

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

Jaromír Hrdý
Synchrotronové záření

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 37 (1992), No. 3, 140--150

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/139385>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1992

Institute of Mathematics of the Academy of Sciences of the Czech Republic provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This paper has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://project.dml.cz>

- [15] J. T. ODEN: *Finite Elements: An Introduction*, In: Handbook of Numerical Analysis, vol. II. (ed. P. G. Ciarlet & J. L. Lions). North-Holland, Amsterdam, 1991.
- [16] K. REKTORYS: *Metoda časové diskretizace a parciální diferenciální rovnice*. SNTL, Praha, 1985.
- [17] G. STRANG, G. FIX: *An Analysis of the Finite Element Method*. Prentice-Hall, New Jersey, 1973.
- [18] J. L. SYNGE: *The Hypersphere in Mathematical Physics*. Cambridge Univ. Press, 1957.
- [19] B. A. SZABÓ, I. BABUŠKA: *Finite Element Analysis*. John Wiley & Sons, New York, 1991.
- [20] E. VITÁSEK: *Numerické metody*. SNTL, Praha, 1987.
- [21] J. R. WHITEMAN: *A Bibliography for Finite Elements*. Academic Press, New York, 1975.
- [22] O. C. ZIENKIEWICZ: *The Finite Element Method in Engineering Science*. McGraw-Hill, New York, 1971.
- [23] M. ZLÁMAL: *Numer. Math.* 12 (1968), 394–409.
- [24] A. ŽENÍŠEK: *Nonlinear Elliptic and Evolution Problems and Their Finite Element Approximations*. Academic Press, London, 1990.

Synchrotronové záření

Jaromír Hrdý, Praha

1. Úvod

Elektromagnetické záření v širokém spektrálním oboru je významnou sondou, pomocí níž získáváme informace o nejrůznějších látkách. Každý zdroj záření má jistý maximální výkon. Ten, spolu s použitou optikou, vytváří jisté meze, které ohraničují naše možnosti zkoumání. Obecné schéma experimentu je přitom následující: ze zdroje vychází elektromagnetické záření, které je optickými prvky zpracováno (monochromatizováno, polarizováno, fokusováno atd.) a přivedeno na zkoumaný vzorek. Tam dochází k interakci záření se vzorkem a výsledkem je záření (nemusí již být nutně elektromagnetické), které nese hledanou informaci a které dopadá do vhodného detektoru. I když existují detektory, které jsou schopné detekovat každý foton nebo částici, přesto vyžadují zachycení určitého množství fotonů nebo částic k tomu, aby se měřený signál bezpečně oddělil od šumu a byl určen s požadovanou přesností. Jinými slovy, proces detekce vždy vyžaduje určitý čas, který též nemůže být neomezeně dlouhý.

RNDr. JAROMÍR HRDÝ, DrSc. (1938) je vedoucím vědeckým pracovníkem FZÚ ČSAV, Na Slovance 2, 180 40 Praha 8.

Velikost signálu dopadajícího do detektoru je tím větší, čím je větší intenzita záření dopadajícího na vzorek, a čím je větší počet atomů ve vzorku, které se účastní interakce s dopadajícím zářením. Jsou-li tedy zkoumaný vzorek nebo zkoumaná oblast na vzorku příliš malé, nebo je-li počet interagujících atomů příliš nízký tak, že čas potřebný k detekci je neúměrně dlouhý, nelze experiment provést.

Ještě zřetelnější je případ, kdy chceme studovat časový průběh určitého procesu. Je zřejmé, že můžeme sledovat pouze děje, jejichž trvání je podstatně delší než doba potřebná k detekci signálu pro jeden časový interval časového průběhu studovaného děje.

Chceme-li tedy studovat vzorky menší, látky zředěnější nebo děje rychlejší, než nám umožňuje dosavadní experiment, musíme použít intenzivnější zdroj záření. To je hlavní důvod, proč se fyzikové snaží vytvořit stále výkonnější zdroje elektromagnetického záření.

V první polovině našeho století docházelo k rychlému rozvoji kruhových urychlovačů. Brzy se zjistilo, že při dostatečně vysokých energiích urychlovaných elektronů značná část energie dodávané na jejich urychlení se ztrácí ve formě elektromagnetického záření, které urychlované elektrony vyzařují. Vlastnosti tohoto záření byly proto intenzivně teoreticky studovány. Prvně bylo toto záření (jeho viditelná část) pozorováno v r. 1947 na General Electric synchrotronu v New Yorku a patrně proto bylo toto záření nazváno synchrotronovým (SZ).

