

fizikai szemle

AZ EÖTVÖS LORÁND FIZIKAI TÁRSULAT LAPJA

Alapította Eötvös Loránd 1891-ben Mathematikai és Physikai Lapok néven

XXIV. évfolyam

3. szám

1974. március

A CIKLOTRON SUGÁRTERÁPIÁS ÉS DIAGNOSZTIKAI JELENTŐSÉGE

Bozóky László
Országos Onkológiai Intézet

Bevezetés

Háromnegyed évszázadra visszamenően megállapíthatjuk, hogy a fizika és az orvostudomány fejlődése között szoros kapcsolat állt fenn, pontosabban megfogalmazva, a fizika terén elért új eredmények, nem egyszer korszakalkotó felfedezések első gyakorlati hasznosítói között csaknem mindig ott találjuk az orvostudományt. Így például, hogy az ionizáló sugárzások területén maradjunk, a röntgen sugárzásnak 1895-ben történt felfedezése után a műszaki, kémiai, mezőgazdasági tudományokat megelőzve az orvostudomány azonnal felfigyelt Röntgen eredményeire és nyomban sok helyen egyszerre megindultak a vizsgálatok, hogy milyen területeken és miként állíthatja az orvostudomány a fizika felfedezését saját eszközeinek fegyvertárába. Az angolok nílusi hadserege például már fél évvel az első ionizáló sugárzás felfedezése után a repeszdarabok könnyebb kioperálása céljából tábori röntgen-készülékkel volt felszerelve. A röntgensugárzás orvosi felhasználásának elterjedése és fejlődése azóta is szünet nélkül tart, egyre újabb lehetőségeket megvalósító bámulatos metodikák születnek.

Ugyanez ismétlődött meg néhány évvel később a radioaktivitásnak, a radioaktív anyagoknak a felfedezése után: évtizedekkel más felhasználókat megelőzve, megindult a rádium széleskörű sugárterápiás alkalmazása és ma, 70 évvel később például a méhrákkezelések egyik leghatásosabb és legelterjedtebb fegyvere még mindig a rádium, milliók köszönhetik életüket neki.

Közben az 1930-as évek során kifejlődött egzakt fizikai dozimetria felhasználásával végzett vizsgálatok nyilvánvalóvá tették azt a tényt, hogy a konvencionális 200 kV-os röntgensugárzások túl sok elnyelt energiát juttatnak a csontokba, a bőrre és általában a mélyen fekvő daganatok előtti és melletti ép testszövetekre. A daganatok gyógyításának eredményesebbé tételéhez tehát jóval nagyobb áthatoló képességű, keményebb röntgensugárzásokra lenne szükség. Így érthető, hogy nagy érdeklődést váltott ki orvosi körökben a különféle részecskegyorsítók megjelenése és már 1937-ben egy 1 millió voltos Van de Graaff-készülékkel előállított nagy energiájú fotonokat, 1948-

ban az első, 22 millió voltos betatronnal előállított fotonokat és elektronokat, majd 1950-től kezdve 4–6 MeV energiájú lineáris gyorsítókkal keltett röntgensugárzásokat állítottak a sugárterápia szolgálatába.

A neutron felfedezése 1932-ben történt. Ebben az esetben természetesen időre volt szükség, míg terápiás besugárzások céljaira alkalmas neutron sugárforrásokat sikerült kifejleszteni, de az orvostudomány kezdeményező érdeklődése ez esetben is nyomban jelentkezett. Stone és Larkin már 1938 és 1943 között a Berkeley-i ciklotronnal nekikezdték a gyors neutronok terápiás hatásának a kipróbálásához. 250 betegen végzett besugárzások hatásainak hosszútávú megfigyeléséből végül is arra a következtetésre jutottak, hogy mivel egyrészt csupán 18 beteg érte meg a neutron-besugárzás után az 5 évet, és az eredmények általában nem jobbak a röntgensugárzással elérhető eredményeknél, másrészt viszont csaknem minden esetben igen komoly késői sugársérülési tünetek jelentkeznek, a neutron-sugárzások orvosi felhasználásra nem ajánlhatók, sőt összefoglaló dolgozatukban óva intettek, hogy bárki is neutron-besugárzásokkal csak kísérletezni is még egyszer megpróbáljon.

