

BROJAČ ZA CIJELO TIJELO

MAGDA HARMUT

Institut za medicinska istraživanja i medicinu rada, Zagreb

(Primljeno 20. IX 1962)

U članku je dan kratak historijski razvoj metoda mjerenja gama zračenja tijela; opći zahtjevi za visoku osjetljivost brojača za cijelo tijelo; svojstva scintilatora, tehnike mjerenja radioaktivnosti cijelog tijela, kalibracija i obrada rezultata te primjena i funkcija brojača za cijelo tijelo općenito.

UVOD

Posljednjih je godina zapažen znatan napredak u preciznosti tehnike mjerenja radioaktivnosti živih bića, a povećala se i širina područja upotrebe te tehnike.

U svijetu se sve više upotrebljava radioaktivni materijal, pa je i rizik unutarnje kontaminacije sve veći. Upravo zbog toga, a i zbog mogućnosti ispitivanja gama-spektra ljudskog tijela, koji je pobudio naročiti interes učenjaka, osjeća se potreba za usavršavanjem tehnike mjerenja radioaktivnosti cijeloga tijela.

Tehnika mjerenja radioaktivnosti tijela već je danas toliko usavršena da pomoću nje možemo mjeriti čak i prirodnu radioaktivnost tijela. Brojač za cijelo tijelo ima široku primjenu za istraživački rad na klinikama. Aparat sposoban za mjerenje kontaminacije mnogo ispod maksimalno dopuštenog opterećenja za tijelo (maximum permissible body burden) za većinu gama emitera može mjeriti i kalij u ljudskom tijelu, a omogućuje i dugoročne pokuse s markiranim elementima ispod nivoa koji su do danas smatrani donjom granicom mogućnosti.

RAZVOJ METODE MJERENJA GAMA-ZRAČENJA TIJELA

Iako je određivanje prirodne radioaktivnosti tijela novijeg datuma (nekoliko posljednjih godina), razvoj metode za određivanje radija u tijelu ima dugu povijest.

Problem mjerenja radioaktivnosti tijela postao je aktuelan onoga dana, kad su se soli radija počele primjenjivati u medicini i kad se dogodila dobro poznata tragedija s radnicima u New Jerseyu, koje su se otrovale radijem pri premazivanju kazaljki na satovima.

Prva mjerenja su vršena ionizacijskim komorama volumena 1–2 litre, koje su bile spojene na nitni elektrometar (string electrometer). *Schlundt* (1) sa suradnicima 1929. god., upotrebljavajući takvu komoru na udaljenosti 30 cm od kičme čovjeka, mjerio je zaostali radon koji odgovara količini radija od 5–100 μg . Ta je metoda, međutim, imala dosta nedostataka.

Moderni razvoj u smjeru preciznijih kvantitativnih mjerenja datira od radova *Evansa* (2) 1937. godine. Evans uzima u obzir apsorpciju osnovnog zračenja (background) od strane subjekta. On je upotrebljavao jedan GM-brojač na udaljenosti 1 m od subjekta koji je ležao na luku radijusa 1 m. U takvoj, naime, poziciji varijacije reagiranja (response) brojača zbog nehomogene distribucije radioaktivnosti u skeletu bile bi minimalne. Na toj udaljenosti, međutim, detektor obuhvata samo mali dio emitiranog gama-zračenja, i ako k toj slaboj geometrijskoj efikasnosti dodamo još i nisku intrinzičnu efikasnost* GM-brojača, zaključili bismo da je metoda bila dosta neosjetljiva. Minimalna aktivnost, koja se još mogla registrirati, bila je ekvivalentna radonu od 0,1 μg radija.

Rajewsky (3) 1941. god., a *Hess* i *McNiff* (4) 1947. god. upotrebljavali su veće ionizacijske komore od svojih predšasnika. Hess i McNiff su svojim uređajem snizili nivo detekcije na 0,03 μg (u toku jednosatne kontrole).

Prvi aparat, kojega se osjetljivost približavala osjetljivosti koja je bila potrebna za mjerenje prirodne gama-aktivnosti tijela, razvio je *Sievert* (5) 1951. godine. On je okružio subjekt, koji je ležao horizontalno, sa 10 drugih cilindričnih ionizacijskih komora visokog tlaka. Geometrijska efikasnost njegova uređaja bila je oko 4π , a pri mjerenjima je dobio standardnu pogrešku $\pm 0,002 \mu\text{g}$ radijum ekvivalenta za seriju od 6–8 mjerenja (svako mjerenje po 2 sata).

