

## VÝUKA CHEMIE

### PŘIVÍTEJTE VE VÝUCE MIKROSKOPY SE SKENUJÍCÍ SONDOU

ZDEŇKA HÁJKOVÁ<sup>a</sup>, ANTONÍN FEJFAR<sup>a</sup>,  
MARTIN LEDINSKÝ<sup>a</sup>, VLASTIMIL PIČ<sup>a</sup>, FILIP  
KŘÍŽEK<sup>a</sup>, DALIBOR ŠULC<sup>b</sup>, ZDENĚK  
NOVÁČEK<sup>b</sup>, PAVEL WERTHEIMER<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Fyzikální ústav Akademie věd České republiky, Cukrovarnická 10/112, 162 00 Praha 6, <sup>b</sup> Vysoké učení technické v Brně, Antonínská 548/1, 601 90 Brno  
hajkovaz@fzu.cz

Došlo 2.6.15, přijato 17.9.15.

Klíčová slova: mikroskopie skenující sondou, skenovací tunelová mikroskopie, mikroskopie atomárních sil, modely, demonstrace, analogie, výukové materiály

#### 1. Úvod

Mikroskopie skenující sondou (scanning probe microscopy, SPM; též rastrovací sondová či hrotová mikroskopie) patří mezi moderní mikroskopické metody běžně používané ve fyzikálních, chemických i biologických laboratořích. SPM totiž umožňuje nahlížet do nanosvěta – dovoluje zobrazovat a charakterizovat povrchy vzorků na úrovni nanometrů (i menší).

Zatímco na amerických středních školách (SŠ) jsou základní pojmy související s SPM součástí středoškolského kurikula<sup>1</sup>, situace v České republice je odlišná. Mikroskopie skenující sondou ani další běžně používané mikroskopické metody pracující až s atomárním rozlišením, jako např. elektronová mikroskopie, nejsou v Rámcovém vzdělávacím programu pro gymnázia, tj. základním kurikulárním dokumentu, vůbec zmíněny. Elektronové mikroskopy sice bývají na mnoha SŠ stručně představeny při výuce týkající se fyziky mikrosvěta<sup>2</sup>, mikroskopy se skenující sondou však zůstávají spíše opomíjeny, což je s ohledem na jejich význam dosti znepokojující.

V tomto příspěvku se proto věnujeme stručnému přiblížení mikroskopů se skenující sondou a nabízíme řadu jednoduchých analogií a modelů, které by při případné implementaci SPM do středoškolského kurikula mohly být pedagogům inspirací a pomocí. V dalším textu je nejprve stručně vysvětlen princip funkce sondových mikroskopů. Zájemcům o podrobnější popis SPM doporučujeme z česky psaných publikací brožuru Mikroskopie skenující sondou<sup>3</sup>, určenou pro studenty přírodovědných oborů niž-

ších ročníků VŠ, a dále publikaci Nanoskopie<sup>4</sup>, která pojednává o mikroskopii skenující sondou a elektronové mikroskopii, a článek Rastrovací tunelová mikroskopie<sup>5</sup>.

#### 2. Co je to mikroskopie skenující sondou (SPM)?

##### 2.1. Princip funkce a techniky SPM

Mikroskopie skenující sondou slouží ke studiu a trojrozměrnému zobrazování povrchů zkoumaných vzorků. Pod mikroskopii skenující sondou se zahrnuje řada mikroskopických technik, které mají společné to, že k zobrazení vzorku využívají sondu zakončenou velmi ostrým hrotem. Hrot sondy se pohybuje v těsné blízkosti povrchu vzorku a postupně bod po bodu snímá (skenuje, rastruje) jeho povrch v předem definované síti bodů. Při tom dochází k interakcím mezi hrotem sondy a povrchem vzorku, na základě nichž se měří určitá fyzikální veličina (např. procházející proud). Z naměřené odezvy počítač vytváří trojrozměrný obraz povrchu vzorku, a to až s atomárním rozlišením.

##### 2.1.1. První SPM: Skenovací tunelová mikroskopie

Prvním typem SPM byla skenovací tunelová mikroskopie (scanning tunneling microscopy, STM), přičemž první mikroskop STM zkonstruovali Gerd Binnig s Heinrichem Rohrerem roku 1981 v laboratořích IBM v Curychu<sup>6</sup>. Význam jejich objevu je zřejmý z udělení Nobelovy ceny za fyziku o pouhých pět let později. Činnost STM je založena na tzv. tunelovém jevu, ke kterému dochází mezi dvěma vodivými tělesy – hrotem sondy mikroskopu a povrchem vzorku, vzdálenými od sebe ~ 1 nm. Je-li mezi ostrý vodivý hrot a vodivý (nebo alespoň polovodivý) vzorek přivedeno napětí a mezeru mezi hrotem a vzorkem je dostatečně tenká, elektrony mohou mezeru překonat kvantově-mechanickým tunelováním a obvodem tedy protéká tzv. tunelový proud. Jeho velikost je exponenciálně závislá na vzdálenosti mezi hrotem sondy a povrchem vzorku – čím blíže je hrot ke zkoumanému povrchu, tím větší obvodem protéká proud. Na základě postupného měření tunelového proudu lze s STM přímo zobrazit povrch vzorku, a to až na úrovni věrného atomárního rozlišení (tj. s přesností lepší než desetina nanometru).