Ezt a tanácsot a radiológusok annál is inkább megfogadták, mert a fizika rövidesen újabb, nem remélt lehetőségeket tárt a sugárterápia elé. A kontrolált láncreakciót megvalósító első atomreaktor sikeres beindítása (1942) és folyamatos üzemeltetése során szerzett kedvező tapasztalatok nyomán újabbak és újabbak épültek, ami csakhamar lehetővé tette a reaktorokban előállítható mesterséges radioizotópoknak azelőtt elképzelhetetlen mennyiségben való előállítását és forgalomba hozatalát. Az előző évtizedek során kifejlesztett, néhány gramm ^{226}Ra elemet tartalmazó rádiumágyúk helyett, ami rendkívül magas beszerzési költségei következtében amúgy is csak kevesek számára volt elérhető — Magyarországnak például csak egyetlen rádiumágyúja volt 3 Ci Ra töltettel az 1936-ban létesült Eötvös Loránd Rádium és Röntgen Intézetben, a „Fizikai Gyógyítás Háza”-ban — 1950-ben működésbe lépett az első kobaltágyú három nagyságrenddel nagyobb aktivitású ^{60}Co töltettel, amit rövidesen a

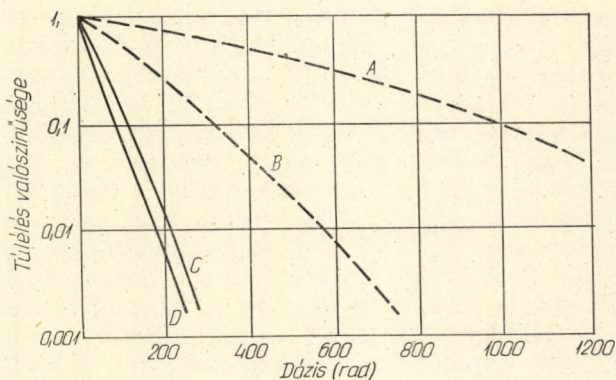
további kobaltágúak ezrei következtek. Ha figyelembe vesszük, hogy egyrészt a 2000–6000 Ci aktivitású ^{60}Co töltetek gamma sugárzása minőségét tekintve egy kb. 3 millió voltos, intenzitását tekintve 3–6-szoros konvencionális röntgen készülék sugárzásának felel meg, másrészt beruházási költségei az 1000-szer kisebb teljesítményű rádiumágúak költségeinek csak töredékét teszik ki, nem csodálkozhatunk azon, hogy a kobaltágúak és kisebb mértékben a ^{137}Cs töltetű céziumágúak is világszerte gyorsan elterjedtek és a konvencionális röntgen készülékeket sok területről fokozatosan kiszorították.

A kobaltágúak és a különféle, orvosi felhasználású gyorsítók, az úgynevezett megavoltos, vagy szupervoltos metodikák sugárzásuk kedvezőbb fizikai tulajdonságai és ennek következtében előnyösebb dóziseloszlása következtében, valamint a korszerű dozimetriai méréseken alapuló, egyénenkénti besugárzási tervek készítése révén a konvencionális röntgen terápiás készülékekkel elért gyógyulási százalékok számottevő megemelését eredményezték.

