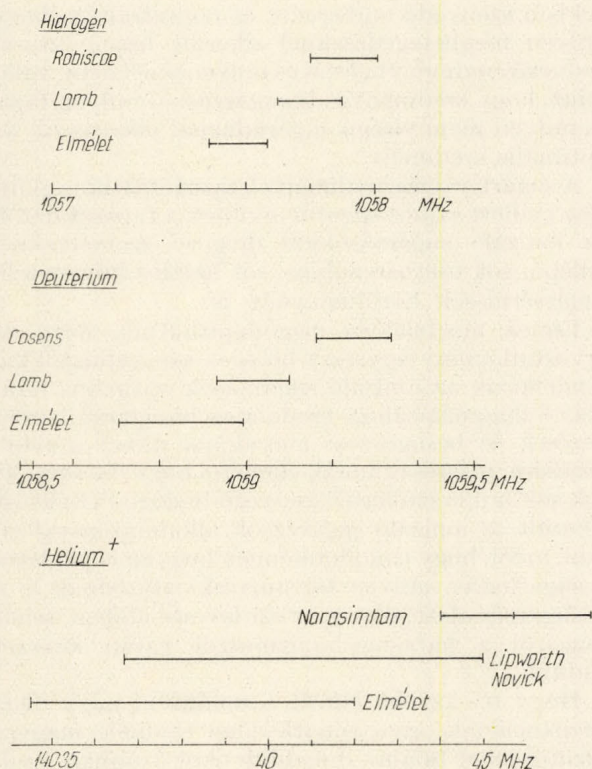




23. ábra

valami nagy baj van. Valószínűbb, hogy az atom energianívókat korrigáló számítási algoritmus módosításra szorul. Persze az is lehet, hogy valamilyen váratlan effektus lapul a háttérben, amit eddig még elszalasztottunk.

Ezzel kapcsolatban érdekes javaslat, hogy a proton körül gyenge pozitív „udvar” lehet a töltéeloszlásban 8 fermi karakterisztikus távolsággal és a teljes proton töltés egy százalékával. (Ezt a lehetőséget még megengedik a protont szondázó mérések.) A töltésudvar meghozná a Lamb shiftben szükséges 0,25 MHz változást és nem változtatná lényegesen a hidrogén hiperfinomstruktúrát, ami jól egyezik az új α értékkel. A „protonudvar” okát persze ismét a hadron-spektroszkópiában kellene megvizsgálni.

Más út a Lamb shift diszkrepancia tisztázásához: a müon-proton rendszer (μ -mezon atom) sugárzási

vonaleltolódásának kimérése. A müonpálya sugara kétszázszor kisebb a H -atomban, ezért a kísérlet sokkal érzékenyebb a proton-struktúrára. A rendkívül bonyolult mérésben a $2S^{1/2} - 2P^{1/2}$ átmeneti energia 0,19 eV a távoli infravörösben. A $\mu-p$ rendszer kis mérete miatt (nagy kötési energia) a vákuumpolarizáció dominál a felhasadásban, még a magasabb vákuumpolarizációs korrekciók is százaléknyi járulékot adnak. Sok örömmünk (vagy gondunk?) lehet, ha a kísérletek véghezviszik ezt a mérési bravurt.

Érdekes felidézni Richard Feynman előadását 1961-ből a Solvay kongresszuson. A kvantum-elektrodinamika lényeges nehézségeit két ponton kereshetjük: a téridőbeni folyamatok *túlrészletezett* leírása és a perturbációszámítás alkalmazása (a kettő nem teljesen független). Feynman javasolta, hogy a diszperziós technika megoldhatja ezeket a nehézségeket.

Csak a teoretikusok értékelik igazán, micsoda mélységeket takar a kifejezés: a téridőben *túlrészletezett* leírás. Szomorú, hogy a térelméleten növekedett nemzedék ultrái a végtetekig *túlhajtották* ezt a fogalmat. Közben ugyanolyan korlátozott hálóban kínlódtak mint amivel a későbbi S -matrix fizikusokat vádolták. Nyilvánvaló, hogy lokális elektron és foton reális fogalmak, a téridőbeni leírásnak van valóságtartalma. A látszólagos belső zártság kedvéért csupasz meg felöltözött részecskékről beszélni viszont nem valami meggyőző dolog. Az elektrodinamika S -mátrix elméletében is ágaskodnak a nehézségek. Itt legalább fizikai amplitúdókkal dolgoznak és van némi bepillantás a közelítések szerkezetébe.

Roland Omnes 1966-ban megkísérelte a Lamb shift S -mátrix elméleti kiszámítását analitikus technikával. Az eredmény nem éri el a térelméleti számítás pontosságát, de fizikailag jóval tisztább és egyszerűbb. Erre ösztönzött 1961-ben Feynman. Kérdés, hogyha megpróbáljuk az összes (térelméletben már figyelembevett) effektus kiszámítását, mire jutunk S -mátrix elméletben. Ez nyitott kérdés amire a következő években választ várunk.

