

44. PROBLÉMA

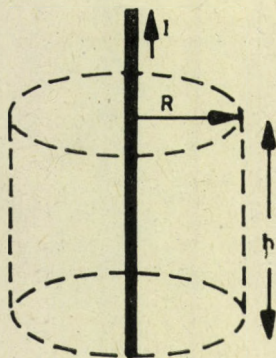
Miért mérik az orvosok a vérnyomást mindig a felkaron? Nem mérhetnék pl. a lábakon is?

(A megoldásokat a szám megjelenését követő 6 héten belül kérjük megküldeni a Szerkesztőség címére Eötvös Loránd Fizikai Társulat, 1368. Bp. Anker-köz 1. Postafiók 240. „Négyyszögletes kerék“ 44. Probléma megoldása címmel.)

42. PROBLÉMA

Végtelen hosszú áramtól átjárt egyenes vezető nem létezik. Matematikailag meghatározható azonban egy ilyen képzeletbeli vezeték mágneses mezeje. Tekintsünk egy ilyen vezetőt, és vágjunk ki a mágneses mezejéből egy, a vezetékkel koaxiális, h magasságú R sugarú hengerfelülettel határolt térrészt. Hogyan lehet véges vezetővel minden pontjában egzakt módon az előzővel megegyező mágneses mezőt létrehozni az előbb leírt térrészben?

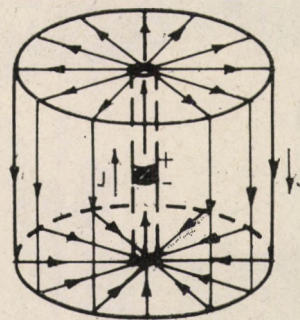
(H. L.)



A 42-ik PROBLÉMA MEGOLDÁSA

A feladat hasonlít a 41-ik feladatbeli problémához. Ott beláttuk, hogy egy toroid tekercs belsejében éppen olyan a mágneses mező, mint egy, a forgási szimmetriatengelyében folyó végtelen egyenes áramé. Olyan „toroidot” kell tehát készítenünk, amelynek torokköre megegyezik a végtelen egyenes vezető keresztmetszetével, és vezetékanyaga teljesen kitölti a h hosszúságú szakaszt, amelyet a henger az egyenes vezetékből kimetsz. Ezt a fűcsa „toroidot” a következő képpen állíthatjuk elő. Vegyünk egy vékonyfalú rézhengert, amelynek belső sugara R . Kössük össze az alap- és fedőlapjának középpontját egy olyan rézrúddal, amely középen meg van szakítva, és a két részt egy gomb-elem köti össze. Amikor az áramkör zárul (ezt pl. a fedőlap kismértékű lenyomásával érhetjük el), a kívánt mágneses mező jön létre. (A rúdban felfelé, az alap és fedőlapokon radiálisan kifelé ill. befelé, a paláston lefelé folyik az áram.)

(H. L.)



FIZIKA MINDENHOL

A MAGYAR FIZIKUSOK SZEREPE SUGÁRTERÁPIÁNK HATÉKONYSÁGÁNAK FOKOZÁSÁBAN

Bozóky László, József Gábor,
Reischl György, Varjas Géza

A fizika és az orvostudomány fejlődése között kezdettől fogva szoros kapcsolat állt fenn. Így például a röntgen-sugárzás felfedezése után (1895) — valamennyi más tudomány területet megelőzve — az orvostudomány azonnal megkezdte az új sugárzásnak a maga területén való hasznosítását, a diagnosztikai és terápiás alkalmazási lehetőségek kipróbálását, újabb és jobb módszerek kifejlesztését. Fél évvel Röntgen nagy felfedezése után például az angolok nilusi hadserege már fel volt szerelve tábori röntgen-készülékkel, ami a testbe került repeszdarabok kioperálásánál igen nagy segítséget jelentett.

Hasonló gyors reagálást láthattunk — hogy csak a sugárzásokkal kapcsolatos területen maradjunk — a radioaktív sugárzások, a neutron-sugárzás, a lézer-sugárzás, a körkörös és lineáris gyorsítók által előállított ultrakemény elektromágneses sugárzások gyakorlati használatbavételénél is.

Így érthető, hogy az orvostudomány élenjáró intézményeiben lassanként igényelni kezdték a fizikusok közreműködését a lépten-nyomon felmerülő elméleti és gyakorlati kérdések megoldásához, az ionizáló sugárzások dozimetriai módszereinek a kidolgozásához, az egyre nagyobb számban szükségessé váló terápiás sugárvédelmi mérések elvégzéséhez, az orvosok által megálmodott új módszerek bevezetését lehetővé tevő új készülékek kifejlesztéséhez, a fizikai sugárvédelem egyre nagyobb jelentőségűvé váló új kérdéseinek elméleti és gyakorlati kutatásához stb.

Másrészt a fizikusok közül is egyre többen ismerték fel, hogy a korszerű, úgynevezett nukleáris orvostudomány területén számos olyan megoldatlan feladat várja a fizikusok közreműködését, amelyek komoly és szép eredményekkel kecsegtetnek.

Hazánkban az 1936-ban megnyílt új intézmény, a „Székesfővárosi Közkórházak Bárány Eötvös

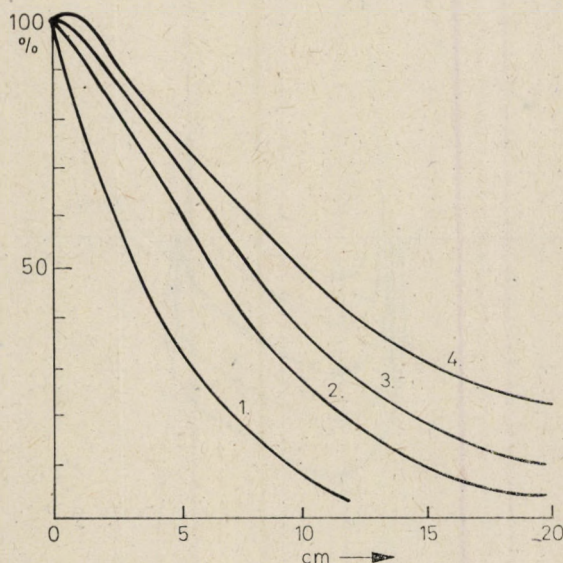
Loránd Rádium és Röntgen Intézete, a Fizikai Gyógyítás Háza" jelentette a fordulópontot, amennyiben Manninger Vilmos orvos professzornak kitartó munkával sikerült végre nemcsak ezt a 100 ágyas új kórházat tető alá hozni és az akkor ismert legkorszerűbb röntgen-készülékekkel, rádiumágyúval, sok száz rádiumtűvel, rádiumtubussal és béta-sugárzó rádiumlappal, korszerű fizikai sugármérő műszerekkel, fizikai laboratóriummal felszerelni, hanem azt is kiharcolni, hogy az egészségügyben alkalmazhatók listájára felvegyék végre az immár nélkülözhetetlennek tűnő és sok országban már évtizedek óta szereplő fizikusi státusokat is. Ezzel egyrészt behoztuk az élenjáró országokhoz képesti lemaradásunkat, másrészt évtizedekkel megelőztünk számos, egyébként fejlett egészségügygel rendelkező országot.