A neutron-besugárzások alapvető kérdései

Az utóbbi évek során végzett tervszerű kutatások és az ezek eredményeként adódott új felismerések nyomán úgy tűnik, hogy a sugárterápiás eredmények javításának egy újabb jelentős korszakához érkeztünk, melyben döntő szerepet a sugárbiológiai paramétereknek a javítása játszik. Arról van ugyanis szó, hogy a már említett Stone és munkatársainak sikertelen neutron terápiás kísérleteit 20 év után, azaz 1964-ben a londoni Hammersmith Hospitalban működő Orvosi Kutató Tanács Ciklotron Csoportja ismét napirendre tűzte. Igen gondos sugárfizikai és sugárbiológiai előkutatások után 100 előrehaladt stádiumban levő betegnél végeztek gyors-neutron besugárzásokat a következő újabb tapasztalatok, illetve megfontolások alapján:

1. Az oxigénnel rosszul ellátott, úgynevezett hypoxiás sejteknél a tapasztalat szerint 2–3-szor



1. ábra. A túlélés valószínűsége a dózis függvényében kis és nagy LET értékű sugárzásokra: A kis LET és hypoxiás sejtek, B kis LET és oxigenizált sejtek, C nagy LET és hypoxiás sejtek, D nagy LET és oxigenizált sejtek

nagyobb dózisa van szükség röntgen- és gamma-sugárzás esetén azonos károsodás létrehozásához, mint oxigénnel jól ellátott sejteknél (1. ábra).

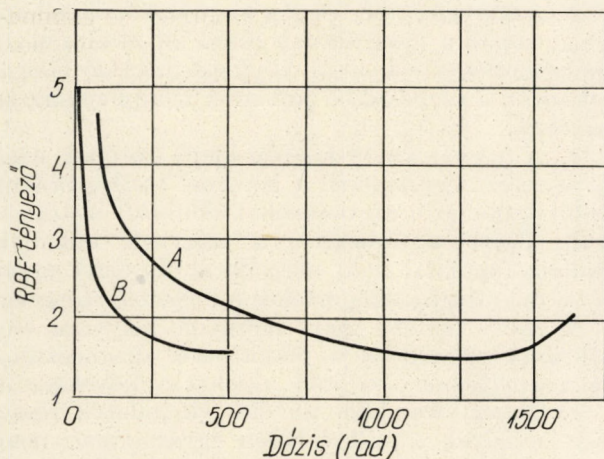
2. A normális testszövetek sejtjei és a daganatok nagy része általában jól el vannak látva oxigénnel. Sok daganatban azonban úgy látszik, a vérrellátás nem kielégítő, és így a daganat kis mennyiségben hypoxiás sejteket is tartalmaz.

3. Minthogy a besugárzás során a daganat környezetében levő ép testszövetek is elkerülhetetlenül a daganatos sejtekkel közel azonos dózisu besugárzásban részesülnek, a besugárzás folyamán egyszercsak eljutunk ahhoz a dózishoz, amely az ép sejtek számára a tolerancia-dózist jelenti, tehát további besugárzásuk súlyos károsodáshoz vezetne, míg ugyanez a dózis a hypoxiás sejtek számára még távol van az elpusztításukhoz szükséges dózistól, tehát a besugárzás megszüntetése esetén ezek tovább szaporodnak, a daganat tovább növekszik. Így vagy az ép sejtek irreverzibilis károsodásának elkerülése céljából abba hagyjuk a besugárzást és lemondunk a hypoxiás sejtek és ezzel a daganat elpusztításáról, vagy tovább folytatjuk a besugárzást a hypoxiás sejtek elpusztításáig, de ebben az esetben számolnunk kell az ép sejtek elpusztulásával is.

4. Powers és Tolmach kimutatták, hogy kísérleti állatdaganatokban hypoxiás sejtek jelennek meg és már kis százalékban való megjelenésük is jelentősen megváltoztatja a túlélő sejteknek a dózishoz való viszonyát.

