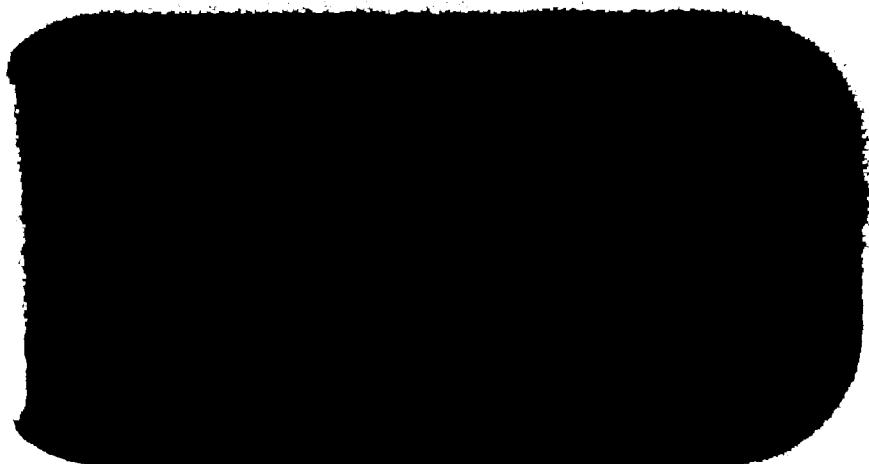


R0810,1555

✓



**CENTRUL DE STUDII PENTRU ENERGIA NUCLEARA
INSTITUTUL CENTRAL DE FIZICĂ**



**SECRET-NUCLEAR
RO22222**

CENTRAL INSTITUTE OF PHYSICS
INSTITUTE FOR PHYSICS AND NUCLEAR ENGINEERING
Bucharest, P.O.B.5206, ROMANIA

IFIN -
NP-9-1979

Martie

Utilizarea radiatiilor X

F.Rebigan

Abstract : In this paper the modality of X-ray utilization in different activities and economy is given. One presents firstly quantities and units used in radiation dosimetry and other fields. One gives the generation of X-rays, their properties as well as the elements of radiation protection. The utilization characteristics of these radiations in different fields are finally given.

1. GENERALITATI

In aplicațiile radițiilor ionizante în medicină, industrie și cercetare pentru determinarea cîmpurilor de doze se folosesc aparate denumite generic dozimetre sau debitmetre care măsoară de obicei expunerea (doza de expunere) sau debitul expunerii.

Expunerea, notată cu X (definită numai pentru radiații X și gama - radiații fotonice) este raportul $\Delta Q/\Delta m$ unde ΔQ este suma sarcinilor electrice ale tuturor ionilor de acelaș semn produși în aer prin ionizare :

$$X = \frac{\Delta Q}{\Delta m}, \quad [C/kg].$$

Mărimea expunerii (denumirea mai veche - doza de expunere) are ca unitate specială röntgen, notat R , care în sistemul internațional de unități SI are valoarea :

$$1 R = 2,58 \cdot 10^{-4} C/kg$$

Debitul expunerii, \dot{X} este raportul $\Delta X/\Delta t$, unde ΔX este variația expunerii în timpul Δt :

$$\dot{X} = \frac{\Delta X}{\Delta t} \quad [R/s]; \quad [A/kg]$$

în unități SI avem :

$$1 R/h = 7,167 \cdot 10^{-8} A/kg.$$

O altă mărime care măsoară efectele radiației asupra substanțelor este doza absorbită sau debitul dozei absorbite.

Doza absorbită, D , este raportul $\Delta E_D/\Delta m$, unde ΔE_D este energia cedată de radiația ionizantă substanței într-un element de volum și Δm este masa substanței din acel volum:

$$D = \frac{\Delta E_D}{\Delta m}, \quad [erg/g].$$

Unitatea specială este rad-ul și are valoarea

$$1 rad = 100 erg/g = 0,01 J/kg.$$

Debitul dozei absorbite, \dot{D} , este raportul $\Delta D/\Delta t$,

unde \dot{D} este variația dozei absorbite în timpul Δt :

$$\dot{D} = \frac{\Delta D}{\Delta t}, \quad [\text{erg/g.s}]; [\text{rad/h}].$$

În condiții de echilibru electronic se poate stabili o relație cantitativă între röntgen (unitatea de expunere) și rad (unitatea de doză absorbită). Dacă mediul absorbant este aerul se poate scrie:

$$D[R] = 0,87 \cdot D [\text{rad}].$$

Aceasta înseamnă că, în condiții de echilibru electronic, unei expuneri omogene de 1R, îi corespunde în aer o doză absorbită de 0,87 rad.

