

O ODDĚLENÍ A POSÍLENÍ OBRAZU ZA ZRCADLEM (DERACEMIZACE A AMPLIFIKACE CHIRALITY)

MICHAL JURÁŠEK^a, BOHUMIL KRATOCHVÍL^b, MICHAL KOHOUT^c, FRANTIŠEK ŠVEC^d
a PAVEL DRAŠAR^a

^a Ústav chemie přírodních látek, ^b Ústav chemie pevných látek, ^c Ústav organické chemie, Vysoká škola chemicko-technologická, Technická 5, 166 28 Praha 6 - Dejvice; ^d Katedra analytické chemie, Farmaceutická fakulta, Univerzita Karlova, 500 05 Hradec Králové, Česká republika
jurasekm@vscht.cz, kratochb@vscht.cz, svecfr@faf.cuni.cz, kohouti@vscht.cz, drasarp@vscht.cz

Došlo 5.8.23, přijato 12.9.23.

Článek popisuje základní aspekty chiraloty, zamýšlí se nad původem chiraloty chemických sloučenin a přináší pohled na základní děje při deracemizaci. Článek naznačuje bezbřehost tematiky chiraloty, chirální koordinace, asociace a interakce a nečiní si nikterak nárok na to, aby přinesl vyčerpávající přehled.

Klíčová slova: chiralita, symetrie, enantiomery, diastereomery, deracemizace, homochiralita

Vzápětí byla Alenka za zrcadlem a lehce seskočila do pokoje za ním.... Rozhlížela se kolem sebe a zjistila, že co je vidět z tamtoho pokoje je obyčejné a nezajímavé, zato ostatek je docela jináčí.... Jakkap by se ti, Katko, líbilo v domě za zrcadlem! Jestlipak by ti tam dávali mlíčko! Třeba se to mlíčko v domě za zrcadlem nedá ani pít... (cit.¹).

Začněme nejdříve, tak jako diskutující v době antiky, definicí slova chiralita. Termín pochází z řečtiny, kde χεῖρ/χέρι (cheir/chéri) značí ruku. Chiralita² je geometrická vlastnost (asymetrie prostorového rozložení) tuhého objektu (nebo prostorového uspořádání objektu, bodů nebo atomů) spočívající v nemožnosti překrytí (ztotožnění) se svým vlastním zrcadlovým obrazem³; takový objekt nemá žádné prvky symetrie druhého druhu (zrcadlovou rovinu, $\sigma = S_1$, střed symetrie, $i = S_2$, rotačně-reflexní osu, S_{2n}).

Může však mít rotační osu symetrie C_n . Zcela novým fenoménem stereoisomerie je tzv. akamptisomerie, kde oba isomery jsou jeden ke druhému propojeny inverzí vazebného úhlu³. Pro jednoduchost v tomto příspěvku použijeme představu o chemii, jakou mají obyčejní chemici, kteří vědí, že oba enantiomery chirální sloučeniny mají všechny fyzikálně-chemické vlastnosti stejné s výjimkou, pokud se na ně „díváme či saháme“ čímkoli, co je samo o sobě chirální. Chirální objekt a jeho zrcadlový obraz se označují jako enantiomorfy, v případě molekul se hovoří o enantiomerech.

Pro úplnost malinko odbočíme. Trochu složitější je problém chiraloty v krystalické fázi, tzn. třídídimenzionální chiralita (jakkoliv je všechna chiralita trojrozměrná). Ačkoliv počet možných krystalových struktur se zdá být neomezený, tak jejich symetrické uspořádání popisuje pouze 230 prostorových grup⁴. Zjednodušeně řečeno: pro-



Obr. 1. Chiralita objektů

[§] K popisu symetrických objektů jsou v textu použity dva zápisy. Hermannův-Mauguinův zápis je preferován v krystalografii, zatímco spektroskopie preferuje Schoenfliesův zápis. Tak např. střed symetrie je i (v S), nebo -1 (v H-M), zrcadlová rovina je σ (v S) a m (v H-M) atd.



