



## Výfučtení: Krystaly

Již od starověku byli lidé fascinováni symetriemi a pravidelností nacházející se v předmětech nebo fenoménech. Válcová symetrie šišek stromu, rovinná symetrie člověka a většiny zvířat, speciální tvar, ve kterém rostou listy kopřiv, okvětní lístky kopretiny či pravidelný tvar javorového listu, to všechno jsou příklady pozoruhodných přírodních pravidelností. Krystaly, kterým se v tomto Výfučtení hodláme věnovat, slouží jako ukázkový příklad přírodní symetrie. Snad právě díky dokonalým hranatým tvarům např. pyritu vpravo či magickým odleskům diamantů říkáme, že něco je „krystalicky“ čisté. Samotným krystalům někdo dokonce přisuzuje léčivé vlastnosti.

Na dalších řádcích se tedy podíváme na to, čím se krystaly od ostatních forem látek vyznačují z hlediska fyzikálního, jak je můžeme popsat a jak jejich speciální vlastnosti můžeme využít v technologiích. Snad tento popis symetrie krystalů jejich přirozenou krásu jen podtrhne.

### Historie

Těžko říci, kdo krystaly objevil první, neboť se o nich ví již od starověku. Však taky samotné slovo krystal pochází z řeckého *krystallos*, což znamená led. Krystaly přitahovaly pozornost svými nezvyklými barvami, ale hlavně pravidelným tvarem a výše zmíněnou symetrií. Přesto zůstávalo záhadou, z čeho se skládají a čemu vděčí za svou pravidelnost na rozdíl od např. běžných kamenů.

Ve starém Řecku se vyskytovalo mnoho různých proudů myšlení, které vysvětlovaly, proč různé látky mají různé vlastnosti. Podle jedné z nejúspěšnějších teorií, tzv. *atomové teorie*, může za různost látek jejich různá vnitřní struktura. Všechnu látku totiž tvoří nedělitelné částičky pojmenované atomy (z řeckého *a-* (ne) + *tomos* (dělit), tedy nedělitelný). Existuje mnoho druhů atomů a různé druhy atomů mají za důsledek různé vlastnosti.

Slovo atom jste již bezpochyby slyšeli, neboť se používá i dnes s podobným významem jako podle původních atomistů Leukippa či Démokrita. Víme totiž, že hmota se vskutku skládá z jistých malých částíček, kterým také říkáme atomy. Dnes již však víme dvě podstatné věci, které nebyly zahrnuty v původní atomistické teorii:

- I samotné atomy lze za jistých podmínek dělit.<sup>1</sup>
- Atomy se mohou spojovat s jinými atomy, a tvořit tak tzv. *molekuly* s jinými vlastnostmi. Např. dva atomy plynného vodíku H s jedním atomem plynného kyslíku O mohou dohromady vytvořit tekutinu  $H_2O$ , též zvanou voda.

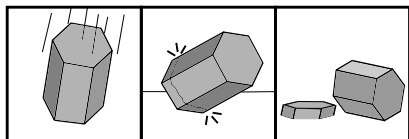
Řeční atomisté tedy měli do jisté míry dobrý nápad ohledně toho, z čeho je složená hmota. Zvláštní vlastnosti krystalů však nepramení z toho, že by obsahovaly nějaké zvláštní atomy,



Obr. 1: Krychlovitá struktura krystalu pyritu

<sup>1</sup>Nejdříve se myslelo, že je nelze dělit, a až po jejich pojmenování byl objeven opak. Jméno jim však zůstalo.