A következőkben a sugárterápia hatékonyságának jelentős fejlődését szolgáló, hazai fizikusok közreműködésével elért, nemzetközi fórumok, mint például az Egészségügyi Világszervezet (WHO), a bécsi Nemzetközi Atomenergia Ügynökség (IAEA), által is elismert néhány eredményünkről számolunk be, megvilágítva a sugárterápia fizikai vonatkozású általános problémáit.

Teleterápia

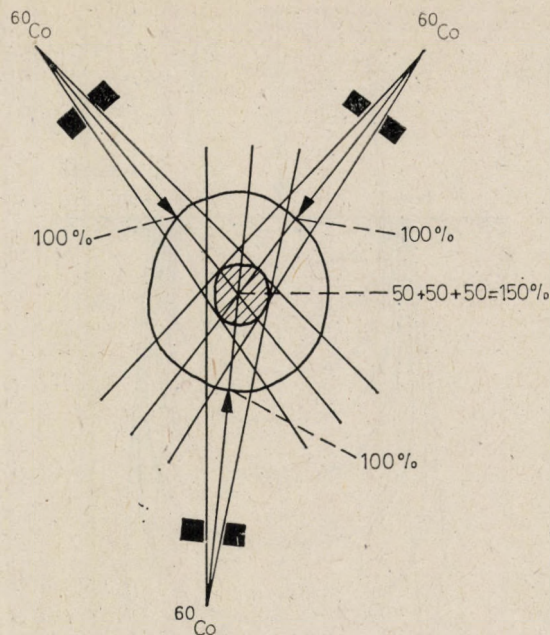
A sugárterápia egyik több, mint fél évszázados problémája: hogyan lehet a testben mélyen fekvő daganatra az elpusztításához szükséges dózist lejuttatni a környező testszövetek sugárkárosodása nélkül?

Az 1. ábra az emberi test lágy testszöveteiben a különböző mélységekbe lejutó dózist tünteti fel a felületi dózis százalékában különböző keménységű foton-sugárzásokra. Ezeknek az úgynevezett mélydózis-görbéknek a menete a fotonok energiá-

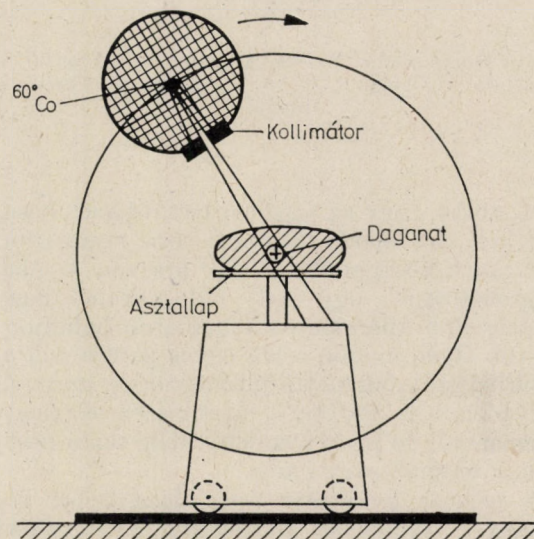


1. ábra Mélydózis görbék különböző energiájú foton sugárzásoknál:

1. 3 mm Al felezőréteg vastagságú röntgen sugárzás,
2. 1 mm Cu felezőréteg vastagságú röntgen sugárzás,
3. 4 mm Cu felezőréteg vastagságú röntgen sugárzás,
4. ^{60}Co 1,17 és 1,33 MeV-es γ -sugárzása.



2. ábra Három állómezős besugárzás keresztmetzeti képe.

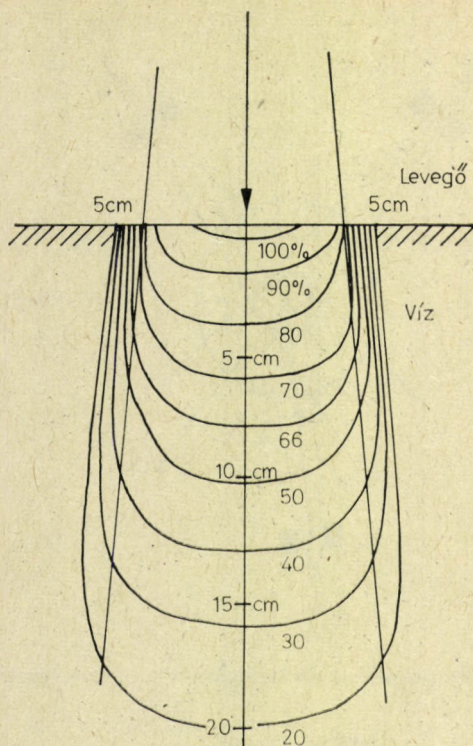


3. ábra Mozgómezős besugárzás keresztmetzeti képe.

in kívül függ természetesen a fókuszbőr távolságtól és a sugárnyaláb keresztmetszetétől is.

E szerint a több, mint fél évszázadon át használt néhány tized MeV-es röntgen sugárzások, de még a ^{60}Co 1,25 MeV-es gamma sugárzása esetén is, ha csak 10 cm mélységben levő daganattal számolunk is, arra már csak a felületi dózisnak fele, harmada juttatható le, tehát vagy nem kapja meg az elpusztításához szükséges dózist, vagy ha igen, akkor az előtte fekvő testszövetek szükségszerűen 2–3-szor nagyobb dózist elnyelve kifehélyesednek és a besugárzás a beteg gyógyítása helyett annak halálát okozhatja.

Csak a fizikai szempontokat véve figyelembe, a megoldás kézenfekvő: vagy több irányból kell a daganatot megcélózni, amikor is az elnyelt energiák a daganatban egyszerűen összegeződnek, míg a felületi dózisok más-más bőr területet terhelve, a bőrt elpusztító dózis értéke alá szoríthatók



4. ábra Dóziseloszlás vízben ^{60}Co sugárforrásnál 60 cm-es forrásbőr távolságnál, 6×8 cm-es mező középvonala mentén

le (2. ábra), vagy az úgynevezett rotációs besugárzást kell alkalmazni (3. ábra), azaz a sugárforrást a daganat középpontja körüli köríven — állandó szögsebességgel úgy kell elmozdítani, hogy a sugárnyaláb állandóan a daganaton haladjon keresztül. Ilyen módon a bőr egyes pontjainak a dózisterhelése a daganatra jutó összdózis harmadára, negyedére is leszorítható, mert hiszen bár nagyobb intenzitású, de jóval rövidebb ideig tartó besugárzásnak vannak csak kitéve.

A feladat kvalitatív megoldása tehát régóta ismeretes. Gyakorlati kivitelezése azonban technikai nehézségek és elvi problémák miatt csak igen korlátozott mértékben volt lehetséges. Az igen kis fajsúlyú tüdő és az erősen elnyelő csont között számos egyéb inhomogenitás és található az emberi testben. Ezeknek a számításbavételére gyakorlatilag nem volt meg a lehetőségünk. Emellett nagy problémát jelentett az emberi test egyes részeinek különböző mérvű sugárérzékenysége is.