Kasnije je 1955–1956. god. *Sievert* (6) instalirao sličan uređaj u jednom podzemnom laboratoriju 55 m ispod stijena, da bi reducirao osnovno zračenje kozmičkog porijekla. Uz dobru vodenu zaštitu, tim uređajem je uspio dobiti standardnu pogrešku od $\pm 0,001 \mu\text{g}$ radijuma ekvivalenta pri jednom mjerenju od 3–4 sata.

U Leedsu 1953. god. *Burch* i *Spiers* (7) upotrebljavaju također ionizacijske komore visokog tlaka, ali uz modifikaciju Sievertova uređaja. Burch i Spiers su popravili statistiku time, što su uspjeli isključiti negativni efekt eksplozija ionizacije izazvanih pljuskovima čestica kozmičkog

* Omjer energije nabijenih čestica koja je pretvorena u svjetlosnu energiju i incidentne kinetičke energije tih čestica.

porijekla. Oni su jednim mjerenjem od 2 sata postigli standardnu pogrešku od $\pm 0,003 \mu\text{g}$ radijuma ekvivalenta. Sličan aparat je u Danskoj konstruirao *Rundo* (8) 1955. god.

Osjetljivost uređaja s ionizacijskim komorama visokog tlaka bila je dovoljna za određivanje prirodne gama-aktivnosti ljudskoga tijela uz standardnu grešku od $\pm 20\%$. Budući da gama zračenje ljudskog tijela dolazi gotovo isključivo od K-40 sadržanog u tijelu, to znači da se količine kalija u tijelu mogu odrediti sa sigurnošću $\pm 20\%$.

Točno mjerenje prirodne gama-aktivnosti tijela omogućeno je, međutim, tek razvojem scintilacionih uređaja. Veliki tekući scintilatori, koje je razvio *Anderson* (9) i njegovi suradnici, pa aparat s kristalom natrijeva jodida, koji su prvi upotrijebili *Miller* i *Marinelli* (10), i aparat *Burcha* i *Birda* (11) sa 3 plastična scintilatora omogućili su mjerenje totalne količine kalija u tijelu uz statističku pogrešku od nekoliko postotaka u mjernom intervalu od 15 minuta. Svi ti uređaji snizili su granice detekcije za faktor 10, a ujedno olakšali analizu gama-spektra, dakako uz razne stupnjeve rezolucije. Naprijed spomenuti uređaji istisnuli su ionizacijske komore i GM-brojače. Tablica 1 prikazuje razvoj metode brojanja radioaktivnosti tijela u posljednje tri dekade, a ujedno ukazuje na široki interval za koji su stručnjaci uspjeli sniziti granice detekcije. Taj faktor sniženja iznosi 50.000.

OPĆI ZAHTJEVI ZA VISOKU OSJETLJIVOST

Kod mjerenja radioaktivnosti tijela na nivou prirodne gama aktivnosti nailazimo na mnoge teškoće zbog toga što se tu radi o slabom izvoru zračenja raspodijeljenom na veliku i geometrijski nepravilnu masu nehomogenog sastava. Vrlo je važno raspolagati detektorima visoke efikasnosti. Zbog te činjenice imaju metode scintilacije veliku prednost ispred metoda s ostalim detektorima. Važno je također obuhvatiti što veći dio emitiranog zračenja iz tijela. Moramo voditi računa i o brzini brojanja impulsa (counting rate) kao i o omjeru signala i osnovnog zračenja (signal-to-background ratio). Da bismo za taj omjer dobili što veću vrijednost, moramo sniziti osnovno zračenje. To se može postići masivnom zaštitom. Sniženje osnovnog zračenja nije, međutim, jedini razlog za upotrebu masivne zaštite. Prirodna gama emisija tijela povećava broj impulsa detektora samo za 0,25% iznad nivoa osnovnog zračenja. Međutim, unošenjem tijela – koje djeluje kao apsorber i raspršivač – dolazi do znatnog sniženja osnovnog zračenja, tako da bi se to povećanje od 0,25% bez masivne zaštite posve izgubilo.

