

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

Jiří Komrška

Korpuskulární optika jako experimentální východisko při výuce kvantové mechaniky [Pokračování]

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 27 (1982), No. 2, 61--74

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/139952>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1982

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>

Korpuskulární optika jako experimentální východisko při výuce kvantové mechaniky*)

Jiří Komrská, Brno

5. Difrakce částic na krystalových mřížkách

*Na haldě knih se uvelebil
a četl — moudřejší však nebyl.
Tu nuda, tam zas klam a tlach,
či pustý nesmysl až strach.*

A. S. Puškin: Eugen Oněgin I, 44

Faktem je, že oprávněnost de Broglieovy hypotézy byla poprvé prokázána difrakcí částic na krystalových mřížkách. Z toho však ještě neplyne, že tyto pokusy jsou nej názornější nebo pedagogicky nejvhodnější ilustrací vlnové povahy částic, jak se už více než padesát let tvrdívá v učebnicích moderní fyziky. Zejména je nevhodné uvádět za příklad jednoduchosti a názornosti první a největší z těchto experimentů — Davissonovu a Germerovu difrakci pomalých elektronů na povrchu monokrystalu kovu.

Podívejme se nejdříve, co se dočteme o tomto experimentu v učebnicích. Učebnice kvantové mechaniky, v nichž jde především o matematickou strukturu teorie, se o těchto pokusech jen zmiňují. Bohužel většinou takto [1]: „*Základní prvky kvantové mechanického popisu přírody nejzřejměji vystávají v experimentu s rozptylem svazku elektronů kovovým krystalem, poprvé provedeným Davissonem a Germerem v r. 1927. Účelem jejich experimentu bylo ověřit de Broglieovu hypotézu, podle níž ...*“ Co lze tomuto přístupu vytknout?

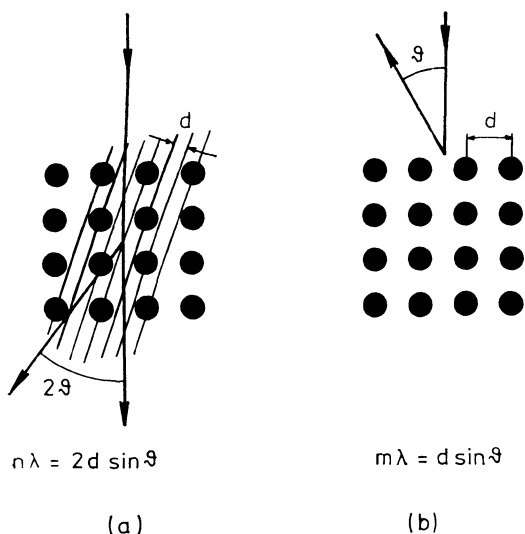
(1) Difrakce elektronů na makroskopických objektech je fyzikálně mnohem názornější než difrakce elektronů na krystalové mřížce. V Davissonově-Germerově pokusu šlo o difrakci pomalých elektronů. V tomto případě elektrony interagují s jednou mřížkovou rovinou nebo s velmi malým počtem mřížkových rovin na povrchu krystalu. Interpretace je tak náročná, že vyžaduje specialistu.

(2) Účelem Davissonova-Germerova experimentu vůbec nebylo ověřit do Broglieovu

*) Druhá část večerní přednášky pronesené 12. 5. 1981 na semináři „Pedagogicko-fyzikální problematika kvantové fyziky“ (Luhačovice 12.—14. 5. 1981). První část jsme otiskli v letošním prvním čísle PMFA, dokončení otiskneme v příštím čísle. (Pozn. red.)

hypotézu. Důvody, proč byl tento experiment proveden, byly technické až komerční. Davisson a Germer byli prostě experimentátoři nejvyšší kategorie, kteří difrakci elektronů – netušenou a identifikovanou ex post – nemohli přehlédnout.

Některé méně teoreticky zaměřené učebnice fyziky se snaží Davissonův-Germerův pokus interpretovat dosti podrobně. Pravda je, že jsou učebnice, kde je tato interpretace naznačena přijatelným způsobem. Z knih u nás hojně rozšířených k nim patří např. učebnice Orearova [2] a zejména Wichmannova [3]. Většina učebnic (viz např. [4, 5]) však svádí k hrubému omylu tím, že interpretuje Davissonův-Germerův pokus pomocí představy, že jde o difrakci na trojrozměrné mřížce, a používá Braggovy rovnice $n\lambda = 2d \sin \vartheta$. Při difrakci pomalých elektronů však elektrony interagují pouze s povrchem krystalu, takže jde o difrakci na dvojrozměrné mřížce a představy o difrakci v objemu krystalu jsou scestné. K dovršení zmatku lze při difrakci na jednorozměrné nebo dvojrozměrné mřížce (a při kolmém dopadu) podmínku pro směry difrakčních maxim napsat ve tvaru $m\lambda = d \sin \vartheta$, takže eventuální nesrovnalosti lze velkoryse zahladit „volbou“ $n = 2m$ (nebo ještě lépe, na n zapomenout [5]). Fyzikálně však jde o dvě naprosto různé věci. Veličiny d i ϑ také mají v obou vztazích různý význam (srov. obr. 5.1.).



Obr. 5.1. Veličiny d a ϑ mají různý význam v Braggově rovnici udávající směr difrakčních maxim při difrakci na trojrozměrné krystalové mřížce (a) a v rovnici $m\lambda = d \sin \vartheta$ udávající směry difrakčních maxim při difrakci na dvojrozměrné mřížce (b) představované povrchem krystalu.

Je také nefyzikální hledat nějaké analogie mezi difrakcí pomalých elektronů a difrakcí rentgenového záření o stejné vlnové délce, a to bez ohledu na to, že v původních článkách Davissona a Germera [13, 10] je taková analogie zmíněna. Rentgenové záření se rozptyluje na elektronech krystalu. Je-li jeho vlnová délka kolem 0,1 nm, je dostatečně tvrdé, aby proniklo hluboko do krystalu. Je-li navíc monochromatické, nemusí být splněny tři Laueovy rovnice a žádné hlavní difrakční směry nemusí existovat. Naproti tomu elektrony jsou rozptylovány potenciálem krystalu. Při difrakci pomalých elektronů na dvojrozměrné periodické struktuře představované povrchem krystalu jsou dvě Laueovy rovnice splněny i při přísně monochromatických, tzn. monoenergiových elektronech,

takže vždy existují hlavní difrakční směry. Prostě pomalé elektrony jsou pomalé elektrony a rentgenové záření je rentgenové záření. Difrakční obrazce by si odpovídaly, jen kdyby interakce obojího záření s látkou byla stejná, což předpokládat, nebo dokonce požadovat je zřejmý nesmysl.

