

VÝUKA CHEMIE

NANOVÝROBA V PŘÍRODOVĚDNÉM VZDĚLÁVÁNÍ

ZDEŇKA HÁJKOVÁ^{a,b} a PETR ŠMEJKAL^a

^a Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta, Katedra učitelství a didaktiky chemie, Hlavova 8, 128 43 Praha 2, ^b Fyzikální ústav Akademie věd České republiky, Cukrovarnická 10/112, 162 00 Praha 6
zdenka.hajkova@gmail.com, petr.smejkal@natur.cuni.cz

Došlo 27.5.13, přepracováno 12.2.14, přijato 13.3.14.

Klíčová slova: nanotechnologie, nanočástice, nanovýroba, nanoauto, top-down, bottom-up, výukové demonstrace, výukové experimenty

1. Úvod: „Nano“ ve výuce přírodovědných předmětů

V dnešní době bychom asi těžko hledali někoho, kdo dosud neslyšel pojmy nanotechnologie, nanovlákná, nanoelektronika nebo třeba nanočástice. Slova s předponou „nano“ jsou dnes velmi populární, a to jak u odborníků, tak u laické veřejnosti. Nanotechnologie proto může být vhodným tématem pro implementaci do přírodovědného kurikula na střední škole (SŠ), příp. je možné uvažovat i o výuce „nano“ na úrovni druhého stupně základní školy (ZŠ).

Vyučovat o nanotechnologii je však náročné, a to zejména proto, že se jedná o silně multi- a interdisciplinární obor, který vychází z přírodovědných disciplín a inženýrských přístupů. Nanotechnologie vyžaduje zvládnutí mnoha různých oblastí lidského poznání a jejich úzké propojení. Zařazování interdisciplinárních témat a přístupů do výuky však podporuje mj. základní kurikulární dokument – Rámcový vzdělávací program pro gymnázia, ve kterém je uvedeno: „*Zkoumání přírody nezbytně vyžaduje komplexní, tj. multidisciplinární a interdisciplinární přístup, a tím i úzkou spolupráci jednotlivých přírodovědných oborů a odstraňování jakýchkoli zbytečných bariér mezi nimi.*“¹

Ačkoliv je zřejmé, že poznatky z tzv. nanosvětla by se měly objevit ve výuce přírodovědných předmětů (tj. v chemii, fyzice, biologii, příp. přírodopise), není snadné odpovědět na otázku, jakým způsobem by do této výuky měly být implementovány. Pro podporu výuky o „nano“ na SŠ již byly v češtině publikovány jak dílčí náměty (např. na experimenty^{2–5}, modely^{6–8} či demonstrace⁹), tak i celé práce sdružující různé výukové materiály (např. diplomová práce Hájkové¹⁰ obsahující výukový text, multi-

mediální prezentaci, návrhy projektu a exkurze, mezipředmětové úlohy a testy). Pro vzdělávací účely mohou být nápomocné i dokumenty dostupné na portálu www.nanotechnologie.cz¹¹.

V tomto příspěvku je dále pozornost blíže zaměřena na jednu ze základních otázek týkajících se nanotechnologie, a to: „Jak vyrobit nanočástice a nanostruktury?“ Následující text na ni odpovídá nejprve stručným teoretickým pojednáním a následně odkazy na několik experimentů a popisem jednoduchých demonstrací použitelných ve výuce na SŠ, příp. i na ZŠ. Představované demonstrace jsou založeny na makroskopických analogiích (s kostkami LEGO, resp. krystaly cukru, co by atomy či molekulami).

2. Výroba nanostruktur „shora dolů“ vs. „zdola nahoru“

Nanotechnologii lze definovat jako „*výzkum a technologický vývoj na atomové, molekulární nebo makromolekulární úrovni, v rozměrové škále přibližně 1–100 nm. Je to též vytváření a používání struktur, zařízení a systémů, které mají v důsledku svých malých nebo intermediárních rozměrů nové vlastnosti a funkce. Je to rovněž dovednost manipulovat s objekty na atomové úrovni.*“¹² Nanotechnologie se tedy zabývá mj. nanovýrobou, tj. výzkumem a vývojem metod výroby částic, struktur a systémů s rozměry v řádu nanometru.

