**9-lekciya. Kvant optikası.**

**Reje:**

1. Jıllılıq nurlаnıwı. Аbsоlyut qarа deneniń nurlаnıw nızamları.
2. Fоtоeffеkt. Sırtqı fоtоeffеkttiń nızamları hám kvant teoriyası.
3. Jaqtılıq basımı.
4. Kоmptоn effеkti.

**1. Jıllılıq nurlаnıwı. Аbsоlyut qarа deneniń nurlаnıw nızamları.**

         Tábiyatta nur shıǵıw hádiyseleri júdá kóp bolıp tabıladı.  Nurlanıw xımıyalıq reakciya nátiyjesinde,  gazlardan elektr tokı ótiw processinde,  qattı denelerdi tezletilgen elektronlar dástesi menen atqılaǵanda hám aqır-aqıbette deneler temperaturasın kótergenımızde payda boladı.

         Nurlanıwdıń eń kóp tarqalǵan túri-denelerdi qızdırıwda payda bolatuǵın nurlanıw bolıp tabıladı.  Bul ıssılıq nurlanıwı dep ataladı. Issılıq nurlanıwı qálegen temperaturada vujudǵa kelip,  tómen temperaturalarda infraqızıl nur kórinisinde,  joqarı temperaturalarda qızǵısh,  sarǵalaq hám aq jaqtılıq nurlar kórinisinde kórinedi.

         Issılıq nurlanıwı procesi deneniń temperaturası menen teń salmaqlılıq jaǵdayda júz beredi. Bul halda,  deneniń temperaturası artıwı menen, onıń nurlanıw jedelligi da artıp baradı. Teń salmaqlılıqda bolǵan jaǵday hám processlerge termodinamıka nızamların qollaw múmkin.

         Issılıq nurlanıwın sıpatın súwretlew ushın bazı shamalerdi anıqlap alamız.

         Nurlanıp atırǵan deneniń birlik betinen clip_image080 bárshe baǵıtlar boylap  *Ω* = 2*π*  keńislikdegi múyesh)  shıǵıp atırǵan energiya aǵımı deneniń energiyalıq jaqtırtıwshańlıǵı Re dep ataladı.

         Qandayda bir betke nurlanıw aǵımı túskende bul nurlanıwdıń bir bólegi betinen shaǵılısadı,  bir bólegi sınıp ótip ketedi hám qalǵan bólegi denede jutıladı.

         Demek túsiwshi nurlanıw aǵımı hár úsh aǵımlar jıyındısınan ibarat esaplanadı:

**Fo=Fsh+Fju+Fs**

      .                                                                                      Ápiwayı ózgerislerdi orınlasaq tómendegi ańlatpaǵa iye bolamız

clip_image082

Bul jerde clip_image084 -deneniń nur shaǵılıstırıw koefficienti,  clip_image086 -nur jutıw koefficienti hám clip_image088 -nur ótkeriw koefficienti dep ataladı.

         Móldir denelerde,  bul koefficientlerdiń jıyındısı 1 ge teń boladı

clip_image090  ,                                (1.1)

Egerde dene nur ótkermese D = 0,

clip_image092

ge teń boladı. Egerde deneniń jutıw koefficienti de nolge teń bolsa,  yaǵnıy a = 0, ol halda

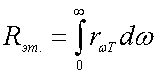
clip_image094

teń bolıp,  dene absolyut aq dene dep ataladı hám túsiwshi nurlanıwdıń barlıǵın shaǵılıstıradı.

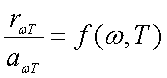
        Egerde a = 1 shárt orınlansa,  bunday dene absolyut qara dene dep ataladı.

        Egerde,   *ρ*  birden kishi bolıp, onıń nur jutıw qábileti hámme jiyilikler ushın birdey bolsa  (a = const) ,  bunday dene kúlreń dene dep ataladı.