Podíváme-li se do našich učebnic, skript a sbírek příkladů, žasneme. Davissonův-Germerův pokus se zaměřuje s difrakcí v objemu fólií, někdy dokonce polykrystalických, interpretuje se Braggovou rovnicí, pomalé elektrony se fotograficky registrují apod. Co se říká studentům fyziky o difrakci pomalých elektronů? Člověka napadá, že k obdobnému problému – Co se říká básníkovi o květech – se A. Rimbaud [6] vyslovil takto:

*„Ty, jenž jsi se jal utíkat
přes Patis, bosý harcovníku,
což nemůžeš a nemáš znát
poněkud svoji botaniku?*

*Mám strach, že k růži svážeš blín,
že cvrčka dáš ke Cantharidě,
po zlatu Ria modrý Rýn,
že Norsko vrhneš po Floridě!“*

Nechme však poezie i učebnic a poučme se z původních článků, jak tomu bylo s ověřováním de Broglieovy hypotézy a s difrakcí částic na krystalových mřížkách.

První pokusy, které prokázaly vlnovou povahu částic, byly prováděny nezávisle na de Broglieových myšlenkách a byly zahájeny v New Yorku v r. 1919 v institutu Bell Telephone Laboratories. Podnět k nim zavdal vleklý patentový spor o triodu mezi firmou Western Electric Company (později Bell Telephone Laboratories), zastupovanou H. D. Arnoldem, a firmou General Electric Company, zastupovanou I. Langmuirem [7]. Aby mohly být soudu předloženy podklady pro řešení sporu, sestrojili C. J. Davisson a L. H. Germer [8] aparaturu pro měření emise elektronů ze vzorků bombardovaných ionty nebo elektrony. Pomocí této aparatury zjistili C. J. Davisson a C. H. Kunsman [9], že určitá malá část sekundárních elektronů má touž energii jako primární elektrony, a z toho usoudili, že jde o primární elektrony odchýlené o velké úhly. Davisson s Germerem pak studovali elektrony odražené na povrchu polykrystalického niklu, platiny a hořčíku. Výsledky však byly těžko reprodukovatelné a tím méně interpretovatelné. Zlom nastal v dubnu 1925, kdy došlo k proslulé laboratorní nehodě [10], při níž praskla nádoba s kapalným vzduchem a rozbila evakuovanou trubici s vyhřátým vzorkem polykrystalického niklu, jehož povrch zoxidoval. Při redukčním žíhání ve vakuu a vodíkové atmosféře došlo k rekrystalizaci provázené růstem zrna v niklovém vzorku. Jestliže před nehodou byl pozorován rozptyl od velkého počtu malých krystalků, byl po ní pozorován rozptyl od několika velkých krystalků. Úhlové rozložení rozptýlených elektronů vykazovalo několik výrazných přednostních směrů. Davisson napsal o těchto výsledcích M. Bornovi do Göttingen. M. Born a J. Franck usoudili, že by mohlo jít o difrakci de Broglieových vln na krystalové mřížce [11], a svěřili studium tohoto problému W. Elsasserovi, jenž v dopise redakci Naturwissenschaften [12] upozornil na některé

experimentální skutečnosti již dříve v literatuře popsané (mezi jiným také experimenty Davissonovy a Kunsmanovy, publikované v r. 1923 [9]), v nichž lze spatřovat vlnové projevy částic. Kvantitativního souhlasu s de Broglieovou teorií dosáhli Davisson a Germer počátkem r. 1927 [13, 10] při difrakci pomalých elektronů (50–400 eV) na povrchové ploše {111} monokrystalu niklu. Po vyjasnění otázky změny vlnové délky a lomu pomalých elektronů v difrakčujícím monokrystalu bylo dosaženo shody s teorií v mezích přesnosti experimentu.

Davissonův-Germerův pokus s difrakcí elektronů je počátkem dnešní difrakce pomalých elektronů (LEED) a lze jej jistě považovat za jeden z největších fyzikálních experimentů. Uvážíme-li experimentální a interpretační nesnáze, které autoři museli překonat, je zřejmé, že experiment předstihl technickou úroveň svou dobu o tři desetiletí.

Zcela jinými motivy byl veden G. P. Thomson, autor druhého experimentu s difrakcí elektronů na krystalové mřížce [14], publikovaného dva měsíce po článku Davissona a Germera [13]. Thomsonovi šlo od počátku o verifikaci de Broglieova vztahu (1). Sám o tom napsal [15]: „*Mým záměrem bylo ověřit teorii; Davissonovým – vysvětlit experiment.*“ Thomson usiloval o analogii optického Youngova eriomtru, kdy se v rovině pozorování objevuje difúzní halo způsobené rozptylem na náhodně orientovaných vlákních uložených na transparentní podložce. Průměry těchto halo jsou nepřímo úměrné rozměrům vlákna. K rozptylu elektronů použili G. P. Thomson a A. Reid [14] celuloidu, o němž bylo známo, že má vláknité molekuly a že z něho lze snadno připravit tenkou vrstvu. Po průchodu elektronů s energií 3,9 až 16,5 keV celuloidovou vrstvou skutečně pozorovali difúzní halo, jejichž průměry byly v rozumné relaci s de Broglieovou vlnovou délkou a s odhadem tloušťky molekuly nitrované celulózy. Aby dostal přesvědčivější výsledky, opakoval G. P. Thomson [16] tento experiment, avšak místo celuloidu použil tenké polykrystalické vrstvy zlata, hliníku a platiny. Pozorované průměry Debyeových-Scherrerových difrakčních kružnic odpovídaly s přesností 1% de Broglieově vlnové délce (vzhledem k velké energii elektronů (12 až 61 keV) byla změna vlnové délky a tím i korekce na lom v preparátu zanedbatelná).

Uvedený experiment je počátkem difrakce rychlých elektronů. Je analogický obdobným jevům v rentgenové difraktografii. Experimentálně je mnohem snazší než pokusy Davissonovy-Germerovy; proto se difrakce rychlých elektronů stala během několika málo let běžnou laboratorní technikou a od r. 1947 běžným doplňkem elektronové mikroskopie krystalických preparátů.

