

# Výroba radioisotopů a jejich použití

V. PETRŽILKA.

Účelem tohoto článku jest referovati o použití cyklotronu a atomových reaktorů k výrobě velké řady radioisotopů, jejichž tabulka jest připojena. Tyto umělé radioaktivní látky docházejí významného použití v mnoha oborech na př. v měrné technice, v strojnictví, v geologii, v chemii anorganické i organické, v biochemii, v biologii, v botanice, v zemědělství a v lékařství.

Poněvadž v tomto stručném referátu je možno podati pouze výčet hlavních dat týkajících se praktického zužitkování atomové energie, jsou na konci článku uvedeny jednak souborné publikace [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7], jednak články v odborných časopisech, v nichž lze najíti jak širšího tak hlubšího poučení o otázkách týkajících se praktického použití radioisotopů.

## 1. Atomová energie.

Chceme-li mluvit o atomové energii, jeví se účelným připomenouti několik pojmů z atomové fyziky [1] [4] [5] a zavésti příslušnou terminologii.

Každý prvek v Mendělejevově soustavě má své pořadové číslo a svou hmotu, které říkáme atomová hmotu. Atomy každého prvku pozůstávají z kladně nabitého jádra a z negativně nabitých elektronů tvořících obal jádra. Ježto celkové množství kladného i záporného náboje v atomu je stejné, jeví se atom ve svém základním stavu neelektrickým.

Jádra atomů jednotlivých prvků nejsou jednoduchá. Jsou složena z protonů a neutronů.

Nejjednodušší atom má jako jádro proton, kolem něhož krouží jediný elektron. Nazýváme jej lehkým vodíkem. Elektron má klidovou hmotu  $m_e = 9,01 \cdot 10^{-28}$  g, a záporný elektrický náboj  $e = 4,803 \cdot 10^{-10}$  elektrostat. jedn. Proton má klidovou hmotu  $m_p = 1840 m_e$  a nese kladný elektrický náboj téže velikosti jako elektron. Hodnota tohoto náboje je nejmenší dosud pozorovanou hodnotou a nazývá se proto elementárním elektrickým nábojem. Neutron je částice neutrální bez elektrického náboje mající klidovou hmotu zhruba rovnou hmotě protonu, čili  $m_n \doteq m_p$ .

Atomy prvků v Mendělejevově soustavě jsou pak vytvořeny tak, že atomy určitého prvku mají vždy týž počet protonů. Mají tedy týž počet kladných elementárních nábojů a tudíž také negativních elektronů. Ten to počet je shodný s pořadovým číslem  $Z$  v Mendělejevově tabulce. Uvádí se jako index na levé dolní straně chemické značky prvku.

Tentýž prvek však může mít atomy, které sice obsahují stejný počet protonů, ale různý počet neutronů ve svém jádře. Mají tedy různou atomovou hmotu. Nazýváme je isotopy příslušného prvku. Úhrnný počet částic v jádře čili součet protonů a neutronů nazýváme hmotovým číslem  $A$  isotopu. Udává se u chemické značky prvku na levo nebo na pravo nahoře. Můžeme tedy psát lehký vodík symbolem  ${}^1_1\text{H}$  neboť má v jádře jeden kladný náboj, tudíž  $Z = 1$ , a má v jádře pouze jednu částici, tudíž  $A = 1$ . Stojí na prvním místě ( $Z = 1$ ) v Mendělejevově tabulce.

Vedle toho má ovšem isotop, který má v jádře vedle protonu ještě neutron. Nazývá se těžkým vodíkem, který má  $Z = 1$ ,  $A = 2$ . Píšeme tedy jeho symbolické označení ve tvaru  ${}^2_1\text{H}$  nebo  ${}^2_1\text{D}$  vzhledem k tomu, že pro těžký vodík bylo zavedeno také označení deuterium a symbol  $\text{D}$ . Tak postupujeme u všech prvků.

Isotopy téhož prvku, i když existují nebo se dají uměle připravit, nemusí být stabilní. Mohou být radioaktivní, t. j. rozpadati se buď za vysílání paprsků  $\alpha$ , čili jader heliových, nebo za vysílání paprsků  $\beta$ , čili kladných nebo záporných elektronů. Tento rozpad bývá někdy doprovázen vysláním záření  $\gamma$ , což jest elektromagnetické vlnění, kratší vlnové délky než paprsky  $X$ . Poločasem radioaktivního isotopu nazýváme onu dobu, za kterou se rozpadne polovina jeho atomů. Tak např. i vodík má ještě třetí isotop obsahující v jádře dva neutrony. Má tedy hmotové číslo 3 a nazývá se triterium. Užívá se pro něj symbol  ${}^3_1\text{T}$ . Je radioaktivní a má poločas zhruba 12 roků.

Podobně je tomu u ostatních prvků. Tak např. u uhlíku je dnes známo pět isotopů:  ${}^{10}_6\text{C}^*$ ,  ${}^{11}_6\text{C}^*$ ,  ${}^{12}_6\text{C}$ ,  ${}^{13}_6\text{C}$  a  ${}^{14}_6\text{C}^*$ . Z nich jsou isotopy s hmotovým číslem 10, 11 a 14 radioaktivní. Označují se obvykle hvězdičkou na pravé horní straně chemického symbolu.

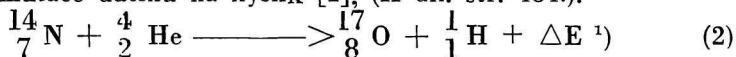
Jadernými čili nukleárními reakcemi nazýváme takové pochody v atomových jádrech jednotlivých prvků, při nichž se jeden prvek mění v druhý na př. tím způsobem, že některá z elementárních částic vnikne do jádra transmutovaného prvku. Každá taková reakce je doprovázena buď ziskem nebo úbytkem hmoty  $\Delta m$  a vyznačuje se tím, že se při ní buď získaná hmota mění v energii nebo obráceně úbytek hmoty nahrazuje energií dodanou do reakce podle známého zákona o ekvivalenci mezi hmotou a energií, který vyslovil poprvé Einstein v roce 1905 ve tvaru [1], (II. díl. str. 334):

$$\Delta m c^2 = \Delta E$$

kde  $c$  jest rychlost světla,  $\Delta E$  energie uvolněná nebo dodaná při jaderné reakci. Říká se jí proto nukleární nebo atomová energie. Podobně jako v chemii rozeznáváme i v nukleární fyzice reakce endotermické, je-li třeba energii k uskutečnění reakce dodat, a reakce exotermické, jestliže se při nich atomová energie získává.

Dají se prováděti buď v urychlovačích používajících vysokého napětí, nebo v cyklotronech nebo v atomových reaktorech.

Pro praktické využití atomové energie je však podstatná ještě další skutečnost, totiž výtěžek atomové reakce čili počet přeměněných atomů, připadajících na určitý počet bombardujících (transmutujících) částic. Tomuto výtěžku je úměrný výtěžek atomové energie, který je roven součtu energií uvolněných v jednotlivých transmutacích. Ve většině nukleárních reakcí, prováděných protony, deutrony, neutrony nebo částicemi  $\alpha$  je výtěžek velmi malý. Na deset tisíc nebo dokonce sto tisíc vystřelených částic připadá jedna transmutace atomového jádra ostřelovaného prvku. Z toho je zřejmo, že by se uvedenými transmutacemi, při nichž se z daného prvku vytvoří jádro nejbližše vyšší nebo nižší, nedosáhlo uvolňování atomové energie ve větším měřítku. A tak od první transmutace dusíku na kyslík [1], (II díl. str. 484.).



provedené Rutherfordem v r. 1919, bylo za prvních dvacet let nukleární fyziky prostudováno velké množství nukleárních reakcí, kterými můžeme připravovati umělé radioaktivní prvky. Byla to však teprve reakce nazývaná dnes štěpením atomového jádra, která použitím prvků, jež jsou schopny tvořiti současně řetězovou reakci, vedla ke konstrukci atomových reaktorů, v nichž se dají dnes vyráběti radioaktivní isotopy ve větším měřítku.

## 2. Výroba umělých radioisotopů v atomovém reaktoru po případě v cyklotronu.

U každého prvku je možno z jeho isotopů připravit methodami pro umělou přeměnu prvků [1] [4] [5] buď stabilní nebo radioaktivní isotopy. Uměle připravené radioaktivní isotopy se nazývají proto umělými radioisotopy na rozdíl od přirozených radioisotopů tvořících řadu uranovou, thoriovou a aktiniovou.

Prvky, které mají několik isotopů, jsou směsí atomů o různých atomových hmotách v určitém procentuálním poměru. Z toho důvodu do staneme u takových prvků při umělých přeměnách prvků popřípadě směs několika radioisotopů s různými poločasy.<sup>2)</sup> V dnešní době je však již možno použití při některých jaderných reakcích oddělených isotopů výchozího prvku, neboť byla vypracována řada method, kterými je možno získati tyto isotopy ve velmi koncentrovaném nebo dokonce úplně čistém stavu. V praxi se používá pro separaci isotopů hlavně metody elektromagnetické a metody kaskádní difuze.

Přípravu radioaktivních isotopů je možno prováděti ostřelováním buď neutrony  $n = {}^1_0n$  nebo deuterony  $d = {}^2_1\text{H} = {}^2_1\text{D}$ . Chceme-li po-

<sup>1)</sup> Tato reakce je náhodou reakcí endothermickou; k jejímu uskutečnění je třeba dodatí energie.

<sup>2)</sup> Poločasem radioaktivního isotopu nazýváme onu dobu, za kterou se rozpadne polovinu jeho atomů.

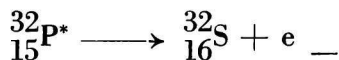
užití neutronů, je nejvýhodnější vyráběti radioisotopy v uranovém reaktoru, v němž je možno dosáhnouti z používaných zařízení největší intenzity neutronů a tudíž největšího výtěžku u vyráběného radioisotopu. V uranovém reaktoru můžeme připravit téměř všechny umělé radioisotopy. Existují však přece některé, na př. dlouhodobé isotopy jodu, které se nedají připravit ostřelováním neutrony, nýbrž pouze v reakcích s deuterony. Při přípravě některých radioisotopů, jako na př. radioisotopů zinku se dosáhne lepších výtěžků při používání deuteronů než neutronů. Konečně nemáme-li k dispozici intenzivní zdroj neutronů, můžeme použítí k výrobě radioisotopů deuteronů, kterými bombardujeme výchozí prvek. Ze stávajících zařízení pro umělou přeměnu prvků se k tomuto účelu nejlépe hodí cyklotron, v němž je možno získati největších intenzit a tudíž i nejlepších výtěžků. V obou případech, jak v uranovém reaktoru tak v cyklotronu, závisí výtěžek připravovaného radioisotopu od intenzity a energie neutronů resp. deuteronů. Podrobné probrání těchto otázek přesahuje rámec tohoto pojednání.

Použijeme-li k přípravě umělých radioaktivních látek neutronů, na př. v uranovém reaktoru, děje sa tak v zásadě třemi druhy reakcí.

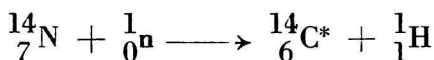
Nejobvyklejší z nich je reakce, při které je neutron  ${}^1_0n$  pohlcen v jádře, při čemž se vytvoří umělý radioisotop o atomové hmotě zhruba o jedničku vyšší než je výchozí isotop a atomová energie se uvolní ve formě záření  $\gamma$ . Tento nukleární pochod se označuje reakcí  $n, \gamma$ ). Dá se jím připravit na př. známý radioisotop fosforu  ${}^{32}_{15}P$ , jestliže vzorky stabilního isotopu fosforu  ${}^{31}_{15}P$  ve formě některé z jeho vhodných sloučenin (na př.  $Na_2HPO_4$ ) vložíme do uranového reaktoru. Reakce probíhá podle vztahu



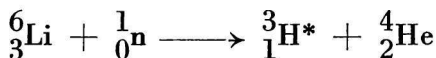
Radiofosfor  ${}^{32}_{15}P^*$  se rozpadá s poločasem 14,3 dne za vysílání záporných elektronů (negatronů)  $e^-$ , při čemž se mění na stabilní isotop síry  ${}^{32}_{16}S$  podle schematu



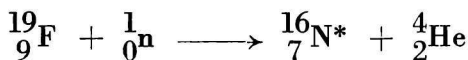
Další dvě reakce, kterými je možno získati radioisotopy, jsou reakce, při nichž z atomů ostřelovaného prvku je uvolněn proton  $p$  nebo částice  $\alpha$  a tím vytvořen nový radioisotop. Jsou to reakce označované  $(n, p)$  a  $(n, \alpha)$ . Použitím těchto reakcí můžeme připravit na př. podle rovnice



známý radioisotop uhlíku  ${}^{14}_6\text{C}^*$ , který se rozpadá za vysílání negativních elektronů na stabilní isotop dusíku  ${}^{14}_7\text{N}$ . Poločas tohoto rozpadu jest řádově 5.100 let. Podle reakce



je možno připravit radioaktivní isotop vodíku o hmotovém čísle 3, nebo podle reakce



je možno získati radiodusík o hmotovém čísle 16. Radiovodík o hmotovém čísle 3 zvaný též triterium nebo tritium má poločas 12 roků zatím co radiodusík  ${}^{16}_7\text{N}^*$  pouze 8,4 sek.