5. A konvencionális röntgen- és gammasugárzások elektronok útján adják át energiájukat a testszöveteknek. Az elektronpályák mentén a lineáris energiaátadás (Linear Energy Transfer, LET), azaz a hosszegységre eső ionpárok száma aránylag kicsi — 100 ionpár/mikrométer úthossz. A neutronok ezzel szemben az emberi testben elsősorban a meglökött protonok révén adják le energiájukat. Protonsugárzásra a LET értéke nagy, az energiaátadás nagyságrendekkel rövidebb pályák mentén, erősen koncentrált formában történik. A nagy LET értékkel rendelkező sugárzásokra viszont mind a jól oxigenizált, mind az anoxiás, hypoxiás sejtek jelentősen érzékenyebbek, mint a kis LET értékű sugárzásokra (1. ábra) és emellett érzékenységekben mutatkozó különbség kicsi: 10–30%, szemben a kis LET értékű sugárzásoknál mutatózó 200–300%-al. Eszerint a neutron-sugárzásokkal sokkal nagyobb esélyünk van a daganatok elpusztítására, mint röntgen- és gammasugárzásokkal anélkül, hogy a szükségszerűen besugárzott ép sejteket is irreverzibilis károsodás érne. Más szavakkal kifejezve: neutron-sugárzással lehetőségünk nyílik a 100%-os daganatpusztító dózis leadására, és nem kell félnünk attól, hogy az esetleg csak kis számban is jelenlevő hypoxiás, anoxiás sejtek túlélnek a besugárzást, mint a röntgen- és gammasugárzások esetén. Ez utóbbiaknál a sok tovább növekvő daganat, tehát eredménytelen besugárzás éppen ezekre a túlélő hypoxiás sejtekre vezethető vissza.

6. Igen lényeges megállapításuk volt, hogy neutron-sugárzásnál a relatív biológiai effektivitás

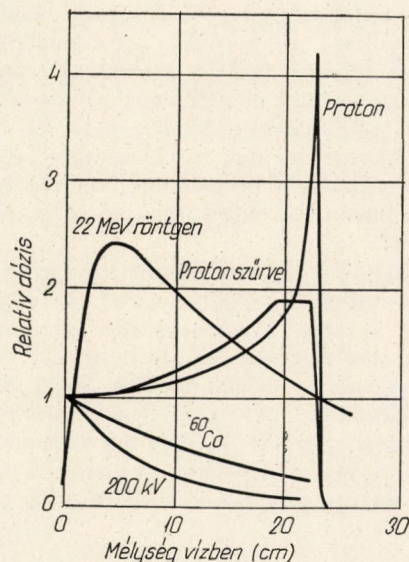


2. ábra. Az RBE tényező értéke az egy frakcióra eső dózis függvényében: A bőr, bél, reproduktív szervek, porc esetében, B lymphociták, csecsemőmirigy, vesejt-képző sejtek esetén

— RBE tényező — függ az egyes frakciókban leadott dózisok nagyságától, a dózis csökkenésével az RBE tényező jelentősen növekszik (2. ábra). A röntgen- és gammasugárzásoknál ez a jelenség nem áll fenn, és így természetesen Stone és Larkin előtt sem volt ismeretes. Nagyon valószínű, hogy a 30 évvel ezelőtt lefolytatott neutron terápiás besugárzásaiknál a késői bőrsérülési tünetek felépése nagyrészt a frakcionálásból eredő túldozírozással magyarázható meg. Viszont a 3. ábrán feltüntetett új összefüggések ismeretében lehetségesnek látszik egy az eddigieknél eredményesebb, sőt az előző megfontolások szerint ugrás-szerűen megjavuló eredményekhez vezető neutron sugárterápia.