O a treia mărime dozimetrică de bază este doza biologică sau, în nomenclatura nouă echivalentul de doză, care reprezintă produsul între doza absorbită și un factor de calitate a radiației N , specific fiecărui tip de radiație :

$$B = D \cdot N, \quad [\text{rem}].$$

Unitatea de măsură tolerată este rem-ul nou, pentru debit rem/h iar în sistemul SI, W/kg.

Deci în domeniul radiațiilor X de energii obișnuite o doză debit biologică de 1 rem/h este determinată de o doză absorbită de 1 rad/h datorată radiațiilor X considerate (pentru radiațiile X și gama se consideră $N = 1$).

2. PRODUCEREA RAZELOR X

Razele X sînt radiații ionizante de natură electromagnetică, cu lungimea de undă cuprinsă între 8\AA și $0,06\text{\AA}$ ($1\text{\AA} = 10^{-7}\text{m}$).

Razele X se produc prin frînarea electronilor accelerați produși de un filament incandescent la nivelul catodului, pe anticatod, de obicei realizat din tungsten, metal greu fuzibil și cu număr atomic (Z) mare. Revenirea atomilor bombardați ai anticatodului la starea de echilibru este însoțită de emisia de radiații X a căror frecvență (lungimea de undă) este determinată de energia electronilor accelerați și numărul atomic al anticatodului. Acestea sînt așa zisele radiații caracteristice. Ele sînt

rezultatul dislocării electronilor din straturile cele mai centrale ale atomului anticatodului, electroni puternic atrași de nucleu. Atomul ionizat, ca urmare a smulgerii și expulsării unui electron caută să ajungă din nou în starea inițială de echilibru, prin rearanjarea straturilor sale electronice.

Deplasarea unui electron de pe unul din straturile centrale ale unui atom este urmată de o avalanșă de transferuri de electroni. Drept urmare, locurile electronilor dislocați sînt luate de către electroni din straturile externe următoare. Cantitatea de energie eliberată în cursul rearanjării straturilor electronice este egală cu diferența energiilor de legătură dintre orbitele periferice și centrale între care s-a efectuat schimbul electronic.

Eliberarea excesului de energie care însoțește fiecare transfer de electroni are loc sub formă de fotoni caracteristici și de electroni Auger. În acest ultim caz, rearanjările consecutive ionizării nu se mai însoțesc de emisia de fotoni, ci de ejectarea electronului care urmează să facă trecerea de pe stratul periferic.

Este important de reținut că fotonii caracteristici sînt proprii substanțelor cu număr atomic ridicat, în timp ce electronii Auger celor cu număr atomic mic. Întrucît valoarea energiei eliberate este proprie atomului ionizat și învelișului electronic în care a avut loc interacțiunea, fotonii de raze X sînt caracteristici acestuia. De exemplu dacă interacția are loc în stratul K al tungstenului, ea este urmată de excitarea seriilor K ale tungstenului. Cu alte cuvinte, structura învelișurilor electronice ale atomului variază de la un element chimic la altul, fiecare element chimic emite raze caracteristice, proprii, în funcție de diferența energiilor de legătură dintre orbitele atomilor anticatodului.

Radiațiile de frînare apar la frînarea electronilor eliberați de catod și frînați în câmpul electrostatic al nucleului atomic din anticatod.

Un electron care se deplasează în vecinătatea unui

nucleu atomic este influențat de câmpul electric al acestuia fiind supus unei forțe de atracție electrostatică care îl accelerează și-i schimbă în același timp direcția.

Energia cinetică pe care o cedează electronul în fenomenul de frinare, se manifestă sub formă de fotoni de raze X. Este vorba de o interacție radiativă care se însoțește de transformarea energiei cinetice în energie electromagnetică. Electronii sînt însă frinați la diverse distanțe de nucleul atomic astfel că vor lua naștere fotoni cu energii diferite, mai mari sau mai mici, după cum energia cedată a fost mai mare sau mai mică. De aceea, fascicolul radiațiilor X de frinare va conține un număr infinit de radiații, deci va prezenta un spectru continuu, dar neomogen, întrucît conține fotoni de energii diferite. Explicația este că energia fotonului de raze X, emis într-o interacție radiativă, este influențată de distanța dintre electroni și nucleu, de energia electronului incident și de sarcina nucleului ce intră în interacție.