Obr. 2. Chiralita v přírodě

storová grupa je množinou všech operací symetrie, které lze s danou krystalovou strukturou provést. Pokud chirální látka krystaluje ve formě čistého enantiomeru, potom její krystalovou strukturu nazýváme absolutní. Absolutní struktura enantiomeru patří do jedné z chirálních (neboli Sohnckeho) grup, kterých je pouze 65 (tab. I). Chirální grupy jsou podmnožinou 230 grup při respektování symetrických omezení pro chiralitu, viz výše.

Příroda si však „libuje“ v určitých symetriích, mimo jiné v lidské populaci je více praváků než leváků. Proto všech zmíněných 230, resp. 65 grup není rovnoměrně zastoupeno. Velmi často se setkáváme s grupami monoklinickými, triklinickými a ortorombickými: $P2_1/c$ (nejčastější ze všech 230), $P-1$ nebo $P2_12_12_1$, z nichž pouze $P2_12_12_1$ je chirální, protože neobsahuje střed symetrie. Naproti tomu některé prostorové grupy vyšších symetrií (kubické, hexagonální) jsou zastoupeny jen ojediněle. Distribuce grup kubických a hexagonálních tvoří v přírodě pouze 1 % (cit.⁵). Důvody pro nerovnoměrné zastoupení symetrických vzorů v přírodě (asymetrie v symetrii) jsou zřejmě v energetických preferencích.

Stanovení absolutní struktury enantiomerů, tedy jejich přesného uspořádání v 3D prostoru, umožňuje především monokrystalová RTG difrakční analýza, která po-

skytne hodnotu tzv. Flackova parametru $x <0,1>$. Pokud je hodnota x blízká 0, potom je nalezená absolutní struktura určena správně, pokud je x blízká 1, potom je absolutní struktura určena nesprávně a je nutné koordináty všech atomů vynásobit -1 , tzn. strukturu invertovat přes střed symetrie na správnou absolutní konfiguraci. Pokud se hodnota x pohybuje okolo 0,5, potom se pravděpodobně jedná o racemát nebo krystalové dvojče.

Pokud je objekt superponovatelný (zcela překrytelný, identický, E) na svůj zrcadlový obraz, je popsán jako achirální. Objekty, které se vyskytují pouze v řadách jedné chirální formy, se označují jako homochirální (např. většina přírodních aminokyselin, sacharidů či steroidů).

Chiralita, jako fenomén, nabyla na mimořádné důležitosti zejména po conterganové (thalidomidové) aféře, kdy byl v 50. letech ženám podáván racemický⁶ 2-(2,6-dioxopiperidin-3-yl)-1*H*-isoindol-1,3(2*H*)-dion, jako nebarbituratové hypnotikum, k potlačení ranních těhotenských nevolností. Postupem času bylo zjištěno, že zatímco *R*-enantiomer je účinné sedativum a antiemetikum, *S*-enantiomer je teratogenní^{7,8}. Problém byl v tom, že teratogenita byla dlouho tajena, a proto se narodily (pravděpodobně) desítky tisíc znetvořených dětí. Později bylo prokázáno, že *R*-enantiomer v organismu racemizuje, a tedy ani podávání čistého *R*-enantiomeru (a tím i racemátu) těhotným matkám, ale ani ženám a mužům nepoužívajícím antikoncepci není možné⁶ (používá se však i nadále za přísných podmínek⁹ např. proti některým zhoubným nádorům, zánětům, artritidě, lepre čili malomocenství¹⁰).