Ennek előfeltétele természetesen egy megfelelő neutron terápiás készülék kifejlesztése volt. Kezdetben deuterium-trícium magreakcióból eredő 14 MeV-es monoenergetikus neutronokat szolgáltató kis gyorsítókkal próbálkoztak. Ezek azonban kis teljesítményük következtében neutron terápiás célokra nem váltak be. A további vizsgálatok során aztán kitűnt az is, hogy ha a neutron-besugárzások nyújtotta sugárbiológiai előnyöket nem akarjuk a rosszul megválasztott fizikai paraméterek következtében ismét elveszteni, akkor a neutron sugárforrásokkal szemben olyan fizikai követelményeket kell támasztani, amelyek a kilovoltos röntgensugárzások dóziseloszlásánál lényegesen kedvezőbb megavoltos röntgensugárzásokéhoz hasonló dóziseloszlást tudnak a neutron-besugárzásoknál is biztosítani. A 3. ábra a különböző sugárfajtákra vonatkozó tipikus mélydózis-görbéket tünteti fel, melyekről leolvasható, hogy a nagyobb energiáknál milyen nagy mértékben megnő a mélybe lejutó relatív dózis. Alapvető követelmény tehát a sugárzás megfelelő kvantum-, illetve részecske energiája.

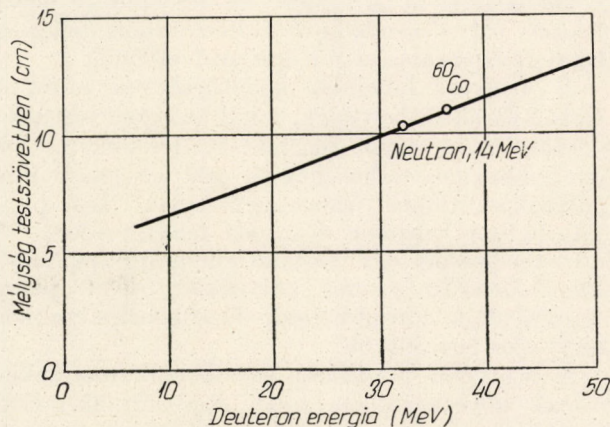
Egy másik követelmény a nagy, 1 méter körüli fókusz-bőr távolság, ami végeredményben ismét neutron-fluxus probléma. Nagy fókusz-bőr távolságnál a 14 MeV-es neutron sugárnyaláb dózis-



3. ábra. Mélydózis görbék különféle sugárzásokra vízben

eloszlása körülbelül a ^{60}Co -sugárnyaláb dóziseloszlásának felel meg, ami nyilvánvalóan még nem tekinthető optimálisnak.

A neutronsugárzás mélydózis görbéjének a menete azonban a neutronenergia növelésével kedvezőbbé tehető. Így pl. 50 MeV energiájú deuteronokkal létrehozott deuteron-berillium magreakciókból származó neutronsugárzás mélydózis görbéje egy kb. 8 megavoltos röntgensugárzás mélydózis görbéjének felel meg, ami már számottevően kedvezőbb a ^{60}Co mélydózis görbéjénél. Az 4. ábra a neutronsugárzás 1 cm mélységben mért dózisteljesítményének fele értékre való lecsökkentéséhez szükséges mélységet tünteti fel a deuteron energia függvényében szövetekvivalens fantomban $5 \times 5 \text{ cm}^2$ -es besugárzási mező és 125 cm-es forrás-fantomfelszín távolságnál (Almond). Az ábrába a 14 MeV-es neutron és a ^{60}Co gamma sugárzásának megfelelő pontok is be vannak rajzolva. Az ábra szerint a ^{60}Co -nál nagyobb felezőréteg vastagságok, tehát kedvezőbb mélydózis görbék D-Be magreakciók esetén 35 MeV-nél nagyobb deuteron energiáknál várhatók.



4. ábra. Az 1 cm mélységben mért neutron dózisteljesítmény fél értékre való lecsökkentéséhez szükséges mélység testszövetben a deuteron energia függvényében

Az eddigieknél jelentősebb jobb sugárterápiás eredményekkel kecsegtető gyorsneutron sugárforrásnak tehát a fentiek szerint egy legalább 35 MeV-es deuteronok előállítására alkalmas ciklotron látszott legalkalmasabbnak, mely D-Be magreakció révén termeli a klasszikus röntgen- és gamma-sugárzásokénál sokkal kedvezőbb sugárbiológiai paraméterekkel rendelkező gyorsneutron-sugárzást.

