



Rentgenové záření jako diagnostický prostředek materiálového inženýrství a nanotechnologie

X-ray as diagnostics means of materiál engineering and nanotechnology

115 let od objevu, 110 let od udělení 1. Nobelovy ceny za fyziku

115 years from the discovery and 110 years from the award trough the first Nobel Prize for physics

Lubomír SODOMKA, Adhesiv,TUL Liberec

Abstrakt

From the discovery of X-rays in the year 1895 by W.C.Roentgen has been gone over more then 115 years. For this discovery W.C.Roentgen has been awarded trough first Nobel prize for physics in the year 1901. The fundamental properties of X-rays have been determined their linear propagating and penetrating trough materials and with electromagnetic radiation identified. Further wave properties as diffraction, interference and others have been discovered later (1914 M.v.Laue, 1915 Braggov0, 1917 Barkla, 1927 Compton, 1962 DNA, 1979 CT). The important application in NDT technique is diffraction, which is also the fundamental for the for the physics of condensed state. The important application of X-ray is in medicine as well as in technique. The contribution to the development of x-ray physics a its application of Czech scientist is being also presented.

Abstrakt

Od objevu rentgenového záření (rtgz) ke konci října roku 1895 uplynulo již 115 let. Význam objevu rentgenového záření Wilhelmem Conradem Röntgenem byl potvrzený ihned po objevu snímkem se zviditelněnou kostrou ruky a první Nobelovou cenou (NCF) za fyziku v roce 1901. Tím vzniklo další výročí, a to 110. od udělování Nobelových cen. Rentgenové záření získalo ihned využití v medicíně. Během vývoje byly objevené další vlastnosti rentgenového záření, které našly využití ve vědě i technice. Šlo nejprve o vlastnosti zjištěné již samotným Röntgenem jako je jeho přímočaré šíření, absorpce různými materiály a jeho užití k diagnostice v lékařství i materiálech. Další objev vlnových vlastností jako je difrakce (NCF M.von Laue 1914, Braggové1915.) a polarizace (NCF Ch. Barkla, 1917) a rozptyl rentgenového záření (NCF Compton,1927). Mezi další objevy vlastností rtg záření byla jeho interference. Rentgenové difrakce se užívá k určování struktury látek. Vlnové vlastnosti rtg záření prokázaly, že jde o elektromagnetické záření o vlnových délkách v oblasti $2 \cdot 10^{-3} \text{ nm}$ až $1 \cdot 10^{-2} \text{ nm}$ Mezi významné aplikace rtgz patří bezesporu zjištění dvojspirálové struktury molekul DNA (DNK) (Crick, Watson, Wilkins NCFM 1962). Další významnou aplikací rtg záření v medicíně využívající zprvu rentgenového záření je i počítačová tomografie (CT, A.Cormack, NC1979), využívána v lékařské diagnostice. Nechybí ani rentgenové lasery (xasery). V poslední době se objevila další rentgenová nanodiagnostika nazvaná ptychografie, což je bezčočkové zobrazování rentgenovým zářením. Došlo i k využití rentgenového záření v kosmu zobrazováním jeho zdrojů a založení rentgenové astronomie.

Také v ČSR se pěstovala fyzika a využití rentgenového záření téměř od samého začátku po objevu. Mezi významné pracovníky v tomto oboru je možné zařadit na KU v Praze prof. Dolejška, Kunzla, ve Škodových závodech A.Kochanovskou, J Bačkovského, kteří vchovali alespoň dvě generace následovníků. Fyzika rentgenového záření se pěstovala jak na vysokých školách, výzkumných ústavech , tak i na větších závodech. Přístrojové vybavení zajišťovala v ČSSR firma Chirana Praha Modřany.

Účelem tohoto příspěvku je ukázat, jak velký vliv měl objev rtg záření na rozvoj vědy, techniky a společnosti a jak společnost obohatil a tím i nepřímo ukázat především na vliv NC za fyziku, chemii a medicínu a fyziologii, nanedstruktivní diagnostiku a na život celé společnosti.

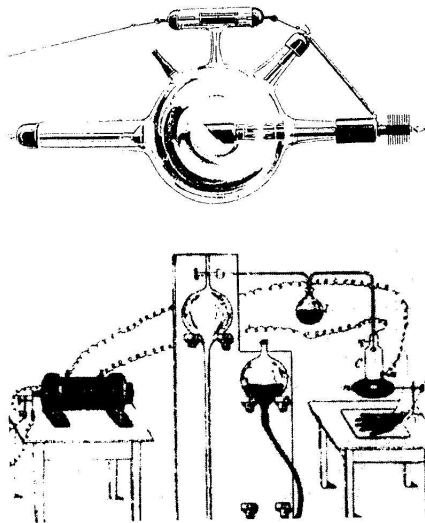
1. Úvod

I když v kosmickém prostoru je atmosféra tvořena také rentgenovým zářením, musela být tato skutečnost zjištěna až po objevu rtg záření v laboratoři na zemském povrchu. To se stalo ke konci října v roce 1895 mimo jiné i na Würtzburšské univerzitě v laboratoři W. C. Röntgena. Ten konal pokusy s výboji v plynech. K tomu užíval trubici Crooksova typu. V trubici byly umístěny tři elektrody katoda, antikatoda a anoda. Antikatoda a anoda byly elektricky propojené a mezi katodou a anodou bylo připojované napětí nad 10kV (obr.1). V horní části je původní Röntgenova trubice. Vlevo je katoda, vpravo antikatoda a anoda. Nahoře je tlakoměr plynu v trubici, která je čerpaná. Celková uspořádání Röntgenovy aparatury je ve spodní části obr.1