Osnovno zračenje dolazi od kozmičkog zračenja, lokalnog gama-zračenja i od radioaktivne kontaminacije samog detektora. Visoke pulseve, koji dolaze od kozmičkih zraka (mezoni) možemo eliminirati pomoću impulsnog analizatora, no znatan doprinos broju impulsa u scintilatoru dobivamo od kozmičkih zraka nižih energija.

Tablica 1

Datum	Autor i aparat	Vrijeme promatranja subjekta	Približna granica detek- cije (stand. greška)	
			u $\mu\text{g Ra}$	u $\% \text{K-40}$ u tijelu
1929.	<i>Schlundt i suradnici</i> ion. komora 1 atm.		5	
1933.	ion. komora 1 atm.		0,2	
1937.	<i>Evans</i> GM brojač		0,1	
1947.	<i>Hess i McNiff</i> ion. komora 1 atm.		0,03	
1951.	<i>Sievert</i> ion. komora visokog tlaka	2 h	0,005(SG)	50(SG)
1953.	<i>Burch i Spiers</i> dif. ion. komore visokog tlaka . . .	2 h	0,003(SG)	30(SG)
1956.	<i>Sievert</i> ion. komore vis. tlaka pod zemljom	3-4 h	0,001(SG)	10(SG)
1957.	<i>Los Alamos</i> 4 π tekući scintilator	15 min	0,0001(SG)	1(SG)
do	<i>Argonne National Laboratory</i> NaI scintilator	15 min	0,0003(SG)	3,5(SG)
1960.	<i>Leeds</i> Plastični scintilatori	15 min	0,0001(SG)	1,5(SG)

Lokalno gama zračenje može se reducirati do zanemarive vrijednosti pomoću zaštite od olova, vode, čelika, pa čak i krede.

Osim toga, moramo izbjegavati, koliko je to moguće, tragove radioaktivnosti u kristalu i u kućištu fotomultiplikatora. Stoga je važno reducirati kontaminaciju (kalij i drugi izotopi) samih kristala kao i fotomultiplikatora.

SVOJSTVA SCINTILATORA

Zbog visoke efikasnosti scintilatora, broj impulsa koji pomoću njih dobivamo vrlo je velik. To je vrlo važno, jer o broju impulsa ovisi statistička točnost mjerenja.

Spektrometrijska svojstva scintilatora sastoje se u tome, što je pretvaranje energije sekundarnih elektrona u svjetlo i pretvaranje svjetlosnih bljeskova (flešova) u električne pulseve preko fotomultiplikatora praktički proporcionalno. Amplitude tih pulseva možemo analizirati i brojati. Time dobivamo distribuciju visina pulseva kojoj korespondira početni faktor fotona.

Moć reagiranja jednog scintilatora na spektar zavisi u prvom redu od naravi fizikalne interakcije fotona u scintilatoru. U kristalima teških elemenata, kao što su natrijev jodid ili cezijev jodid, znatan dio incidentnih fotona biva fotoelektrički apsorbiran. Kod takvih kristala dobivamo spektralnom analizom oštre impulse s malom širinom amplitude. U organskim scintilatorima, bilo tekućim, ili plastičnim, fotoni će biti apsorbirani preko Comptonova raspršenja. Spektar organskih scintilatora je stoga okarakteriziran širokim, asimetričnim maksimumima. Zgodnom kombinacijom scintilatora i fotomultiplikatora može se, međutim, dobiti dosta dobra spektrometrijska rezolucija.

Scintilator mora imati dobru optičku transparentiju (12), a mora biti okružen materijalom koji dobro reflektira. To je važno zbog toga da scintilacije od raznih dijelova scintilatora dosegnu fotomultiplikator s istom efikasnošću.

Broj fotomultiplikatora kojima skupljamo svjetlost, njihova stabilnost kao i uniformnost fotokatoda igraju važnu ulogu za dobivanje dobrih rezultata.

Planiranje scintilacionog aparata, uzevši u obzir sve te faktore, još uvijek dosta zavisi o vještini eksperimentatora, o njegovu iskustvu i moći rasuđivanja.