1966-ban 2 ilyen ciklotron állt az orvostudományi kutatások rendelkezésére; az egyik a már említett londoni Hammersmith Hospitalban, a másik a washingtoni egyetem orvosi ciklotronja St. Louis-ban. 5 évvel később, 1971-ben már 9 orvosi célokat szolgáló ciklotron működött Anglia, Franciaország, NSZK és az USA különböző orvosi intézményeiben és további ciklotronok felállítását kezdték el ilyen célokra, köztük 3-at a Szovjetunióban.

Izotóp diagnosztika

Az orvostudomány igen nagy érdeklődése a ciklotronok iránt a már említett merőben új lehetőségeket feltáró protonterápia mellett azzal magyarázható, hogy a ciklotronok lehetővé teszik nagyon rövid felezési idejű radioizotópok helyszíni előállítását diagnosztikai célokra. Itt tehát egyrészt arról van szó, hogy számos nagyon rövid felezési idejű radioizotóp, vagy csak ciklotronban állítható egyáltalában elő, vagy legalábbis termelése sokkal nagyobb hozamú ciklotronban, mint reaktorban. Másrészt nyilvánvaló, hogy az igen rövid felezési idejű radioizotópok szállítása nem képzelhető el, azokat a felhasználásuk színhelyén, azaz magában a kórházban, vagy annak közvetlen közelében kell előállítani. Különösen nagy jelentősége van az igen rövid felezési idejű radioaktív gázokkal — mint az ^{15}O izotóppal és a ^{11}C izotópot tartalmazó szénmonoxiddal történő új diagnosztikai technika meghonosításának. Az ^{15}O pozitron sugárzó izotóp felezési ideje: 2,1 perc, az ugyancsak pozitron sugárzó ^{11}C izotópé: 20,4 perc.

De melyek is az egészen rövid, néhány perces felezési idővel rendelkező radioizotópok diagnosztikai felhasználásánál jelentkező előnyök?

1. A gyors lebomlás következtében mind az izotóp dúsulási helyének, mind az egész testnek a dózisterhelése nagy mértékben lecsökken, ami gyermekeknél, terhes nőknél stb. végzendő vizsgálatoknál döntő jelentőségű lehet. Így pl. a kiterjedten használt 8 napos felezési idejű ^{131}I dózisterhelésnél egy hasonló energiájú sugárzásokat kibocsátó azonos aktivitású, de 2 perces felezési idejű izotóptól eredő dózisterhelés csaknem 6000-szer lesz kisebb.

2. Nagyobb pontosság érhető el a méréseknél annak következtében, hogy nagyobb aktivitású izotóp mennyiségeket alkalmazhatunk anélkül, hogy ennek a betegre káros következményétől, jelentősebb dózisterheléstől tartanunk kellene.

3. A nagyon rövid felezési idejű izotópok lehetőséget adnak a vizsgálatnak rövid idő eltelte utáni megismétléséhez anélkül, hogy ezt az előző vizsgálat során a szervezetbe juttatott izotóp sugárzása zavarná.

4. A nagyon rövid felezési idejű izotópok lehetővé teszik ugyanannál a betegnél esetleg órákon belül különböző szerveknek különböző izotópokkal, illetve ugyanannak a szervnek különféle radioizotópokkal való vizsgálatát és ezzel minél több diagnosztikailag értékes információ szerzését.

A rövid felezési idejű izotópok helyszíni előállításán túlmenően a ciklotronok diagnosztikai felhasználásának további indokai a következők:

1. Olyan elemekkel történő vizsgálatok esetében, amelyek a szervezetben egyáltalában nem, vagy csak igen kis mennyiségben fordulnak elő, hordozómentes izotóp alkalmazása válik szükségessé. Számos esetben ezek előállítása csak ciklotronban lehetséges.