Pokud není vzat v potaz vliv asymetrického vnějšího prostředí, mají mít oba enantiomery, ze kterých se skládá racemická směs, stejnou energii, a tudíž vznik obou, libovolným způsobem, bude mít pravděpodobnost 50:50. Jak je potom možné, že v přírodě nalézáme jednotlivé enantiomery, a dokonce homochirální řady sloučenin, ba dokonce

Tabulka I
65 chirálních (Sohnckeho) grup

Krystalografická soustava	Hermann-Mauguinův symbol
Triklinická	$P 1$
Monoklinická	$P 121, P 12_11, C 121$
Ortorombická	$P 222, P 222_1, P 2_12_12, P 2_12_12_1, C 222_1, C 222, F 222, I 222, I 2_12_12_1$
Tetragonální	$P 4, P 4_1, P 4_2, P 4_3, I 4, I 4_1, P 422, P 42_12, P 4_122, P 4_12_12, P 4_222, P 4_22_12, P 4_322, P 4_32_12, I 422, I 4_122$
Romboedrická	$P 3, P 3_1, P 3_2, R 3, P 312, P 321, P 3_112, P 3_121, P 3_212, P 3_221, R 32$
Hexagonální	$P 6, P 6_1, P 6_5, P 6_2, P 6_4, P 6_3, P 622, P 6_122, P 6_522, P 6_222, P 6_422, P 6_322$
Kubická	$P 23, F 23, I 23, P 2_13, I 2_13, P 4_32, P 4_232, F 432, F 4_132, I 432, P 4_332, P 4_132, I 4_132$

chirální uskupení, jako např. krystaly, vzniklé z achirálních sloučenin? Takové případy se zdají být porušením principu symetrie formulovaném Neumanem, Minigerodem a Curie¹¹.

Úvahy o tom, kde se vzala na Zemi chiralita, jsou kdesi mezi vysokou fyzikou a filozofií. Protože k prvotnímu výskytu chiralit podle všeho nepotřebujeme nic menšího než ji samou. Chiralita a její původ jsou i zajímavým zdrojem poetických filozoficko-naturalistických půtek mezi evolucionisty a kreacionisty¹². Pro začátek je nutno poznamenat, že fyzika vidí možné zdroje pravé i nepravé chiralit v gravitačních potenciálech narušujících paritu¹³, výklad čehož ovšem poněkud přesahuje rozměry tohoto příspěvku¹⁴ tak, jak tato vlastnost může být připsána jakýmkoliv objektům od elementárních částic po galaxie¹⁵. Pokud je porušená parita ve vesmíru, prapůvod toho, že nakonec v reálném prostředí enantiomery nemají zcela identickou energii, může být počátek homochiralit některých řad sloučenin na Zemi i v jejich extraterestriálním původu¹⁶. V této souvislosti můžeme vidět i Millsovo tvrzení, že poměr enantiomerů v racemátu nikdy není přesně 50:50 a že jeden enantiomer vždy mírně převažuje¹⁷.

Obecně je přijímaný názor, že oba enantiomery mají stejnou energii, který však platí pouze pro izolované objekty (molekuly). U krystalických fází a podobně i u solvovaných molekul (mnohočásticových systémů) je otázka energetické rovnosti přinejmenším diskutabilní, protože „enantiomery“ mohou projevovat rozdílnou reaktivitu při interakcích s chirálním prostředím, to ale již odcházíme od vlastností pouhých enantiomerů a musíme vzít v potaz vznik nekovalentních diastereomerních supramolekul (klastrů). Existují však i speciální systémy – polární smektické fáze lomených kapalných krystalů, které se vyznačují spontánní deracemizací a tvorbou makroskopicky chirálních domén v systému, jenž je tvořen výhradně z achirálních molekul¹⁸, jak diskutujeme dále.

Porušení (prostorové) parity představuje základní vlastnost částicové a atomové chiralit používané k vypořádání se s komplexním fenoménem asymetrie ve vesmíru. Na molekulární úrovni však četné experimenty naznačují,



Obr. 3. Chirální galaxie¹⁹

že energetické rozdíly související s porušením parity samy o sobě nezpůsobily zesílení a šíření homochiralit²⁰. Parita (a P-symetrie) je však narušována slabými interakcemi. Asymetrické transformace prováděné za podmínek vzdálených od rovnováhy odhalují existenci nelineární autokatalýzy, která má stochastickou povahu. V každém případě a z globálního hlediska se chiralita jeví jako sjednocující charakteristika našeho pozorovatelného prostředí s evolučními implikacemi²¹.