Důležitou součástí SPM je také polohovací zařízení – např. piezoelektrický skener, který zodpovídá za přesnou pozici hrotu nad povrchem vzorku a jeho pohyb vzhledem k povrchu vzorku. Skener mívá nejčastěji tvar trubice, jež mění svoji délku ve směru osy  $z$  a nakláněním zajistí i pohyb v rovině  $xy$ . Obvykle se při měření STM pohybuje hrotem nad vzorkem se zapojením zpětné vazby, která přibližuje nebo vzdaluje hrot během skenování tak, aby tekoucí proud byl roven zvolené konstantní hodnotě. Ske-

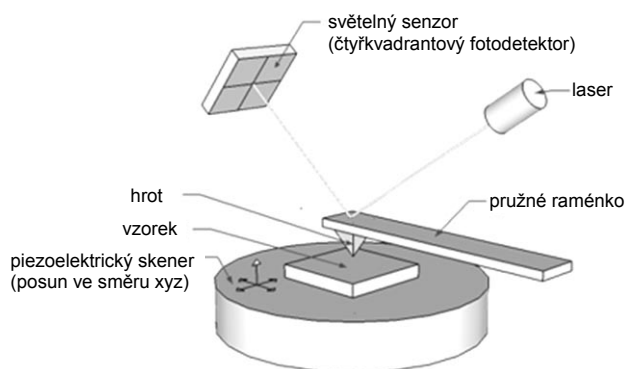
ner přitom umožňuje pohyb hrotu s přesností až na 0,001 nm (cit.<sup>4</sup>). Náznornou představu o této přesnosti dovolí následující příklad. Hrot je obvykle podobně ostrý jako Eiffelova věž, jen je milionkrát menší. Kdybychom Eiffelovu věž obrátili vzhůru nohama a zkoumali bychom vozovku pod ní, velikost atomů by odpovídala zrnkům písku a věži bychom dokázali pohybovat s přesností na 1  $\mu\text{m}$ .

### 2.1.2. Široce používaná SPM: Mikroskopie atomárních sil

V laboratořích po celém světě je také často využívána mikroskopie atomárních sil (atomic force microscopy, AFM). AFM funguje na základě měření silových interakcí mezi povrchem vzorku a ostrým hrotem sondy (vytvořeným např. z křemíku), umístěným na konci pružného raménka (nosník, angl. cantilever). Raménko lze stěží postřehnout naším zrakem – má totiž rozměry srovnatelné s tloušťkou lidského vlasu (řádově 100  $\mu\text{m} \times 10 \mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$ ). Hrot na konci raménka je velmi ostrý, typicky s poloměrem křivosti v řádu jednotek nanometrů. Ještě ostřejšího hrotu lze docílit funkcionalizací hrotu, tj. tím, že na hrot zachytíme vhodnou molekulu (např. oxid uhelnatý, CO). S takto ošetřenými hroty je možné zobrazovat i chemickou strukturu molekul, včetně rozložení orbitalů<sup>7,8</sup>.

Raménko sondy AFM musí mít velmi malou tuhost, aby mohlo reagovat na působení atomárních sil krátkého a středního dosahu (tj. přitažlivých van der Waalsových sil, odpuzivých Pauliho sil aj.). Působením síly mezi hrotem a vzorkem (typicky okolo 10 nN) se raménko (s typickou tuhostí 1 N/m) prohne o několik nanometrů. I takto malá prohnutí lze snadno měřit, např. tak, že se na horní povrch raménka zamíří paprsek laserové diody a sleduje se poloha stopy paprsku po odrazu na dělenou světlocitlivou diodu. Na základě tohoto snímání počítač zaznamenává naměřená data a v reálném čase sestavuje 3D obraz povrchu zkoumaného vzorku.

Schematické uspořádání AFM je naznačeno na obr. 1. Vzhledem k tomu, že atomární síly působí nezávisle na vodivosti vzorku, hrot sondy ani povrch vzorku nemusí být vodivé, což je velkou výhodou této metody oproti STM. Na druhou stranu ale AFM obvykle dosahuje menšího rozlišení.



Obr. 1. Schéma uspořádání AFM

### 2.1.3. Další techniky SPM

Zatímco standardní AFM dovoluje měřit mechanické vlastnosti vzorku, pokročilé metody SPM umožňují vedle 3D topografie vzorku měřit i další vlastnosti, jako např. rozložení povrchového potenciálu (Kelvin Probe Force Microscopy, KPFM) či vodivost (Conductive AFM, C-AFM). K dalším specifickým technikám SPM patří např. mikroskopie magnetických sil (Magnetic Force Microscopy, MFM), mikroskopie elektrostatických sil (Electrostatic Force Microscopy, EFM), skenovací kapacitní mikroskopie (Scanning Capacitance Microscopy, SCM), mikroskopie v blízkém optickém poli (Near-field Scanning Optical Microscopy, NSOM) a skenovací teplotní mikroskopie (Scanning Thermal Microscopy, SThM).