         Tájiriybeden málim bolıwınsha,  denelerdiń nur shıǵarıw qábileti  (r)  deneniń temperaturasına hám nurlanıw jiyiligine baylanıslı.  Nur shıǵarıw qábileti málim bolǵan halda energiyalıq jaqtırtıwshańlıqtı esaplaw múmkin:

,                            (1.2)

         Qálegen deneniń nur shıǵarıw hám nur jutıw qábiletleri ortasında anıq ǵárezlilik  Kirxgof nızamı dep ataladı:  nur shıǵarıw hám jutıw qábiletleriniń óz-ara qatnası denelerdiń tábiyatına baylanıslı bolmay,  hámme deneler ushın jiyilik hám temperaturanıń universal funkciyası bolıp tabıladı

    ,                          (1.3)

Absolyut qara denede clip_image100 bólǵanı ushın

clip_image102

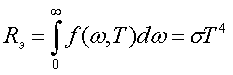
teńlikke iye bolamız.

         Demek,  Kirxgofftıń universal funkciyası absolyut qara deneniń nur shıǵarıw qábiletınıń ózi bolıp tabıladı.

clip_image104 funkciyanıń kórinisin teoriyalıq keltirip shıǵarıw júdá quramalı másele bolıp tabıladı.

         Stefan (1879 j.)  tájiriybe nátiyjelerin analız etip,  qálegen deneniń energiyalıq jaqtırtıwshańlıǵı absolyut temperaturanıń tórtinshi dárejesine proporcional degen juwmaqqa keldi.

        Bol'cman bul jumıslardı dawam ettirip,  termodinamık muloxazalarga súyene otırıp,  absolyut qara deneniń energiyalıq jaqtırtıwshańlıǵı ushın tómendegi ańlatpanı keltirip shıǵardı:

  ,                    (1.4)

Bul ańlatpa Stefan-Bol'cman nızamı,  *σ*= 5,7⋅10-8 W/m2grad4 bolsa,  Stefan-Bol'cman turaqlısı dep ataladı.

        Stefan-Bol'cman nızamı energiyalıq jaqtırtıwshańlıqtıń temperaturaǵa ǵárezliligin kórsetiw menen,  spektral bólistiriw funkciyasın da anıqlaw imkanıyatın beredi.

         Óz gezeginde Vin elektromagnit teoriya nızamlarınan paydalanıp,  bólistiriw funkciyası ushın tómendegi ańlatpanı usınıs etti:

clip_image108   ,                           (1.5)

Bul jerde clip_image110 -jiyiliktiń temperaturaǵa qatnasınıń belgisiz funkciyası bolıp tabıladı.

         Nurlanıw spektri maksimumınıń tolqın uzınlıǵınıń absolyut temperaturaǵa kóbeymesi turaqlı shama bolıp tabıladı.

clip_image112   ,                                 (1.6)

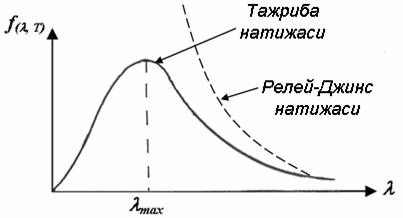
hám bul ańlatpa **Vinniń jılısıw nızamı** dep ataladı. Bul jerde

clip_image114

         Reley hám Djins energiyanıń erkınlık dárejesi boyınsha teń bóliniwin esapqa alıp clip_image116 funkciyanıń anıq kórinisin keltirip shıǵardı.

clip_image118yaki   clip_image120       (1.7)

Reley-Djins ańlatpası tek úlken tolqın uzınlıqlarında tájiriybe nátiyjeleri menen sáykes keledi, kishi tolqın uzınlıqlar ushın zinhar qarsı nátiyjege alıp keledi  (1-súwret) .