I když sám Röntgen zjistil řadu významných vlastností vedoucích bezprostředně k využití v lékařství, bylo třeba ještě dalších objevů, zvláště pak vlnových vlastností rtg záření, a to difrakce, polarizace a interference, což bylo předmětem dalších NC za fyziku. Kromě toho se začaly vlastnosti rtg záření využívat téměř ve všech oborech vědy a techniky. Z podstatných aplikací rtg záření je třeba ještě v úvodu uvést vyřešení struktury molekul deoxyribonukleové kyseliny (DNK, DNA), které mají výjimečný význam při studiu dědičnosti živých organismů (NC Crick, Wilkins, Watson 1962, [1], [2]) a vynález rentgenové tomografie (Cormack NC 1979, [1], [2]). Jinak využití rtg záření vedlo k četným patentům a výrobě rtg přístrojů a zařízení využívaných v lékařství k určování struktury materiálů rentgenovými spektrálními a difrakčními metodami.



Conrad Wilhelm Röntgen



Obr.1

Obr.1 Röntgenova trubice, která se v dnešní technické podobě nazývá rentgenka, horní část obr.1. V dolní části je celková Röntgenova aparatura. V levé části obrázku je zdroj vysokého napětí, induktor, ve středu čerpací aparatura, vpravo rentgenka se zobrazovanou rukou na fotodesce.

2. Prehistorie objevu rtg záření

Prehistorie rtg záření začíná studiem výbojů v plynech, kterými se zabývala velká většina významných fyziků a významných laboratoří v Německu, Anglii a Francii již od roku 1850. Patřila mezi ně taková jména, která se vyskytují v učebnicích, jako W. Crooks, J.W.Hittorf, H. Hertz, P.Lenard, N.Tesla, T.Edison, J.J.Thomson a řada dalších. Výboje v plynech studovali ve vyčerpaných trubcích s vnitřními elektrodami, které vynalezl Crooks. K objevu rtg záření měla velmi blízko celá řada z uvedených fyziků, zabývajících se hlavně katodovým zářením, které bylo identifikované jako proud záporně nabitých částic, elektronů. Nebylo jednoduché vedle podobných účinků katodového záření oddělit nový typ záření.

3. Z historie rtg záření

W. C. Röntgen po příchodu na Würzburgskou univerzitu, kde se stal ředitelem laboratoře se ihned pustil do výzkumné práce ve výbojích v plynech. Navázal na práce Lenarda a Hertze ve studiu katodového záření. Lenard opatřil výbojovou trubici tenkou hliníkovou folií, takže katodové paprsky pronikaly ven z trubice a způsobovaly luminiscenci v jejím okolí do vzdálenosti 30 až 80mm. Zatímco paprsky sledované Röntgenem pronikaly do mnohem větší vzdálenosti než paprsky katodové a nebylo je možné odchylovat magnetem.Röntgen si uvědomil, že jde o nový typ záření, které nazval paprsky X. Röntgen začal zkoumat jejich vlastnosti a zjistil: šíří se přímočaře pronikají materiály, pro jiná známá záření nepropustné, pronikají i lidskou tkání a jsou schopné zobrazit i část kostry, jak dokázal na snímku ruky na obr.2. v uspořádání na obr.1. Na něm jsou zobrazeny části kostry ruky spolu s prstenem. To svědčí i o přímočařem šíření paprsků X, které byly později nazvané v některých státech na jeho počest rentgenovým zářením a o různé absorpci v materiálech. Objev rtg záření dal

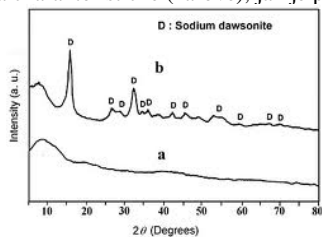
podnět k objevům dalších druhů záření, což se podařilo A.Bequerelovi objevem záření uranových solí, které nazval záření beta (NCF 1902) a manželům Curieovým objevem radiaktivního záření (NCF 1903).



Obr.2 Snímek ruky rentgenovým zářením, který dal okamžitý podnět k využití v lékařské diagnostice. Expoziční doba byly v té době kolem jedné hodiny.

4. Vlastnosti rtg záření

Röntgen na základě experimentu si sám odpověděl na otázky: 1. Šíří se rtg záření přímočaře? 2. Podléhá zákonu lomu a odrazu? 3. Liší se od katodových paprsků? 4. Jde o záření částic nebo o elektromagnetické vlnění? Odpovědi : Rtg. záření se šíří přímočaře, jak dokazuje projekce ruky. Zákon lomu ani odrazu neprokázal. Prokázal však, že jde o jiný druh záření než je záření katodové. Katodové záření odchyluje magnet, rtg. ne. Rtg. záření proniká masivnímu tloušťkami materiálů, zatímco katodové jen tenkými foliemi hliníku a do krátkých vzdáleností. Postupně byly zkoumány další vlastnosti rtg záření. Ukázalo se, že rtg. záření je příčné elektromagnetické vlnění o krátkých vlnových délkách od zlomků po stovky nanometrů na základě jeho difrakce a byly potvrzeny i jeho interferencí na krystalové mřížce a polarizací, jak bude ukázáno v dalším textu. Spektrum rtg. záření je spojitě (brzděné) a charakteristické (čárové), jak je patrné z obr.3. Na něm je také vidět, že spojitě spektrum rtg.