2. Ciklotronnal előállíthatók egyes, diagnosztikai célokra különösen kedvező fizikai sajátságokkal rendelkező radioizotópok is. Ilyenek például a *béta-sugárzás nélkül* csak gamma-sugárzást kibocsátó radioizotópok, amelyek ismét a szervezet jelentősen kisebb dózisterhelése mellett ugyanannyi diagnosztikai információt szolgáltatnak, mint a béta-gamma sugárzó radioizotópok. A béta-sugarak ugyanis rövid hatótávolságuk következtében már a testszövetekben abszorbeálódnak és csupán jelentős dózisterhelést hoznak létre anélkül, hogy a testből kilépő gamma-sugarakhoz hasonlóan a nagyobb távolságokban elhelyezett detektorokhoz, például a radioizotóp térbeli eloszlásáról, bizonyos góciókban történő feldúsulás mértékéről stb. bármilyen információt is szolgáltatni tudnának.

Különösen nagy pontosságú lokalizációt tesznek lehetővé a ciklotronban előállítható *pozitron*-sugárzó radioizotópok, ha az ellentétes irányban szétrepülő annihilációs fotonjaik mérésére speciális detektorrendszert alkalmazunk.

3. A nagyon rövid felezési idejű izotópoknak a helyszínen, ciklotronnal, tetszésszerűen időben történő előállítása lerövidíti a nukleár medicina módszereivel történő kivizsgálásoknak és ezzel a kórház igénybevételének az idejét, mert hiszen nem kell az izotópok megrendelésével és azok beérkezéséhez szükséges idővel számolni.

4. Lehetővé válik a beteg terápiás kezelése során a gyakrabban megismételhető radioizotópos diagnosztikai vizsgálatokkal a beteg állapotában bekövetkező változásokat az eddiginél jobban nyomon követni és ennek alapján a terápiában szükségesnek látszó módosításokat foganatosítani.

Az 1. táblázat a ciklotronban előállítható fontosabb, nagyon rövid és rövid felezési idejű radioizotópok felezési idejét és a kibocsátott sugárzások fajtáját tünteti fel a felhasználásuk szerinti csoportosításban.

A fentiekben összefoglalt előnyök alapján nem csodálkozhatunk Rosen adatain, mely szerint az USA-ban 1970-ben a ciklotronban előállított

1. táblázat

Felhasználási területek	Az izotópok		
	Jele	Felezési ideje	A sugárzás fajtája
Lokalizációs vizsgálatok: csont metasztázis, lágy testszöveti daganatok, csontelváltozások, agydaganat stb.	^{11}C	20,4 perc	pozitron
	^{18}F	110 perc	pozitron
	^{81}Rb	4,7 óra	pozitron + gamma
	^{123}I	13,3 óra	csak gamma
	^{67}Ga	78 óra	csak gamma
	$^{87}\text{Sr}^m$	2,8 óra	gamma (^{87}Y generátorból)
	^{52}Fe ^{206}Bi	8,2 óra 6,2 nap	pozitron + gamma csak gamma
Térfogat meghatározás: vörös véresejt térfogat, elektrolit vizsgálatok stb.	^{11}C	20,4 perc	pozitron
	^{43}K	22,4 óra	elektron + gamma
	^{77}Br	56 óra	csak gamma
Véráramlás meghatározás: agyi véráramlás, myocardialis véráramlás stb.	$^{81}\text{Kr}^m$	13 másodperc	csak gamma ^{81}Rb generátorból
	^{84}Rb	33 nap	pozitron + gamma
	^{15}O	2,1 perc	pozitron
Funkció vizsgálatok: renográfia, pajzsmirigy, tüdő, lép-funkció vizsgálatok	^{81}Rb	4,7 óra	pozitron + gamma
	^{123}I	13,3 óra	csak gamma
	^{129}Cs	32,4 óra	csak gamma
	^{15}O	2,1 perc	pozitron
	^{11}C	20,4 perc	pozitron
	^{13}N	10,0 perc	pozitron

radioizotópok értéke elérte a 3 millió dollárt és a termelés azóta is rohamosan emelkedik. Egy másik felmérése szerint 1975-re az USA-ban 20 izotóptermelő ciklotron felépítése fejeződik be.