Z hlediska funkce urychlovačů elektronů jde o jev, který brání dosahovat vysokých energií elektronů. V r. 1956 však Tomboulion a Hartmann ukázali, že UV složka SZ může být použita k fyzikálním experimentům. O tři roky později Parrat rozšířil možnost aplikace SZ do rentgenové oblasti. Šedesátá léta se tak stala počátkem využívání SZ k fyzikálním experimentům. Důvodem byly jeho mimořádné vlastnosti, zejména jeho vysoká intenzita. Synchrotronové záření, které sejevilo původně jen jako překážka urychlování elektronů na vysoké energie, se stalo významným nástrojem rozvoje fyzikálních, chemických, biologických a dalších věd a jeho význam stále roste.

2. Synchrotronové záření

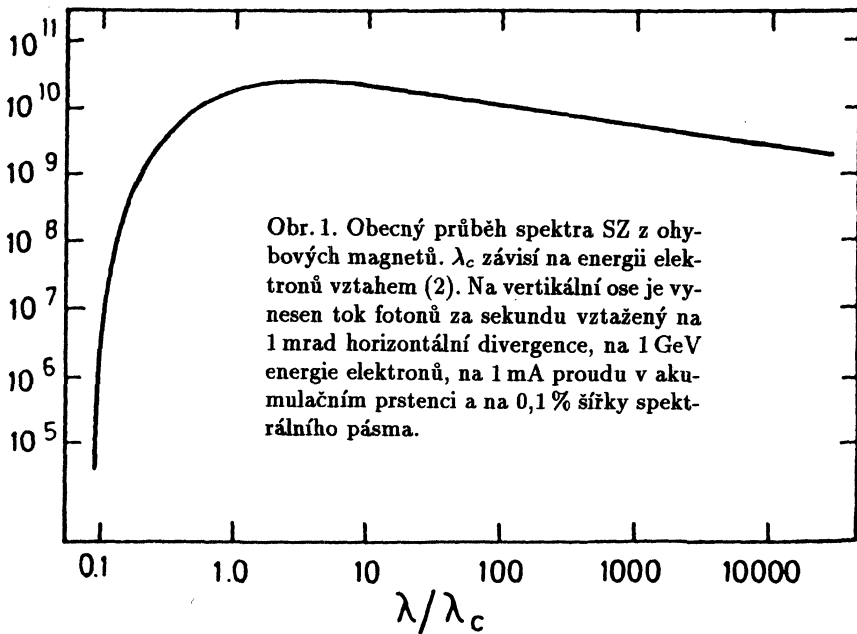
Synchrotronové záření je záření, které vyzařuje relativistická nabitá částice pohybující se na zakřivené dráze (k zakřivení zpravidla dochází v magnetickém poli). Na rozdíl od nerelativistické částice, jejíž pohyb můžeme registrovat ať se prakticky vyskytuje kdekoli na své oběžné dráze (orbitě), vytváří relativistická částice elektromagnetický vzruch jen v úzkém kuželu, jehož osou je tečna k orbitě vedená v bodě, kde částice právě jsou [1, 2]. (Tuto situaci lze přirovnat k cyklistovi, který jede po kruhové dráze a svítí si před sebe světlometem seřizovaným tak, aby svítil do úzkého kužele). Úhel otevření tohoto kužele pro částice s energií E je přibližně $1/\gamma$. Platí

$$(1) \quad \gamma = E/(m_0c^2) = E[\text{MeV}]/0,511[\text{MeV}],$$

kde m_0 je klidová hmotnost elektronu a c značí rychlost světla. Pozorovatel zaregistruje pohybující se částici pouze tehdy, protíná-li tento kužel místo, kde je umístěn detektor.

Pozorovatel tedy zaregistruje pulsy, jejichž frekvence je dána dobou oběhu částice $T = L/c$, kde L je délka orbity.

Na takovýto pulsní signál lze aplikovat Fourierův rozvoj. Základní harmonická bude mít frekvenci rovnou frekvenci oběhu částice a přibližně lze odhadnout nejvyšší harmonickou jako takovou, která odpovídá délce trvání jednoho pulsu. K určení délky tohoto pulsu musíme brát v úvahu Dopplerův jev, který má pro částice pohybující se prakticky rychlostí světla podstatný vliv a posunuje tak nejvyšší harmonickou pro E dosahující hodnot stovek MeV až do oblasti rentgenového záření. Spektrum SZ se tedy skládá ze značného počtu vyšších harmonických, které se však vlivem neustálých oscilací parametrů částice na orbitě natolik rozmaže, že se spektrum jeví jako spojitě. Typický průběh spektra SZ pro různé energie E je na obr. 1.