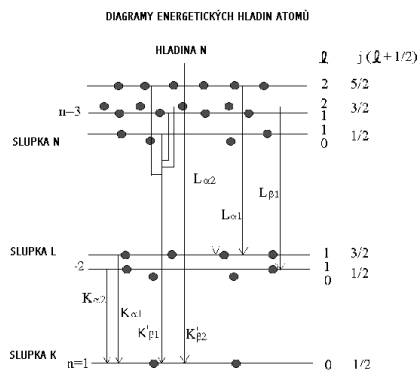


Obr.3. Spojitě (a) a čárové (b) spektrum rtg záření

záření vzniká až při určitém kritickém potenciálu U_k , který určuje krátkovlnovou hranici rtg záření, vystupující z rentgenky. U_k je určené mechanismem, kdy elektrostatická energie elektronu eU_k s přeměnění celá na foton rentgenového záření, takže

$$h\nu_k = eU_k, \quad \nu_k = c/\lambda_k, \quad \lambda_k(\text{nm}) \approx 1,2345/U(\text{kV}) \quad (1)$$

Ve vztahu (1) je h Planckova konstanta $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ J.s, c je rychlost světla $c = 2,997 \cdot 10^8$ m/s, ν_k a λ_k jsou kritická frekvence a krátkovlnová hranice rtg záření je napětí na elektrodách rentgenky. Zatímco spojitě (brzděné) záření vzniká klasicky zabrzděním náboje elektronu na anodě, čárové spektrum vzniká podobně jako spektrální čáry světla přechodem na vnitřní



Obr.4 Hladiny energetických hladin k výkladu rtg čárových spekter energetické hladiny atomů K, L, M, N, ...

4.1 Absorpce

Absorpce (pohlcování) rtg. záření patří mezi nejjednodušší a přitom nejrozšířenější využití rtg. záření, a to především v diagnostice materiálů a v medicíně. Využívání absorpce v lékařské diagnostice bylo zahájeno jen několik dní po jeho objevu pořízením zobrazení ruky na obr.2. Metoda je založena na různé absorpci materiálů definované exponenciálním Lambertovým- Beerovým zákonem ve tvaru

$$I(x) = I(0) \exp(-\mu x) \quad (1)$$

kde $I(0)$ je intenzita dopadajícího záření o lineárním absorpčním součiniteli μ procházejícím tloušťkou materiálu x a má na výstupu hodnotu $I(x)$, jak znázorňuje obr.5. Pro teoretický výpočet absorpčního součinitele je výhodnější hmotový součinitel absorpce $\mu_h = \mu/\rho$, kde ρ je objemová hmotnost (hustota) absorbovaného materiálu. Výhoda hmotového absorpčního součinitele spočívá v tom, že při zastoupení atomů o protonovém čísle Z_x, Z_y, Z_u v materiálu je možné spočítat hmotový absorpční součinitel užitím vztahu, který je lineární kombinací jednotlivých hmotových součinitelů v materiálu přítomných atomů o protonovém čísle $Z_{x,y,u}$

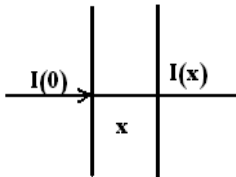
$$\mu_h(Z_x, Z_y, Z_u) = X \mu_h(Z_x) + Y \mu_h(Z_y) + U \mu_h(Z_u) + \dots \quad (2)$$

kde X, Y, U jsou relativní hmotnostní zastoupení prvků $Z_{x,y,u}$ v látce o hmotovém absorpčním součiniteli $\mu_h(Z_x, Z_y, Z_u)$. Hmotový absorpční součinitel závisí na vlnové délce a na protonovém čísle Z v materiálu přítomných atomů empirickým vztahem:

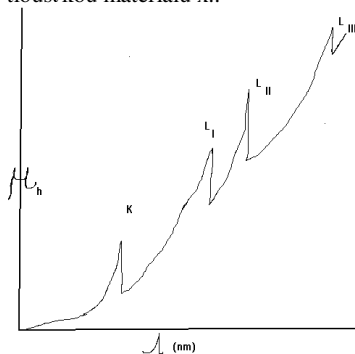
$$\mu_h = k \lambda^n Z^m, \quad (3)$$

v němž $n \sim 3$ a $m \sim 4$. Průběh $\mu = \mu(\lambda)$ není tak monotonní podle (3), ale pro vlnové délky serie K, L, M, N dochází

ke skoku v závislosti $\mu(\lambda)$, jak znázorňuje obr.6.



Obr.5 K zákonu absorpce $I(0)$ intenzita dopadajícího záření, $I(x)$ intenzita prošlého záření tloušťkou materiálu x .



Obr.6. Nemonotonní průběh $\mu = \mu(\lambda)$

Hmotový absorpční součinitel ukazuje, že na absorpci rtg. záření se podílí pouze zastoupení jednotlivých prvků bez ohledu, jak jsou navzájem vázané. Na absorpci se a tedy i v absorpčním činiteli μ podílejí jednak vlastní absorpce, kdy se rtg. záření přemění v jiné formy energie nejčastěji v tepelnou a z látky nevystupuje a na složku rozptylu, kdy se záření odchýlí od původního směru a do něho pak již při výstupu z materiálu nepřispívá.

Zákony absorpce neprokázaly jednoznačně částicový či vlnový charakter rtg. záření.