## 2.2. SPM jako nanomanipulátor

Sondové mikroskopy mají velký vliv na rozvoj oboru nanotechnologie, protože dovolují cílenými zásahy ovlivňovat tvar, velikost a uspořádání nanostruktur. Díky SPM je dnes možné nejen zobrazovat povrchy vzorků, ale také modifikovat nanostruktury a dokonce manipulovat s jednotlivými molekulami i atomy. Připomeňme zde např. slavný pokus Donalda Eiglera a Erharda Schweizera z roku 1990 (cit.<sup>9</sup>), při němž poprvé cíleně přemístili 35 atomů xenonu a sestavili z nich na krystalu niklu logo společnosti, pro niž pracovali: IBM. S atomy bylo manipulováno pomocí mikroskopu STM ve velmi vysokém vakuu za teploty blízké absolutní nule (4 K). Pohyb atomů xenonu byl možný díky přitažlivým interakcím působícím mezi hrotem sondy mikroskopu a těmito atomy.

Dodnes bylo pomocí různých mikroskopů se skenující sondou vytvořeno manipulací s jednotlivými atomy mnoho nápisů a obrázků, a to nejen statických. Roku 2013 IBM uvedlo film nazvaný „Chlapec a jeho atom“ (v originále „A Boy and His Atom“)<sup>10</sup>, což je nejmenší animovaný film na světě, zapsaný v Guinnessově knize rekordů<sup>11</sup>. Hlavní roli v tomto minutovém představení hrají atomy kyslíku (vázané v molekule oxidu uhelnatého), které byly uspořádány na povrchu mědi a zobrazeny STM tak, že představují chlapce, který si hraje s míčem – atomem, tancuje, skáče na trampolíně apod. Celkem muselo být za teploty kolem 5 K správně umístěno asi 10 000 molekul oxidu uhelnatého. Každý z 242 snímků, z nichž se film skládá, má velikost 25 × 45 nm a je zvětšený stamilionkrát. Nic menšího od kinematografie již zřejmě nelze očekávat.

## 3. Výukové materiály týkající se SPM

### 3.1. Vědecké modely SPM

Na některých výzkumných pracovištích lze najít vědecké modely SPM, které slouží k ilustraci principů, na

nichž fungují skutečné SPM. Obvykle při tom jde o podomáčku vyrobené (makroskopické) modifikace SPM, které je možné zkonstruovat levněji, než za kolik se prodávají komerčně dostupné mikroskopy SPM. Bohužel se v případě těchto přístrojů nejedná o vizuální prostředky vhodné pro použití ve výuce na SŠ, a to proto, že jsou složité na sestavení (např. makroskopické modely konstruované pro použití v laboratořích fyziky)<sup>12–14</sup> a/nebo jsou stále příliš drahé<sup>15–17</sup>.

S ohledem na to, že konstrukce vědeckých modelů je značně náročná (a to jak časově, tak finančně), dále bude tento příspěvek zaměřen na lehce sestavitelné a levnější modely a jednoduché analogie, snadněji využitelné ve výuce na středních školách (a nejen tam). Většinu z dále představovaných modelů jsme s velkým úspěchem používali mj. na interaktivní výstavě „Mikroskopie hrou“<sup>18</sup>, pořádané v rámci světového mikroskopického kongresu IMC 2014 v Praze, kterou navštívilo na 3000 návštěvníků od dětí z mateřských škol až po seniory.

### 3.2. Výukové modely a analogie SPM

#### 3.2.1. Makroskop AFM

Modely pracující se stejnými nebo stejně malými hroty jako skutečné vědecké přístroje, trpí jedním velkým nedostatkem – pro plné pochopení dějů mezi hrotem a povrchem vyžadují velkou představivost žáků. Jednou z možností, jak v omezeném čase princip činnosti SPM vysvětlit, je mikroskop (či alespoň jeho část) zvětšit. Posunem do viditelných měřítek můžeme „neviditelné“ zviditelnit a žákům tak názorně princip předvést. Zvědavým žákům je pak možné na zvětšených modelech demonstrovat například i to, jak vznikají různé, pro SPM typické, artefakty v měřených obrázcích.

Díky velkému rozmachu jednočipových prototypových desek (LaunchPad od firmy Texas Instruments, Arduino apod.) lze v rámci projektově řízené výuky (např. na technickém lyceu) levně vyrobit zvětšený model SPM. Inspirací může být makroskopický model AFM – „Makroskop“ (obr. 2), který byl postaven na Fakultě strojního inženýrství VUT v Brně. Zdrojové kódy a výkresy jsou volně ke stažení na <https://bitbucket.org/sventek/makroskop/src><sup>19</sup>. Piezoelektrický skener je vhodné nahradit lineárním vedením (vyřazené tiskárny, plotry, příp. modulární systémy z hobby prodejen) s krokovými či stejnosměrnými motorky. Samotnou sondou může být kyvně uchycené raménko, jehož výchylku lze snímat například pomocí magnetu (na raménku) a snímače magnetického pole. Tento princip byl použit i u „Makroskopu“, s nímž jsme byli schopni na povrchu vzorku rozpoznat polohu malé mince. Kvůli velkému zakřivení hrotu už nebylo možné rozeznat její nominální hodnotu. To však není na škodu. Naopak, na tomto příkladu lze ukázat vliv zakřivení hrotu na rozlišení.

