha - \beta) + \frac{1}{2} \cos(\alpha + \beta)$$

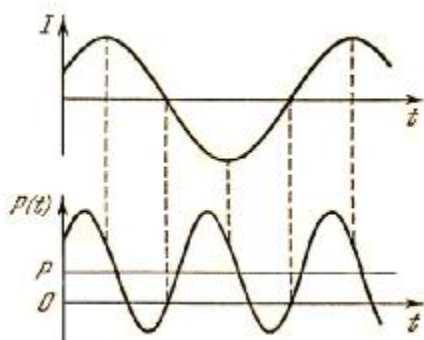
formulasınan paydalanıp (246)-an'latpanı mına tu'rge keltiremiz:

$$P(t) = \frac{1}{2} U_m J_m \cos \varphi + \frac{1}{2} U_m J_m \cos(2\omega t - \varphi). \quad (247)$$

A'melde bizdi $P(t)$ quwattın' ortasha ma'nisi kızıqtaradı. Onı P arqalı belgileymiz. $\cos(2\omega t - \varphi)$ shamasının' ortasha ma'nisi nolge ten' bolg'anlıqtan

$$P = \frac{U_m J_m}{2} \cos \varphi. \quad (248)$$

(247)-an'latpadan bir zamatlıq quwattın' ortasha ma'nisi a'tirapında toqtın' jiyiliginen eki ese artıq jiyilik penen terbeletug'ınlıg'ın ko'remiz. Bul awhal 71-su'wrette sa'wlelendirilgen.



71-su'wret.

O'zgermeli toqtın' quwatı $P(t)$ shamasının' o'zinin' ortasha ma'nisi a'tirapında toqtın' jiyiliginen eki ese ko'p jiyilik penen terbeletug'ınlıg'ın ko'rsetetug'ın diagrammalar.

(239)-formulag'a sa'ykes

$$\cos \varphi = \frac{R}{\sqrt{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2}} = \frac{R}{Z}. \quad (249)$$

$\cos \varphi$ din' bul ma'nisin (248)-formulag'a qoysaq, onda mına an'latpanı alamız:

$$P = \frac{RJ_m^2}{2}. \quad (250)$$

Usınday quwatqa ku'shi

$$J = \frac{J_m}{\sqrt{2}} \quad (251)$$

shamasına ten' bolg'an toq iye boladı. Bul shama toq ku'shinin' *ta'sir etetug'in* (yamasa *effektiv*) ma'nisi dep ataladı. Tap usıg'an sa'ykes

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \quad (252)$$

shaması kernewdin' *ta'sir etiwshi (effektiv)* ma'nisi dep ataladı.

Demek *o'zgermeli toq ku'shi menen o'zgermeli kernewdin' effektiv ma'nisleri olardin' amplitudalıq ma'nislerinen $\sqrt{2}$ ese kishi eken. O'zgermeli toq ku'shinin' effektiv ma'nisi ta'siri tap sonday bolg'an turaqlı toq ku'shinin' ma'nisindey boladı. Tap sol sıyaqlı o'zgermeli kernewdin' effektiv ma'nisi ta'siri usı o'zgermeli kernewdin' ta'sirindey bolg'an turaqlı kernewdin' ma'nisine ten'.*

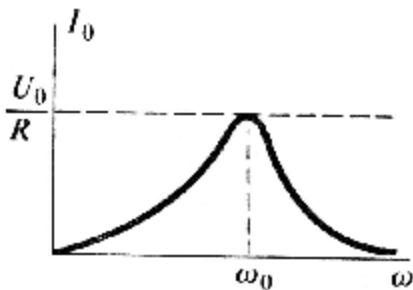
Toq penen kernewdin' ta'sir etiwshi ma'nisi arqalı an'latılğan ortasha quwat ushın an'latpa

$$P = UJ \cos \varphi \quad (253)$$

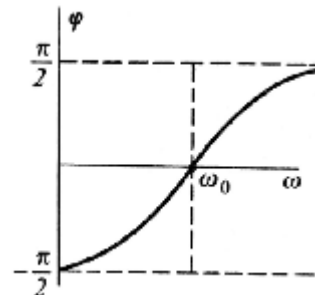
tu'rine iye boladı. Bul an'latpag'a kiriwshi $\cos \varphi$ ko'beytiwshisin *quwat koeffitsienti* dep ataladı. Texnikada bul funksiyanın' ma'nisin mu'mkin bolg'anınsha u'ikenirek etip alıwg'a umtıladı.

Biz joqarıda kondensatorda da, induktivlik tu'tede de $\cos \varphi = 0$, yag'nıy $\varphi = \frac{\pi}{2}$ ekenligin ko'rgen edik. Usıg'an baylanıslı induktivlikte de, sıyımlıqta da $P = 0$ ha'm usıg'an sa'ykes quwat jog'alımaydı (jıllılıq ushın jumsalmaydı) dep juwmaq shıg'aramız.

Kernew ha'm toq rezonansı. Biz joqarıda qarag'an terbelmeli kontur o'zgermeli toq konturının' bir tu'ri bolıp tabılardı (mısal retinde 67-su'wretti keltiriwge boladı).



72-su'wret. $I_0(\omega)$ funksiyanının' grafigi.



73-su'wret. $\varphi(\omega)$ funksiyanının' grafigi.

Endi biz belgilewlerde bir qansha o'zgerisler kirgizemiz ha'm toq ku'shin J arqalı emes, al ko'pshilik oqıw a'debiyatlarında qabıl etilgen I haripinen paydalanamız (u'wretlerde de toq ku'shin sa'ykes I haripi menen belgileyemiz). Toqtın' amplitudalıq ma'nisi I_0 , toq penen kernew arasındag'ı fazalar ayırması φ bolsın. Bunday jag'dayda toqtın' amplitudalıq ma'nisi menen

fazalar ayırmasının' sırttan tu'sirilgen kernewden g'a'rezligin anıqlaymız. (225)-(226) formulalar boyınsha

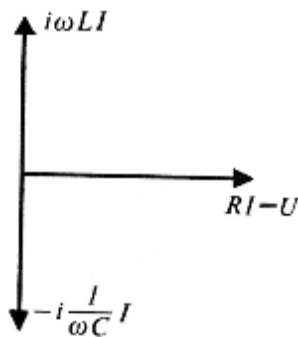
$$I_0 = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} \quad (254)$$

$$\tan \varphi = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}. \quad (255)$$

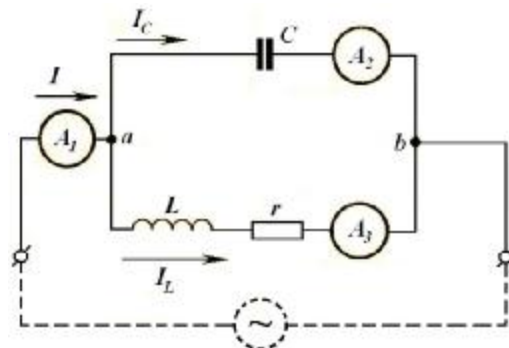
$I_0(\omega)$ menen $\varphi(\omega)$ baylanısları 72- ha'm 73-su'wretlerde berilgen. Toq ku'shi I_0 jiyilik

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (256)$$

bolg'anda maksimumg'a jetedi. Bul jiyiliktı konturdın' rezonanslıq jiyiligi dep atag'an edik. Bunday jag'dayda toq ku'shinin' amplitudası $\frac{U_0}{R}$ ge, al fazalar ayırması $\varphi = 0$ ge ten'. Bunday jag'day shınjırda sıyımlıq ta, induktivlik te joq jag'dayg'a sa'ykes keledi. Basqa so'z benen aytqanda biz qarap atırg'an jag'dayda sıyımlıqtag'ı kernew menen induktivliktegi kernew bir birin tolıq kompensatsiyalaydı (demek sıyımlıqqa tu'sken kernew menen induktivlikke tu'sken kernew birdey ma'niske iye, al fazaları boyınsha ha'mme waqıttag'ıday qarama-qarsı). Usıg'an baylanıslı bunday rezonanslı **kernewler rezonansı** dep ta ataydı. Kernewler rezonansının' vektorlıq diagramması 74-su'wrette keltirilgen. Rezonansta (yag'nıy $\omega = \omega_0$ sha'rti orınlang'anda) kontur o'zin tek aktiv karsılıq sıpatında ko'rsetedi.



74-su'wret. Kernewler rezonansındag'ı kernewlerdin' vektorlıq diagramması (vertikal bag'ıttag'ı kernewler bir birin joq etedi).



75-su'wret. Toqlar rezonansın ju'zege keltiriw ushin arnalg'an shınjır.

