

## ENIGE FUNDAMENTELE EIGENSCHAPPEN VAN RÖNTGENSTRALEN\*)

DOOR

PROF. DR. R. H. DE WAARD.

Een moderne röntgenbuis is in beginsel een geëvacueerd vat waarin een kathode en een anode tegenover elkaar zijn geplaatst. De kathode bestaat uit een gloeidraad met toevoer- en afvoerleiding en de anode uit een forse metaalklomp met een glad oppervlak.

Wanneer men de buis in werking wil stellen brengt men allereerst een spanning van enkele volts aan tussen de kathodeleidingen. De gloeidraad wordt dan heet en laat electronen los uit de schillen van de atomen waaruit hij is samengesteld.

Elk atoom bestaat uit een positieve kern en uit een schil van electronen die alle een lading  $-e$  dragen waarbij

$$e = 4.8 \times 10^{-10} \text{ e.s.e.}$$

Wanneer  $Z$  het rangnummer van het atoom voorstelt in het periodiek systeem van Mendelejeff draagt de kern een lading  $Ze$ . Het rangnummer van het wolfram is 74, van calcium en fosfor resp. 20 en 15, en van zuurstof, stikstof, koolstof en waterstof resp. 8, 7, 6 en 1. Naarmate het rangnummer en daarmee de kernlading kleiner is, is dit ook met het aantal electronen in de schil het geval.

Wanneer de gloeidraad electronen heeft losgelaten moet men ervoor zorgen dat deze met grote snelheid de tegenoverliggende anode treffen. Men bereikt dit door tussen gloeidraad en anode een spanningsverschil aan te brengen van enige tienduizenden volts. De plaats waar de anode wordt getroffen is het focus van de buis; de electronen verliezen hier plotseling hun snelheid en de daarbij vrijgekomen energie gaat grotendeels over in warmte, voor een zeer klein deel - minder dan 1% - echter ook in röntgenstralen die in alle richtingen worden uitgezonden.

Ten aanzien van de aard van röntgenstralen kan gezegd worden dat ze kwalitatief verwant zijn met lichtstralen; beide zijn „electromagnetische

\*) Naar een voordracht, gehouden voor de najaarsvergadering van de Ned. Ver. v. Tandartsen

evenwichtsverstoringen" die zich voortplanten met een snelheid van  $3 \times 10^8$  m/sec. Kwantitatief zijn er echter grote verschillen. De golflengten van licht liggen tussen 4000 Å voor violet en 8000 Å voor rood terwijl de golflengten van röntgenstralen bij de meeste geneeskundige toepassingen liggen tussen 0.1 Å bij 200 kV en 1 Å bij 20 kV. 1 Å is daarbij een lengte-eenheid ter grootte van  $10^{-10}$  m. Het grote verschil in golflengte brengt mee dat röntgenstralen niet noemenswaard worden teruggekaatst of gebroken en dat men in de geneeskundige praktijk deze verschijnselen geheel kan verwaarlozen.

Een ander belangrijk verschil is dat de meeste media veel beter doorlaatbaar zijn voor röntgenstralen dan voor licht. Hierbij valt op te merken dat de doorlaatbaarheid van een medium voor röntgenstralen enkel afhangt van de soorten atomen die het bevat en niet van de wijze waarop deze tot moleculen zijn verenigd. De doorlaatbaarheid is groter naarmate de atomen een lager rangnummer hebben en dit alles brengt mee dat de weke delen van het menselijk lichaam die behalve  ${}_1\text{H}$  en  ${}_8\text{O}$  voornamelijk  ${}_6\text{C}$  en  ${}_7\text{N}$  bevatten alle ongeveer even doorlaatbaar zijn als water. Dat het skelet veel minder doorlaatbaar is dankt het aan het daarin voorkomen van de elementen  ${}_{20}\text{Ca}$  en  ${}_{15}\text{P}$  die een veel hoger rangnummer hebben.

Men kan de doorlaatbaarheid van de weke delen voor röntgenstralen dus ongeveer gelijk stellen aan die van water, en de doorlaatbaarheid van water is daarom voor de praktijk een belangrijk gegeven. Zij is niet zo groot als men misschien zou verwachten. Zeker niet voor straling met een golflengte van ongeveer 1 Å. Van die straling wordt door een waterlaag van 1 cm slechts ongeveer 5% doorgelaten. Straling met een golflengte van 0.1 Å wordt door zulk een waterlaag voor 85% doorgelaten, maar dat betekent toch nog altijd dat een 10 cm dikke waterlaag slechts 20% doorlaat en een 20 cm dikke niet meer dan 4%. De vraag is nu wat er gebeurt met de energie die in het medium aan de doorvallende bundel wordt onttrokken.