A kvantumozott sugárzástelméletben máshol is találtak kis eltéréseket a kísérleti értékekkel összehasonlítva (pl. az elektron anomális mágneses momentumában). A további kutatás fogja megmondani, hogy az eltérések csak egyszerű kísérleti hibák, vagy valami új kezdete.

AZ IONIZÁLÓ SUGÁRZÁSOK HATÁSÁNAK BIOFIZIKAI PROBLÉMÁI

Bozóky László
Országos Onkológia Intézet

Háromnegyed évszázaddal ezelőtt az elektromos kisüléseknek ritkított gázokban való tanulmányozása során a fizikusok első ízben gyorsítottak fel elektronokat és ezeknek szükségszerű lefékezésével első ízben állítottak elő — tudtukon kívül

Elhangzott a Miskolci Vándorgyűlésen 1969. aug. 22-én.

— nagy áthatolóképeségű elektromágneses sugárzásokat (Crooks-féle csövek, Geissler-csővek, stb.) 1895-ben W. C. Röntgen volt az, aki kísérleti eredményeinek szigorú, logikus végig gondolásával aztán felfedezte a róla elnevezett újfajta sugárzást.

Mint a sugárzásnak egyik legfontosabb tulajdonságát állapította meg annak ionizáló képességét.

Hamarosan ezután felfedezték a radioaktivitást és az ugyancsak ionizálásra képes α -, β - és γ -sugárzásokat, majd a 30-as években a neutron-sugárzást. Az utóbbi évtizedek során mesterségesen előállított proton- és egyéb töltött részecskéket tartalmazó, valamint igen nagy energiájú — betatronokkal, lineáris gyorsítókkal, stb. előállított — elektromágneses sugárzások egészítették ki az ionizáló sugárzások népes családját.

Az ionizáló sugárzások detektálására természetesen egyre újabb és újabb nagyérzékenységű mérőeszközt dolgoztak ki és ezek révén egyre újabb és újabb, meglepő megállapítások születtek. Így például nyilvánvalóvá vált, hogy az emberiség egész életét ionizáló sugárzásban élte le, melynek három fő forrása:

1. A kozmikus-sugárzás,
2. A környezetünk radioaktív sugárzása, nevezetesen a talajban, a levegőben, az ősrégi barlangoduk és a modern épületek falában egyaránt jelenlevő természetes radioaktív anyagok sugárzása és végül,
3. Magában az emberi testben szükségszerűen mindig jelenlevő radioaktív anyagoknak, mint pl. a természetes kálium ^{40}K radioizotóp komponensének, a ^{14}C , ^{226}Ra stb. szennyeződések sugárzása.

Az ionizáló sugárzások tehát már felfedezésük előtt is hatottak az emberre és pedig nem is elhanyagolható mértékben.

A természetes háttérsugárzás értéke egyes helyeken, pl. az indiai Kerala tartományban az átlag érték 1000-szeresét is eléri. Bizonyos ércbányákban — Joachimstal, Érceghység — sok száz éven át a bányászok nagymérvű, rejtélyes elhalálózását, mint utólag kiderült, a bányákban található, nagyobb koncentrációban főként uránt és rádiumot tartalmazó kőzetek inkorporációja, illetve ezek radioaktív sugárzása okozta.

Az ionizáló sugárzások felfedezése után azok mesterséges előállításával ugrásszerűen sok nagyságrenddel megnőtt az emberrel kölcsönhatásba jutó ionizáló sugárzások mennyisége. Nem véletlen, hogy Röntgen nagy jelentőségű felfedezésének ismertetését a wüzburgi Orvosok és Fizikusok Egyesületében tartotta meg. A röntgensugárzás, majd később a többi ionizáló sugárzás iránt is a legnagyobb érdeklődést mindig az orvostudomány mutatta, messze megelőzve a többi tudomány ágazatot, az ipart és a mezőgazdaságot. Így pl. fél évvel a röntgensugárzás felfedezése után az angolok nilusi hadserege már fel volt szerelve idegentestkereső tábori röntgenkészülékkel és igen rövid időn belül megindult az új sugárzás terápiás felhasználása is.

Ilyen módon rohamosan növekedett azoknak a száma, akik orvosi beavatkozások következtében nagyobb mennyiségű ionizáló sugárzással kerültek kölcsönhatásba. Ennek megfelelően évről évre szaporodtak a röntgen és radioaktív sugárzások biológiai hatásaival kapcsolatos tapasztalatok is, amelyek természetesen előre nem látható és ki nem számítható, merőben kísérleti úton nyert megállapítások voltak. Sorra vették a különféle betegsége-

gekben szenvedő embereket és regisztrálták, hogy milyen megbetegedéseknél sikerült besugárzással kedvező eredményt elérni és milyeneknél nem, valamint, hogy eredményes besugárzásnál milyen fajta és milyen mennyiségű sugáradagnál jelentkezik az optimális eredmény.