Drept urmare, la alcătuirea fascicolului de raze X utilizat în röntgen-diagnostic sau röntgen-terapie, participă atât radiațiile de frinare cît și cele caracteristice. Fascicolul de raze X odată format după ce traversează peretele de sticlă al tubului de raze X și placa de aluminiu (filtru) situată la nivelul fantei cupolei, este astfel filtrat încît dispar fotonii cu energii mici.

O instalație de raze X este constituită din tubul de raze X, generatorul de tensiune înaltă și pupitrul de comandă.

3. PROPRIETĂȚILE RAZELOR X

Drept deosebire de radiațiile luminoase care sînt ușor oprite de obstacole, razele X trec, în general, mai ușor prin corpurile materiale, fiind puțin atenuate de elementele materiale pe care le întîlnesc în drumul lor. Penetrabilitatea lor este determinată de calitatea lor, adică de energia și intensitatea fascicolului de fotoni.

Duritatea razelor X se măsoară în kV, iar intensitatea fascicolului în mA. Tensiunile mici dau lungimi de undă mari deci raze mai puțin penetrante, raze mai moi și invers. Dar fascicolul de raze X pe care îl utilizăm în radiologic sau radioterapie este policromatic adică conține fotoni cu lungimi de undă diferite. Penetrabilitatea poate fi modificată convenabil prin filtrare. Se cunosc trei tipuri de filtraje:

a) filtrarea inerentă, realizată prin construcția de învelișul de sticlă, uleiul izolant și fereastra carcasei tubului;

b) filtrarea adițională obținută cu ajutorul filtrelor de Al, Cu, interpușe între tub și pacient;

c) filtrarea fascicolului de raze X la nivelul regiunii examinate (iradiate). Atât filtrarea inerentă cât și filtrarea adițională urmăresc să îndepărteze din fascicolul de raze X fotonii cu energii joase (sub 50 keV).

Atenuarea este fenomenul fizic prin care un corp material diminuează sau anulează intensitatea radiației ajunsă la nivelul său. Astfel, dacă vom urmări un fascicul de raze X înainte de a pătrunde într-un corp material oarecare și după aceea la ieșirea din corpul material respectiv, vom observa atât modificarea calitativă cât și schimbări cantitative. Numărul fotonilor care traversează regiunea examinată fără să fi suferit vreo modificare la nivelul ei va fi din această cauză, mult mai mic decât cel plecat din focarul tubului de raze X. În spectrul fascicolului de raze X așa cum se prezintă el după traversarea de corpuri materiale, vor predomina radiațiile dure.

Cauzele acestor modificări, ale atenuării fascicolului de fotoni sînt procesele elementare de interacție cu substanța și anume, efectul fotoelectric, efectul Compton și producerea de perechi electron-pozitron.

Dintre cele trei procese care explică atenuarea fascicolului de raze X este necesar să ne oprim numai asupra primelor două; absorbția și difuzia. Se știe că razele X sînt absorbite în diferite materiale într-o proporție

diferită care depinde atât de caracteristicile materialului ca numărul atomic, densitatea, grosimea corpului străbătut și cele ale fasciculului însuși cum ar fi energia. Absorbția se face după legea exponențială:

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu d}$$

unde I este intensitatea radiației emergente, I_0 intensitatea radiației incidente, μ coeficientul de absorbție lineară al materialului absorbant, d este grosimea materialului absorbant iar e baza logaritmilor naturali ($e = 2,718$).

Fasciculul de raze X, în urma traversării corpului respectiv nu este constituit din radiații cu aceeași lungime de undă ci dimpotrivă are o compoziție neomogenă. El este constituit din fotoni primari și din fotoni secundari sau difuzati. Fotonii difuzati se formează ca urmare a interacțiilor dintre fotonii incidenti și atomii elementelor materiale străbătute de fascicul. Ei posedă energie mică și au o direcție deviată în comparație cu direcția fotonilor primari.

Asemenea fotoni pot fi absorbiți sau difuzati, absorbția prin difuzie fiind predominantă în cazul radiațiilor cu lungimea de undă mică.

Difuzia determină apariția de fotoni și în afara limitelor regiunii traversate de fasciculul de raze X, fotonii difuzati răspîndindu-se în toate direcțiile, chiar și retrograd față de direcția fotonilor incidenti, fotoni retro-difuzati.

