

ARHIIVKOGU



Compton'i efektist ja selle tähtsusest röntgeni süvikuravi puhul.¹⁾

Jüri Grünthal. *J. Haldre*

Röntgenravi puhul on tarvilik, et röntgenikiired juhitaks haigussessa. Kiiritamisel tekib kehas kahesugune nähtus: absorptsioon ja hajumine.

Absorptsiooni all mõistetakse niisugust nähtust, kus röntgenikiir, kokku põrgates aatomiga, hävib, üle andes oma energiat aatomile. Enamalt jaolt esineb kokkupõrge röntgenikiire ja elektroni vahel, mille puhul röntgenikiire energia kandub üle elektronile ja muutub elektroni kineetiliseks energiaks. Osa aatomile üle antud energiast tarvitatakse aga elektroni vabastamiseks aatomist, mille tagajärjel tekib aatomi isekiirgumine, iseäranis kui on tegemist elektroniga, mis asetseb aatomi tuuma lähedal.

Vabastatud elektronid liiguvad aatomist suure kiirusega eemale, tekib elektronide emissioon. Absorptsiooni puhul tekkinud elektrone nimetatakse fotoelektroneks. Isekiirgumise teel saadud kiired on, keharakkude aatomiumbreid arvesse võttes, niivõrt pehmed, et need kiired absorbeeruvad samas piirkonnas, mis omakord suurendab fotoelektronide emissiooni.

Hajumise all aga mõistetakse röntgenikiire refleksiooni, endisest sihist kõrvale kaldumist. J. J. Thomson'i klassilise kiirtehajumise teooria järgi (mis väljub Hertzi valemist) on hajumine primaarsete röntgenikiirte transformatsioon uteks sama-

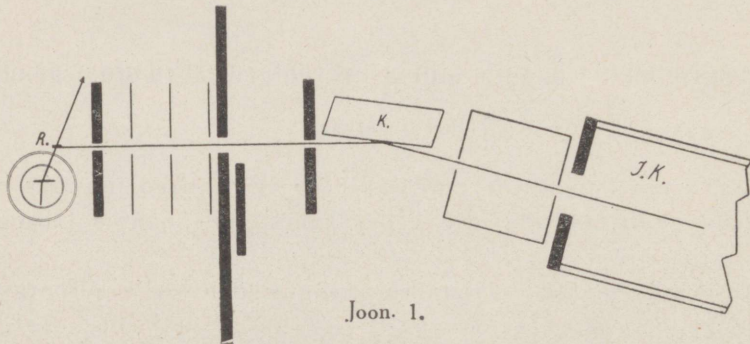
¹⁾ Eradotsendi prooviloeng, peetud arstiteaduskonna istungil 7. XII 31.

sugusteks, ainult teise suunaga röntgenikiirteks. Selle teooria järgi ei kaota röntgenikiir oma energiat, ei muuda lainepikkust, vaid võtab ainult teise sihi, kuni ka tema absorbeerub.

Et eksperimentaalsed andmed hulga aastate jooksul leidsid kooskõla Thomson'i teoorias, siis koostati nii mõõtmisaparatuuride taatlus (*Eichung*) kui ka doosimistabelid vastavalt primaarsete kiirte kvaliteedile, arvesse võttes, et hajunud kiir ei muuda oma kvaliteeti.

Et ainult absorptsiooni puhul tekib elektronide emissioon, mis on seotud aatomiehituse muutusega, siis on arusaadav, et ainult absorbeerunud energia võib bioloogilist efekti esile kutsuda.

Siin jääb aga arusaamatuks, nagu seda ka Wintz toonitab,

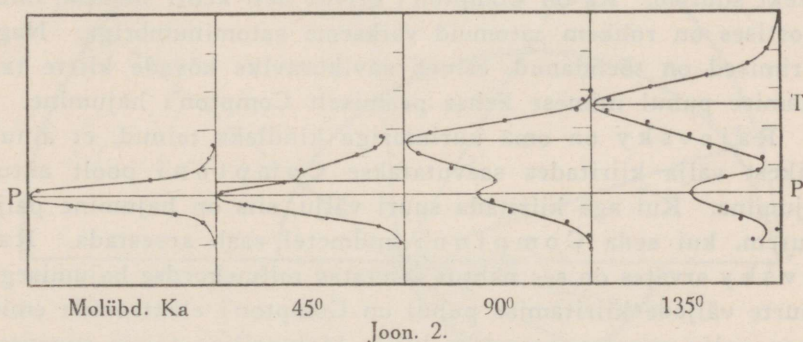


kuidas kõvad kiired, mille absorptsioon on väga väike, suudavad bioloogilist toimet avaldada. Eriti jääb aga arusaamatuks, kuidas kutsuvad bioloogilise toime esile raadiumikiired, mille γ -kiired on väga kõvad ja mille absorptsioon on minimaalne. Kostust sellele küsimusele annab Compton'i efekti uurimine.