A sugárterápiás eredmények szisztematikus gyűjtése mellett sajnos spontán gyűltek a tapasztalatok az ionizáló sugárzásokkal dolgozó személyeknél fellépő, sok esetben súlyos, sőt halálos kimenetelű sugársérülések körülményeire is.

Ennek megfelelően megállapíthatjuk, hogy az orvostudomány egyrészt bőséges tapasztalatokkal rendelkezik az ionizáló sugárzások optimális terápiás felhasználásához, csodálatos besugárzó berendezések és besugárzási metodikák állnak rendelkezésére, másrészt annak ellenére, hogy 74 éven át sok sok millió embernél kedvező biológiai effektust sikerült az ionizáló sugárzások alkalmazásával elérni, arról, hogy tulajdonképpen hogyan is jön létre a sugárhatás, milyen folyamatok játszódnak le a besugárzás alatt, illetve az ezt követő időben, tehát magáról a hatásmechanizmusról vajmi keveset tudunk.

Hogy mi az oka ennek a rendkívül nagy diszkrepanciának, arra vonatkozóan többféle magyarázatot lehet találni. A legfőbb okot azonban nyilvánvalóan abban jelölhetjük meg, hogy a sugárhatás létrejötte tipikusan több tudomány terület közötti határterületi jelenség. Az emberi agynak rendszerező tevékenysége a természetben lejátszódó jelenségeket csoportosította és fizikai, kémiai, biológiai növénytani, állattani, genetikai, geológiai, stb. jelenségekről, illetve az ezekkel foglalkozó tudományokról beszélünk.

Ám a természetben — elsősorban az élők világában — számtalan olyan jelenséget találunk, amelyben egész sor tudományterületre eső folyamat egymással szorosan összekapcsolódva, egyidejűleg játszódik le. Ezeknek a jelenségeknek a tanulmányozásához, megértéséhez, a törvényszerűségek felismeréséhez tehát több tudományterület ismeretére van szükség. Ilyen határterületi kérdés az ionizáló sugárzásoknak az élő szervezetekre gyakorolt hatásának a problematikája is.

A részlet ismeretek gyarapodásával az egyes tudományterületek szükségszerűen egymástól egyre távolabb kerültek. Röntgen idejében még az orvosoknak és fizikusoknak közös egyesületük volt, egymás problémáit megértették és sok esetben ezeket közösen vitatták meg. Ma már ilyesmiről aligha beszélhetünk, egymás nyelvét sem értik meg, sőt maguk az egyes tudományterületek is szakosodtak és így a határterületi kérdések tanulmányozása háttérbe szorult.

W. Friedrich professzor, akinek Laue-val és Knippinggel 12 évvel a röntgen sugárzás felfedezése után sikerült végre annak hullámtermészetét igazolni, néhány éve Budapesten járt és a határterületek jellemzésére a következő hasonlatot említette: A tudományok összessége egy nagy réthez hasonlítható, amelyen egyes erősen lelegelt foltok képviselik az egyes tudományok, a fizika, a kémia,

a biológia stb. területeit, ahol az intenzív kutatás már minden könnyen elérhető eredményt leartott és igen igen nehéz még valami újat találni. Az egyes foltok közti területek jelzik az egyes tudományágak közti határterületeket, ahol szinte érintetlenül pompáznak a rét virágai, a könnyen elérhető új tudományos felismerések, melyeket sokszor egy ökör is leleghet, ha egyszer be tudott jutni a területre. A lemaradás oka éppen abban rejlik, hogy kevesen vannak azok, akik a környező tudományterületek alapismereteinek az elsajátításával megszerzik a határterületre való belépés előfeltételét.

A sugárzás hatásmechanizmusának tanulmányozása az elmondottak alapján ugyancsak több tudományterület felől közelíthető meg. Talán nem nevezhetjük elfogultnak azt a véleményt, hogy ez esetben különös jelentőséget kell tulajdonítanunk a fizika oldaláról történő megközelítésnek. A fizikus számára ugyanis nem idegen a határtudományok közül az alapjelenséget értelmező fizikán kívül a kémia, a matematika, az elektronika, a kibernetika sem és nem okozhat nagyobb nehézséget további kémiai, biológiai, szövettani, fejlődéstani, genetikai, stb. ismeretek elsajátítása sem.

Ezt bizonyítja D. E. Lea, sajnos igen fiatalon elhunyt fizikus, akinek „Actions of radiations on living cells” című műve az idevonatkozó irodalomból erősen kiemelkedő remekmű.

Ezzel szemben a nem egzakt természettudományok művelőinél legtöbb esetben eleve olyan ellenszenvet találunk a „rettegett tárgyak”, a fizika, a matematika és kapcsolódó tudományterületekkel szemben, ami rendkívül megnehezíti a problémakör egységes áttekintését és az optimális előfeltételek biztosítását.