Vzhledem k tomu, že neutron nemá náboje, není odpuzován od jader atomů, které jsou ostřelovány. Pravděpodobnost, že neutron vnikne do jádra atomu, je zhruba nepřímě úměrná rychlosti, s kterou se neutron pohybuje. Neboť čím pomaleji se neutron pohybuje, tím déle prodlévá v okolí jader ostřelovaných atomů a tím větší je pravděpodobnost, že bude pohlcen. To platí zvláště pro reakci  $(n, \gamma)$ . Reakce  $(n, p)$  a  $(n, \alpha)$  poskytují větší výtěžek při vyšších energiích neutronů. Jinými slovy reakce  $(n, \gamma)$  potřebuje pomalé neutrony, reakce  $(n, p)$  a  $(n, \alpha)$  rychlé neutrony. Uranový reaktor dává možnost používati k výrobě radioisotopů obou druhů neutronů, neboť rychlé neutrony vznikají při štěpení a jsou kolisemi s atomy moderátoru zpomalovány na termické neutrony, aby mohlo dojíti k dalšímu štěpení uranu. Vzorcky se vkládají do reaktoru v nádobkách z měkkého skla. Nesmí se používati skla, jež by obsahovalo bór nebo kadmium, které pohlcují samy silně neutrony.

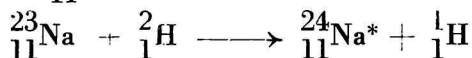
Je třeba ještě poznamenati, že výtěžek připravovaného radioisotopu se podstatně zvýší, jestliže při určitých energiích neutronů nastává mimořádně zvýšené pohlcování neutronů jádru atomů ostřelovaného prvku, čili t. zv. rezonanční absorpce.

Nemáme-li k dispozici uranový reaktor nebo nemůžeme-li ze zásadních důvodů použiti k výrobě radioisotopu neutronů, pak musíme aplikovati reakce s deuterony. Jsou to buď reakce, při nichž je uvolněn proton čili reakce  $(d, p)$ , nebo neutron, čili reakce  $(d, n)$ , nebo částice  $\alpha$ , čili reakce  $(d, \alpha)$ . Ve zvláštních případech by bylo možno použiti i reakcí, v nichž se uvolňují dva neutrony, čili reakce  $(d, 2n)$ , nebo reakcí při nichž vzniká triterium čili reakce  $(d, {}^3_1\text{H})$ .

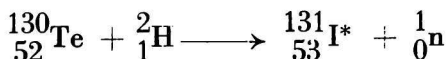
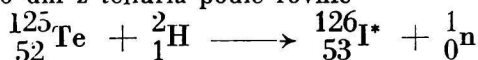
Terčik s ostřelovanou látkou se vsune buď do tanku cyklotronu [1], [2], [4], [5], třeba přímo mezi desky D (vnitřní terčik) nebo za okénko, kterým mohou deuterony vystupovati z tanku cyklotronu (vnější terčik). K přípravě radioisotopů v množství, jehož aktivita je řádově několik milicurie, stačí urychlovati deuterony v cyklotronu na energie 10

MeV. Cyklotrony, které slouží zejména k výrobě radioisotopů, byly konstruovány řádově pro tuto energii deuteronů.

Jako příklad běžně užívané reakce (d, p), a (d, n) je možno uvést výrobu radiosodíku  ${}_{11}^{24}\text{Na}^*$  cyklotronem podle reakce



a výrobu radioisotopu jodu  ${}_{53}^{131}\text{I}^*$  s poločasem 8,0 dní a radiojodidu  ${}_{53}^{126}\text{I}^*$  s poločasem 13,0 dní z telluria podle rovnic



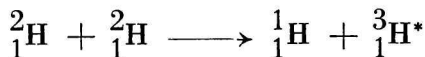
Reakce (d,  $\alpha$ ) přichází v úvahu vlastně jenom pro dlouhodobý radiosodík  ${}_{11}^{22}\text{Na}^*$  poločas 3,0 roky, který je možno připravit z magnesia ostřelováním deuterony podle vztahu



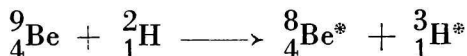
Vzhledem k tomu, že povaha reakce (d, 2n) je endothermická, dá se jí užití pouze při vyšších energiích deuteronů. Hodí se na př. k přípravě radiojodu  ${}_{53}^{126}\text{I}^*$  z isotopu telluria s hmotovým číslem 126 podle rovnice



Použití reakce (d,  ${}_1^3\text{H}$ ) má smysl pouze v několika zvláštních případech jako na př.



nebo



V dalším je uvedena tabulka důležitých radioisotopů používaných v praxi a vyráběných buď v reaktorech nebo v cyklotronech. Při svém rozpadu vysílají umělé radioisotopy uvedené v tabulce buď pozitrony (kladné elektrony) nebo negatrony (záporné elektrony), popřípadě záření  $\gamma$ . Energie vysílaných elektronů je uvedena v pátém sloupci, energie záření  $\gamma$  v šestém sloupci tabulky. Při tom je častým zjevem, že elektrony resp. záření  $\gamma$  je vysíláno z různých energetických hladin atomového jádra. Je proto v některých případech uváděno několik maximálních hodnot energií elektronů a několik hodnot energií záření  $\gamma$ . V posledním sloupci jsou uvedeny reakce, podle nichž mohou býti radioisotopy vyrobeny.

Radioisotop	Označení	Poločas	Rozpad	Maximální energie elektronů MeV	Energie záření $\gamma$ MeV	Nukleární reakce
Tritérium	$^3\text{H} \equiv ^3\text{T}$	12r	e <sup>-</sup>	0,013		$^9\text{Be}$ (d, $2\alpha$ ) $^6\text{Li}$ (n, $\alpha$ ) $^2\text{H}$ (n, $\gamma$ )
Uhlík	$^{11}\text{C}$	20,4m	e <sup>+</sup>	0,981		$^{10}\text{B}$ (p, $\gamma$ ) $^{10}\text{B}$ (d, n) $^{12}\text{C}$ (n, $2n$ )
	$^{14}\text{C}$	5.100r	e <sup>-</sup>	0,145		$^{13}\text{C}$ (d, p) $^{14}\text{N}$ (n, p)
Dusík	$^{13}\text{N}$	9,9m	e <sup>+</sup>	0,92; 1,20	0,285	$^{12}\text{C}$ (p, $\gamma$ ) $^{12}\text{C}$ (d, n)
Fluor	$^{18}\text{F}$	107m	e <sup>+</sup>	0,7		$^{17}\text{O}$ (d, n) $^{18}\text{O}$ (d, $2n$ ) $^{20}\text{Ne}$ (d, $\alpha$ )
Sodík	$^{22}\text{Na}$	3,0r	e <sup>+</sup>	0,58	1,3	$^{24}\text{Mg}$ (d, $\alpha$ ) $^{24}\text{Mg}$ (n, $^3\text{H}$ )?
	$^{24}\text{Na}$	14,8h	e <sup>-</sup>	1,37	0,8; 1,5; 2,0; 3,0;	$^{23}\text{Na}$ (d, p) $^{23}\text{Na}$ (n, $\gamma$ )
Fosfor	$^{32}\text{P}$	14,3d	e <sup>-</sup>	1,72		$^{31}\text{P}$ (d, p) $^{34}\text{S}$ (d, $\alpha$ ) $^{31}\text{P}$ (n, $\gamma$ ) $^{32}\text{S}$ (n, p) $^{35}\text{Cl}$ (n, $\alpha$ )
Síra	$^{35}\text{S}$	87,1d	e <sup>-</sup>			$^{34}\text{S}$ (d, p) $^{34}\text{S}$ (n, $\gamma$ ) $^{37}\text{Cl}$ (d, $\alpha$ ) $^{35}\text{Cl}$ (n, p)
Chlor	$^{34}\text{Cl}$	32,0m	e <sup>+</sup>	2,5		$^{31}\text{P}$ ( $\alpha$ , n) <sup>*</sup> $^{33}\text{S}$ (d, n)
	$^{38}\text{Cl}$	37,5m	e <sup>-</sup>	1,1; 4,99	1,65; 2,15	$^{37}\text{Cl}$ (d, p) $^{37}\text{Cl}$ (n, $\gamma$ )

Radioisotop	Označení	Poločas	Rozpad	Maximální energie elektronů MeV	Energie záření $\gamma$ MeV	Nukleární reakce
Draslík	$^{42}\text{K}$	12,4h	e <sup>-</sup>	3,5		$^{41}\text{K}$ (d, p) $^{41}\text{K}$ (n, $\gamma$ ) $^{45}\text{Sc}$ (n, $\alpha$ ) $^{42}\text{Ca}$ (n, p)
Vápník	$^{41}\text{Ca}$	180d	e <sup>-</sup>	0,19; 0,91	0,71	$^{44}\text{Ca}$ (d, p) $^{44}\text{Ca}$ (n, $\gamma$ ) $^{45}\text{Sc}$ (n, p)
Mangan	$^{52}\text{Mn}$	6,5d	K; e <sup>+</sup>	e 0,77	1,0	$^{52}\text{Cr}$ (d, 2n) $^{54}\text{Fe}$ (d, $\alpha$ )
	$^{54}\text{Mn}$	310d	K		0,85	$^{56}\text{Fe}$ (d, $\alpha$ ) $^{54}\text{Fe}$ (n, p)
Zezezo	$^{55}\text{Fe}$	4,0r	K; e <sup>+</sup>			$^{55}\text{Mn}$ (d, 2n) $^{54}\text{Fe}$ (n, $\gamma$ )
	$^{59}\text{Fe}$	47d	e <sup>-</sup>	0,4; 0,9	1,0	$^{58}\text{Fe}$ (d, p) $^{59}\text{Co}$ (n, p)
Kobalt	$^{55}\text{Co}$	18,0h	e <sup>+</sup>	1,50	0,16; 0,21 0,80; 1,2	$^{54}\text{Fe}$ (d, n)
	$^{56}\text{Co}$	80,0d	e <sup>+</sup>	1,20	1,7	$^{56}\text{Fe}$ (d, 2n) $^{58}\text{Ni}$ (d, $\alpha$ )
	$^{57}\text{Co}$	270,0d	e <sup>+</sup>	0,26		$^{56}\text{Fe}$ (d, n)
	$^{58}\text{Co}$	72,0d	e <sup>+</sup>	0,47	0,810	$^{57}\text{Fe}$ (d, n) $^{58}\text{Ni}$ (n, p)
	$^{60}\text{Co}$	10,7m 5,3r	e <sup>-</sup> e <sup>-</sup>	1,25 0,31	1,5 1,10; 1,30	$^{59}\text{Co}$ (n, $\gamma$ ) $^{59}\text{Co}$ (d, p) $^{60}\text{Ni}$ (n, p) $^{62}\text{Ni}$ (d, $\alpha$ )
Měď	$^{61}\text{Cu}$	3,4h	e <sup>+</sup>	1,22		$^{61}\text{Ni}$ (p, n) $^{60}\text{Ni}$ (d, n) $^{61}\text{Ni}$ (d, 2n)
	$^{64}\text{Cu}$	12,8h	e <sup>-</sup> ; K; e <sup>+</sup>	e <sup>-</sup> 0,574 e <sup>+</sup> 0,649		$^{64}\text{Ni}$ (p, n) $^{64}\text{Ni}$ (d, 2n) $^{63}\text{Cu}$ (n, $\gamma$ )



