

GEORGE JIŘÍ SCHULZ

A JEHO ELEKTRONOVÉ MONOCHROMÁTORY

Jiří Horáček, Ústav teoretické fyziky MFF UK, V Holešovičkách 2, 180 00 Praha 8

*Zdeněk Herman, Ústav fyzikální chemie Jaroslava Heyrovského AV ČR,
Dolejškova 3, 182 23 Praha 8*



1/ George Jiří Schulz

Letos je tomu třicet let, co zemřel významný americký fyzik českého původu George Jiří Schulz. Byl to slavný experimentální fyzik. V sedmdesátých letech málokdo pochyboval o tom, že mu za jeho epochální objev rezonančního záchytu elektronů na atomech a molekulách bude udělena Nobelova cena za fyziku. Bohužel, těžký infarkt, který přerval jeho život v pouhých padesáti letech, této poctě zabránil.

Jiří Schulz se narodil 29. dubna 1925 v Brně. Jeho otec byl učitelem ekonomie a matka byla v domácnosti. Mládí prožíval v období okupace Československa fašistickým Německem a tato zkušenost ho silně poznamenala na celý život. Za války byl mladý J. Schulz vězněn čtyři roky v Německu. V roce 1947 odjel Jiří Schulz na stipendium do USA a začal studovat fyziku na *Pennsylvania State University*. Zde dosáhl v roce 1949 titulu bakalář (B. S.) a v roce 1950 titulu master (M. A.). V roce 1954 získal titul Ph.D. na *Massachusetts Institute of Technology*. Při přijetí amerického občanství si změnil jméno na

George Jiří Schulz. V roce 1968 se těšil na návštěvu Československa, ale přišla sovětská okupace 21. srpna a George Schulz již se do Československa nikdy nevrátil.

První část své vědecké činnosti spojil George Schulz s výzkumnými laboratořemi firmy Westinghouse (*Westinghouse Research Laboratories*) v Pittsburghu. To bylo v poválečných letech významné centrum výzkumu v atomové fyzice s výbornou vědeckou atmosférou. Působila tu řada fyziků, jejichž jména jsou spojena s rozvojem fyziky ionizovaných plynů (M. A. Biondi, A. V. Phelps, R. E. Fox, W. M. Hickham, J. A. Hipple a jiní). Patřil sem i jiný brněnský rodák, Alois Langer, který zde uvázl během studia v rámci Fulbrightova stipendia těsně před válkou a na jehož příspěvek k počátkům iontové fyziky a hmotnostní spektrometrie se zcela zapomíná.

Ve své práci se zaměřil George Schulz na studium ionizovaných plynů. To byla velmi překvapivá volba, protože tento obor ležel v té době daleko mimo hlavní proud fyzikálního výzkumu. Tato intuitivní volba se však zanedlouho ukázala jako vynikající. Za tři léta po ukončení jeho doktorského studia totiž vyletěl Sputnik a náhle všechno, co mělo vazbu na kosmický program, nabylo na důležitosti. Procesy v ionizovaných plynech byly náhle v centru pozornosti jako základní procesy v horních vrstvách atmosféry. Tato schopnost dobré intuitivní volby ho provázela po celý život. Jako první prolomil hranici 100 meV v energetickém rozlišení elektronového svazku a tento krok představoval úplnou renesanci elektronové spektroskopie. V roce 1963 oznámil G. J. Schulz objev slavné rezonance na heliu s energií 19,3 eV. Za tento objev obdržel v roce 1965 od Americké fyzikální společnosti Davisson-Germerovu cenu. Na 3. mezinárodní konferenci o fyzice elektronových a atomárních srážek ICPEAC, která se konala v Londýně v srpnu roku 1963, prohlásil prof. H. Massey tento objev za nejvýznamnější objev v oblasti atomové fyziky za posledních dvacet let.

V roce 1966 G. J. Schulz přijal nabídku *Yale University* a stal se profesorem v nově budovaném oddělení inženýrství a aplikované vědy. Na Yaleově univerzitě se věnoval hlavně studiu srážek elektronů

s molekulami, měření procesu vibrační excitace molekul dopadem elektronu, objevil slavnou „bumerangovou“ strukturu v molekulárním dusíku a studoval proces disociativního záchytu elektronů na molekulách. Jako první a dosud jediný změřil účinné průřezy disociativního záchytu elektronu na molekulách vodíku a deuteria a objevil zde neočekávaně silný izotopický jev. Jeho data jsou dodnes využívána například při studiu procesů v raných stadiích vývoje vesmíru, modelování procesů v plazmatu a v mnoha dalších oblastech. Výsledky jeho práce jsou shrnuty ve dvou klasických publikacích: Je to zaprvé práce věnovaná atomárním rezonancím nazvaná *Resonances in Electron Impact on Atoms*, která vyšla v roce 1973 v *Reviews of Modern Physics*, číslo 45, strana 378–422, a práce věnovaná dvouatomovým molekulám nazvaná *Resonances in Electron Impact on Diatomic Molecules*, která vyšla v témže roce v *Reviews of Modern Physics*, 45, strana 423–486.

G. J. Schulz zemřel náhle ve věku padesáti let 15. ledna 1976 na zástavu srdce. Jeho práce je živá i dnes. Monochromátory, které byly vyvinuty v jeho laboratoři se používají dodnes a díky jim je možné studovat i tak složité procesy, jako je například radiační poškození molekul DNA apod. Osobností takového formátu, jako byl G. J. Schulz, je málo a neměly by být zapomenuty.

V tomto příspěvku bychom rádi podali stručný popis některých jeho experimentů a ukázali vliv jeho práce na další rozvoj fyziky elektron-atomových a elektron-molekulových srážek. Nejprve půjde o pohled očima teoretického fyzika, v druhé části pak náhled fyzika experimentálního.