A jelenlegi helyzetet mindenesetre úgy jellemezhetjük, hogy a gyakorlati sugárterápia háromnegyed évszázados, kétségkívül igen szép eredményei a sugárhatás kialakulásának ismerete nélkül, tisztán az igen nagyszámú besugárzásnál nyert tapasztalatok összegyűjtése alapján születtek meg. Az elméleti megalapozáshoz szükséges ismereteink még gyermek cipőben járnak.

De lássuk, mi is az amit a sugárhatással kapcsolatban biztosan tudunk, mi az, amiről bizonyos elképzeléseink vannak és melyek azok a fontosabb tények, amelyeket ma még egyáltalában nem tudunk megmagyarázni.

1. Biztosan tudjuk azt, hogy minden sugárhatás kezdeti folyamata a testszövetekben lejátszódó ionizáció. Bármely ionizáló sugárzás — legyen az akár közvetlenül ionizáló töltött részecskékből álló sugárzás, mint az α -, β -, elektron, proton stb. sugárzások, akár közvetve ionizáló röntgen-, gamma-, vagy neutron sugárzás — biológiai hatást csak ott és olyan mértékben fejt ki, ahol és amilyen mértékben a sugárzás ionizációt hoz létre, azaz a sugárzás energiája ionizációs energiává alakul át. Így pl. a testen ütközés nélkül áthaladó neutronok, fotonok semmilyen biológiai hatást sem váltanak ki. Valamely foton biológiai hatást csak akkor fejt ki, ha fotoelektromos abszorpció, Compton-szóródás,

vagy nagy energiák esetén párkeltés útján energiája részben, vagy egészben gyorsan mozgó elektronok kinetikai energiájává alakul át.

2. Emberre nézve a félhalálos dózis (az a dózis, melynél a besugárzott egyedek fele elpusztul) 450 R. Ha kiszámítjuk, hogy egy 70 kg-os ember teste hány atomot tartalmaz és ezt a számot elosztjuk a 450 R által létesített ionpárok számával, 10^8 -t kapunk. Ez azt jelenti, hogy ha testünkben minden százmillió változatlanul maradó atom mellett csak egynél egyetlen külső elektron leszakad, ionizáció jön létre, ennek következményeit a szervezetünk már nem tudja eliminálni, elpusztul. Szervezetünk természetesen nem atomokban, hanem molekulákban gondolkodik. De még így is megmagyarázhatatlanul kis arányszámot, illetve hihetetlen nagy érzékenységet kapunk az ionizáló sugárzásokkal szemben.

Energiába átszámolva a 450 R félhalálos dózist azt kapjuk, hogy a test hőmérséklete mindössze 0,001 C°-kal emelkedik meg.

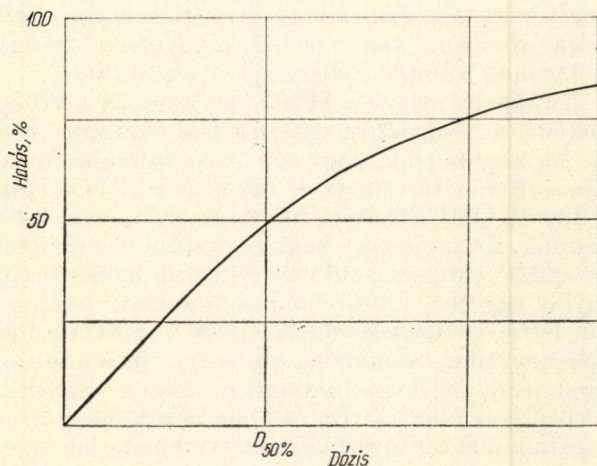
Minden biológiai sugárhatás kezdete tehát az ionizáció, amely atomáris, illetve molekuláris jelenség. A biológiai hatás nyilvánvalóan az atomokról, illetve molekulákról áttevődik a sejtekre, a sejtekről a testszövetekre, a testszövetekről a szervekre és végül az egész szervezetre. Bizonyos idő eltelte után közvetlenül észleljük annak funkcionális elváltozásait. Ezekről az egymást követő folyamatokról azonban mint már említettük vajmi keveset tudunk.

3. Az ide vonatkozó elméletek közül megemlítjük a *találat-elméletet* (Treffer-Theorie), melynek első megfogalmazását és matematikai leírását még 1922-ben Dessauer és munkatársai végezték el. A találatelmélet legtökéletesebb kifejtését Lea angol fizikus írta meg, 1947-ben megjelent, fentebb már idézett művében.