**1-súwret. Absolyut qara deneniń nurlanıw spektri**

         Úzliksiz sızıqlar absolyut qara deneniń tájiriybede alınǵan nurlanıw spektri nátiyjelerin,  úzik-úzik sızıqlar Reley-Djins ańlatpasınıń esap nátiyjelerin ańlatadı:

clip_image124

clip_image125 ańlatpanı clip_image127 boyınsha sheship,  0 den  ∞  aralıqda integrallaǵanda energiyalıq jaqtırtıwshańlıq pánisin bahalaw múmkin.

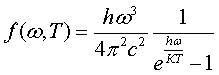
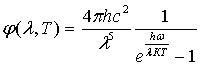
        M.Plank clip_image128 funkciyanıń tájiriybe nátiyjelerine sáykes keliwshi ańlatpasın keltirip shıǵardı. Ol óz teoriyasında klassik fizika nızamlarına sáykes kelmeytuǵın bazı ózgertiwlerdi kirgizdi,  yaǵnıy elektromagnit nurlanıw energiyası porciya (kvant)  muǵdarında tarqaladı hám energiya kvantı tómendegige teń dep esapladı.

clip_image130  ,                               (1.8)

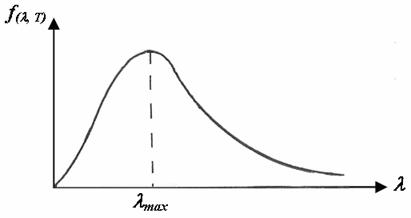
Bul jerde clip_image132 -Plank turaqlısı dep ataladı.

clip_image134

Absolyut qara deneniń nurlanıwı ushın,  Plank ańlatpası jiyilik yamasa tolqın uzınlıǵına baylanıslı bolıp,  tómendegi teńlik menen ańlatıladı:

   yaki        (1.9)

Plank ańlatpasınıń esap nátiyjeleri tájiriybe nátiyjeleri menen úlken anıqlıqda bir-birine sáykes keldi  (2-súwret).



**2-súwret. Absolyut qara dene nurlanıw spektriniń Plank ańlatpası**

          (1.9)-ańlatpadan Stefan-Bol'cman hám Vin ańlatpaların ańsat keltirip shıǵarıw múmkin.

clip_image142,      (1.10)

clip_image144

Salay etip,  Plank teń salmaqlılıqlı ıssılıq nurlanıwınıń aqırǵı ańlatpasın teoriyalıq keltirip shıǵardı hám bul kvant teoriyasınıń tiykarlarınan biri dep esaplanadı.

         Alıstan nur tarqatıp atırǵan denelerdiń  yamasa joqarı temperaturalı,  qızıǵan,  denelerdiń temperaturasın ápiwayı usıllar menen ólshep bolmaydı.

         Bunday jaǵdaylarda temperaturanı alardıń nurlanıw spektrine qaray anıqlaw múmkin. Denelerdiń nurlanıwına qaray alardıń temperaturasın anıqlawshı usıllardıń barlıǵı optik pirometriya hám ólshew ásbapları bolsa,  optik pirometrler dep ataladı.

        Alar eki túrli-radiaciyalıq hám optik pirometrlerge bólinedi. Radiaciyalıq pirometrlerde qızdırılǵan deneniń 0 den ∞ bolǵan jiyilik keńliginde tarqalıp atırǵan tolıq ıssılıq nurlanıwı jámlenedi. Optik pirometrlerde nurlanıw spektriniń tiyisli kishi bólegin qabıllaw arqalı dene temperaturası anıqlanadı.

**2.  Fotoeffekt**

         Absolyut qara deneniń ıssılıq nurlanıwın jaqtı túsintirgen Plank gipotezası,  fotoeffekt hádiysesin da túsinip jetiwde óz ańlatpasın taptı hám ol kvant teoriyasın qáliplestiriwde úlken áhmiyetke iye boldı.

         Fotoeffekt-sırtqı, ishki hám ventilli bolıwı múmkin.