Radioisotop	Označení	Poločas	Rozpad	Maximální energie elektronů MeV	Energie záření $\gamma$ MeV	Nukleární reakce
Zinek	$^{65}\text{Zn}$	250d	K; e+	0,19; 0,37; 0,47	0,45; 0,65; 1,0	$^{64}\text{Zn}$ (d, p) $^{65}\text{Cu}$ (d, 2n) $^{64}\text{Zn}$ (n, $\gamma$ )
Arsen	$^{73}\text{As}$	50h	e+	0,6		$^{72}\text{Ge}$ (d, n) $^{73}\text{Ge}$ (d,, 2n)
	$^{74}\text{As}$	16d	-; e+	e- 0,9 e+ 1,3	0,582	$^{73}\text{Ge}$ (d, n) $^{74}\text{Ge}$ (d,, 2n) $^{76}\text{Se}$ (d, $\alpha$ )
	$^{76}\text{As}$	26,8h	e-; K; e+	Komplexní spektrum	0,83; 1,94	$^{75}\text{As}$ (n, $\gamma$ ) $^{75}\text{As}$ (d, p) $^{76}\text{Ge}$ (d, 2n) $^{76}\text{Se}$ (n, p) $^{78}\text{Se}$ (d, $\alpha$ )
Brom	$^{78}\text{Br}$	6,4m	e-	2,3	0,108; 0,46	$^{77}\text{Se}$ (d, n) $^{75}\text{As}$ ( $\alpha$ , n)
	$^{80}\text{Br}$	4,4h 18m	e-	2,0	0,037; 0,047 0,5	$^{79}\text{Br}$ (n, $\gamma$ ) $^{79}\text{Br}$ (d, p)
	$^{82}\text{Br}$	34h	e-	0,465	0,547; 0,787; 1,35	$^{80}\text{Se}$ (d, 2n) $^{81}\text{Br}$ (n, $\gamma$ ) $^{81}\text{Br}$ (d, p) $^{82}\text{Se}$ (d, 2n) $^{85}\text{Rb}$ (n, $\alpha$ ) $^{82}\text{Se}$ (d, n)
	$^{83}\text{Br}$	140m	e-	1,05		Produkt štěpení uranu neutrony.
Stroncium	$^{89}\text{Sr}$	55d	e-	1,50		$^{88}\text{Sr}$ (n, $\gamma$ ) $^{88}\text{Sr}$ (d, p)
Stříbro	$^{106}\text{Ag}$	8,2d	e-	1,2	0,69; 1,06	$^{105}\text{Pd}$ (d, n)
	$^{108}\text{Ag}$	225d	e-	1,3	0,650; 0,926;	$^{109}\text{Ag}$ (n, $\gamma$ )
	$^{110}\text{Ag}$	24,2s			1,51	
	$^{111}\text{Ag}$	7,5d	e-	0,8		

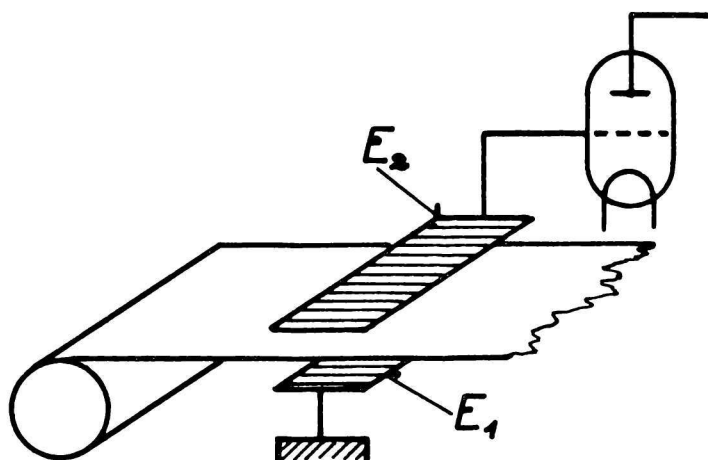
Radioisotop	Označení	Poločas	Rozpad	Maximální energie elektronů MeV	Energie záření MeV	Nukleární reakce
Jód	$^{126}\text{I}$	13,0d	e—	1,1	0,5	$^{125}\text{Te}$ (d, n)
	$^{128}\text{I}$	25,0m	2e—	1,05; 2,10	0,4	$^{126}\text{Te}$ (d, 2n)
	$^{130}\text{I}$	12,6h	e—	0,83		$^{127}\text{I}$ (n, $\gamma$ )
	$^{131}\text{I}$	8,0d	e—	0,595	0,080; 0,367	$^{128}\text{Te}$ (d, 2n)
						$^{130}\text{Te}$ (d, 2n)
						$^{139}\text{Cs}$ (n, $\alpha$ )
						$^{130}\text{Te}$ (d, n)
						Produkt štěpení uranu neutrony.
Zlato	$^{198}\text{Au}$	2,7d	e—	0,78	0,28; 0,44	$^{197}\text{Au}$ (n, $\gamma$ )
						$^{197}\text{Au}$ (d, p)
Rtuť	$^{197}\text{Hg}$	25h				
	$^{203}\text{Hg}$	64h				
	$^{205}\text{Hg}$	51,5d	e—	0,30	0,28	$^{204}\text{Hg}$ (n, $\gamma$ )

s = sekunda; m = minuta; d = den; r = rok.

### 3. Přehled použití radioisotopů.

Velký počet radioisotopů, které je možno buď v uranovém reaktoru nebo v cyklotronu vyrobiti, došel dnes tak rozsáhlého použití, že není snadné provést přehledné rozřídění jejich aplikací. Používá se jich k některým základním měrným operacím, k radiografii v nejrůznějších oborech, v strojnictví při studiu opotřebování ložisek, v praktické geologii k hledání nových ložisek na př. nafty, v chemii, biochemii a metalurgii k určování a stopování některých prvků, v lékařství, biologii a fyziologii k studiu nejrůznějších pochodů. V lékařství samotném se jich používá také k léčení některých chorob. Začíná se i s některými aplikacemi v zemědělství. Při praktickém použití radioisotopů se využívá jednak působení nukleárních částic nebo záření na hmotu (ionisace, uvolňování atomů nebo molekul, umělé přeměny prvků), jednak vlivu hmoty na vysílané částice nebo záření (rozptyl a absorpce částic nebo záření prostředím), jednak jejich možností indikačních (určování a stopování prvků) vzhledem k tomu, že vysílají záření, které umožňuje jejich identifikaci i methodami jinými než chemickými. Statistika ukazuje, že po

užití radioisotopů jako indikátorů tvoří 80% všech aplikací. Připojená tabulka skýtá velký výběr radioisotopů pro uvedené účely.

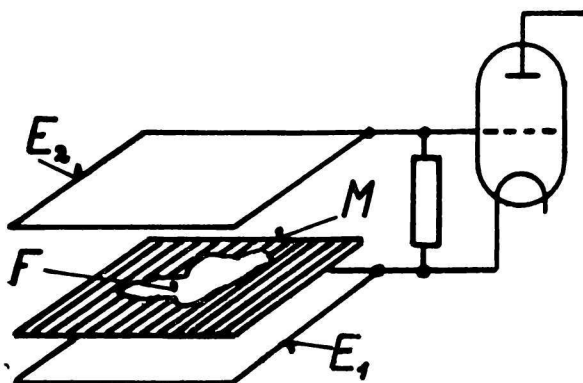


Obr. 1. Zařízení ke kontrole tloušťky pohybujícího se pásu.

Pokud jde o použití radioisotopů k základním měrným operacím [34] [35] [36], je možno určovat ze změny absorpce záření použité radioaktivní látky buď tloušťku nebo plochu. Obr. 1 ukazuje zařízení, kterým je možno trvale kontrolovat na př. tloušťku zpracovaného materiálu tím způsobem, že jej necháme procházeti mezi elektrodami  $E_1$  a  $E_2$ . Na spodní elektrodu  $E_1$  umístíme radioaktivní látku, jejíž ionizační účinky měříme ionizační komůrkou. Sběrná elektroda této komůrky je označena  $E_2$  a spojena s mřížkou první elektronky zapojené do zařízení pro registraci tloušťky. Dokud neprochází mezi elektrodami  $E_1$  a  $E_2$  zpracováváný materiál, indikuje zařízení, na př. miliampermetr zapojený do anodového obvodu elektronky, konstantní proud. Jakmile začne materiál procházeti, výchylka miliampermetru poklesne a je konstatní, pokud se tloušťka materiálu nemění. Vzroste-li tloušťka materiálu, poklesne výchylka miliampérmetru, klesne-li tloušťka materiálu, nastane zvětšení výchylky miliampérmetru. Změna tloušťky materiálu se tak projevuje v různé absorpci radioaktivního záření, která má za následek změnu výchylky indikujícího stroje.

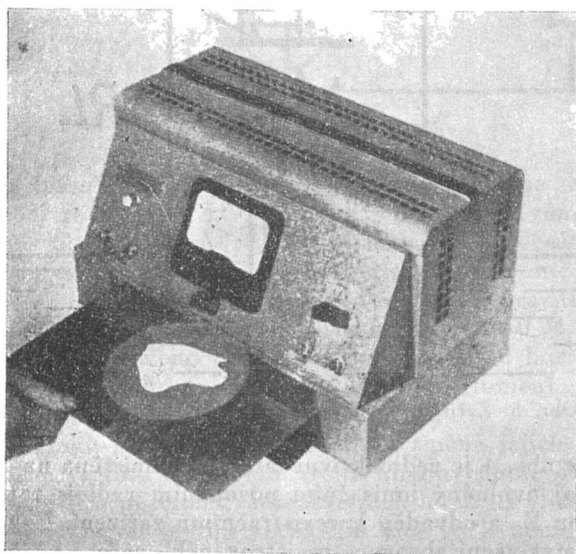
Toto zařízení může sloužiti nejen ke kontrole ale i k automatické regulaci tloušťky při výrobním procesu. Jde-li o výrobu látky s velkým absorpčním koeficientem, na př. při válcování silných plechů, zvolíme radioisotop vysílající paprsky  $\gamma$ , které mají větší pronikavost než paprsky  $\beta$ . Radioisotopu, který vysílá paprsky  $\beta$ , použijeme na př. při výrobě celulosy [35], která jeví malou absorpci, nebo při výrobě velmi tenkých ocelových pásů [37].

Obdobně je možno měřiti plochu zařízením znázorněným schematicky na obr. 2. Radioaktivním preparátem se pokryje spodní elektroda



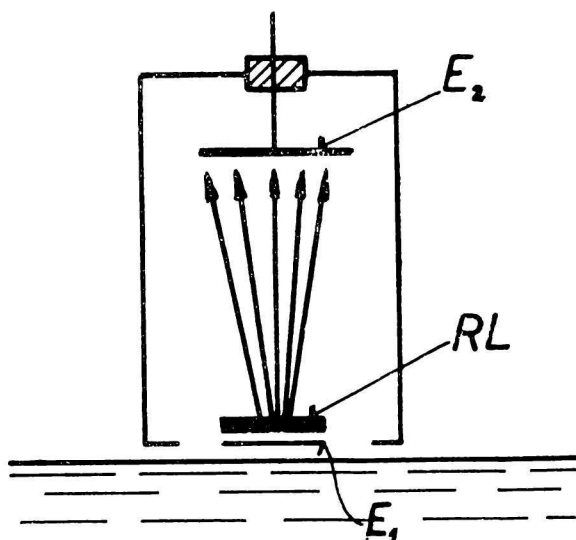
Obr. 2. Zařízení k měření plochy folií.

$E_1$ , nad níž se umístí mřížka M. Na tuto mřížku se klade absorbující folie F, jejíž plochu chceme určit. Ježto jde obvykle o tenký typ folie, je třeba užití radioisotopu, který se rozpadá vyzařováním částic  $\alpha$ . Hodí se k tomu účelu na př. preparát polonia. Před pokusem procházejí částice sítkou M. Způsobená ionisace se měří sběrnou elektrodou, kterou spojíme, na mřížku první elektronky. Změna ionisace způsobená absorpcí folie F se zjišťuje zařízením, jehož fotografii ukazuje obr. 3. Z naměřených hodnot se určí tloušťka folie.

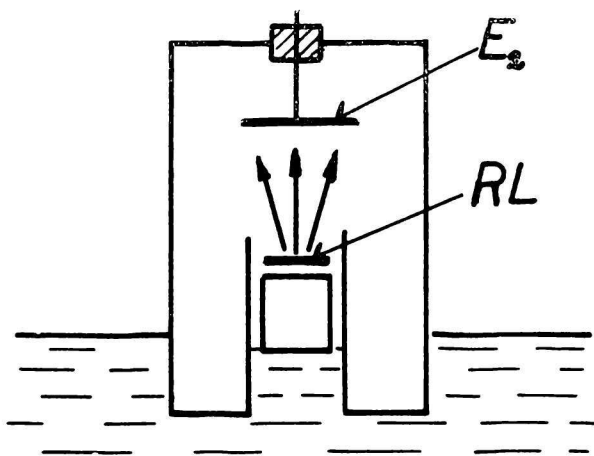


Obr. Fotografie zařízení k měření plochy folií. (34)

Do této skupiny použití radioisotopů patří i kontrola výšky hladiny kapaliny na př. zařízením podle obr. 4, nebo zařízením podle obr. 5. V



Obr. 4. Zařízení k měření a kontrole hladiny kapalin.