TEHNIKA MJERENJA RADIOAKTIVNOSTI
CIJELOG TIJELA

Postoje različiti tipovi detektora za mjerenje radioaktivnosti ljudskog tijela. Dijelimo ih uglavnom u dvije grupe: konvencionalni detektori i detektori za niskoenergetske fotone. Ti posljednji služe za mjerenje X-zraka i gama-zraka u energetskom području od 10–200 KeV, a konvencionalni za ostale energije (13).

Kod svakog mjerenja radioaktivnosti ljudskog tijela, bez obzira na tip brojača dolazi do izvjesne nepouzdanosti očitavanja, jer unutrašnja apsorpcija i raspršenje gama zraka su neizbježno veći kod jednih osoba nego kod drugih. Veličina te nesigurnosti ovisi o tipu brojačkog sistema,

jer građa tijela i lokacija izotopa u tijelu izazivaju kod nekih uređaja veće razlike nego kod drugih.

Brojač za cijelo tijelo može imati visoku osjetljivost, a relativno slabu točnost, i obratno. Kakav ćemo uređaj izabrati ovisi o problemima koje želimo njime rješavati. Brojač s visokom osjetljivošću upotrebljava se, na primjer, za mjerenje sadržaja prirodnog radija kod pučanstva. Ovdje tačnost individualnog mjerenja nije važna, a osjetljivost je bitna zbog malih količina radija u tijelu. Drugi tip brojača sa slabom osjetljivošću a sa većom točnošću upotrebljava se kod studija metabolizma i slično.

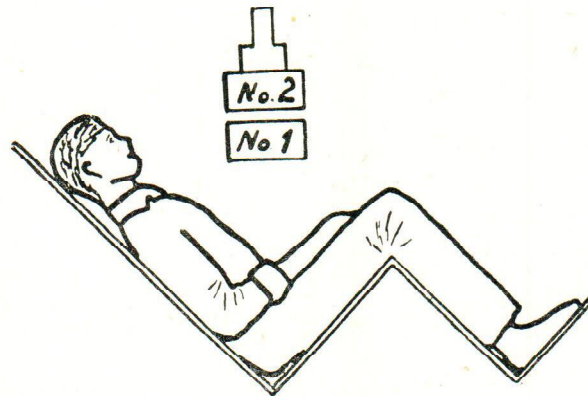
Želimo li dobiti pouzdana mjerenja, brojač mora zadovoljavati ove uvjete:

1. Osjetljivost brojača ne smije ovisiti o građi tijela subjekta ili o raspodjeli tvari u njegovu tijelu.

2. Mora se omogućiti kalibracija brojača pomoću nekog fantoma, jer treserske količine dugoživućih izotopa ne možemo administrirati u ljudsko tijelo bez opasnosti. To je, međutim, samo gruba aproksimacija prave raspodjele radioizotopa u ljudskom tijelu.