Een gedeelte ervan wordt in de vorm van röntgenstralen met een iets kleinere golflengte in alle richtingen verstrooid, terwijl de rest door het medium wordt opgenomen en uiteindelijk voor het grootste deel overgaat in de meest triviale energievorm die we kennen: warmte. Warmteontwikkeling in het medium betekent dat de gemiddelde kinetische energie van de moleculen toeneemt en de temperatuur omhooggaat, maar de effecten die voor de biologie van belang zijn zijn van geheel andere aard.

Dat röntgenstralen nog andere effecten teweeg kunnen brengen dan enkel temperatuursverhoging is aan een ieder bekend. We hoeven maar te denken aan het groen oplichten van het Ba-Pt-cyanuur van een doorlichtingsscherm of aan de inwerking op fotografisch materiaal.

Een ander sinds lang bekend verschijnsel is het geleidend worden van lucht waarin zich röntgenstralen voortplanten. Een temidden van lucht geïsoleerd opgestelde electrisch geladen bol verliest zijn lading wanneer door die lucht röntgenstralen passeren. De lucht wordt dus geleidend en de verklaring van dit verschijnsel heeft men daarin gevonden dat uit neutrale luchtmoleculen negatieve electronen worden losgemaakt waardoor ze als positieve ionen achterblijven. Een positief geladen bol wordt dan geneutraliseerd door het toevloeien van negatieve electronen en een negatief geladen bol door het toevloeien van positieve ionen.

De ionisatie van lucht door röntgenstralen heeft een bijzonder belang doordat ze al tientallen jaren de basis is van de dosimetrie van deze stralen. De meest gebruikte dosiseenheid is nog altijd de roentgen („r”) en deze is principieel aan de ionisatie van lucht gekoppeld. Om tot de definitie van deze eenheid te komen gaan we allereerst na wat men bij de meting van een röntgendosis eigenlijk tracht te bepalen. We stellen ons daartoe voor een klein gebied  $g$  dat gedurende een zekere tijd  $t$  door röntgenstralen wordt doorlopen. In en om dit gebied kan zich lucht bevinden of bot of weke-delen-weefsel of water, maar de dosis in  $g$  wordt in al die gevallen bepaald door de ionisatie waartoe de betreffende straling aanleiding zou hebben gegeven wanneer in en om  $g$  alleen lucht aanwezig was geweest. Het gaat daarbij om de straling binnen  $g$ , maar deze leidt zowel binnen als buiten  $g$  tot de vorming van ionen. De bedoelde straling maakt nl. alleen binnen  $g$  electronen los, maar deze electronen krijgen daarbij een grote snelheid, waardoor ze zowel in als buiten  $g$  nieuwe electronen losmaken; deze maken op hun beurt nieuwe electronen los, en dit proces zet zich voort tot alle beschikbare energie is verbruikt.

Waar het nu om gaat bij de bepaling van de stralendosis waarmee  $g$  in de loop van de tijd  $t$  wordt belast is de totale lading van alle positieve ionen die ontstaan doordat op de aangegeven wijze in en om  $g$  electronen worden losgemaakt; wanneer men het aantal e.s.e. van deze lading deelt door het aantal ml lucht in  $g$  vindt men de grootte van de bedoelde dosis in r-eenheden.

We zullen hier niet nagaan hoe men de totale ionenlading waarvan boven sprake was kan meten. Waar het ons vooral om gaat is dat de

grootte van een stralendosis volgens de gegeven definitie aangeeft in welke mate de betreffende straling in staat is lucht te ioniseren. Er is echter gebleken dat zij ook een bruikbare maat is voor de biologische effecten die kunnen optreden wanneer levende objecten aan straling worden blootgesteld. Dit wekt het vermoeden dat de biologische effecten aan ionisatie in het milieu te danken zijn. Dit milieu bestaat wel niet uit lucht maar het bevat toch in hoofdzaak atomen met een laag rangnummer, en de ionisatie stemt daardoor althans in de weke delen in grote trekken met die van lucht overeen.