Je požitkem číst původní články Davissona a Germera [10] a G. P. Thomsona [16]. Jsou krásné z protichůdných důvodů. Davissonova a Germerova práce oslňuje experimentální bravurou, jež původně nebyla kontrolována, ani vedena teorií. Thomsonova práce naproti tomu byla teorií vyprovokována a vedena. Okouzluje úsilím ověřit vlnovou mechaniku. Hned na první stránce článku [16] čteme: „*S ohledem na mimořádně fundamentální povahu této teorie je nanejvýš žádoucí, aby byla podložena přímějším důkazem a zejména aby prokázala, že je schopna předpovídat ...*“ A tak předpověděl, že lze prostřednictvím elektronů získat Debyeovy-Scherrerovy difrakční kružnice, skutečně je získal a ověřil jimi vztah $\lambda = h/p$.

Úspěch pokusů s difrakcí elektronů na krystalových mřížkách vyvolal v následujících

letech (tj. od r. 1928 až asi do r. 1937) zájem o podobné pokusy s difrakcí jiných částic. S výjimkou neutronů nevykázaly žádné částice tak přesvědčivé difrakční jevy jako elektrony. Přesto jsou pro fyziku cenné; dokázaly totiž, že vlnovou povahu mají nejen elementární částice, ale i atomy a molekuly. V r. 1929 prokázali F. Knauer a O. Stern [17, 18] difrakci atomů hélia a molekul vodíku na štěpné ploše krystalu NaCl a v následujícím roce I. Estermann a O. Stern [19] difrakci týchž částic na LiF. Rovněž v r. 1930 demonstroval T. H. Johnson [20] difrakci atomárního vodíku na LiF. V následujících letech usilovali experimentátoři o difrakci mnoha jiných atomů (např. Ne, Ar [21] aj.), avšak difrakční jevy nebyly průkazné. V r. 1927 zahájil A. J. Dempster pokusy s difrakcí protonů s kinetickou energií 15 až 40 keV na vápenci [22] a jiných krystalických látkách [23], aniž však získal průkazné difrakční jevy. Y. Sugiura [24] prováděl pokusy s difrakcí pomalých protonů (250–500 eV) na polykrystalické platině a wolframu, avšak jeho výsledky byly jen v kvalitativním souhlase s teorií [25]. Velmi zřetelné difrakce protonů s kinetickou energií 58 až 275 keV na polykrystalické zlaté fólii byly publikovány E. Ruppem a R. v. Meibomem [26]. Tyto pokusy s difrakcí atomů, molekul a protonů však nenašly praktického upotřebení. S velkým praktickým uplatněním se naproti tomu setkala difrakce neutronů na krystalových mřížkách, která nenahraditelně doplňuje rentgenovou a elektronovou difrakci, zejména při studiu magnetické struktury látek. Byla prokázána na polykrystalickém železe H. v. Halbanem a P. Preiswerkem [28] a v zápětí nezávisle D. P. Mitchellovou a P. N. Powersem [29] na monokrystalu MgO a na polykrystalickém hliníku.

Nepřekvapuje, že difrakce rychlých elektronů a neutronová difrakce se uplatnily takřka ihned po svém objevu. Je pochopitelné, že rozvoj difrakce pomalých elektronů mohl nastat teprve v šedesátých letech a že dosud trvá; Davissonův a Germerův pokus byl zcela mimořádný. Bylo třeba třiceti až čtyřiceti let, aby mohl být prováděn v širším měřítku, ve stovkách laboratoří. Stále rozšiřuje poznatky fyziky a chemie povrchů krystalů. Ale co ostatní částice? Je elektrony a neutrony sortiment částic vhodných pro studium struktury látek vyčerpán? Asi ano. (Jen sporadicky se objevují publikace o difrakci protonů [30] nebo heliových atomů [31].) Pro pedagogickou fyziku by mohlo být zajímavé přemýšlet o důvodech, proč tomu tak je.

Literatura

- [1] SAXON D. S.: *Elementary quantum mechanics*. Holden-Day, San Francisco 1968, 5.
- [2] OREAR J.: *Základy fyziky*. Alfa, Bratislava 1977, 378–380.
- [3] WICHMANN E. H.: *Quantum physics*. Berkeley physics course, Vol. 4. McGraw-Hill Book Co., New York, N. Y., 1971, 187–198.
- [4] ŠPOLSKIJ E. V.: *Atomová fyzika I*. 2. vyd. SNTL Praha 1957, 331.
- [5] BEISER A.: *Úvod do moderní fyziky*. Academia, Praha 1978, 100–102.
- [6] RIMBAUD A.: *Verše*. Přebásnil V. NEZVAL. SNKLHU, Praha 1956, 161.
- [7] GERMER L. H.: *Physics Today* 17 (1964), č. 6, 19.
- [8] DAVISSON C., GERMER L. H.: *Phys. Rev.* 15 (1920), 330.
- [9] DAVISSON C., KUNSMAN C. H.: *Phys. Rev.* 19 (1922), 235, 534; 22 (1923), 242.
- [10] DAVISSON C., GERMER L. H.: *Phys. Rev.* 30 (1927), 705.

- [11] BORN M.: Science 122 (1955), 675. *Physics in My Generation*. Pergamon Press, London 1956, 182. *Experiment and Theory in Physics*. Dover Publications Inc., New York 1965, 21. *Nobel Lectures — Physics 1942–1962*. Elsevier Publ. Co., Amsterdam, London, New York 1965, 256.
- [12] ELSASSER W.: Naturwiss. 13 (1925), 711.
- [13] DAVISSON C., GERMER L. H.: Nature 119 (1927), 558.
- [14] THOMSON G. P., REID A.: Nature 119 (1927), 890.
- [15] THOMPSON G. P.: Physics Today 20 (1967), č. 5, 55.
- [16] THOMPSON G. P.: Nature 120 (1927), 802; Proc. Roy. Soc. London (A) 117 (1928), 600.
- [17] KNAUER F., STERN O.: Z. Phys. 53 (1929), 779.
- [18] STERN O.: Naturwiss. 17 (1929), 391.
- [19] ESTERMANN I., STERN O.: Z. Phys. 61 (1930), 95.
ESTERMANN I.: Čs. čas. fyz. A 27 (1977), 503.
- [20] JOHNSON T. H.: Phys. Rev. 35 (1930), 1299.
- [21] ZABEL R. M.: Phys. Rev. 42 (1932), 218.
- [22] DEMPSTER A. J.: Phys. Rev. 34 (1929), 1493; Nature 125 (1930), 51.
- [23] DEMPSTER A. J.: Phys. Rev. 35 (1930), 1405; Nature 125 (1930), 741.
- [24] SUGIURA Y.: Scient. Pap. Inst. Phys. Chem. Research 16 (1931), 29.
- [25] LAUE M. v.: Naturwiss. 19 (1931), 951, 1044. *Materiewellen und ihre Interferenzen*. Akademische Verlagsgesellschaft Geest und Porting, Leipzig 1948, 217.
- [26] RUPP E.: Z. Phys. 78 (1932), 722.
MEIBOM R. v., RUPP E.: Ann. Phys. 17 (1933), 221.
- [27] ELSASSER W. M.: Compt. Rend. Acad. Sci. Paris 202 (1936), 1029.
- [28] HALBAN H. v., PREISWERK P. N.: Compt. Rend. Acad. Sci. Paris 203 (1936), 73.
- [29] MITCHELL D. P., POWERS P. N.: Phys. Rev. 50 (1936), 486.
- [30] CERN Courier 20 (1980), 111.
- [31] RIEDER K. H.: Europhysics News 12 (1981), č. 10, 6.

