



Matemātika, Bitli un datortomogrāfija

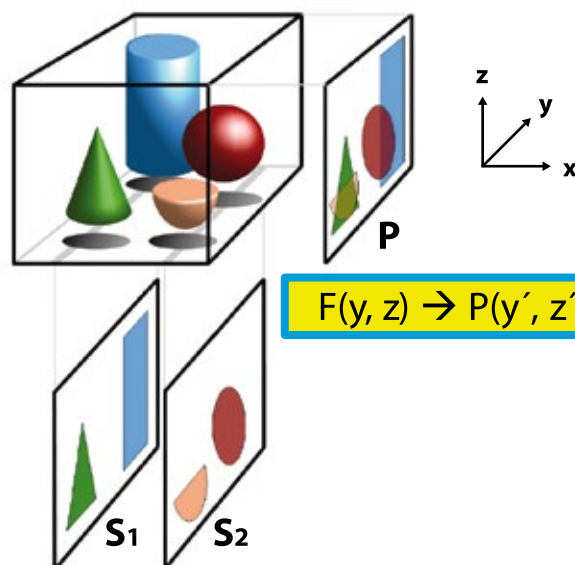
Avots: Dreamstime

Kurts Švarcs

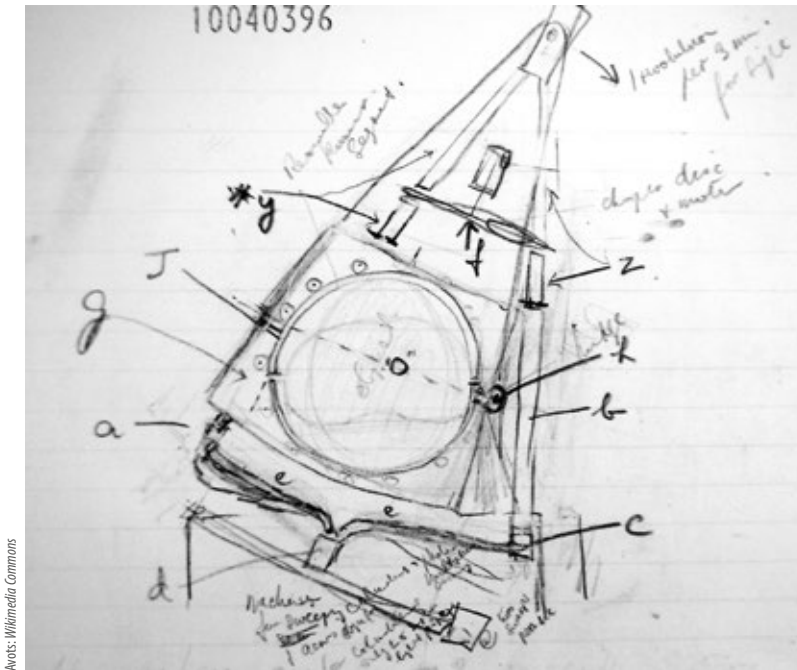
No rentgena caurskatēm līdz datortomogrāfijai

Vilhelma Konrāda Rentgena 1895. gadā atklātie X-stari jeb rentgenstari (ar kvantu enerģiju no aptuveni 10 eV līdz 1 MeV) izraisīja apvērsumu medicīnā, paverot ceļu orgānu caurskatēm un staru terapijai. Jau gadu vēlāk mediķi šo starojumu nosauca atklājēja vārdā, un 1901. gadā Rentgenam tika piešķirta Nobela prēmija fizikā – viņš kļuva par pirmo šīs godpilnās balvas laureātu.