S pomocí „Makroskopu“ lze názorně vysvětlit funkci skutečného AFM. Jeho konstrukce je však stále poměrně náročná. Vzhledem k tomu, že učitelé oceňují zejména nízkonákladové a rychle sestavitelné modely, nabízíme



Obr. 2. Brněnský „Makroskop“, tj. makroskopický model AFM

v následujícím oddílu řadu tipů na skutečně jednoduché, levné modely dostupné každému.

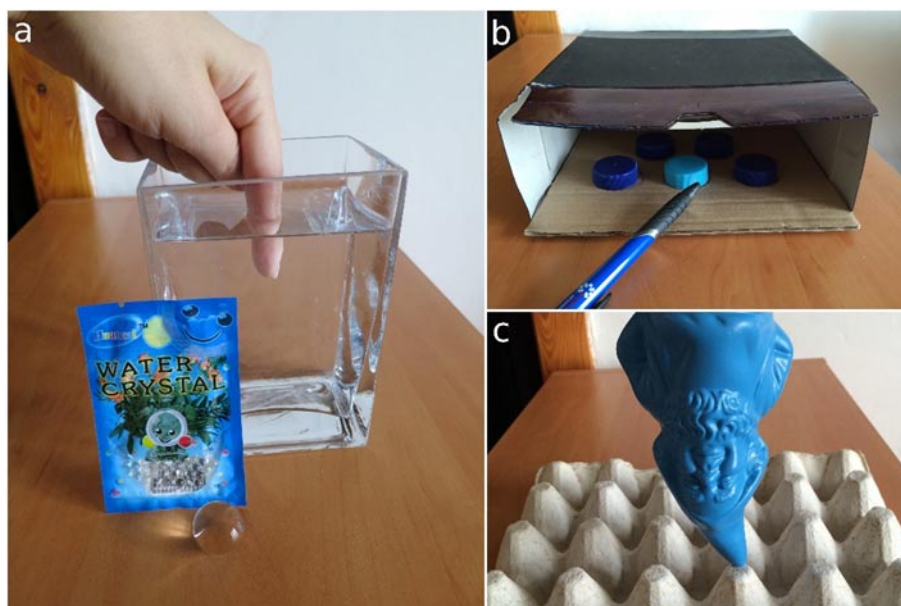
#### 3.2.2. Modely a analogie SPM snadno a levně

Skenování sondy SPM po povrchu vzorku je možné přirovnat k funkci gramofonové jehly v gramofonu. Protože však gramofon dnešní generaci žáků již není příliš dobře znám, nabízíme i další jednoduché analogie a levné a rychle sestavitelné modely SPM.

Činnost SPM si můžeme například představit tak, že velmi tenký hrot sondy mikroskopu zkoumá povrch vzorku podobně jako slepec, který používá slepeckou hůl, jejímž prostřednictvím „osahává“ své okolí a vytváří si myšlenkový obraz toho, jak vypadá. Podobně jako nevidomí lidé si díky SPM můžeme „osahat“ atomy na povrchu vzorku. Nevidomí lidé získávají informace o svém okolí, např. o nerovnosti terénu, po kterém se pohybují, prostřednictvím slepecké hole. V případě SPM funguje jako „slepecká hůl“ sonda zakončená ostrým hrotem. Při použití analogie se slepcem je však třeba upozornit žáky na to, že slepec se dotýká povrchů okolo sebe, zatímco u hrotu sondy mikroskopu tomu tak být nemusí, např. u nekontaktního AFM se sonda povrchu vzorku nedotýká, ale jenom jej „objíždí“ v malé vzdálenosti.

Využití principu „osahávání“ neznámého povrchu pomocí sondy a představit SPM je možné i s pomocí jednoduchého modelu s hydrogelovými kuličkami namočenými ve sklenici s vodou (obr. 3a). Tyto kuličky (nazývané též „vodní perly“) představují atomy. Vzhledem k tomu, že čiré, nabobtnalé hydrogelové kuličky mají podobný index lomu jako voda, téměř v této kapalině nejsou vidět. Pokud se pouze podíváme na sklenici s vodou (a s kuličkami), jsme „slepi“ – žádné atomy nevidíme. Pokud však do sklenice ponoříme prst (představuje sondu mikroskopu), ucítíme, že se ve sklenici kromě vody nacházejí ještě „atomy“. Hydrogelové kuličky lze pod názvem „vodní perly“ koupit ve vybraných květinářstvích. Zvláště u mladších žáků se tato pomůcka setkává s velkým zájmem – vždyť, kdo by se nechtěl dotknout atomu...