Számtalan tapasztalat egyértelműen azt mutatja, hogy az embernél az ionizáló sugárzások — ellentétben a növényekkel — mindig *bionegatív*, azaz pusztító hatást fejtenek ki. A gyógyítás tehát csak úgy következhet be, hogy a gyorsan burjánzó daganatot az elpusztításához szükséges dózissal és semmivel sem kisebbel valóban teljes egészében elpusztítjuk. A daganat fokozatosan széthull, az elhalt részeket a szervezet folyamatosan kiküszöböli magából, míg az ép testszövetek a kisebb elnyelt dózis és általában a kisebb sugárérzékenységük következtében regenerálódnak. A gyógyítás előfeltétele tehát minden esetben a térben és időben megfelelő dozírozás.

Pontosabban megfogalmazva az optimális terápiás besugárzásnak két fő követelménye:

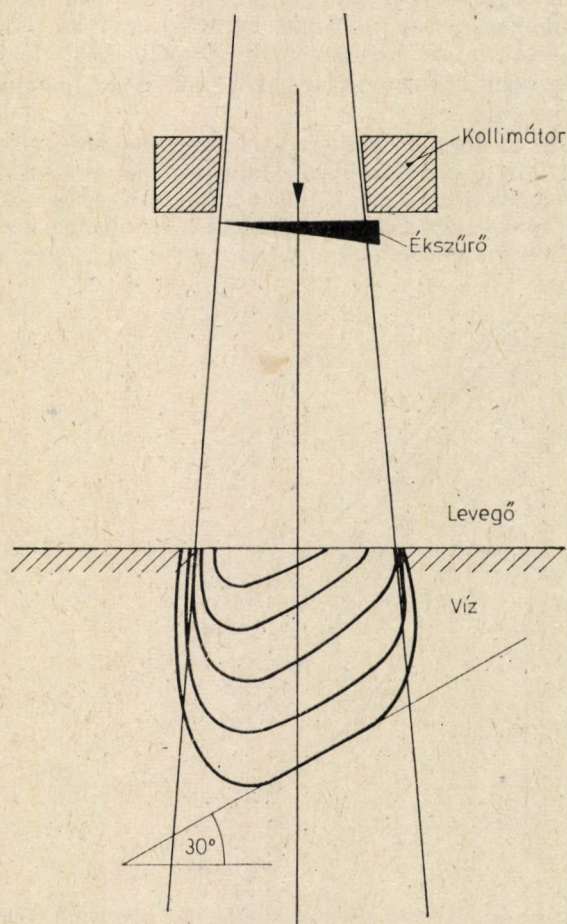
1. A daganat, illetve a legtöbbször egészen pontosan nem meghatározható határfelülete következtében a daganatnál kissé nagyobb célterület teljes egészében *homogén besugárzást* kapjon,

2. A célterület körül a dózis minél meredekebben csökkenjék.

Minél inkább sikerül jó besugárzástervezéssel és a terv szerinti pontos besugárzással a fenti két követelményt teljesíteni, annál nagyobb a valószínűsége a beteg gyógyulásának.

A besugárzástervezés alapja tehát a pontos testkeresztmetszeti rajz és benne a daganat felüntetése. Ez az elsősorban orvosi és aszisztensi munka nagy gyakorlatot igénylő, nem könnyű tevékenység, viszont ennek pontos, a valóságnak megfelelő voltán nyugszik az egész besugárzástervezés. E röviden *topometriának* nevezett, sokszor szerteágazó vizsgálatokat igénylő munka részleteivel e helyen nem foglalkozunk.

A komplett testkeresztmetszeti rajz kerül aztán a fizikus kezébe. Az ő feladata most már a testkeresztmetszeti rajz méretei és méret arányai alapján ledönteni, hogy milyen irányokból, milyen besugárzási mezőkkel és milyen módosító tényezők alkalmazásával milyen besugárzási tervet lát legcélszerűbbnek. Döntését a dóziseloszlás pontról



5. ábra Dóziseloszlás vízben ^{60}Co sugárforrásnál, 6×8 cm-es mezőnél 30° -os ékhatású éksűrő alkalmazásánál. Az ékhatás szögét, α -t az 50%-os izodózis görbének a vízszintestől való elhajlása szolgáltatja

pontra történő kiszámításával és az izodózis görbék berajzolásával elsősorban ön maga felé igazolnia kell. Amennyiben a dóziseloszlás nem bizonyulna elfogadhatónak, például a dózis maximum a góc mellé esik, egy, vagy több tényező módosításával újabb tervet kell készítenie.

A besugárzási terv több állómezős besugárzás esetén lényegében véve egy testkeresztmetszeti rajzon feltüntetett izodózisgörbe sereg, amely tartalmazza az 1:1 arányú testkeresztmetszeti rajzon a daganat, illetve a besugárzandó célterület pontos elhelyezkedését, nagyságát, alakját, a csontokat, a tüdőt, egyes különösen sugárvédelmet igénylő egyéb szerveket, a sugárbelépési kapukat (besugárzási mezőket), a besugárzási irányokat, az egyes besugárzási mezőkhöz tartozó besugárzási időkkel, valamint egyéb előírásokat, mint például ékszírók, légréseket kitöltő blózsok, stb., illetve az ezek összességéhez tartozó izodózis görbéket.

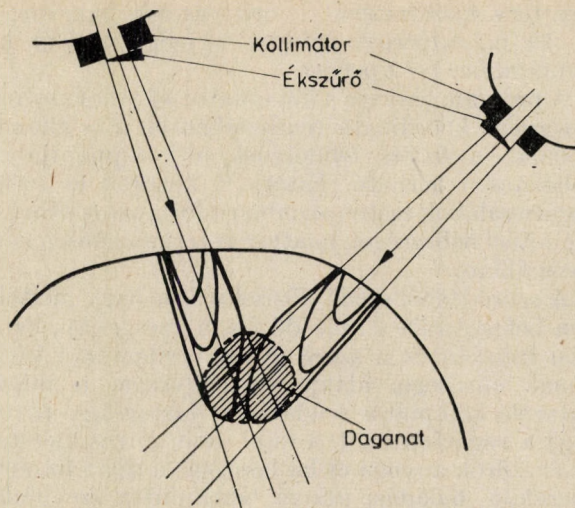
A besugárzási tervről, más néven dóziseloszlási térképről közvetlenül leolvasható, hogy mennyiben esik a dózismaximum valóban a célterület középső részére, mennyire homogén a célterület besugárzása, milyen gyorsan esik a dózis a célterület körül, mekkora dózist kapnak az egyes szervek, a különösen védendő területek, stb.

A dózistérképek szerkesztése hosszú időn át világszerte úgy történt, hogy a kérdéses sugárforrás — túlnyomó részt kobaltágyú — különböző alakú és nagyságú besugárzási mezőikhez tartozó homogén, lágy testszövetekre, illetve az ezt jól helyettesítő vízre vonatkozó dóziseloszlási térképeket víz-fantomban, különböző mélységekben gondosan kimérték, különös tekintettel a félárnyékos szakaszokban futó görbék lefutására, 4. ábra.

A többmezős besugárzásokra vonatkozó dóziseloszlási térképek az adott esetben megfelelő egyes mezők dóziseloszlási térképeinek az egymásra fektetéséből és ezeknek pontonkénti összegezéséből transzparens grafikus eljárással készültek. Ez természetesen még homogénnek nevezhető testrészek besugárzása esetén is igen fáradtságos és hosszadalmas munkát jelentett és így csak a betegek egy részénél volt elvégezhető még ott is, ahol gyakorlatilag fizikusok rendelkezésre állottak. Ilyen hely pedig hazánkban is csak nagyon kevés volt.