Pagājušā gadsimta vidū aktualizējās jautājums par rentgentomogrāfiju. Tomogrāfija paredz dažādus attēlu iegūšanas paņēmienus, kas atsedz objekta iekšējo trīsdimensionālo struktūru. Parasti tomogrāfijā izmanto objekta šķērs griezumus (slāņa attēli vai tomogrammas): telpisko attēlu raksturo objekta šķēlumu summa (1. att.). Tomogrāfijā var izmantot jebkuru starojumu (rentgenstarus, gaismu, akustiskos



1. attēls. Tomogrāfijā no trīsdimensionāla objekta šķēlumu projekcijām (S_1, S_2, P) rekonstruē tā telpisku attēlu (augšējais kubs)



2. attēls. Britu inženieris Godfrijs Haunsfilds radīja tehnisko bāzi datortomogrāfijai – atklājumam, kas izraisīja apvērsumu kliniskajā medicīnā un 1979. gadā vainagojās ar Nobela prēmiju medicīnā. Pa kreisi: Haunsfilda skice datortomogrāfa prototipam

viļņus u.c.), pret kuru objekts ir transparents (caurspīdīgs). Tomogrāfiju izmanto radioloģijā, arheoloģijā, bioloģijā, atmosfēras novērojumos, ģeofizikā, okeanogrāfijā, plazmas fizikā, materiālu zinātnē, astrofizikā u.c. jomās.

Matemātiski tomogrāfiju var raksturot kā trīs argumentu funkciju $\Psi(x, y, z)$, kura jāapraksta pēc daudzām divdimensionālām projekcijām. Tas nozīmē, ka, projicējot telpisku objektu no dažādu leņķu un virzienu skatpunkta, no daudzām divdimensionālām projekcijām var restaurēt telpisko objektu. Matemātiski šo problēmu jau 1917. gadā atrisināja austriešu matemātiķis **Johans Radons** (*Johann Radon*, 1887–1956), un tā nosaukta autora vārdā – Radona transformācija [1]. Šī metode shematiski ilustrēta 1. attēlā. Trīsdimensionālais figūru novietojums kubā (x, y, z) tiek analizēts pēc divdimensionāliem šķēļumiem $S_1(y', z')$, $S_2(y', z')$ un $P(y', z')$. Ja šīs projekcijas summē (matemātiski – integrē), tad var restaurēt telpisko objektu. Šajā attēlā parādītas tikai trīs projekcijas, taču labai trīsdimensionāla objekta rekonstrukcijai ir nepieciešams simtiem projekciju!

Nezinot profesora Radona darbu [1], Dienvidāfrikā dzimušais angļu izcelsmes amerikāņu profesors **Alans Kormaks** (*Allan Cormack*, 1924 – 1998; Nobela prēmija 1979. gadā) šo problēmu teorētiski atrisināja no jauna sešdesmito gadu vidū. Kormaks matemātiski aprakstīja trīsdimensionālo objektu rentgenstaru attēlu iegūvi no divdimensionālām projekcijām. Būtībā Kormaks izstrādāja datorkenēšanas programmas, analizējot apstākļus objektu radiogrāfiskā šķērsgriezuma attēlu iegūšanai. 1963. un 1964. gadā A. Kormaks publicēja sava pētījuma rezultātus vadošā starptautiskā žurnālā [2, 3], taču tie neizraisīja lielu uzmanību un netika izmantoti. Publicēšanas laikā rentgentomogrāfija vēl nebija izveidota.