I v následující demonstraci sondu představuje prst/



Obr. 3. **Modely SPM s „atomárním“ rozlišením.** a) Atomy jsou reprezentovány hydrogelovými kuličkami ve sklenici s vodou, sonda SPM prstem. Ačkoli „atomy“ nejsou vidět, jsou cítit při „osahání“ sondou. b) Atomy jsou reprezentovány víčky od PET lahví schovanými v krabici, sonda SPM propiskou. c) Zkoumaný vzorek představuje kartonová proložka na vajíčka, hrot sondy SPM čepice trpaslíka

ruka žáka, zkoumaným vzorkem při tom mohou být např. klouby druhé ruky sevřené v pěst (u této demonstrace doporučujeme, aby žáci měli zavřené oči) nebo neznámé předměty (např. víčka od PET lahví nalepená na kusu kartonu, obr. 3b) umístěné v krabici, do které není vidět. Úkolem žáků je prstem/rukou (tj. sondou) přejet po kloubech druhé ruky/víčkách od PET lahví (tj. atomech na povrchu neznámého vzorku) a následně zkusit na papír nakreslit (či alespoň popsat), co cítili. U této demonstrace lze podotknout, že mikroskopy SPM umožňují zobrazit velikost a uspořádání atomů či nanostruktur, ale obvykle nepodávají informaci o druhu atomů; (prstem poslepu také nerozlišíme, zda je víčko modré či červené). Žáci také mohou vyzkoušet „skenování“ neznámého předmětu pomocí hrotu tužky či propisky a porovnat ho se skenováním prstem.

Princip funkce SPM lze dále snadno demonstrovat s pomocí kartonové proložky (plata) na vajíčka a propisky. Demonstrace je založena na makroskopické analogii, kdy proložka od vajíček představuje povrch zkoumaného vzorku (výstupky v proložce reprezentují jednotlivé atomy) a hrot propisky představuje hrot sondy mikroskopu, kterým učitel postupně pohybuje a obkresluje v několika centimetrové vzdálenosti reliéf povrchu proložky. Pozor tedy na to, že se hrot propisky (podobně jako sonda mikroskopu SPM) nedotýká povrchu proložky, ale pouze ho „kopíruje“ v určité malé vzdálenosti. K demonstraci je možné místo propisky použít např. plastovou láhev (víčko demonstruje hrot sondy), sošku trpaslíka (špičatá čepice představuje ostrý hrot sondy; obr. 3c) apod. Použití sošky trpaslíka<sup>20</sup>

navíc názorně (a vtipně) objasňuje původ předpony „nano“, tvořící první část dnes velmi populárních slov „nanotechnologie“, „nanočástice“, „nanomateriály“ apod. Předpona nano- je totiž odvozena od řeckého slova *návoç* [čti nanos], které znamená trpaslík.

Jak bylo uvedeno výše, základem mikroskopů se skenující sondou je sonda. Ta je v případě mikroskopu atomárních sil tvořena ohebným raménkem zakončeným ostrým hrotem. V důsledku působení přitažlivých a odpuzivých atomárních sil mezi hrotem sondy a povrchem vzorku se raménko v průběhu skenování vzorku různě vychyluje. Velikost vychylky raménka je snímána citlivým (zpravidla laserovým) snímačem a je úměrná působícím silám, resp. odpovídá topografii vzorku. Makroskopický model sondy AFM lze zkonstruovat např. z různých obalových materiálů. Model na obr. 4a byl vytvořen z ohebného polystyrenu (raménko) a molitanu (sonda). Hrot je k raménku upevněn pomocí nalepených magnetek. S tímto modelem lze snadno demonstrovat tzv. poklepový režim AFM, při němž se „atomy“ mohou na chvíli stát sami žáci. Během demonstrace učitel drží sondu za konec raménka (s hrotem nasměrovaným dolů), zvolna s ní poklepává a při tom postupně po řadách skenuje okolí (např. hlavy žáků, které představují atomy). Ve chvíli, kdy se poklepávající hrot dotkne hlavy žáka, dojde k vychylce (prohnutí) raménka, a tím i k zaznamenání „atomu“.

Sonda SPM může sloužit také jako nanomanipulátor, což je možné demonstrovat např. s pomocí magnetických kuliček stavebnice Neocube a transparentního plastového



Obr. 4. **Modely sondy SPM.** a) Model raménka AFM s hrotem a jeho demonstrace na výstavě Mikroskopie hrou. b) Model sondy STM, coby nanomanipulátoru, sestavený z magnetických kuliček

obalu (krabičky) na CD (obr. 4b). Šest čtveřic magnetických kuliček (představují nanočástice/molekuly) rozmístíme nepravidelně do obalu na CD a obal zavřeme. Z dalších kuliček vymodelujeme „sondu“. Pokud se „sondou“ přiblížíme k vybrané „nanočástici“, dojde i přes obal na CD k vzájemnému přitahování „sondy“ a „nanočástice“ a „nanočástici“ můžeme jednoduchým tažením „sondou“ manipulovat na zvolené místo – třeba k další „nanočástici“ a vyvolat tím chemickou reakci. Tímto způsobem je tedy možné cíleně přemísťovat částice a vytvářet z nich nové, organizované struktury. Podobně, jako to v laboratorních vědci provádějí se skutečnými mikroskopy SPM.

Všechny modely a analogie mají ze své podstaty jistá omezení a nepřesnosti. Nedostatkem většiny výše uvážených příkladů je např. to, že ve skutečnosti je hrot sondy tvořený atomy, a proto by měl mít v porovnání s příslušným vzorkem (modelem atomů) mnohem větší rozměry a neměl by být tak ostrý. I přes značnou míru zjednodušení se však domníváme, že se představené modely mohou stát užitečnou podporou výuky o SPM.