Tak zvaná kritická vlnová délka λ_c , nebo kritická energie ε_c ($\varepsilon_c[\text{eV}] = 1240/\lambda_c[\text{nm}]$), jsou hodnoty ve spektru záření, pro které platí, že vyzařovaná energie nad a pod touto hodnotou jsou stejné; λ_c se nachází blízko vlnové délky λ_{max} , pro kterou je intenzita ve spektru maximální.

Pro kritickou vlnovou délku λ_c platí vztah ([3], str. 14),

$$(2) \quad \lambda_c[\text{nm}] = 0,559R[\text{m}]/E^3[\text{GeV}] = 1,864/B[\text{T}]E^2[\text{GeV}],$$

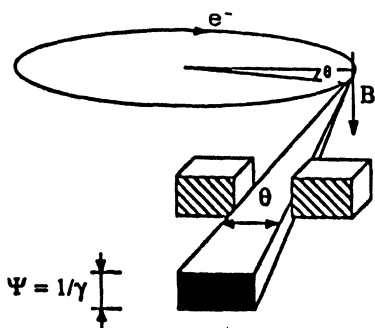
kde R je poloměr zakřivení orbity v místě, kde se odebrá záření, a B je magnetické pole. Pod kritickou vlnovou délkou intenzita záření ve spektru rychle klesá. Zkušenost však ukazuje, že lze SZ použít až asi do hodnoty $0,3-0,1 \lambda_c$.

Pro výkon SZ vyzařovaného jednou částicí na oběžné dráze platí ([3], str. 14),

$$(3) \quad P = (2/3)(e^2 c/R^2)[E^4/(m_0 c^2)^4],$$

kde e je elementární náboj a m_0 klidová hmotnost částice. Odsud je především vidět, že podstatně vyzařují pouze lehké částice, tj. elektrony nebo pozitrony.

Vztah pro divergenci záření $1/\gamma$ platí pro $\lambda = \lambda_c$. Pro λ delší je divergence větší a pro λ kratší je divergence menší. Pro energii elektronů $E = 1\text{ GeV}$ je $1/\gamma$ asi 100 úhlových vteřin. Úhel $1/\gamma$ je tedy přibližně divergence SZ ve vertikálním směru, tj. ve směru kolmém na rovinu orbity. Horizontální divergence SZ je taková, jakou ji vymežíme např. štěrbinou (obr. 2). Při poměrně velké vzdálenosti od zdroje záření k experimentální stanici (až desítky metrů) je i horizontální divergence řádově v minutách. SZ je tedy úhlově velice dobře kolimované.



Obr. 2. Divergence synchrotronového záření (SZ). Vertikální divergence je dána „přirozenou“ divergencí SZ o velikosti $1/\gamma$. Horizontální divergence SZ závisí na šířce štěrbinu a její vzdálenosti od zdroje záření.

SZ je v rovině orbity lineárně polarizované. Paprsky odkloněné od roviny orbity jsou elipticky polarizované.

Vzhledem k tomu, že elektrony na orbitě nejsou rozprostřeny rovnoměrně, nýbrž vytvářejí shluky (shustky), má SZ pulsní charakter. Shustek může být jen jeden, může jich však být i několik desítek. Frekvence těchto pulsů bývá od 0,1 MHz až do stovek MHz. Délka pulsů pak může být asi od 50 ps až asi do 1 ns.

Pro porovnání SZ s jinými zdroji záření se užívá veličina spektrální briliance [2], což je počet fotonů vyzařovaných za sekundu do jednotkového prostorového úhlu, z jednotkové plochy zdroje v jisté relativní šířce spektrálního pásma, zpravidla 0,1 %. Je to právě spektrální briliance, která je u SZ proti ostatním zdrojům záření (s výjimkou výkonných laserů) o mnoho řádů větší. (SZ z ohybových magnetů má spektrální brilianci v UV a rtg. oboru až o 5–6 řádů větší než klasické zdroje.)

Konečně, parametry SZ lze z energie elektronů, magnetického pole, poloměru zakřivení a počtu elektronů na orbitě (který lze určit) velice přesně spočítat, což činí SZ velice vhodným jak pro kalibraci zdrojů záření, tak i pro kalibraci detektorů.

Z uvedeného vyplývají tyto hlavní přednosti SZ:

- vysoká spektrální briliance,
- spojitost spektra v širokém rozsahu vlnových délek,
- polarizace záření,
- vysoký stupeň úhlové kolimace,
- pulsní charakter,
- spočítatelnost parametrů.