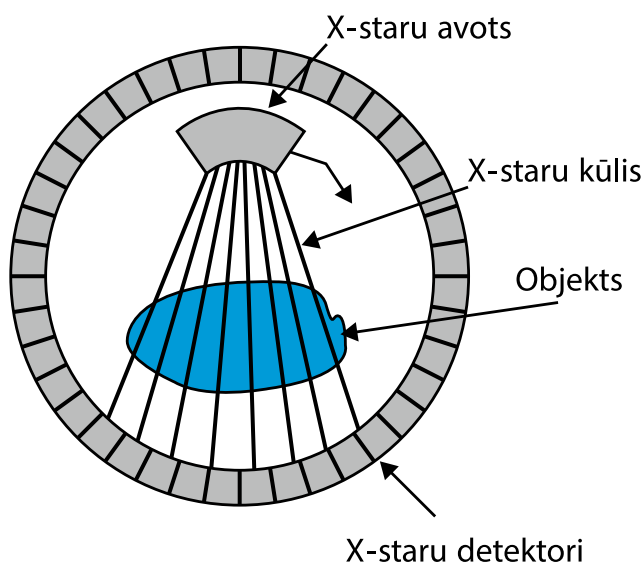
Kormaka tomogrāfijas apstrādes programmas varēja realizēt tikai pēc **Godfrijas Haunsfilda** (*Sir Godfrey Newbold Hounsfield*, 1919–2004; Nobela prēmija 1979. gadā)

datortomogrāfu izstrādes. Neraugoties uz profesora Radona prioritāti problēmas matemātiskajā risinājumā, Kormaks bija pirmais, kurš šos matemātiskos pamatprincipus saistīja ar datorprogrammām, tā paverot ceļu kliniskajai diagnostikai. Interesanti atzīmēt, ka datortomogrāfijas teorija un eksperimentālā tehnika tika izstrādātas neatkarīgi viena no otras un Haunsfilds un Kormaks pirmo reizi satikās Nobela prēmijas pasniegšanas ceremonijā 1979. gadā, katram laureātam uzstājoties ar savu Nobela lekciju [4, 5].

Pirmie eksperimenti

Rentgentomogrāfijas tehniskā aparatūra tika izstrādāta firmā *Electric and Musical Industries Ltd* (EMI), kas dibināta 1931. gadā. Uzņēmums ražoja skaņuplates un skaņu ieraksta un atskaņošanas iekārtas. 1949. gadā šajā firmā sāka strādāt jauns, talantīgs inženieris Godfrijs Haunsfilds. Otrajā pasaules karā Haunsfilds bija dienējis Karaliskajos Gaisa spēkos un nodarbojies ar radara tehniku. Pēc kara, pateicoties Karalisko Gaisa spēku stipendijai, viņš absolvēja prestižo Faradeja Elektrotehnisko koledžu Londonā. Haunsfilda vadībā EMI izstrādāja Anglijā pirmo komerciālo datoru uz tranzistoru bāzes. Kaut gan dators bija oriģināls, tas uzņēmumam nenesa peļņu un tā ražošanu drīz pārtrauca.

Kādā nedēļas nogales pastaigā 1958. gadā Haunsfildam radās ideja par tomogrāfiju – trīsdimensionālu objektu struktūras analīzi pēc rentgenstaru transmisijas caur objektu. Trīsdimensionālu objektu, tostarp cilvēka ķermeni, varētu aprakstīt, novērojot to šķērsojušos rentgenstarus no dažādiem skatpunktiem. Šīs idejas pamatā bija Haunsfilda darbs radiolokācijas jomā. Radaru sistēmas skenē apkārti, izsūtot radioviļņus no centrālā punkta, un tādējādi



3. attēls. Rentgenstaru tomogrāfijas principi: (1) rotējošs rentgenstaru (X-stari) avots ar vēdekļveida plakānu staru kūli šķērso cilvēka ķermeni un tiek uztverts detektoros; (2) detektoru rentgenstaru attēlu datorsistēma (šajā attēlā nav parādīta) pārvērš vizuālā attēlā