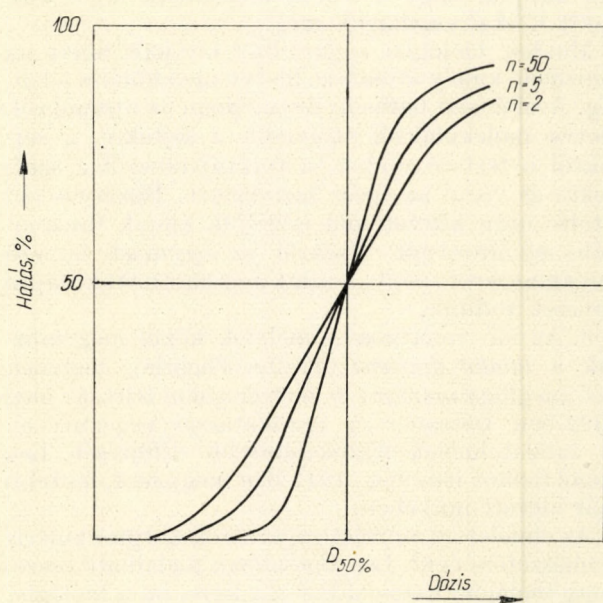
Az elmélet az ionizáló sugárzások korpuszkuláris természetére épül. Lényege abban foglalható össze, hogy biológiai hatás akkor jön létre, ha a biológiai objektum bizonyos meghatározott, sugárérzékeny térfogatában ionizáció történik, azaz az objektumot találat éri. Ha tehát az egész biológiai objektumot, például valamely sejtet egy céltáblához hasonlítjuk, akkor biológiai elváltozás csak akkor jön létre, ha a „lövedék” a céltábla középső, fekete körterületébe, illetve a sejtben valahol elhelyezkedő, meghatározott térfogatú sugárérzékeny részbe talál. Innen ered az eredeti Dessauer-féle elmélet továbbfejlesztésének *Céltábla-elmélet* (Trefferbereich-Theorie) elnevezése.

Az elmélet évtizedeken át sok érdekes kísérlet elvégzésére ösztönzött. Ezek bizonyos objektumok és sugárfajták esetére igazolták is az elméletet és lehetővé tették például a sugárérzékeny térfogat nagyságának a kiszámítását is, azonban általános érvényét mindezideig nem sikerült bebizonyítani.

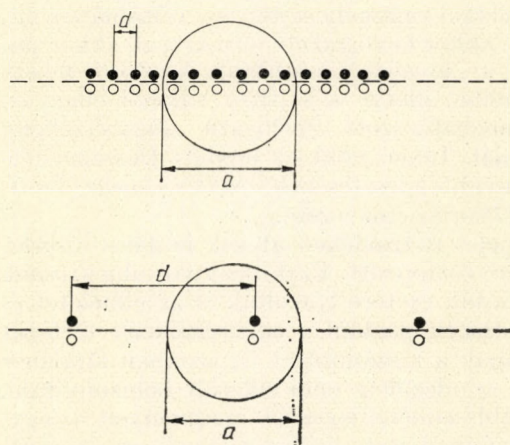
A céltábla-elmélet legszebb eredményeit az egytalálatos folyamatok hatásgörbéinek az értelmezésénél érte el. Az egytalálatos folyamatoknál egyetlen ionizáció, a többtalálatos folyamatoknál több ionizáció szükséges a vizsgált hatás kiváltá-



1. ábra. A hatásgörbe menete egytalálatos sugárhatásoknál



2. ábra. A hatásgörbe menete 2, 5 és 50 találatos sugárhatásoknál



3. ábra. Nagy és kis fajlagos ionizációjú sugárzások találati valószínűsége. d = az ionpárok átlagos távolsága, a = a biológiai objektum sugárérzékeny térfogatának átmérője

sához. Minél magasabbrendű szervezetről van szó, annál inkább többtalálatos hatással kell számolnunk. Az egytalálatos biológiai reakciók közé tartoznak általában a vírusok inaktiválása, bizonyos fajta baktériumok elpusztítása és a gén-mutációk.

A hatásgörbe sok azonos biológiai egyed besugárzása esetén a vizsgált hatást, például az elpusztulást mutató egyedek százalékos számát tünteti fel a dózis függvényében. Egytalálatos folyamatoknál a dózis növekedésével a találatok száma $1 - e^{-x}$ szerint növekszik, a görbe is ennek megfelelő menetű (1. ábra), míg többtalálatos folyamatoknál a hatásgörbe általában bizonyos küszöbértéknél kezdődő szigmoid alakot mutat. A görbe középső szakasza annál meredekebb minél több találatra van szükség, a hatás kiváltásához (2. ábra). Több találatos folyamatoknál számolnunk kell az egyébként azonos egyedek között mutatkozó biológiai különbséggel, az úgynevezett biológiai variabilitással is. Ennek matematikai beépítését az elméletbe Zuppinger és Meissner végezték el.