### 3.2.3. Publikované modely SPM vhodné pro výuku na SŠ

Mezi další vynikající výukové pomůcky přibližující SPM patří následující modely:

#### Modely vhodné zejména pro demonstrační předvedení učitelem:

- AFM model využívající upravenou gramofonovou jehlu<sup>21</sup>,
- AFM modely sestavené z kostek stavebnice LEGO (cit.<sup>22–25</sup>),
- dřevěný AFM model<sup>24</sup>,

- STM model s meotarem, průhlednou proložkou a skleničkou založený na analogii průchodu tunelového proudu s Lambertovým-Beerovým zákonem<sup>20</sup>.

#### Modely vhodné pro žákovskou manipulaci:

- AFM model postavený z papírového kelímku na kávu<sup>26</sup>,
- AFM model z krabice, papírových tubusů a pingpongových míčků<sup>27</sup>,
- AFM model (přesněji MFM model) z ohebné ledničkové magnetky a „sondy“ vytvořené z téže magnetky<sup>22,28–30</sup>,
- MFM model z brček, dřívěk, párátek, magnetu a obalu na CD<sup>31</sup>,
- SPM jako manipulátor s atomy; atomy jsou při tom reprezentovány sponkami ze sešíváčky, mincemi či magnety, sonda magnetkou či magnetickou tužkou<sup>32</sup>,
- SPM/STM model s fotočlánkem z CdS detegujícím množství světla z LED diody – čím blíže je zkoumaný vzorek, tím více na fotorezistor dopadne světla a tím větší bude měřené napětí<sup>1</sup>,
- SPM model, který deteguje signál podobně jako termín, tj. první elektronický hudební nástroj, na který se hraje, aniž by se ho hráč jakkoli dotýkal<sup>33</sup>.

### 3.3. Další výukové materiály k SPM

Vedle výše uvedených modelů a analogií lze při výuce o SPM použít i jiné výukové materiály a přístupy. Reálný výukový model SPM je možné nahradit/doplnit multi-mediální ukázkou – videem modelu SPM<sup>34,35</sup> či animací<sup>36,37</sup>. Dále velkým přínosem pro žáky může být zkuš-

nost s reálným SPM, spojená např. s exkurzí na pracovišti s tímto mikroskopem. Návrh exkurze doplněný pracovními listy, testy, výukovým textem a multimediální prezentací je např. součástí diplomové práce Hájkové<sup>38</sup>. Navíc jsou tyto výukové materiály týkající se nanosvětla volně ke stažení na portálu PŘF UK na podporu výuky chemie na ZŠ a SŠ: <http://www.studiumchemie.cz/nanosvet.php>.<sup>39</sup>

Ještě zajímavější (a efektivnější) než použití modelu či exkurze u SPM může pro žáky být řešení laboratorní úlohy přímo se skutečným SPM, což dokládají zejména zahraniční publikace<sup>40–42</sup>. Z českých prací lze nalézt např. v diplomové práci Baďurové<sup>43</sup> (2009) popis principu techniky mikroskopie se skenující sondou a návrh využití přístroje NanoEducator v pěti laboratorních úlohách vhodných pro žáky SŠ.

Jako zdroj inspirace s mnoha dalšími náměty pro výukové aktivity vztahující se k problematice SPM (a k dalším tématům z oblasti nanosvětla) mohou sloužit:

- Slovensky psaná publikace Tkáčové<sup>44</sup>, která se šířejí zaměřuje na možnosti integrace problematiky nanovědy a nanotechnologií do výuky na SŠ i na ZŠ, a to při využití aktivizujících technik, didaktických her, jednoduchých demonstrací s předměty denní potřeby (např. sýrem, magnetkou, kostkami LEGO) a multimédií.
- Brožura „Exploring the Nanoworld with LEGO® Bricks“, která sdružuje návody na modely, které lze sestavit z kostek stavebnice LEGO. S pomocí těchto modelů jsou přiblíženy mikroskopy se skenující sondou, skenovací elektronová mikroskopie, efekt obřího magnetického odporu, fotolitografie, samosestavování a mnoho dalšího.
- Příručka „NanoDays DEMO GUIDE“<sup>46</sup>, kterou tvoří soubor deseti jednoduchých demonstrací, jež mají za cíl poutavě představit základní koncepty a principy nanosvětla. Demonstrace jsou určeny zejména pro žáky ve věku 10–12 let. V příručce najdeme vedle analogie SPM např. návod na demonstraci přibližující velikost jednoho nanometru pomocí lámání špagety či náměty na ukázky superhydrofobního chování „magického písku“ nebo samosestavování kostek LEGO ve vodě.
- Pěkně zpracované náměty na žákovské aktivity, pracovní listy, videa, výukové texty atp. jsou v angličtině k dispozici na těchto webových stránkách: <http://www.nisenet.org/catalog><sup>47</sup>, <http://teachers.stanford.edu/activities><sup>48</sup>, <http://howtosmile.org/><sup>49</sup>, <http://sustainable-nano.com><sup>50</sup>.

Uvedený výčet publikací a internetových odkazů samozřejmě nelze považovat za zcela vyčerpávající. Zájemcům o danou problematiku však může usnadnit vyhledávání relevantních informací. Navíc výhodou výše uvedených materiálů je jejich snadná dostupnost na internetu.