3. Osjetljivost (broj impulsa po mikrokiriju) mora biti visoka, da bi vrijeme brojanja bilo što je moguće kraće.

4. Pozicija subjekta i svakog kristala mora biti ista za sva mjerenja bez obzira na građu tijela subjekta.

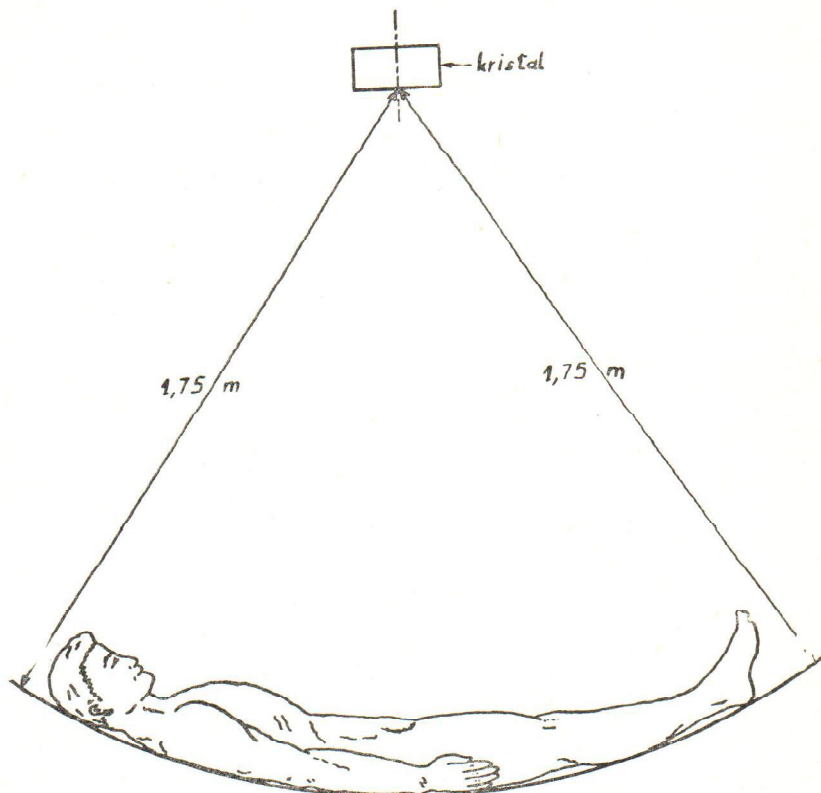


Sl. 1

5. Brojač mora davati dobru rezoluciju energija. Da bi se razni izotopi mogli identificirati, energetska stabilnost mora biti dobra, a osnovno zračenje nisko.

Slike 1, 2 i 3 prikazuju tri različite tehnike mjerenja radioaktivnosti cijelog tijela.

Na slici 1 vidimo tehniku s nagnutom stolicom. Pacijent sjedi u tipičnoj poziciji (14) relativno prema stolici. Stolica je nagnuta tako da njezin naslon zatvara kut od 35° s horizontalom. Kristal natrijeva jodida postavljen je iznad pacijenta, kao što se vidi na slici. Pomoću takvog uređaja mogu se dobiti velike brzine brojanja, a uređaj je relativno neovisan o tjelesnoj građi pacijenta. Upotrebljava se uglavnom za rutinska mjerenja kalija, cezija, radija i torija u tijelu (15).

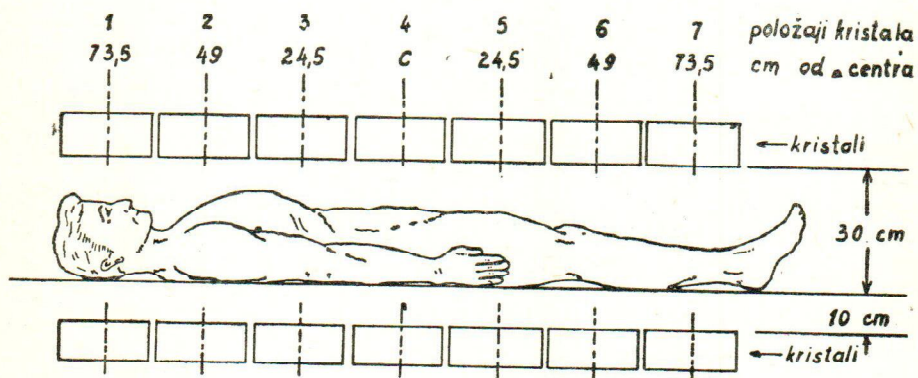


Sl. 2

Slika 2 prikazuje lučnu tehniku, koju je uveo *Evans* (16) 1937. god. Pomoću nje je *Evans* pokušao načiniti minimalnima nesigurnosti zbog heterogene distribucije Ra-226 u skeletu. Svoju svrhu je htio postići na taj način, da je subjekt postavio duž luka kružnice, kojoj je radijus bio velik u usporedbi s debljinom tijela. Time se postiže da udaljenost izvor-detektor svuda bude približno ista. A da bi kompenzirao razliku u atenuaciji gama-zraka u tijelu, uzeo je geometrijsku sredinu očitavanja

u zrcalnim pozicijama s obzirom na detektor. Tu metodu su kasnije modificirali *Marinelli* (17) i suradnici, uzevši u obzir i raspršenje u samom tijelu. Osjetljivost ovog uređaja je slaba, jer su svi dijelovi tijela daleko (oko 90 cm) od kristala, i kristal registrira samo mali postotak gama-zraka.