De biologische effecten waarom het hier gaat zijn ten dele al lang bekend. Vooral de effecten op de huid. Op korte termijn kan men hier roodheid zien optreden, haaruitval, vorming van vochtblaasjes onder de opperhuid en uiteindelijk loslating van die opperhuid, alles dikwijls gevolgd door volledig herstel. Op lange termijn kan blijvende atrofie optreden met hyperkeratosen en kloven en verlies van haren en er kunnen in de zo veranderde huid zelfs carcinomen ontstaan. Er is ook al vrij lang bekend dat röntgenstralen tot veranderingen in inwendige organen kunnen leiden, vooral in de bloedvormende bestanddelen van het beenmerg en in de voortplantingsorganen. Dat blootstelling van deze voortplantingsorganen aan röntgenstralen ook oorzaak kan zijn van het optreden van erfelijke afwijkingen bij het nageslacht dringt echter pas in de laatste jaren algemeen door.

We willen ons thans nog enige ogenblikken bezighouden met de vraag hoe de verschillende stralingseffecten uit ionisatie kunnen voortkomen. Men heeft wel eens gedacht dat de van elkaar losgemaakte positieve en negatieve bestanddelen zich eenvoudig weer zouden verenigen, dat de door de straling afgestane ionisatie-energie daarbij in warmte zou overgaan, en dat de bedoelde effecten het directe gevolg zouden zijn van deze warmte-ontwikkeling. Deze opvatting vond enige steun in het feit dat verschillende stralenreacties van de huid oppervlakkig beschouwd een zekere overeenkomst vertonen met verbrandingen; men hoort daardoor dikwijls van röntgenverbrandingen spreken. Men kan echter met een paar eenvoudige berekeningen laten zien dat de geschetste opvatting onjuist moet zijn. Om van deze berekeningen een indruk te krijgen denken we ons allereerst een hoeveelheid lucht die aan röntgenstralen wordt blootgesteld en we beschouwen daarin een volume van 1 ml. We stellen ons daarbij voor dat in dit volume een dosis van 1 roentgen wordt geapliceerd. De positieve ionen die als gevolg van deze applicatie worden gevormd dragen dan tezamen een lading van 1 e.s.e. Elk van deze ionen heeft een lading van  $4.8 \times 10^{-10}$  e.s.e. en hun aantal bedraagt dus

$$\frac{1}{4.8 \times 10^{-10}} = 2.08 \times 10^9.$$

Om nu in lucht uit een neutraal molecuul een positief ion te doen ontstaan is gemiddeld een energie nodig van 32.5 electronvolt, d.w.z. van

$$32.5 \times 1.60 \times 10^{-12} \text{ ergs} = 5.2 \times 10^{-11} \text{ ergs.}$$

Er moet dus door de straling van de beschouwde ml lucht een energiehoeveelheid van

$$2.08 \times 10^9 \times 5.2 \times 10^{-11} \text{ ergs} = 0.108 \text{ ergs}$$

zijn overgedragen en aangezien een ml lucht 0.00129 gram weegt betekent dit per gram een energiehoeveelheid van

$$\frac{0.108}{0.00129} \text{ ergs} = 84 \text{ ergs.}$$

Deze overdracht van energie is in de laatste jaren een grootheid van belang geworden. Men heeft daarop zelfs een nieuwe dosiseenheid gebaseerd die de roentgen zou moeten vervangen. Deze eenheid, de rad, vertegenwoordigt bij definitie een energieoverdracht van 100 ergs per gram doorstraalde stof en zij is in lucht dus slechts weinig groter dan de overdracht van 84 ergs per gram die optreedt bij belasting met 1 roentgen.

In water en in de weke delen van het lichaam verschilt de energieoverdracht bij belasting met 1 roentgen nog minder van de rad; zij bedraagt daar 93 erg per gram, en men kan daaruit gemakkelijk de corresponderende temperatuursstijging afleiden. Daar 1 erg =  $2.39 \times 10^{-8}$  calorie is

$$93 \text{ erg} = 2.23 \times 10^{-6} \text{ calorie}$$

en 10000 roentgen zouden dus een warmte toevoeren van 0.0223 calorieën per gram en derhalve leiden tot een temperatuursstijging van ongeveer 0.02°, een stijging die voor een levend wezen nauwelijks betekenis heeft. Belasting met een stralendosis van 10000 r daarentegen heeft desastreuze gevolgen, ook dan wanneer ze tot een klein gedeelte van het lichaam beperkt blijft. Het biologisch effect van röntgenstralen kan dus niet worden verklaard door de onderstelling dat de door het object opgenomen ionisatie-energie eenvoudig in warmte zou overgaan; er moeten bij de verwerking van deze energie ook andere mechanismen in het spel zijn en deze moeten zelfs een hoofdrol spelen. We willen op dit punt wat nader ingaan. We hebben gezien dat röntgenstralen in staat zijn neutrale luchtmoleculen te splitsen in positieve ionen en negatieve electronen. Het ligt voor de hand dat deze bestanddelen na hun ontstaan zullen neigen tot recombinatie. Wanneer echter alleen recombinatie optrad zou dit een volledig herstel betekenen van de oorspronkelijke chemische bindingen en de enige wijziging van de toestand zou inderdaad de boven besproken lichte tempera-