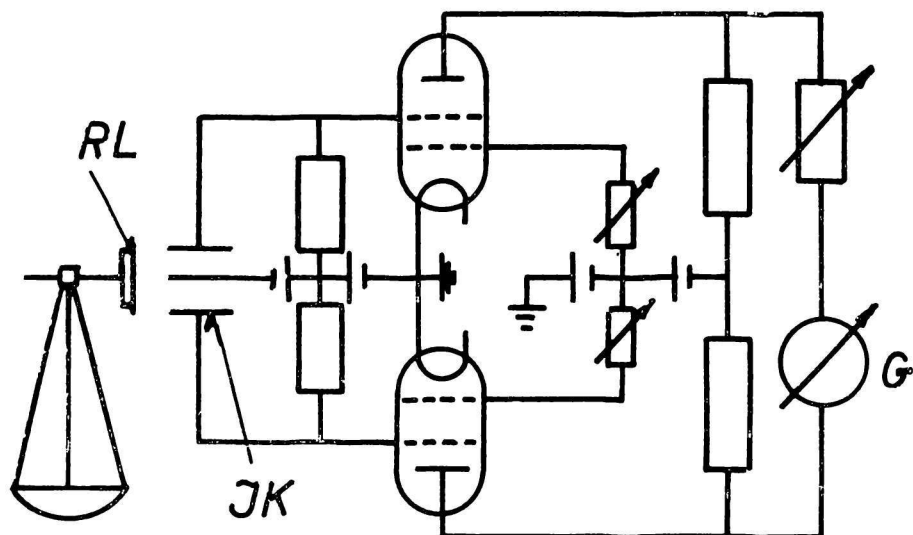


Obr. 5. Zařízení k měření a kontrole hladiny kapalin.

zařízení podle obr. 4 je radioaktivní látka RL umístěna na dně  $E_1$  měrné nádoby. Náboj uvolněný ionizačním působením radioisotopu RL je sbírán elektrodou  $E_2$  a odváděn k registračnímu zařízení. Nežádoucí stoupnutí hladiny a zvětšení absorpce registrovaného záření může být hlášeno nebo zamezeno nejrůznějšími způsoby. Toto zařízení může být také modifikováno na př. tak, že se použije plováku, na něž se upevní radioaktivní isotop (obr. 5.). Zvyšováním nebo snižováním hladiny se mění poloha plováku a tím i ionizační proud indikovaný zařízením. Dá se ho

použití opět buď k pouhé registraci nebo k regulaci výšky hladiny kapaliny.

Změny polohy radioaktivní látky a s tím spojené změny ionisace se dá použít nejen k zjišťování změn hladiny kapaliny, nýbrž i k jiným aplikacím, na př. u radioaktivních mikrovah. Výkyvy vahadla mohou být citlivě zjišťovány, jestliže rameno vahadla opatříme folií s radioaktivní látkou, v jejíž blízkosti umístíme dvojitou ionizační komůrku, jak je naznačeno na obr. 6. V rovnovážné poloze neukazuje galvanometr G žád-

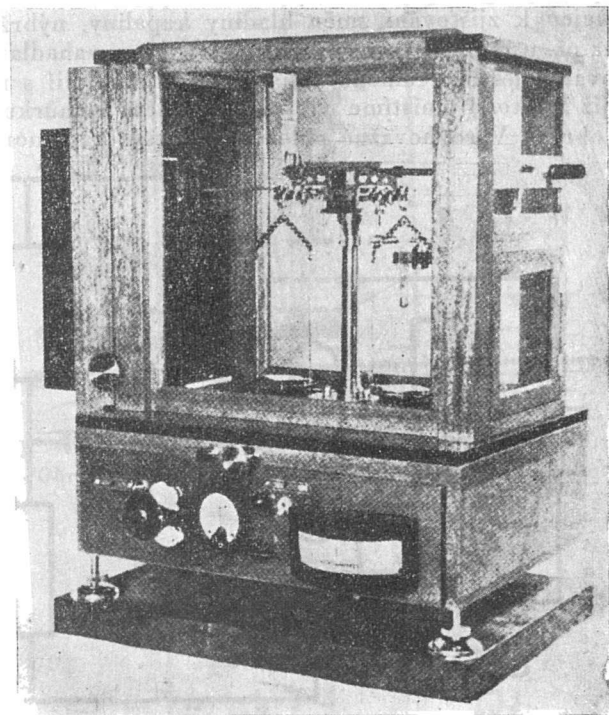


Obr. 6a. Radioaktivní mikrováhy.

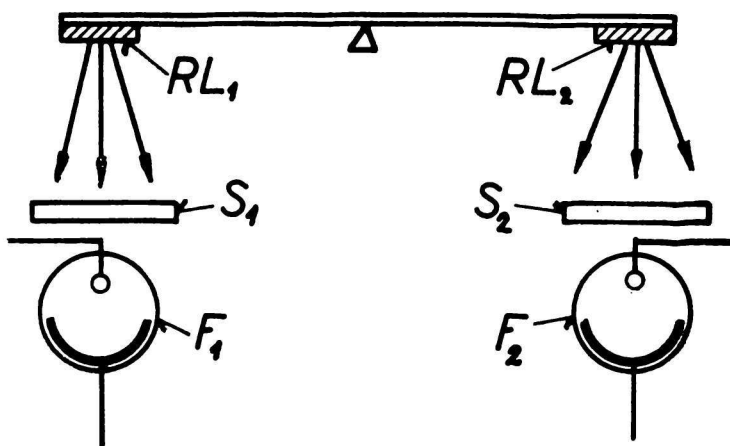
neu výchylku. Jakmile se rameno vychýlí na jednu nebo druhou stranu nastane porušení rovnováhy, které je citlivě zaznamenáváno výchylkami galvanometru G na jednu nebo druhou stranu. Dá se dosáhnouti zaznamenání 1 microgramu [38], jestliže se použije velice přesně provedených ložisek. V původních pokusech bylo použito břitů z brazilského achátu. Délka středního břitu byla 1,56 cm, postranních břitů 0,94 cm. Dobrých výsledků však bylo dosaženo také s ložisky z karbidu bóru, které měly tytéž rozměry. U vah bylo použito magnetického tlumení. Je však možno s nimi pracovati bez zvláštního tlumení.

Závislost účinku radioaktivních látek na změně jejich polohy se dá použít k radioaktivnímu udržování určité hladiny podle obr. 7. V tomto obrázku je použito působení radioaktivních látek na fluorescenční stínítko. Jeho světlování je tím větší, čím více se k němu radioaktivní látka RL přiblíží. Registraci intenzity fluorescence způsobené RL můžeme provést fotočlánekem F. Ujijeme-li dvou takových článků  $F_1$  a  $F_2$  v kompenzačním zapojení, můžeme tím dosáhnouti toho, že jakákoliv výchylka ramen nesoucích radioaktivní látky  $RL_1$  a  $RL_2$  je ihned vykompensována fotočlánekem  $F_1$  a  $F_2$ .

Dala by se uvésti řada zařízení založených na principu změny ionisace se změnou polohy radioaktivní látky. Stačí upozorniti aspoň ještě



Obr. 6b. Radioaktivní mikrováhy.

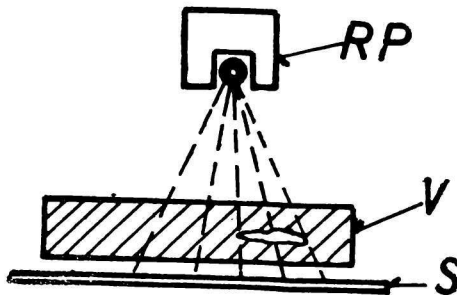


Obr. 7. Zařízení k udržování zvolené hladiny.

na jednu další aplikaci, kterou můžeme registrovat změny řádu  $10^{-6}$  cm. Pozůstává v tom, že se volí ionizační komůrka plněná dobře izolující organickou látkou, čímž se sníží na př. dolet částic  $\alpha$  tisíckrát. Nepatrné změny ve vzdálenosti elektrod ionizační komůrky, na př. řádu  $10^{-6}$  cm způsobí pak již pozorovatelné změny proudu, takže je možno tohoto zařízení použití k měření teplotních koeficientů látek. K tomu účelu se spojí konec zahřívané tyče s jednou elektrodou ionizační komůrky.

Radioisotopy docházejí dnes stále většího a většího použití v radiografii. Pod tímto názvem rozumíme vytváření obrázků určitých předmětů účinkem záření radioaktivních látek. Rozděluje se ve dvě části podle toho, je-li radioaktivní preparát mimo zobrazovaný předmět nebo je-li radioaktivní isotop obsažen v předmětu jako indikátor. V tomto druhém případě se obvykle mluví o autoradiografii.

V prvním případě, kdy se zobrazování předmětu, na př. za účelem kontroly kvality výrobku, provádí zářením  $\gamma$  radioaktivního preparátu umístěného mimo zobrazovaný předmět, jde vlastně o stínové obrázky a makrostrukturní zkoušení materiálu, které se již provozně provádí při výrobě odlitků nebo provádění svárů užitím paprsků X. Zkoušený předmět (obr. 8.), se postaví mezi radioaktivní preparát RP a fluorescenční



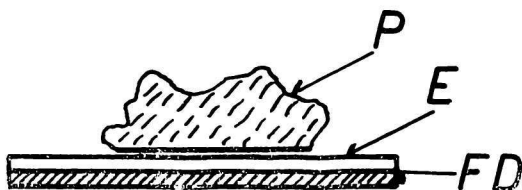
Obr. 8. Radiografie zkušného výrobku.

stínítko S nebo fotografický film a ze získaného stínového obrázku je posouzí kvalita výrobku V. Pro úspěch radiografie použitím radioisotopů je třeba si ujasnit některé požadavky charakterisující tuto metodu. Jsou to energie záření  $\gamma$  vysílaného radioisotopem, poločas radioisotopu a možnost přípravy radioisotopu. Nahlédnutím do tabulky zjistíme, že se pro radiografii velmi dobře hodí isotop kobaltu s hmotovým číslem 60, který má poločas 5,3 r a vysílá záření  $\gamma$  o maximální energii 1,3 MeV. Dá se připravit pohodlně a levně v uranovém reaktoru, takže i třetí požadavek je splněn. Někdy se říká, že vzhledem k svým vlastnostem nahradí z větší části používání přirozeného radia [39].

Autoradiografie je v podstatě metoda sledující ukládání a rozložení radioisotopu použitého jako indikátoru zaznamenáváním jeho záření na vhodnou fotografickou desku nebo film. Jestliže má předmět vyšetřovanou plochu rovinnou, pozůstává autoradiografie v položení předmětu D na emulsi E fotografické desky F D a v expozici po několik ho-



din nebo i dní (obr. 9). Nemá-li vyšetřovaný předmět vhodný tvar, je možno jej obaliti fotografickou emulzí buď přímo nebo nanesenou na celulosu. Autoradiografie dochází stále většího rozšíření. Užívá se jí v ana-



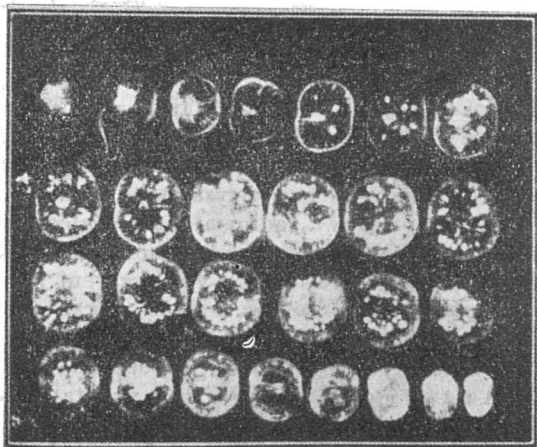
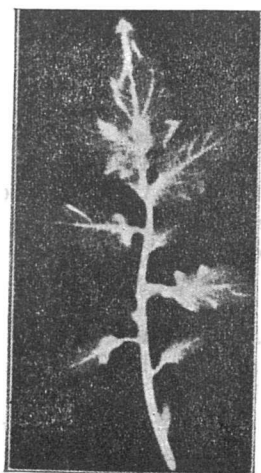
Obr. 9. Autoradiografie studovaného předmětu.

tomii, cytologii, histologii, botanice, při řešení geologických, chemických a fyzikálních problémů, ve strojnictví atd. Je účelné užití k autoradiografii speciálních desek citlivých pro účinky radioaktivního záření. Indikátory vysílající částice  $\alpha$  působí na fotografickou desku nejvíce. Ovšem dobře se registruje speciálními emulsemi fotografických desek i účinek záření  $\beta$  a  $\gamma$ .

Autoradiografická technika umožňuje na př. zjištění radioaktivních látek v horninách.

H. Becquerel objevil tímto způsobem radioaktivitu smolince. I. Curieová - Joliotová [40] vypracovala v poslední době autoradiografickou metodu, která umožňuje dokonce kvalitativní stanovení radioaktivní látky při geologických studiích.

Autoradiografie vedla však k dobrým výsledkům i v tom směru, že ukázala rozdělení některých prvků ve stvolech, listech, plodech a jádrech rostlin [31]. Obr. 10 ukazuje radiografii listu rajského jablíčka radiofosforem (31).