4.1 Lom, odraz

První pokusy zjistit lom a úplný odraz byly neúspěšné. Byly prováděné na hranolu vytvořeném z vodného roztoku bisulfidu uhlíku v obalu slídy. Rovněž i čočky vytvořené z ebonitu lom neprokázaly [3]. Také úplný odraz rtg záření nebyl z počátku zjištěný. Drude – Lorentzovou teorií bylo později prokázáno, že index lomu n_L se liší od jedničky pouze v pátém až šestém řádu, takže

$$n_L = 1 - \delta, \delta \approx N e^2 / 2\pi m v^2 \approx 1,67 \cdot 10^{-6} \quad (3)$$

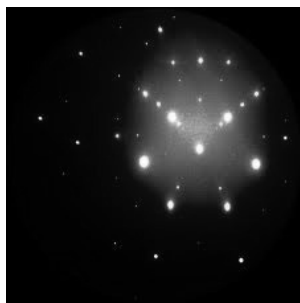
N je počet elektronů v jednotce objemu, e náboj, m hmotnost elektronu, v je frekvence rtg záření $v \approx 10^{18} \text{ Hz}$ [4]. Tato malá odchylka svědčí o tom, že lom rtg záření je velmi těžko měřitelný. Rovněž i mezní úhel úplného odrazu je velmi malý, takže i úplný odraz je těžko pozorovatelný.

4.2 Difrakce

Jev, který prokázal vlnový charakter rtg záření byla jeho difrakce (ohyb) na krystalové mřížce. S myšlenkou použití difrakce rtg záření na krystalové mřížce přišel Max von Laue (obr.7) předpokládaje, že vlnové délky rtg záření jsou srovnatelné s mezimřížkovými vzdálenostmi v krystalech. Experiment, který dokázal difrakci na krystalech modré skalice uskutečnili v roce 1912 W Friedrich a P.Knipping se spojitým rtg zářením a získali difrakční obrazce jejichž souměrnost odpovídala souměrnosti krystalu (obr.8). M.von Laue získal NCF pro rok 1914 a je zajímavé, že Friedrich a Knipping, který experiment uskutečnili, se na něj nepodíleli a bez nich by k objevu nedošlo.



Obr.7. Max von Laue



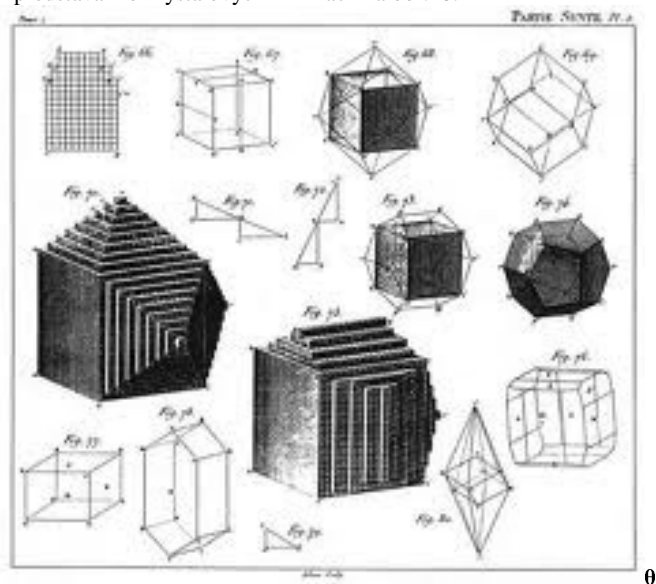
Obr.8. Difraktogram

Podrobnosti myšlenkových pochodů, které vedly k objevu difrakce rtg záření na krystalové mřížce lze nalézt ve vlastní excelentní a stručné publikaci M.von Lauea [5].

Důležitým výsledkem Laueova objevu byla získaná souvislost mezi rtg zářením a krystalovou mřížkou. Difrakce rtg záření na krystalu prokázala 1.vlnovou podstatu rtg záření 2.souměřitelnost vlnové délky a rozměru periodicity krystalové mřížky, 3. difrakční rovnice umožnily měřit mřížkové parametry, 4. difrakce na známé krystalové mřížce umožňuje provádět rtg spektrální analýzu chemikálií, která je mnohem jednodušší než optická spektrální analýza.

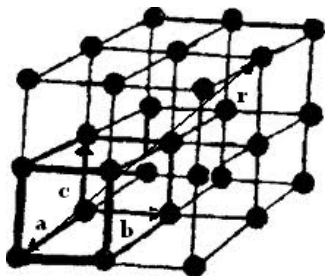
4.2.1 Základní představy krystalové struktury a její popis

Ve vědě platí zásada, že náhoda přeje připraveným. Max von Laue nenechával však nic náhodě. Sledoval ze zájmu výsledky krystalografie, která již prostřednictvím René-Just Haüy od roku 1784 přišla s periodickou představou struktury krystalů a vytvořila zákon racionálních indexů, který později vedl k zavedení Millerových indexů, tj. třech celých čísel k označování krystalových rovin. Krystalové roviny jsou roviny vytvořené mřížkovými body v krystalové rovině. Haüyovy představy o stavbě krystalů jsou uvedené na obr.9, které vedly k představám o krystalových mřížkách na obr.10.

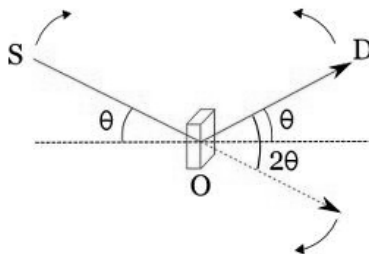


Obr.9. Haüyovy představy o stavbě krystalů.