6. Difrakce částic na rytých mřížkách

*Pěstěné se tu s nepěstěným mísí,
že okrasy se přirozené zdají.
Přírodou zdá se, co k své libosti si
umění tvoří, přičemž za vzor má ji.*

T. Tasso [1]

Difrakce částic na krystalových mřížkách kvantitativně potvrdila de Broglieův vztah pro vlnovou délku. Tento typ difrakce však nemá onu názornost, jíž vynikají klasické difrakční pokusy světelné optiky, které byly bezpečným východiskem při budování vlnové teorie světla. M. v. Laue o tom říká [2]: „*Přesto však mohl nějaký skeptik stále ještě namítat, že atomy snad mohou vychýlit částice způsobem, který ještě nechápeme.*“ Z tohoto hlediska jsou pozoruhodné experimenty Ruppovy [3] z r. 1928 s ohybem pomalých elektronů (70–310 eV) na ryté kovové mřížce (130 vrypů/mm) při dopadu pod úhly řádu 10^{-3} rad. Na fotografické desce (hic!) ve vzdálenosti 38,5 cm od mřížky byla zřetelně rozlišena difrakční maxima prvního, druhého, a dokonce třetího řádu. Umožnila stanovit vlnovou délku, a tím ověřit de Broglieův vztah s přesností 5%, v nejlepším případě 2%. Obdobné pokusy provedené rovněž s elektrony popsal o půl roku později B. L. Worsnop [4]. S molekulárním vodíkem prováděli difrakci na mřížce (100 vry-

pů/mm, dopad pod úhly řádu 10^{-3} rad) Knauer a Stern [5] v r. 1929. Pozorovali však pouze náznaky prvních difrakčních maxim po obou stranách zrcadlového odrazu.

Zdá se, že tyto experimenty tvoří nevýznamnou epizodu v dějinách fyziky. Nenašly se ani aplikace, ani nebyly později opakovány nebo podrobeny kritickému zhodnocení. Čas od času lze slyšet pochybnosti o některých Ruppových výsledcích citovaných v této a předcházející kapitole. Napsáno však o tom nebylo pravděpodobně nic. V této souvislosti je pozoruhodné, že M. v. Laue, jenž s Ruppem kolem r. 1930 spolupracoval (srov. [6]), se o něm vůbec nezmiňuje ani v monografii [7], ani v Dějinách fyziky [2].

Tuto netečnost fyziky k problémům difrakce částic na rytých mřížkách lze možná objasnit tím, že rozvoj elektronové mikroskopie postavil celou problematiku ověřování vlnové povahy částic difrakcí na jiných objektech, než jsou krystalové mřížky na kvalitativně jinou úroveň, jak uvidíme v následujících třech kapitolách. Kromě toho kvantová fyzika natolik upevnila své postavení, že většina fyziků už vůbec nepovažuje za nutné vlnovou povahu částic ověřovat. Avšak experimenty, které současná elektronová mikroskopie nabízí, mají svůj půvab a mají i praktický význam (většinou jako metody elektronové mikroskopie). Pro nás je nyní především důležité, že jsou cenné z pedagogického hlediska.

Literatura

- [1] TASSO T.: *Osvobozený Jeruzalém*. Přel. J. POKORNÝ. Odeon, Praha 1980, 223.
- [2] LAUE M. v.: *Dějiny fyziky*. Orbis, Praha 1963, 135.
- [3] RUPP E.: *Naturwiss.* 16 (1928), 656; *Z. Phys.* 52 (1929), 8.
- [4] WORSNOP B. L.: *Proc. Phys. Soc.* 40 (1928), 284; *Nature* 123 (1929), 164.
- [5] KNAUER F., STERN O.: *Z. Phys.* 53 (1929), 779.
- [6] LAUE M. v., RUPP E.: *Ann. Phys.* 4 (1930), 1097.
- [7] LAUE M. v.: *Materiewellen und ihre Interferenzen*. Akademische Verlagsgesellschaft Geest und Porting, Leipzig 1948.

7. Difrakce elektronů na nenabitých makroskopických objektech

*... na každé stránce nákres mnohý
a každý list tu počmárán.
Tu čáry máry; mezi nimi
text s myšlenkami rozumnými, ...*

A. S. Puškin [1]

Již vícekrát jsme upozornili na nepochopitelnou skutečnost, že právě ty difrakční a interferenční jevy, které posloužily Fresnelovi k prosazení vlnové teorie světla, jsou zcela stranou zájmu pedagogů vyučujících kvantovou mechaniku, přestože se svým historickým i věcným půvabem přímo nabízejí k ilustraci vlnových vlastností. Provádějí-li se tyto pokusy s částicemi, je na nich zajímavé také to, že jde o difrakci na makro-

skopických objektech, tj. na objektech velkých ve srovnání s rozměry atomů. Rozměry propustných i nepropustných částí difrakujícího objektu mohou být řádu mikrometrů i větší. Vlnová délka elektronů (o kin. energii $T = 10^5$ eV) tedy nejen není srovnatelná s rozměry propustných a nepropustných částí difrakčního stínítka (což se z nepochopitelných důvodů stále požaduje v učebnicích fyziky), ale je řádově nejméně 10^4 krát menší.