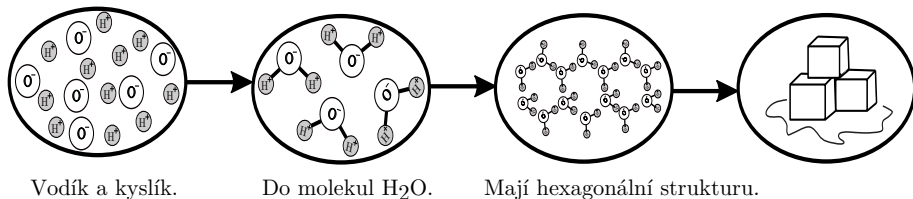
nebo že by se atomy sdružovaly do nějakých exotických molekul. Krystalické vlastnosti a jejich pravidelnou podobu pomohl vysvětlit až otec moderní krystalografie pan René Just Haüy v 19. století. Ten jednoho dne omylem upustil kus kalcitu na zem, čímž jej rozbil na části. Zjistil při tom, že jednotlivé části krystalu mají stejný tvar jako krystal celý (obrázek 2). Došel tak k závěru, že krystalické látky v sobě obsahují jistý základní tvar, který se neustále opakuje.



Obr. 2: Štěpení krystalu, jak jej pozoroval R. Haüy

René Just Haüy tedy zjistil, co odlišuje krystaly od ostatních látek. Opakuje se v nich jeden primitivní (neboli základní) tvar, který je pořád stejný. Tento tvar nacházíme i pokud lámeme krystal na stále menší a menší kousky. Tento tvar by měly tedy zaujímat i molekuly! Zdá se to jako odvážné tvrzení, nicméně se ukázalo jako pravdivé. Dohromady tedy vidíme, že látky mohou mít až tři struktury znázorněné na diagramu 3 níže: atomickou, molekulární a krystalickou. Každá z těchto struktur určuje vlastnosti látky.

Které druhy atomů      Jak jsou atomy poskládány? Jsou molekuly nějak      Výsledek: led  
jso v látce přítomny?      poskládány?



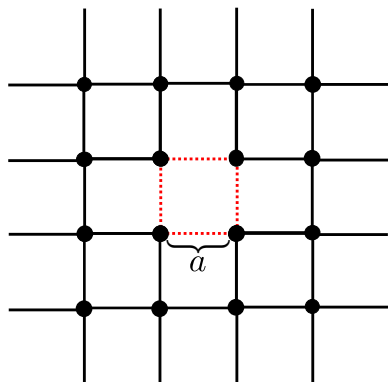
Obr. 3: Tři faktory, které ovlivňují vlastnosti látek – zde na příkladu ledových krystalů.

Změnou byť jen jediné z kategorií bychom dostali látku s jinými vlastnostmi (např. látka se stejnou atomovou a molekulární strukturou ale bez krystalické struktury by byla tekutá voda nebo vodní pára).

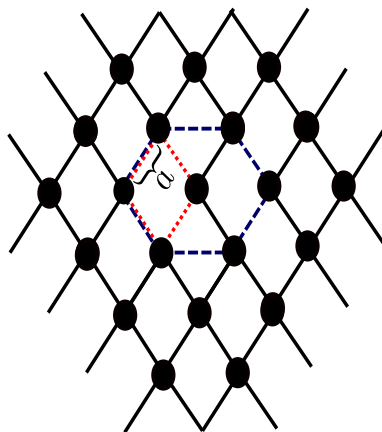
### Krystalické mřížky

Poznatek pana Haüye se zdá překvapivý a nezvyklý. Pokusme se jej tedy vyjasnit na příkladech zahrnujících 2D krystaly. Začneme obrázky několika tzv. *krystalických mříží* neboli nákrešů, na kterých jsou znázorněny jednotlivé atomy či molekuly a jejich propojení. Podívejme se nejdříve na obrázky 4 a 5.

Můžeme si představit, že krystalická mřížka je průřez nějakým krystalem, který je velmi velký (a proto mřížka nikdy nekončí). Na tomto nákrešů lze v plné kráse vidět poučku pana Haüye: u obou mříží najdeme jeden primitivní tvar, který se stále opakuje. Ve čtvercové mřížce je to čtverec, v šestiúhelníkové se sice opakuje (modře čárkovaně vyznačený) šestiúhelník, nicméně musíme být pozornější. Hledáme totiž nejjednodušší tvar. Můžeme tedy vzít rovnou červeně



Obr. 4: Čtvercová krystalická mřížka



Obr. 5: Šesterečná krystalická mřížka

(tečkovaně) vyznačený čtyřúhelník. Tomuto základnímu tvaru, který můžeme vybrat u každé krystalické mřížky, se říká (základní) *elementární buňka*.