Egy további nehézséget okozott az a körülmény, hogy éppen ezeknek a besugárzási terveknek a készítése során derült ki, hogy az évtizedeken át használt úgynevezett „nyíltmezős” besugárzásokkal — amelyekre az 1. ábra görbéi is vonatkoznak — az optimális terápiás besugárzásoknak már említett két fő követelménye: a célterület homogén besugárzása és körülötte a dózisnak minél rohamosabb csökkenése, nem teljesíthető, feltétlenül szükség van különböző hajlásszögű ékszírókra, [esetleg légréseket kitöltő úgynevezett blózsokra] — 5. ábra — amelyekkel az egyes mezőkhöz tartozó dóziseloszlási térképek tetszés szerint módosíthatók, 6. ábra.

Végül az eredő dózistérkép pontos kiszámítását rendkívül megnehezítette az a körülmény, hogy az átsugárzásra kerülő testrész általában inhomogén. A csontok, a 0,3–0,4 fajsúlyú tüdő, stb. jelentős mértékben befolyásolhatják a sugárzás elnyelődését és szóródását. Ennek figyelembe vételével



6. ábra Két ékszíróval besugárzással elérhető, hogy a daganat elülső és hátsó felszíne ugyanazt a dózist kapja.

re viszont gyakorlatilag már egyáltalában nem volt meg a lehetőség.

A fent vázolt nehézségek fokozottabb mértékben jelentkeztek a mozgómezős, rotációs besugárzásoknál, ahol — mint már említettük — a sugárforrás a daganat, mint középpont körül hosszabb rövidebb köríven egyenletes sebességgel elmozdul. Az ebből eredő dozirozási nehézségek voltak elsősorban az okai annak, hogy az igen szépen megkonstruált, drága rotációs készülékek — szerte a világon — többnyire csak mint állómezős készülékek nyertek alkalmazást.

Lényeges változás következett be mintegy 20 évvel ezelőtt a gyakorlati számítástechnika megjelenésével. Ez ugyanis arra sarkallta a fizikusokat, hogy megkíséreljenek egy olyan számítógép-programot írni, amely a sugárzás és anyag közti kölcsönhatások fizikai törvényszerűségeinek a figyelembe vételével a besugárzandó célterület középpontján átfektetett és legtöbbször a test hossztengeleire merőleges síkon elhelyezett négyzetes rács pontjaira vonatkozóan kiszámítja a különböző besugárzási mezőkből az egyes pontokba jutó dózisokat, majd ezeket pontonként összegezi. A kívánt testkeresztmetszethez tartozó dóziseloszlási térképet képernyőn, vagy természetes nagyságban kinyomtatva szemlélhetjük és elfogadhatónak, vagy elfogadhatatlannak minősíthetjük.

Ilyen módon az egyébként szükséges munkaidőnek sok nagyságrenddel való csökkentésével elvileg lehetőség kínálkozott a korszerű besugárzástervezés általános bevezetésére és ezzel a teleterápia hatásfokának ugrásszerű, lényeges megemelésére.

A számítógépes besugárzástervezési programok megírására valóban el is kezdődtek a munkák. Igen nagy problémát okozott azonban az a tény, hogy a sugárterápia szempontjából legfontosabb sugárzásnál, a különféle elektromágneses sugárzásoknál az anyaggal való kölcsönhatásnak számos bonyolult fajtája jön létre és még ha ezek közül a csak kis valószínűséggel fellépő kölcsönhatásokat el is hagyjuk, egy olyan rendkívül sokrétű és igen sok paramétertől függő jelenségről van szó, amely-

egy terv kiszámítása — nagyságától függően — 5–10 másodpercet igényel, egy-egy térkép ki-nyomtatása 1–2 perccel.

A program lényege a következő: a 7. ábra szerinti divergens koordináta rendszerben az $x =$ állandó vonalak a forrás felületének a középpontjában tökéletesen leírható. Kiterjedt közegek és széles sugárnyalábok esetén azonban a formula gyakorlati számítási nehézségek miatt már természetesen nem használható.

A szóródásból eredő dóziseloszlást nagy mértékben befolyásolja a szóródó foton energiáján, haladási irányán és a szóró közeg rendszámán kívül annak sűrűsége, alakja és nagysága, a mezőt határoló kollimátor rendszára, vastagsága, távolsága a sugárforrástól, a radioaktív forrás méretei, az ékszűrők anyaga és hajlásszöge, a szórt fotonok energiája, haladási iránya, valamint a szekunder és terciér szóródás mértéke is. Mindezeknek figyelembe vétele és egzakt matematikai leírása — mint már említettük gyakorlatilag lehetetlen.

Ezért más módszert kellett választani a számítógépes besugárzástervezés megvalósításához: nevezetesen a fizikai jelenségeket leíró túlságosan bonyolult matematikai képletek helyett a könnyebben elvégezhető dózismérésekben megnyilvánuló törvényszerűségeket felhasználni a számítógépi program megírásához. Más szavakkal: célszerűnek látszott nagy pontosságú méréssorozatokkal közvetlenül meghatározni, hogy bizonyos paraméterek, mint például mezőnagyság, félárnyék szélesség, ékszűrők, stb. fokozatos megváltoztatásának milyen hatása van az effektív dóziseloszlásra és az így kapott függvényekre alapozni a program egyébként túlságosan bonyolult, megírhatatlan részeit.

Az elméleti számítások és a pontosan meghatározott körülmények között végzett mérések legszorosabb összekapcsolásából születtek meg hosszú és nehéz munkával a nem régen még remélni sem mert besugárzástervezési számítógépi programok. Ezek között igen előkelő helyet foglal el a jól ismert holland Johan van de Geijn fizikusnak nagy tudással és gondossággal megírt, — kobaltágyukra vonatkozó — EXTIDOS nevű kitűnő programja, amellyel 1975-ben bennünket megajándékozott.

A program a már felsorolt tényezőkön kívül figyelembe veszi a ^{60}Co sugárforrás folyamatos lebomlását, a testen belüli inhomogenitást mutató területeket (csont, tüdő, stb.), a sugárnyaládba helyezett tetszés szerinti alakú ólomblokkokat például a genitális szervek letakarására, stb. Képes ezen kívül az eredeti, a céltér fogat közepén áthaladó sík előtt, vagy mögött elhelyezkedő, az eredetivel párhuzamos síkokra is meghatározni a dóziseloszlási térképeket.

Időközben az 1955. és 1975. közötti időszakban lényegesen megnőtt a magyar fizikusok szerepe az egészségügy területén is. Egyre többen kapcsolódtak be a radioizotópok felhasználása során megnyíló új lehetőségek kihasználásánál jelentkező sugárfizikai problémák megoldásába mind az orvosi diagnosztika, mind a sugárterápia vonalán.

Az Eötvös Loránd Rádium és Röntgen Intézet 1949-ben Országos Onkológiai Intézzé átszervezte közvetlenül az Egészségügyi Minisztérium

irányítása alá került és 1952-ben a 100 ágyas Bakáts-téri épületéből átköltözött a Kékgolyó utcai volt Siesta Szanatórium 300 ágyas, pavilon rendszerű épületeibe, ahol a sugárfizikai osztály is a hozzá tartozó finommechanikai műhellyel végre megfelelő tágas elhelyezéshez jutott.