Endi **toqlar rezonansın** qarap o'temiz. Onın' ushin 75-su'wrette keltirilgen shınjırda paydalanamız. Bunday jag'dayda shınjır arqalı o'tiwshi toqtın' shaması minag'an ten':

$$I = I_L + I_C = U \left(\frac{1}{R + i\omega L} + i\omega C \right) = U \left(\frac{R - i\omega L}{R^2 + \omega^2 L^2} + i\omega C \right) = U \frac{R}{R^2 + \omega^2 L^2} - i \frac{U}{R^2 + \omega^2 L^2} [\omega L - \omega C(R^2 + \omega^2 L^2)]. \quad (257)$$

Bul an'latpadag'ı en' keyingi (kvadrat) qawsırma ishindegi shamalar nolge ten' bolg'anda jormal ag'za jog'aladı, toqtın' shaması $I = \frac{UR}{R^2 + \omega^2 L^2}$ an'latpası ja'rdeminde anıqlanadı ha'm shınjır tek omliq qarsılıqqa iye boladı. Yag'nıy

$$\omega L - \omega C(R^2 + \omega^2 L^2) = 0. \quad (258)$$

Sırtqı kernew menen toq ku'shi arasındag'ı fazalar ayırması nolge ten'. (258)-an'latpanın' eki ta'repin de $\omega^2 LC$ g'a bo'lip

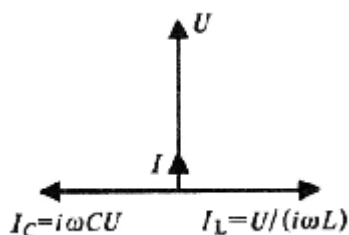
$$\frac{1}{\omega C} - \omega L = \frac{R^2}{\omega L} \quad (259)$$

an'latpasına iye bolamiz. A'meldegı ko'pshilik a'hmiyetli jag'daylarda (ko'binese texnikada) $\omega L \gg R$ sha'rti orinlanatug'ın konturlar qollanıladi. Sonlıqtan keyingi eki ten'lemenin' sheshimi

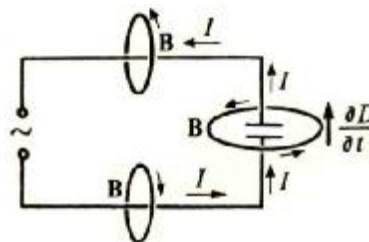
$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (260)$$

tu'rinde jazıladi (256-an'latpag'a qayta kelgenligimizdi an'g'arıwımız kerek). Demek L , C ha'm ω nın' ma'nislerin o'zgerte otırp fazalar ayırması φ di nolge alıp keliw mu'mkin eken. Bunday jag'dayda kontur aktiv qarsılıq qa'siyetine iye boladı. Ma'jbu'riy terbelislerdin' bul dara jag'dayın **toqlar rezonansı** dep ataymız.

Toqlar rezonansın baqlaw ushın 75-su'wrette keltirilgen sxemadan paydalanıwg'a boladı. Bul jag'dayda A_1 ampermetri menen birge ha'r bir tarmaqtag'ı toq ku'shin o'lshew ushın A_2 ha'm A_3 ampermetrleri de qollanıladi. O'zgermeli kernew deregi retinde o'jirelerdegi jaqtılandırıw tarmag'ın alıwg'a boladı (jiyiligi 50 Gts). İnduktivlik retinde temir o'zekke iye drosseldi alıw qolaylı (o'zektin' ornın a'ste-aqırınlıq penen o'zgertiw arqalı L di o'zgerte alamız). Bunday jag'dayda mınaday jag'daydı bayqay alamız: Da'slep I_L tog'ı (A_3 ampermetri menen o'lshegen) A_2 ampermetri menen o'lshegen I_C tog'ınan a'dewir kishi. A_1 ampermetri bolsa sezilerliktey ku'shke iye bolg'an I tog'mın' o'tip turg'anlıgın ko'rsetedi. Drosseldin' induktivligi L din' kishireyiwi menen I_L tog'ı o'se baslaydı (I_C tog'ı o'zgerissiz qaladı). Al shama menen $I_C - I_L$ ayırmasına ten' tolıq toq I kishireye baslaydı. İnduktivliktin' bazı bir ma'nisinde I tog'ı en' kishi ma'niske iye boladı (rezonans). Bunday jag'dayda A_2 ha'm A_3 ampermetrleri A_1 ampermetrinin' ko'rsetiwinen a'dewir u'lken bolg'an, shamaları derlik birdey ma'niske iye bolg'an toqlardın' o'tip turg'anlıg'ın ko'rsetedi. Bul na'tiyjeler I_C menen I_L toqlarının' fazaları boyınsha derlik qarama-qarsı ekenligin ko'rsetedi. İnduktivlikti ja'ne de kishireytsek, onda I_L tog'ı I_C tog'ına salıstırğ'anda u'lkeyedi, al tolıq toq I de u'lkeye baslaydı. 76-su'wrette toqlar rezonansındag'ı toqlardın' vektorlıq diagramması ko'rsetilgen.



76-su'wret. Toqlar rezonansındag'ı toqlardın' vektorlıq diagramması. I_C ha'm I_L toqlarının' bag'ıtlarının' (derlik) qarama-qarsı ekenligin ko'rinip tur.



77-su'wret.

Awısıw tog'ı

20-§. Maksvell postulatları

Awısıw tog'ı. Maksvell ten'lemeleri ha'm olardın' ta'jiriybelerden kelip shıg'atug'ın tıykarları. Maksvell ten'lemelerinin' fizika ilimindegi tutqan ornı. Elektromagnit tolqınlar.

Elektromagnit tolqinlardin' qa'siyetleri, olardin' ko'ldenen' tolqin ekenligi. Tolqin energiyasi. Poynting vektori. Elektromagnit tolqinlardi payda etiw. Gerts ta'jiriybeleri

Kondensator jalg'ang'an shinjir arqali turaqli toq o'tpeydi, al o'zgermeli toq o'tedi (misali 67-su'wrette keltirilgen terbelmeli kontur arqali turaqli toq o'tpeydi). O'tkizgishlik kvazistatsionar tog'min' ku'shi shinjirdin' barliq izbe-iz jalgang'an elementlerinde birdey ma'niske iye boladi. Kondensator arqali elektronlardin' qozg'alisi menen baylanisli bolg'an o'tkizgishlik tog'min' o'tiwi mu'mkin emes. Sebebi onin' astarlari bir birinen dielektrik arqali ajratilg'an. Usig'an baylanisli biz minaday juwmaq shig'aramiz: kondensatorda sonday bir *protsess* ornı aladı, sol protsess o'tkizgishlik tog'in tuyiqlaydı. Basqa so'z benen aytqanda bul protsess kondensatordın' bir astarınan ekinshi astarina zaryad alıp barmaydı, biraq usig'an qaramastan kondensatordın' astarlari arasında zaryad almasıwdı ta'miynleydi. **Bunday protsessti awisiw tog'i dep ataydı.**

77-su'wrette keltirilgen tegis kondensatorg'a iye o'zgermeti toq shinjirın qaraymız. Kondensatordın' astarlari arasında kernewligi $E = \frac{\sigma}{\epsilon}$ bolg'an elektr maydanı bar (ϵ arqali astarlari arasındag'ı dielektrik zattyan' dielektriklik sin'irgishligi, al σ arqali astardag'ı zaryadlardın' tıg'ızlıgı belgilengen). Kondensatordın' astarlari arasındag'ı elektr awisiwı $D = \sigma = \frac{Q}{S}$ ($Q = DS$ arqali kondensatordın' ha'r bir astarındag'ı zaryad mug'darı, al S arqali astardın' maydanı belgilengen), . Shinjirdag'ı toq ku'shi $I = \frac{\partial Q}{\partial t}$ g'a ten'. Bunnan

$$I_{awisiw} = S \frac{\partial D}{\partial t}. \quad (261)$$

A'llette $I_{awisiw} = I$ bolıwı kerek. Demek shındırdag'ı toqtı tuyiqlaytug'in protsess kondensatordın' astarlari arasındag'ı elektr awisiwının' o'zgerisi bolıp tabıladı eken. Astarlari arasındag'ı awisiw tog'min' tıg'ızlıg'ı

$$j_{awisiw} = I_{awisiw}/S = \frac{\partial D}{\partial t}. \quad (262)$$

Astarlari arasındag'ı ha'r bir noqatta j_{awisiw} dın' bag'ıtı $\frac{\partial D}{\partial t}$ nın' bag'ıtına parallel bolg'anlıqtan

$$j_{awisiw} = \frac{\partial D}{\partial t}. \quad (263)$$

Awisiw tog'min' bar ekenligi 1864-jılı Maksvell ta'repinen boljap aytilg'an edi (bunday toqtın' bar ekenligi fizikag'a ullı Shotlandiyalı Maksvell ta'repinen postulat tu'rinde engizildi dep aytamız). Bunnan keyin o'tkerilgen eksperimentler awisiw tog'min' bar ekenligin ha'm onın' tıg'ızlıg'ının' hakiyqatında da (263)-an'latpa menen anıqlanatug'inligin tasiyıqladı.