         Elektromagnit nurlanıw tásirinde zatlardaǵı elektronlardıń betke shıǵıw xodisası **sırtqı** **fotoelektrik effekt  (fotoeffekt**)  dep ataladı. Sırtqı fotoeffekt tiykarlanıp qattı denelerde  (metallar,  yarımótkizgishler,  dielektrikler),  hámde gazlardaǵı bólek atom hám molekulalarda  (fotoionlasıw)  baqlanadı.

         Fotoeffekt Gerc tárebinen 1887 jılda birinshi ret baqlanǵan. Ol  gazlardı úshqın shıǵıw dáwirinde ul'trafiolet nurlanıw menen nurlatǵanda razryad procesiniń kúsheytiwin baqlaǵan.

         Fotoeffekt hádiysesin birinshi ret Stoletov tolıq úyrengen. Fotoeffekt hádiysesin úyreniwshi qurılma dúzilisi 3-súwrette keltirilgen.

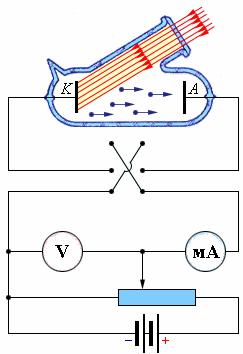
         Vakuum trubkadaǵı K - elektrod katod dep ataladı hám ol tekserilip atırǵan hár túrli metallardan tayarlanadı.

         A-elektrod anod dep ataladı hám metall tordan ibarat boladı. Eki elektrod sırtqı fizikalıq kernewge jalǵanǵan bolıp,  R ózgermeli qarsılıq  (potenciometr)  járdeminde fizikalıq kernew mánisi hám belgisin ózgertiw múmkin. Úyreniletuǵın metall  (katod)  monoxromatık jaqtılıq penen jaqtırtılǵanda payda bolatuǵın toktı shınjırǵa jalǵanǵan milliampermetr arqalı ólshew múmkin. Ótkerilgen tájiriybeler nátiyjelerine tıykarlanıp Stoletov tómendegi nızamlılıqlardı ornattı:

         1)  metallardaǵı fotoeffekt hádiysesine ultrafiolet nurlar kóbirek tásir kórsetedi;

         2)  jaqtılıq tásirinde zatlar tiykarlanıp keri zaryadlardı joǵatadı;

         3)  jaqtılıq tásirinde payda bolatuǵın tok kushı onıń jedelligine tuwrı proprcional bolıp tabıladı.



**3-súwret. Fotoeffekt hádiysesin úyreniwshi qurılma**

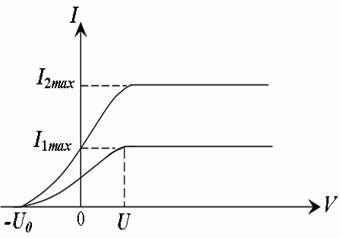
          Tompson 1898 jılda jaqtılıq tásirinde shıǵıw bólekshelerdiń salıstırmalı zaryadın ólshedi hám alar elektronlardan ibarat ekenligin tastıyıqladı.

         Yarımótkizgish yamasa dielektriklerdiń energetik spektrindegi baylanısqan energetik jaǵdaylardan erkin energetik jaǵdaylarǵa elektromagnit nurlanıw tásirinde elektronlardıń ótiwi-**ishki fotoeffekt** dep ataladı,  sebebi elektronlar bir energetik jaǵdaydan joqarıǵı energetik jaǵdaylarǵa ótip,  zatdan betke shıqpaydı.

Eki yarım ótkizgish yamasa metall-yarımótkizgish  kontaktların jaqtılıq penen jaqtırtılǵanda foto elektr qozǵawshı kúsh  (EQK)  payda bolıw procesine ventilli fotoeffekt dep ataladı.    Bul hádiyse quyash energiyasın tuwrıdan-tuwrı elektr energiyasına aylandırıw imkanıyatın jaratıp beredi.