Itt fejlesztettük ki az 1956–1957. években azt a nagy külföldi érdeklődést is kiváltó kéttank rendszerű kobaltágyú típust, amely a más országokban gyártott egytank rendszerű készülékektől három lényeges eltérést mutatott:

1. A beteg beállítását végző orvos és asszisztens *gamma-sugárterhelést egyáltalán nem kap*, mert a ^{60}Co sugárforrás minden besugárzás után elhagyja nemcsak a besugárzó fejet, de magát a besugárzó helyiséget is.

2. A készülék *elektromos áram nélkül üzemeltethető*, tehát az elektromos hálózattal még nem rendelkező ázsiai és afrikai országok is alkalmazhatják a legkorszerűbb sugárterápiás besugárzásokat az egytank rendszerű készülékeknél sokkal kisebb beruházási költségért.

3. Az igen egyszerű készüléknél számottevő meghibásodás nem léphet fel és a sugárterápiás besugárzásokon kívül igen nagy intenzitású *panoráma besugárzásokra* is felhasználható.

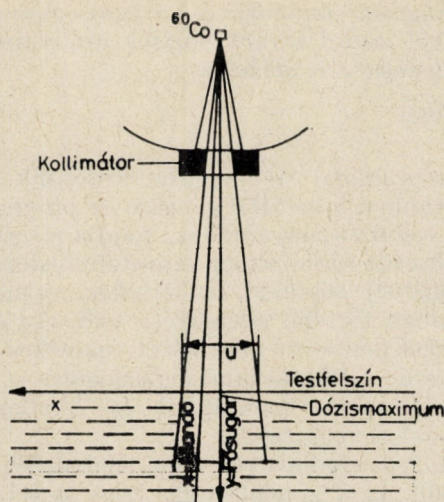
■ Nem a fizikusokon múltott, hogy az állómezős besugárzások céljaira házilag felépített GRAVIER CERT készülék és a MEDICOR bevonásával készített ROTACERT mozgómezős készülék típusokból összesen csupán 8 db készült, és ebből csak 2 db ment külföldre.

■ Ezeket a készülékeket használat közben tovább fejlesztettük, illetve kiegészítettük a már említett ékszűrőkkel és a projekciós rács-szűrőkkel. *Rács-szűrő* alatt egy olyan vastagabb ólomlemez értünk, amely a primer sugárzásnak legalább 90%-át elnyeli, és amelyen szabályos rács-szerű elrendezésben olyan kör, vagy négyzet alakú nyílások helyezkednek el, amelyeknek összterülete a besugárzási mező területének meghatározott részét, legtöbbször 50%-át teszi ki.

Nagyobb területek besugárzása esetén célszerű egy kisebb méretű rácsszűrőt a sugárforrás közelében elhelyezni és a rácsot a távolabb elhelyezkedő *betegre rávetíteni*, mert így a 45 mm vastag rácsszűrő még kézzel emelhető tartozékot jelent. Minthogy azonban a ^{60}Co sugárforrások általában 20 mm keresztmetszetűek, a rács projiciálásának speciális előfeltételei vannak. Ennek részleteire itt nem térhetünk ki.

Számítógépes Országos Besugárzástervezési Hálózat

Visszatérve mármost a számítógépes besugárzástervezésnek EXTIDOS programjára megállapíthatjuk, hogy a gyakorlati követelményeket messzeszemenően kielégítő program természetesen csak nagy számítógépeken volt futtatható, igénye 96 kbyte. A hazai egészségügyi intézményeknek rendelkezésére álló Állami Számítástechnikai Szolgálat (ÁSZSZ) Honeywell Bull 66/60 számítógépé-



7. ábra A kobaltágyú paramétereitől meghatározott divergens koordináta-rendszer.

nek komplett matematikai leírása — az egyes elemi kölcsönhatások fizikai törvényszerűségeinek pontos ismerete dacára — rendkívül nehéz, gyakorlatilag megoldhatatlan feladatot jelent.

Így például a Compton-szóródás elemi folyamata jól ismert jelenség, a Klein–Nishina-képlettel találkozunk. Általános esetben a dózist a következő összefüggés írja le:

$$D(x, y, u, v) = D_0 \cdot D_{\text{mélyd}}(y, u, v) \cdot \delta(x, y_0, u, v),$$

ahol D_0 a dózismaximum helyén leadott dózis,

$D_{\text{mélyd}}$ a dózismaximumra normált mélydózis, azaz a leadott dózis és a dózismaximum hányadosa a mélység függvényében, a fősugár mentén mérve,

δ az úgynevezett „off-center ratio” vagy dózisprofil, egy adott y_0 mélységben a leadott dózis és a fősugár menti dózis hányadosa a fősugártól mért távolság függvényében és

u, v a téglalap alakú mező két oldala úgy, hogy az u oldal párhuzamos a testkeresztmetszet síkjával.

a) Mélydózis

A maximumra normált mélydózis görbék alakja függ a besugárzási mező nagyságától. Téglalap alakú mezőket olyan négyzetes mezővel helyettesítünk, melyek mélydózisa a lehető legjobban megközelíti a téglalap alakú mezőét. Ezt *ekvivalens négyzetnek* nevezzük.

A programban a mélydózis görbéket 0,5 cm-nél nagyobb mélységekre a következő kifejezéssel közelítjük:

$$D_{\text{mélyd}} = \left(\frac{f + 0,5}{f + d} \right)^2 \cdot [g_1(s)d^2 + g_2(s)d + g_3(s)],$$

ahol f a forrás-bőr távolság, d a mélység, g_i az s ekvivalens mezőmérettől függő, mérésekkel meghatározott állandók. A 0 és 0,5 cm közötti tartományban egy jóval egyszerűbb és kevésbé pontos másodfokú közelítést alkalmazunk.

b) Dózisprofil

A 10 cm mélyen mért dóziseloszlást használjuk minden mélységben, mert bár a görbe alakja függ a mélységtől, de az ebből adódó hiba a kinyomtatott térképen legfeljebb 1 karakternyi eltolódást jelent.