„Spontánní“ deracemizace (porušení zrcadlové symetrie) je v současném výzkumu chiralit náročným multidisciplinárním předmětem. V nepřítomnosti jakýchkoli chirálních induktorů může být achirální látka nebo racemická směs transformována do enantiomerně obohaceného nebo dokonce homochirálního stavu prostřednictvím selektivního vstupu energie, např. chemického potenciálu, ozařování, mechanického mletí, ultrazvukových vln, tepelných gradientů atd.²² Podívejme se blíže na některé možnosti takové „deracemizace“, tj. přeměnu stabilního racemického stavu na asymetrický neracemický. Přeměnu, která po léta přitahuje pozornost přírodovědců i filozofů, protože bytostně souvisí s životem na Zemi²³ a je významným procesem pro oblast farmakologie, supramolekulární chemie, nanověd a dalších oborů. Je logické, že procesy deracemizace musíme vidět i v souvislosti s epimerací, kdy je jeden epimer přeměněn na druhý, neboť i zde se mj. uplatní polarizované záření, keto-enol tautomerie, chirální katalýza a enzymy (epimerasy). Je nabíledni, že s popsávanými jevy souvisí naopak i spontánní racemizace²⁴.

Chiralita a helicity látek, nekovalentních supramolekul či krystalů, může být ovlivněna či dokonce zesílena řadou způsobů, jako např. ozařováním různými vlnovými délkami elektromagnetického záření nebo zářením kruhově polarizovaným^{25,26}, přičemž vznik polarizovaného světla můžeme vidět mj. selektivní absorpcí a rozptylem (světlo přicházející z oblohy je částečně polarizováno), odrazem pod tzv. „Brewsterovým“ úhlem, dvojlomem, někdy kombinovaným s odrazem, kdy dvojlom může být přirozený, nebo navozený silným elektrickým polem. Jako historickou reminiscenci na úrovni iluminace si připomeňme praxi Vikingů, kteří, aniž tehdy věděli proč, hledali pod zamračenou oblohou pro navigaci polohu slunce (zdroj polarizovaného záření) používající „sólsteinn“, sluneční kámen, krystal islandského dvojlomného vápence (polarizační analyzátor)²⁷. V kosmickém scénáři se má, podle některých, za to, že působení polarizovaného kvantového záření ve vesmíru, jako jsou kruhově polarizované fotony nebo spinově polarizované částice, mohlo vyvolat asymetrické podmínky v primitivních mezihvězdných médiích, což mělo za následek pozemskou bioorganickou homochiralitu²⁸. Podobné efekty při vzniku chirálních komplexů může mít i aplikace ultrazvuku²⁹.

Slabé elektrické interakce se liší od ostatních tím, že jsou schopné rozlišit chiralitu zúčastněných částic^{30,31}. Podle všeho však tyto síly k deracemizaci samy opět nestačí³². Je užitečné poznamenat, že tyto obecné rysy lze ilustrovat pohledem na vývoj chemického systému, který je zpočátku daleko od rovnováhy. Příklady jsou systémy

narušující chirální symetrii a oscilační systémy, kde stacionární stav lze vidět tehdy, když změna entropie je minimální. Výpočet rychlosti produkce entropie na jednotku objemu pak lze nejnázne provést pro homogenní chemické systémy, ve kterých jsou známy všechny elementární kroky reakcí³³. Polární interakce mohou mít za důsledek, že je chiralita ovlivněna i pH (cit.³⁴).