3. Realizace zdrojů SZ

Urychlovače, na kterých se prováděly experimenty se SZ v první etapě jeho využití, byly synchrotrony určené k urychlování elektronů. Uživatelé SZ mohli pracovat pouze v tzv. parazitním režimu, často jen několik hodin týdně. Není zde dosti místa na popisování historického vývoje využívání SZ, a proto se budeme věnovat současnosti. Moderní zdroje SZ (třetí generace), které se v současné době budují, jsou tzv. akumulární prstence, optimalizované jako zdroje SZ, z kterých se již žádné částice nevyvádějí, zato však mají i několik desítek vývodů pro SZ [1, 2, 3, 4].

Takovýto akumulární prsteneček je evakuovaná trubice (10^{-9} – 10^{-10} torr neboli 0,13–0,013 μ Pa); zpravidla má tvar jakéhosi pravidelného N -úhelníka, v jehož vrcholech jsou tzv. ohybové magnety. V ohybových magnetech se dráha elektronů zakřivuje, a právě z nich se odebírá (tečně) záření. Z N přímých sekcí je jedna rezervována pro vstřikování částic a druhá pro vysokofrekvenční rezonátor, v kterém se částicím dodává jen tolik energie, kolik se jí vyzáří. Částice tak mohou cirkulovat na orbitě několik hodin, pokud nevypadnou z cirkulace v důsledku srážky s atomy zbytkového plynu.

Do zbývajících sekcí se vkládají speciální zařízení, tzv. viglery nebo undulátory [2]. První z těchto zařízení, vigler, je tvořen sérií magnetů (může jich být až několik desítek), často supravodivých s magnetickým polem až 10 T, uspořádaných tak, že magnetické pole periodicky střídá směr. Elektron se při průletu ve vigleru rozkmitává; jeho dráha bude mít tvar připomínající sinusoidu. Protože je magnetické pole ve vigleru silnější než v ohybových magnetech, je spektrum záření z vigleru podobné spektru z ohybových magnetů, avšak je posunuto směrem ke kratším vlnovým délkám. Navíc se zde sčítají intenzity od jednotlivých period, a proto je intenzita záření z vigleru podstatně vyšší než z ohybového magnetu.

Undulátor se od vigleru liší jen hodnotou magnetického pole, která je malá, menší než magnetické pole z ohybových magnetů. Dráha elektronu uvnitř undulátoru je zvlněna jen nepatrně. Často se používá permanentních magnetů na bázi vzácných zemin. Na rozdíl od viglerů je spektrum záření z undulátoru koncentrováno do úzkého spektrálního pásu, jehož vlnová délka je větší než λ_c z ohybových magnetů. V závislosti na hodnotě magnetického pole se mohou vyskytnout i vyšší liché harmonické. Záření z undulátorů se vyznačuje vysokou spektrální briliancí. Ta u některých projektovaných undulátorů převyšuje spektrální brilianci záření z ohybových magnetů až o 4 řády.

Undulátory a viglery ve své klasické podobě jsou zdroji lineárně polarizovaného záření. Existuje však dnes již několik způsobů, jak vytvořit z těchto zdrojů zdroje kruhově polarizovaného záření ([3], kap. 2).

Moderní zdroje SZ, tj. zdroje třetí generace, mají tyto hlavní vlastnosti:

- jsou to akumulární prstence specializované a optimalizované pro SZ,
- SZ se odebírá převážně z viglerů a undulátorů,
- poskytují vysokou spektrální brilianci,
- mají vysokou stabilitu svazku záření a dlouhou dobu života částic na orbitě.

Spektrální brilianci a střední dobu života částic na orbitě lze zvýšit výměnou elektronů za pozitrony. To lze technicky snadno provést (je však třeba mít zdroj pozitronů) a s touto možností se u většiny projektovaných zdrojů třetí generace také počítá.

V současné době je v provozu asi 39 zdrojů SZ; asi 17 zdrojů se buduje a další jsou ve stadiu projektové přípravy. Zdroje o energii několika set MeV jsou určeny pro UV, VUV a viditelné záření, popř. i pro tzv. měkké rtg. záření. Některé jsou specializované pro mikroelektroniku, konkrétně pro rentgenovou litografii. Větší význam mají zdroje o energii 1,5 až 2 GeV poskytující převážně VUV a měkké rentgenové záření, ale s pomocí viglerů i rtg. záření vhodné pro krystalografické účely. Konečně zdroje SZ s energií kolem 6 GeV poskytují širokou škálu vlnových délek v rentgenové oblasti, a to i z undulátorů.