Na slici 3 je prikazan uređaj sa više kristala. Kod takvih uređaja broj impulsa znatno varira s lokacijom tvari u tijelu, a osim toga totalni broj impulsa je funkcija visine pacijenta. Prednost uređaja je ta što daje veći broj impulsa ako upotrijebimo velike kristale. Osim toga, daje podatke o raspodjeli izotopa u ljudskom tijelu pri ispitivanju metabolizma radioelemenata i omogućuje mijenjanje osjetljivosti postepenim ukopčavanjem, odnosno iskopčavanjem pojedinih kristala.



Sl. 3

Osim ta tri navedena tipa konvencionalnih detektora, postoje i detektori za niskoenergetske fotone, koji mjere X-zrake i gama-zrake u energetskom području 10–200 KeV. Osjetljiviji su od konvencionalnih detektora, koji često nisu kadri detektirati spektar niskoenergetskih fotona. Oni služe za određivanje plutonija-239 kod radnika u nuklearnoj industriji, zatim za mjerenje vanjskog »bremstrahlung« čistih beta-emitera u tijelu pri kliničkim ispitivanjima, za radioaktivne padavine i za mjerenje izotopa niskoenergetskog X-zračenja.

KALIBRACIJA I OBRADA REZULTATA

Tehnika kalibracije je vrlo težak problem koji je inherentan samom mjerenju radioaktivnosti ljudskog tijela.

Glavna razlika u mjerenju radioaktivnosti ljudskog tijela i nežive tvari je u metodi kalibracije apsolutne osjetljivosti detektora. U slučaju

nežive tvari, fizički oblik i veličina uzorka mogu se mijenjati, kako bi se postigla specifična geometrija u odnosu na detektor. Uzorak se može i izmiješati, kako bi se dobila jednolika raspodjela radioizotopa u njemu. Pomoću takvog uzorka kalibrirani brojač daje apsolutnu brzinu dezintegracije. Tu se svakako upotrebljavaju pripremljeni uzorci i referentni izvori, koji su identični u svakom relevantnom detalju, osim u totalnoj aktivnosti.

Veličinu i oblik ljudskoga tijela ne možemo mijenjati. Radioaktivnost može biti raspodijeljena u cijelom tijelu ili koncentrirana u pojedinim organima relativno niske gustoće, kao što su na primjer pluća, ili visoke gustoće, kao što je na primjer skelet. Kao rezultat svega toga, unutar-nja apsorpcija i raspršenje variraju ne samo zbog veličine subjekta nego i zbog lokacije radioizotopa u raznim dijelovima tijela.

Kod nekih slučajeva mogu se varijacije radioaktivnosti vremenom slijediti relativnim mjerenjima, koja u slučaju nepromjenljive prostorne distribucije radioaktivnosti ne pokazuju sistematske pogreške, a ni greške zbog kalibracije. Često su, međutim, potrebna apsolutna mjerenja radioaktivnosti, koja zahtijevaju određivanje odnosa između očitavanja na instrumentu i poznatih količina radio-elemenata u tijelima različitih masa i veličina.

Kod mjerenja ukupne količine kalija u tijelu možemo izvršiti vrlo preciznu kalibraciju s umjetnim izotopom K-42 koji emitira jednu vrstu gama zraka skoro iste energije kao i K-40, a ima vrlo kratko poluvrijeme raspada. Dr Spiers i dr Burch bili su prvi, koji su prije 10 godina upotrijebili tu metodu kalibracije, a vršili su je s ionizacijskim komorama. Sa nekoliko mikrokirija K-42 administriranog oralno (doza od nekoliko milirada) dobiva se distribucija vrlo slična distribuciji normalnog kalija.

U većini slučajeva radi se, međutim, o elementima s dugim biološkim poluzivotom u tijelu. Tada se gama-spektar čovjeka mora odrediti na neki način bez administriranja radio-izotopa u organizam. U takvim slučajevima kalibracija se vrši fantomima.

Mjerenja radioaktivnosti tijela postaju vrlo komplicirana i dugotrajna uz razrađene metode kalibracije i uz povećanje broja kanala analizatora, čime se dobiva sve više detalja gama-spektra. Odbijanje osnovnog zračenja u svakom od 100 kanala, na primjer, skoro je nemoguće kod rutinskih mjerenja, osim ako se izvrši instrumentalno. Podatke treba, dakle, obrađivati računalima. Stručnjaci se bez izuzetka slažu, da su računala potrebna za istraživanje spektra kao i za kalibraciju.