Juba Florence väitis 1910. a., et kiirte lainepikkus suureneb hajumisnurga suurenemisega ja et Thomson'i hajumisel on õieti väike tähtsus. Säärastele teatele ei pandud suuremat rõhku, senikui Compton 1923. a. näitas, et meil on siin tegemist uue nähtusega. Oma uurimiste varal röntgenikiirte hajumisest ta leidis, et hajumisel muutuvad kiired pehmemaks. Joonisel nr. 1 on skeemiliselt kujutatud Compton'i katse kulgu. Röntgenitoru T kõrval asub hajuv keha R, mis koosneb grafiitpulbrist. Viimasest väljuv kiir läbib mitut diafragmat ja langeb spektrometri kristallile K, kust ta juhitakse ionisatsioonikambrisse IK. Röntgenitoru antikatoode või röntgenianoodoode koosnes molübdeenist, mille $K\alpha$ kiirt ($R = 0,711 \text{ \AA}$) spektraalselt uuriti mitmesuguse

hajumise nurgi. Selgus, et primaarsete kiirte ühest joonest on saanud kaks joont (v. joonis nr. 2), kusjuures üks joon omal kohal püsib, kuna teine joon kujutab kiirt, mille laine on pikem ja asub esimesest joonest seda kaugemal, mida suurem on hajumisnurk.

Leiu seletas Compton ja temaga peaaegu ühel ajal, kuid iseseisvalt Debye kvantideteooria põhjal. Kvantideteooria põhjal tuleb röntgenikiirt vaadelda kui röntgenikvanti, s. o. energiakvanti E , mille suurus on $h\nu$, kus ν on röntgenikiire laine frekvents, võngete arv: $\frac{c}{\lambda}$, h aga Planck'i toimekvantum (*Wirkungsquantum*), seega konstantne arv ($h=6,55 \cdot 10^{27}$). Kui näiteks võtta



punase kiire kvant 1-na, siis on röntgenikvant 70 000 ja raadiumi γ kvant 700 000, mis küllaldaselt näitab nende kiirte energiahulga vahet.

Kvantideteooria põhjal on kergem röntgenikiirte ja materia vastastikust toimet ette kujutada. Kui nüüd röntgenikvant põrkab kokku mõne tegeliku kehakesega, nagu seda on elektronid, siis on võimalik siin elastsete tõugete seadusi tarvitada. Röntgenikvandi ja elektroni kokkupõrkele analoogilise nähtuse leiame piljardit mängides, kus tõugatud piljardikuul seisvale kuulile külge veeredes võib 1) ise seisma jäädes oma energiat teisele üle anda ja selle liikuma panna ja 2) seisvat kuuli liikuma pannes oma jooksu sihti ja kiirust muuta. Esimene juht on analoogiline kvandi absorptsiooniga, kus kogu röntgenikvandi energia $E=h\nu$ üle läheb elektroni kineetiliseks energiaks. Teisel juhul väheneb röntgenikvandi energia selle võrra, kui palju energiat kokkupõrkel elektronile üle anti. Hajunud kvandil $h\nu'$ on laine pikem,

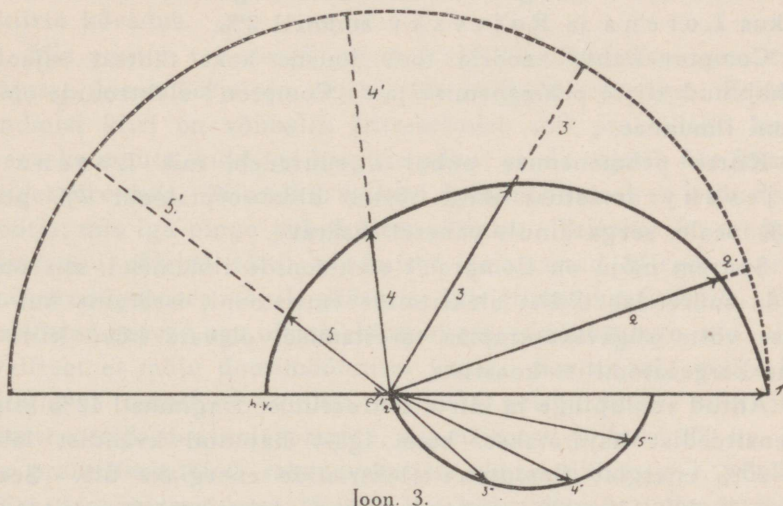
frekvents väiksem. Elektron saab tõukel energiat $h\nu - h\nu_1 = h(\nu - \nu_1)$. Hajumisel tekkinud elektrone nimetatakse hajumise ehk Compton'i elektroneks. Klassilise hajumisteooria alusel neid elektrone ei arvestatud, järjekult ka nende bioloogilist toimet mitte.