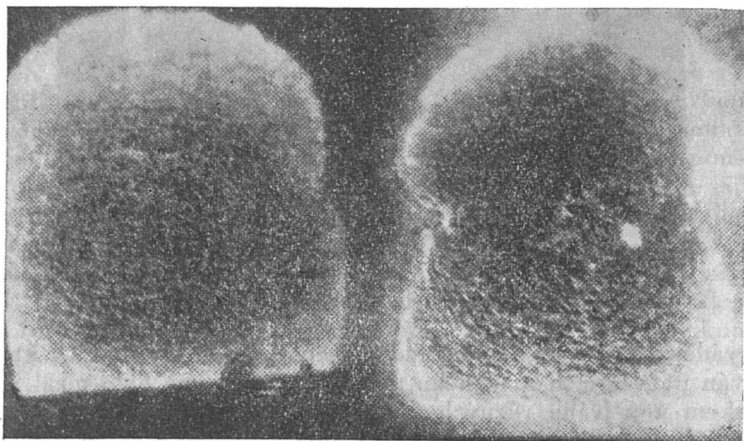
Obr. 10. Autoradiografie listu rajského jablíčka radiofosforem (31).

Obr. 11. Autoradiografie plodu rajského jablíčka radiozinkem. (31)

fosforem  $^{32}\text{P}$ . Roztok jeho soli byl přiléván ke kořenům rostliny rajskeho jablíčka a popsanou autoradiografickou technikou (obr. 9.), bylo sledováno ukládání fosforu v listech (obr. 10). Překvapujícím je obr. 11, který ukazuje, že i zinek se uplatňuje jako stopový prvek při vytváření plodu rajskeho jablíčka a že jeho ukládání se děje zvláště v semenech. Ballard a Dean užili radiofosforu k zjišťování vlivu rozložení fosforu v půdě na jeho ukládání v rostlinách. Pokusy tohoto druhu byly prováděny na př. na vinné révě, tím způsobem, že roztok, obsahující radiofosfor byl nalit do různých vzdáleností v okolí keře vinné révy. Množství uloženého radiofosforu bylo sledováno v popelu listu Geiger-Müllerovými počítači.

Obdobným způsobem za použití desek citlivých pro paprsky  $\beta$  bylo studováno rozložení radiouhlíku  $^{14}\text{C}$  v lymfocytech, erythrocytech a leucocytech. Radiojodu bylo použito ke studiu nádorů štítné žlázy u lidí a u krys. Potřebná minimální dose  $^{131}\text{I}$  pro autoradiografické studie štítné žlázy u krys je 1 microcurie na 1 kg krysy. Se zkouškami autoradiografickými bylo započato 24 hodin po vstříknutí injekce s radiojodem do těla krysy. Tkáň 7 mikronů silná preparovaná formalinem a alkoholem byla nanešena na fotografickou emulsi o tloušťce 6 mikronů. Expositice byla prováděna po 24 hodin [31] [41].

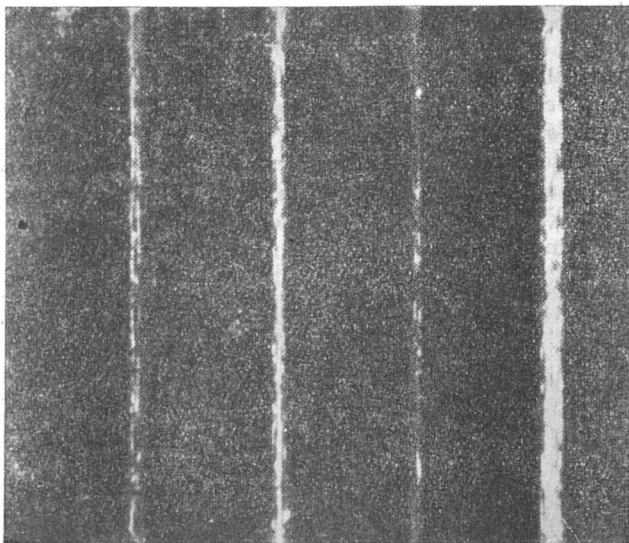
Zajímavé je použití radioisotopu ruthenia  $^{106}\text{Ru}$  a radiojodu  $^{131}\text{I}$  pro zjištění kvality mouky k pečení chleba (bílého) [36]. Jakost mouky k tomuto účelu se dá určit absorpcí iontů radioaktivního ruthenia. Osudy jodičnanu draselného, který se přidává do těsta k zlepšení jeho zpracování, byly studovány během pečení chleba také autoradiografií krajíčů položených na fotografickou desku (obr. 12). Tyto snímky ukázaly rozložení jodu, který zůstává v pečeném chlebu z největší části jako jodid a pouze z menší části, která činí méně než 10%, jako jodičnan.



Obr. 12. Autoradiografie krajíce chleba.

Radioisotopy se mimořádně dobře hodí ve strojnictví k studiu tření v ložiskách a používání vhodných mazadel. Je to způsobeno tím, že jde o nesmírně malá množství materiálu, která se přenášejí mezi třecími plochami a která mohou být zjištěna přesně metodou indikátorů za použití radioautografické techniky [42], [43], [36]. Princip pozůstává v tom, že se nechají třít dva vzorky studovaných materiálů, z nichž jeden je radioaktivní, o sebe a pak se z aktivity obou vzorků soudí na způsob opotřebování a přenášení vyšetřovaných materiálů. Vzorky mohou být buď ve tvaru hranolů nebo koulí, nebo jeden z nich ve formě hranolu, po němž klouže druhý jako jezdec. Pohyb vzorků se provádí vhodným zařízením. Mezi vzorky se při tom mohou vkládati různá mazadla a zkoušet jejich vliv.

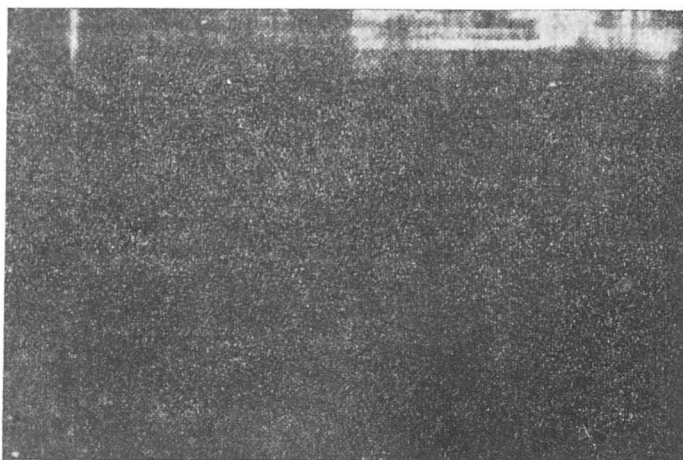
Tímto způsobem bylo studováno opotřebování mědi, která byla ozářena deuterony, takže na jejím povrchu byly vytvořeny radioisotopy  $^{63}\text{Zn}$  a  $^{64}\text{Cu}$ . První pokusy byly čistě výzkumného rázu a byly prováděny tak, že po hranolu z mědi byly posouvány za různých podmínek koule nebo jezdec jiného tvaru z různých kovů nebo skla a jednak Geiger-Müllerovými počítači bylo zjišťováno množství přenesené z hranolu na jezdec, jednak autografickými snímky byl studován mechanismus pohybu jezdec a způsob přenášení materiálu (obr. 13). Opačné zkoušky by-



Obr. 13. Užití radioisotopů k studiu tření.

ly prováděny s radioaktivním jezdcem obsahujícím radium D, který byl posouván po vzorcích z různého materiálu, při čemž bylo mezi jezdcem a vzorkem používáno různých mazadel a studován jejich účinek. Tyto studie však vešly již do praktického stadia v tom smyslu, že byly aplikovány na řešení čistě technických problémů, jako je opotřebování těsní-

cích kroužků u pístů ve válcích výbušných motorů [43]. Za tím účelem byly kroužky pokoveny radioaktivním chromem. Autoradiografickou technikou bylo studováno přenášení chromu na povrch válců (obr. 14)



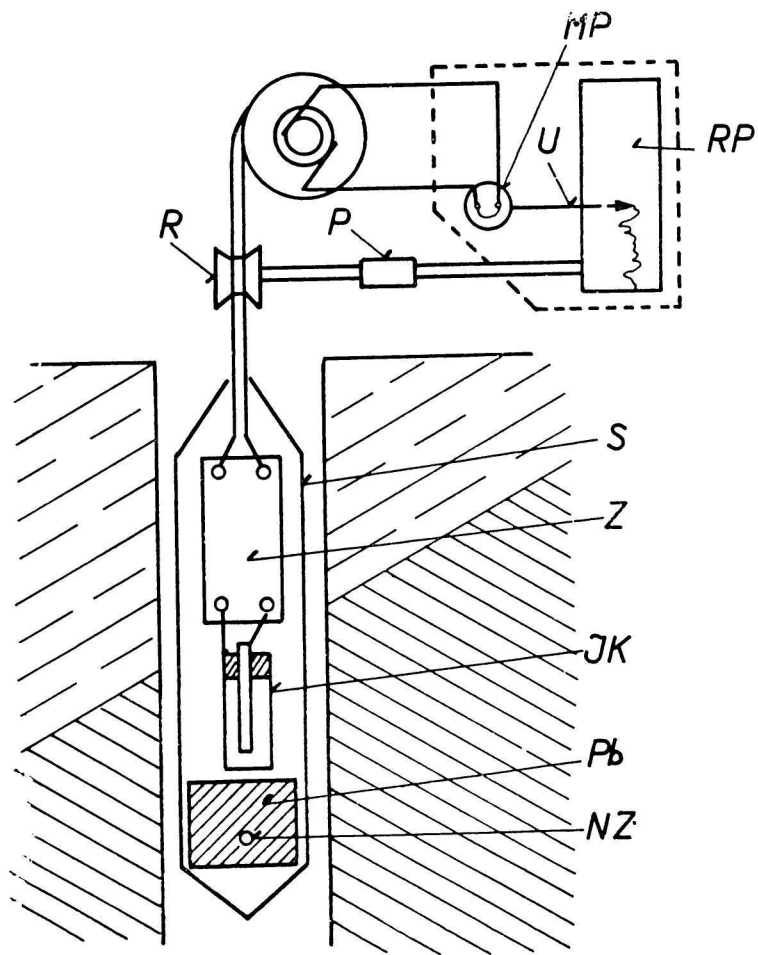
Obr. 14. Autoradiografie válců výbušných motorů.

V geologii nabývá dnes vedle jiných běžných method mimořádného významu metoda užívající nukleárních procesů k vyšetřování geologických vrstev v pokusných vrtech. Informace, které tyto metody podávají, jsou velmi cenné zvláště pokud jde o hledání nafty. Svědčí o tom skutečnost, že byly provedeny desetitisíce měření jednak se sondami obsahujícími pouze ionizační komůrku k zjišťování přirozené radioaktivity měřením záření  $\gamma$  v různých hloubkách pokusného vrtu [44], jednak se sondami obsahujícími neutronový zdroj a ionizační komůrku měřící sekundární záření způsobené neutronovým zdrojem v různých hloubkách pod povrchem zemským [15].

Pokud jde o sondování půdy tím, že se měří intenzita záření  $\gamma$  jednotlivých geologických vrstev v různých hloubkách pokusného vrtu, dá se použití k tomuto účelu běžných zařízení s ionizační komůrkou a registračním zařízením pro intenzitu záření  $\gamma$  v závislosti na hloubce pod zemským povrchem. Ionizační komůrka vhodného typu se spouští postupně do různých hloubek pokusného vrtu, při čemž intenzita záření je zapisována jako funkce hloubky samočinně registrujícím přístrojem (miliampermetrem).

Sondování geologických vrstev neutronovým zdrojem znázorňuje obr. 15. Neutronový zdroj NZ, na př. směs radia s beryliem [46], je uložen v olověném obalu Pb na konci sondy, aby byla ionizační komůrka, umístěná za zdrojem NZ chdáněna před účinkem paprsků  $\gamma$  vysílaných radiem obsaženým v neutronovém zdroji. Neutrony vysílané zdrojem NZ do vrstev pokusného vrtu způsobují, že prvky, obsažené v těchto vrstvách vysílají sekundární záření, které je vyvoláno jednak neelastickými srážkami neutronů s jádry atomů, jednak zářením

vysílaným při pohlcení neutronů jádru atomů, jednak štěpením jader některých těžkých prvků neutrony, jednak umělou radioaktivitou způsobenou neutrony v okolních vrstvách. Toto sekundární záření způsobené neutrony je zaznamenáváno ionizační komůrkou JK a zesilováno v zesilovací části Z sondy. Neutronový zdroj NZ je umístěn s ionizační komůrkou IK a zesilovačem Z ve společném plášti, tvořícím sondu S. Pohybuje se tedy neutronový zdroj NZ, jakož i ionizační komůrka IK společně pokusným vrtem, při čemž zachovávají v sondě S konstantní vzdálenost. Pohyb sondy S se přenáší řemenicí R a vhodným převodem P na pohyb registračního papíru RP. Záznamy intenzity sekundárního záření měřeného IK jsou prováděny na registrační papír RP, ukazovatelem měřicího přístroje MP připojeného k zesilovači Z. Sondovací křiv-



Obr. 15. Sondování vrstev v pokusných vrtech neutronovým zdrojem.

ka pak znázorňuje závislost intenzity sekundárního záření vyvolaného neutrony jako funkci hloubky pod zemským povrchem.