Z těchto představ vznikla postupně mřížková struktura krystalů uvedená na obr.10.



Obr.10



Obr.11

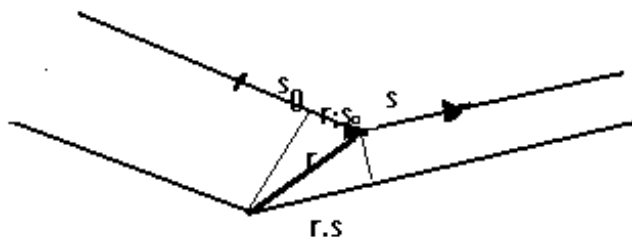
Obr.10. Hypotetická struktura krystalové mřížky, která byla experimentálně potvrzena difrakcí rtg záření navrženou M.von Lauem. Obecná mřížka krystalů. **a,b,c** mřížkové parametry, **r** polohový vektor mřížkového bodu $\mathbf{r} = m \mathbf{a} + n \mathbf{b} + o \mathbf{c}$, m,n,o celá čísla."

Obr.11. Podstata pokusu difrakce rtg záření. S dopadající paprsek, O krystal, D difraktovaný paprsek odchýlený od S o úhel 2θ . Slouží k určení Lauovy difrakční rovnice.

Podstatou difrakce rtg záření bylo určit hodnoty mřížkových parametrů a, b, c v obr.10. Laueova hypotéza spočívala v předpokladu, že mřížkové parametry tvořící krystalovou mřížku a vlnová délka rtg záření λ jsou v hodnotě srovnatelné tj. $a, b, c \approx \lambda$. Podstata důkazu difrakce je na obr.11. K určení kvantitativních vztahů $a, b, c \approx \lambda$ je třeba vyjádřit difrakční podmínku. K tomu vybereme dva mřížkové body z mřížky na obr.10 v bodech $\mathbf{r} = \mathbf{0}$ a $\mathbf{r} = \mathbf{m}\mathbf{a} + \mathbf{n}\mathbf{b} + \mathbf{o}\mathbf{c}$, jak znázorňuje obr.12 a určíme difrakční podmínku pro libovolné body mřížky $\mathbf{r} = \mathbf{m}\mathbf{a} + \mathbf{n}\mathbf{b} + \mathbf{o}\mathbf{c}$. (4)

Na krystalovou mřížku dopadá záření ve směru určeném jednotkovým vektorem \mathbf{s}_0 a vystupujícím po difrakci ve směru o jednotkovém vektoru \mathbf{s} . Vystupující paprsek splňuje difrakční podmínku, je-li dráhový rozdíl obou paprsků L rovný celému počtu n vlnových délek λ , takže platí

$$L = \mathbf{r} \cdot \mathbf{s} - \mathbf{r} \cdot \mathbf{s}_0 = \mathbf{r} \cdot (\mathbf{s} - \mathbf{s}_0) = n\lambda \quad (\text{obr.12}) \quad (5)$$



Obr. 12. K odvození Laurových rovnic a Braggovy rovnice.

Dosazením za \mathbf{r} ze (4) a \mathbf{S} za $\mathbf{S} = (\mathbf{s} - \mathbf{s}_0)/\lambda$, upravíme rovnicí (5) na

$$(\mathbf{m}\mathbf{a} + \mathbf{n}\mathbf{b} + \mathbf{o}\mathbf{c}) \cdot \mathbf{S} = n, \text{ kde } n \text{ je celé číslo, řád difrakce.} \quad (6)$$

Po dosazení za \mathbf{r} postupně mřížkové vektory $\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c}$, dostáváme trojici rovnic představujících difrakci na třech lineárních mřížkách jako v optice:

$$a (\cos(\mathbf{a}, \mathbf{s}) - \cos(\mathbf{a}, \mathbf{s}_0)) = n_a \lambda \quad (7)$$

Vztahy (7) jsou Laueovy rovnice. Rozepsáním skalárního součinu vztahu (6) a uvážením, že podle obr. 12 je $l/(\mathbf{s} - \mathbf{s}_0) = 2\sin\theta$ a výrazy $a(\cos(\mathbf{a}, (\mathbf{s} - \mathbf{s}_0)))$ určují mezivzdálenost d soustavy rovnoběžných rovin, na kterých dochází k difrakci (k reflexi (obr.11)), takže výsledkem je jednoduchá rovnice, nazývaná Braggova rovnice, která vysvětluje mechanismus difrakce ve spojení s obr.11 jako odraz na krystalových rovinách o mezivzdálených vzdálenostech d a je tvaru

$$2d \sin\theta = n\lambda, \quad (8)$$

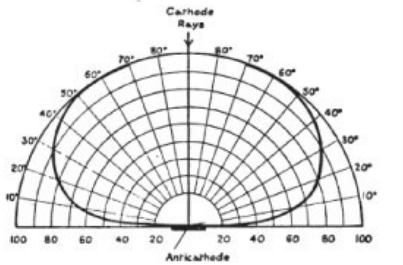
v níž n je celé číslo, řád difrakce.

Za výklad mechanismu difrakce jako reflexe na rovnoběžných krystalových rovinách o mezirovinových vzdálenostech d získali otec a syn Braggové Nobelovu cenu za fyziku pro rok 1915. Difrakce prokázala, že rtg záření je vlnový děj, zda jde o podélné nebo příčné vlnění rozhodla teprve až polarizace záření.