#### 4. Závěr

Jako mikroskopie skenující sondou (SPM) se označuje soubor technik, které slouží ke studiu a trojrozměrnému

zobrazování povrchů vzorků až s atomárním rozlišením. Mikroskopy se skenující sondou fungují na základě měření interakcí působících mezi velmi ostrým hrotem sondy a povrchem vzorku. Vedle zobrazení topografie umožňují též vytvářet nanostruktury požadovaného tvaru (např. cílenou manipulací jednotlivými atomy). V příspěvku byla představena řada výukových materiálů (zejména analogií a modelů), které ilustrují SPM a mohly by pomoci učitelům jednoduše vysvětlit a žákům správně pochopit principy funkce těchto mikroskopů.

*Tato práce byla zčásti podpořena projektem GAČR 14-15357S a podporou MŠMT pro výzkumnou infrastrukturu Laboratoř nanostruktur a nanomateriálů (projekt LM2011026). Poděkování patří též Mgr. Václavu Hájkovi za pomoc s grafikou.*

#### LITERATURA

1. Morin M. J.: *J. Chem. Educ.* 91, 251 (2014).
2. Kubínek R., Půlkrábek J.: *Moderní mikroskopické techniky*. Katedra experimentální fyziky Přírodovědecké fakulty Univerzity Palackého v Olomouci. <http://exfyz.upol.cz/didaktika/oprlz>, staženo 14. 4. 2015.
3. Kubínek R., Vůjtek M., Mašláň M.: *Mikroskopie skenující sondou*. Univerzita Palackého v Olomouci, 2003. Pro potřeby výuky je k dispozici volná verze textu ve formátu PDF: <http://atmilab.upol.cz/brozura.html>.
4. Vůjtek M., Kubínek R., Mašláň M.: *Nanoskopie*. Univerzita Palackého, Olomouc 2012. Dostupné také na: <http://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/nanoskopie.pdf>.
5. Jelínek P., Hapala P., Cháb V.: *Vesmír* 89, 290 (2010).
6. Binnig G., Rohrer H., Gerber C., Weibel E.: *Phys. Rev. Lett.* 49, 57 (1982).
7. Gross L., Mohn F., Moll N., Liljeroth P., Meyer, G.: *Science* 325, 1110 (2009).
8. Gross L., Mohn F., Moll N., Schuler B., Criado A., Guitian E., Pena D., Gourdon A., Meyer G.: *Science* 337, 1326 (2012).
9. Eigler D. M., Schweizer E. K.: *Nature* 344, 524 (1990).
10. A Boy And His Atom: The World's Smallest Movie. <http://www.research.ibm.com/articles/madewithatoms.shtml#fbid=KpUw1c454PL>, staženo 14. 4. 2015.
11. Smallest stop-motion film. <http://www.guinnessworldrecords.com/world-records/smallest-stop-motion-film>, staženo 14. 4. 2015.
12. Zypman F. R., Guerra-Vela C.: *Eur. J. Phys.* 22, 17 (2001).
13. Guerra-Vela C., Zypman F. R.: *Eur. J. Phys.* 23, 145 (2002).
14. Greczyło T., Debowska E.: *Eur. J. Phys.* 27, 501 (2006).