3-súwrettegi  qurılmadan paydalanıp,  jaqtılıq tásirinde katod shıǵaratuǵın elektronlar aǵımı payda etetuǵın I fototoktıń elektrodlar arasındaǵı fizikalıq kernew túsiwine ǵárezliligin,  yaǵnıy **fotoeffekttiń vol't-amper xarakteristikasın  (VAX)**úyreniw múmkin.

         Jiyilikleri birdey,  jedellikleri hár túrli eki túrli jaqtırtılǵanlıq ushın fototoktıń VAX  4-súwrette keltirilgen.



**4-súwret. Fotoeffekttiń vol't-amper xarakteristikası**

Eki elektrod arasındaǵı fizikalıq kernew túsiwi U asıwı menen,  baslanıwda fototok az-azdan asıp baradı,  yaǵnıy katoddan shıǵıp,  anodǵa jetip baratuǵın fotoelektronlar sanı asıp baradı. Iymek sızıqlardıń qıyalıq túsi katoddan elektronlar hár túrli tezlikde atılıp shıǵıwın kórsetedi.

         Fototoktıń maksimal mánisi Imax= Itoy. ,  yaǵnıy toyınıw fototokınıń baslanıwı sonday U fizikalıq kernew túsiwi menen anıqlanadı,  bunday fizikalıq kernew túsiwinde katoddan shıǵıp atırǵan elektronlar anodǵa jetip keliwge úlgeredi:

clip_image150    ,                                 (2.1)

bul jerde n-katodtıń 1 sekundda shıǵarǵan elektronlar sanı.

         Vol't-amper xarakteristikadan U = 0 bolǵanda fototok nolge aylanbawı kórinip turıptı,  sebebi katoddan shıǵıp atırǵan ayırım elektronlar nolden ayrıqsha *υ* baslanǵısh tezlikke iye bolıp,  málim kinetik energiyaǵa iye bolǵanları ushın,  sırtqı maydansız anodǵa jetip kele aladı.

         Fototok nolge teń bolıwı ushın,  elektronlarǵa belgisi keri bolǵan,  elektronlardı toqtatıp qalıwshı (– *U*0) fizikalıq kernew qoyıw kerek. Demek, *U* = –*U*0 bolǵanda,  hátteki clip_image152-maksimal tezlikke iye bolǵan elektronlar da toqtatıp qalıwshı fizikalıq kernewdi jeńe almaydı hám anodǵa jetip kele almaydı,  nátiyjede fototok nolge aylanadı.

         Berilgen katod zatı hám jaqtılıq nurı jiyiligi ushın toqtatıp qalıwshı – *U*0 fizikalıq kernewdi ólshew,  katoddan shıǵıp atırǵan fotoelektronlardıń tezligi hám kinetik energiyası mánislerin anıqlaw imkanıyatın beredi:

clip_image154  ,                        (2.2)

         Hár túrli katod materialları ushın,  katodǵa túsip atırǵan jaqtılıqtıń jiyiligi hám hár túrli jaqtırtılǵanlıq jedelliklerinde alınǵan fotoeffekt VAX nátiyjelerine tiykarlanıp tómendegi úsh fotoeffekt nızamları ornatıldı:

         1. Stoletov nızamı. Katodǵa túsip atırǵan jaqtılıqtıń belgilengen jiyiligida,  birlik waqıtta katoddan ajralıp shıǵıp atırǵan fotoelektronlar sanı jaqtılıq jedelligine proporcional bolıp tabıladı;

         2. Fotoelektronlar baslanǵısh tezliginiń maksimal mánisi katodǵa túsip atırǵan jaqtılıq jedelligine baylanıslı bolmay,  tek *ν* jiyilikke baylanıslı bolıp, onıń asıwı menen sızıqlı ósip baradı;

         3. Har bir zat ushın fotoeffekttiń «qızıl shegarası» bar,  yaǵnıy jaqtılıqtıń *ν*0-minimal jiyiligi bar bolıp,  bul jiyilikde jaqtılıqtıń qálegen jedelliginde fotoeffekt baqlanadı.