POHLED TEORETICKÉHO FYZIKA

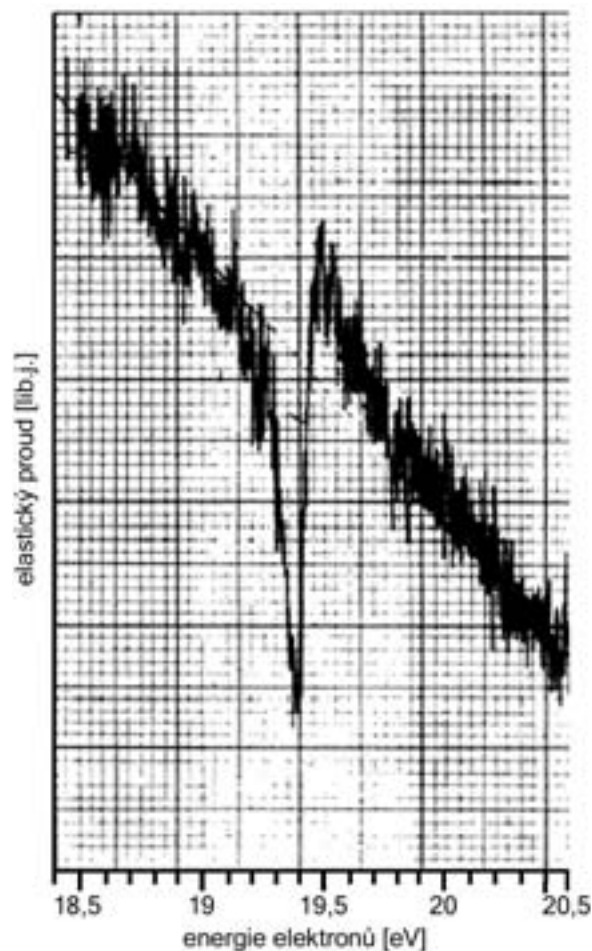
Z mnoha výsledků G. J. Schulze se jsme vybrali tři velmi důležité oblasti: 1. atomární rezonance, 2. vibrační excitace molekuly dusíku dopadem elektronu a 3. disociativní záchyt elektronu na molekule vodíku, které dobře reprezentují širokou škálu jeho činnosti a které měly zásadní vliv jak na rozvoj experimentu, tak hlavně na rozvoj teorie v této oblasti. Začneme nejprve prací, za kterou dostal cenu Americké fyzikální společnosti.

Atomární rezonance

V roce 1948 studoval E. Wigner [E. P. Wigner, Phys. Rev. 73 (1948) 1002] obecné chování účinných průřezů srážkových procesů a předpověděl jisté obecné vlastnosti těchto veličin. Tak například kanál elastického rozptylu „cítí“ existenci kanálů, v nichž může docházet k excitaci terčového atomu nebo molekuly. Dá se za jistých předpokladů předpovědět, že při energii, při které se excitační kanál otevírá, bude mít účinný průřez elastického kanálu

singularitu (nespojitosť první derivace), jejíž tvar je v podstatě dán jen tvarem interakce na velkých vzdálenostech. Tyto singularity (Wignerovy cuspy) by měly být běžným jevem ve všech srážkových procesech. Wignerova teorie ale neříká, jak ostré tyto singularity mají být. Neurčuje energetickou oblast, v níž by bylo možné tyto struktury pozorovat. Pokud by byly velmi úzké, je jasné, že jak vliv teploty, tak i špatné energetické rozlišení elektronového svazku tyto struktury rozmaže tak, že v experimentu nebudou vůbec vidět. Protože G. J. Schulz ve svých experimentech dosahoval velmi přesné energie elektronů, rozhodl se studovat existenci Wignerových cuspy při srážkách elektronů s atomy. Pro experiment je velmi vhodné helium. Netvoří molekuly a jeho energetické hladiny jsou dobře známy. První excitovaná hladina je dosažitelná při energii 19,8 eV. Výsledek Schulzova experimentu z roku 1962 je na následujícím obrázku [10].

Je zde vidět skutečně úzká struktura tvarem připomínající Wignerův cusp. Ale pozor, tato struktura je pozorována při energii 19,3 eV, a ne 19,8 eV, jak by měla být. Co je zde špatně?



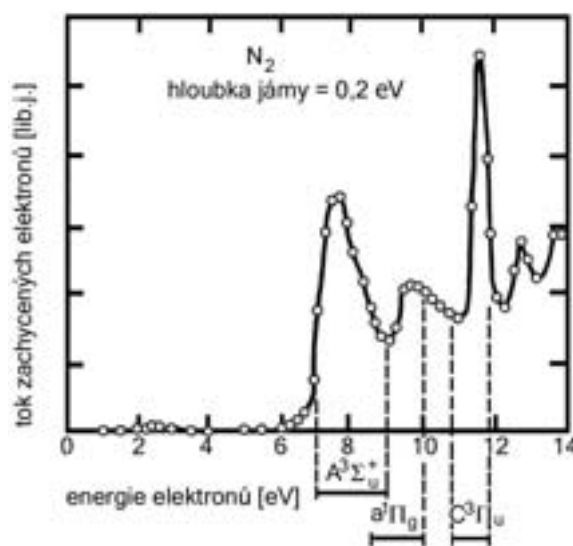
2/ X – Y záznam křivky elastického účinného průřezu vs energie elektronu. Pokles účinného průřezu v 19,3 eV je přibližně 14 %.