15. Gadia V., Patel R., Roy S., Singh R., Venkatesh N., Lunagaria S., Layton B. E.: *The Nanotechnology Group* 4, 1 (2005).
16. Bosma E., Offerhaus H. L., van der Veen J. T., Seegerink F. B., van Wessel I. M.: *Am. J. Phys.* 78, 562 (2010).
17. Pahlmeyer M., Hankins A., Tuppan S., Kim W. J.: *Am. J. Phys.* 83, 104 (2015).
18. Interaktivní výstava Mikroskopie hrou. <http://mikroskopiehrou.cz>, staženo 14. 4. 2015.
19. Makroskop: Model mikroskopu atomárních sil. <https://bitbucket.org/sventek/makroskop/src>, staženo 14. 5. 2015.
20. Hájková Z., Fejfar A., Šmejkal P.: *J. Chem. Educ.* 90, 361 (2013).
21. Bonson K., Headrick R. L., Hammond D., Hamblin, M.: *Am. J. Phys.* 79, 189 (2011).
22. Campbell D. J., Olson J. A., Calderon C. E., Doolan P. W., Mengelt E. A., Ellis A. B., Lisensky G. C.: *J. Chem. Educ.* 76, 1205 (1999).
23. Planinsic G., Kovac J.: *Phys. Educ.* 43, 37 (2008).
24. Planinsic G., Lindell A., Remskar M.: *Eur. J. Phys.* 30, S17 (2009).
25. Campbell D. J., Miller J. D., Bannon S. J., Obermaier L. M.: *J. Chem. Educ.* 88, 602 (2011).
26. Ashkenaz D. E., Hall W. P., Haynes Ch. L., Hicks E. M., McFarland A. D., Sherry L. J., Stuart D. A., Wheeler K. E., Yonzon Ch. R., Zhao J., Godwin H. A., Van Duyne R. P.: *J. Chem. Educ.* 87, 306 (2010).
27. Goss V., Brandt S., Lierberman M.: *J. Chem. Educ.* 90, 358 (2013).
28. Lorenz J. K., Olson J. A., Campbell D. J., Lisensky G. C., Ellis A. B.: *J. Chem. Educ.* 74, 1032A (1997).
29. Ellis A. B., Kuech T. F., Lisensky G. C., Campbell D. J., Condren S. M., Nordell K. J.: *J. Nanopart. Res.* 1, 147 (1999).
30. Probing What You Can't See. <http://teachers.stanford.edu/activities>, staženo 14. 4. 2015.
31. Magnetic Force Microscopy. <http://teachers.stanford.edu/activities/ForceMicroscopy/ForceMicroscopy.pdf>, staženo 14. 4. 2015.
32. Hájková Z.: *Disertační práce*. Univerzita Karlova, Praha 2014.
33. Quardokus R. C., Wasio N. A., Kandel S. A.: *J. Chem. Educ.* 91, 246 (2014).
34. LEGO AFM Overview Video. <https://www.youtube.com/watch?v=GjVWN0YQUfM>, staženo 14. 4. 2015.
35. Center for Probing the Nanoscale: Videos. <http://teachers.stanford.edu/activities>, staženo 14. 4. 2015.
36. Nanotechnology. <http://www.atom.rmutphysics.com/charud/scibook/nanotech/page/Unit4-3.html>, staženo 14. 4. 2015.
37. STM filmed by SEM. <https://www.youtube.com/watch?v=LDKnhfdBj3Z>, staženo 14. 4. 2015.
38. Hájková Z.: *Diplomová práce*. Univerzita Karlova, Praha 2009.
39. [www.studiumchemie.cz](http://www.studiumchemie.cz): Výukové materiály týkající se nanosvěta. <http://www.studiumchemie.cz/nanosvet.php>, staženo 14. 4. 2015.
40. Blonder R., Joselevich E., Cohen S. R.: *J. Chem. Educ.* 87, 1290 (2010).
41. Margel H., Eylon B. S., Scherz Z.: *J. Chem. Educ.* 81, 558 (2004).
42. Rapp C. S.: *J. Chem. Educ.* 74, 1087 (1997).
43. Baďurová R.: *Diplomová práce*. Univerzita Palackého v Olomouci, Olomouc 2009.
44. Tkáčová Z.: *Nanoveda a nanotechnologie vo vyučovaní*. Metodicko-pedagogické centrum, Bratislava 2011. [http://mpc-edu.sk/shared/Web/OPSOSO%20I.%20kolo%20vyzvy%20na%20poziciu%20Odborny%20poradca%20vo%20vzdelavani/1 OPS\\_Tkacova%20Zuzana%20-%20Nanoveda%20a%20nanotechnologie%20vo%20vyucovani.pdf](http://mpc-edu.sk/shared/Web/OPSOSO%20I.%20kolo%20vyzvy%20na%20poziciu%20Odborny%20poradca%20vo%20vzdelavani/1 OPS_Tkacova%20Zuzana%20-%20Nanoveda%20a%20nanotechnologie%20vo%20vyucovani.pdf), staženo 14. 4. 2015.
45. Campbell D. J., Freidinger E. R., Querns M. K., Swanson S., Ellis A., Kuech T., Payne A., Socie B., Condren S. M., Lisensky G., Rasmussen R., Hollis T., Villarreal R., Campbell K.: *Exploring the Nanoworld with LEGO® Bricks*. Bradley University, Peoria 2012. <http://education.mrsec.wisc.edu/LEGO/PDFfiles/nanobook.PDF>, staženo 14. 4. 2015.
46. NanoDays DEMO GUIDE. <http://www.seas.virginia.edu/admin/diversity/k12/UVa%20NanoDemo%20Guide-JerryFloro.pdf>, staženo 14. 4. 2015.
47. Nanoscale Informal Science Education Network. <http://www.nisenet.org/catalog>, staženo 14. 4. 2015.
48. Center for Probing the Nanoscale: Hands-on nano Activities. <http://teachers.stanford.edu/activities>, staženo 14. 4. 2015.
49. <http://howtosmile.org>, staženo 14. 4. 2015.
50. <http://sustainable-nano.com>, staženo 14. 4. 2015.

Z. Hájková<sup>a</sup>, A. Fejfar<sup>a</sup>, M. Ledinský<sup>a</sup>, V. Píč<sup>a</sup>, F. Křížek<sup>a</sup>, D. Šulc<sup>b</sup>, Z. Nováček<sup>b</sup>, and P. Wertheimer<sup>b</sup>  
 (<sup>a</sup>Institute of Physics, Academy of Sciences of the Czech Republic, Prague, <sup>b</sup>Brno University of Technology, Brno):  
**Introduce Scanning Probe Microscopy into Education**

Contemporary chemistry, physics, as well as biology frequently deal with the structure of matter at nanoscale level. One of the most important techniques used for imaging and measuring surfaces at the nanoscale (sometimes even with atomic resolution) is the scanning probe microscopy (SPM). SPM is an important up-and-coming technique in both academic sphere and industry. For this reason, concepts underlying SPM should be mentioned in secondary education, at least for students with an interest in science and technical subjects. In order to introduce SPM into secondary science education, various teaching approaches might be followed. In this contribution, special attention is paid to simple models and analogies of SPM to illustrate the basic SPM principles.