Jediným experimentem tohoto druhu, který poutá zájem pedagogů (a to zastánců vlnového přístupu i zastánců vektorového formalismu), je Youngův pokus s difrakcí na dvou otvorech. Bohužel při diskusi tohoto experimentu dochází ke dvěma věcným a metodickým nedopatřením:

(1) O difrakci částic na dvou otvorech se mluví jako o myšlenkovém experimentu, což vzbuzuje dojem, že tento experiment nelze provést. Místo rozboru výsledku skutečného experimentu zachyceného např. fotograficky se medituje nad neskutečnými nákresey.

(2) Zaměňuje se Fresnelova a Fraunhoferova difrakce. Používané schematické nákresey odpovídají spíše Fraunhoferovým difrakčním jevům. Pouze pro Fraunhoferovy difrakční jevy totiž platí věta, že difrakci na několika identických stejně orientovaných otvorech lze charakterizovat součinem dvou funkcí, z nichž jedna odpovídá difrakci na jediném otvoru a druhá závisí jen na vzájemné poloze otvorů. Tato věta má základní význam pro studium struktury krystalů pomocí difrakce záření a odtud vešla fyzikům natolik do krve, že zapomněli, že platí pouze pro Fraunhoferovy difrakční jevy a že její použití při Fresnelově difrakci je absurdní. Rozložení intenzity očekávané z klasického, tj. korpuskulárního hlediska, se nesprávně konfrontuje s Fraunhoferovými difrakčními jevy namísto s Fresnelovými. U Fraunhoferových difrakčních jevů jde totiž o směrové rozložení intenzity, resp. energie. Tomu odpovídá difrakční obrazec v nekonečnu nebo v ohniskové rovině čočky, na což by bylo třeba čtenáře upozornit. (Použití čočky je však zbytečné a znepřehledňuje průzračnou jednoduchost Youngova pokusu.)

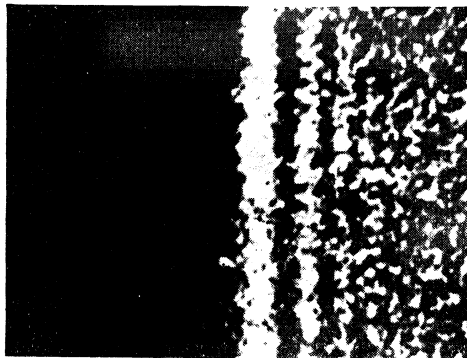
Zaměňování Fresnelových a Fraunhoferových difrakčních jevů je pro studenta, jenž si hledí uchovat cit pro experiment, velice matoucí. Prohlíží si obrázky a grafy, u nichž vše svědčí pro to, že jde o Fraunhoferovu difrakci. Nemůže si však být jist, neboť nikde není ani zmínka o tom, že by šlo o difrakční jev v nekonečnu. Navíc v uváděných grafech není většinou vyznačeno, zda jde o závislost intenzity na souřadnici nebo na úhlu. (Se smíšenými pocity pak student vzpomíná na výtky, jichž se mu dostávalo v prvním semestru, když zapomněl v protokolu z praktika řádně popsat osy.) I když jde o věcně závažné nedostatky, nebudeme zde provádět analýzu tohoto přístupu v různých učebnicích. Uvedeme raději jeden pozitivní příklad, kterým jsou Feynmanovy učebnice [2, 3]. I když se v nich nemluví o konkrétním experimentu a používá se jen schematických náčrtků, čtenář není nikdy na pochybách, že jde o Fresnelovu difrakci na dvou otvorech, a vždy ocení užitečnost a přiměřenost obrázků.

Dříve než uvedeme přehled experimentů s difrakcí elektronů na makroskopických objektech, upozorníme ještě na jednu samozřejmost: difrakující objekty musí být vodivé a uzemněné, jinak by se totiž nabíjely a dávaly by vzniknout složitým rozptylovým obrazcům, o nichž se zmíníme v kap. 9.

Z toho, co jsme uvedli v kap. 5 a 6, je patrné, že první experimenty s difrakcí a interferencí elektronů byly analogií optiky rentgenového záření. Difrakce částic na krystalových mřížkách byla obdobou rentgenové difraktografie a zmíněné experimenty Ruppovy,

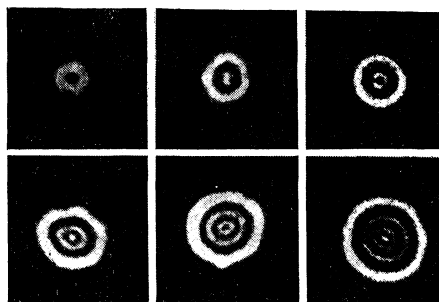
Worsnopovy a Knauerovy-Sternovy byly obdobou Comptonova-Doanova pokusu s ohybem rentgenového záření na ryté mřížce [4]. Ve všech těchto pokusech šlo o směrové rozložení difraktovaných paprsků, tedy – v optické terminologii – o Fraunhoferovu difrakci. Stále chyběly Fresnelovy difrakční jevy získané elektrony, při nichž se sleduje rozložení intenzity v rovině umístěné v konečné vzdálenosti od difraktujícího objektu. (Fresnelovy ohybové jevy jsou však nepostradatelné při důkazu vlnové povahy záření. Právě v době vzniku vlnové mechaniky to bylo zdůrazněno P. Ehrenfestem a P. S. Epsteinem, kteří uzavírají dvojici článků [5] věnovanou difrakci fotonů zjištěním: „Je zřejmé, že Fresnelovu difrakci nelze vysvětlit v rámci pouze korpuskulárních představ.“)

Teprve elektronová mikroskopie umožnila studovat Fresnelovy ohybové jevy získané elektrony. Po vynálezu elektronového mikroskopu však bylo třeba sedmi let technického zdokonalování, než dostatečné zvětšení a rozlišovací schopnost mikroskopu umožnily pozorovat Fresnelovy ohybové jevy. Tmavé a světlé proužky těchto jevů se pozorují v elektronovém mikroskopu při rozostřeném obrazu a malé úhlové apertuře osvětlovacího svazku. Je zajímavé, že tyto jevy byly původně mylně interpretovány a vysvětlovány chromatickou [6] nebo otvorovou [7] vadou objektivu. Avšak již za necelý rok – v r. 1940 – upozornili H. Boersch [8] a J. Hillier [9] na Fresnelovy ohybové jevy v elektronově optických obrazech a H. Boersch současně publikoval [10] první difrakční obrazec tohoto typu – ohyb elektronů na okraji nepropustné poloroviny (obr. 7.1).