Ülaltoodud arvestused on õiged ainult siis, kui elektronid asetuksid aatomis vabalt, sest ainult siis on võimalik kasutada elastsete tõugete seadust. Kuid mõiste „elektroni vaba aetus“ aatomis on väga relatiivne. Suure frekventsiga kvandile võib osutada aatomis olev elektron vabana sel ajal, kui sama elektron teisele, väiksemale kvandile osutub kinninaelutatuks. Siit järgneb, et lühilainelisematel, s. o. suurema kvandiga kiirtel on Compton'i efekt suurem. Ka on Compton'i efekt neil kehil suurem, mille koostises on rohkem aatomeid väiksema aatominumbriga. Nagu uurimised on tõendanud, esineb süvikuraviks kõvade kiirte tarvitamise puhul inimese kehas peamiselt Compton'i hajumine.

Rajevsky on oma uurimisega kindlaks teinud, et ainult väikest välja kiiritades saavutatakse Compton'i poolt antud hajumine. Kui aga kiiritada suuri välju, siis on hajumine palju suurem, kui seda Compton'i andmetel saab arvestada. Rajevsky arvates on see nähtus seletatav mitmekordse hajumisega. Suurte väljade kiiritamise puhul on Compton'i elektronide emissioon palju suurem, seega ka kiirte bioloogiline toime tugevam. Ka on hajunud kiired pehmemad kui primaarsed, mille tõttu, nagu seda Friedrich ja Bender'i, Rajevsky ja teiste uurimised on näidanud, on kiired kiiritatud keha sügavuses heterogeense karakteriga. Sellepärast on Dessauer'i endine nõudmine, et haiguspesa kogu ulatuses ühtlaselt ja homogeenselt kiiritataks, võimatu täita just Compton'i efekti tõttu. Me võime enam-vähem homogeenset kiirtekimpu tarvitada kiiritamiseks, kuid kehas muutub igasugune homogeneen kiirtekimp Compton'i hajumise tõttu ikkagi heterogeenseks. See asjaolu raskendab aga teatud määral doosimist, millest pärastpoole pikemalt.

Graafiliselt võiksime Compton'i efekti järgmiselt ette kujutada (v. joonis nr. 3). Röntgenikvant $h\nu_0$, mille suurust määrame vektoriga $h\nu_0$, hajutatakse elektroniga e . Endise, klassilise hajumisteooria järgi kokkupõrkele järgnev hajunud kiir ei muuda frekvensi, küll aga ainult suunda. Hajunud kiiri märgime klassilise teooria alusel vektoritega 1^1-5^1 , mis võrduvad $h\nu_0$, s. o. et hajunud kiire kvant on võrdne hajuva kiire kvandiga.

Compton'i andmeil, mida paljud teadlased küllaldaselt kontrollinud, ei ole hajumine mitte nii lihtne, nagu ta seda on Thomson'i teooria järgi. Tegelikult väheneb hajunud röntgenikvant, s. o. laine pikkus suureneb, kiir muutub pehmemaks. Hajunud kiire kvant oleneb hajumisnurgast; mida suurem hajumisnurk, seda väiksemaks muutub hajunud kvant. Laine pikenemine $\Delta\lambda = \lambda_1 - \lambda_0$ on Compton'i andmeil $\Delta\lambda = 0,024(1 - \cos \delta) \text{ \AA}$. Kui nurk $\delta = 0^\circ$, siis laine pikkus ei muutu, kuna ta nurk 180° juures



Joon. 3.

näitab maksimumi $0,048 \text{ \AA}$. Hajunud kiire kvandid on märgitud vektoritega 1—5. Hajumisel elektronele üleantud energia on märgitud vektoritena 1"—5". Vektorite pikkused nii hajunud kiire kvandi kui ka Compton'i elektroni energia suuruse jaoks on nii eksperimentaalselt kui ka kvantideteooria alusel teoreetiliselt arvestatud.

Nüüd, kus me Compton'i efektiga lähemalt oleme tutvunud, tekib küsimus, millist tähtsust omab see efekt röntgen-süviku-ravi puhul. See tähtsus on kahesugune:

1. Otsene, kuna peale Compton'i elektronide emissiooni bioloogilise toime esiletoomist sügavuses hajunud kiired muutuvad pehmemaks, absorbeeruvad kergemini ja suurendavad fotoelektronide emissiooni.