O'tkizgishlik tog'ı ta'repinen magnit maydanının' payda etiliwi

$$\text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{j} \quad (264)$$

ten'lemesi ja'rdeminde beriledi. Joqarıda aytilg'anlardı esapqa alıp (awisiw tog'min' bar ekenligin esapqa alıp) biz (264)-an'latpanı bilayınsha ko'shirip jazamız:

$$\text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{j} + j_{awisiw}. \quad (265)$$

Bul ten'leme Maksvell ten'lemelerinin' biri bolıp tabıladı.

Solay etip biz ha'zir g'ana ko'rgen *o'zgermeli elektr maydanı ta'repinen magnit maydanının payda etiliwi ta'biyattın' fundamentallıq qubılıslarının' biri bolıp tabıladı.*

Maksvell ten'lemeleri sisteması. Joqarıda eksperimentallıq na'tiyjelerdi juwmaqlawdın' saldarınan alıng'an ha'm Maksvell ten'lemeleri sistemasına kiredi dep ayılğ'an ten'lemelerdin' tolıq sistemasın qaraymız. Usı ten'lemeler sistemasın du'ziw menen Maksvell elektr ha'm magnit qubılıslarının' birden bir teoriyasın do'retti. Bul teoriya sol waqıtlardag'ı barlıq eksperimentallıq faktlerdi tu'sindire aldı ha'm bir katar qubılıslardın' orın alatug'ınıg'ın boljap ayttı. Bul boljawlar keyinirek eksperimentte tastıyıqlandı. Maksvell teoriyasının' tiykarg'ı na'tiyjesi vakuumde jaqtılıq tezligi menen tarqalatug'ın elektromagnit tolqınların' bar ekenligi haqqındag'ı juwmag'ı bolıp tabıladı. Bunday tolqınlardı teoriyalıq izertlewler Maksveldi jaqtılıqtın' elektromagnit teoriyasın do'retiwge alıp keldi.

Maksvell teoriyasının' tiykarın Maksvell ten'lemeleri quraydı. Biz olardı Gauss sistemasında (ratsionallastırılmağ'an sistemada) bılayınsha jazamız:

İntegral formada:

$$\oint_L \mathbf{H} d\mathbf{l} = \frac{4\pi}{c} \int_S \left(\mathbf{j} + \frac{1}{4\pi} \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \right) d\mathbf{S}, \quad (\text{M-1})$$

$$\oint_L \mathbf{E} d\mathbf{l} = -\frac{1}{c} \int_S \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} d\mathbf{S}, \quad (\text{M-2})$$

$$\oint_L \mathbf{D} d\mathbf{S} = 4\pi \int \rho dV, \quad (\text{M-3})$$

$$\oint_L \mathbf{B} d\mathbf{S} = 0. \quad (\text{M-4})$$

Differentsial formada:

$$\text{rot } \mathbf{H} = \frac{4\pi}{c} \mathbf{j} + \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}, \quad (\text{M-5})$$

$$\text{rot } \mathbf{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad (\text{M-6})$$

$$\text{div } \mathbf{D} = 4\pi \rho. \quad (\text{M-7})$$

$$\text{div } \mathbf{B} = 0, \quad (\text{M-8})$$

Ratsionallastırılğ'an esaplaw sistemasında (Sİ sistemasında) joqarıdag'ı ten'lemeler bılayınsha jazıladı:

İntegral formada

$$\oint_L \mathbf{H} d\mathbf{l} = \mathcal{J} + \int_S \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} d\mathbf{S}, \quad (\text{M-1a})$$

$$\oint_L \mathbf{E} d\mathbf{l} = - \int_S \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} d\mathbf{S}, \quad (\text{M-2b})$$

$$\oint_L \mathbf{D} d\mathbf{S} = q, \quad (\text{M-3c})$$

$$\oint_L \mathbf{B} d\mathbf{S} = 0. \quad (\text{M-4d})$$

Differentsial formada:

$$\text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}, \quad (\text{M-5a})$$

$$\text{rot } \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad (\text{M-6b})$$

$$\text{div } \mathbf{D} = \rho, \quad (\text{M-7c})$$

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0. \quad (\text{M-8d})$$

Maydan ten'lemeleri dep atalutug'ın bul ten'lemelerdi barlıq makroskopiyaıq elektromagnit qubılısların ta'riplew ushın qollanıw mu'mkin. Al ayqın situatsiyalardı izertlegende materiallıq ortalıqlardıń elektromagnitlik qa'siyetlerin de esapqa alıw kerek boladı. Ko'pshilik jag'daylarda bul

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E}, \quad \mathbf{B} = \mu \mathbf{H}, \quad \mathbf{j} = \lambda \mathbf{E} \quad (\text{M-9})$$

formulaların qollanıw menen a'melge asırıladı. Bul formulalardı materiallıq ten'lemeler dep ataydı. Bul ten'lemelerdegi ε , μ ha'm λ shamaları ortalıqtın' sa'ykes **dielektriklik** ha'm **magnitlik** sin'irgishligi ha'm **elektr o'tkizgishligi** dep ataladı.

Materiallıq ten'lemeler SI sistemasında bılayınsha jazıladı:

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \varepsilon \mathbf{E}, \quad \mathbf{B} = \mu_0 \mu \mathbf{H}, \quad \mathbf{j} = \lambda \mathbf{E} \quad (\text{M-9a})$$

Bul an'latpalardag'ı $\varepsilon_0 \varepsilon$ ha'm $\mu_0 \mu$ ko'beymelerin ortalıqtın' dielektriklik ha'm magnitlik **absolyot sin'irgishlikleri** dep ataydı.

(M-1), (M-5) ten'lemeleri magnit maydanının' o'tkizgishlik ha'm ta'replik toqlar ta'repinen payda etiletug'inlig'in an'g'artadı. O'tkizgishlik ha'm ta'replik toqları magnit maydanının' mu'mkin bolg'an derekleri bolıp tabıladı.

(M-2) menen (M-6) ten'lemeleri elektromagnit induktsiyanı ha'm o'zgeriwshi magnit maydanının' o'zgermeli elektr maydanın payda etetug'inlig'in an'g'artadı.

(M-3) penen (M-7)-ten'lemeler Kulon nızamına sa'ykes keletug'in elektr zaryadı payda etken elektr maydanın ta'ripleydi.

(M-4) penen (M-8)-ten'lemeler statsionar magnit maydanı ushın Maksvell ten'lemesi bolıp tabıladı ha'm olar magnit zaryadların' ta'biyatta joq ekenligin ta'ripleydi. Bul ten'lemeden elektr zaryadların' elektr maydanın payda etetug'inlig'ı sıyaqlı magnit maydanın payda etetug'in magnit zaryadların' joq ekenligin bilemiz. Sonın' menen bul ten'lemeden kernewlilik **B** nın' ku'sh sızıqlarının' basın' da, aqırının' da joq ekenliginen derek beredi. Magnit maydanının' ku'sh sızıqları tuyıq boladı yamasa sheksizlikke ketedi. Bunday sızıqlardıń basın' da (baslang'ısh noqatının' da), aqırının' da (tamam bolatug'in noqatının' da) joq ekenligin anıq.

(M-9) ha'm (M-9a) materiallıq ten'lemeleri materiallıq ortalıqtın' qa'siyetlerin esapqa alatug'in maydanlar ha'm toqlar arasındag'ı qatnastı ta'ripleydi.

Maydan ten'lemeleri superpozitsiya printsipin esapqa alatug'in sızıqlı ten'lemeler bolıp tabıladı.

Maksvell ten'lemelrin du'ziwge alıp keletug'in talqılıwların' hesh qaysısı da bul ten'lemelerdin' durısıg'ının' da'lili dep karawg'a bolmaydı. Pu'tkilley jan'a printsipler eski teoriya ishinde bolmaydı ha'm sol teoriya tiykarında jan'a printsiplerdi keltirip shıg'arıwg'a da bolmaydı. Bunday ko'z-karaslar boyınsha Maksvell ten'lemelerin de keltirip shıg'arıwg'a bolmaydı. Bul ten'lemelerge **ta'jiriybelerde aling'an faktlerdi ulıwmalastırıw jolı menen aling'an elektrodinamikanın' tiykarıg'ı aksiomaları** dep qaraw kerek. Sonlıqtan bul paragrafqa «Maksvell ten'lemeleri» dep emes, al «Maksvell postulatlardı» dep at berildi.