Z řady zdrojů SZ třetí generace, které se v současné době v různých částech světa budují, se zde zmíním aspoň o dvou evropských. Je to 1,5–2 GeV akumulární prstenelec Elettra poblíž Terstu a 6 GeV akumulární prstenelec (European Synchrotron Radiation Facility — ESRF) v Grenoblu. Zatímco první z nich je koncipován jako italské národní centrum SZ otevřené i ostatním státům, ESRF je budován spoluprací řady západoevropských států. Oba mají být dokončeny v r. 1993 a lze předpokládat, že se stanou významnými centry evropské vědy. Podobné zdroje se budují v USA, Japonsku a některých dalších státech.

Zdroje SZ tohoto typu budou poskytovat svazky záření o výkonu až několik kW. Na první optický element bude dopadat záření o hustotě výkonu jednotek až desítek W/mm^2 . Uvádí se, že tyto hodnoty jsou srovnatelné s hodnotami svářecího autogenu. Při této extrémní tepelné zátěži nejen že nesmí dojít k destrukci optických elementů, ale musí být zajištěna jejich řádná funkce, a to s vysokou přesností. To staví před rentgenovou optiku, která se díky SZ velice rychle rozvíjí, velice aktuální a závažné úkoly.

4. Aplikace synchrotronového záření

Rentgenová difrakce

Z četných aplikací SZ uvedme především studium struktury látek metodami rentgenové difrakce. Všimněme si nejprve práškových metod ([5], kap. 5).

Zde se SZ používá jednak při tzv. energiové disperzní difrakci EDD a jednak při difrakci kolimovaného a monochromatického svazku záření na práškovém vzorku.

První z obou aplikací (s pomocí SZ byla prvně provedena v DESY Hamburg v r. 1976) záleží v tom, že se na vzorek svítí kolimovaným svazkem polychromatického záření a sleduje se energetické spektrum záření, rozptýleného pod jistým pevným úhlem od směru dopadajícího záření. V klasických difrakčních metodách zpravidla dopadá na vzorek svazek monochromatického záření a změna mezivzrostových vzdáleností $d_{H,K,L}$ se určuje ze změn Braggova úhlu $\Theta_{H,K,L}$. Zde se změny $d_{H,K,L}$ projeví v posunu příslušných energetických maxim $E_{H,K,L}$ ve spektru záření. Rozptýlené záření se zpravidla analyzuje polovodičovým detektorem spojeným s mnohokanálovým analyzátozem, jehož rozlišovací schopnost však není vysoká ($\Delta E/E \approx 10^{-2}$). Ta se však dá až o dva řády zlepšit, analyzuje-li se spektrum záření difrakcí na krystalu.

Tato relativně velmi jednoduchá metoda je vhodná např. pro studium fázových transformací a spolu se SZ našla své použití při studiu vzorků malých rozměrů (desetin mm) podrobených vysokým tlakům v diamantových tlakových komorách (dosahovaný tlak bývá 100–200 GPa). S klasickými rtg. lampami jsou tyto experimenty obtížně proveditelné vzhledem k nízké intenzitní úrovni záření ve spojitém spektru. Touto metodou se např. studovaly strukturální změny vzácných plynů v tuhém stavu za vysokých tlaků.

Druhou aplikací je monochromatická difrakce. Dosahované vysoké rozlišení je zde především díky vysokému stupni úhlové kolimace SZ. Vysoký jas SZ umožňuje studium vzorků malých rozměrů. Na rozdíl od předcházejícího případu se registruje záření rozptýlené do různých směrů a v některých případech se proto s výhodou výrazné úspory času (avšak na úkor rozlišení) používají pozičně citlivé detektory. Zvláště zajímavé jsou „in situ“ studie látek při vysokých anebo nízkých teplotách (vysokoteplotní supravodiče) nebo vnořených do reaktivní atmosféry a perspektivně i za vysokých tlaků. Vysokotlaké experimenty s monochromatickým zářením však budou vyžadovat fokusované záření z vigleru.

Synchrotronové záření se uplatňuje i při studiu struktury dvourozměrných systémů složených z jedné nebo několika monovrstev ([5], kap. 7). Tyto systémy se rovněž studovaly zářením z rtg. lampy s rotační anodou, avšak expoziční časy byly neúměrně dlouhé, např. 400 hod. Synchrotronové záření zde poskytuje zkrácení expozičních časů o dva i více řádů. Experimenty, jejichž provedení s rtg. lampou bylo na hranicích možností, se s pomocí SZ stávají rutinní záležitostí. Příkladem zde může být studium tenkých vrstev kapalných krystalů.