2. Kaudne, kuna Compton'i efekt mõjustab doosimis-aparaate,

Esimeses punktis mainitud Compton'i efekti tähtsuse määramiseks arvestasid Lorenz ja Rajevsky teoreetiliselt elektronide emissiooni suurust esiteks vastavalt endisele klassilisele teooriale ja teiseks vastavalt Compton'i efektile.

Klassilise teooria järgi elektronide emissioon koosneb fotoelektronest, mis tekivad primaarsete ja hajunud (= niisama kõvad kui primaarsed) kiirte absorptsiooni puhul. Röntgenitoru koor-mati 200 kv. ja kiiri filtreeriti läbi Cu 1,3 mm + Al 1,0 mm. Sel teel saadud kiirte energiast absorbeeritakse igas väikeses voluumiühikus Lorenz ja Rajevsky andmeil 2%.

Compton-Debye teooria toob juurde kaks tähtsat asjaolu: 1) hajunud kiirte pehmenemise ja 2) Compton'i elektronide emissiooni ilmutumise.

Kiirte pehmenemise puhul λ suureneb, mis Lorenz ja Rajevsky arvestuse järgi tõstab üldabsorptsiooni 2% pealt 2½% peale, seega ainult vähesel määral.

Suurem mõju on Compton'i elektronide ilmutumisel, mis omakorda suurendab üldist elektronide emissiooni, iseäranis kui arvesse võtta sügavikuterapias tarvitamisel olevaid kõvu kiiri ja keha kergeatomilist koostist.

Antud voolupinge ja kiirte filtreerimise tingimusil 12% kiirte intensiteedist hajutatakse, kuna igast hajunud kvandist läheb 25—30% energiat Compton'i elektronide energiaks üle. Seega läheb 3—4% (25—30% arvatud 12%-st) lokaalsest intensiteedist Compton'i elektronide energiaks üle.

Kokku võttes Lorenz ja Rajevsky arvestusi võiksime ütelda, et kohalikust röntgenienergiast, Compton'i teooria alusel arvestades, saadakse 2,5% fotoelektronide, 3,5% aga Compton'i elektronide energiana. Kogu elektronide emissioon teeb 6% kohalikust röntgenienergiast välja, mis tegelikult kutsubki bioloogilise toime esile, kuna endise teooria järgi arvestades ainult 2% kohalikust energiast bioloogilist toimet esile kutsub.

Eelpooltoodust ongi selge, miks kõvadel röntgeni- resp. raadiumi γ -kiirtel on nii suur bioloogiline toime, olgugi et nende kiirte absorptsioon on väga väike. Mida kõvemaks kiired muutuvad, seda suuremaks muutub Compton'i elektronide emissioon, mis kiirte bioloogilist toimet aina suurendab. Seda asjaolu aluseks võttes leiab Rajevsky, et väga vajalik on süvikuraviks ikka kõvemaid ja kõvemaid kiiri tarvitada, et sel teel kiirte bioloogilist toimet suurendada.

Osalt mainitud ja osalt muil kaalutlusil on püütud ehitada eriti tugevapingelisi aparate ja röntgenitorusid. Nii on hiljuti Berliini Charité naistekliinikus üles seatud süvikuravi-aparaat, mis annab 600 000 volti. Et selle pingetugevuse jaoks veel torud puuduvad, siis püütakse ka torude kvaliteeti parandada. Praegu ollakse tehniliselt niikaugel, et suudetakse töötada 400 000 voldiga torus ja 1 milliampriga ja hellitatakse lootust lähemal ajal pinget tõsta 500 000 voldini. Võib-olla jõutakse kunagi pingeni 1—2 miljonit volti torus, s. o. pingeni, mille puhul röntgenikiirte on γ -kiirte kõvadus.

Mis puutub teisesse Compton'i efekti tähtsusesse, s. o. tema mõjusse doosimõõtjaisse, siis on see mõju kahesugune. Esiteks: pindmisi kiiri on võimalik filtreerimise abil praktiliselt homogeenseks muuta, kuid iga haiguse puhul ei ole vajalik üht ja sama pinget tarvitada. Siin tekib raskusi doosimõõtmisel, et leida doosimõõtja, mis iga pinge puhul õieti näitaks. Teiseks: on teada, et Compton'i efekti tõttu pindmised primaarsed kiired erinevad suuresti sügavuses mõjule pääsvaist kiirist oma kvaliteedilt. Doosimõõtjad peavad aga olema ehitatud nii, et voolupinge, s. o. kiirte kvaliteet ei mõju doosimõõtmisel kaasa. See asjaolu andis füüsikuile ja tehnikuile küllalt nii-öelda peamurdmist, kuni jõuti konstrueerida doosimisaparate, mis näitavad 50 kuni 200 kv. juures praktiliselt õieti rahvusvahelisis röntgeniühikuis r. Sellega võiks doosimisprobleemi füüsikalist külge lugeda lahendatuks.