Pokud jde o chemii, bylo při používání kontroly chemických procesů používáno jak stabilních izotopů, tak radioaktivních izotopů.

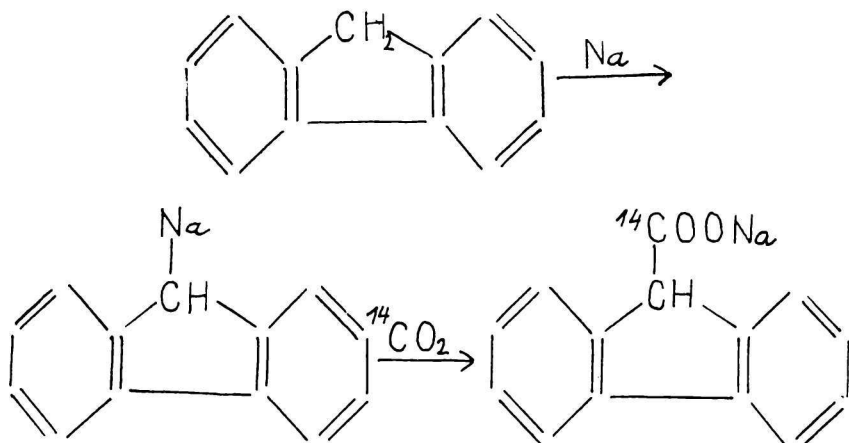
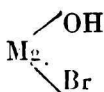
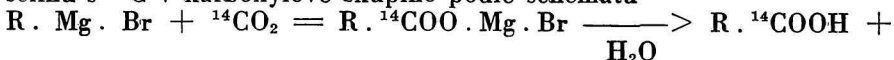
Je to především těžký vodík s hmotovým číslem 2, který byl k tomuto účelu aplikován. Bude v tomto směru jistě hojně používán i vodík s motovým číslem 3 čili triterium, neboť je radioaktivní, vysílá při rozpadu negativní elektrony, má dlouhý poločas (asi 12 roků) a dá se vyrobiti v uranovém reaktoru. Bylo ho již použito při studiu rozpustnosti vody v různých uhlovodících.

Dusík, ačkoliv by byl pro organické chemiky žádoucím činitelem, má oba radioisotopy  $^{13}\text{N}$  a  $^{16}\text{N}$  s velmi krátkým poločasem. Nepřichází proto v úvahu.

Zbývá tedy pouze radioisotop uhlíku  $^{14}\text{C}$ , který má poločas zhruba 5.000 let, zatím co druhý radiostop uhlíku  $^{11}\text{C}$  je rovněž krátkodobý (poločas asi 20 minut).

Radioaktivní isotop uhlíku  $^{14}\text{C}$  byl ve velmi mnohých případech vpraven do molekul organických sloučenin a to zvláště tehdy, když bylo nutno rozhodnouti o průběhu té či oné reakce a kde jakékoli jiné způsoby jednoznačného určení reakčního průběhu selhaly. Methody, jimž se  $^{14}\text{C}$  do organických sloučenin vpravuje, vycházejí zpravidla z  $^{14}\text{CO}_2$  a jsou dvojího druhu:

1. reakci s Grignardovým činidlem poskytne  $^{14}\text{CO}_2$  karbonovou kyselinu s  $^{14}\text{C}$  v karboxylové skupině podle schematu



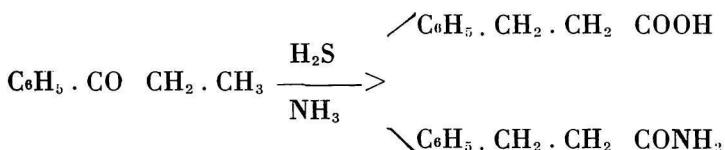
<sup>3)</sup> Stať o aplikacích radioisotopů v chemii byla zpracována doc. Dr. J. Staňkem z Chemického ústavu university Karlovy.

2.  $^{14}\text{CO}_2$  se vpravuje přímou karboxylací do takových molekul organických sloučenin, jež vytvářejí sloučeniny s alkalickými kovy, na př.

Nejběžnější sloučeninou, obsahující  $^{14}\text{CO}_2$  je kyselina octová, kterou lze získati podle prvního z uvedených schémat; deriváty této sloučeniny (chlorid, anhydrid) umožňují pak obvyklými jinak způsoby vpravení acetylu s  $^{14}\text{C}$  do molekuly organické sloučeniny.

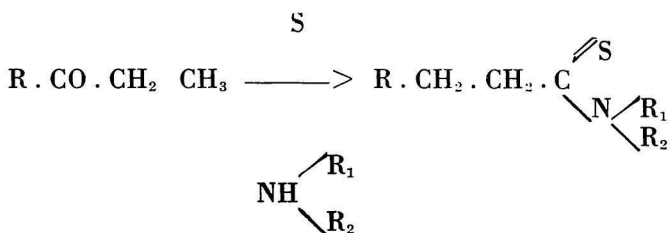
Význam method, při nichž bylo použito zavedení radioaktivního uhlíku do organické sloučeniny, nejlépe vysvitne z několika příkladů:

Willgerodtova reakce je vznik arylmastné kyseliny neb jejího amidu při zahřívání masně-aromatických ketonů se žlutým sírníkem amonným; probíhá dle schématu:

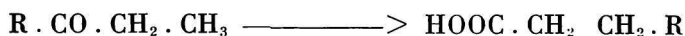


Tato reakce byla svým objevitelem vysvětlována tak, jako by se koncová methylová skupina alifatického řetězce oxidovala za současně redukce skupiny ketonické; Willgerodt sám však tuto možnost reakčního průběhu odvolal, když zjistil, že jakýkoli z nutně předpokládaných meziproduktů takového pochodu neposkytuje zahříváním se žlutým sírníkem amonným příslušnou karbonovou kyselinu.

Modifikátor Willgerodtovy reakce Kindler, který odstranil žl. sírník amonný použitím sek. aminů a síry, nalezl, že reakčním produktem v tomto případě je vždy thioamid příslušné kyseliny, který vzniká podle schématu:

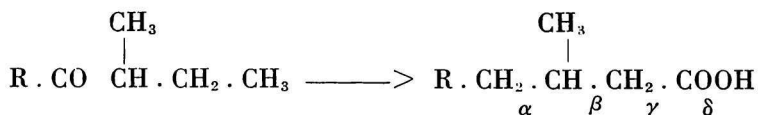


Kindler navrhl pro vysvětlení reakčního průběhu jiný mechanismus, v tomto případě velmi komplikovaný přesmyk, při němž aromatické jádro by se nutně muselo přesmyknouti z jednoho konce alifatického řetězu na druhý:



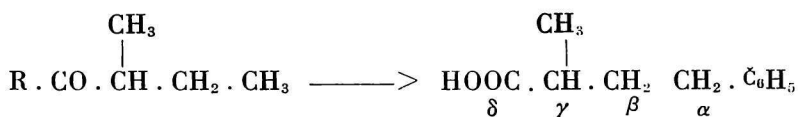
Podle tohoto Kindlerova schématu probíhá uvedená reakce, i když spolupůsobením síry a sek. aminu je průběhem reakce karboxyl zaměněn za skupinu typu  $-\text{CSN}(\text{R}_1\text{R}_2)$ . Kindlerova domněnka byla poněkud

kud otřesena pokusy, při nichž byl proveden přesmyk s obdobnými látkami s delším alifatickým řetězcem, který byl ještě substituován methylovou skupinou:



Zde bylo nalezeno, že poloha methylové skupiny na pobočném řetězci se vzhledem k aromatickému jádru nezměnila (methylová skupina zůstala v  $\beta$ -poloze), zatím co by se musila dostat přesmykováním podle Kindlerova mechanismu nutně do polohy  $\gamma$  (vzhledem k arom. jádru).

Chybný výklad:

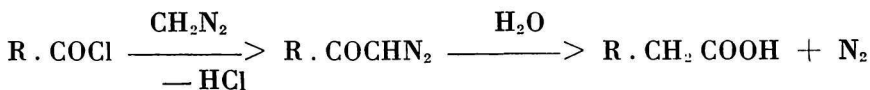


Kindlerův výklad byl definitivně potvrzen zavedením radioaktivního  $^{14}\text{C}$  do molekuly, při čemž poloha uhlíku sousedícího s benzenovým jádrem byla nalezena nezměněna:



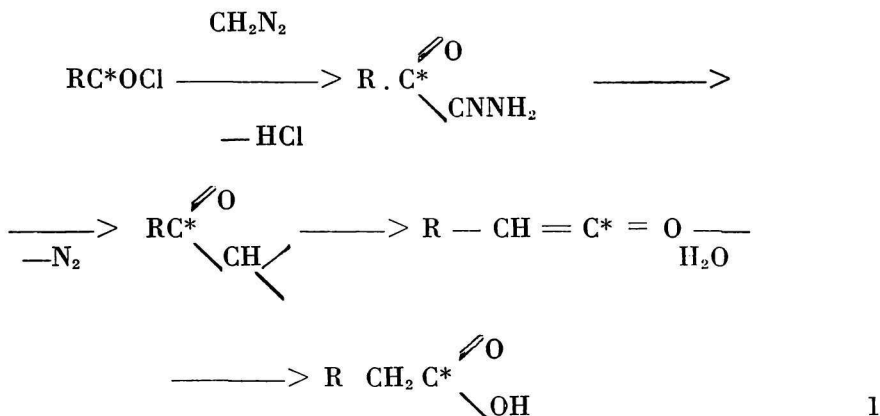
Prokazatelná radioaktivita kysličníku uhličitého, získaného dekarboxylací kyseliny fenyloctové, jež současně vzniká jako vedlejší produkt, naznačuje, že v tomto právě citovaném případě snad průběh reakce probíhá jinak, pokud vznik  $^{14}\text{CO}_2$  není ovlivněn reakčními pochody při dekarboxylaci.

Arndt-Eistertova syntéza je prodlužování řetězu karbové kyseliny o jednu skupinu  $\text{CH}_2$  působením diazomethanu na chlorid kyseliny podle schématu:



Při této reakci však bylo nalezeno, že uhlíkový atom, který byl původně v karboxylové skupině, v této skupině zůstává, t. j. posouvá se během reakce (nález opět učiněn zavedením radioaktivního uhlíku): Eistert navrhl pak reakční schéma, jež předpokládá vznik ketenu přesmykem volného radikálu, vzniklého odštěpením molekuly dusíku:

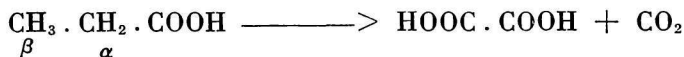




1

Radioaktivní uhlíkový atom je označen křížkem.

Je ještě řada reakcí v organické chemii, jež byly objasněny ve svém průběhu zavedením radioaktivního uhlíku; tak na př. bylo nalezeno, že oxydací kyseliny propionové manganistanem draselným v alkalickém prostředí, při čemž vzniká kyselina oxalová a kysličník uhličitý:



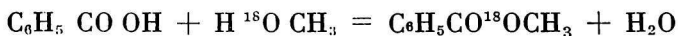
nevzniká kysličník uhličitý z karboxylové skupiny kyseliny propionové, jak bylo dříve předpokládáno, nýbrž že se oxydací rozrušuje vazba mezi  $\alpha$  a  $\beta$  uhlíkovým atomem, při čemž  $\text{CO}_2$  vzniká výlučně z  $\beta$  methylové skupiny; teprve za vysoké alkalinity je přednostně napadána vazba mezi karboxylem a sousedící  $\alpha$  methylenovou skupinou; naproti tomu oxyduje-li se propionová kyselina dvojhromanem draselným (za vzniku kyseliny octové a kysličníku uhličitého), vzniká v tomto případě  $\text{CO}_2$  jedině z karboxylové skupiny kyseliny propionové.