tuursverhoging zijn. Men kan zich echter ook een ingewikkelder gang van zaken denken. In de eerste plaats is het mogelijk dat een vrij electron zich met een neutraal O<sub>2</sub> of N<sub>2</sub> molecuul verenigt tot een negatief ion, en daarna zou dan vereniging kunnen plaats hebben van een O<sub>2</sub><sup>+</sup> met een N<sub>2</sub><sup>-</sup> ion of van een N<sub>2</sub><sup>+</sup> met een O<sub>2</sub><sup>-</sup> ion. Men zou zich zelfs kunnen voorstellen dat op die wijze chemische bindingen tot stand komen.

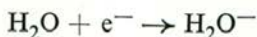
Het is ook denkbaar dat een gevormd O<sub>2</sub> of N<sub>2</sub> ion niet stabiel is en uiteenvalt in bouwstenen als O<sup>+</sup>, O, O<sup>-</sup>, N<sup>+</sup>, N, N<sup>-</sup>, welke bouwstenen zich dan wel weer op een of andere manier met elkaar zouden verenigen, al of niet onder de vorming van chemische verbindingen.

Of deze mogelijkheden zich in lucht inderdaad voordoen willen we hier in het midden laten. Ook wanneer dit het geval was zouden ze van biologisch standpunt nauwelijks belang hebben. Men neemt echter algemeen aan dat processen van de beschreven soort zich wel voordoen in water en dat ze daar de grondslag vormen van de stralenreacties die in de weke delen van het menselijk lichaam kunnen optreden.

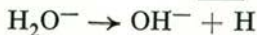
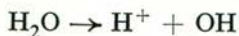
Een neutraal watermolecuul kan tengevolge van straling uiteenvallen volgens de formule



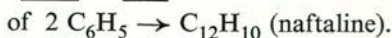
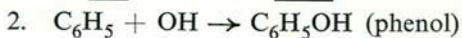
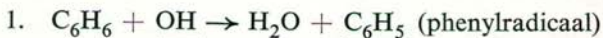
en een vrijkomend electron kan zich volgens de formule



met een neutraal waterstofmolecuul verenigen tot een negatief ion. De ionen H<sub>2</sub>O<sup>+</sup> en H<sub>2</sub>O<sup>-</sup> zijn nu weinig bestendig en splitsen zich gemakkelijk volgens de schema's



waarbij de neutrale producten OH en H normaliter niet in water voorkomen en „vrije radicalen” worden genoemd. Men stelt zich nu voor dat deze vrije radicalen een zeer korte levensduur hebben doordat ze met allerlei stoffen uiterst gemakkelijk reageren. Als voorbeeld van zulk een stof noemen we het benzol, waarmee de volgende reacties plaats kunnen hebben:



Men kan zich gemakkelijk voorstellen dat door reacties van deze soort allerlei enzymwerkingen gestoord kunnen worden, en het is duidelijk dat

dit verregaande consequenties kan hebben. Er zijn over dit alles slechts weinig precieze gegevens bekend en we willen daar niet verder op ingaan. Waar ik de aandacht op heb willen vestigen is dat men pas na de ontdekking van de „vrije radicalen” is gaan begrijpen hoe het mogelijk is dat ioniserende straling kan leiden tot uiterst krachtige biologische reacties. We merkten al op dat deze reacties niet alleen weefselbeschadigingen tengevolge kunnen hebben die zich manifesteren bij het getroffen individu, maar dat ze bij inwerking op de gonaden ook oorzaak kunnen worden van erfelijke veranderingen die pas bij het nageslacht te voorschijn komen. De eerstgenoemde beschadigingen weet men tegenwoordig in het algemeen wel te voorkómen; de erfelijke veranderingen hebben echter enige bijzondere trekken die een afdoende bescherming enerzijds moeilijk, maar anderzijds zeer dringend maken.