Maydanlar statsionar bolsa $\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} = \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = 0$. Bunday jag'dayda maksvell ten'lemeleri eki toparg'a bo'linedi. Birinshi topardı elektrostatiikanın' ten'lemeleri quraydı:

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = 0, \operatorname{div} \mathbf{D} = 4\pi\rho.$$

Ekinshi topardı magnitostatika ten'lemeleri quraydı:

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \frac{4\pi}{c} \mathbf{j}, \operatorname{div} \mathbf{B} = 0.$$

Bul jag'dayda elektr ha'm magnit maydanları bir birinen g'a'rezsiz ha'm usig'an sa'ykes elektr maydanının' deregi elektr zaryadları, al magnit maydanının' deregi elektr tog'ı bolıp tabıladı.

Elektromagnit qubılısları barlıq inertsiallıq esaplaw sistemalarında birdey bolıp o'tedi (yag'nıy salıstırmalıq printsipin qanaatlandıradı). Usig'an sa'ykes maksvell ten'lemeleri bir inertsiallıq esaplaw sistemasınan ekinshi inertsiallıq esaplaw sistemasına o'tkende eger $\mathbf{H}, \mathbf{B}, \mathbf{E}, \mathbf{D}, \mathbf{j}$ ha'm ρ shamaları Lorents tu'rlendiriwlerine sa'ykes tu'rlendiriletug'ın bolsa o'zinin' formasın o'zgertpeydi (yag'nıy relyativistlik invariant). Elektromagnit protsessleri ushın salıstırmalıq printsipinin' orınlanıwı ken'islik penen waqıtqa bolg'an klassikalıq ko'z-qaraslardı o'zgertiwge ha'm 1905-jılı Eynshteyn ta'repinen salıstırmalıq teoriyasının' do'retiliwine alıp keldi. Maksvell ten'lemelerinin' relyativistlik invariant forması elektr ha'm magnit maydanlarının' bir pu'tin fizikalıq qubılıs ekenligin tastıyıqlaydı.

Maksvell ten'lemelerinen bir qatar saqlanıw nızamları kelip shıg'adı. Olardın' ayırımların qarap o'temiz.

Zaryadtın' saqlanıw nızamı en' fundamentallıq nızamlardın' qatarına kiredi. Bun nızamdı matematikalıq jollar menen mına makroskopiyalıq shamalar bolg'an zaryadtın' tıg'ızlıg'ı ρ ha'm elektr tog'mın' tıg'ızlıg'ı \mathbf{j} arqalı an'latamız. Ortalıqta V ko'lemin qorshap turg'an ıqtıyarlı tu'rde aling'an S tuyıq betin alamız (78-su'wret). V ko'leminen S tuyıq beti arqalı ha'r bir sekunda o'tip atırg'an elektr zaryadların' mug'darı $\oint j_n dS$ integralına ten'. Tap usı shamanı $-\frac{\partial q}{\partial t}$ arqalı da an'latıwg'a boladı (q arqalı V ko'lemindegi zaryad mug'darı belgilengen). Usı eki an'latpanı bir birine ten'lestirip, mınanı alamız

$$\frac{\partial q}{\partial t} = - \oint j_n dS. \quad (\text{M-10})$$

Endi q zaryadının' $q = \int \rho dV$ ekenligin eske alamız ha'm $\oint j_n dS$ betlik integralın belgili formulalar tiykarında ko'lemlik $\int \operatorname{div} \mathbf{j} dV$ integralına tu'rlendiremiz. Na'tiyjede mına an'latpag'a iye bolamız:

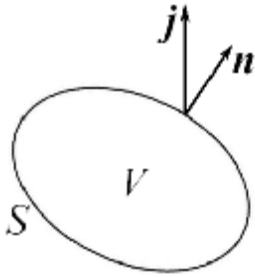
$$\frac{\partial}{\partial t} \int \rho dV = - \int \operatorname{div} \mathbf{j} dV. \quad (\text{M-11})$$

Bul an'latpa qa'legen V ko'lemi ushın orınlanadı. Sonlıqtan

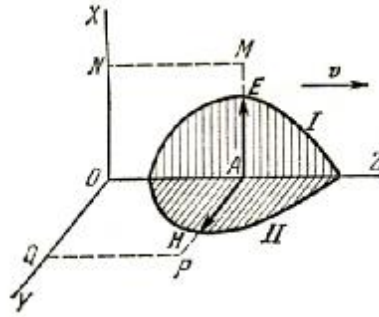
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div} \mathbf{j} = 0. \quad (\text{M-12})$$

(M-10)-(M-12) an'latpalar **makroskopiyalıq elektrodinamikadag'ı elektr zaryadının' saqlanıw nızamı** bolıp tabıladı. Son'g'ı formula **u'zliksizlik ten'lemesi** dep te ataladı. A'llette bul formula

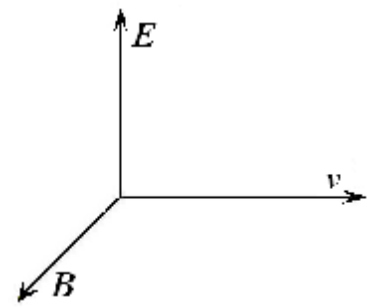
Maksvell ten'lemeler sistemasına kiredi (biraq anıq emes tu'rde, yag'nıy ten'lemeler sistemasında bul ten'leme anıq ko'rinip turqan joq).



78-u'wret. V ko'leminen S tuyıq beti arqalı ha'r bir sekunda o'tip atırǵ'an elektr zaryadların' mug'darı $\oint j_n dS$ integralına ten'.



79-su'wret.



80-su'wret. E, B, v shamaları bag'ııları arasındag'ı baylanıs (olar o'z-ara on' burg'ı qatnasınday qatnasta boladı).

Biz o'zgermeli elektr maydanının' o'zgermeli magnit maydanının', al o'zgermeli magnit maydanının' o'zgermeli elektr maydanın payda etetug'ınılıg'ın bilemiz. Usınday jag'day elektromagnit tolqınların' payda bolıwına alıp keledi. Meyli elektr maydanı I iymeklik penen, al magnit maydanı II iymeklik penen berilgen bolsın (79-su'wret). Elektromagnit maydanının' usı kartınası qanday da bir v tezligi menen qozg'aladı dep boljaymız (bul boljawdın' durıs ekenligi azmazdan keyin ma'nim boladı). Qozg'almaytug'ın eki $OAMN$ ha'm $OQPA$ konturların alamız ha'm Maksvell ten'lemelerin

$$\oint_{OAMN} \mathbf{E} d\mathbf{l} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \Phi_m}{\partial t},$$

$$\oint_{OQPA} \mathbf{H} d\mathbf{l} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \Phi_{el}}{\partial t}$$

tu'rinde jazamız. Bul an'latpalarda Φ_m arqalı magnit ag'ısı, al Φ_{el} arqalı \mathbf{D} vektorının' sa'ykesv kontur arqalı ag'ısı belgilengen. A'piwayılıq ushın AM ta'repin birge ten' etip alayıq. Onda $OAMN$ konturında \mathbf{E} maydanı tek AM ta'repinde nolge ten' emes. Sonlıqtan joqarıdag'ı ten'lemelerdin' birinshisi mına tu'rge enedi:

$$E \equiv E_x = -\frac{1}{c} \frac{\partial \Phi_m}{\partial t}.$$

Tap sol sıyaqlı ekinshi ten'leme mına tu'rge tu'rlenedi:

$$H \equiv H_x = -\frac{1}{c} \frac{\partial \Phi_{el}}{\partial t}.$$

Bizin' boljawlarımız boyınsha dt waqıtı ishinde elektromagnit maydanı $v dt$ aralıg'ına jalıyıldı. $vB dt$ magnit maydanı $OAMN$ konturı sheklerinden, al elektr ag'ısı $vD dt$ bolsa $OQPA$ konurı sheklerinden shıg'ıp ketedi. Usının' saldarınan sol konturlar arqalı Φ_m ha'm Φ_{el} ag'ısları $d\Phi_m = vB dt$, $d\Phi_{el} = vD dt$ shamalarına o'zgeredi. Bunnan

$$\frac{\partial \Phi_m}{\partial t} = vB, \quad \frac{\partial \Phi_{el}}{\partial t} = vD$$

an'latpalarına iye bolamız. Al aldın'g'ı an'latpalardan mına an'latpalardı alamız:

$$E = \frac{v}{c} B, \quad H = \frac{v}{c} D. \quad (\text{M-13})$$

Usı waqıtqa shekem $D = \varepsilon E$ ha'm $B = \mu H$ materiallıq ten'lemeleri paydalanıl'g'an joq edi. Eger olardı itibarg'a alatug'ın bolsaq, onda D ha'm B shamaların jog'altıwg'a boladı. Bul mınanı beredi:

$$E = \frac{v}{c} \mu H, \quad H = \frac{v}{c} \varepsilon E. \quad (\text{M-14})$$

bunnan

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon \mu}}. \quad (\text{M-15})$$