Velmi důležitou roli hrál  $^{14}\text{C}$  při zjišťování průběhu Fischer-Tropschovy reakce, při níž se redukcí kysličníku uhelnatého vodíkem za přítomnosti železa jako katalysátoru (kromě jiných kovů) získává směs uhlovodíků podobná přirozeným směsím těchto látek; předpokládalo se totiž, že meziproduktem je zde karbid železa, který pak redukcí vodíkem poskytuje směs uhlovodíků. Za reakčních podmínek Fischer-Tropschovy reakce může skutečně karbid železa vzniknout působením kysličníku uhelnatého na železo. Byl proto připraven karbid železa  $\text{Fe}_2^{14}\text{C}$  a touto látkou ve vrstvičce filmu povlečen katalysátor. Předpokládalo se, že vznikají-li uhlovodíky redukcí karbidu železa, pak již v prvních podílech vzniklých uhlovodíků by musila být radioaktivita prokázána, což se nestalo, alespoň nikoli v takové míře, aby bylo lze výše zmíněnému reakčnímu mechanismu přikládati jakoukoli generelnější platnost. Fischer-Tropschova reakce musí proto probíhat jinak, než přechodnou tvorbou karbidu železa a redukcí této látky.

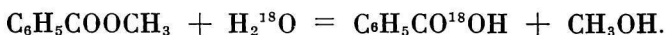
Zcela obdobně byly provedeny řady pokusů s radioaktivními isotopy ostatních prvků, které mají význam v organické chemii; průmyslový význam zde má radioaktivní síra, jež se podle literatury přidává do výrobního postupu viskosového hedvábí; zde totiž při koagulaci vláken se uvolňuje velmi jedovaté sloučeniny síry a to jak sirovodík a sirouhlík, tak i merkaptany. Sledováním radioaktivity lze zabránit ohrožení zdraví pracujících v provozech, neboť lze předpokládati, že úměrně přidanému množství radioaktivní síry budou uvolněny i sloučeniny radioaktivní síry, obdobně sirovodíku, sirouhlíku a merkaptanům.

Jiná praktická aplikace radioaktivních isotopů se naskýtá při vybarvování tkaniv, jež je spíše záležitostí zkušenosti, nežli vědeckou. Při kontinuálním pochodu mohou nastati nestejnomyšlnosti v intenzitě vybarvení vzhledem k tomu, že roztok barviva se neustále ochuzuje o barvivo. Může dojít k zeslabení tónu vybarvení. Zavedení radioaktivních prvků do molekuly barviva umožňuje sledování intenzity radioaktivity a tím zásah do provozního postupu, jestliže by nastávala nežádoucí změna ve vybarvování tkaniv.

Reakční kinetika esterifikace a zmýdelnění byla objasněna použitím  $^{18}\text{O}$ . Při přípravě benzoanu methylnatého z kyseliny benzoové a  $\text{CH}_3^{18}\text{OH}$  (methylalkoholu s kyslíkem  $^{18}\text{O}$ ) bylo nalezeno, že voda reakcí vzniklá neobsahuje ani stopu tohoto isotopu. Musí proto probíhati esterifikace tímto způsobem:



t. zn. z karboxylu kyseliny je poskytnuta skupina OH a z alkoholu pouze vodík. Zcela totožně probíhá i zmýdelnění, alkylová skupina zůstává spojena s kyslíkovým atomem:



Bylo to prokázáno tím, že hydrolysou vodou s isotopem kyslíku  $^{18}\text{O}$  přešel tento isotope kvantitativně do molekuly kyseliny.

Je ještě třeba upozorniti na aplikace radioisotopů v elektrochemii a zdůrazniti, že to bylo vlastně prvé použití tehdy ještě přirozených radioisotopů [48] k řešení chemických problémů.

Mechanismus koroze kovů byl studován na slitině zinku, aluminia a olova ve vodních parách. Bylo použito autoradiografické metody k ukázání vlivu olova na odolnost vzorku vůči korozi.

Konečně neméně důležitým činitelem jsou zde radioisotopy v metalurgii a fyzikální či chemické. Je to především problém difuze jednoho materiálu druhým materiálem a problém vlastní difuze daného prvku nebo sloučeniny prostředím téhož složení. Difusní studie tohoto typu ukazují jednoduchost s jakou je možno studovati tyto problémy, je-li jedno z obou prostředí označováno radioaktivním isotopem. Po stránce chemické velmi názorně ukazuje výhodnost použití radioisotopů v některých případech studie [36], která rozhodla otázku rozdělení fosforu mezi struskou a tekutým železem aplikací radiofosfo-

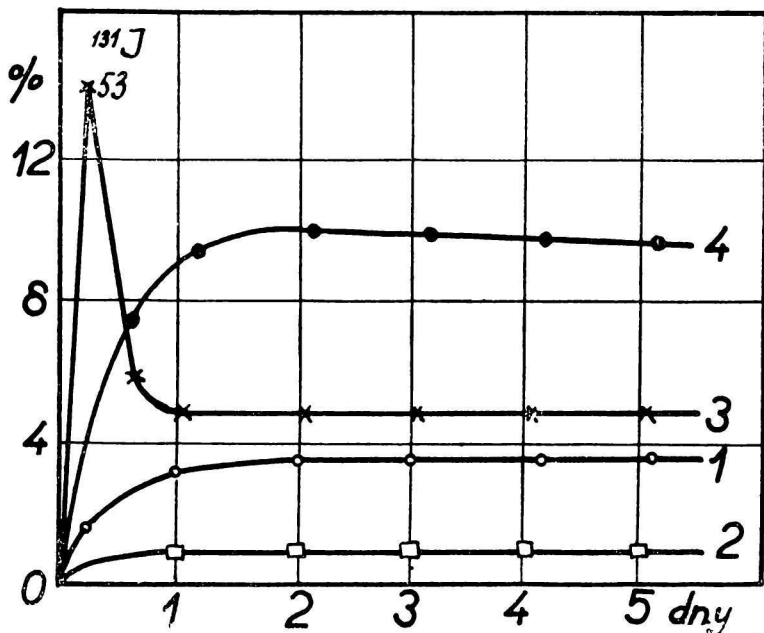
ru. Bylo třeba zjistiti, jak dlouho mají býti ponechány vedle sebe základní struska a tekuté železo za účelem obnovení rovnováhy, jestliže bylo přidáno železa nebo změněna teplota. Ukázalo se, že stačí k tomu 10 až 15 minut, což bylo zjištěno tím způsobem, že byly brány při pokusech každých 5 minut vzorky, u nichž byla po vychladnutí zjištěna aktivita radiofosforu a tím i jeho obsah.

Pokud jde o biochemii je možno říci totéž co o organické chemii. Největší použití má opět radiouhlik  $^{14}\text{C}$ .

Snad největšího použití došly radioisotopy v biologii [32], [33], po případě fyziologii. Je to celkem pochopitelné vzhledem k mnohosti a složitosti jevů této disciplíny a vzhledem k tomu, že na živé hmotě není možno aplikovati všechny fyzikální a chemické metody vypracované pro vědy anorganické. Zvláštní význam mají pro studium výměny látkové.

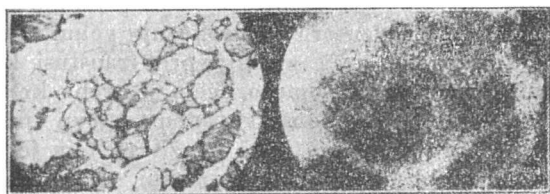
Klasickým jsou v tomto případě pokusy týkající se metabolismu štítné žlázy. Provedli je Hamilton a Soley, kteří sledovali přijímání jodu štítnou žlázou v různých jejích abnormálních stavech. Tyto abnormální stavy mohou býti, jak je dnes obecně známo, trojího druhu. Je to především hypothyroidální stav, při kterém je metabolismus postiženého jedince nízký, za druhé hyperthyroidální stav, při němž metabolismus je vysoký vzhledem ke zvýšené činnosti štítné žlázy ve formě tzv. toxického volete, a konečně třetí stav, při němž nastává sice také zvětšení volete, avšak v důsledku nesprávné výživy a nikoliv vlivem štítné žlázy, která pracuje normálně, takže vole není toxické. Hamilton a Soley prováděli pokusy s radioaktivním isotopem  $^{131}\text{I}$ , který podávali osobám stíženým jedním ze tří abnormálních případů štítné žlázy. Absorpci jodu ve štítné žláze vyšetřovaných sledovali pak několik dní po podání radioaktivního preparátu tím způsobem, že měřili každý den aktivitu ve štítné žláze vyšetřované osoby Geigerovým a Müllerovým počítačem. Výsledky jejich měření jsou reprodukovány v obr. 16. Křivka 1 ukazuje pro srovnání absorpci jodu normální štítnou žlázou. Křivka 2, která znázorňuje absorpci při hypothyroidálním stavu, se tvarem svého průběhu neliší od křivky 1, pouze množství jodu přijímaného štítnou žlázou je daleko menší než při normálním stavu. Křivka 4 ukazuje případ netoxického volete. Zvětšení štítné žlázy vzniklo v tomto případě nesprávnou výživou a má za následek daleko větší absorpci jodu, než ve stavu normálním. Průběh absorpce má však stejný charakter jako v normálním případě, neboť štítná žláza pracuje normálně a absorbuje pouze větší množství vzhledem k své abnormální velikosti. Nejzajímavější je případ znázorněný křivkou 3. Ukazuje absorpci jodu při hyperthyroidálním stavu štítné žlázy, která absorbuje z počátku jod velmi silně, daleko více než v normálním případě až 80% z jediné dávky jodidu sodného podaného per os, avšak stejně tak rychle jej zase ztrácí. Průběh křivek znázorněný v obr. 16 je dobrým vodítkem pro vyšetřujícího lékaře, aby mohl provést správnou diagnosu onemocnění štítné žlázy.

Měření aktivity absorbovaného jodu ve štítné žláze užitím Geigerových a Müllerových počítačů podává pouze celkový obraz o ab-



Obr. 16. Křivka absorpce jodu štítnou žlázou v některých chorobných stavech. (31)

sorpci jodu. Často by však byla žádoucí bližší informace o tom, jak a kde je uložen jod ve štítné žláze, na př. jeví-li žláza onemocnění rakovinou. V tom případě je třeba užití metody autoradiografie. Tenké řezy štítné žlázy po předchozí přípravě radioaktivním jodem a po odborné preparaci se položí na fotografickou desku. Místa, kde byl uložen radioaktivní jod, se projeví na fotografické desce černáním způsobeným vysílanými elektrony viz též [49].



Obr. 17. Štítná žláza. (31)

V obr. 17 je zobrazena na levé straně mikrofotografie řezu štítnou žlázou. Na pravé straně je ukázka části fotografické desky, na niž byl položen řez štítné žlázy, která absorbovala radioaktivní jod. Z černání fotografické desky můžeme usouditi na uložení jodu v štítné žláze. Toto uložení je rozdílné u normální a chorobné štítné žlázy. V místech zachvácených rakovinou se jod neukládá.

Radiofosforu  $^{32}\text{P}$  a radiocalcia  $^{45}\text{Ca}$  bylo použito k studiu metabolismu fosforu nervového systému svalů, zvláště otázka výměny fosforu při jejich stahování, a tkáně kostní. Byla studována rychlost obnovy fosforu v zubech, kostech a vůbec v celé kostře. Otázka obsahu fosforu v krvi byla řešena rovněž radioisotopem fosforu. Vedle fosforu bylo používáno též radiocalcia popřípadě i radioisotopu stroncia  $^{90}\text{Sr}$ .

Radioaktivní síry  $^{35}\text{S}$ , která má poločas 88 dní, avšak velmi malou energii vystřelovaných negatronů (0, 11 MeV) bylo užito mimo jiné účely zvláště pro studium zpracování vitamínu  $\text{B}_1$  v lidském těle. Vitamín  $\text{B}_1$  byl synteticky připraven za použití radioaktivní síry a bylo vyšetřováno jeho ukládání, zužitkování a vylučování v lidském těle. Bylo zjištěno, že během každého dne se v lidském těle zničí 10% z množství vitamínu  $\text{B}_1$ , které má tělo k dispozici, což dnes slouží jakožto důležitý poznatek pro řízení správné výživy lidského organismu.

Použití radioisotopů železa pro studium krve má ráz jak biologický, tak lékařský. Přicházíme tak částečně k aplikacím lékařským. Pro studium krve bylo dokonce použito dvou různých radioaktivních isotopů železa. Byl to především radioaktivní isotope  $^{59}\text{Fe}$ , který se dá připravit buď bombardováním železa deuterony nebo bombardováním kobaltu neutrony. Rozpadá se poločasem 47 dnů za vysílání negatronů o energii 0,9 MeV. Tohoto radioaktivního isotope použili H a h n, B a l e, L a w r e n c e a W h i p p l e k studiu anemie. Zjistili, že zdravý pes absorboval pouze malá množství železa, zatím co anemický pes absorboval značné dávky. U anemických psů bylo železo silně absorbováno červenými krvinkami na rozdíl od zdravých psů, kteří absorbují pouze asi 1,3% podávaného železa. Byli-li však normální pes přiveden do anemického stavu tím, že mu byly odejmuty dvě třetiny krve, nebylo podávané železo prakticky absorbováno. Obsah cirkulujícího haemoglobinu se stal během krátké doby normální. Když však nyní bylo podáno psovi radioaktivní železo, ukázalo se, že absorpce železa stoupla na 10%. Z toho je patrné, že to není anemický stav, který reguluje absorpci železa, nýbrž obsah železa v tkáni.