A téglalap alakú mezők profiljait is a négyzetes mezőkre visszavezetve lehet leírni igen jó közelítéssel:

$$\delta(x, 10, u, v) = \frac{\delta(x, 10, u, u) + \delta(x, u, v) \cdot \Delta(u, v)}{1 + \Delta(u, v)}$$

ahol

$$\delta(x, u, v) = \frac{(u + v)^2}{(u + v)^2 + 4x^2} \quad (u \neq v)$$

és

$$\Delta(u, v) = \frac{D(0, 10, u, v) - D(0, 10, u, u)}{D(0, 10, u, u)}$$

Mivel $x = 0$ -ban $\delta(x, 10, u, v) = 1$, ezért egyszerűsítés után

$$\Delta(u, v) = \frac{D_{\text{mélyd}}(10, u, v)}{D_{\text{mélyd}}(10, u, u)} - 1$$

A $D_{\text{mélyd}}(10, u, v)$ -t az a) pontban leírt ekvivalens mező mélydózisával számítva a $\delta(x, 10, u, v)$ -t tisztán négyzetes mezők segítségével határozhatjuk meg.

c) Korrekciók, módosítások

Az EXT DOS program a fent leírt alapeset különböző korrekcióit is ki tudja számítani. Így meghatározza az izodózis görbéket egyenletlen, a fősugár nem merőleges testkontúr esetére is, kiszámítja a görbék torzulását a test belsejében levő inhomogenitások hatására, stb. Bár ez a torzulás nem nagy, mégis különösen tüdődaganatok esetében érdemes figyelembe venni. A program alkalmas az ékek hatásának a kiszámítására is.

d) Mozgómezős besugárzások

A több mezőből származó dóziseloszlást az egyes mezők által leadott dózisok egyszerű összegezésével határozhatjuk meg. Ez teszi lehetővé a mozgómezős besugárzások tervezését. Egy köríven mozgatott mező dóziseloszlását több állómező együttes dóziseloszlásával írjuk le. Az ív hosszától és a mező nagyságától függően az ívet 5–20 fokos szakaszokra osztjuk fel és minden szakaszra egy állómezőt helyezünk. Az ezekhez tartozó dóziseloszlások összegezésével megkapjuk az íven mozgó mezőktől származó teljes dóziseloszlást.

Lehetőségünk van több, különböző íven mozgó mezővel végzett besugárzás megtervezésére is.

Adat és eredményszolgáltatás

A program által igényelt adatok két csoportba oszthatók: a kobaltágyukat jellemző *technikai adatok*, amelyek hosszú időn át változatlanok maradnak és az egyes *betegekre*, valamint tervezett kezelésükre vonatkozó adatok.

A kobaltágyukra vonatkozó adatok:

1. Technikai adatok, mint a forrás aktivitása, méretei, betöltésének időpontja, a készülék sor-száma, a forrás-bőr távolság, a forrás-tengely távolság, a forrás-kollimátor távolság, az ékek abszorpciós együtthatója és hajlásszöge, stb.

2. Dózisteljesítmény valamennyi mezőre a maximum helyén.

3. Nagyszámú adatot jelent a $\delta(x, 10, u, u)$ függvény értékeinek halmaza a 3×3 cm-es mezőtől a 22×22 cm-es mezőig 1 cm-enként. Valamennyi mezőnél a függvény értékeket $\Delta x = 0,5$ cm-es lépésközzel kell megadni.

4. Végül szükség van még a $g_1(u)$, $g_2(u)$, $g_3(u)$ együtthatókra valamennyi mezőre vonatkozóan. Ezeket nagyszámú méréssel kell meghatározni. Értékük azonos típusú készülékeknél ugyanaz.

A betegre és kezelésre vonatkozó adatok:

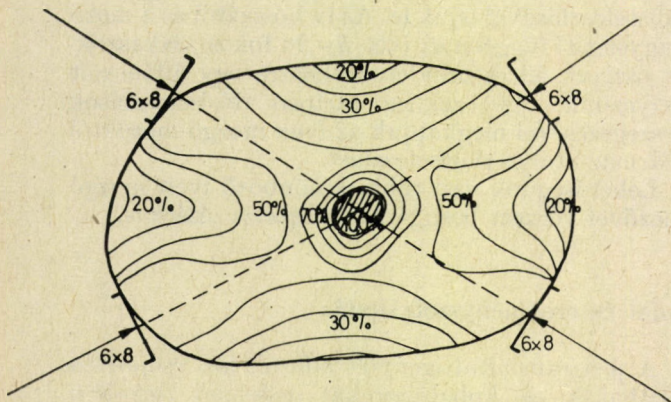
1. A beteg neve, a daganat helye, kórlapszám, dátum.

2. A testkontúr, valamint a daganat (célterület) és az esetleg figyelembe veendő inhomogenitások kontúrjainak adatai, a daganat és az inhomogenitások sűrűsége. A kontúrok megadása egy polárkoordináta rendszerben történik: egy adott iránytól kezdve 20 fokenként megadjuk a koordináta rendszer középpontjának és a kontúr megfelelő pontjának távolságát.

3. A kezelésre vonatkozó adatok: a besugárzási mezők száma és mérete, a mezők középpontjainak koordinátái egy előre rögzített derékszögű koordináta rendszerben, a fősugár belépési szöge, a használt ék azonosítója és az egyes mezőkön leadni kívánt dózisok aránya. Mozgó mezőknél a forgatás középpontjának koordinátái, valamint az elfordulás kezdő és végállásának szöge egy adott alapállástól.

Eredménysszolgáltatás

A program eredménye a *dóziseloszlás térképe* (8. ábra), amelyen az azonos számok, illetve betűk azonos dózisú pontokat jelölnek. Kirajzolódik a céltérfogat és az inhomogenitások körvonala is és így gyorsan felmérhető, hogy a tervezett kezelés alkalmas-e a daganat elpusztítására az egészséges testszövetek nagyobb mérvű károsodása nélkül.



8. ábra Négy-mezős besugárzási terv dóziseloszlási térképe a kinyomtatott lapon szereplő bemenő- és kiszámított adatok nélkül.

A program kiszámítja és kiírja az egyes mezőkön keresztül leadni kívánt dózisok arányainak megfelelő *besugárzási időket* is.

Ellenőrzés

A programmal való megismerkedésünk után első feladatunk volt az IBM gépekre írt program adaptálása hazai viszonyainkhoz, majd a program által szolgáltatott térképeknek szövetekvivalens anyagból (Mix-D) készített makettekben, valamint vízfantomban történő ellenőrzése volt. Az ellenőrző méréseket pontszerű mérések elvégzéséhez készített kisméretű — $10-15 \text{ mm}^3$ légtérfogatú — kondenzátor ionizációs kamrákkal és filmdozimetriai eljárásokkal végeztük.

Mivel az eredmények igen kedvezőek voltak, felmerült az a gondolatunk, hogy a teleterápiás besugárzások hatékonysága szempontjából új korszakot jelentő lehetőséget ne csak az Országos Onkológiai Intézet két kobaltágyújával, (1 Gravicert és 1 Rotacert) hanem az ország valamennyi, jelenleg 9 kobaltágyúval besugárzott daganatos betege számára biztosítsuk.