atklāj vides struktūru. Kāpēc neizmantot apvērstu procesu – atšifrēt iekšējo trīsdimensionālo (3D) struktūru, pamatojoties uz ārēju signālu? Būtībā Haunsfilds gribēja iegūt rentgenomogrāfijas attēlu, bet šīs idejas īstenošanai nebija tehniskās bāzes. Vēlāk savā Nobela lekcijā Haunsfilds atcerējās: "Es domāju, vai tas nebūtu jauki, ja no daudziem rentgenstaru mērījumiem, kas veikti no dažādu leņķu skatpunkta, varētu rekonstruēt trīsdimensionālo pacienta ķermeni un izpētīt objekta iekšējo struktūru no āruses." [5] Izmantojot vienkāršu modeli – pudeles ar dzelzs naglām, Haunsfildam izdevās pierādīt savas idejas realitāti. Tobrīd Haunsfilds interesējās par eksperimentālo tehniku un vēl nezināja, ka matemātisko problēmu par telpiska objekta aprakstu, pamatojoties uz divdimensionālām projekcijām, jau 1917. gadā atrisinājis austriešu matemātiķis J. Radons un ka šo problēmu no jauna atklājis un risinājis Johannesburgā dzimušais angļu izcelsmes profesors A. Kormaks.

Pēc pirmajiem eksperimentiem Haunsfilds devās uz Veselības departamentu, lai iegūtu finansiālu atbalstu un kontaktus ar mediķiem – radiologiem. Haunsfilda ideja balstījās uz faktu, ka, ejot caur objektu, rentgenstaru intensitāte samazinās (absorbējas). Dažādi cilvēka ķermeņa audi – kauli, muskuļi, smadzenes – atšķirīgi izmaina rentgenstaru intensitāti. Virzot rentgenstarus caur objektu zem dažādiem leņķiem, varētu iegūt daudzas projekcijas un rekonstruēt šī objekta telpisko attēlu.

Haunsfilda pirmajos eksperimentos kā starojuma avotu izmantoja radioaktīvā elementa amerīcija (Am) gamma starus; tas bija vieglāk pieejams nekā rentgenstaru avots. Pirmie apstarošanas objekti bija pudeles un stikla burkas, kas piepildītas ar ūdeni un metāla un plastmasas gabaliņiem. Haunsfilds bija pārsteigts par attēlu kvalitāti. Nākamajā eksperimentā Haunsfilds izmantoja rotējošus dzīvniekus – tehniski grūtāk bija rotēt rentgenstaru avotu. Šādā primitīvā iekārtā skenēšanas process aizņēma deviņas dienas un

deva ap 30 000 mērījumu, kuru apstrāde datorā, lai iegūtu attēlu, ilga vairākas stundas. Kaut gan Veselības departaments atbalstīja Haunsfilda meklējumus, ierobežotais finansējums neļāva izvērst eksperimentus plašāk.

Datortomogrāfijas tehnikas izstrādi brīnumainā kārtā veicināja populārā rokmūzikas grupa *The Beatles*. Sešdesmitajos un septiņdesmitajos gados Bītlī iemantoja pasaules slavu, nodrošinot skaņu ierakstu firmai EMI milzīgus ienākumus. Ņemot vērā Haunsfilda pirmos panākumus tomogrāfijas jomā, EMI viņam piešķīra teju neierobežotu finansējumu. Tas pavēra iespēju izstrādāt datortomogrāfijas tehniku, izraisot revolūciju rentgendiagnostikā.

Haunsfilds kopā ar nedaudziem palīgiem datortomogrāfijas aparatūru izstrādāja samērā īsā – desmit gadu periodā, un 70. gadu beigās šo izgudrojumu vajadzēja ieviest medicīnā. Tas izrādījās ne vienkāršs uzdevums, kura veicējiem nācās saskarties ar tā laika mediķu konservatīvismu. Klīniskos eksperimentus Haunsfilds veica sadarbībā ar **Džeimiju Embrouzu** (*Jamie Ambrose*, 1923–2006), Atkinsona Morleja slimnīcas radiologu. Embrouzs pētīja smadzeņu struktūru, izmantojot ultraskaņas refleksiju un encefalogrāfiju, kas tolaik bija ieviešanas stadijā. Abu pirmā tikšanās gan izvērtās neveiksmīga – dažādās specialitātes neļāva izskaidrot metodes detaļas. Taču, kad Haunsfilds ar savu iekārtu izmeklēja Embrouza iedoto smadzeņu preparātu ar audzēju un iesniedza viņam kontrastainu attēlu, Embrouzs bija sajūsmināts, un viņa entuziasms ļoti sekmēja tomogrāfijas ieviešanu klīnikā. Laikā no 1969. līdz 1970. gadam viņi izmeklēja daudzus Morleja slimnīcas pacientus un ieguva kvalitatīvus tomogrāfiskos smadzeņu attēlus, paverot iespējas ķirurģiskām operācijām. Pirmais rentgenomogrāfs tika izgatavots EMI firmā, un 1971. gada oktobrī to uzstādīja Atkinsona Morleja slimnīcā. Tas bija sākums klīniskajai tomogrāfijai, ko mūsdienās praktizē visā pasaulē.