         Bul nızamlardı túsintiriw ushın Eynshteyn 1905 jılda fotoeffektnıń kvant teoriyasın islep shıqtı. Bul teoriyada,  *ν*0 jiyilikli jaqtılıq nurlanıwda da,  tarqalıwda da hám zatlarda jutılıwda da bólek energiya porciyaları

clip_image156

arqalı kórinedi. Salay etip,  jaqtılıq tarqalıwın úzliksiz tolqın procesi dep oyda sawlelendirmey, onı keńislikte diskret jaqtılıq kvantları aǵımı sıpatında,  vakuumda bolsa s tarqalıw tezligi menen háreketlenedi dep esaplaw kerek. Bul elektromagnit nurlanıw kvantları fotonlar dep ataladı.

         Kvant teoriyasına tiykarlanıp,  hár bir kvanttı tek bir elektron jutıwı múmkin. Usınıń sebebinen,  jaqtılıq tásirinde katoddan ajralıp shıqqan fotoelektronlar jaqtılıq jedelligine proporcional bolıp tabıladı (fotoeffekttiń I nızamı) .

         Katodǵa túsip atırǵan foton energiyası elektrondı metalldan shıǵıw jumısın  (A) jeńiwge hám shıǵıp atırǵan fotoelektronǵa clip_image158 kinetik energiya beriwge sarp etedi.

clip_image160     ,                    (2.3)

Bul ańlatpa sırtqı **fotoeffekttiń Eynshteyn teńlemesi** dep ataladı hám fotoeffekttiń II hám III nızamların túsindire aladı.

         Eynshteyn teńlemesinen,  fotoelektronnıń maksimal kinetik energiyası túsip atırǵan nurlanıw jiyiligi asıwı menen sızıqlı ósip barıwı hám nurlanıw jedelligine baylanıslı emesligi kórinip turıptı.

         Jaqtılıq jiyiligi azayıwı menen fotoelektronnıń kinetik energiyası tómenlep,  qanday da kishi jiyilikde clip_image162,  fotoeffekt baqlailmaydi:

    ,                              (2.4)

Áne sol *ν*0 jiyilik berilgen metall ushın **fotoeffekttiń «qızıl shegarası»** boladı hám tek elektronıń shıǵıw jumısına baylanıslı boladı.

          (2.2) -,  (2.3) -hám  (2.4) -ańlatpalardan tómendegige iye bolamız:

clip_image166  ,                           (2.5)

**3. Jaqtılıq basımı**

Eynshteynniń jaqtılıq kvantları haqqındaǵı gipotezasına tiykarlanıp, jaqtılıq diskret energiyası porciyaları – **fotonlar** sıpatında nurlanadı, jutıladı hám keńislikte tarqaladı.

Foton energiyası  ǵa teń. Foton massasın onıń energiyası arqalı kórsetiw mumkin:

 , (3.1)

Fotondı elementar bólekshe dep esaplasaq, *c* jaqtılıq tezligi menen tarqalıwı sebepli, turǵun massasın nólge teń dep esaplaw mumkin.

Fotonnıń impulsi

 , (3.2)

ǵa teń.

Fotonnıń massası, impulsi hám energiyası onıń korpuskulyar qásiyetin belgileydi, *ν* - jiyiligi bolsa, jaqtılıqtiń tolqın qásiyetin belgileydi.

Foton, egerde impulsqa iye bolsa, ol jaǵdayda denege túsip atırǵan jaqtılıq oǵan basım tásirin ótkizedi, uluwmalıq foton betke urılǵanda, oǵan óz impulsin jiberedi.