Některé látky se vyznačují tím, že jejich krystaly nedorůstají do dostatečné velikosti, aby mohly být studovány pomocí konvenčních rtg. zdrojů ([5], kap. 8). Ty vyžadují rozměry vzorků větší než asi 50 μm , abychom dostali měřitelný signál. V některých případech je velikost krystalku omezena „experimentálním okolím“, např. již dříve uvedenou diamantovou tlakovou komorou, která vyžaduje velice malé vzorky, má-li se s ní dosáhnout velmi vysokých tlaků.

Použití SZ zde umožňuje snížit velikost vzorku i pod 1 μm . (Tato velikost samozřejmě závisí na složení vzorku.) Velmi často zde jde o krystaly organických látek, navíc složených z lehkých prvků.

Experimenty s časovým rozlišením

Vysoká intenzita a pulsní charakter SZ umožňují studovat kinetiku různých procesů, např. přechod systémů z metastabilního nebo excitovaného do základního stavu ([5], kap. 9). Pulsní charakter SZ je, jak bylo již řečeno dříve, dán existencí shustků částic na orbitě. Délka trvání pulsu je dána délkou shustku, ale též i délkou undulátoru, vigleru, případně délkou oblouku orbity, z kterého se odebírá záření. Frekvence pulsů je dána délkou orbity a počtem shustků. Délka pulsů se pohybuje v desítkách až stovkách ps a jejich frekvence v MHz. U moderních zdrojů SZ lze počet shustků regulovat. Frekvenci pulsů SZ lze však ovlivňovat i „pasívně“ např. tím, že se SZ propouští přes rychle rotující disk se šterbinou, jehož rychlost rotace je v přesné relaci s orbitální frekvencí. Toto zařízení může propouštět pouze některé pulsy SZ, např. 1 puls každé 3 ms. Jsou vypracovány i další metody regulace frekvence pulsů záření.

Vlastní experiment je pak zařízen tak, že se na vzorek pulsně působí (toto působení může být mechanické, tepelné, elektromagnetickým polem, laserovým zářením atd.) a následujícím pulsem SZ se vzorek zkoumá, přičemž je zařízeno, aby puls působení na vzorek a puls SZ byly ve vhodném časovém odstupu. Pokud jde o ireverzibilní proces, pak již jeden puls SZ musí být dostatečně silný k získání požadované informace. (Skutečně se prokázalo, že již jeden puls SZ z prototypu undulátoru pro Advanced Photons Source (Argonne, USA) byl dostačující k záznamu lauegramu z makromolekulárního krystalu.)

Výhodnější je, je-li studovaný proces reverzibilní a cyklus excitace vzorku a jeho následné zkoumání pulsem SZ se může opakovat tak dlouho, až se získá požadovaná informace. Excitace vzorku musí být synchronizována s pulsy SZ. Tyto experimenty mohou poskytnout rozlišení až do hodnot srovnatelných s délkou trvání pulsů. Experimenty s nanosekundovým rozlišením již byly provedeny.

Příkladem prací s časovým rozlišením jsou např. studium kinetiky kontrakce svalů pomocí malouhlového rozptylu rtg. záření s detekcí pozičně citlivým detektorem s milisekundovým rozlišením, studium fázových změn v lipidech, procesy polymerizace, studium separace fází v binárních slitinách atd. Použití videosystému jako detektoru umožňuje sledovat např. pohyb dislokací pomocí časově rozlišené rtg. topografie apod.

Pro experimenty s časovým rozlišením jsou přirozeně vhodné metody, v kterých se pro dané časové rozpětí mezi excitací a osvětlením vzorku pulsem SZ zaznamenávají všechny požadované údaje současně, jako např. celé energetické spektrum polovodičovým detektorem spojeným s mnohokanálovým analyzátozem nebo všechny Laueovy reflexe pomocí pozičně citlivého detektoru.

Magnetický rozptyl

Je všeobecně znám mechanismus rozptylu rtg. záření na látce, který je založen na interakci elektromagnetického záření s elektrickým nábojem elektronu (Thomsonův rozptyl). Ve skutečnosti však dochází i k interakci elektromagnetického pole s magnetickým momentem elektronu, která je příčinou tzv. magnetického rozptylu ([5], kap.

14). Jeho účinný průřez je však podstatně ($[\lambda mc^2/h]^2$ krát) menší než účinný průřez Thomsonova rozptylu. Hodnota výrazu v závorce klesá se vzrůstající energií fotonů a rovná se přibližně jedné pro 500 keV. Pro hodnoty energií fotonů kolem 5 keV je však amplituda magnetického rozptylu již stokrát slabší. Uvědomíme-li si dále, že pouze asi 10 % elektronů atomu je nespárovaných (a pouze ty přispívají k magnetickému rozptylu), vychází, že intenzita magnetického rozptylu je asi 10^6 krát menší než intenzita Thomsonova rozptylu. Je proto pro studium magnetického rozptylu nutná vysoká intenzita záření a použití SZ je zde proto žádoucí.