1972. gadā Embrouzs prezentēja pirmos klīniskos tomogrāfu attēlus Starptautiskajā radiologu konferencē. Redzot smadzeņu attēlus, kas skaidri parādīja audzējus un asinsizplūdumus, izgaisa radiologu skepticisms. Embrouzs būtiski sekmēja tomogrāfijas ieviešanu klīniku praksē, taču kautrīgā rakstura dēļ turējās nomaļus, tāpēc lielāko starptautisko popularitāti ieguva Haunsfilds un Kormaks. Pirmos digitālos rentgenomogrāfus pasaulē sāka ražot uzņēmums *Electric and Musical Industries*.

Kopš pirmā Haunsfilda tomogrāfiskā skenera 1971. gadā ir pagājis gandrīz pusgadsimts. Desmitiem firmu ražo modernos skenerus, kas dod iespēju minūtes laikā iegūt attēlu, lai sniegtu pacientam nepieciešamo palīdzību. Rentgenomogrāfs sastāv no (1) skenera bloka (angļu val. *gantry* – rāmis, platforma), (2) tomogrāfiskās konvertēšanas sistēmas un (3) datora rentgenstara attēla vizualizācijai. Skenera bloka shēma parādīta 3. attēlā. Bloka (*gantry*) atveres diametrs ir 70–90 cm, un bloks rotē ap nekustīgo pacientu. Pilna apgrieziena laika intervāls ir 0,3–1 sekunde. Blokā ir ievietots jaudīgs rotējošs impulsa rentgenstaru avots (lampa, kuras jauda 50 kW, spriegums līdz 140 kV, impulsa frekvence 50 Hz (periods $\tau = 0,02$ s)). Rentgenstaru avots izstaro plakānu vēdekļveida rentgenstaru kūli, kas aptver visu pacienta ķermeni. Rentgenstaru pusvadītāju detektori atrodas ārējā cilindriskā sistēmā, un to skaits modernās iekārtās sasniedz vairākus tūkstošus, nodrošinot cilvēka šķērsgriezuma attēlos 0,4 mm izšķirtspēju. Rotējošais rentgenstaru avots zem



4. attēls. Modernā datortomogrāfijas iekārta. Datortomogrammu – pacienta orgānu šķēsgriezuma attēlu iegūst blokā (1), kurā ievietots rotējošs rentgenstaru avots un detektori. Pacienta orgānu (galvas, krūšu kurvja u.c.) tilpuma attēlus iegūst, pārvietojot pacientu (melnās bultiņas virzienā (2)). Tipiskā rentgenstaru enerģija (spriegums) diagnostiskiem izmeklējumiem ir 120 – 140 kV (1 kV = 1000 volti). Izšķirtspēja (Δl) ir atkarīga no orgānu struktūras (mīkstie audi, muskuļi, kauli u.c.), un optimālos apstākļos $\Delta l = 0,4$ mm. Attēlā: *Siemens Somatom Force* datortomogrāfs