V autokatalytických reakčních systémech přítomnost malého množství (chirálního) reakčního produktu v enantiomerním přebytku může napomoci vytvoření mnohem většího enantiomerního přebytku výsledného produktu (Soai-ho reakce)³⁵. Tato reakce je unikátní laboratorní demonstrace absolutní kineticky kontrolované asymetrické syntézy, tj. spontánní tvorby (automultiplikace) enantiomerně obohaceného produktu, a to i v nepřítomnosti jakýchkoli dalších chirálních induktorů nebo fyzikálních sil²². Srovnatelnou možností je i „naočkování“ spontánní krystalizace achirální látky, která tvoří chirální krystaly, prvním chirálním krystalem (ze supramolekulárního pohledu prvním synthonem), často znásobená jednosměrným mícháním³⁶. Při takových dějích, jimiž je vlastně samoskladba, se uplatňují jevy jako filtrování (oprava) chyb, molekulární rozpoznání a kooperativita, protože pokud k takovému ději dochází, musí to být z hlediska energie (entropie) výsledného produktu výhodné. Mají zde místo všechny myslitelné nekovalentní interakce.

Tvorba chirálních krystalů achirální látky je možná tehdy, když sama achirální látka tvoří při krystalizaci chirální krystalovou buňku³⁷. Příkladem takových enantiomerních krystalů je křemen, sádra, olivín, clinopyroxen, klinoamfibol³⁸ nebo chlorečnan sodný, a z organických sloučenin např. benzofenon, fenol a řada dalších. V přírodě pak může chirální krystal iniciovat jak enantioselektivní krystalizaci, tak chirální reakci, a to i v pevné fázi³⁹.

Podobným případem je i tvorba uniformních chirálních krystalů vycházející z téměř racemické směsi levotočivých a pravotočivých krystalů. Procesy rozpouštění a rekrystalizace založené na úvahách o rozpustnosti malých a větších krystalů podle Gibbsova-Thomsonova pravidla (Stefanův problém)⁴⁰, spojené s racemizací v míchaném roztoku, vedou tento téměř rovnovážný systém k uniformní chiralitě v pevné fázi⁴¹ (Ostwaldovo zrání^{42–44}), vysvětlované buď pohledem na aproximaci středního pole (teorie Lifshitze-Slyozovho-Wagnera, LSW) anebo mnohačasticovou teorií vycházející z řešení difuzní rovnice v kvazistatické aproximaci⁴⁵.

Pozoruhodný názor můžeme vidět u tzv. přirozené orbitální chiralitě Země vytvořené především pravotočivou rotací Země kolem její rotační osy (včetně precese) a pravotočivým kroužením Země kolem Slunce, které vytvářejí efektivní rytmické pravotočivé silové pole v prostoru a čase, které může vést např. k prvotní krystalizaci „očka“ jednoho z enantiomerů⁴⁶. Existují úvahy, že zmíněné pole ani není potřebné, pokud dojde k prosté statistické fluktuaci³², byť v miniaturním měřítku, např. podle modelu navrženého Frankem⁴⁷. Nicméně bylo prokázáno, že silné laminární rotační míchání postačí jako

jediný chirální diskriminační zdroj pro vznik homochirálních supramolekulárních gelů⁴⁸, ale i homochirálních krystalů, ať již z roztoku nebo z taveniny⁴⁹. Rovnovážné systémy se uplatňují jak při uniformním míchání krystalizující směsi⁵⁰, tak i při mletí (např. v kulovém mlýně), při procesu zvaném Viedmovo zrání⁵¹, kdy je produktem totální deracemizace. Nutnou podmínkou úspěšné deracemizace je schopnost dané látky existovat v racemickém stavu ve formě konglomerátu, tedy tvořit racemickou směs z enantiomerně čistých krystalů. Pouze asi 15 % všech známých chirálních sloučenin tuto schopnost má, mezi nimi i biologicky významné substance, jako je např. kyselina asparagová⁵². Proces, který může vypadat jako čarodějnickví, se tak používá např. ve výrobě farmaceutik⁴².