Demek v tezligi ushın nolge ten' emes shekli an'latpa alındı. Demek elektromagnit maydanının ken'islik ha'm waqıt boyınsha o'zgerisi (vozmuneniesi) haqqındag'ı bizin' boljawlarımız durıs bolıp shıqtı degen so'z. Solay etip Maksvell ten'lemeleri v tezligi menen tarqalatug'ın elektromagnitlik tolqın tu'rindegi sheshimge iye bolatug'ın ko'rdik.

(M-13) ten'lemelerin vektorlıq tu'rde bilayınsha jazamız:

$$E = \frac{1}{c} [vB], \quad H = \frac{1}{c} [vD]. \quad (\text{M-16})$$

Bul jerde v vektorı elektromagnit tolqınının' tek tarqalıw tezliginin' san shaması bolıp qoymay, onın' bag'ıtın da beredi. Bul an'latpalarda E, H ha'm v vektorları bag'ıtları arasında on' burg'ı qatnasının' bar ekenligin bildiredi (80-su'wret). Olar o'zara perpendikulyar. Sonlıqtan elektromagnit tolqınlarının' (elektromagnit vozmunenielerdin') ko'ldenen' tolqınlar ekenligin an'g'aramız. Eger E yamasa H vektorının' bag'ıtın qarama-qarsı bag'ıtqa o'zgertse, onda tolqınının' tarqalıw bag'ıtı da qarama-qarsı bag'ıtka o'zgeredi.

E yamasa H vektorı ken'islikten' ha'r bir noqatında bir tegislikte jatatug'ın bolsa, onda elektromagnit tolqının *sızıqlı polyarizatsiyalang'an tolqın* dep ataymız.

(M-14)-ten'lemeden mınalardı alamız:

$$\varepsilon E^2 = \mu H^2. \quad (\text{M-17})$$

Bul an'latpa (juwırıwshı) tegis elektromagnit tolqınında qa'legen waqıt momentindegi elektr energiyasının' magnit energiyasına ten' ekenligin ko'rsetedi. Tap usınday awhal mexanikalıq juwırıwshı tolqınlarda da orın aladı. Bul jerde de tolıq energiya o'z-ara ten'dey bolg'an kitenikalıq ha'm potentsial energiyalardan turadı. Tap usınday qa'siyetlerge *superpozitsiya printsipine bag'mıwshı* barlıq vozmunenielere iye.

Vakuimde $\varepsilon = \mu = 1$. Sonlıqtan (M-15)-an'latpadan $v = c$ kelip shıg'adı. Biz joqarıda Vilgelm Veber ha'm Rudolf Kolraush ta'repinen elektrodinamikalıq turaqlı c nın' san ma'nisin tabıw boyınsha o'tkerilgen ta'jiriybelerdin' hakiyqatında da elektrodinamikalıq turaqlı c nın' san ma'nisinin' jaqtılıqtın' vakuumdegi tarqalıw tezligine ten' bolatug'ınlıg'ın atap o'tken edik.

Energiya ha'm energiya ag'ısı. Maksvell ten'lemelerin energiyanın' saqlanıw nızamın an'latıwshı an'latpa menen tolıqtırıw kerek.

Meyli elektromagnit maydanı qozdırılutug'ın ortalıq qozg'almaytugin bolsın. Elektromagnit maydanı o'zgergende ha'm ko'lem birligi arqalı toq o'tkende elementar sırtqı jumıs islenedi:

$$\delta A^{sirtqi} = \frac{1}{4\pi} (\mathbf{E} d\mathbf{D} + \mathbf{H} d\mathbf{B}) + (\mathbf{jE}) dt. \quad (\text{M-18})$$

Bul an'latpanın' ayırım qolılıwshıları menen elektrostatikanı ha'm turaqlı toqlardıń magnit maydanı haqqındag'ı ta'limattı u'yrengenimizde tanısqań edik. Magnitleniw jumısı $\frac{1}{4\pi} (\mathbf{H} d\mathbf{B})$ an'latpası alıng'anda tsirkulyatsiya haqqındag'ı teorema awısıw tog'ı esapqa alınbastan qollanıldı. Biraq bul jag'day (awısıw tog'ın esapqa almaw) o'zgermeli elektromagnit maydanlarına o'tkende a'hmiyetke iye bolmay qaladı.

(M-18) jumısı ishki energiyanın' o'simi ushın jumsaladı (tek jıllılıq o'tkizgishliktin' esabınan ko'lem birliginen shıg'ıp ketetug'ın jıllılıq esapqa alınbag'ın). Jıllılıq o'tkizgishti nolge ten' dep esaplap jıllılıqtın' shıg'ıp ketiwin esapqa almawımızg'a boladı. Solay etip u arqalı qarap atırğ'an ortalıqtın' ko'lem birliginnin' ishki energiya belgilengen bolsa, onda $\delta A^{sirtqi} = du$ yamasa

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{1}{4\pi} (\mathbf{E} \dot{\mathbf{D}} + \mathbf{H} \dot{\mathbf{B}}) + (\mathbf{jE}) \quad (\text{M-19})$$

Biz u ishki energiyanın' tıg'ızlıg'ı haqqında ga'p etkenimizde ishki energiyanın' tek elektromagnit bo'liminin' ishki energiya emes, al barlıq ishki energiyanın' tıg'ızlıg'ın tu'sinemiz. Sonlıqtan (M-19)-an'latpa barlıq ortalıqlar ushın, sonın' ishinde ferromagnit ha'm ferroelektrik ortalıqlar ushın da durıs. Bul an'latpa Djoul jıllılıg'ı menen bir qatarda ferromagnit ha'm ferroelektrik gisteresislerinin' jıllılıg'ın da o'z ishine aladı. (M-5a) ha'm (M-6b) Maksvell ten'lemelerin paydalanıp (M-19) dın' on' ta'repin mına tu'rge alıp kelemiz:

$$\mathbf{E} \left(\frac{1}{4\pi} \dot{\mathbf{D}} + \mathbf{j} \right) + \frac{1}{4\pi} \mathbf{H} \dot{\mathbf{B}} = \frac{c}{4\pi} (\mathbf{E} \text{ rot } \mathbf{H} - \mathbf{H} \text{ rot } \mathbf{E}). \quad (\text{M-20})$$

Matematikalıq fizikadan mınaday vektorlıq ten'lik orınlı ekenligin bilemiz:

$$\mathbf{E} \text{ rot } \mathbf{H} - \mathbf{H} \text{ rot } \mathbf{E} = -\text{div} [\mathbf{EH}] \quad (\text{M-21})$$

Usıg'an baylanısı

$$\mathbf{S} = \frac{c}{4\pi} [\mathbf{EH}] \quad (\text{M-22})$$

belgilewin kirgizemiz (bul an'latpa birinshi ret Poynting ta'repinen engizildi). Bunday jag'dayda (M-19) dın' mına tu'rge engenligin ko'riwge boladı:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \text{div } \mathbf{S} = 0 \quad (\text{M-23})$$

Bul ten'lemeni fizikalıq jaqtan tu'sindiriw ushın onı u'zliksizlik ten'lemesi menen salıstıramız:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div } \mathbf{j} = 0. \quad (\text{M-12})$$

Bul ten'lemede ρ shaması zattın' yamasa elektr zaryadların' tıg'ızlıg'ın, al \mathbf{j} shaması bolsa zattın' ag'ısının' tıg'ızlıg'ın yamasa elektr tog'ının' tıg'ızlıg'ın an'g'artadı.