Obr. 7.1. První snímek Fresnelovy difrakce elektronů na nepropustné polorovině publikovaný H. Boerschem v r. 1940 [10]. Polorovina byla z amorfního kysličníku hlinitého. Vzdálenost zdroje elektronů od poloroviny byla 0,35 mm; vzdálenost roviny pozorování od poloroviny 313 mm; vlnová délka $\lambda = 6,6 \cdot 10^{-9}$ mm (34 keV).

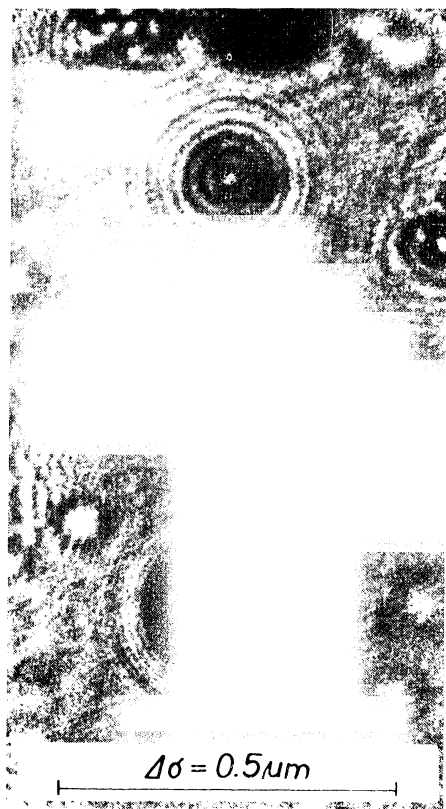
Obr. 7.2. Fresnelovy difrakční jevy získané difrakcí elektronů na kruhových otvorech v nepropustném stínítku [11–13].



Od té doby se Fresnelovy ohybové jevy využívají ke správnému zaostření, ke korekci osového astigmatismu a vůbec k posouzení provozních vlastností elektronového mikroskopu. Z mnoha publikovaných snímků reprodukuje několik obecně zajímavých na obr. 7.2 až 7.6.

Na obr. 7.2 jsou Fagetovy a Fertovy snímky Fresnelovy difrakce na kruhových otvorech v nepropustném stínítku [11–13]. Jednotlivé snímky odpovídají situacím, kdy otvor propouští dvě až sedm Fresnelových zón. Odchytky od rotační symetrie jsou způsobeny tím, že tak malé otvory (průměr kolem jednoho mikronu) bylo obtížné vyrobit i jen přibližně kruhové. Pozoruhodná je intenzita ve středech difrakčních obrazců: jak vyplývá z Fresnelovy zónové konstrukce, je při sudém počtu propuštěných zón nulová intenzita ve středu difrakčního obrazce, naproti tomu při lichém počtu propuštěných zón je relativní intenzita uprostřed obrazce maximální (rovna čtyřem).

Komplementárním difrakčním jevem k difrakci na kruhovém otvoru je difrakce na nepropustných kruhových překážkách. Snímek Fresnelových jevů tohoto typu získaný V. Drahošem [14] je uveden na obr. 7.3. Malé latexové kuličky posloužily jako nepro-



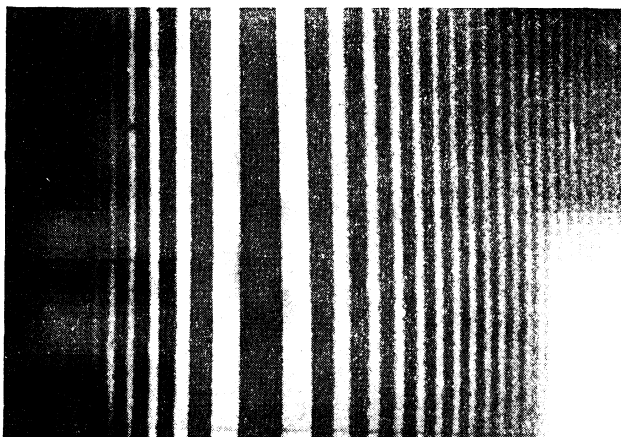
Obr. 7.3. Fresnelova difrakce elektronů na kuličkách z polystyrenového latexu odstíňujících jednu, resp. čtyři Fresnelovy zóny [14]. Parametry experimentálního uspořádání: vlnová délka $\lambda = 4,33 \cdot 10^{-9}$ mm (75 keV); poloměry kuliček 0,12 μm ; vzdálenost zdroje od kuliček 42,8 mm; vzdálenost roviny pozorování od kuliček 0,78 mm. Úsečka značí měřítko v rovině pozorování.

puštěné kruhové překážky. Aby se nenabíjely, byly pokryty tenkou vodivou vrstvou. Víceméně náhodou byly parametry experimentálního uspořádání takové, že menší z kuliček zastíňuje jednu, větší čtyři Fresnelovy zóny. Uprostřed obou difrakčních jevů je zřetelná Fresnelova-Aragova stopa (o jednotkové relativní intenzitě), která se vždy objevuje ve středu Fresnelova difrakčního jevu na kruhových překážkách.

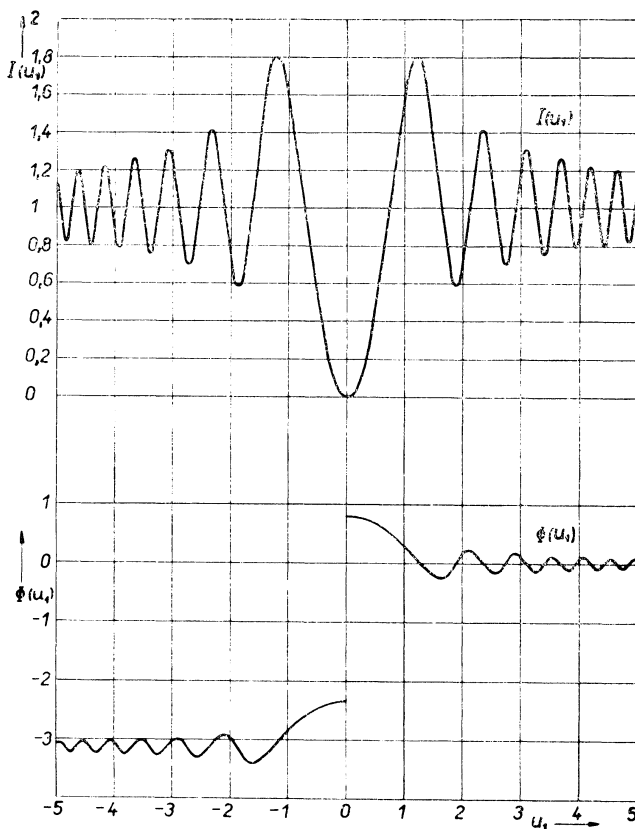
Zajímavý difrakční jev byl publikován v r. 1957 J. Fagetem a Ch. Fertem [12, 13, 15]