Jiná možnost rozdělení enantiomerů je převedení enantiomerů na diastereomery, které mají již rozdílné fyzikálně chemické vlastnosti. Tvorba diastereomerů nemusí být výhradně založena na kovalentní vazbě, může jít např. i jenom o solvataci chirálním rozpouštědlem, anebo prostředím (chirální chromatografie), či kokrystalizaci s jedním enantiomerem chirální látky, jak již bylo řečeno. Příbuzné je i dělení enantiomerů na chirálních membránách⁵³. Enantiomery lze rozdělit i pomocí enzymů nebo přímo buněčných kultur či organismů, které selektivně přemění jen jeden z enantiomerů⁵⁴, což je proces, kde dynamický vznik diastereomerů z enantiomerů je zcela oprávněně představitelný.

Snaha porozumět původu chiralitě v biologických systémech vyvolala intenzivní hledání nelineárních efektů v katalýze a drahách pro zesílení mírných enantiomerních přebytků v racemátech za vzniku opticky čistých molekul. Amplifikace chiralitě v polymerních systémech jako výsledek kooperativních procesů byla a je intenzivně zkoumána⁵⁵. Ukázalo se, že jemná souhra nekovalentních interakcí, jako je vodíková vazba, π - π vrstvení a hydrofobní interakce, je také dostatečná k pozorování zesílení chiralitě v malých molekulách⁵⁶. Takzvané „matricí podporované zesílení chiralitě“ je jev, kdy např. pomocí výše zmíněného π - π vrstvení umocněného vhodnými vlastnostmi prostředí se na sebe skládají molekuly ať již chirální, nebo achirální⁵⁷, avšak s určitým omezením volné pohyblivosti tak, že vytvářejí chirální, například helikální útvary. V případě chirálních entit se dokonce uplatní princip „četař a vojáci“ (sergeant-and-soldiers)⁵⁸, kde několik seržantů může ovládat pohyby velkého počtu kooperativních vojáků⁵⁹, tak i těch několik chirálních nebo stericky nepoddajných supramolekulárních komponent např. může ovládnout supramolekulární helicitu výsledné supramolekuly, protože je pro komponenty dokonce energeticky výhodné podržet se pouze jedné z helicit, která v případě nekoordinace „seržantů“ může ve výsledném agregátu i alternovat. Příkladem takového chování může být vrstvení porfyrinových jednotek majících chirální a strukturálně nepoddajné substituenty, které v roztoku po určité době dosáhnou, při měření chiroptických vlastností, dále se neměnícího stavu, který vykazuje specifickou optickou rotaci desítek tisíc jednotek⁶⁰. Později bylo zjištěno, že vrstvení jednotek v závislosti na chiralitě substituentu

může být typu J či H (cit.⁶¹). Chirální agregáty byly pozorovány elektronovým mikroskopem a výpočtem byla prokázána pro daný agregát výhodnost jedné z helicit^{62,63}.

Článek naznačuje složitost a šíří tématu chiralit⁶⁴, chirální koordinace, asociace a interakce a nečiní si nikterak nárok na to, aby přinesl vyčerpávající přehled. Existuje mnoho sofistikovanějších pokusů o iniciaci homochiralit jako uplatnění plasmy, polarizovaných částic, spinů... (cit.^{28,65}). Nicméně, pokusili jsme se naznačit zásadní otázky a badatelské výsledky, jejichž důležitost zřejmě ocení až děti našich dětí⁶⁶.