Valamilyen hatás kiváltásához szükséges dózis nagysága szempontjából nagy szerepet játszik egyrészt a sugárzás által létesített ionizáció eloszlása, nevezetesen az ionizáló részecske pályája mentén a hosszegységre jutó ionpárok száma, azaz a fajlagos ionizáció, másrészt, hogy egy, vagy többtalálatos biológiai hatásról van-e szó. A 3. ábra szerint nyilvánvaló, hogy sűrűn ionizáló sugárzásnál, például α -sugárzásnál, ahol a szomszédos ionok közti távolság általában jóval kisebb, mint a biológiai objektum sugárérzékeny térfogatának átmérője és egytalálatos hatásról van szó, akkor a találatok nagy része olyan térfogat részekre jut, amelyek már kaptak egy találatot és így a vizsgált hatás, például az egyed elpusztulása már nélkülük is létrejött. Az ilyen felesleges, illetve a hatás szempontjából elvesztett találatok következtében a hatás kiváltásához szükséges dózis, ami az összionizációval arányos, szükségszerűen jelentősen nagyobb, mintha ugyanezt az objektumot kisebb fajlagos ionizációjú sugárzással — például β -sugárzással — váltjuk ki, ahol az ionok egymástól való átlagos távolsága nagyobb, mint a sugárérzékeny térfogat átmérője és így csak kis valószínűsége van annak, hogy a sugárérzékeny térfogatba a szükséges 1-nél több ionizáció jöjjön létre.

Többtalálatos biológiai objektumoknál viszont fordítva áll a helyzet, kis fajlagos ionizációjú sugárzásoknál kicsi a valószínűsége annak, hogy a sugárérzékeny térfogatba több ionizáció keletkezzék és így a hatás kiváltásához szükséges dózis általában nagy. Nagy fajlagos ionizációjú sugárzásoknál azonban a térfogaton belüli többtalálat valószínűsége az összes találatához viszonyítva megnő és így ugyanazt a hatást sűrűn ionizáló sugárzással jelentősen kisebb dózissal tudjuk már elérni.

Vannak végül olyan hatások, amelyeknek kiváltásához ugyan több találatra van szükség, de nem feltétlenül szükséges, hogy ezek egyidejűleg jöjjenek létre. Ilyen hatásoknál tehát a sugárérzékeny térfogat akumulálja az egyes ionizációkat és a hatás csak akkor jelentkezik, ha a szükséges számú

találathoz a sugárérzékeny térfogat megkapta, esetleg csak hónapok, vagy évek múlva.

4. A találat-elmélet mellett más magyarázatok is elképzelhetők. Így például ha kiszámítjuk egy α -részecske pályája mentén kialakuló elektromos teret, azt találjuk, hogy az 10^5 Volt/cm nagyságrendű, ami elegendő ahhoz, hogy egy kromoszómát, mint dipólust mechanikusan kettétörjön.

5. Az eddig említett elméletek szerint a sugárhatás ugyanott jön létre, ahol az ionizáció létesült. Ezek tehát *direkt sugárhatás* tételeznek fel. Ezzel szemben Fricke és munkatársai 1927–29-ben vizes oldatok besugárzásakor olyan eredményeket észleltek, amelyek a besugárzás helyétől távolabb jelentkeztek, tehát *indirekt sugárhatás*ra utaltak.

1944-ben Weiss e hatások magyarázatára kidolgozta a *víz-aktiválási elméletét*. Eszerint vizes oldatokban ionizáló sugárzás hatására hidrogén és hidroxil ionok, H-atomok és OH-gyökök jönnek létre. Ezek rekombinációjából egyrészt H_2 és H_2O_2 (hidrogénperoxid) keletkezik, másrészt a keletkezett ionok és gyökök, minthogy kémiaiilag rendkívül aktívak, a vízben oldott anyagokkal különféle reakciókat, új vegyületeket, esetleg toxikus anyagokat is hoznak létre. Ezeket a vegyületeket a nedv váram keletkezésük helyéről távolabbi helyekre is elviheti, azaz az egész szervezetben érvényesül bizonyos sugárhatás.

6. 1959-ben nyilvánvalóvá lett, hogy a víz-aktiválási elméletet módosítani kell: a sugárkémiai redukciót a vizsgálatok szerint két különböző ágens váltja ki. A nagyobb mennyiségben jelen levő redukáló anyag egy egyszeres negatív töltéssel rendelkező ion, az úgynevezett *hidratált elektron*. Mibenlétére impulzus-radiolízis alkalmazásával sikerült fényt deríteni.

A módszer lényege abban áll, hogy a vizsgálható rendszert rendkívül rövid ideig 10^{-6} – 10^{-9} sec – nagy energiájú elektronokkal sugározzák be és a közben keletkező intermediereket spektroszkópiai vizsgálatoknak vetik alá. Eszerint a rendkívül erős redukáló tulajdonságú, de tiszta vízben aránylag stabil ágens egy olyan elektron, mely egyszerre több vízmolekulával áll kölcsönhatásban, az elektront hidrat-burok veszi körül.

Az utóbbi években igen sok biológiai fontosságú vegyületet tartalmazó rendszerben vizsgálták a hidratált elektron reakcióit impulzus-radiolízis segítségével, amiből kiderült, hogy bár sok jelenség így alaposabban megérthető, a sugárhatás számos alapvető problémáját azonban a hidratált elektron segítségével sem lehet értelmezni.