(obr. 7.4). Jde o Fresnelovu difrakci elektronů na neabsorbující polorovině posouvající fázi o π . Polorovinu tvořila tenká uhlíková blanka (15 nm), která jen nepatrně absorbuje elektrony. Fázový posuv vzniká v důsledku vnitřního potenciálu ϕ uhlíku. Ten způsobuje

Obr. 7.4. Fresnelova difrakce elektronů na přímkovém okraji téměř dokonale propustné uhlíkové blány posouvající fázi o π [12, 13, 15]. Tloušťka blány je asi 15 nm, vlnová délka $\lambda = 3,7 \cdot 10^{-9}$ mm (100 keV).

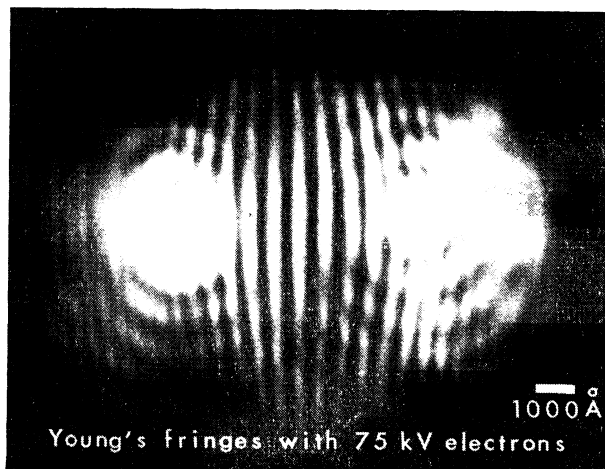


Obr. 7.5. Vypočtené rozložení relativní intenzity I a fáze ϕ ve Fresnelově ohybovém jevu na dokonale propustné polorovině posouvající fázi o π (srov. obr. 7.4). Parametr u_1 je úměrný vzdálenosti od středu difrakčního obrazce. Ve středu difrakčního obrazce, tj. v místě $u_1 = 0$ odpovídajícím průmětu okraje poloroviny, je intenzita nulová a fáze je nespojitá — mění se skokem o π .



buje, že uhlíková blána má vzhledem k elektronům s kinetickou energií T index lomu $n \doteq 1 + |e\phi|/2T$, jenž je různý od jedné, takže na tloušťce d uhlíkové blány dochází k fázovému posuvu $2\pi(n - 1) d/\lambda \doteq |e\phi| \pi d/T\lambda$. Jak ukazuje výpočet (obr. 7.5), mělo by být za ideálních experimentálních podmínek rozložení intenzity v rovině pozorování souměrné podle průmětu okraje poloroviny.

Fresnelovu difrakci na dvou otvorech (Youngův pokus) zamýšlel provést L. Marton [16] kolem r. 1950. Od realizace experimentu však upustil pro obtíže vyplývající z malé vlnové délky elektronů. V letech 1956–1961 publikovali J. Faget a Ch. Fert [11–13, 15] několik difrakčních jevů na dvojici kruhových otvorů. Jejich snímky však měly dvě zvláštnosti, které nebyly zcela vysvětleny: (1) střední proužek byl vždy tmavý a nikoli světlý, (2) uvnitř průmětů otvorů nebyly pozorovatelné difrakční proužky lemující okraje otvorů. Kvalitnější snímky byly publikovány v r. 1973 A. Tonomurou a T. Komodou [17]. Proužky mezi průměty otvorů byly na jejich snímcích zřetelné. Přitom střední proužek byl vždy světlý. Proužky uvnitř průmětů otvorů byly na některých snímcích rovněž patrné. Zatím nejdokonalejší snímky Fresnelovy difrakce na dvou otvorech publikovali M. Ohtsuki a E. Zeitler [18] v r. 1977. Na obr. 7.6 uvádíme snímek, který zasílal E. Zeitler jako pozdrav k Novému roku 1975. Na snímku je zajímavé, že „interferenční“ proužky nejsou rovné, ale mají „soudkovitý“ tvar. Je obtížné výpočtem ověřit, zda tomu tak má být. Analogický pokus s laserovým světlem však dává stejný výsledek.



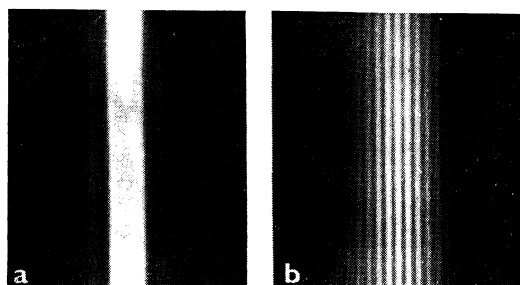
Obr. 7.6. Fresnelova difrakce elektronů na dvou kruhových otvorech ve zlaté fólii. Průměr otvorů je přibližně $1 \mu\text{m}$. Zdrojem elektronů je autoemisní katoda, divergence osvětlovacího svazku je menší než 10^{-6} rad [18].

Pozoruhodné snímky Fraunhoferových difrakčních jevů na jedné i několika štěrbinách publikovali G. Möllenstedt a C. Jönsson v r. 1959 [19]. Zvláště zdařilé byly snímky C. Jönssona z r. 1961 [20]. Jönsson vyráběl speciální elektronově optickou a elektrolytickou cestou měděné fólie tlusté $0,5 \mu\text{m}$ s jednou až pěti štěrbinami dlouhými $50 \mu\text{m}$, širokými pouze $0,3–0,5 \mu\text{m}$ a mřížkovou konstantou $1 \mu\text{m}$. Dva z jeho snímků představující Fraunhoferovu difrakci na jedné a dvou štěrbinách jsou uvedeny na obr. 7.7. Byly získány tak, že elektronový zdroj o šířce 5 nm osvětloval štěrbinu vzdálenou od něho 30 cm a byl zobrazen elektronovou čočkou s velkou ohniskovou vzdáleností (asi 15 cm)

umístěnou těsně za štěrbinami. V rovině obrazu zdroje pak byla pozorována Fraunhoferova difrakce na štěrbinách. Je zřejmé, že získané difrakční jevy zcela odpovídají difracím známým ze světelné optiky. (Pro porovnání uvádíme parametry analogického uspořádání pro světelnou optiku: šířka zdroje 5 mm, šířka štěrbin 5 cm, vzdálenost zdroje od štěrbin 30 km, ohnisková vzdálenost čočky asi 15 km.)