Je špatně určena energetická kalibrace elektronového svazku a leží tedy tato struktura při správné energii? To by mohlo být, protože kalibrace elektronového svazku je vždy problémem. Po pečlivém přezkoumání se ale ukázalo, že kalibrace je v pořádku a že tato struktura leží skutečně téměř půl elektronvltu pod energií, kde by měla být. Bylo tedy jasné, že G. J. Schulz objevil něco jiného, a daleko zajímavějšího, než Wignerův cusp. Na počátku šedesátých let publikoval Herman Feshbach řadu prací, v nichž předpověděl nový typ stavů v jistém smyslu s dlouhou, ale konečnou dobou života. Tyto stavy jsou dnes známy jako Feshbachovy rezonance [H. Feshbach, Ann. Phys. (N.Y) 5 (1958), 357]. Podstatou těchto rezonancí v atomech je ten fakt, že interakce excitovaného atomu s dopadajícím elektronem je přitažlivá a někdy natolik silná, že dokáže dopadající elektron zachytit do kvazivázaného stavu. Pokud by se excitovaný elektron nemohl vrátit na svoji základní hladinu, jednalo by se skutečně o vázaný stav heliového aniontu. Protože ale excitovaný elektron může přejít na svoji základní hladinu a přebytečnou energii předat druhému elektronu, bude tedy tento stav žít jen po konečnou dobu a přebytečný elektron odletí. Pokud takový stav bude existovat, bude jeho energie ležet pod excitační energií atomu o hodnotě rovné „vazbové“ energii dodatečného elektronu. G. J. Schulz tedy pozoroval Feshbachovu rezonanci a ne Wignerův cusp. Tím byla otevřena cesta k objevu mnoha rezonancí jak v atomech, tak i v molekulách. Tak například analogickou rezonanci v atomárním vodíku pozoroval G. J. Schulz v roce 1964 (experimenty s atomárním vodíkem jsou velmi obtížné, protože vodík je prudce reaktivní). Za objev atomární Feshbachovy rezonance na Helium byla G. J. Schulzovi udělena v roce 1965 právem cena Americké fyzikální společnosti, Germerova cena. K výše uvedenému obrázku se vztahuje ještě jedna drobná příhoda. Změřený účinný průřez diskutoval G. J. Schulz se svým kolegou M. Biondim. Ten v zápalu diskuse vzal tužku a do obrázku nakreslil tlustou čáru interpolující účinný průřez přes oblast rezonance. Tato čára se nedala vymazat a je vidět i na obrázku. Protože v té době měl G. J. Schulz již velmi silnou konkurenci v USA, rozhodl se nečekat na nové měření a publikoval tento obrázek, jak uvedeno výše.

Vibrační excitace molekulárního dusíku

V době, kdy G. J. Schulz začínal se svými projekty, se obecně přijímalo za nepravděpodobné, aby pomalý elektron při srážce s molekulou, jako je například molekulární dusík, byl schopen změnit její vibrační stav. K této víře existují dobré důvody. Hlavní je ten, že molekula je mnohonásobně těžší než elektron. Molekula dusíku je asi 200 000krát těžší než elektron. V případě dusíku je to, jako kdybychom míčky

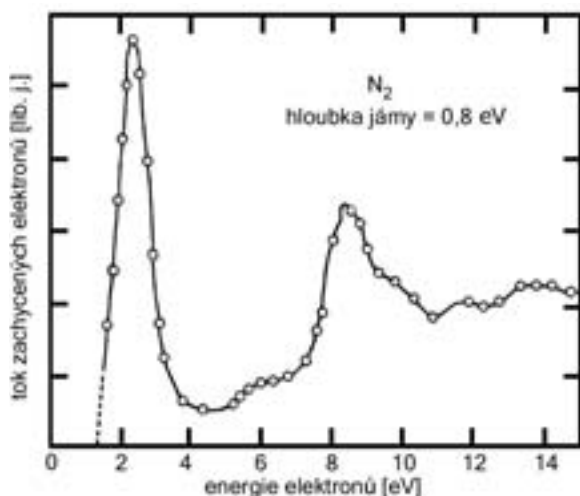
o váze 10 dkg chtěli ostřelovat plně naložený nákladník o váze 20 tun. Klasický výpočet ukazuje, že lze předat pouze nepatrnou energii, která je mnohem menší, než je vibrační energie molekuly dusíku. G. J. Schulz ale pozoroval rychlý úbytek energie elektronů v dusíkovém plynu, což se zdálo být v rozporu s obecně přijatou představou. Po vytvoření elektronových svazků s dobrým rozlišením se G. J. Schulz k této své myšlence vrátil a pomocí metody zpomalujícího potenciálu studoval ztrátu energie elektronů v dusíkovém plynu. Co se dá od takového experimentu očekávat? Pokud je energie elektronů dostatečná, bude docházet k excitaci elektronových stavů molekuly. Pro nižší energie elektronů je možná pouze vibrační a rotační excitace molekuly dusíku. Podle výše uvedeného můžeme tedy očekávat zanedbatelný účinný průřez pro elektronové energie menší než asi 6 eV a sérii maxim, odpovídající excitaci různých elektronových stavů molekuly, pro energie vyšší. Na následujícím obrázku je výsledek Schulzova experimentu. Metodou *retarding potential* byly detegovány elektrony, které při srážce s dusíkem ztratily energii 0,2 eV [4].



3/ Excitační spektrum dusíku při hloubce jámy 0,2 eV.

Obrázek skutečně odpovídá naší intuitivní představě. Maxima odpovídající elektronovým excitacím jsou zřetelně patrné. Při nižších energiích je účinný průřez nepatrný s jakýmsi náznakem čehosi při energiích okolo 2,3 eV. G. J. Schulz byl známý svou posedlostí rozumět každé „vlnce“ ve svých experimentech a samozřejmě se začal zajímat o to, co se děje v oblasti energií 2,5 eV. Na dalším obrázku vidíme výsledek jeho analogického experimentu, ve kterém ale ztráty energie byly větší. Konkrétně: detegovaly se elektrony, které ztratily energii 0,8 eV.

Výsledek je šokující. Píky odpovídající elektronové excitaci jsou viditelné i nadále, ale cosi se děje při nízkých energiích. Účinný průřez při energii



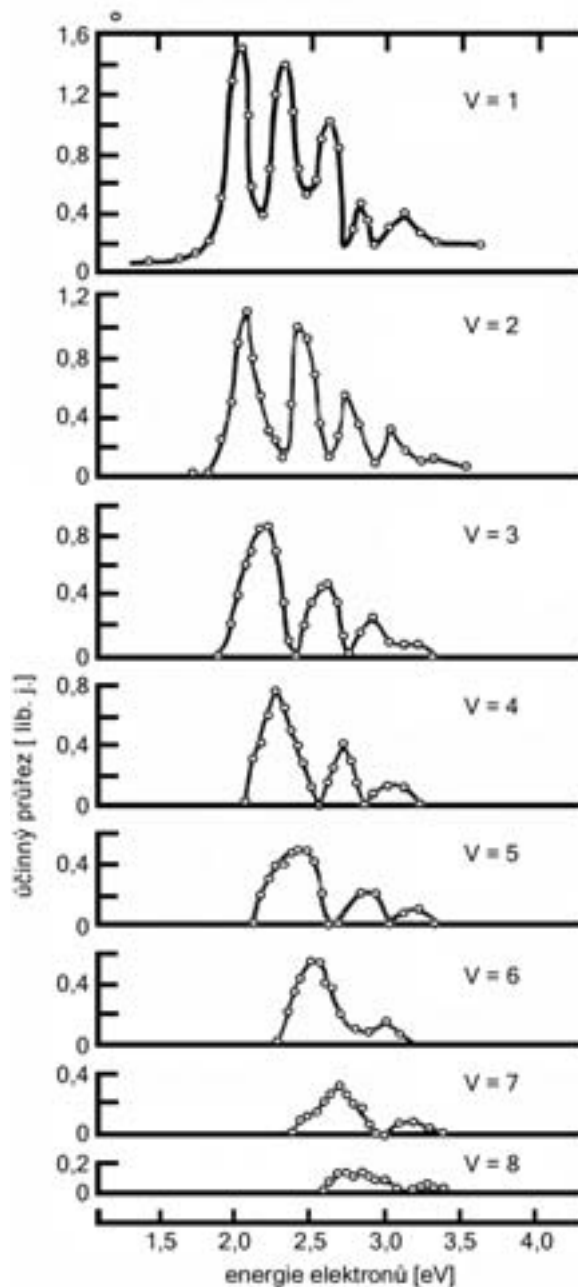
4/ Excitační spektrum dusíku při hloubce jámy 0,8 eV.

2–4 eV je obrovský, je ve skutečnosti větší než část odpovídající elektronovým excitacím. Co se zde děje? Probíhá zde nějaký nový neznámý a rychlý proces, nebo jsou naše úvahy založené na klasické fyzice chybné? Přeskočme několik let intenzivní práce a podívejme se přímo na detailní měření účinného průřezu vibrační excitace dusíku. Na dalším obrázku vidíme účinné průřezy excitace ze základního vibračního stavu do stavu $v = 8$ [15].

Na základě tohoto měření můžeme učinit dva důležité závěry.

1. Účinné průřezy vibrační excitace jsou neobyčejně veliké, a to i pro přechody do vysoce excitovaných stavů.
2. Samy účinné průřezy mají svoji vnitřní strukturu, několik velice úzkých rezonančních píků je jasné vidět zejména pro excitace do nižších vibračních stavů (dnes jsou tyto struktury známé jako bumerangové oscilace).

Teď byla na řadě teorie, na kterou působil tento experiment jako rudý hadr na býka, aby tato fakta vysvětlila, a lze říci, že tento experiment výrazně ovlivnil rozvoj teorie elektron-molekulových srážek. Dnes, po čtyřiceti letech intenzivní teoretické práce, je tento experiment již dobře vysvětlen. Podstata spočívá v tom, že se jedná o proces rezonanční. Nejedná se ale o rezonanci Feshbachova typu jako v případě rezonance na heliu, ale o tak zvanou rezonanci tvaru (*shape resonance, one-particle resonance* etc.), která je podmíněna tvarem interakce elektronu s molekulou. Typicky se tato interakce skládá z přitažlivé krátkodosahové části a odpudivé bariéry na velkých vzdálenostech. V případě dusíku je bariéra tvořena odstředivým členem, $J(J+1)/R^2$, pro $J = 1, 2$, která elektron zadrží v blízkosti molekuly. Vznikne tím molekulární komplex (TNI, *transient negative ion*), který má dlouhou dobu života ve srovnání s časem, který by elektron o dané energii potřeboval k průletu elektronovým oblakem



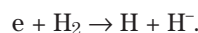
5/ Energetická závislost vibračního účinného průřezu dusíku při dopadu elektronu.

molekuly. Tato dlouhá doba života molekulárního komplexu má dva nesmírně důležité důsledky:

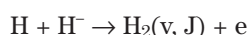
1. Umožňuje efektivně přenést energii z elektronů na molekuly a tím vysvětlit velikou magnitudu vibrační excitace.
2. Umožňuje vytvořit teoretický popis rezonanční srážky (tak zvaný nelokální rezonanční model), který vysvětluje všechny výše uvedené vlastnosti zmíněné výše a který je možné velmi přesně řešit na počítačích. Často teď známe rezonanční účinné průřezy přesněji než průřezy přímých procesů, při nichž nedochází ke vzniku molekulárního komplexu [např. J. Horáček a kol., Phys.Rev. A **73**, 022701 (2006)].

Disociativní záchyt elektronu na molekulárním vodíku

Posledním důležitým měřením G. J. Schulze, o kterém se zde zmíníme, bude studium procesu disociativního záchytu elektronu na molekule (DEA, *dissociative electron attachment*) vodíku [16], [20]. Jedná se o tento proces:



Molekula se po srážce s elektronem rozpadne na atom vodíku a záporně nabitý vodíkový ion. Tento proces je zdrojem intenzivních svazků záporných iontů vodíku a je například využíván pro ohřev plazmatu neutrálními částicemi. Obrácený proces, proces asociativního odtržení (AD, *associative detachment*)



je dominantní reakcí v raných stádiích vzniku vesmíru. Tímto procesem totiž vzniká molekula vodíku, nejhojnější molekula ve vesmíru. Jejím prostřednictvím je pak umožněno efektivní ochlazování vesmíru při teplotách pod 8000 K. G. J. Schulz jako první změřil účinné průřezy DEA, a to i v oblasti malých elektronových energií. Ukazuje se totiž, že DEA proces má první maximum při energii okolo 5 eV, druhé při vyšší energii asi 10 eV a poslední při energii 13 eV. Proces při této energii vede k tvorbě excitovaného atomu vodíku. Účinný průřez v oblasti 5 eV je velmi malý, maximum je řádu 10^{-25} m². Jeho velikost je změřena relativně k hodnotě píku při 13 eV; činí asi 8 % této hodnoty. G. J. Schulz změřil i účinné průřezy pro molekuly, v nichž jeden nebo oba atomy vodíku byly nahrazeny deuteriem, tj. HD a D₂, a při tom se ukázalo, že tyto procesy jsou ještě mnohem pomalejší než DEA pro vodík: HD asi desetkrát, D₂ asi dvěstěkrát. Tak výrazný izotopický jev nebyl dosud pozorován. Na následujícím obrázku jsou uvedeny účinné průřezy pro všechny tři izotopy vodíku. Podíly amplitud těchto procesů jsou velmi důležité pro teorii a jejich dobrá znalost by umožnila některé teorie vyřadit. Měření, která G. J. Schulz provedl, jsou ale dosud jedinými měřeními.

Kromě těchto tří vybraných prací se G. J. Schulz věnoval řadě jiných problémů, například studiu prahových chování účinných průřezů atd.

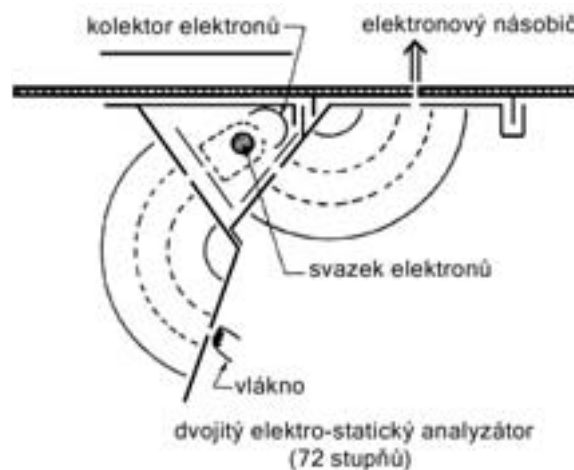
POHLED EXPERIMENTÁLNÍHO FYZIKA

Převážnou část své práce věnoval George Schulz atomové a molekulové fyzice a elementárním procesům srážek elektronů s atomy a molekulami. Experimentální práce spočívala v měření elastických a neelastických srážek elektronů s atomy a molekulami a určení totálních průřezů nebo dife-

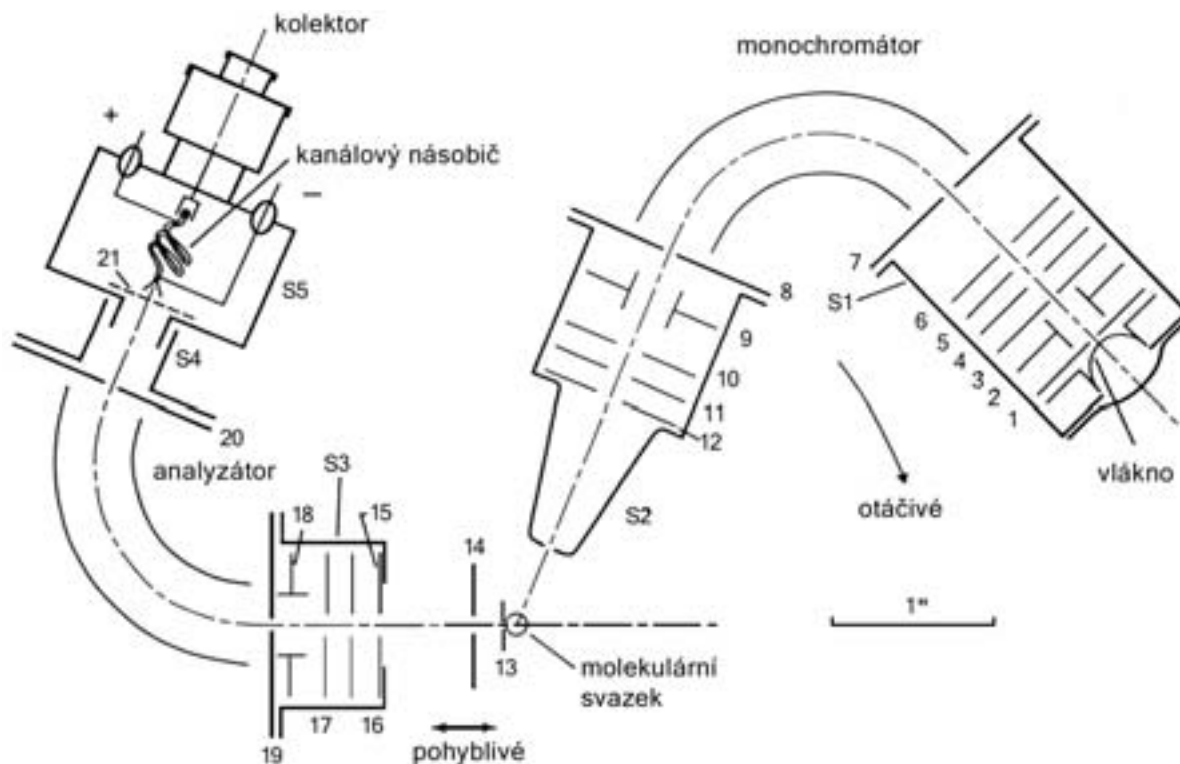
renciálních průřezů (tj. průřezů v závislosti na rozptylovém úhlu) těchto procesů. Základní podmínkou práce, která vedla k jeho zásadním objevům, byla příprava monochromatického svazků elektronů s úzkým rozdělením energie (0,02–0,1 eV). Většina jevů, které sledoval, totiž probíhá ve velmi úzké oblasti energií a při větším rozptylu energií v elektronovém svazku zkrátka zaniká.

Nejběžnější příprava elektronového svazku dostatečné intenzity spočívá v emisi elektronů z rozžhaveného vlákna, urychlení uvolněných elektronů potenciálním rozdílem na danou energii a vyclonění svazku pomocí elektrostatických čoček se štěrbinami. Materiálem vlákna bývá wolfram, wolfram pokrytý karbidem wolframu, nebo Schulzem často používané iridium pokryté thoriem. Díky vysoké teplotě emitujícího vlákna je rozptyl energií elektronů v paprsku velikosti až několika elektronvoltů. Pro potřeby práce s monoenergetickými elektrony je třeba tedy takový svazek zpracovat vhodným monochromátorem.

Základním typem selektoru energie elektronů je cylindrický monochromátor energie, popsáný už v třicátých letech a technicky dopracovaný počátkem šedesátých let (viz levá část obr. 6). Elektrony emitované rozžhaveným vláknem jsou urychleny vloženým napětím v úzké štěrbině, jíž procházejí do elektrostatického válcového pole, tvořeného dvěma válcovými sífkami, na které je vložen potenciální rozdíl. V tomto elektrickém poli opisují elektrony kruhové dráhy s různým poloměrem podle své energie. Výstupní štěrbinou je umístěna na stejném poloměru jako vstupní štěrbinou tak, aby úhel odklonu byl 127° (u úhlu odklonu $\pi/\sqrt{2}$ je totiž ohnisko elektronového paprsku, který vstupuje s mírnou divergencí vstupní štěrbinou do cylindrického pole). Rozlišovací schopnost monochromátoru je závislá na šířce vstupní a výstupní štěrbinou a poloměru cylindrického pole a tento typ



6/ Schéma aparatury s dvěma elektrostatickými analyzátory.

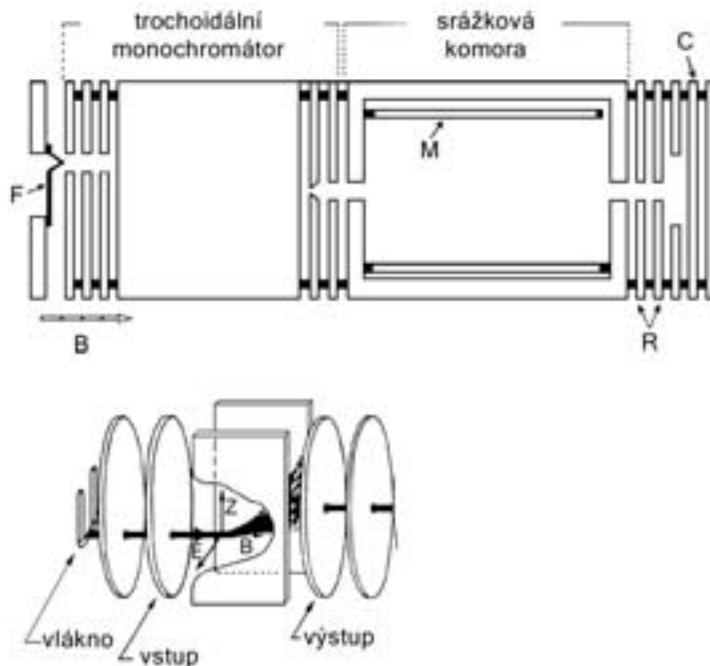


7/ Schéma aparatury s elektrostatickým deflekčním monochromátorem a elektrostatickým analyzátozem. Úhlový rozptyl lze sledovat otáčením analyzátoru vzhledem k monochromátoru.

poskytuje elektronové svazky s rozptylem energií 50–100 meV. G. J. Schulz použil tohoto zařízení v experimentech, které vedly k zásadnímu objevu rezonancí v elastickém rozptyle elektronů v heliu ([10], viz také obr. 2). V tomto zařízení byl tento cylindrický monochromátor použit ve spojení se analyzátozem energií stejného cylindrického typu. Ten analyzoval v tomto experimentu energii elektronů, rozptýlených v heliu pod úhlem 72° (vzhledem k původnímu směru dopadajících elektronů). Celý aparát je schematicky na obr. 6. V sedmdesátých letech používal Schulz ke studiu rezonancí a elastického i neelastického diferenciálního rozptylu elektronů vylepšenou aparaturu, spočívající na téže principu 127° cylindrických analyzátorů (obr. 7). Elektronem emitované z vlákna (na obrázku vpravo) jsou urychleny a zfokusovány elektrostatickými čočkami do cylindrického monochromátoru a iontovou optikou soustředěny na molekulový paprsek sledovaných částic. Elektronem rozptýlené srážkami pod určitým úhlem jsou analyzovány dalším cylindrickým analyzátozem a registrovány kanálovým násobičem.