Nanostruktury mohou být v principu vyráběny dvěma způsoby: buď postupem označovaným jako „top-down“ („shora dolů“), nebo opačným postupem „bottom-up“ („zdola nahoru“). První postup se někdy označuje jako fyzikální nebo rozkladný, druhý postup bývá označován jako chemický či syntetický. Společnou snahou obou postupů je kontrolovaně vytvářet nanočástice a nanostruktury stejného tvaru a velikosti.

V případě výrobního postupu „top-down“ do nanosvětla pronikáme z makrosvětla. Začínáme se strukturami vytvořenými člověkem (obvykle mikrosystémy), se kterými se dobře manipuluje, a cíleně se snažíme zmenšovat jejich velikost až na objekty o velikosti v řádu nanometru. V každém kroku miniaturizace se vytváří produkt o něco menší, než byl předcházející, a to tak dlouho, až vznikne struktura, která je dostatečně malá na to, aby byla nositelkou nové unikátní vlastnosti nebo funkce¹³. Současné „top-down“ technologie pracují na dolní hranici v rozměrech cca 10–100 nm (cit.¹⁴). Používají litografii, leptání a další procesy, které jsou postupným vývojem (založeným na rozsáhlém a nákladném výzkumu) zdokonalovány a posouvají se detaily do menších a menších rozměrů¹⁵. Pro představu v makrosvětě analogickým postupem pracuje např. řezbář nebo sochař. V současnosti metody „top-down“ převládají nad metodami „bottom-up“ např. při výrobě integrovaných obvodů¹⁶.

Druhý výrobní postup – „bottom-up“ neboli „zdola nahoru“ – začíná se stavbou funkčního nanostrukturního celku u nejmenších částic hmoty, tj. u jednotlivých atomů a molekul. Z nich se hierarchicky skládají součástky, které tvoří další složky komplikovanějších systémů. Metody „bottom-up“ se přirozeně uplatňují v přírodě při vytváření biologických struktur. To lidi inspirovalo ke snaze vytvářet tímto způsobem nanostruktury umělé. Jejich velikost se dnes pohybuje typicky v rozmezí asi 2–10 nm (cit.¹⁴). „Bottom-up“ metody využívají kontrolované chemické reakce, a jsou proto levnější než litografické metody. Často se také využívá přirozené schopnosti jednotlivých složek vzájemně se rozpoznávat, strukturovat, samosestavovat a samoorganizovat¹⁷. Tyto metody se stále ještě nacházejí ve stadiu vývoje, očekává se však, že v budoucnu naleznou ve výrobě velké uplatnění. Už dnes se používají např. pro výrobu uhlíkových nanotrubiček a kvantových teček¹⁴.

3. Experimenty demonstrující výrobu nanočástic a nanostruktur

Vzhledem k nepatrné velikosti nanočástic a nanostruktur je výuka o „nano“ poměrně náročná na představivost žáků. Správné pochopení může usnadnit použití vhodných vizuálních prostředků, např. experimentů. Reálné experimenty mohou prezentovat přípravu nanočástic chemickým postupem, tj. postupem „bottom-up“ směřujícím zdola nahoru. K publikovaným experimentům, vhodným pro použití na SŠ, patří např.:

- příprava nanočástic stříbra (a jejich porovnání se stříbrem ve formě makroskopických a koloidních částic¹⁸) a ukázka toxicity nanočástic stříbra⁵,
- příprava zlatých nanočástic (a pozorování barevných změn při jejich agregaci)^{19,20},
- příprava koloidních soustav (tj. soustav obsahujících částice o velikosti přibližně 1–1000 nm; a demonstrace jejich vlastností, např. Tyndalova jevu)^{3,4}.

4. Jednoduché demonstrace nanovýroby založené na makroskopické analogii

„Neexperimentální“ vizuální výukové prostředky, jako demonstrace založené na makroskopické analogii či modely, jsou alternativou k chemickým experimentům (v případě, že nejsou dostupné chemikálie nebo laboratorní vybavení apod.), resp. mohou fungovat jako jejich doplnění. Publikována již byla např. demonstrace týkající se nanolitografie, tj. metody, pomocí níž lze připravit nanočástice požadované velikosti, tvaru a složení²¹.