dažādiem leņķiem rada precīzus cilvēka ķermeņa šķēluma attēlus, ko reģistrē detektori. Lai iegūtu orgāna (smadzeņu, krūškurvja u.c.) tilpuma attēlu, pacientu automātiski (datora vadības sistēma) pārvieto (4. att., melnās bultiņas (2) virzienā). Tomogrammas uzņemšana prasa precīzu elektromehānisku sistēmu, kā arī rentgenattēla reģistrāciju (intensitātes sadalījums \rightarrow ķermeņa struktūra) un tā vizualizāciju – optiskā attēla iegūšanu. Latvijā datortomogrāfija pieejama jau kopš pagājušā gadsimta astoņdesmitajiem gadiem [6, 7].

izstrādājumi – tehnika un matemātika un datorprogrammas – tika veikti pilnīgi neatkarīgi viens no otra un abi laureāti pirmo reizi satikās Stokholmā Nobela prēmijas pasniegšanas laikā. Medicīnas profesors Bhatačaraja no Indijas to apraksta šādi: "Medicīnas vēstures garajā un likumainā gaitā daudzi citu zinātnes nozaru pārstāvji ir būtiski veicinājuši medicīnas izaugsmi un attīstību. Tomēr neviens to nav veicis spilgtāk kā Godfrijs Haunsfilds – inženieris, kurš izveidoja datortomogrāfiju klīniskajā medicīnā" [8]. **E&P**

Nobela prēmija un pelnītā popularitāte

Nobela prēmiju komiteja mēdz būt gana neprognozējama. Arī 1979. gada Nobela prēmija medicīnā "Par datortomogrāfijas attīstību" britu datorspeciālistam Godfrijam Haunsfildam un amerikāņu fiziķim un matemātiķim profesoram Alanam Kormakam bija visnotaļ neparasta. Tomogrāfijas metodes izstrāde patiešām bija lielākā revolūcija medicīniskajā diagnostikā kopš rentgenstaru atklāšanas, un klīniskajā praksē to ievieša Haunsfilds. Rentgentomogrāfijas attēli no tilpuma objekta tiek būtiski uzlaboti pēc matemātiskās apstrādes ar datorprogrammām, ko jau sešdesmitajos gados izstrādāja profesors Kormaks, bet kas kļuva "dzīvas" tikai septiņdesmitajos gados pēc pirmo rentgentomogrāfu izstrādes. Zināmā mērā Haunsfilds atdzīvināja Kormaka pētījumu rezultātus. Neparasti bija arī tas, ka abi radošie

Literatūra

- [1] Radon, Johann, "Über die Bestimmung von Funktionen durch ihre Integralwerte längs gewisser Mannigfaltigkeiten", Berichte über die Verhandlungen der Königlich-Sächsischen Akademie der Wissenschaften zu Leipzig, Mathematisch-Physische Klasse, Band 69, Seiten 262–277 1917.
- [2] Allan MacLeod Cormack, Representation of a function by its line integrals, with some radiological applications, *Journal of Applied Physics*, 34, (9), p. 2722–2727, 1963.
- [3] Allan MacLeod Cormack, Representation of a function by its line integrals, with some radiological applications. II, *Journal of Applied Physics*, 35, (10), p. 2908–2913, 1964.
- [4] Allan MacLeod Cormack, Early two-dimensional reconstruction and recent topics stemming from it, Nobel Lecture (13 pages), 8 December, 1979.
- [5] Godfrey N. Hounsfield, Computed medical imaging, Nobel Lecture, 8 December, 1979.
- [6] L. Kalinka. Ceļš uz digitālo revolūciju vizuālā diagnostikā, *Sakarā pasaule*, 2 (2), 2003.
- [7] Veselības Centrs 4, Daudzslāņu datortomogrāfija, <https://vc4.lv>.
- [8] K. B. Bhattacharyya, Godfrey Newbold Hounsfield: The man who revolutionized neuroimaging, *Annals of Indian Academy of Neurology*, 19 (4), 448 – 450, 2016.