Krása popisu krystalů spočívá v tom, že místo toho, abychom popisovali celý krystal, se stačí zaměřit pouze na jeho elementární buňku. Zjistíme-li např. její hustotu, pak stejná bude hustota celého krystalu. Podobně můžeme např. zjišťovat měrný elektrický odpor, měrnou tepelnou kapacitu, tepelnou roztažnost a tak dále.

## Symetrie

Makroskopickou látku tedy můžeme popsat velmi zjednodušeně pomocí studia její mřížové struktury či elementární buňky. Abychom si tento popis ještě ulehčili, zavedeme další pojem, tzv. *symetrie*. Toto řecké slovo má dvě složky: *syn-* (sou) a *metron* (míra), které se také vyskytují v českém synonymu *souměrnost*. V běžném jazyce bychom symetrický předmět nazvali pravidelným, protože se v něm vzory opakují. V krystalografii se však symetrie chápe jako matematický pojem, který znamená, že pokud na něčem provedeme nějakou operaci (posunutí, pootočení apod.) a ono se to nezmění, pak je to (vůči této operaci) symetrické.

Existují různé typy symetrií: *středově symetrické* je např. kolo, protože když ho otočíme kolem středu, tak vypadá pořád stejně. *Osově symetrická* je např. činka, tu můžeme otočit kolem její osy a nikdo si toho nevšimne (dokonce má těchto os více). Dále máme např. symetrii *časovou*, kterou můžeme pozorovat u vrhů. Vyhodíme-li např. míček do vzduchu a necháme ho klesnout, tak je jeho let časově symetrický (nevšimli bychom si, kdyby někdo let míčku přehrál pozadu).

Pojďme si však blíže rozebrat zmíněný pojem „operace“. Každá symetrie zahrnuje spolu dvě věci: již zmiňovanou operaci symetrie a k ní tzv. prvek symetrie. *Operací symetrie* může být mnoho, jak si níže některé představíme. Patří mezi ně otáčení (rotace), zrcadlení, posouvání (translace), nebo třeba inverze (středová souměrnost). *Prvek symetrie* je naproti tomu vybraný bod či přímka (v prostoru i rovina), která se při působení operace nemá měnit, a tím vlastně danou symetrii správně rozlišíme, například: čtverec obsahuje mj. 2 symetrie zrcadlení podle

os stran a také 2 symetrie zrcadlení podle úhlopříček (úhlopříčky i osy stran jsou pro čtverec prvky některé symetrie). Obdélník naproti tomu má za prvky symetrie pouze své osy stran, protože jej nelze symetricky zrcadlit podle úhlopříčky. Můžeme tedy říct, že čtverec má „větší symetrii“ než obdélník. V obou případech jde sice shodně o operace zrcadlení, ale kvalitativní rozlišení různých symetrií zde spočívalo v odlišných prvcích symetrie (stejná operace ale odlišný prvek je už jiná symetrie). Zrovna tak říkáme, že symetrie jsou různé, i pokud se liší operací, ale mají shodný prvek. Kupříkladu stejný šestiúhelník lze otočit o  $60^\circ$  i  $120^\circ$  kolem středu a jeho obrázek se nezmění. Říkáme, že jde o dvě různé operace symetrie se stejným prvkem (v tomto případě středem šestiúhelníku), a tak i o docela jiné symetrie jako takové.

Podíváme se nyní blíže na několik zmíněných typů symetrií, které mohou mít krystaly v rovině.

### *Translační symetrie*

Všechny krystalické mřížky splňují *translační* symetrii neboli symetrii v posunu. Posuneme-li např. čtvercovou mřížku o vzdálenost  $a$  strany čtverce elementární buňky doprava, tak se nezmění (nezapomeňte, že mřížku bereme jako nekonečnou, neboť skutečná mřížka je oproti délce vazeb mezi atomy velmi velká). Podobně, posuneme-li šestiúhelníkovou o vzdálenost  $a$  vhodným směrem, také se nic nezmění. Tato symetrie vystihuje poučku Reného Haüyeho. Pokud bychom totiž měli pouze základní buňku, mohli bychom polohy ostatních mřížkových bodů (atomů) dostat pouze posunem elementární mřížky.