Kokku võttes eelpooltoodut julgen tähendada, et Compton'i efekt 1) selgitab röntgeni- ja γ -kiirte ühte transformatsiooni põhi-toimet, mis 2) küllaldaselt vastab küsimusele, kuidas kõvad kiired ja eriti γ -kiired suudavad bioloogilist toimet esile kutsuda selle peale vaatamata, et nende absorptsioon on väike.

Compton'i efekti tõttu ja ka muil kaalutlusil püütakse süvikuravi jaoks kiirte kvaliteeti parandada, s. o. kõvemaid kiiri saada, et sel teel kiirte bioloogilist toimet sügavuses tõsta.

Deutsches Referat.

Jüri Grünthal: **Der Comptoneffekt und seine Bedeutung für die Tiefentherapie** ¹⁾.

Bei der Bestrahlung treten im Körper zweierlei Erscheinungen auf: Absorption und Streuung. Bei der Absorption kommt die Emission der

¹⁾ Habilitationsvortrag, gehalten vor der Sitzung der medizinischen Fakultät zu Tartu-Dorpat am 7. Dez. 1931.

Photoelektronen zustande, wobei die Energie der absorbierten Röntgenstrahlen im Körper verbraucht wird. Die Streuung nach der klassischen Streuungstheorie von Thomson ist eine Reflexion der Strahlen ohne Elektronenemission. Da nur die im Körper verbrauchte Energie eine biologische Wirkung auslösen kann, ist es verständlich, dass nur die absorbierte Energie biologisch wirkt. Es ist aber unverständlich, worauf die Wirkung der harten Röntgenstrahlen beruht, welche eine geringe Absorption besitzen. Noch weniger verständlich ist der Umstand, dass Radiumstrahlen biologisch wirken können, da die Absorption der γ -Strahlen äusserst minimal ist. Eine Erklärung für diese Tatsache finden wir auf Grund des Comptoneffektes.

Wir wollen zur Erklärung des Comptoneffektes die Versuchsanordnung benutzen, welche Compton für seine Untersuchungen verwandte (cf. Skizze 1 u. 2). Es wurde Molybdän-K α -Linie spektral untersucht. Es erwies sich, dass bei der Streuung aus der einfachen Spektrallinie eine Doppellinie geworden war. Je grösser der Streuwinkel ist, desto mehr entfernt sich die neue Linie von der primären.

Die Erscheinung wurde bereits von Compton und kurze Zeit darauf von Debye, aber unabhängig von Compton, auf der Basis der Quantentheorie geklärt. Nach der Comptonschen Formel ist es leicht die Wellenlängenvergrößerung der Röntgenstrahlen bei der Streuung zu berechnen. Auch wird der Comptoneffekt graphisch dargestellt (cf. Skizze 3).

Die Bedeutung des Comptoneffektes für die Tiefentherapie ist 1) eine direkte und 2) eine indirekte.

Der direkte Einfluss des Comptoneffektes ist bedingt: a) durch Zustandekommen der neuen Comptonschen Elektronenemission und durch dabei verbrauchte Energie; b) durch Weicherwerden und dadurch schnellere Absorbierbarkeit der gestreuten Röntgenstrahlen. Es kommt bei der Streuung die Comptonsche Elektronenemission zustande, deren biologische Wirkung gemäss der klassischen Streuungstheorie vernachlässigt wurde. Auch erhöht die schnellere Absorbierbarkeit der Comptonschen gestreuten Röntgenstrahlen den biologischen Effekt beträchtlich.

Bei der Streuung wird jeder praktisch homogen gewählte Strahlenkegel in der Tiefe als inhomogen zur Wirkung kommen, was aber die Messinstrumente sehr stark beeinflusst. Um richtig dosieren zu können, muss man unabhängig von Strahlenqualität richtig zeigende Messinstrumente haben.

Zum Schluss kann man behaupten, dass der Comptoneffekt uns einen Grundvorgang der Strahlentransformation im Körper zeigt, was eine genügende Aufklärung gibt, wie harte Röntgen- und γ -Strahlen eine biologische Wirkung auslösen können.