Není to však jen vysoká intenzita, která činí SZ vhodným pro tyto experimenty. Důležitá je i jeho polarizace, zejména kruhová polarizace, potřebná pro studium spinové závislé hustoty momentů. Tento typ experimentů (na rozdíl od neutronového rozptylu) umožňuje rozlišit mezi spinovým a orbitálním příspěvkem k hustotě momentů.

Studium magnetických látek pomocí magnetického rozptylu se díky SZ v posledních letech dosti rozšířilo.

EXAFS

Je-li v látce absorbován foton rtg. záření, dochází k ionizaci některé vnitřní hladiny atomu. Absorpční koeficient je přitom úměrný pravděpodobnosti přechodu elektronu z počátečního stavu do konečného stavu, a ta zase závisí na vlnových funkcích obou stavů. Vlnová funkce konečného stavu je superpozicí vlnové funkce volného fotoelektronu a rozptýlených vln od okolních atomů. Pro některé vlnové délky dopadajícího záření (resp. energie fotonů) je tato superpozice „konstruktivní“, pro jiné „destruktivní“, čímž vzniká jemná struktura na krátkovlnné straně absorpční hrany. Tyto oscilace se nazývají EXAFS (Extended X-ray Absorption Fine Structure) a lze z nich určovat strukturu blízkého okolí atomů určitého prvku, tj. prvku, jehož absorpční hranu měříme ([3], kap. 10).

Kdo někdy proměřoval spektrum záření z rtg. lampy pomocí krystalových spektrometrů, ví, jak relativně slabá je intenzita záření spojitého spektra. Po průchodu tohoto záření studovaným vzorkem je jeho spektrální intenzita na krátkovlnné straně absorpční hrany ještě asi o řád oslabena. Zachytit na ní EXAFS oscilace s dostatečnou přesností, které často činí jen několik procent spektrální intenzity záření prošlého vzorkem, znamená úmornou a dlouhodobou práci. Situaci lze však částečně zlepšit použitím různých fokusačních metod.

Synchrotronové záření umožňuje zkrácení těchto experimentů na několik desítek minut. Dnes snad u každého zdroje SZ poskytujícího rtg. záření existují stanice pro měření EXAFS. Pokud je zajištěno vhodnou metodou, že se celé spektrum EXAFS registruje současně pozičně citlivým detektorem (tzv. disperzní EXAFS), je možné provádět časově rozlišená měření. V některých pracích tohoto typu se dosáhlo rozlišení desítek milisekund.

Rentgenová fluorescenční analýza

Rentgenová fluorescenční analýza je nedestruktivní metoda k měření obsahu chemických prvků ve zkoumaném vzorku, resp. v jeho jednotlivých oblastech ([5], kap. 16). Při této metodě se rtg. zářením, popř. svazkem částic (elektrony, protony, atd.) ionizují *K*- nebo *L*-slupky atomů ve vzorku; tím dochází ke vzniku charakteristického rtg. záření (s výjimkou lehkých prvků). Spektrální analýzou tohoto záření a měřením intenzity jednotlivých spektrálních čar lze určit, z jakých prvků a o jaké jejich koncentraci je vzorek složen.

Excitace vzorku synchrotronovým zářením má proti excitaci částicemi některé výhody. Polarizace SZ umožňuje pronikavě snížit pozadí, a to umístěním detektoru do místa, kde je minimální rozptyl SZ. Účinný průřez absorpce dovoluje analyzovat i těžké elementy. Důležitá je možnost studia vzorků, které nemohou být umístěny do vakua (to se týká zejména biologických vzorků a nejenom fluorescenční analýzy). Konečně SZ poskytuje možnost analyzovat i hlubší vrstvy pod povrchem vzorku bez jeho destrukce.

Ve srovnání s klasickými zdroji rtg. záření, intenzivní spojité spektrum SZ dává možnost buzení vzorku monochromatickým zářením, jehož vlnová délka je vybrána pro optimální detekci vybraných prvků. Vysoký stupeň úhlové kolimace umožňuje provádět analýzu i z malých oblastí o velikosti desítek μm . Při buzení spojitým zářením lze dosáhnout rozlišení řádově v mikrometrech. Pomocí takovéto mikroanalýzy lze vytvořit dvojrozměrnou (i trojrozměrnou) mapu rozdělení určitého elementu ve studovaném vzorku.