### *Rotační symetrie*

Rotační symetrie znamená, že mřížku v rovině lze otočit o nějaký úhel kolem určeného bodu a nezmění se (bod otáčení je tedy prvkem symetrie). Např. čtvercovou mřížku v rovině lze otočit okolo některého mřížového bodu o  $90^\circ$  nebo o libovolný celočíselný násobek a nezmění se. Šestiúhelníkovou mřížku taky můžeme otáčet, stačí se zaměřit na jeden šestiúhelník a je vidět, že ten kolem středu můžeme otočit o  $60^\circ$  (jedna šestina celé otočky o  $360^\circ$ ).

Ne všechny krystaly jsou rotačně symetrické, ale každý musí splňovat translační symetrii. Skloubení těchto dvou symetrií dohromady není bezbolestné: matematicky lze ukázat, že v krystalech lze mít rotační symetrie pouze o  $180^\circ$ ,  $120^\circ$ ,  $90^\circ$  nebo  $60^\circ$ .

### *Zrcadlová symetrie*

Symetrie vůči zrcadlení (reflexi) spočívá v tom, že danou krystalickou mřížku lze zrcadlit podle nějaké osy (resp. roviny kolmo protínající rovinu krystalu) a nic se nezmění (osa zrcadlení je tedy přímkou, která je zároveň prvkem symetrie). Čtvercovou mřížku lze zrcadlit podél úhlopříček i podél stran, má celkem čtyři roviny zrcadlení. Šestiúhelníkovou mřížku lze taktéž zrcadlit, při pohledu na šestiúhelník můžeme najít až šest os (rovin) zrcadlení (na třech leží úhlopříčky a na třech leží osy stran). Pro přehlednost ještě dodáme, že zrcadlové symetrii odpovídá osová souměrnost v geometrii.

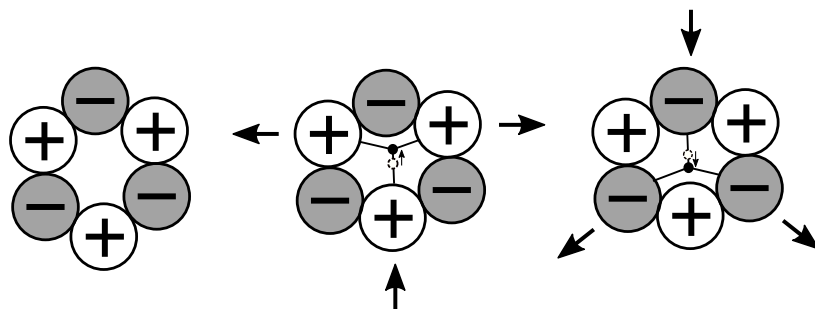
### *Důsledky symetrie*

Znalost krystalových symetrií nám může pomoci při určování vlastností krystalů jako např. elektrický odpor. Díky symetrii však také můžeme jasně vidět komplikaci, která často vyvstane: *směrovou závislost* některých veličin. Vezměme např. zmíněný odpor a představme si třeba

obdélníkovou mřížku, tj. mřížku s elementární buňkou tvořenou obdélníkem o hranách  $a$  (kratší strana) a  $b$  (delší strana). Pokud bychom pustili do mřížky proud o napětí 1 V ve směru podél hrany  $a$ , tak po cestě častěji narazí na atomy. Oproti tomu ve směru podél hrany  $b$  je koncentrace atomů nižší. V závislosti na druhu látky je tak naměřený proud v ampérech v obou směrech různý – mají různý odpor. Kdybychom pak proud pustili šikmo, byl by odpor ještě jiný. K popisu těchto směrových vlastností krystalů se v matematice používají tzv. *tenzory*, těmi se ale pro jejich složitost nebudeme zabývat.