Ilyen problémák például a következők:

A fentebb említett kémiai reakciók 10^{-8} sec alatt játszódhatnak le. Ezzel szemben a biológiai elváltozások csak sok sok nagyságrenddel hosszabb idők után jelentkeznek. A látens idő alatt általában semmiféle hatást sem észlelünk. Hol és hogyan raktározódik el a sugárhatás? Hol és hogyan összegeződnek egyes hatásoknál a különböző időpontokban elszenvedett sugárhatások? Hogyan következik be bizonyos jelenségeknél a regenerálódás?

A szummálódásra például megemlítjük az életkor megrövidülését, a regenerálódás megnövekedésére a rácsbesugárzást.

A bőrpír megjelenéséhez sok évtizedes tapasztalat alapján 650 R bőrdózisra van szükség. Ha azonban ugyanaz a például 1 cm²-es bőrfelület nem egy 10×10 cm-es besugárzott terület egy része, hanem egy 10×10 cm-es, de 50%-ában rácsalóval takart terület egyik besugárzást kapott 1 cm²-es eleme, akkor a bőrpír csak mintegy 5-ször nagyobb dózissal, 3000 R-nél jelenik meg. A direkt sugárhatás elméletével ezek a jelenségek semmiképpen sem értelmezhetők.

Több más hasonló tapasztalattal is rendelkezünk, amelyek egyelőre megmagyarázhatatlannak látszanak. Azonban nyilvánvaló, hogy megfelelően összehangolt biofizikai és biokémiai kísérletekkel lépésről lépésre előre lehet haladni és a természet egyre több és több idevonatkozó titkát lehet fel tárni.

A biofizika területére eső és megoldásra váró feladatok közül megemlítjük még a következőket:

a) A térfogatózások mérésének, illetve számításának a kidolgozása az eddigi primitív eljárásoknál lényegesen tökéletesebb metodikával.

b) A lágy röntgensugárzások és közepes energiájú neutronok dozimetriájának lényeges továbbfejlesztése.

c) Az inkorporált radioaktív anyagok viselkedésének további tanulmányozása különös tekintettel azok kiürülésének törvényszerűségeire. Az eddigi tapasztalatok szerint egyes radioizotópoknál a testből történő kiürülés exponenciális függvényekkel, más izotópoknál viszont hatvány függvényekkel közelíthető meg. A folyamatok matematikai leírása azonban még sok szempontból finomításra szorul. Alig ismeretes például a kiürülést befolyásoló tényezőknek a szerepe és a kiürülés kezdeti szakaszára vonatkozó törvényszerűség.

d) Az ekvivalens dózis kiszámításánál bevezetett különféle szorozótényezők meghatározása. Ennek előfeltétele: a sugárhatást befolyásoló körülmények, nevezetesen a besugárzási időtartam, a besugárzás szakaszossága, a dózisintenzitás, a besugárzási mezőn belüli homogenitás, a besugárzott térfogatnagyság, a relatív biológiai hatékonyság, a biológiai variabilitás, stb. szerepének tisztázása.

e) Az inkorporált radioaktív anyagoktól eredő rövid- és hosszútávú dózisterhelések meghatározásának különféle problémái.

Említettük már, hogy az emberiség egész életét ionizáló sugárzásban élte le. Az ebből eredő dózisterhelés átlagértékét az elmúlt évtizedben végzett kiterjedt mérések alapján kerekén évi 0,1 remre tehetjük. Semmi okunk sincsen azt feltételezni, hogy ez az érték az elmúlt évezredek során, vagy akár több tízezer évvel ezelőtt is lényegesen más lett volna. Sokan úgy vélik, hogy bár az ember rendkívül érzékeny az ionizáló sugárzásokra és semmi sem mutat arra, hogy lassanként nagyobb és nagyobb sugárterhelések elviseléséhez embereket, vagy akár állatokat is hozzá lehetne szoktatni,

a természetes háttérsugárzás az emberre semmiféle káros hatást sem fejt ki.

Mások szerint a jelenleg észlelt genetikai aberrációk egy részét a természetes háttérsugárzás okozza. Állatkísérletek szerint a genetikai károsodás területén az elszennvedett sugárhatások dózisainak szigorú összegeződését látjuk.

Emberre nézve is általában feltételezik, hogy a legkisebb dózisok is hozzáadódnak az emberiség genetikai osszdózisához és így növelik a genetikai összkárosodást. A sugárzás által kiváltott mutációra ráta emberben természetesen nem határozható meg kísérleti úton és erre csak közvetett úton végezhetünk becsléseket.