Později vyvinul George Schulz, společně se svým bělehradským kolegou Alexem Stamatovičem, nový typ jednoduchého a účinného monochromátoru energií elektronů, tzv. trochoidálního monochromátoru [21]. Tento přístroj využívá magnetického pole, orientovaného axiálně ve směru pohybu elektronů, v kombinaci s příčným elektrickým polem. V těchto

zkřížených polích opisují elektrony trochoidální křivky a pohybují se ve směru kolmo jak na magnetické, tak na elektrické pole, přičemž jejich konečná odchylka od původního směru je různá podle jejich rychlosti (viz obr. 8, dolní část). V používaném zařízení byly elektrony, uvolňované z iridiového

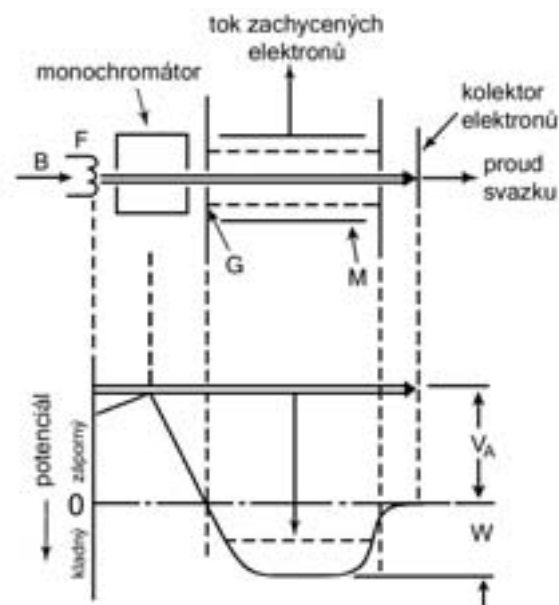


8/ Schéma transmisního elektronového spektrometru (nahore) a schéma trochoidálního monochromátoru.

vlákná, urychleny ke štěrbině umístěné excentricky (0,32 cm) vzhledem k ose monochromátoru a vnikaly vstupním otvorem do elektrostatického pole mezi paralelními elektrodami 1,9 cm dlouhými. Celé zařízení bylo umístěno v axiálním magnetickém poli o velikosti 100–250 G. Vložením vhodného napětí na deflekční destičky byl paprsek rozmnítán podle rychlostí elektronů, takže výstupní štěrbinou, umístěnou v ose přístroje, procházely jen elektrony s malým rozptylem energie. Tento monochromátor dosahoval rozlišovací schopnosti lepší než 0,02 eV (20 meV) při zachování dostatečně vysoké intenzity monochromatického paprsku elektronů.

Schulz a jeho spolupracovníci použili tohoto monochromátoru úspěšně v aparatuře pro měření rezonancí v totálním průřezu srážek elektronů s atomy a molekulami [35]. Rezonance se zde projevují jako jemné struktury v závislostech totálního průřezu na energii elektronů. Aparaturu pro tuto tzv. transmisní elektronovou spektroskopii (obr. 8, horní část) tvořil trochoidální monochromátor, z něhož monochromatické elektrony postupovaly do srážkové komory, kde se srážely s terčovými molekulami. Elektrony, které prošly výstupní štěrbinou, byly zbrzděny na energii asi 0,2 eV napětím na zpomalovacích elektrodách R. Toto zbrzdění zabránilo většině elektronů, rozptýlených ve srážkách, aby dorazily ke kolektoru C: rychlosti elasticky rozptýlených elektronů měly jiný směr a tudíž jejich složka rychlosti ve směru brzděného pole nebyla dostatečně velká k překonání potenciální bariéry a neelasticky rozptýlené elektrony neměly k tomu dostatečnou energii. Kolektor C tak zaznamenával jenom elektrony nerozptýlené ve srážkách (proud $I(E)$). Z této hodnoty proudu elektronů ke kolektoru lze pak stanovit totální srážkový průřez, $Q_t(E)$, a jeho závislost na energii elektronů E , $I(E) = I_0 \exp(-NQ_t L)$, kde I_0 je proud elektronů vstupujících do srážkové komory, N je hustota částic terčového plynu a L je délka srážkové komory. Přístroj umožňoval také použití derivační techniky, při níž bylo na válcovou elektrodu M , umístěnou ve srážkové komoře, přivedeno malé modulační napětí (0,05–0,06 V), které vedlo k jemné modulaci energie elektronů. Výsledná modulace proudu elektronů k detektoru byla zaznamenána synchronním detektorem. Tento způsob detekce umožnil sledovat jemné změny v totálním průřezu ve velmi úzké oblasti energií elektronů, jež jsou charakteristické právě pro rezonanční jevy. Šlo vlastně o zjemnění metody „zpomalujícího potenciálu“ (nebo lépe malého potenciálního rozdílu) vyvinuté a použité Schulzem už dříve [11].

Neelastické průřezy srážek elektronů s atomy a molekulami, zvláště v blízkosti energetických prahů, měřil Schulz pomocí metody elektronů zachycených v potenciální jámě [3]. V principu jde



9/ Schéma experimentu s elektrony zachycenými v potenciální jámě a rozdělení potenciálů podél osy přístroje. Detaily v textu.

o to, vytvořit na cestě elektronů jámu elektrostatického potenciálu, ve které se zachytí všechny elektrony, které ztratily část původní energie v neelastických srážkách, a které jsou pak detegovány s vysokou citlivostí.