(M-23)- penen (M-12)-an'latpalar arasındag'ı uqsaslıqtan biz energiyanın' ken'islikte suyıqlıq ta'rizli bolıp ag'atug'inlig'ın ko'remiz. Qala berse \mathbf{S} shaması elektromagnit energiyasının' ag'ısının' tıg'ızlıg'ı bolıp tabıladı. Eger (M-23)-an'latpag'a ko'rgizbelirek tu'r beriw ushin onı integral formada jazıwımız kerek:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V u dV = \oint S_n dF. \quad (\text{M-24})$$

Bul an'latpada V arqalı tuyıq F beti menen shegaralang'an ortalıqtag'ı iqtıyarlı tu'rde aling'an ko'lem, \mathbf{n} bolsa usı betke tu'sirilgen ishki normal. Bunday formada ten'leme mınanı an'latadı: *V ko'leminde F beti arqalı sırttan kiriwshi elektromagnit energiyasının' esabınan ishki energiyanın' o'simi orın aladı.*

Ken'isliktegi energiya ag'ısı haqqındag'ı birinshi ideya N.A.Umov (1846-1915) ta'repinen 1874-jılı berildi. Sonlıqtan energiya ag'ısının' tıg'ızlıg'ı vektorın **Umov vektori** dep ataymız (a'dette energiya ag'ısının' fizikalıq ta'biyatın aykınlastırmaı-aq Umov vektori haqqında ga'p etiledi). Bul vektor ushin ayqın an'latpa Umov ta'repinen serpimli ortalıqlar menen jabısqaq suyıqlıqlardı izertlew barısında aling'an edi. Aradan 11 jıl o'tkennen son' Umovtın' bul ideyaları Poynting (1852-1914) ta'repinen elektromagnit energiyası ushin qollanıldı (joqarıda M-22-formulanın' Poynting ta'repinen aling'anlıg'ı atap o'tilip edi, sonlıqtan \mathbf{S} vektorın Poynting vektori dep ataydı). **Elektrodinamikadag'ı energiyanın' saqlanıw nızamın an'g'artatug'ın** (M-23)- ha'm (M-24)-an'lapalar Umov-Poynting teoreması dep ataladı.

Maksvell ten'lemeleri og'ada ko'p sandı qubılıslardı ta'ripleydi. Sonlıqtan olar elektrotexnika menen radiotexnikanın' tiykarında jatadı. Sonın' menen birge olar ha'zirgi waqıttag'ı fizikanın' mınaday a'hmiyetli tarawların' rawajlanıwında a'hmiyetli orındı iyeledi:

plazma fizikası menen basqarılatug'ın termoyadrolıq sintez mashqalası,
magnit gidrodinamikası,
sızıqlı emes optika,
zaryadlang'an bo'lekshelerdi tezletkishlerdi konstruktsiyalaw,
astrofizika ha'm basqalar.

«Tastıyıqlayman»

Oqıw isleri boyınsha prorektor

M.İbragimov

2008-jıl 25-avgust

Fizika-texnika fakultetinin' fizika qa'nigeliginin' (Ta'lim bag'dari: **5440100 - Fizika**) 1-kurs studentleri ushin

«Elektr ha'm magnetizm»

pa'ni boyinsha

SABAQLARG'A MO'LSHERLENGEN OQIW PROGRAMMASI

Saatlar sanı 302.

Sonın' ishinde:

Lektsiyalar 40 saat.

A'meliy sabaqlar 36 saat.

Laboratoriyalıq sabaqlar 76 saat.

O'z betinshe islew din' ko'lemi 150 saat.

Pa'nnin' sabaqlarg'a mo'lshterlengen oqiw programmasi Qaraqalpaq ma'mleketlik universitetinin' ilimiy-metodikaliq ken'esinin' 2008-jıl 25-avgust ku'ngi ma'jilisinde qarap shıg'ıldı ha'm maqullandı. Protokol nomeri 1.

Du'ziwshi ulıwma fizika kafedrasının' baslıg'ı, fizika-matematika ilimlerinin' kandidati, professor B.Abdikamalov

Sınshılar:

B.Jollıbekov, A'jiniyaz atındag'ı No'kis ma'mleketlik pedagogikalıq institutının' rektori, fizika-matematika ilimlerinin' kandidati, dotsent.

B.Narimbetov, O'zbekstan İlimler Akademiyasının' Qaraqalpaqstan bo'limi baslıgının' orınbasarı, fizika-matematika ilimlerinin' kandidati.

Pa'nnin' sabaqlarg'a mo'lshterlengen oqiw programmasi fizika-texnika fakultetinin' ilimiy ken'esinin' 2008-jıl «_____» avgustındag'ı ma'jilisinde talqılandı ha'm maqullandı. Protokol sanı 1.

İlimiy ken'es baslıg'ı

Q.İsmailov

Kelisildi:

Kafedra baslıg'ı

B.Abdikamalov

2008-jıl 25-ıron.

2008-2009 oqıw jılı ushın «Elektr ha'm magnetizm» pa'ni boyınsha sabaqlarg'a mo'lsheirlengen oqıw programmasına o'zgertiwler ha'm qosımshalar kirgiziw haqqında.

Ta'lim bag'darı: **5440100 – Fizika** boyınsha «Elektr ha'm magnetizm» pa'ni boyınsha sabaqlarga mo'lsheirlengen oqıw programmasına to'mendegidey o'zgerisler ha'm qosımshalar kirgizilmekte:

O'zgerisler ha'm qosımshalar kirgiziwshiler:

(Familiyası, atı, lawazımı, ilimiy da'rejesi ha'm ilimiy atag'ı)

(qolı)

(Familiyası, atı, lawazımı, ilimiy da'rejesi ha'm ilimiy atag'ı)

(qolı)

Sabaqlarg'a mo'lsheirlengen oqıw programması fizika-texnika fakulteti ilimiy ken'esinde talqılandı ha'm maqullandı. Protokol sanı _____.

İlimiy ken'es baslıg'ı

Q.İsmailov

Elektr ha'm magnetizm pa'ni boyınsha a'meliy sabaqlar

I. Elektrostatika

Zaryadlardin' o'z-ara ta'siri nizamına, elektr maydanı kernewliligi superpozitsiyası usılı ja'rdeminde esaplar shıg'arıw. Ostrogradskiy - Gauss teoremasın qollanıwg'a baylanıslı ma'seleler sheshiw. Potentsial ha'm potentsiallar ayırmasın esaplaw. Elektr maydanda islengen jumıs.

Elektr sıyımlıg'ı. Kondensatorlardin' sıyımlıg'ın esaplaw. Elektr maydanı energiyası.

II. Turaqlı elektr tog'ı

Shinjır ushastkası ushın Om nızamı. Qarsılıqlar ha'm olardin' temperaturag'a g'a'rezligi. Tuyıq шинjır ushın Om nızamı. Tarmaqlang'an шинjarlar. Kirxgoftın' I ha'm II qa'delerin qollanıw. Elektr tog'ının' jumısı ha'm quwatı, jıllılıq ta'siri. Djoul-Lents nızamı. Toq derekleri ha'm olardin' paydalı jumıs koeffitsienti.

III. Toqlardin' magnit maydanı

Shen'ber ta'rizli toqtın' orayındag'ı ha'm ko'sheri boyında aling'an iqtıyarlı noqattag'ı magnit maydanın esaplaw. Tuwrı toqtın' a'tırapında iqtıyarlı tu'rde aling'an noqattag'ı magnit maydanının' kernewligin esaplawg'a baylanıslı ma'selerdi sheshiw. Magnit maydanı kernewliginin' bag'ıtların anıqlaw. Solenoid, toroidlardin' magnit maydanının' kernewligin esaplaw. Elektr ha'm magnit maydanlardag'ı zaryadlang'an bo'lekshelerdin' qozg'alısı.

IV. Elektromagnit induksiya. O'zlik induksiya qubılısı

Induktivliklerdi ha'r qıylı dara jag'daylar ushın esaplaw. Magnit maydanı energiyası.

V. Elektr terbelisleri

Erkin elektr terbelisleri. Sıyımlıq, induktivlik ha'm aktiv qarsılıqlarlan ibarat terbelis konturlardin' da'wiri ha'm jiyiligi. Ma'jbu'riy elektr terbelisleri. O'zgermeli toq шинjırındag'ı sıyımlıq, induktivlik ha'm aktiv qarsılıq. O'zgermeli toq шинjırı ushın Om nızamı. Toq ku'shi menen kernewdin' effektiv ma'nislerin esaplaw. O'zgermeli toqtın' jumısı ha'm jıllılıq ta'sirleri. Kompleks qarsılıqlar. O'zgermeli toq шинjırındag'ı qarsılıqlardı esaplaw. Aktiv ha'm reaktiv qarsılıqlar.