Jönssonův experiment byl proveden na zvláštní elektronově optické aparatuře s válcovými čočkami. V průběhu šedesátých let byla vypracována metodika elektronové difrakce pod malými úhly v běžných elektronových mikroskopech [21]. S její pomocí lze ve většině prozařovacích elektronových mikroskopů pozorovat Fraunhoferovu difrakci elektronů na vnějším tvaru makroskopických objektů. Pěkné a instruktivní difrakční obrazce dávají náhodně rozmístěné pouhlikované latexové kuličky [21, 22] a repliky optických mřížek [22].

Obr. 77. Fraunhoferova difrakce elektronů na štěrbině (a) a dvou štěrbinách (b) [20]. Vlnová délka $\lambda = 5,4 \cdot 10^{-9}$ mm (50 keV).



Mohlo by se zdát, že pokusy popsané v této kapitole jsou sice zajímavé, jsou snad užitečné z pedagogického hlediska, jsou jistě užitečné pro speciální obory jako např. pro elektronovou mikroskopii, že však současné fyzice už nemají co říci. Z tohoto hlediska je zajímavý abstrakt přednášky G. Möllenstedta [23] na 7. evropské konferenci o elektronové mikroskopii v Haagu v r. 1980. Pojednává o aplikacích Soretovy (Möllenstedt říká Fresnelovy) zonální ploténky k fokusaci a zobrazování pomocí rentgenového záření, ultrazvuku a — a to je zvláště zajímavé a překvapující — neutronů. Je v něm např. uvedeno, že měděná fólie tloušťky 2,5 μm , pro neutrony dokonale propustná, obrací fázi neutronů o vlnové délce $\lambda = 2$ nm. Z takové fólie byla v Laueově-Langevinově ústavu v Grenoblu vyrobena zonální ploténka, která fokusuje svazek neutronů. Ploténku tvoří 200 měděných kroužků nesených křemíkovou podložkou, průměr první zóny je 140 μm a vnější průměr ploténky je 2 mm. Tato ploténka fokusuje rovnoběžný svazek neutronů o $\lambda = 2$ nm ve vzdálenosti 2,5 m a používá se jí pro experimenty s neutronovou mikroskopií. Není to ukázkové propojení klasické a moderní fyziky? Nestimuluje to zájem o podstatu fázového posuvu neutronových vln?

Literatura

- [1] PUŠKIN A. S.: *Eugen Oněgin*. Přel. J. HORA. SNKLU, Praha 1962, 241.
- [2] FEYNMAN R. P., LEIGHTON R. B., SANDS M.: *The Feynman lectures on physics. Volume III. Quantum mechanics*. Addison—Wesley, Reading, Mass. 1965, kap. 1 až 3.

- [3] FEYNMAN R. P., HIBBS A. R.: *Quantum mechanics and path integrals*. McGraw-Hill Books Co., New York 1965, kap. 1.
- [4] COMPTON A. H., DOAN R. L.: Proc. Nat. Acad. Sci. *11* (1925), 598.
- [5] EPSTEIN P. S., EHRENFEST P.: Proc. Nat. Acad. Sci. *10* (1924), 133.
EHRENFEST P., EPSTEIN P. S.: Proc. Nat. Acad. Sci. *13* (1927), 400.
- [6] HILLIER J.: Canad. J. Res. *A 17* (1939), 64.
- [7] BORRIES B. v., RUSKA E.: Naturwiss. *27* (1939), 281.
- [8] BOERSCH H.: Naturwiss. *28* (1940), 711.
- [9] HILLIER J.: Phys. Rev. *58* (1940), 842.
- [10] BOERSCH H.: Naturwiss. *28* (1940), 709.
- [11] FAGET J., FERT CH.: Compt. Rend. Acad. Sci. Paris *243* (1956), 2028.
- [12] FAGET J., FERT CH.: Cah. Phys. *11* (1957), 285.
- [13] FAGET J.: Revue d'Optique *40* (1961), 347.
- [14] DRAHOŠ V., KOMRSKA J. ve sborníku *Fourth Czech. Conf. on Electronics and Vacuum Physics*. (Vyd. PÁTÝ L.) NČSAV, Prague 1968, 544.
- [15] FERT CH. ve sborníku *Traité de microscopie électronique*. (Vyd. MAGNAN C.) Herman, Paris 1961, 338, 359.
- [16] MARTON L.: Science *118* (1953), 470; též ve sborníku *Proceedings of the Third International Conf. on Electron Microscopy 1954*. (Vyd. ROSS R.) Royal Microscopical Society, London 1956, 272.
- [17] TONOMURA A., KOMODA T.: Journal of Electron Microscopy *22* (1973), 141.
- [18] OHTSUKI M., ZEITLER E.: Ultramicroscopy *2* (1977), 147.
- [19] MÖLLENSTEDT G., JÖNSSON C.: Z. Phys. *155* (1959), 472.
- [20] JÖNSSON C.: Z. Phys. *161* (1961), 454.
JÖNSSON C.: Am. J. Phys. *42* (1974), 4, 423.
- [21] DRAHOŠ V., DELONG A.: Nature *209* (1966), 801.
DRAHOŠ V., DELONG A.: Slaboproudý obzor *27* (1966), 494.
- [22] MADER S., HERD S. R.: Journal of Applied Physics *38* (1967), 2396.
- [23] MÖLLENSTEDT G. ve sborníku *Electron Microscopy 1980. Volume 1, Physics*. Published by the Seventh European Congress on Electron Microscopy Foundation, Leiden 1980, 2.

Bifurkácie negradientných dynamických systémov

Pavol Brunovský, Milan Medveď, Bratislava

1. Úvod

Úvodom tohto článku, ktorý pojednáva o teórii singularít diferenciálnych rovníc a ich parametrických deformáciach, spomeňme teóriu singularít funkcií závislých na parametroch, resp. Thomovu teóriu katastrof. Táto teória totiž už vošla do povedomia matematikov a vďaka sérii pekných článkov [19, 20, 21, 34] si o nej mali možnosť urobiť