Dále budou v tomto příspěvku představeny dvě demonstrace, jejichž cílem je názorně předvést rozdíl mezi přístupem „top-down“ a „bottom-up“ při výrobě „nanoauta“. Demonstrace může realizovat učitel či žáci. Vzhledem

k tomu, že k jejich provedení není třeba žádných drahých, nebezpečných ani škodlivých chemikálií, mohou je žáci vyzkoušet i sami doma. Uvedené demonstrace jsou jednoduché a finančně i časově nenáročné (k realizaci je třeba asi 5–10 minut).

Vyrobte si „nanoauto“ z kostek stavebnice LEGO

Materiál a pomůcky

1–2 podvozky auta ze stavebnice LEGO DUPLO (2×4 nopy, tj. výstupky), kostky LEGO (alespoň 44 ks, velikost 2×2 nopy v případě klasických kostek LEGO), chňapka.

Postup provedení s vysvětlením

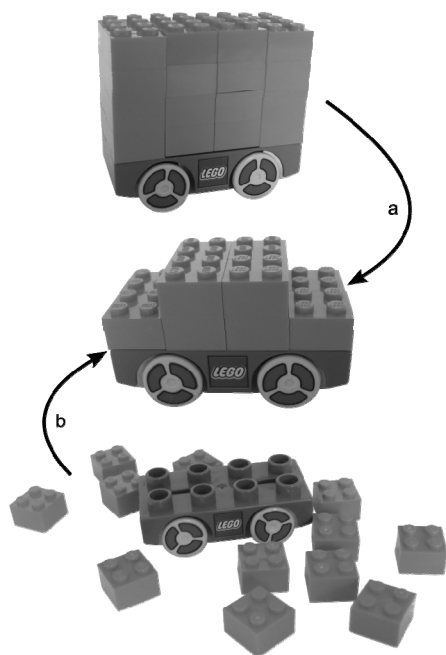
Pokud máme postavit „nanoauto“, které sestává z podvozku LEGO DUPLO 2×4 nopy a 12 klasických kostek LEGO 2×2 nopy (jedna takováto kostka lze nasadit na 1×1 nop LEGO DUPLO), můžeme postupovat dvěma způsoby: buď „nanoauto“ sestavíme „shora dolů“, nebo „zdola nahoru“.

V případě postupu „shora dolů“ (tj. „top-down“) začneme s podvozkem auta, na který je umístěn blok alespoň 32 kostek LEGO 2×2 nopy (uspořádaných do kvádrů 2×4×4 kostky; do výšky je možno dát až 6 kostek), čímž se vytvoří „mikroauto“. To musíme miniaturizovat, tzn. postupně odebírat jednotlivé kostky, a tím vytvořit požadované „nanoauto“ (obr. 1a). Odebírání kostek představuje např. proces leptání. Je poměrně snadné odebírat kostky rukou, ale pokud si nasadíme na ruku chňapku, miniaturizace se stane mnohem obtížnější. Podobně je i v případě skutečného postupu „top-down“ náročné vytvořit „nanoobjekt“, obzvláště pokud má mít velmi malý vzor (viz níže výrobu „nanoauta“ z cukru). Navíc, jak je z demonstrace vidět, nevýhodou tohoto postupu je odpad, který při výrobě vzniká (nevyužitých 20 kostek LEGO).

Pokud budeme postupovat opačně, tj. „zdola nahoru“ („bottom-up“), začneme tím, že budeme mít prázdný podvozek auta a 12 samostatných kostek LEGO 2×2 nopy (obr. 1b), které představují atomy či molekuly. Kostky postupně jednu po druhé umístíme na správná místa na podvozku a vytváříme „nanoauto“. Na rozdíl od předchozího postupu nám nevzniká žádný odpad. Aplikace tohoto postupu je snadná v případě, že kostkami LEGO manipulujeme rukou. Kdybychom však stavěli auto skutečně v rozměru „nano“ a kostky LEGO by měřily ne 1,6 cm, ale 1,6 nm, manipulace s nimi by byla mnohem obtížnější (viz níže výrobu „nanoauta“ z cukru).

Poznámky

Počet a typ kostek pro demonstraci lze samozřejmě modifikovat podle dostupné stavebnice, typu podvozku apod. Při kombinaci podvozku LEGO DUPLO s klasickými kostkami LEGO lze na jeden nop LEGO DUPLO nasadit jednu klasickou kostku LEGO 2×2 nopy. Název „DUPLO“ totiž znamená, že kostka má dvojnásobné rozměry v porovnání s klasickou kostkou LEGO, a proto jsou oba typy kostek kompatibilní.



Obr. 1. „Nanovýroba“ z kostek LEGO. „Nanoauto“ je možné vyrobit dvěma postupy: (a) „shora dolů“ („top-down“) nebo (b) „zdola nahoru“ („bottom-up“)

Tato demonstrace byla inspirována náměty z brožury *Exploring the Nanoworld with LEGO® Bricks*²², jež se věnuje představení fyzikálních a chemických principů

z oblasti „nanosvěta“ za pomoci modelů vytvořených ze stavebnice LEGO. Podobné náměty na aktivity umožňující integrovat problematiku nanotechnologie do výuky na základních a středních školách lze nalézt i ve slovenské práci Tkáčové²³.

Vyrobte si „nanoauto“ z cukru

Obtížnost výroby v řádu nanometrů je pro žáky snáze představitelná, pokud se namísto kostek LEGO použije cukr a demonstrace se provádí v žákovské formě.

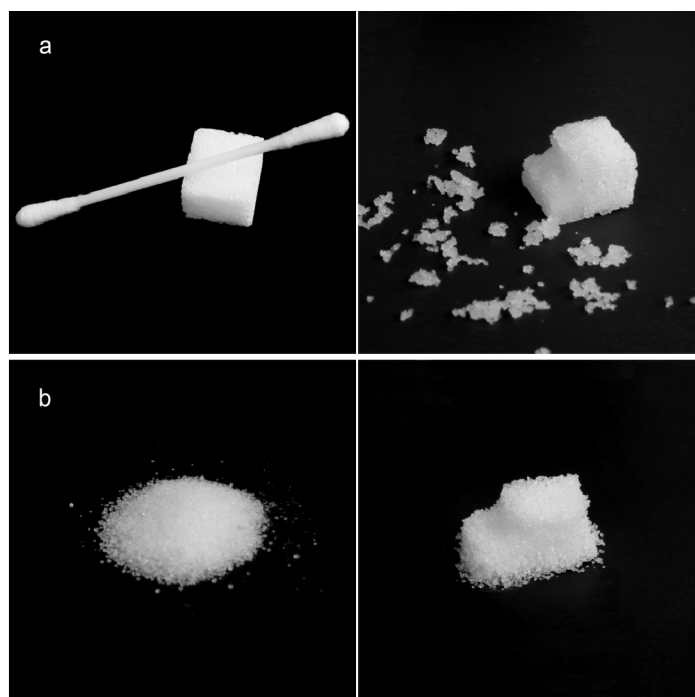
Materiál a pomůcky

1 kostka cukru, 1 lžička cukru krystal, pinzeta, vatová tyčinka, kádinka s vodou.

Postup provedení s vysvětlením

V případě postupu „shora dolů“ („top-down“) žáci vezmou kostku cukru a pomocí vatové tyčinky namáčené ve vodě se jí pokouší „vyleptat“ tak, aby vytvořili karoserii „nanoauta“ (obr. 2a). Brzy zjistí, jak je náročné takovýmto postupem vytvořit detaily. (Ve skutečnosti není možné při výrobě nanomateriálů postupem „top-down“ dosáhnout takové přesnosti, např. v rovnosti povrchu, jako při postupu „bottom-up“.) Kromě toho žáci mohou při demonstraci vidět nevyužitě krystaly cukru odstraněné z původní kostky, tedy určité množství odpadu, který vzniká, postupujeme-li „shora dolů“.

U opačného postupu, tj. „zdola nahoru“ („bottom-up“), žáci dostanou lžičku krystalového cukru a opět se



Obr. 2. „Nanoauta“ vytvořená z různých forem cukru. (a) Karoserie „nanoauta“ „vyleptaná“ z kostky cukru postupem „top-down“. (b) „Nanoauto“ sestavené z navlhčených krystalků cukru postupem „bottom-up“

pokouší postavit karoserii „nanoauta“, tentokrát však z jednotlivých krystalů cukru (obr. 2b), jejichž rozměr je cca desetkrát menší než rozměr kostek LEGO. (Cukr krystal obsahuje nejméně 70 % cukru o velikosti krystalů 0,4 až 2,0 mm (cit.²⁴); rozměry kostky LEGO 2×2 nopy jsou asi 1,6×1,6×1,0 cm). Žáci si vyzkouší, jak je manipulace s krystaly cukru pomocí rukou náročná, prakticky nemožná. A to je rozměr krystalu cukru ještě o pět až šest řádů větší než velikost molekul, se kterými bychom pracovali v případě konstrukce skutečného nanoauta s rozměry v řádu nanometrů! S použitím např. pinzety by se krystaly cukru organizovaly snadněji, ale stále by to bylo velmi náročné a zdoluhavé. Je proto zřejmé, že pro práci v nanosvětě bude nutné používat speciální přístroje, např. mikroskopy se skenující sondou (SPM). Případně je vhodné využít procesů samoorganizace či samosestavování (viz níže demonstrace přibližující proces samosestavování).

Poznámky

Před zahájením sestavování „nanoauta“ postupem „bottom-up“ je vhodné cukr lehce navlhčit, (ale pouze do té míry, aby se zvýšila soudržnost jednotlivých krystalů cukru a „nanoauto“ se nerozpadalo; vody se nesmí přidat moc, aby nedošlo k rozpuštění cukru).

Funkční nanoauto – realita nebo fikce?

Nedávno se skutečně podařilo vytvořit funkční molekulární nanostroje, které připomínají makroskopická vozidla, a to nejen klasická nanoauta, ale i nanoauta nákladní nebo nanovlaky, jež mohou dokonce přepravovat náklad – atomy a molekuly²⁵. A jak taková nanovozítka vypadají? Jejich součástky (podvozek, kola, osy kol apod.) jsou tvořeny samostatnými molekulami (např. první kola nanoauta sestávala z molekul fullerenu C₆₀)²⁶. Z nich se nanoauto skládá postupem „bottom-up“, např. procesem samosestavování.

Proces samosestavování (self-assembly), při němž se částice na základě slabých, nekovalentních interakcí samovolně uspořádávají do strukturovaných, stabilních funkčních celků¹⁷, lze žákům jednoduše demonstrovat např. na kostkách LEGO, ke kterým jsou přilepeny magnety²⁷. Pokud dáme „magnetické“ kostky LEGO do misky či do krabice, kterou opatrně zatřese, při vzájemném přiblížení kostek (představují částice) dochází působením magnetických sil (představují nekovalentní interakce) k samosestavování kostek a vytvoření organizované struktury. Podobně lze ukázat samosestavování působením kapilárních sil u dalších makroskopických objektů, např. kostek LEGO^{22,23}, kousků slámky²⁸, těstovin²⁹ apod.

5. Závěr

Nanotechnologie je dynamicky se rozvíjejícím oborem s řadou aplikací. Vzhledem k naznačené aktuálnosti a velkému významu nanotechnologie by toto téma nemělo chybět ve výuce přírodovědných předmětů na středních

školách, příp. by se zmínka o „nano“ mohla objevit už i na druhém stupni škol základních. V příspěvku byla pozornost zaměřena zejména na problematiku výroby nanomateriálů. K tomuto tématu byly mj. představeny dva náměty na jednoduché demonstrace, které s použitím běžně dostupných pomůcek (jako jsou kostky stavebnice LEGO či cukr) umožňují přiblížit žákům základní způsoby výroby nanomateriálů, a to postupem „top-down“ („shora dolů“), resp. „bottom-up“ („zdola nahoru“). Domníváme se, že se obě navrhované demonstrace mohou stát užitečnými názornými prostředky, jež usnadní implementaci poznatků z oblasti nanosvětla do výuky na našich školách.

Tato práce byla podpořena projektem Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy MSM0021620857.

LITERATURA

1. *Rámcový vzdělávací program pro gymnázia*. VÚP Praha, Praha 2007.
2. Kolář K., Kmetřová J., Myška K., Tomeček O.: *Biol. Chem. Zem.* 12, 85 (2003).
3. Panáček A., Kvítek L., Klečková M.: *Chem. Listy* 98, 39 (2004).
4. Panáček A., Kvítek L.: *Chem. Listy* 99, 606 (2005).
5. Vaníčková M., Soukupová J., Kvítek L.: *Chem. Listy* 104, 945 (2010).
6. Kolář K., Myška K., Hirsch M.: *Biol. Chem. Zem.* 8, 177 (1999).
7. Hájková Z., Šmejkal P.: *Biol. Chem. Zem.* 21, 230 (2012).
8. Hájková Z., Hájek V., Šmejkal P.: *Biol. Chem. Zem.* 22, 234 (2013).
9. Hájková Z., Šmejkal P.: *Alternativní metody výuky 2011*, Sborník příspěvků 9. ročníku konference (Ulrich M., Zatloukal K., ed.), str. 1–6. Gaudeamus, Hradec Králové 2011.
10. Hájková Z.: *Diplomová práce*. Univerzita Karlova, Praha 2009. Materiály dostupné na: <http://web.natur.cuni.cz/studiumchemie/materialy.php?obor=E&typ=>
11. *Nanotechnologie.cz*. <http://www.nanotechnologie.cz>, staženo 26. května 2014.
12. Prnka T., Šperlink K.: *Nanotechnologie, Šestý rámcový program evropského výzkumu a technického rozvoje*. Repronis Ostrava, Ostrava 2004.
13. Klusoň P., Drobek M., Bártková H., Budil I.: *Chem. Listy* 101, 262 (2007).
14. Mijatovic D., Eijkel J. C. T., van den Berg A.: *Lab Chip* 5, 492 (2005).
15. Musil V.: *Perspektivy elektroniky*. Sborník přednášek (Biolek Z., ed.), str. 35–43. SPŠE, Rožnov pod Radhoštěm 2005.
16. Singh R., Tiwari S., Tawaniya J.: *Int. J. Res. Comput. Eng. Electronics* 2, 1 (2013).
17. Prnka T., Šperlink K.: *Bionanotechnologie, Nanobio-technologie, Nanomedicína, Sedmý rámcový program evropského výzkumu a technického rozvoje*. Repronis

- Ostrava, Ostrava 2006.
18. Soukupová J., Kvítek L., Kratochvílová M., Panáček A., Pucek R., Zbořil R.: *J. Chem. Educ.* 87, 1094 (2010).
 19. McFarland A. D., Haynes Ch. L., Mirkin Ch. A., Van Duyne R. P., Godwin H. A.: *J. Chem. Educ.* 81, 544A (2004).
 20. Sharma R. K., Gulati S., Mehta, S.: *J. Chem. Educ.* 89, 1316 (2012).
 21. Haynes Ch. L., McFarland A. D., Van Duyne R. P., Godwin, H. A.: *J. Chem. Educ.* 82, 768A (2005).
 22. 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://mrsec.wisc.edu/edetc/LEGO/index.html>, staženo 5. března 2013.
 23. Tkáčová Z.: *Nanoveda a nanotechnologie vo vyučovaní*. Metodicko-pedagogické centrum, Bratislava 2011. <http://shared.mpc-edu.sk/web/OPSOSO%20I.%20kolo%20vyzvy%20na%20poziciu%20Odborny%20poradca%20vo%20vzdelavani/Nanoveda%20a%20nanotechnologie%20vo%20vyucovani.pdf>, staženo 28. srpna 2012.
 24. Cukrovar Prosenice: *Cukr bílý krystal – specifikace výroby*. <http://www.hps.cz/cukr-krystal>, staženo 5. března 2013.
 25. Vives G., Tour J. M.: *Acc. Chem. Res.* 42, 473 (2009).
 26. Shirai Y., Osgood A. J., Zhao Y., Kelly K. F., Tour J. M.: *Nano Lett.* 5, 2330 (2005).
 27. Jones M. G., Falvo M. R., Broadwell B., Dotger S.: *The Science Teacher* 73, 54 (2006).
 28. Campbell D. J., Freidinger E. R., Hastings J. M., Querns M. K.: *J. Chem. Educ.* 79, 201 (2002).
 29. Burgan D. A., Baker L. A.: *J. Chem. Educ.* 86, 704A (2009).

Z. Hájková^{a,b} and P. Šmejkal^a (^a *Department of Teaching and Didactics of Chemistry, Faculty of Science, Charles University, Prague,* ^b *Institute of Physics, Academy of Sciences of the Czech Republic, Prague*): **Nanofabrication in Science Education**

Nanoparticles and nanostructures can be fabricated by numerous methods. These methods are usually divided into “top-down“ and “bottom-up“ approaches. In this contribution, two simple demonstrations of the construction of a “nanocar“ are presented. Both demonstrations are based on macroscopic analogies with LEGO bricks or sugar crystals (that represent atoms or molecules) and are suitable for secondary science education.