Elektr ha'm magnetizmge tiyisli laboratoriyalıq jeumislardin' dizimi

1. Turaqlı toq ko'piri ja'rdeminde qarsılıqlardı o'lshew;
2. Kishi qarsılıqlardı o'lshew;
3. U'iken qarsılıqlardı o'lshew;
4. Tangens-Bussol ja'rdeminde Jerdin' magnit maydanının' gorizont bag'ıtındag'ı qurawshısın anıqlaw;
5. Mistın' elektroximiyalıq ekvivalentin anıqlaw;
6. Turaqlı toq ja'rdeminde galvanometrдин' ishki qarsılıg'ın esaplaw;
7. Galvanikalıq elementtin' elektr qozg'awshı ku'shin kompensatsiya usılı menen anıqlaw;
8. Kondensatorдин' sıyımlıg'ın ko'pir usılı menen o'lshew;
9. Elektrolitlik vanna ja'rdeminde elektrostatikalıq maydandı u'yreniw;
10. Termoparalardı graduировkalaw;
11. Elektrolitlerдин' qarsılıg'ının' temperaturalıq koeffitsentin anıqlaw;

12. Mistın' qarsılıg'ının' temperaturalıq koeffitsentin anıqlaw;
 13. Sım tu'telerdin' o'z-ara induksiya koeffitsentin ampermetr ha'm voltmeter usılı menen anıqlaw.
 14. O'zgermeli toq ushın Om nızamın tekseriw;
 15. Solenoid ko'sherindegi magnit maydanının' kernewliginin' tarqalıwın (bo'listiriliwin) tekseriw.
 16. Ferromagnittegi gisterezisti ballistikalıq usıl menen tekseriw.
 17. Elektrodinamikalıq turaqlını anıqlaw
 18. Kondensatorlardın' zaryadlanıw ha'm razryadlanıw protsesslerin u'yreniw.
 19. Relaksatsiyalıq terbelis ja'rdeminde u'lken karsılıq ha'm sıyımlıqlardı o'lsheiw.
 20. Magnitoelektrik sistemadag'ı galvanometrді u'yreniw.
 21. Toqlar rezonansın u'yreniw
 22. Kernewler rezonansın u'yreniw
 23. Ampermetr ha'm voltmeterdi graduировкаlaw.
 24. Tomson usılı menen (qos ko'pir ja'rdeminde) metall o'tkizgishlerdin' kishi qarsılıqların anıqlaw.
- Qosımsha:** Joqarıda atları atalıp o'tilgen laboratoriyalıq jumıslardın' keminde onının' orınlanıwı sha'rt.

O'z betinshe jumıslar temalarınn' dizimi

- Laboratoriyalıq ha'm a'meliy sabaqlarg'a teoriyalıq tayarlıq ko'riw.
- Elektr maydanın esaplaw. Ostrogradskiy-Gauss teoreması ja'rdeminde dara jag'daylar ushın elektr maydanın esaplaw.
- Potentsiallar ayırmasın dara jag'daylar ushın esaplaw.
- Elektr maydanın ta'jiriybede u'yreniw. Elektrolitlıq vanna usılı.
- Kondensatorlardın' sıyımlıg'ın dara jag'daylar ushın esaplaw.
- Pezoelektrikler ha'm olardıń qollanıwı. Segnetoelektrikler (Ferroelektrikler).
- Elektr tog'ının' xarakteristikaları. Toqtın' tıg'ızlıg'ı. Elektr tog'ının' ta'sirleri. Shunt qarsılıqtı tan'lap alıw. Qarsılıqlardı o'lsheiw usılları.
- Kvazistatsionar toqlar.
- Elektron shıralar ha'm olardıń qollanıwı.
- Yarım o'tkizgishlerdin' xalıq xojalıg'ındag'ı qollanıwı.
- Elektrolitlerdegi elektr tog'ı. Faradey nızamları.
- Gazlerdegi elektr tog'ı. Plazmanın' elektr o'tkizgishligi.
- Kontakt qubılısları.
- Termoelektrik qozg'awshı ku'sh. Termoparalar.
- Bio-Savara-Laplas nızamın dara jag'daylar ushın qollanıw.
- Magnit materiallardın' qollanıwı.
- Menshikli elektr terbelisleri. Terbeliw da'wiri ha'm jiyiligi.
- Kompleks shamalar. Kompleks qarsılıqlar. O'zgermeli toq shınjırındag'ı qarsılıqlardı dara jag'daylar ushın esaplaw.
- Elektromagnit tolqınlardı qollanıw.

Tiykarg'ı a'debiyatlar

1. Kalashnikov S.G. Umumiy fizika kursi. Elektr. Oliy wquv yurtlardin' fizika ixtisosi bo'yinsha darslik. «Wqituvshi» baspası, Tashkent. 1979. 615 b.
2. Sivuxin D.V. Kurs obhey fiziki.t.III, Elektrishestvo, Ushebnoe posobie dlya studentov fizisheskix spetsialnostey visshix ushebnix zavedeniy. İzdatelstvo «Nauka». Moskva. 1977. 687 s.
3. Saxarov D.İ. Fizika masalalari twplami. Oliy wquv yurtlari ushin qwllanma. «Wqituvshi» baspası. Tashkent. 1965 365 b.
4. Volkenshteyn V.S. Umumiy fizika kursidan masalalar twplami. Oliy texnika wquv yurtlari ushin wquv qwllanma. «Wqituvshi» baspası. Tashkent. 1969. 440 b.
5. Fizikadan praktikum. Elektr ha'm optika. V.İ.İveronova taxriri ostida. Toshkent. 1968 y. (Fizisheskiy praktikum. Mexanika i molekulyarnaya fizika. Pod redaktsiey professora V.İ.İveronovoy. İzdatelstvo «Nauka». Moskva. 1967. 354 s.)
6. Buribaev İ., Karimov R. Elektr ha'm magnetizmdan fizpraktikum. Universitet. Tashkent. 2002 yil.

Qosimsha a'debiyatlar

1. Tamm İ.E. Osnovi teorii elektrishestva. Ushebnik dlya studentov fizisheskix fakultetov universitetov. İzdatelstvo «Nauka». Moskva. 1966. 624 s.
2. Savelev İ.V. Umumiy fizika kursi. II kism. Oliy texnika wquv yurtlari ushin qwllanma. «Wqituvshi» baspası. Tashkent. 1976, 450 b.
3. Zisman G.A., Todes O.M. Kurs obhey fiziki. Tom II, Elektrishestvo, Ushebnoe posobie dlya studentov fizisheskix spetsialnostey visshix ushebnix zavedeniy. İzdatelstvo «Nauka». Moskva. 1972. 360 s.
4. Matveev A.N. Elektrishestvo i magnetizm. İzdatelstvo «Visshaya shkola». Moskva. 1983. 464 s.
5. Shtrauf E.A. Kurs fiziki. Tom II. Elektrishestvo i magnetizm. Ushebnik dlya visshix texnisheskix ushebnix zavedeniy. Ledingrad. 1968.
6. Buribaev İ. Elektr ha'm magnetizm. Ma'ruzalar matni. Universitet. 2000 y.
7. İrodov İ.E. Zadashi po obhey fizike. Ushebnoe posobie dlya VUZov. İzdatelstvo «Nauka». Moskva. 1979. 367 s.
8. Gurev L.G. Kortnev A.V. i dr. Sbornik zadash po obcemu kursu fiziki, Ushebnoe posobie dlya VUZov. Moskva. İzdatelstvo «Visshaya shkola». 1972. 432 s.
9. Sbornik zadash po obcemu kursu fiziki. pod.red. Yakovleva İ.A. Ushebnoe posobie dlya studentov fizisheskix spetsialnostey VUZov. Moskva. İzdatelstvo «Nauka». 1977. 272 s.
10. Andreev İ.S., Sultanova K.A. Fizikadan praktikum."Elektr ha'm magnetizm". «Wqituvshi» baspası, Tashkent. 1976 y.
11. Karimov R.K., Buribaev İ.B., İOsupov R., Sagatova X., "Elektr ha'm magnetizm" bwlimga oid laboratoriya ishlarini esaplawda kishik EXM ni qwllash. Tashkent, Universitet. 1990 y.
12. Zaydel İ. Elementarnie otsenki oshibok izmereniy. Moskva. 1959.
13. Karimov R.K., İOsupov R. A. İspolzovanie PEVM v ushebnix laboratoriyax po obcemu kursu fiziki. Universitet. Tashkent. 1990.
14. B.A.Abdikamalov. «Elektr ha'm magnetizm» kursı boyinsha lektsiyalar tekstleri. No'kis. 2008 (adresı www.abdikamalov.narod.ru).