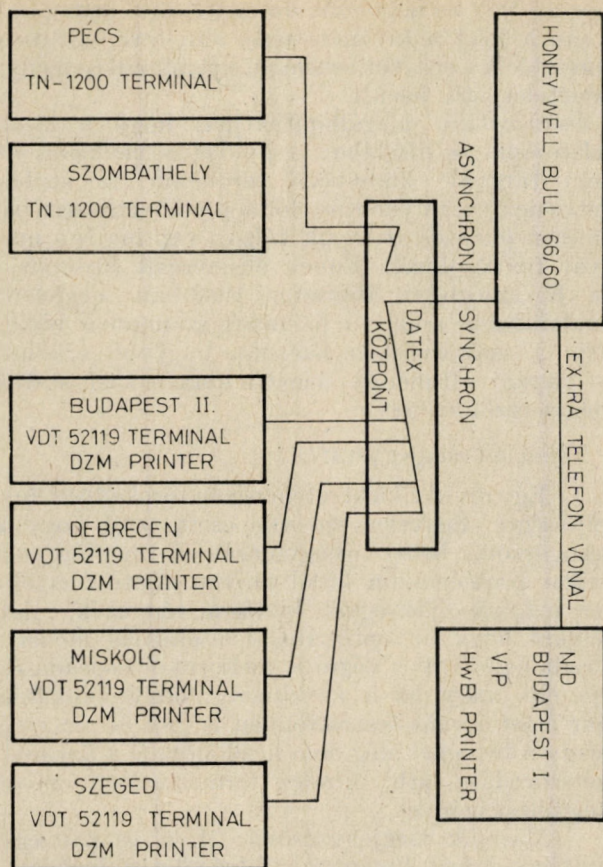
Ennek személyi és tárgyi előfeltételei a következők voltak:

1. A daganat pontos helyének meghatározására alkalmas *készülékek és orvosok*, mert hiszen az új, egzakt természettudományos módszereken alapuló besugárzástervezéstől csak akkor várhatunk lényeges előre lépést, ha a beteg testkeresztmetszeti képébe az orvos pontosan be tudja rajzolni a daganatot, illetve a besugárzandó gócot.

2. Radiológiai alapismeretekkel és rendelkező, interdiszciplináris kérdések iránt érdeklődő *fizikusok*, akik a térbeli geometriai viszonyokat, a sugárfizikai problémákat, a sugárvédelmi kérdéseket, stb. jól át tudják tekinteni, elvégzik a korszerű dozimetriai és topometriai méréseket, meghatározzák és beadják a számítógépbe az előírt input adatokat, lekérdezik és kiértékelik a számítógép által szolgáltatott eredményeket, stb.

3. *Számítógép*, illetve számítógépi kapacitás. Mivel a besugárzástervezéshez — az elmondottak szerint — egyrészt csak igen költséges számítógép jöhetett szóba, másrészt mivel ezek kihasználtsága ezzel a feladatkörrel csak igen igen kismérvű lett volna, az egyes teleterápiás kórházakba, klinikákba külön-külön sok millió forintos számítógépek telepítése, egyes más országok gyakorlatához hasonlóan, hazai viszonylatban teljesen irreálisnak tűnt. Ettől függetlenül más szempontok is azt a másik lehetőséget látszottak támogatni, hogy egy egyetlen nagy számítógépre támaszkodó országos besugárzástervezési hálózatot hozzunk létre, amelynek irányító és ellenőrző centruma az Országos Onkológiai Intézet és a vele bérelt telefon vonalon állandóan kapcsolatban álló Állami Számítástechnikai Szolgálat Honeywell Bull CII-Hb 66/60-as nagy számítógépe.

A többi sugárterápiás központ, azaz a kobaltágyúval rendelkező budapesti, miskolci, szombathelyi tanács-kórházak, valamint debreceni, pécsi és szegedi klinikák, amelyek egyenletesen fedik le az ország egész területét, egy-egy sornyomtatóval is ellátott terminállal a posta által biztosított külön



9. ábra Az ötödik éve működő Számítógépes Országos Besugárzástervezési Hálózat blokkdaigramja.

telefon vonalakon, újabban kizárólag távadat-közlési célokra kiépített DATEX vonalakon keresztül csatlakozik a hálózat budapesti központjához, 9. ábra. A központ egyrészt az üzemeltetés rutin munkáját, és az ezzel kapcsolatos ellenőrzési feladatokat látja el, másrészt biztosítja a folyamatos üzemeltetési, javítási, karbantartási, fejlesztési és pénzügyi feltételeket.

Az előfeltételek effektív megteremtése mintegy 3 éves, szerteágazó, nehéz munkát igényelt. Döntő mozzanata volt, hogy 1976-ban a bécsi Nemzetközi Atomenergia Ügynökség (IAEA) igazgató tanácsa megszavazta technikai segítségnyújtási programja keretében azt a 100 000 dollárt, amelyet az ÁSZSZ HwB 66/60-as számítógépéhez csatlakoztatható HwB terminálok beszerzéséhez kértünk. A dóziseloszlási térképek kinyomtatására is alkalmas 5 db HwB terminált, továbbá egy képernyős terminált külön kinyomtató egységgel és Sematron modemekkel csak 1 éves — Budapesten és Bécsben folytatott — közelharcok után 1977-ben sikerült megkapnunk.

Ekkor kezdhettük el a többi előfeltétel biztosítását, mint például a testkeresztmetszetet rajzoló készülékek, állványzatok és számos egyéb segéd-eszköz tervezését, beszerzését, illetve házi legyártását. Igen nagy feladatot jelentett a több mint 20 fizikusi és orvosi állás, valamint ezek betöltésére alkalmas szakemberek megszerzése, a külön telefonvonalak és helyiségek biztosítása, egy komplex tanfolyam megrendezése e célra megírt jegyzettel,

végül az egész hálózat, mint egyetlen új egység üzemeltetési költségeinek a biztosítása az egészségügyi tárca keretében egy tételben az Országos Onkológiai Intézet kezelésében és bonyolításában.

A Számítástechnikai Országos Besugárzástervezési Hálózat közvetlenül a tanfolyam befejezése után 1978. október 16-án kezdte meg működését, azóta folyamatosan dolgozik mintegy 50 szakember, köztük 18 fizikus közreműködésével. Menetközben természetesen többször került sor, főként a fizikusok, az ÁSZSZ és posta szakembereinek közös megbeszéléseire az észlelt hibák kiküszöböléséről, új technikai lehetőségek fokozatos igénybeviteléről, valamint az elért eredmények értékeléséről.

A Hálózat első négy évi működése

Az orvosi titoktartás és biztonság érdekében minden állomás a számítógépben külön saját területtel (file) rendelkezik, amelyhez csak egy jelszó ismeretével lehet hozzáférni. A diagnosztizált és pontosan kivizsgált betegről a daganat közepén áthaladó, általában a test hossz tengelyére merőleges síkban pontos testkeresztmetszeti rajz készül, melybe az orvos berajzolja a besugárzandó gócot és inhomogenitási területeket. A fizikus meghatározza a görbéket leíró 18–18 pont polárkoordinátáit, valamint az adatlapon szereplő egyéb adatokat és ezeket terminálján keresztül közli közvetlenül az ÁSZSZ számítógépével, amelyben valamennyi kobaltágyúra vonatkozó fix adat, köztük a sugárforrásra és az intézetünk által a helyszínen kimért dóziseloszlási görbékre vonatkozó adatok folyamatosan tárolva vannak.

Intézetünk az adatok beérkezésének ellenőrzése után elindítja a számítógépet, majd valamennyi dóziseloszlási térképet lekérdezi, azaz kinyomtatattja. Ellenőrzésük, a netán szükséges javítások elvégzése után, megadja a számítógépnek az engedélyt az eredményeknek a megfelelő állomásokkal való közlésre. Az állomások a lekérdezett és kinyomtatott dóziseloszlási térképeket kiértékelik, az esetleg nem megfelelőnek bizonyuló helyett — a térképről leolvasható irányokba ható módosításokkal — új tervet készítenek.

A jónak minősülő tervek ezután a kobaltágyus üzemekbe kerülnek, ahol külön gondot jelent, hogy a betegek beállítása a több hetes besugárzási sorozatok valamennyi napján pontosan a tervnek megfelelően történjenek.