Almond véleménye szerint az orvostudomány étvágya a merőben új lehetőségeket feltáró ciklotronok iránt olyan mértékben megnőtt, hogy előrelátható az az idő, amikor minden nagyobb populáció körzet orvosi központja ciklotronnal fog rendelkezni, amelyet nappal daganatos betegek sugárterápiás kezelésére, éjjel rutin orvosi kivizsgálásokhoz szükséges rövid felezési idejű radioizotópok előállítására, a közbeeső időkben pedig kutatási célokra fognak üzemeltetni.

És hogyan fejlődött a nukleáris medicina hazánkban? Erről egészen röviden a következőket mondhatjuk:

Az 1930-as évek során hazánkban is több helyen alkalmazásra került az akkor elérhető legnagyobb energiájú sugárzás, a rádium gamma sugárzása. Világviszonylatban is előkelő helyet foglalt el az 1936-ban megnyílt Eötvös Loránd Rádium és Röntgen Intézet, mely egy 3 grammos rádium-ágyúval, több száz, összesen 2000 mg rádiumot tartalmazó egyéb rádium-készítményekkel, egy 400 kV-os röntgen terápiás készülékkel és a legkorszerűbben felszerelt sugárfizikai laboratóriummal rendelkezett. A mesterségesen előállított radioizotópok gyorsan elterjedő orvosi felhasználása hazánkban az 1950-es évek közepén indult meg: egyrészt újabb és újabb mérőberendezések kifejlesztésével, illetve importjával aránylag kis fáziskéséssel az újabb és újabb diagnosztikai eljárások kerültek bevezetésre, másrészt egy új típusú kobaltágyú kifejlesztésével 1958 és 1964 között 6 korszerű kobaltágyú létesült és egyéb

radioizotópok terápiás felhasználása is megkezdődött. 1971 óta az Országos Onkológiai Intézetben egy 25 MeV-es betatron képviseli a legkorszerűbb megavoltos terápiát.

Igen kíváncsún lenne, hogy egy orvosi célokra is alkalmas ciklotron létesítésével a fentiekben vázolt nagy jelentőségű előrehaladást hazai vonalon is mielőbb a beteggyógyítás szolgálatába állíthassuk.

Összefoglalva megállapíthatjuk, hogy a fizika, ezen belül a fentiekben vázolt sugárfizika és magfizika az orvostudomány fejlődésére igen mély és eredményes hatással volt az elmúlt háromnegyed évszázad folyamán. Semmi okunk sincsen feltételezni, hogy ez a hatás a jövőben csökkenne. Sőt máris folynak a kutatások például a pi-mezonok és a nehéz töltött részecske-sugárzások különféle orvosi felhasználása irányában, ami mellest azt is jelenti, hogy a jövőben az orvostudománynak még nagyobb számban lesz szüksége olyan jólképzett magfizikusokra, akik az orvostudomány határterületi problémáiban is kellő ismeretekkel rendelkeznek.

IRODALOM

- P. R. Almond, Nuclear Science in Medicine, Proc. Symp. on Nuclear Sciences, April 28–29 1972. Washington, pp 61–89.
- M. R. Rajn: Physical and Biological Aspects of high LET Radiations with Reference to Radiotherapy, LA-5041-MS, Los Alamos.
- N. J. McNally: Recovery from sub-lethal damage by hypoxic tumour cells in vivo. British Journal of Radiology, 45. 116–120. 1972.
- N. J. McNally: A comparison of the effects of radiation on tumour growth delay and cell survival. The effect of oxygen. British Journal of Radiology 46. 450–455. 1973.