Trebuie luate de aceea măsuri pentru protejarea obiectului iradiat, a personalului de specialitate și creșterea calității iradierii efectuate. Diafragma secundară și localizatoarele sînt necesare în acest caz pentru a restrînge întinderea fasciculului și dimensiunile corpului iradiat. Aceasta deoarece un cîmp mare de iradiere înseamnă un volum mare de iradiat și implicit, în cazul unui fascicul incident penetrant, o mare cantitate de

radiații difuzate. Când utilizăm tensiuni ridicate la instalația de raze X, absorbția este redusă, iar difuzia mare. Radiațiile noi sînt deci mai mult absorbite decît difuzate și deci participă în mai mică măsură la alcătuirea fasciculului emergent.

Luminiscenta este proprietatea anumitor săruri ca sulfatul de zinc, platino-cianura de bariu ș.a. de a deveni luminoase sub influența razelor X. Datorită luminiscentei, razele X invizibile pot fi vizualizate cu ochiul liber de către operator. Luminiscenta îmbracă două forme distincte: fosforescența și fluorescența.

Fosforescența, observată la unele săruri, este fenomenul de luminiscentă care persistă un timp oarecare și după ce razele X și-au încetat acțiunea asupra lor.

Fluorescența este luminiscenta care durează numai atît timp cît acționează fasciculul de raze X asupra sărurilor fluorescente.

În practica medicală de exemplu, fluorescența prezintă o importanță deosebită și cunoaște utilizări multiple. Astfel ecranul radioscopic transformă energia radiațiilor X în energie a radiațiilor luminoase evidențiind imaginile obiectului iradiat. Fenomenul de luminiscentă prezintă un mecanism de apariție similar celui studiat la producerea razelor X (ionizarea și excitarea atomilor și moleculelor substanței luminiscente).

Razele X au proprietatea, ca și lumina, de a impresiona emulsia de bromură de argint de pe filmul fotografic. Această proprietate a razelor X stă la baza formării imaginilor radiografice. Sub influența razelor X, particulele de bromură de argint fiind supuse unor procese de ionizare devin sensibile la acțiunea substanțelor reductoare. Revelatorul transformă bromura de argint în argint metalic, care fiind opac, filmul capătă, după fixare, culoarea neagră.

Inegrarea emulsiei radiografice are loc în mod diferit, mai mult sau mai puțin în raport cu cantitatea de

energie ce a fost cedată filmului, determinând la nivelul acestuia nuanțe pînă la negru închis.

4. TEHNICI DE UTILIZARE A RAZELOR X

Cele mai importante domenii în care se utilizează razele X în diferite tehnici, sînt: medicina (radiodiagnostic și radioterapie), iradieri industriale, sterilizări prin radiații, iradierea diferitelor materiale pentru a le studia proprietățile la radiații, calibrarea și testarea aparatului radiometric și dozimetrice, etc.

În toate aceste cazuri, depinzînd de scopul propus, se folosesc două tipuri de fascicule de raze X: cazul cel mai des întâlnit este cel al unui fascicul îngust bine definit, delimitat cu diafragme și în care se știe debitul dozei în fiecare punct de pe axul fasciculului și cazul fasciculului larg, divergent, în care se măsoară în diverse puncte ale sale debitul dozei de expunere sau absorbție.

În primul caz, fasciculul se colimează cu mai multe diafragme așa cum se vede din figura de mai jos, pentru a înlătura radiațiile secundare ce ar perturba iradierile. Acest tip de fascicul de obicei se monitoarează cu un tip special de camere de ionizare, așa zisele camere monitor prin transmisie și cu un dozimetru obișnuit, deoarece se poate face o calibrare a lor, la un anumit curent de ionizare corespunzînd un debit al dozei dat.