Sabaqlarg'a mo'lsheirlengen oqiw bag'larlamasi

Lektsiyaliq sabaqlar ko'lemi 40 saat. A'meliy sabaqlar 36 saat.

	Temalar atları	Lektsiyaliq saatlar sanı	A'meliy saatlar sanı	Paydalanıla- tug'in a'debiyatlar
1	Kirisiw. Elektr ha'm magnetizm pa'ni. Pa'nnin' maqseti. Pa'nnin' wazıypası, metodikalıq ko'rsetpeler, bahalaw kriteriyleri. Pa'nnin' qa'nigeler tayarlawda tutqan ornı. Predmetler aralıq baylanısı. Elektr ha'm magnetizmge tiyisli ulıwmalıq mag'lıwmatlar.	2		
2	Elektrostatika. Elektr zaryadlarının' o'z-ara ta'sirlesiw nızamı. Kulon nızamı. Noqatlıq zaryad haqqında tu'sinik. Zaryadların' xalıq aralıq (SI) ha'm SGS birlikler sistemasındg'ı o'lsheir birlikleri. Zaryadların' sıziqlı, betlik ha'm ko'lemlik tıg'ızlıqları. Elektr maydanı. Elektr maydanı kernewligi. Superpozitsiya printsipi. Elektr dipoli.	2	2	
3	Elektr maydanın grafikalıq ta'riplew. Ku'sh sıziqları. Elektrostatikalıq maydanının' induktsiya vektorı ha'm onın' ag'ısı. Elektr maydanın esaplaw. Ostrogradskiy-Gauss teoreması. Ostrogradskiy-Gauss teoremasının' differentsial ko'rinisi. Elektrostatikalıq maydanda islengen jumıs.	2	2	
4	Potentsial. Potentsiallar ayırması. Potentsiallar gradienti. Ekvipotentsial betler. Elektrostatikanın' ulıwmalıq ma'selesi. Puasson ha'm Laplas ten'lemeleri.	2	2	
5	Elektr maydanındag'ı o'tkizgishler. Elektr sıyımlıg'ı. Sıyımlıq birlikleri. Kondensatorların' sıyımlıg'ı. Elektr maydanı energiyası ha'm onın' tıg'ızlıg'ı.	2	2	
6	Elektr maydanındag'ı dielektrikler. Dielektriklerdi polyarizatsiyalaw. Polyarizatsiya vektorı. Ortalıqtın' dielektriklik sin'irgishligi ha'm qabıllawshılıg'ı. Eki dielektrik ortalıq shegarasındag'ı polyarizatsiya ha'm induktsiya vektorları ha'm elektr maydanı kernewligi vektorının' u'zilisi. Dielektriklik kristallardın' elektrlik qa'siyetleri.	2	2	
7	Turaqlı elektr tog'ı. Elektr tog'mın' xarakteristikaları. O'tkizgishlik elektr tog'ı. Qarsılıq ha'm onın' temperaturag'a g'a'rezliligi. Om nızamının' differentsial ko'rinisi. Tuyıq shınjır ushın Om nızamı.	2	2	
8	Elektr qozg'awshı ku'sh. Tarmaqlang'an shınjırlar. Kirxgof qa'deleri. Tarmaqlang'an shınjırlardı esaplawdın' o'zine ta'n o'zgeshelikleri. Elektr tog'mın' jumısı, quwatı ha'm jıllılıq ta'sirleri.	2	2	

	Toq dereginin' paydalı jumıs koeffitsenti.			
9	Elektr o'tkizgishlerdin' ta'biyatı. Metallardag'ı elektr o'tkizgishlik. Rike, Mandelshtam-Papaleksi ha'm Stioart-Talmen ta'jiriybeleri. Metallardag'ı elektr o'tkizgishliktin' klassikalıq elektron teoriyası tiykarında Om ha'm Djoul-Lents, Videman-Frants nızamların tu'sindiriw.	2	2	
10	Vakuumdag'ı elektr tog'ı. Termoelektronlıq emissiya. Volt-amperlik xarakteristikası. Toyınıw tog'ının' temperaturag'a baylanışlı ekenligi. Yarım o'tkizgishler. Yarım o'tkizgishlerdin' elektr o'tkizgishligi. Taza ha'm aralaspalı elektr o'tkizgishlik. Asa o'tkizgishlik ha'm onın' tiykarg'ı qa'siyetleri.	2	2	
11	Suyıqlıqlardag'ı ha'm gazlerdegi elektr tog'ı. Suyıqlıqlardag'ı ha'm gazlerdegi elektr tog'ının' ta'biyatı. Elektroliz ha'm elektrolitlik dissotsiatsiya. Faradeydın' elektroliz nızamları ha'm elementar zaryad. Galvanikalıq elementler ha'm akkumulyatrolar. Ionizatsiya ha'm rekombinatsiya. Plazma.	2	2	
12	Toqlardın' magnit maydanı. Toqlardın' o'z-ara magnitlik ta'siri. Magnit maydanının' induksiya vektorı. Toq elementi. Bio-Savara-Laplas nızamı. Magnit maydanının' kernewligi. Tuwrı toq ha'm aylanbalı toqlardın' magnit maydanlarının' kernewliklerin esaplaw. Solenoidtın' ko'sheri boyınsha magnit maydanının' kernewliginin' tarqalıwı. Parallel toqlardın' o'z-ara magnitlik ta'sirlesiwı.	2	2	
13	Magnit ag'ımı. Magnit maydanındag'ı toqlı kontur. Magnit maydanı kernewliginin' tsirkulyatsiyası. Magnit maydanındag'ı toq o'tip turg'an o'tkizgish. Amper ku'shi. Magnit maydanında qozg'alıwshı zaryadlang'an bo'lekshege ta'sir etiwshı ku'sh. Lorents ku'shi. Xoll effekti. Qozg'alıstıg'ı zaryadlang'an bo'lekshenin' magnit maydanı.	2	2	
14	Magnetikler. Zatlardın' magnitlik qa'siyetleri. Molekulalıq toqlar. Magnitleniw vektorı. Diamagnetikler, paramagnetikler, ferromagnetiklar. Para- ha'm diamagnetizmdi tu'sindiriw.	2	2	
15	Ferromagnetikler. Ferromagnetiklerdi magnitlew protsessi. Gisterezis qurıg'ı. Qaldıq magnitleniw ha'm koertsitiv ku'sh. Ferromagnetizmdi tu'sindiriw. Ferromagnitlik domenlar haqqında tu'sinik.	2	2	
16	Elektromagnitlik induksiya qubılısı. Elektromagnitlik induksiya. Faradey ta'jiriybeleri. Lents nızamı. Elektromagnit induktsiyanın' tiykarg'ı nızamı. O'zlik induksiya qubılısı.	2	2	

17	Induktivlik. Solenoidtin' induktivligi. Ortaliqtin' magnit sin'irgishligi. O'zlik induksiya na'tiyjesinde shinjirdag'ı toqtin' jog'alıwı ha'm tikleniwi. Magnit maydanının' energiyası. O'z-ara induksiya.	2	2	
18	Elektr terbelisleri. Menshikli elektr terbelisleri. So'niwshi elektr terbelisleri. Menshikli elektr terbelislerinin' ten'lemesi. So'niw bolmag'andag'ı elektr terbelisleri. Ma'jbu'riy elektr terbelisleri. O'zgermeli toq. O'zgermeli toq generatorı.	2	2	
19	O'zgermeli elektr tog'ı shinjirındag'ı aktiv qarsılıq, sıyımlıq ha'm induktivlik. Vektorlıq diagrammalar usılı. O'zgermeli toqlar ushın Om nızamı. O'zgermeli toqtin' quwatı ha'm jumısı. Toq ha'm kernewdin' effektivlik ma'nisleri. O'zgermeli toq shinjirındag'ı tarmaqlanıw. Kernew ha'm toqlar rezonansı. Elektr ha'm magnit maydanlarının' o'z-ara baylanıslı ekenligi. Elektromagnit maydan.	2	2	
20	Maksvell postulatları. Awısıw tog'ı. Maksvell ten'lemeleri ha'm olardın' ta'jiriybelerden kelip shıg'atug'm tiykarları. Maksvell ten'lemelerinin' fizika ilimindegi tutqan ornı. Elektromagnit tolqınlar. Elektromagnit tolqınlardıń qa'siyetleri, olardıń ko'ldenen' tolqın ekenligi. Tolqın energiyası. Poynting vektorı. Elektromagnit tolqınlardı payda etiw. Gerts ta'jiriybeleri.	2		
JA'Mİ		40 saat	36 saat	