Vysoká intenzita SZ umožňuje detekovat prvky vyskytující se ve velice nízkých koncentracích. U zdroje SZ v Novosibirsku se např. při studiu vzorků ve tvaru tenkých folií dosáhla minimální detekovaná hodnota koncentrace některých prvků (Rb, Ru, Ag) řádu několika částic na jednu miliardu částic, a to při době expozice řádu 10^3 sekundy.

Není zde možné pojednat o všech aplikacích SZ a tím spíše jít do detailů. Čtyři díly *Handbook of Synchrotron Radiation*, které se převážně aplikacemi SZ zabývají, mají dohromady přes 3000 stran. Poslední díl [6] se zabývá převážně aplikacemi v biologii a medicíně. Přednost SZ zde nespočívá jen ve vlastním zkrácení expozice. Ukázalo se, že biologické vzorky snáze vydrží ozáření určitou dávkou, jestliže se na ně působí vysokou intenzitou po krátkou dobu. Z tohoto důvodu často nelze experiment s rtg. lampou provést, i když potřebné expoziční časy nejsou dlouhé, neboť dochází k degradaci vzorku.

V USA byla poprvé na člověku vyzkoušena tzv. rentgenová angiografie pomocí SZ. Rentgenovou angiografií se zkoumá průchodnost srdečních cév. Ve své klasické podobě tato metoda spočívá v tom, že se pomocí katetru, který se zavede do blízkosti srdce, vstříkne do cévního řečiště kontrastní jódový preparát a pomocí rtg. záření se zobrazí vnitřek cév. Synchrotronové záření zde umožňuje vybrat pouze ty vlnové délky, které se nejvíce podílejí na vytvoření kontrastu; provedou se expozice s vlnovou délkou těsně před a těsně za *K*-absorpční hranou jódu a oba obrazy se digitálně odečtou. Metoda je

natolik citlivá, že odpadá riskantní katetrizace a pacient je minimálně zatížen zářením i kontrastní látkou.

Nezabývali jsme se zde ani rentgenovou mikroskopií, ani tzv. mikrotomografií, ani řadou dalších zajímavých aplikací synchrotronového záření včetně technických, jako např. rentgenovou litografií. Nezbyvá, než zájemce odkázat na literaturu. Zde šlo pouze o to ukázat, že SZ se již stalo běžným nástrojem vědeckého bádání (některé typy experimentů se staly vyloženě rutinní záležitostí) a pronikavě ovlivnilo fyziku, materiálový výzkum a některé další vědecké obory.

L i t e r a t u r a

- [1] *Synchrotron Radiation (Techniques and Applications)*. Red. C. KUNZ. Springer-Verlag 1979.
- [2] *Synchrotron Radiation Research*. Red. H. WINICK a S. DONIACH. Plenum Press 1980.
- [3] *Handbook on Synchrotron Radiation, sv. 1*. Red. E. E. KOCH. North-Holland 1983.
- [4] *Handbook on Synchrotron Radiation, sv. 2*. Red. G. V. MARR. North-Holland 1987.
- [5] *Handbook on Synchrotron Radiation, sv. 3*. Red. D. E. MONCTON. North-Holland 1991.
- [6] *Handbook on Synchrotron Radiation, sv. 4*. Red. S. EBASHI, M. KOCH a E. RUBENSTEIN. North-Holland 1991.

Matematické trivium

V. I. Arnold, Moskva

Úroveň matematické kultury klesá; jak studenti tak i aspiranti našich vysokých škol, včetně mechanicko-matematické fakulty Moskevské státní univerzity (dále MMF MSU), nejsou o nic víc nevzdělaní než jejich profesori a učitelé. V čem spočívá příčina tohoto nenormálního jevu? Za normálních okolností studenti a aspiranti znají svou vědu lépe než profesori v souladu s obecným principem šíření znalostí: nové vítězí nikoliv proto, že se ho starci naučí, ale proto, že přicházejí nová pokolení, která ho znají.

Z řady příčin tohoto nenormálního jevu chtěl bych se omezit na ty příčiny, které závisejí na nás samotných, abychom se mohli pokusit napravit to, co je v našich silách. Jednou z takových příčin, podle mého mínění, je náš systém zkoušek speciálně zaměřený na produkci zmetků, t.j. pseudovědců, kteří se matematiku učí jako marxismus: nazpaměť se naučí tvrzení a odpovědi na otázky, které se nejčastěji zadávají.

V. I. ARNOLD: *Matematičeskij trivium*. Uspechi mat. nauk, Vol. 46, č. 1 (1991), pp. 225–232. Přeložil JOSEF DANĚŠ.