Eszerint a kétszerező dózis 7 és 80 R között változhat. Általában 15 R-el szokás számolni. Ennek alapján Glass végzett becsléseket az Egyesült Államokban feltételezve, hogy a lakosságot 30 év alatt orvosi sugárterhelésből akkora gonád-dózis éri, mint a természetes háttérsugárzásból, azaz 5 rem. Az ennek következtében fellépő mutációk 40 generáció alatt egyharmadával növelnék meg a jelenlegi öröklési betegségek számát. A domináns és recesszív mutációkat ugyan a populáció folyamatosan kiküszöböli és így az állandó szinten levő háttérsugárzásnál egyensúlyi állapot áll be a keletkező új mutációk és a kiküszöbölődő régi mutációk között. Más a helyzet azonban a háttérsugárzás fölötti dózisoknál. A Nemzetközi Sugárvédelmi Bizottság (ICRP) a megengedhető maximális dózisszintek megállapításánál a lehetséges genetikai károsodásokat vette alapul.

Összefoglalva megállapíthatjuk, hogy a sugár-

hatás mechanizmusára vonatkozó ismereteink az elmúlt 74 év alatt távolról sem fejlődtek úgy, ahogyan az kívánatos lett volna; gyökeres változásra van szükség e téren. Sürgeti ezt egyrészt a daganatos megbetegedések számának nagymértvű növekedése, ami a sugárterápia további tökéletesítését igényli, de sürgeti ezt az atomenergia felhasználásával, a Soddy szerinti második tűzgyújtás korszakával előtérbe került sugárvédelmi problémák megoldása is. Az atomenergia békés felhasználása nagy lehetőségeket tárt fel az emberiség előtt az életszínvonal emelése, a szebb és jobb életkörülmények megteremtése felé. Ezek megvalósítását erősen fékezi ma még az a körülmény, hogy az ember rendkívül érzékeny az atomenergia felszabadítását szükségszerűen kísérő ionizáló sugárzások iránt, tehát ezekkel szemben védekeznie kell.

A védelemnek ma még csak az úgynevezett fizikai védekezési módszerei ismeretesek, amelyek rendkívül költségesek, terjedelmesek és legtöbbször igen nagy súlyt is képviselnek. Van azonban valamelyes alapja annak a reményünknek, hogy egyszer a fizikai sugárvédelem mellett a kémiai sugárvédelem — tehát az ember sugárérzékenységeinek vegyszerekkel történő lecsökkentése — is gyakorlatilag használható metodikává fejlődik. Nyilvánvaló, hogy ezt a célt is szolgálná, ha a biológia, talán éppen a fizikusok, ha úgyszólván biofizikusok közreműködésével behoznák a fizika ugrásszerű előretörése következtében előállott lemaradását és a többek között sikerülne feltárni a sugárhatás mechanizmusának rejtélyes problémáit is.

ELGONDOLÁSOK A SEBESSÉGÖSSZEADÁS TÖRVÉNYRŐL I.

Jánossy Lajos
Központi Fizikai Kutató Intézet

Leningrádban a Műszaki Egyetem, a Fizikai Társulat és a „Знание” Ismeretterjesztő Társaság közös meghívására májusban előadássorozatot tartottam a relativitáselmélet néhány elvi kérdéséről. Sok szó esett a relativisztikus sebességösszeadás törvényéről. Az ezzel kapcsolatosan felmerült kérdéseket sikerült néhány pontban egyszerűen összefoglalni — és ezt kívánom itt leírni.

I.

§ 1. Valamely objektum mozgását valamilyen más objektumhoz — egy K vonatkoztatási rendszerhez — viszonyítjuk. Általában egy A pont pályáját a K vonatkoztatási rendszerben négyeskoordináta segítségével adjuk meg

$$\mathbf{r}_A(p) = \mathbf{r}_A(p), t_A(p),$$

ahol p egy független paraméter és feltételezhetjük, hogy

$$\dot{t}_A(p) \neq 0.$$

Elhangzott Leningrádban az 1968. szeptemberben tartott konferencián.

(A ponttal a paraméter szerinti deriválást jelöljük.)

Az A pont K -hoz viszonyított v sebességét meghatadjuk egy három komponensű $\mathbf{v}$ mennyiség — pontosabban három mérőszám — segítségével, amely v -nak mértéke a K mértérendszerben.

Definícióként szokásos rögzíteni, hogy

$$\mathbf{v}_A(t) = \frac{d\mathbf{r}_A(t)}{dt} = (\mathbf{r}_A(p) | \dot{t}_A(p))_{t_A(p)=t}.$$

Foglalkozzunk fényjelek terjedésével és jelölje a fényjel pályáját az

$$\mathbf{x}_F(p) = \mathbf{r}_F(p), t_F(p)$$

négyes koordináta.

Vannak vonatkoztatási rendszerek, amelyekhez viszonyítva a fényjelek pályái a következő egyenletnek tesznek eleget

$$\mathbf{r}_F(t) = \mathbf{x}ct + \mathbf{r}_F(0), \quad (1)$$

ahol $\mathbf{x}$ a fényterjedés irányába mutató egységvektor. Az ilyen vonatkoztatási rendszereket két tulajdonságuk tünteti ki: