

# Lze zobrazit atomovou strukturu látky?

**Pavel Konečný, Přírodovědecká fakulta MU Brno**

"Uvěřím, až to uvidím na vlastní oči." Toto prohlášení je často slyšet, pokud je někdo přesvědčován o něčem, co je těžko k uvěření. Inu, jsme zkrátka zařízení tak, že hlavním zdrojem informací, které získává náš mozek o okolním světě, je zrak. Subjektivně vnímáme zrakovou informaci jako maximálně přesvědčivou a máme tendenci ji považovat za pravdivou, i když je nám velmi často něčím zprostředkována. Například lokální válečné konflikty a přírodní katastrofy sledujeme sice "na vlastní oči", ale prostřednictvím televizního zpravodajství.

Existuje speciální přístroj, zdaleka ne tak známý a rozšířený jako televize, ačkoliv na rozdíl od ní dokáže zprostředkovat "přímý přenos" z míst, kam nelze ani teoreticky zorganizovat průzkumnou výpravu. Nazývá se rastrovací tunelový mikroskop, ale velmi často bývá označován jen zkratkou STM (Scanning Tunneling Microscope). Nebudeme-li rozlišovat jeho různé modifikace, můžeme stručně říci, že je zatím nejmladší v rodině zařízení sloužících ke zkoumání tajemství přírody, která jsou našim očím a naší zkušenosti skryta svými nepatrnými rozměry.

Z chemického hlediska je základním stavebním kamenem hmoty atom. Jeho existence byla předpovězena již ve čtvrtém století před naším letopočtem řeckým filozofem Démokritem, který první vyslovil domněnku o nespojitě struktuře látky. Experimentálně podložené argumenty ve prospěch této hypotézy však byly postupně získávány až během devatenáctého století a za nepochybný důkaz správnosti atomové koncepce byla všeobecně přijata až teprve Perrinova teoretická a experimentální analýza Brownova pohybu provedená na počátku století [1]. Ve všech těchto případech šlo ovšem o zkoumání projevů velmi početného souboru atomů.

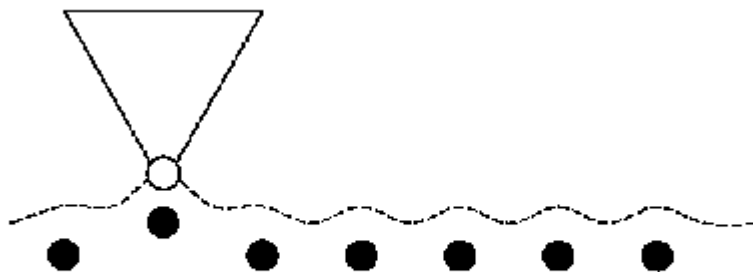
Pokus detekovat přímo jednotlivé atomy uspěl až mnohem později. Některá svoje tajemství totiž příroda chrání velmi rafinovaným způsobem. Veškerá snaha pozorovat atomy optickým mikroskopem je marná, protože viditelné světlo je k detekci tak malých objektů příliš hrubým prostředkem. Pomocí žádného vlnění nelze totiž zobrazit předměty o rozměrech menších, než činí jeho vlnová délka. Ani nejlepším optickým mikroskopem tudíž nemůžeme pozorovat lineární útvar kratší než asi 500 nm. Na tuto délku se ovšem vejde přibližně dva tisíce atomů. Kdybychom tedy chtěli dosáhnout atomárního rozlišení, museli bychom použít záření s vlnovou délkou řádově tisíckrát menší než je vlnová délka viditelného světla. Takové elektromagnetické vlnění skutečně existuje a nazývá se rentgenové záření. Jeho využití pro zobrazovací účely je však znemožněno řadou praktických těžkostí (například pro ně nelze vytvořit dostatečně kvalitní čočku).

Tuto potíž se podařilo obejít tím, že namísto elektromagnetického vlnění byl použit k osvětlování vzorku svazek elektronů urychlených napětím několik desítek až stovek kilovoltů. Jako čočka slouží v tomto případě magnetické pole vhodného tvaru. Možnost zkonstruovat takové zařízení – elektronový mikroskop (Ernst Ruska 1932) – se otevřela díky skutečnosti, že elektrony mají některé velmi zvláštní vlastnosti: v tubusu mikroskopu se nechovají jako kuličky, ale jako vlnění s velmi malou vlnovou délkou. Čím větší urychlovací napětí, tím kratší vlnová délka. Dlouhým vývojem dospěl tento přístroj na takovou úroveň, že je schopen zobrazit atomovou strukturu pevné látky (sedmdesátá léta). Je to však zařízení velmi drahé a rozměrné.

Když uvážíme, jaké problémy přináší snaha vyšetřit atomovou strukturu pomocí vlnění, tedy v principu stejným způsobem, jakým funguje náš zrak, vyvstane otázka, zda by nebylo možné udělat totéž jiným způsobem. Informace o předmětech, které nás obklopují, získáváme nejen zrakem, ale také hmatem. Tato metoda ovšem klade značné nároky na naši představivost, tj. vyžaduje ještě další mentální výkon. K výsledné představě o zkoumaném předmětu totiž dospíváme postupným skládáním a vyhodnocováním hmatových vjemů. Rozlišovací schopnost takového zobrazování je dána v podstatě rozměry a citlivostí našich prstů. Příkladem zařízení, které čte mechanickým způsobem tvar nějaké struktury, je třeba přenoska gramofonu. Na základě signálu z přenosky by – místo obvyklého akustického výstupu – mohl počítač vytvořit obraz zvlněné drážky.

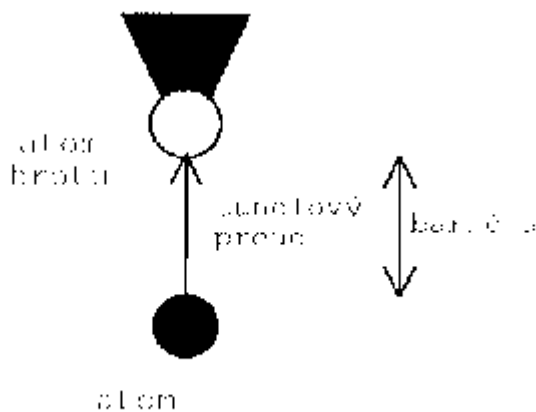
Modifikujme nyní vhodným způsobem gramofonovou přenosku tak, aby fungovala jako hmatové čidlo, a připevněme ji k dostatečně citlivému manipulátoru. Řídící počítač může podle programu napodobit naši činnost při získávání hmatových informací. Tímto zařízením by bylo v principu možné prozkoumat povrch vzorku a zobrazit ho například tak, jak se na mapách zobrazují pohoří a nížiny. Čím jemnější strukturu chceme takto

zkoumat, tím ostřejší potřebujeme hrot, citlivější přenosku a jemnější posuv. Úměrně je třeba snížit přítlačnou sílu, abychom vzorek ani čidlo nepoškodili. K dosažení atomárního rozlišení musíme být schopni nahmatat jednotlivé atomy, což vyžaduje atomárně ostrý hrot. Ten by se však kontaktem se vzorkem velmi brzy zničil. Z toho důvodu není možné, aby se hrot povrchu vzorku přímo dotýkal. Na druhé straně však od něj nemůže být vzdálen příliš, neboť by to nepříznivě ovlivnilo rozlišovací schopnost zařízení. Na první pohled se tento problém jeví téměř neřešitelný: s přesností srovnatelnou s rozměrem atomu je třeba trvale udržovat vzdálenost mezi pohybujícím se atomárním hrotem a jednotlivými atomy povrchu vzorku (obr. 1).



obr. 1

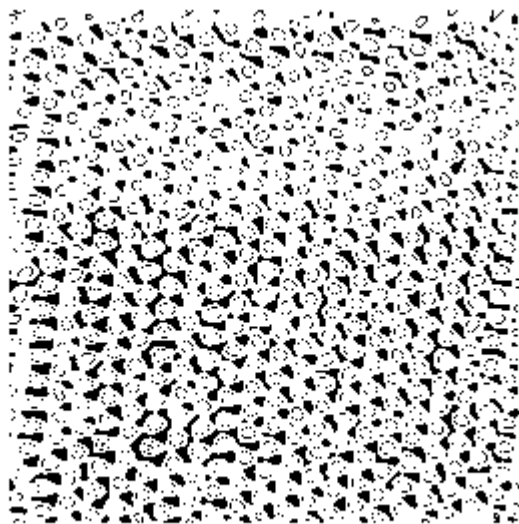
Obvyklé mechanické a optické metody jsou v tomto případě zřejmě nepoužitelné. Nabízí se však jeden velmi zajímavý jev, který opět souvisí s tím, že elektron není obyčejná kulička. Elektron, stejně jako jiné mikroobjekty, totiž dokáže za jistých podmínek projít překážkou (bariérou), kterou by podle běžných fyzikálních představ (podle představ klasické fyziky) projít neměl. Tento jev se nazývá tunelování a tunelující elektrony vytvářejí tzv. tunelový proud. (Při troše zjednodušení můžeme říci, že díky tomuto jevu například poteče obvodem kapesní svítilny elektrický proud i když budou kontakty jejího spínače izolovány velmi tenkou vrstvičkou (několik atomových vrstev) oxidu hliníku. S běžným elektrikářským náčiním se ovšem o správnosti tohoto tvrzení nelze přesvědčit, neboť takový proud je měřitelný jen těmi nejcitlivějšími přístroji.) Tunelový proud velmi rychle klesá s rostoucí tloušťkou bariéry – v našem případě s rostoucí vzdáleností mezi hrotem a atomem na povrchu vzorku (obr. 2).



obr. 2

Tato závislost je tak silná, že změna vzdálenosti o pouhý zlomek rozměru atomu ovlivní podstatně velikost tunelového proudu. V důsledku toho jeho měření poskytuje velmi přesnou informaci o vzdálenosti atomárního hrotu od atomů povrchu vzorku.

Pokud se tedy podaří vyřešit problém, jak pohybovat dostatečně jemně hrotem všemi směry, budeme mít k dispozici zařízení schopné detekovat jednotlivé atomy. Smíříme-li se při tom s nutností existence zprostředkujícího článku mezi našimi vjemy a velkou většinou reality, můžeme dokonce tvrdit, že pomocí tohoto zařízení – tunelového mikroskopu – jsme si na jednotlivé atomy povrchu vzorku sáhli. Pohyb hrotu se zpravidla převádí elektronickou cestou na obrazovou informaci (obr. 3).



*obr. 3 atomová struktura grafitu*

Interpretace zobrazeného reliéfu může však být v některých případech složitější záležitostí, protože velikost tunelového proudu závisí nejen na vzdálenosti atomu hrotu od atomu vzorku.

Předcházející výklad je samozřejmě zjednodušený. Skutečné motivy a ideje, které inspirovaly objev tunelového mikroskopu, byly poněkud jiné a celý příběh byl podstatně složitější. Zejména problém manipulace s hrotem v atomárním měřítku vyžadoval mnoho nového, jak po fyzikální, tak po technické stránce [2]. Však také autoři tunelového mikroskopu Heinrich Rohrer a Gerd Binnig obdrželi již pět let po svém objevu – v roce 1986 – Nobelovu cenu za fyziku. Dalším vývojem spočívajícím v důsledné optimalizaci všech částí se jejich původní přístroj dokonce zjednodušil. Dnes jde o víceméně standardní komerčně dostupné zařízení. Za zmínku stojí fakt, že už i brněnská firma TESCAN zvládla úskalí na cestě od znalostí fyzikálních jevů a principů k funkčnímu přístroji a má tunelový mikroskop ve svém výrobním programu.

#### **Literatura:**

- Lacina, A.: Vznik a vývoj termodynamiky a statistické fyziky, Školská fyzika 4/1995, s. 13-17  
Eckertová, L.: Zviditelnění atomů – tunelová mikroskopie, videokazeta Cesty k vědě 3, FVS JČMF Praha 1995