Végül megjegyezzük, hogy a távadatközlés minőségének ugrásszerű javulása és a Hálózatban dolgozók begyakorlottsága 4 év után lehetővé tette, hogy a fenti működési rendszer továbbfejlesztését meggyorsítsuk.

Diskusszió

A fenti hálózat működésének több szempontból nagy jelentőséget kell tulajdonítanunk. Egyrészt azért, mert a hálózat létrehozásába és folyamatos üzemeltetésébe befektetett sok munkának és költségnek a kezelt betegek nagyobb arányú gyógyulásában, a népgazdaságnak visszaadott nagyobb számú egészséges munkaerőben feltétlenül

jelentkeznie kell, nem beszélve a pénzben — nem felmérhető egyéni haszonról, a beteg meggyógyulásáról.

A szakirodalom már kezd összehasonlításokat közölni egyes országokban végzett felmérésekről. Számos esetben a számítógépes besugárzástervezéssel kezelt betegek gyógyulási aránya a kétszerezést is eléri a csupán becslések alapján kezelt betegek gyógyulási arányának. A kérdés megválaszolása természetesen igen nehéz, mert egyrészt általában az 5 éven túli tünetmentességet tekintik a gyógyulás kritériumának, másrészt egyénenként igen nagy különbségek mutatkoznak az azonos dózisú besugárzásokra való reagálásukban is, azaz csak nagyszámú egyed esetén várhatunk némiképpen is elfogadható statisztikai különbséget.

A hálózat eredményes működésének nagy jelentőséget kell tulajdonítanunk másrésztől azért is, mert egy 10 milliós populációra vonatkozó, azonos dozírozási alappal rendelkező olyan terápiás rendszert képvisel, amelyenhez hasonló — külföldi látogatók véleménye szerint is — másutt eddig nincsen és a nyugati egészségügyi rendszerekben például el sem képzelhető. Hálózatunk mindenestre nagy mértékben felkeltette a WHO és az IAEA érdeklődését is, amennyiben hasonló hálózat létrehozásával az általuk támogatott fejlődő országoknak sokkal kisebb összegekből jelentősen hatékonyabb támogatást tudnának nyújtani.

Tudatában vagyunk annak, hogy a hálózat működésének egyes fázisainál még vannak javítani valóink: például korszerű lokalizáló készülékek (szimulátor) és további kobaltágyuk, illetve lineáris gyorsítók beszerzése terén. A nemzetközi norma szerint ugyanis ma félmillió lakosra kell egy korszerű mélyterápiás készüléket számítani, tehát hazai viszonylatban 20 készülékre lenne szükségünk. Ezzel szemben jelenleg csupán 9 kobaltágyut és

egy 25 MeV-es betatron üzemeltetünk, azaz pontosan a felét a kívánatosnak, ami természetesen a készülékek erős túlterhelését, két műszakos igénybevételét, stb. jelenti.

Összefoglalva megállapíthatjuk, hogy a hazai teleterápia és általában a nukleáris medicina itt nem tárgyalt különböző területein az utóbbi évtizedek során jelentős előrelépés következett be, amiben jelentős szerepük volt és van ma is a magyar fizikusoknak. Ennek elismerését bizonyítja az Egészségügyi Miniszter 1983-ban megjelent rendelkezése, amely a fizikusok számára is biztosítja a szakorvoshoz hasonló, nagyobb erkölcsi és anyagi elismerést jelentő szakfizikusi státusz megszerezhetőségét.

Végül két megjegyzés:

— Egy rövid cikk keretében nem törekedhettünk teljességre. Egyetlen szó sem esett arról, hogy a besugárzott beteg gyógyulását a megtárgyalt fizikai problémákon kívül milyen döntő mértékben befolyásolják egyéb biológiai tényezők, mint például hogy az optimális dóziseloszlás mellett, a radiológus orvos végül is mekkora dózis leadását írja elő, vagy az a körülmény, hogy vannak-e már áttétek más testrészekben is, hol és mennyi, avagy a betegnél még nem kezdődött el a daganat szétszóródása, stb. Mindez természetesen orvosi megítélést igényel.

— Második megjegyzésünk: Mivel csupán egy általános képet kívántunk felvázolni a fizikusok szerepéről a hazai teleterápiában, természetesen el kellett tekintetnünk az e téren tevékenykedő mintegy 20 fizikus egyéni, igen szép eredményeinek a bemutatásától csakúgy, mint a nukleáris medicina, a sugárvédelem és egyéb területeken dolgozó egészségügyi fizikusok szerteágazó, értékes, több száz cikkben publikált munkájának a felvázolásától.

SZÁMÍTÓGÉP AZ OKTATÁSBAN

„ÍGY KEZDTÜK” — az első számítástechnikai oktatási kiállítás és programbemutató Budapest, 1983.

Hubert Tibor

Kvassay Jenő Út-, híd és vasútépítési Szakközépiskola

December utolsó előtti tanítási napján nyílt meg a Bolyai János Matematikai Társulat Számítástechnika oktatását segítő bizottság által szervezett kiállítás „Így kezdtük” címmel. A kiállítás, az előadások és bemutatók a számítástechnikai oktatási program középiskoláit kívánták segíteni.

A kiállítás szervezői meghívták a középiskolák tanárait, néhány oktatási szakembert, és az oktatással foglalkozó intézmények vezetőit. Megszervezésének céljai között szerepelt e kezdeti időszakban az eddigi oktatási módszereink összegyűjtése, tapasztalatszerelése, a jelenlegi helyzetkép felmérése, ötletek gyűjtése a további munkához.

Sajnos a Karácsony előtti csúcsforgalomban a kiküldött meghívók nem mindenhol jutottak el, ennek ellenére a vendégkönyvben levő számszerű adatok azt mutatják, hogy ma már a számítástechnika középiskolai oktatása reflektorfénybe került, a középiskolai tanárok nagy érdeklődést tanúsítanak az ÚGY iránt.

A kiállítást 285 különböző középiskola 320 tanára tekintette meg. Ez az ország középiskolái tanintézetének

több, mint egyharmadát jelenti. A rendezvény aktív kiállítója 38 középiskola volt; dícséretes, hogy ezek között 31 volt a nem budapesti. A kiállító tanárok és diákok lelkesedését mutatja az is, idejüket, fáradságukat (és költségeiket) ellenszolgáltatás nélkül áldozták a program „oltárán”.

A kiállítással egybekötött konzultációk lehetővé tették a látogató tanároknak, hogy találkozzanak és kérdéseket tegyenek fel a számítástechnika-oktatási program vezető szakembereinek.

Nagy érdeklődés kísérte a Tudományszervezési és Informatikai Intézet (TII) igazgatójának — Páris Györgynek — az előadását, aki a jelenlegi helyzetet és a jövőben várható változásokat vázolta fel. Az előadás után a MM, az OOK, az FPI, a KISZ, a TII szakemberei válaszoltak a tanárok kérdéseire. Nagy érdeklődéssel hallgatták Kovács Mihály — nyugalmazott piarista tanár — „Fizikai kísérletek számítógéppel” című bemutatóját.

A félnapokat utazó tanárok nagy figyelemmel nézték a kollégáik munkáját bemutató transzparenszeket, segédanyagokat, és szinte mindegyikük igényelte volna, hogy