Druhý isotope  $^{55}\text{Fe}$ , který se dá připravit na př. bombardováním manganu protony nebo železa deuterony, prokazuje velmi cenné služby pro zjištění, zda konservovaná krev použitá pro transfusi krve se během doby uskladnění nezměnila. K tomuto účelu je třeba krev určenou pro transfusi konservovati a v konservovaném stavu uskladniti. Zda je možno takto preparované krev ještě použiti, o tom je možno se přesvědčiti zkouškou, která pozůstává ve zjištění, zda přenesené krvinky cirkulují v krevním oběhu osoby, u které byla transfuse krve provedena. Neboť jenom v tomto případě měla transfuse smysl vzhledem k tomu, že pouze cirkulující červené krvinky přivádějí tkáni kyslík. Při takových zkouškách konservované krev je tedy nutno odlišiti původní krvinky od krvinek přenesených transfusí krve. Je tedy třeba přenesené krvinky poznamenati, avšak provésti to takovým způsobem, aby nebyly poškozeny. Dá se k tomu užiti radioaktivního isotope železa  $^{55}\text{Fe}$ , který má poločas asi 5 roků a vysílá záření  $\beta$  o nepatrné energii. Pokusy byly provedeny takto: Radioaktivní isotope železa byl po stránce chemic-

ké připraven pro použití ve formě citrátu železnatoamonného, který byl vstříknut do těla dárců krve. Radioaktivní železo přešlo z citrátu do haemoglobinu dárců krve a tím i do krvinek jejich krve. Krvinky dárců krve byly tím zvláště „označeny“ a vzhledem k dlouhému poločasu radioaktivního železa  $^{55}\text{Fe}$  staly se rozlišitelné od krvinek osob, u nichž byla provedena transfuse s krví obsahující „označené“ krvinky. U takových osob byly bezprostředně po transfusi prováděny v pravidelných časových intervalech zkoušky krve tím způsobem, že aktivita vzorků jejich krve byla měřena velmi citlivými Geigerovými a Mullerovými počítacími. Z aktivity krve osob po transfusi můžeme usouditi, kolik krvinek z přenesené krve v jejich krevním oběhu dále žije. Má-li míti transfuse žádaný účinek, musí 70% z přenesených červených krvinek zůstat v krevním oběhu léčené osoby aspoň 48 hodin po provedené transfusi. Bylo totiž zjištěno, že červené krvinky, které konservací a transportem utrpěly na životnosti, byly z krve léčených osob během dvou hodin po transfusi vyloučeny. Radioaktivní isotop železa přispěl tak k rozřešení jednoho z mnoha velmi důležitých problémů lékařství.

Dalším důležitým radioisotopem pro lékařství je radiofosfor  $^{32}\text{P}$ . Byl aplikován při léčení leukemie, při které, jak známo, počet bílých krvinek abnormálně vzrůstá. Léčení leukemie užitím radiofosforu začal prováděti J. H. Lawrence se svými spolupracovníky. Tato nemoc byla dosud léčena ozařováním nemocného paprsky X nebo  $\gamma$  a možno říci, že v lehkých případech má tento postup úspěch v tom smyslu, že udržuje nemocného v poměrně dobrém stavu. Způsob léčení paprsky X nebo  $\gamma$  má však tu nevýhodu, že ozařování nepůsobí selektivně, t. j. pouze na bílé krvinky, nýbrž působí na celé tělo, takže se může státi, že nemocný začne míti větší obtíže způsobené ozařováním než leukemií. Kdyby se však podařilo užití radioaktivní sloučeniny, která by vysílala paprsky  $\beta$  a která by se zároveň absorbovala nebo vážala v leukemických bílých krvinkách, pak by mohlo býti užito silnějších dávek ozařování, neboť paprsky  $\beta$  vysílá takovou látkou by atakovaly pouze nemocné buňky a jejich destrukční činnost by se omezovala pouze na malou oblast, kde je to žádoucí. Lawrence si všiml především skutečnosti, že fosfor jeví snahu hromaditi se v kostech. Pokusy, které vykonal společně s Efrema Tuttleem, studoval absorpci fosforu v kvasnicích nacházejících se v různých prostředcích a dále ukládání radiofosforu u leukemických myší. Experimenty ukázaly, že fosfor má snahu koncentrovati se v leukemických buňkách a v důsledku toho se jeví jakožto prvek, jehož by se dalo používat pro selektivní ozařování paprsky  $\beta$ , které při svém rozpadu vysílá. Léčení leukemie radiofosforem bylo provedeno s dobrým výsledkem u pacientů, kteří byli stíženi poměrně lehkou formou této nemoci. Byli radiofosfor podáván takovým nemocným v intervalech několika týdnů, bylo možno konstatovati, že nemocnému se dařilo docela dobře a byl ušetřen nepříjemných následků častého ozařování paprsky X nebo  $\gamma$ .

Při polycythémii, kdy je v krvi nadbytek červených krvinek, předčí léčení radiofosforem ostatní metody, neboť zasahuje přímo centra tvoření červených krvinek a redukuje jejich počet na průměrnou míru.

1. E. V. Špolskij, Atomnaja fizika, I. díl, 1949 II. díl 1950, Gosudarstvennoje izdatel'stvo techniko-teoretičeskoj literatury, Moskva.
2. M. Livingston, M. Rose i M. Namiac: Ciklotron, Pěřevod pod redakciěj. P. A. Čerenkova, Gosudarstvennoje izdatel'stvo techniko-teoretičeskoj literatury, Moskva 1948.
3. L. Landau a E. Lifšic, Kvantovaja Mechanika, I. díl 1948, Gosudarstvennoje izdatel'stvo techniko-teoretičeskoj literatury, Moskva.
4. V. Petržílka, Umělá přeměna prvků a atomová energie, ESČ, Praha 1947. (Druhé vydání se připravuje.) Atomové reaktory, Elektrotechnický obzor, 39, 185, (1950)
5. V. Santholzer, Mírové využití atomové energie, Melantrich, Praha 1949.
6. C. Goodman, Science and Engineering of Nuclear Power, Addison-Wesley Press, Cambridge (USA), I. díl 1947.
7. F. Dessauer, L'énergie atomique et ses applications, Editions de la Baconnière, Neuchatel, II. vydání 1947.
8. F. Heijn, Nature, 138, 723 (1936), Physica, 4,160 (1937)
9. M. L. Pool, J. M. Cork a R. Thornton, Phys. Rev., 52 41, 239 (1937)
10. E. Fermi, Nature, 133, 898 (1934).
11. E. Amaldi, O. D'Agostino, E. Fermi, B. Pontecorvo, F. Rasetti, E. Sergé, Proc. Roy. Soc. A 149, 522 (1935).
12. O. Hahn a F. Strassmann, Naturwissenschaften, 26, 755 (1938).
13. I. Curie a L. Savitch, Journal de Physique, 9, 355 (1938).
14. O. Hahn a F. Strassmann, Natuwissenschaften, 27, 11 a 89 (1939).
15. D. Corson a R. Thornton, Phys. Rev., 55, 509 (1939).
16. J. D. Cockcroft, Clayton Lecture, proslovená 10. 6. 1947 v Institution of Mechanical Engineers.
17. M. H. Kanner a H. Barschall, Phys. Rev. 57, 372 (1940).
18. H. A. Bethe, Phys. Rev. 54, 248 (1938); 55, 434 (1939).
19. G. Lacoste, Sciences et avenir, č. 39, 195 (1950).
20. Rev. Sci. Instr. 18, 688, (1947).
21. L. A. Ohlinger, Nucleonics, 5, 6, 38 (1949), 6, č. 1, 10, 2, 54, 3, 15, (1950).
22. P. Wessel, Elektrizitätsverwertung, 25, 23, (1950).
23. C. G. Suits, Electrical Engineering, 69, 523, (1950).
24. The Harwell Atomic Energy Research Establishment, Engineering 166, 4305, str. 109 (1948).
25. J. R. Cockcroft, Endeavour, 9, č. 34, 55 (1950).
26. F. Joliot-Curie, Les atomes, 4, č. 35, 39, (1949).
27. C. Goodman, Nucleonics, 4, č. 2, 2, (1949).
28. A. Gemant a H. M. Archer, Nucleonics, 3, č. 1, 40 (1948).
29. J. M. Harrer, Nucleonics, 6, č. 3, 58 (1950).
30. L. B. Borst, Nucleonics, 5, č. 6, 66 (1949).
31. E. Pollard a W. L. Davidson, Applied Nuclear Physics, J. Wiley, New York (1945).
32. A. Ströhl a M. Berger, Les Isotopes radioactifs en biologie, Masson et Cie, Paříž, (1946).
33. M. D. Kamen, Radioactive tracers in biology, Academic Press, New York (1948).
34. M. Blau a J. R. Carlin, Electronics, 21, č. 4, 78, (1948).
35. Les atomes, 4, č. 35, 59, (1949).
36. Ch. Rosenblum, Nucleonics, 6, č. 4, 25, (1950).
37. O. J. M. Smith, Electronics, 20, č. 10, 107, (1947).
38. I. Feuer, Analytical Chemistry, 20, 1231, (1948).
39. A. Morrison, Nucleonics, 5, č. 6, 19, (1949).
40. I. Curie-ová—Joliot-ová, Journal de Physique.
41. G. A. Boyd, Nucleonics, 4, č. 1, 40, (1949).
42. J. I. Burwell, Nucleonics, 1, č. 4, 38, (1947).
43. J. I. Burwell a S. F. Murray, Nucleonics, 6, č. 1, 34, (1950).
44. R. E. Fearon, Nucleonics, 4, č. 4, 67 (1949).

45. R. E. Fearon, *Nucleonics*, 4, č. 6, 30 (1949).  
 46. K. J. Mc Callum, *Nucleonics*, 5, č. 1, 11, (1949).  
 47. H. R. V. Arnstein a R. Bentley, *Nucleonics*, 6, č. 6, 11 (1950).  
 48. G. Hevessy, *Philosophical Magazine*, 23, 628 (1912); *Physikalische Zeitschrift*, 13, 715 (1912).  
 49. T. C. Evans, *Nucleonics*, 2, č. 3, 52, (1948).

# Tvorba pribudliny pri spracovaní melasy na lieh

DEZIDER TOMEČEK

## I. Úvod.

Po takmer 25-ročnej prestávke sa v poslednom čase znovu vynorila otázka, akým spôsobom by sa mohla dosiahnuť zvýšená tvorba pribudliny pri skvasovaní cukru na etylalkohol. Príznačné je, že chemizmus tvorenia pribudlinových súčiastok bol už pred 40 rokmi uverejňovaný, vie sa teda, že vyššie alkoholy vzniknú pri kvasení z aminokyselín, poznáme aj ľahko prístupné látky, ktoré obsahujú tieto aminokyseliny, ale pri všetkých uskutočnených pokusoch ostal problém zvýšenia výťažku pribudliny v priemyselnej praxi predsa cez desaťročia otvorený.

Reflexom na vyššie spomenutú otázku, položenú kompetentnými činiteľmi liehového priemyslu, pokúsime sa zaoberať v nasledujúcej štúdií podmienkami tvorby pribudliny, vyvodit' si najpravdepodobnejší obraz priebehu tejto tvorby, poukázať pritom na príčiny, pre ktoré sa očakávané výsledky uprednostenia tvorby nedosiahly.

## II. Složenie a pôvod pribudliny.

Surový lieh, vydestilovaný na koncentrácii asi 90° Tr. z vykvasenej melasovej zápary, obsahuje na 100 l abs. alkoholu okolo 0,4 kg tzv. pribudliny sp. v. 15/15 Cels. = 0.840, ktorá sa pri rafinačnom procese akumuluje na tých dnách spodnej časti rektifikačnej kolóny, kde koncentrácia alkoholu dosahuje cca 45% v a oddeľuje sa pri rafinácii surového liehu ako najťažšia frakcia. Táto melasová pribudlina pozostáva podľa údajov Boowelt-Gooderhauna z

amylalkoholu	76%
butylalkoholu	12%
propylalkoholu	4%
esterov	3%
etylalkoholu a vody	5%

t. j., obsahuje spolu okolo 90% vyšších alkoholov, vyjadrených často jednotne ako amylalkohol, ktorý má medzi nimi čo do množstva prevahu.