Ukážeme, že další objevy kolem rtg záření vedly také k dalším Nobelovým cenám za fyziku. A jejich aplikace k Nobelovým cenám za medicínu a vytvoření nového oboru rentgenové astronomie.

4.3 Polarizace

Z difrakčních experimentů není zřejmé, zda prokázané vlnění rtg záření je podélné nebo příčné. Důkazu se ujal Ch.G. Barkla v roce 1905. Soustavou clonek a orientaci rentgenky vzhledem ke katodovému záření prokázal jeho polarizaci, naměřenou na obr.13



Obr.13 . Naměřená polarizace rtg záření jako důkaz příčného vlnění.

Za tento důkaz byla udělená Bartlovi Nobelova cena za fyziku v roce 1917, což byla třetí NC za fyziku v oblasti rtg záření. Následovaly však i další.

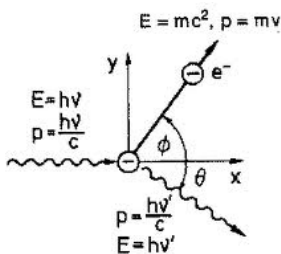
4.4 Rozptyl

V článku 4.1 o absorpci bylo zmíněno o tom, že se na absorpci podílí i změna směru záření uvnitř absorbátoru, rozptyl rtg záření. Jedním z mnoha mechanismů rozptylu rtg záření je Comptonův jev (rozptyl). Význam tohoto jevu spočívá v tom, že jej lze vyložit také částicově a využít k teorii mechanismu srážek v mechanice. Foton rtg záření jako částice narazí na elektron (obr.13) a na základě zákonů zachování hybnosti a energie lze již odvodit vztah pro úhel rozptylu θ , který se shoduje s úhlem naměřeným Comptonem [6], [7] a naměřenou vlnovou délkou λ' :

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = (h/mc) \sin^2 (\theta/2), \quad (9)$$

m je hmotnost elektronu, λ' je vlnová délka rozptýleného, která se rozptylem prodlužuje. Comptonův rozptyl je fyzikálně důležitý, neboť ukazuje na částicově (korpuskulárně) vlnový dualismus rtgz.

Za takto významný objev a jeho teoretický výklad získal Compton další Nobelovu cenu za fyziku pro rok 1927 v oboru rentgenového záření.

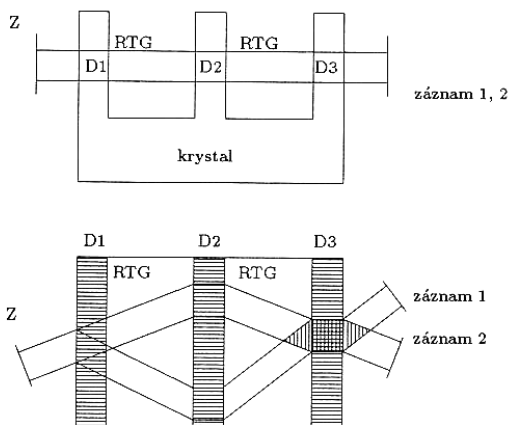


Obr.13. K výkladu mechanismu Comptonova jevu.

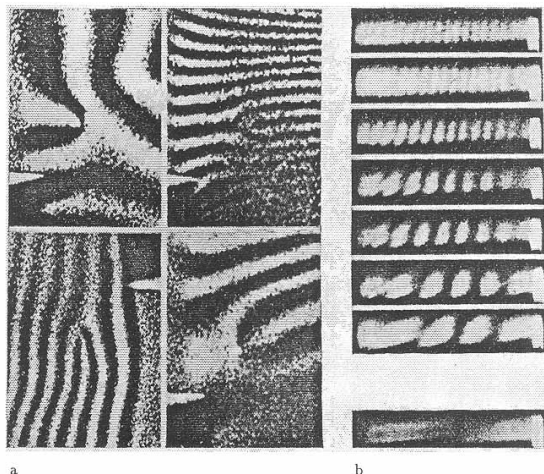
4.5 Interference

Interference rtg záření patří rovněž jako difrakce k potvrzení jeho vlnových vlastností. Uskutečnění rtg interference není však tak jednoduché jako difrakce. Podobně jako ve vlnové optice došlo k uskutečnění rtg interference mnohem později až po 41 letech v roce 1963 po difrakci. K interferenci rtg. záření byly použity analogie z optiky, a to odraz na krystalové mřížce a analogie Youngova pokusu. Tyto experimenty uskutečnili Hart a Bonze s použitím dokonalých krystalů křemíku. Podstatu takového rtg interferometru pochopíme z obr.14. Rtg. interferometr je tvořen blokem dokonalého krystalu křemíku, na němž jsou vyfrézované destičky tak, aby jejich silně difraktující roviny byly kolmé k jejich povrchu a tvořily s původním blokem krystalu kompaktní celek [8].