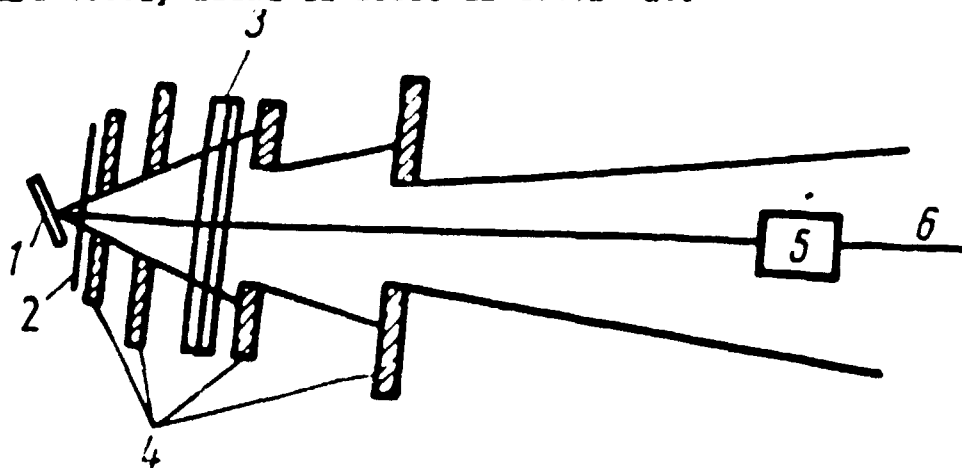


Fig. 1. Modul de colimare a camerei monitor.

1. anticatod
2. filtru suplimentar
3. camera monitor
4. diafragme de delimitare a fasciculului
5. detector
6. fasciculul de raze X

Problema calculului dozei într-un punct determinat sau în diferite puncte ale fasciculului de raze X este legată de cunoaşterea dozei (debitului dozei) într-un punct de referinţă măsurat cu un dozimetru de precizie suficientă pentru scopul propus.

Un exemplu de fascicul de raze X puternic divergent este utilizat în radioscopie pulmonară sau gastrică. Trebuie remarcat că în asemenea cazuri nu se cunoaşte doza exactă ea depinzând de timpul de expunere, dar în general atinge câţiva röntgeni.

Uneori este necesar să se lucreze cu calităţi diferite ale radiaţiilor X, adică cu energii efective diferite. Energiile efective se obţin prin filtrarea radiaţiilor date de tubul de raze X cu filtre speciale din Cu, Al, Pb, Sn, Th. Acestea sînt straturi din metal pur de diferite grosimi interpuse între focarul fasciculului de raze X şi obiectul sau detectorul de iradiat. Ele au rolul de a absorbi radiaţiile cu energie mai mică schimbînd în acelaşi timp compoziţia spectrală a fasciculului de radiaţii.

Măsurătorile spectrale şi calculele efectuate la diferite filtrări, au dus la concluzia că cel mai util este să se stabilească, în mod convenţional, dar nu arbitrar, parametrii unei instalaţii de raze X la care trebuie să funcţioneze şi cu filtrele adiţionale corespunzătoare.

În tabelul de mai jos se dau caracteristicile fasciculului de raze X cu energiile efective adoptate internaţional şi la noi în ţară.

5. MĂSURI DE RADIOPROTECTIE

Protecţia împotriva riscurilor iradierii în

exploatarea și folosirea instalațiilor de raze X, vizează atât personalul operator cât și pe cei din jur. Aceștia li se poate adăuga populația în ansamblu, datorită riscurilor genetic sociale.

În general, este dificil să se stabilească o limită a dozei acceptabile. Acest lucru nu presupune existența unei cantități de raze X sub care riscul este total înlăturat, ci admite că acest risc este în mod deliberat acceptat ca fiind de importanță minimă. Doza acceptabilă variază în funcție de fiecare tip de radiație utilizat. În cazul razelor X, doza maximă acceptată pentru cei care lucrează cu asemenea radiații este de 5R pe an, având ca punct de referință gonadele și organele hematopoetice. În calcularea acestei doze s-a avut în vedere faptul că iradierea nu este constantă pe tot timpul anului, că există perioade de activitate cu o iradiere mai ridicată și perioade cu o iradiere mai puțin importantă.

Pentru piele, în mod deosebit pentru mâini și picioare, doza limită are valori mult mai ridicate. Doza medie este de 600 mR pe săptămână pentru gambe, iar pentru ochi 300 mR.

Operatorul instalației de raze X este în măsură să ia toate precauțiile pentru a executa o iradiere corectă și să se expună riscului iradierii cât mai puțin. Astfel, calitatea radiației, utilizarea grilei antidifuzoare, calitatea filmelor, filtrarea, timpul de expunere, influențează măsurile de protecție împotriva radiațiilor.

Personalul de specialitate trebuie să se găsească în timpul lucrului cât mai departe de sursa de iradiere, protejat de paravane confecționate din materiale care absorb radiațiile ionizante.

Sînt necesare și obligatorii examenele periodice la care să nu se omită relația importantă dintre globulele sîngelui, albe și roșii. Încăperea unde este instalat aparatul de raze X, trebuie să fie bine aerisită, ventilată și suficient de spațioasă, pentru a permite personalului operator să lucreze comod, la distanță mare de tubul de raze X

în timpul expunerii.