PRIMJENE I FUNKCIJE BROJAČA ZA CIJELO TIJELO

Budući da su izdaci u vezi s instaliranjem takvih aparata vrlo veliki (50.000–100.000 \$) mora se voditi računa o njihovoj svrsi i o njihovu racionalnom iskorištavanju. Nema sumnje da ti brojači imaju važnu no-

ipak ograničenu upotrebu. Postoje razni problemi koji se rješavaju ovakvim brojačima. Neki od tih problema imaju veliku važnost za nauku, i za sada su slabije rješivi ili čak nerješivi drugim uređajima. Njihova je primjena ipak usmjerena prema ovim kategorijama:

1. Monitori za cijelo tijelo. Pomoću tih sprava može se mjeriti radioaktivna kontaminacija ispod maksimalno dopuštenih nivoa.
2. Monitori za cijelo tijelo koji služe za rješavanje problematike nacionalne zaštite kao i za rješavanje problema koji se javljaju u industriji baziranoj na nuklearnoj energiji.
3. Aparati za mjerenje beta-emitera preko »bremsstrahlung«.
4. Uređaji za studij trovanja radijem, torijem i mezotorijem.
5. Uređaji za klinička istraživanja, naročito određivanje K-40 u tijelu.
6. Brojač za cijelo tijelo kao novo sredstvo za istraživanje s markiranim elementima ispod nivoa konvencionalnih metoda.

Ovaj kratki pregled izrađen je na temelju studija koji je financijski omogućila Savzna komisija za nuklearnu energiju.

Literatura

1. Schlundt, H., Barker, H. H., Flinn, F. B.: Am. J. Roentgenol. Radium Therapy, 21 (1929) 345.
2. Evans, R. D.: Am. J. Roentgenol. Radium Therapy, 37 (1937) 368.
3. Rajewsky, B.: Strahlentherapie, 69 (1941) 438.
4. Hess, V. F., and McNiff, W. T.: Am. J. Roentgenol. Radium Therapy, 57 (1947) 91.
5. Sievert, R. M.: Strahlentherapie, 99 (1956) 185.
6. Sievert, R. M.: Proc. Intern. Conf. Peaceful Uses Atomic Energy, Geneva, 13 (1955) 187.
7. Burch, P. R. J. and Spiers, F. W.: Nature, 172 (1953) 519.
8. Rundo, J.: Sci. Instr. 32 (1955) 379.
9. Anderson, E. C.: Brit. I. Radiol., Supp. 7 (1956) 27.
10. Marinelli, L. D.: Brit. J. Radiol. Supp. 7 (1956) 38.
11. Bird, P. M. and Burch, R. R. J.: Phys. Med. and Biol. 2 (3) (1958) 217.
12. Price, W. J.: Nuclear Radiation Detection, Mc Graw-Hill Book Company, Inc. New York, 1958.
13. Whole Body Counting, Proceedings of a Symposium, Vienna 1961., IAEA publication.
14. Miller, C. E.: Proceedings of the Second International Conference on Peaceful Uses of Atomic Energy, Geneva, Switzerland 23 (1958) 113-123.

15. *Miller, C. E.*: Gamma Radiation: Low Intensity Spectrometry of Gamma Radiation Emitted by Human Beings, *Med. Phys. Sol.* 3 (1960) 487-492.

16. *Evans, R. D.*: Radium Poisoning (II) Quantitative determination of radium content and radium elimination rate of living persons, *Am. J. Roentgenol.*, 37 (1937) 368.

17. *Marinelli, L. D. et al.*: Quantitative determination of gamma-ray emitting elements in living persons, *Am. J. Roentgenol.* 73 (1955) 661.

Summary

WHOLE BODY COUNTING

A short review is given of the development of methods for measuring gamma radiation of the human body, the general requirements for high sensitivity and the properties of scintillators. Some of the techniques of whole-body counting, calibration, data processing, and the applications and functions of whole-body counters are mentioned as well.

*Institute for Medical Research,
incorporating the Institute of Industrial Hygiene,
Zagreb*

*Received for publication
September 20, 1962*