Dopadá-li monochromatické rtg záření na přední destičku pod Braggovým úhlem, je záření rozděleno na dvě části, procházející a difraktovanou. Tyto oddělené svazky dopadají na druhou destičku, která je po difrakci přivede opět do společného prostoru. Poněvadž jde o koherentní svazky, nastává v tomto prostoru interference. Interferometrem lze získat tzv. moaré obrazce stočením nebo posunutím třetí destičky v bloku. Takovým interferometrem lze



Obr.14. Rtg. interferometr (Z - zdroj rtg. monochromatického záření, $D1$, $D2$, $D3$ -destičky vystupující z jednoho bloku krystalu obvykle křemíkového, RTG - svazky rtg. záření)

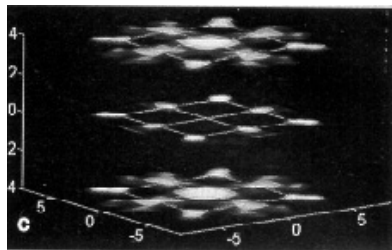


Obr.15. Moiré obrazce vzniklé na dislokacích v destičce monokrystalu,
 b) moiré obrazce při stočení destičky $D3$ vzhledem k $D1$ a $D2$

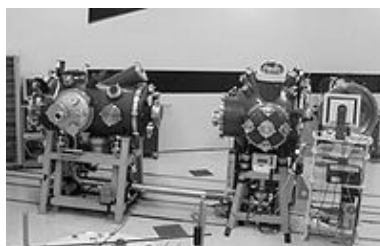
dosáhnout přesnosti v měření mezivinových vzdáleností až 10^{-8} m a v měření úhlů až $0,1''$. Podrobnosti o rtg interferometrii najde čtenář např. v [8].

4.6 Xasery

Název xasery užíváme pro kvantové generátory koherentního rtgz, které se nazývají také rentgenové lasery. Jsou obdobou laserů, kvantových generátorů ve světelné oblasti. Jak vyjadřuje teorie těchto koherentních zdrojů pravděpodobnost jejich realizace klesá s rostoucí třetí mocninou jejich frekvence a tedy s třetí mocninou jejich převrácené vlnové délky. Přes tyto nepříznivé podmínky, došlo k realizaci těchto zdrojů vysoko energetického záření. Kromě toho je možné jejich použitím uskutečnit rentgenovou holografii, která umožní přímé pozorování dynamiky krystalové mřížky, jak o tom snili fyzici pevných látek. To se uskutečnilo tzv. vnitřní holografií [8]. Snímek pořízený touto metodou je zachycený na obr.16.



Obr.16. Rentgenový hologram krystalové mřížky $SrTiO_3$ [?]



Obr.17. Laserové zařízení v Praze

Dnes existují velké a vysoko výkonové xasery pro diagnostiku a technologii materiálu. Jeden takový laser je instalovaný i na fyzikálním ústavu AV v Praze (obr.17).

4.7 Ptychografie

Po dlouhou dobu sloužila jako hlavní optická metoda zobrazování paprsková optika. Obrazy se vytvářely čočkami, založenými na zákonech paprskové optiky odrazu a lomu. Z celého spektra elektromagnetického záření mají rentgenové a gama záření index lomu velmi blízký jedničce, takže lom rentgenového záření je nepatrný a nelze pro něj zkonstruovat čočky podle zákona lomu. Na základě vlnových znalostí elektromagnetického záření a tedy i světla se ukázalo (J.B.Fresnel) [6],[7], že je možné nahradit zobrazování paprskovou optikou, optikou vlnovou a později i optikou kvantovou. Ve vlnové optice jsou zobrazovací čočky nahrazeny Fresnelovými zónálními destičkami. Zobrazování probíhá na základě zákonů difrakce světla [6],[7].

Metoda difrakčního zobrazování je pak použitelná pro krátkovlnové záření jako je rentgenové a gama záření. Bezčočkové zobrazování rentgenovým zářením se nazývá ptychografie [9].

4.8 Mimozemské zdroje rtgz

Poněvadž ve Vesmíru se nacházejí tělesa s teplotou až $\sim 10^7 \text{K}$, což odpovídá energii rtgz, mohou taková tělesa být zdrojem rtgz v kosmickém prostoru. Ke studiu takového záření je třeba se dostat nad zemskou atmosféru, aby se zabránilo jeho absorpci atmosférou. V roce 1949 byla provedena první mimozemská měření rtgz na vypuštěné raketě. V roce 1956 navrhl Riccardo Giacconi zahájit projekt rentgenové astronomie. K tomu sestrojil „rentgenový dalekohled“, který ve spojení s družicí měl provádět snímkování zdrojů rtgz. Družice byla vypuštěna v roce 1999 a tím vznikl nový obor rtgz rentgenová astronomie. Rentgenovým dalekohledem (reflektorem) Giacconia byly pořízené snímky rtgz zdrojů dvojhvězd, supernov a předpokládá se, že bude možné roztou technikou i pozorovat černé díry. Za zavedení rentgenové astronomie byla udělena Giacconiovi NCF pro rok 2002 [1], [2], [7].

5. Využití rtgz záření

Během 115letého výzkumu rtgz se dosáhlo jeho významných aplikací. Mezi první je nutné uvést využití v lékařské diagnostice, založené na absorpci rtgz. V principu stejné techniky se používá v diagnostice nejrůznějších technických konstrukcí prozařováním [4].

Velmi významné je využití rtgz díky jeho krátkým vlnovým délkám srovnatelných s meziatomovými vzdálenostmi v kondenzovaných látkách k určování jejich atomové struktury podstatné pro využití v technologii jejich přípravy [4], [8] a různých jejich fyzikálních charakteristik (velikost zrna, vnitřní pnutí, textura apod.). Důležitost znalosti struktury prokázali F.Crick, J.Watson, M.Wilkins (obr.18) rentgenodifrakční technikou, když zjistili spirálovou strukturu DNK (NCMF 1962), která hraje důležitou úlohu v genetice. Dalším významným využitím rtgz je počítačová rentgenová tomografie známá pod zkratkou jako CT metoda (NCMF 1979, Cormack, [1], [2], [10]).