Un astfel de laborator trebuie să aibă suprafața de circa 50 m², spațiul necesar pentru a organiza bine activitatea și pentru a putea lua cele mai adecvate măsuri de protecție.

Din laborator trebuie exclus orice mobilier metalic pentru că el constituie sursa unor importante contribuții ale radiațiilor secundare. Prezența radiațiilor secundare în cantitate mare dăunează atât personalului operator cât și lucrării pe care o efectuăm.

Se știe că materia vie nu rămâne indiferentă la acțiunea radiațiilor X. Odată ajunși în organism, fotonii de raze X cedează o parte sau întreaga lor energie țesuturilor iradiate, unde au loc procese de ionizare, excitare, transformări chimice, biologice. În urma ionizării și excitației ca procese fizice sunt declanșate procese fizice și chimice complexe, cu semnificație biologică deosebit de importantă, întrucât ele reprezintă sub un anumit aspect leziuni ale structurii celulare. Efectele biologice declanșate de acțiunea radiației ionizante pot fi observate și urmărite la nivele diferite, riscurile legate de iradiere variind după țesuturile atinse. Date fiind condițiile în care se desfășoară lucrările cu radiații X, acțiunea acestora se resfringe asupra tuturor organelor și țesuturilor, un rol important având radiosensibilitatea țesuturilor interesate.

Suita modificărilor determinate de iradiere poate avea drept rezultat final transformarea neoplazică a unor țesuturi supuse acțiunii radiațiilor ionizante sau, în cazul țesuturilor hematopoetice, apariția transformărilor leucemice. Riscul genetic după iradiere a fost deasemenea demonstrat. Nu trebuie neglijat nici faptul că după iradiere se diminuează puterea de apărare a organismului împotriva diverselor afecțiuni și se reduce semnificativ vârsta medie a animalelor iradiate. Reducerea duratei de viață la persoanele ocupate profesional cu raze X nu este confirmată de toate observațiile existente până în prezent.

Nr. crt.	Energia efectivă (keV)	Tensiunea anodică (kV)	Filtru adițional (mm)	Curent anodic (mA)
1.	29	75	2 Al	2; 5; 10
2.	36	50	2 Al	2; 5; 10
3.	45	60	2 Al	2; 5; 10
4.	47	60	0,5 Cu	2; 5; 10
5.	50	100	10,5 Al	2; 5; 10
6.	55	80	2 Al	2; 5; 10
7.	59	80	0,5 Cu	2; 5; 10
8.	66	80	$\left. \begin{matrix} 2 \text{ Cu} \\ 1 \text{ Al} \end{matrix} \right\}$	2; 5; 10
9.	71	100	$\left. \begin{matrix} 2 \text{ Cu} \\ 2 \text{ Al} \end{matrix} \right\}$	2; 5; 10
10.	75	100	2,5 Cu	2; 5; 10
11.	79	100	4,5 Cu	2; 5; 10
12.	80	120	2 Cu	2; 5; 10
13.	82	110	3,5 Cu	2; 5; 10
14.	87	120	$\left. \begin{matrix} 3,5 \text{ Cu} \\ 2 \text{ Al} \end{matrix} \right\}$	2; 5; 10
15.	91	120	4,5 Cu	2; 5; 10
16.	95	120	7,5 Cu	2; 5; 10
17.	110	150	$\left. \begin{matrix} 7 \text{ Cu} \\ 2 \text{ Al} \end{matrix} \right\}$	2; 5; 10
18.	123	150	4,5 Cu	2; 5; 10
19.	135	180	$\left. \begin{matrix} 11 \text{ Cu} \\ 1 \text{ Al} \end{matrix} \right\}$	2; 5; 10
20.	170	200	$\left. \begin{matrix} 5 \text{ Cu}, 2 \text{ Al} \\ 1,2 \text{ Pb} \end{matrix} \right\}$	2; 5; 10

A N E X A In ultimul timp s-au adoptat noile denumiri și valori pentru doză și activitate în sistemul internațional :

- activitatea : becquerel (Bq), 1Bq = $2,70 \times 10^{-11}$ Ci
- doza absorbită : gray (Gy), 1Gy = 1J/Kg = 100 rad
- echivalentul dozei: sievert (Sv), 1Sv = 1J/Kg = 100 rem
- expunerea : coulomb/Kg (C/Kg), 1C/Kg = 3876 R



CENTRAL INSTITUTE OF PHYSICS
Documentation Office
Bucharest, P.O.B. 1906
ROMANIA