Dene betine *ν* jiyilikli monoxromatık jaqtılıq nurı túsip atırǵan bolsın. Egerde birlik bet maydanına birlik waqtinda *N* foton tússe, dene betınıń *ρ* - shaǵılıstırıw koefficientine tiykarlanıp *ρN* fotonlar shaǵılısadı, (1-*ρ*)*N* fotonlar bolsa denede jutıladı.

Hár bir jutılǵan foton betine



impuls uzatadı, shaǵılısqan foton bolsa



impuls uzatadı. Ol jaǵdayda betke tásir etuwshi basım tomendegige teń bóladı:





bul jerde *hν* bir fotonnıń energiyası bolǵanı ushın,



hámme fotonlardıń energiyası boladı yamasa betke túsip atırǵan jaqtılıq energiyası boladı.

Bul jerde  nurlanıw energiyasınıń kólem tıǵızlıǵı dep ataladı.

Sonıń ushın, jaqtılıq betke normal túsiwinde payda bolǵan basımı

 , (3.3)

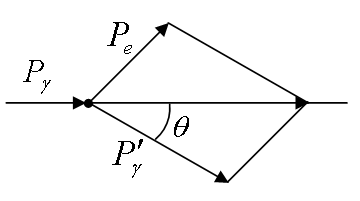
ge teń boladı.

1. **Kompton effekti**

1923 jılda Kompton rentgen nurlarınıń túrli zatlarda tarqalıwın úyrenip, tarqalıp atırǵan nurlardıń tolqın uzınlıǵı túsip atırǵan nurlar tolqın uzınlıǵınan ulken ekenligin anıqladı.

 , (4.1)

bul jerde *λ* - túsip atırǵan rentgen nurınıń tolqın uzınlıǵı, *λ*′ - tarqalǵan nurlar tolqın uzınlıǵı, *θ* - tarqalǵan nur menen túsiwshi nur arasındaǵı múyesh (5-súwret) *λ*0=0,0242 *A*0 nurdıń tábiyatı hám tolqın uzınlıǵına tiyisli bolmaǵan turaqlı shama.



**5–súwret. Fotonda zattıń erkin elektronı menen soǵılısıwı**

Ultra qısqa tolqınlı elektromagnit nurlanıwdıń zatlardaǵı erkin elektronlarda, tolqın uzınlıǵı artıwı menen baylanıslı elastık tarqalıw – **Kompton effekti** dep ataladı.

Korpuskulyar qásiyetine iye bolǵan fotonlar zatlardıń erkin elektronları menen elastık soǵılısıwında, foton elektronǵa, energiya hám impulstiń saqlanıw nızamına tiykarlanǵanda, óziniń energiya hám impulsiniń bir bólekshesine uzatadı.

Zatǵa túsip atırǵan fotonnıń energiya hám impulsi

**, **

ǵa teń. Tınısh halda turǵan elektronnıń energiyası *W*0=*mc*2 ǵa teń.

Foton elektron menen soǵılısǵanda energiya hám impulstiń bir bólegin berip *θ* múyesh astında tarqaladı. Tarqalıp atırǵan foton energiyası hám impulsi tomendegishe boladı:

**, **

Tarqalıp atırǵan fotonnıń energiyası  hám  jiyiligi azayǵanı ushın, onıń tolqın uzınlıǵı *λ* artadı. Tınısh halatta turǵan elektron  impuls hám *W*=*mc*2 energiyaǵa iye bolip, elastık soǵılısıw esabınan hareketge keledi.

Energiyanıń saqlanıw nızamına tiykarlanǵan halda

 , (4.2)

ǵa iye bolamız. Impulstiń saqlanıw nızamına tiykarlanıp



ǵa iye bolamız.

 ,  hám  ekenligin esapqa alıp

 , (4.3)

Tolqın uzınlıqları parqı ańlatpasına iye bolamız. Bul jerde



ǵa teń.