### Piezelektrický jev

Jedno z využití krystalů a jejich symetrií, které můžeme s našimi znalostmi již pochopit, v sobě skrývá tzv. *piezelektrický jev*. Piezelektrické látky mají tu zvláštní vlastnost, že pokud je zmáčkne, tak to v nich vyvolá krátký tok elektrického proudu. Představme si tedy průřez krystalu, který sestává z kladně a záporně elektricky nabitých molekul. Sledujme na nákrese, co se stane s „těžištěm“ kladného a záporného náboje, pokud krystal zmáčkne.



Obr. 6: Atomy krystalu v klidu a po zmáčknutí. Na druhém obrázku je zobrazeno „těžiště“ kladného náboje a na třetím záporného. Vidíme, že došlo k jejich posunu, což je podstata elektrického proudu.

Jak vidíme, při zmáčknutí se celkové nábojové těžiště přesunulo. Celkový kladný náboj se přesunul nahoru a celkový záporný dolů. Přesun nábojů je ale elektrický proud! Zmáčknutím krystalu se tedy z elementární buňky vyloučí velmi malý proud. Těchto buněk je však v krystalu hodně, a proto celkově vznikne pozorovatelný elektrický proud. V tom spočívá podstata piezelektrického jevu.

Tento podivný efekt však skýtá nemálo využití. Najdeme jej např. u BBQ zapalovače (zapalovač s tlačítkem) nebo v mikrofону. V BBQ zapalovači zmáčknutí přímo vyvolá elektrickou jiskru, která zažehne plamen. Mikrofon funguje konkrétněji tak, že zvukové vlny, které vydáme např. ústy, stlačí senzory uvnitř, které pak vydají elektrický proud a množství elektrického proudu se zaznamená. Podle intenzity zaznamenaného proudu lze pak určit zaznamenaný zvuk.

Efekt ale funguje i obráceně, tedy pokud do piezelektrických látek vhodně pustíme proud, tak se smrští či zavibrují. Toho se využívá v hodinkách, ve kterých je piezelektrický krystal z křemíku. Tím, že do něj z baterie teče proud, krystal vibruje na vhodné frekvenci a tato frekvence se pak dá převést na tikot hodinek, které přesně určují čas. Známe-li totiž přesně frekvenci např. 10 tiků za sekundu, stačí napočítat deset tiků (např. pomocí ozubeného kola), a potom posunout vteřinovou ručičku.

## Závěr

Na začátek dalšího ročníku Výfuku jsme se vskutku vydali na počátek, a to do starověkého Řecka za teorii atomistů. Zjistili jsme, že podle novější verze této teorie se hmota skládá z atomů, které se někdy mísí do molekul a ty se vzácněji uspořádávají do krystalů. Od poučky Reného Justa Hauüye, která vysvětlovala podstatu krystalu, jsme přešli k nákresům krystalických mřížek, kde lze strukturu krystalů jasněji pozorovat. K popsání oné struktury jsme pak povolali pojem symetrie, díky němuž jsme si objasnili některé vlastnosti krystalů. Na závěr Výfučení jsme naše nabitě znalosti zužitkovali k popisu piezoelektrického jevu, který se v dnešní době využívá v mnoha technologiích.

Při popisu krystalů jsme pouze lehce přejeli po povrchu: nezmínili jsme se o 3D krystalech, nepopsali jsme různé směrové vlastnosti krystalů a ani nezbyl čas na jiné průmyslové aplikace krystalů (LCD monitory a další). K popisu těchto fenoménů bychom potřebovali mnohem více prostoru, nicméně věříme, že Výfučení nastínilo alespoň základní důležité pojmy. Doufáme, že vás text zaujal a že vám bude užitečný pro budoucí hlubší porozumění.

*Jindřich Dušek*

jindra@vyfuk.mff.cuni.cz

---

Korespondenční seminář Výfuk je organizován studenty a přáteli MFF UK. Je zastřešen Oddělením propagace a mediální komunikace MFF UK a podporován Katedrou didaktiky fyziky MFF UK, jejími zaměstnanci a Jednotou českých matematiků a fyziků.

Toto dílo je šířeno pod licencí Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported.  
Pro zobrazení kopie této licence navštivte <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>.