6. Rentgenové záření v ČSR

Vědci se začali zabývat rentgenovým zářením v poměrně krátce po jeho objevu v roce 1895 ještě za Rakouska-Uherska. V národních listech se objevila zpráva, že k pořízení snímku ruky rentgenovým zářením bylo třeba až hodinové expozice. Další zpráva v Tržištích senzací pocházela od Egona E.Kische.

První se vědecky začal zabývat rtgz profesor na pražské technice Ivan Puluj, který si dělal také nárok na prvenství objevu paprsků X. První chirurgický zákrok po diagnostice hřebíku v žaludku rentgenem provedl chirurg Karel Maydl. První laeogramy získaly na monokrystalech Bohuslav Ježek s Karlem Teigem. V letech 1916 až 1920 byly obhájeny dvě disertace R.Šimánka a A.D.Kašparové. Po roce 1918 se zabývali rentgenovým zářením v ČR František Ulrich a Václav Posejpal, profesor České univerzity v Praze. Ten se stal v roce 1925 autorem první publikace o rentgenovém záření s titulem Rentgenovy X paprsky.

Soustavným studiem rentgenového záření ČSR se začaly zabývat dvě skupiny vedené Václavem Dolejškem. Obě se zabývaly aplikacemi Braggovy rovnice, jedna rtg spektroskopii a druhá rentgenovou difraktoografií. Spektroskopická skupina pracovala na pražské univerzitě a druhá skupina (A.Kochanovská a Jindřich Bačkovský se spolupracovníky) v ústavu Škodových závodů, kterou vedla po smrti Dolejška A.Kochanovská, autorka dvou knižních publikací Radiokrystalografie a Zkoušení jemné struktury materiálů rentgenovými paprsky. Ředitelem Ústavu technické fyziky ČSAV po jeho založení se stal Jindřich Bačkovský. Ten se tam rovněž zabýval rentgenovým zářením a jeho difrakcí na monokrystalech a strukturou monokrystalů. Výpočetní a experimentální techniku pro řešení struktury monokrystalů zajišťovali Alan Línec a J. Drahokoupil.

A.Kochanovská i J.Báčkovský vychovali další dvě generace rentgenových fyziků. A.Kochanovská v první generaci J.Šedivého, V.Synečka, M.Simmerskou, J. Čermáka, v druhé generaci pak J.Waňkovou, M. Polcarovou, H.Šíchovou, L.Sodomku a další.

A.Kochanovská iniciovala rovněž i založení společnosti „Rentgenografické rozhovory“, které po dlouhou dobu předsedala. Společnost se zachovala do současnosti pod nynějším názvem „Krytalografická společnost“. Na závěr ještě uveďme první dámu rentgenografie A.Kochanovskou při práci (obr.19)



Obr. 19. A. Kochanovská při justaci rtg aparatury

7. Závěr

Při 115.výročí od objevu rtgz a 110. výročí od udělení NCF za tento objev W.C. Röntgenovi je třeba si připomenout jednotlivé objevy fyziky rentgenového záření a zopakovat si jejich podstatu, aby neupadly v zapomnění. Důležitost objevů fyziky rtgz potvrdily NCF udělované za jejich objevy. Ukázalo se, že rentgenové záření skýtá i významné aplikace, pro

keré je ještě otevřen \acute e objevitelské pole. Ukazuje se, že rtgz je stále ještě mocn \acute ym nástrojem k určování struktury látek a pro rozvíjející nanotechnologii , založenou na chemii a fyzice kondenzovaných látek [7], [8]. Byly představené i některé hlavní sv \acute etové osobnosti a byli připomenuti vybraní fyzici, kteří se věnovali tomuto rozsáhlému a užitečn \acute mu oboru, který skrývá ještě mnohá tajemství v ČSR a ČR. Je zajímavé uvést, že z oboru fyziky rentgenového záření bylo udělené zatím celkem devět NC, což kvalifikuje fyziku rtgz a jeho aplikace mezi přední obory fyziky.

7.Literatura

- [1] Sodomka,L., et al.: Kronika Nobelových cen I,II, Adhesiv Liberec 2002
- [2] Sodomka,L., et al.: Kronika Nobelových cen .Knižní Klub, Praha 2004
- [3] Assmus , A.: Early history of X-rays. Google, Google/A.Kochanovská
- [4] Sodomka,L.: Rentgenová difrakografie pevných látek. SNTL Praha 1960
- [5] Laue, M. von .: Dějiny fyziky . Orbis Praha 1959
- [6] Karjakin, N.I., Bystrov,K.N., Kirejev,P.S.: Přehled fyziky SNTL Praha 1970, str.299
- [7] Sodomka,L.: Základy fyziky pro aplikace a nanotechnologii. Adhesiv Liberec 2005, díl 2 na CD
- [8] Sodomka,L., Fiala,J.: Fyzika a chemie kondenzovaných látek s aplikacemi, díl1. str.148
- [9] Dierolf, M., et al.: Ptychography a lensless X-ray imaging.Europhysicsnews 39, 2007, č.1, str.22
- [10]Sodomka,L., Sodomková, Mag.: Nobelovy ceny za fyziku. Set Out Praha 1997

Poznámka o vzniku rtg působením ultrazvuku. Návrh vytvoření skupiny k ověření této skutečnosti jako Grant.