Na obr. 9 je schéma takové aparatury, kterou Schulz používal už od konce padesátých let. Paprsek elektronů fokusovaný podélným magnetickým polem procházel monochromátorem do srážkové komory, která byla na potenciálu V_A a kterou tvořily dvě vymežovací destičky a mřížka. Kolem komůrky byl vnější válcový kolektor, na nějž bylo vloženo kladné napětí tak, že uvnitř vznikla potenciální jáma o velikosti W . Elektrony, které ztratily energii v neelastických srážkách, byly zachyceny v jámě, pohybovaly se po spirále v magnetickém poli a nakonec difundovaly ke kolektoru M . Při zvýšení vstupní energie měly elektrony vyšší energii, než byla prahová energie daného procesu, unikly z potenciální jámy, a proud ke kolektoru M klesl na nulu. Měřením závislosti proudu na energii elektronů byl tedy proud zachycených elektronů nulový pod prahem neelastického procesu a pak vzrostl na hodnotu, která byla úměrná velikosti průřezu u energie elektronů nad prahovou hodnotou W .

George Schulz se svými spolupracovníky shromáždil obrovské množství experimentálních dat o srážkách elektronů s atomy a molekulami, které v r. 1973, jen dva roky před svým předčasným odchodem, shrnul ve dvou zásadních článcích v *Review of Modern Physics* [43], [44], zmíněných na počátku tohoto článku.

George Jiří Schulz patřil k nejvýznamnějším atomovým fyzikům šedesátých a sedmdesátých let

a jeho jméno je známé po celém světě. Experimentální a teoretický výzkum rezonancí ve srážkách elektronů s atomy a molekulami tvoří od jeho dob samostatnou sekci velkých mezinárodních fyzikálních konferencí. Během působení na Yaleově univerzitě založil významnou školu výzkumu a jeho laboratoří prošla velká řada studentů a mladých vědců, kteří tento obor dále rozšířili (mj. také Michal Alan, fyzik českého původu působící ve Švýcarsku). Všichni na něj vzpomínají jako na vynikajícího experimentátora s neobyčejnou intuící, fyzika, který vyžadoval od sebe i od jiných pilnou a poctivou práci a přesné vyjadřování, ale také jako na laskavého a přátelského kolegu.

Tímto článkem chceme české fyzikální veřejnosti připomenout život a práci významného krajana, který se stal světově významným vědcem a na něhož bychom neměli zapomínat.

Níže je uveden patrně neúplný seznam jeho časopiseckých prací. Řada jeho prací byla též publikována v knihách. Číselné odkazy v tomto článku se vztahují k tomuto seznamu.

Některé časopisecké publikace G. J. Schulze:

1. Phys.Rev. **106**, 1179 (1957).
2. Phys.Rev. **112**, 150 (1958).
3. Phys.Rev. **113**, 816 (1959).
4. Phys.Rev. **116**, 1141 (1959).
5. J.Chem.Phys. **33**, 1661 (1960).
6. J.Chem.Phys. **34**, 1778 (1961).
7. Phys.Rev. **125**, 229 (1962).
8. Phys.Rev. **128**, 174 (1962).
9. Phys.Rev. **128**, 178 (1962).
10. Phys.Rev.Lett. **10**, 104 (1963).
11. Phys.Rev. **136**, A650 (1964).
12. Phys.Rev.Lett. **12**, 449 (1964).
13. Phys.Rev.Lett. **13**, 477 (1964).
14. Phys.Rev.Lett. **13**, 583 (1964).
15. Phys.Rev. **135**, A988 (1964).
16. Phys.Rev.Lett. **15**, 946 (1965).
17. Phys.Rev. **152**, 81 (1966).
18. J.Chem.Phys. **44**, 3856 (1966).
19. Phys.Rev. **156**, 134 (1967).
20. Phys.Rev. **158**, 25 (1967).
21. Rev.Sci.Inst. **39**, 1752 (1968).
22. Phys.Rev.Lett. **21**, 1031 (1968).
23. Phys.Rev. **187**, 97 (1969).
24. Phys.Rev. **188**, 280 (1969).
25. Phys.Rev.Lett. **22**, 47 (1969).
26. Phys.Rev.Lett. **22**, 1271 (1969).
27. Phys.Rev. **188**, 213 (1969).
28. Phys.Rev. **A2**, 1802 (1970).
29. Rev.Sci.Inst. **41**, 423 (1970).
30. Phys.Rev. **A2**, 2182 (1970).
31. Phys.Rev.Lett. **26**, 943 (1971).
32. Phys.Rev.Lett. **27**, 1333 (1971).
33. Phys.Rev. **A3**, 1968 (1971).
34. Phys.Rev. **A5**, 724 (1972).
35. J.Chem.Phys. **58**, 479 (1972).
36. Phys.Rev. **A5**, 1672 (1972).
37. Phys.Rev. **A6**, 69 (1972).
38. Phys.Rev. **A6**, 676 (1972).
39. Phys.Rev.Lett. **31**, 969 (1973).
40. Phys.Rev. **A7**, 589 (1973).
41. Phys.Rev. **A7**, 593 (1973).
42. Phys.Rev. **A8**, 2883 (1973).
43. Rev.Mod.Phys. **45**, 378 (1973).
44. Rev.Mod.Phys. **45**, 423 (1973).
45. Phys.Rev.Lett. **32**, 1089 (1974).
46. Phys.Rev.Lett. **33**, 134 (1974).
47. Phys.Rev. **A9**, 1969 (1974).
48. J.Phys. **B7**, L249 (1974).
49. Phys.Rev. **A10**, 2100 (1974).
50. Phys.Rev. **A11**, 1309 (1975).
51. Phys.Rev.Lett. **35**, 1429 (1975).