LITERATURA

- Carroll L.: *Alice's Adventures in Wonderland – Through the Looking-Glass and what Alice found there*. Český titul: *Alenka v kraji divů a za zrcadlem*, překlad Skoumal A., Skoumalová H. Albatros, Praha 1988.
- IUPAC. *Compendium of Chemical Terminology*, (the "Gold Book") 2. vyd. (Compiled by A. D. McNaught and A. Wilkinson), Blackwell Scientific Publications, Oxford 1997. Online version (2019-) created by S. J. Chalk. ISBN 0-9678550-9-8. <https://doi.org/10.1351/goldbook>, staženo 27. 4. 2023.
- Canfield P. J., Blake I. M., Cai Z.-L., Luck I. J., Krausz E., Kobayashi R., Reimers J. R., Crossley M. J.: *Nature Chem.* 10, 615 (2018).
- International Tables for Crystallography*, Volume A (Hahn T., ed.). Kluwer Academic Publishers, Dordrecht 1989.
- <http://pd.chem.ucl.ac.uk/pdnn/symm3/sgpfreq.htm>, staženo 27. 6. 2023.
- Cossy J. R., v knize: *Comprehensive Chirality*, str. 1. Elsevier, Amsterdam 2012.
- Newbronner E., Atkin K.: *Disability Health J.* 11, 184 (2018).
- <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/%28S%29-thalidomide>, staženo 10. 7. 2023.
- https://prehledy.sukl.cz/prehled_leciv.html#;_heslo=thalidomide, staženo 10. 7. 2023.
- Dsouza N. N., Alampady V., Baby K., Maity S., Byregowda B. H., Nayak Y.: *Inflammopharmacology* 31, 1167 (2023).
- Brandmüller J.: *Comp. Math. Appl.* 12, 97 (1986).
- Sarfati J.: *J. Creation* 12, 263 (1998).
- Bargueño P.: *Chirality* 27, 375 (2015).
- Pavlov V. A., Shushenachev Y. V., Zlotin S. G.: *Symmetry* 11, 649 (2019).
- Takahashi J., Kobayashi K.: *Symmetry* 11, 919 (2019).
- Furukawa Y., Chikaraishi Y., Ohkouchi N., Ogawa N. O., Glavind D. P., Dworkin J. P., Abe C., Nakamura T.: *PNAS* 116, 24440 (2019).
- Mills W. H.: *J. Soc. Chem. Ind., London* 51, 750 (1932).
- Link D. R., Natale G., Shao R., MacLennan J. E., Clark N. A., Körblova E., Walba D. M.: *Science* 278, 1924 (1997).
- Devinsky F.: *Symmetry* 13, 2277 (2021).
- Gol'danskii V. I., Kuz'min V. V.: *Usp. Fiz. Nauk (YΦH)* 32, 1 (1989).
- Avalos M., Babiano R., Cintas P., Jiménez J. L., Palacios J. C.: *Tetrahedron: Asymmetry* 11, 2845 (2000).
- Buhse T., Cruz J.-M., Noble-Terán M. E., Hochberg D., Ribó J. M., Crusats J., Micheau J.-C.: *Chem. Rev.* 121, 2147 (2021).
- Avetisov V. V., Goldanskii V. I.: *Biosystems* 25, 141 (1991).
- Ikuma N., Tsue H., Tsue N., Shimono S., Uchida Y., Masaki K., Matsuoka N., Tamura R.: *Org. Lett.* 7, 1797 (2005).
- Meierhenrich U. J., Nahon L., Alcaraz C., Bredehft J. H., Hoffmann S. V., Barbier B., Brack A.: *Angew. Chem. Int. Ed.* 44, 2 (2005).
- Pijper D., Jongejan M. G. M., Meetsma A., Feringa B. L.: *J. Am. Chem. Soc.* 130, 4541 (2008).
- Ropars G., Lakshminarayanan V., Le Floch A.: *Contemp. Phys.* 55, 302 (2014).
- Sallembien Q., Bouteiller L., Crassous J., Raynal M.: *Chem. Soc. Rev.* 51, 3436 (2022).
- Komiya N., Muraoka T., Iida M., Miyanaga M., Takahashi K., Naota T.: *J. Am. Chem. Soc.* 133, 16054 (2011).
- Kieu T. D.: *Technical Report UM-P-94/74*; RCHep-94/22, Melbourne Univ., Parkville, VIC (Australia), https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/26/017/26017900.pdf, staženo 1. 6. 2023.
- Mason S. F., Tranter G. E.: *Proc. R. Soc. London, Ser. A* 397, 45 (1985).
- Plasson R., Kondepudi D. K., Bersini H., Commeys A., Asakura K.: *Chirality* 19, 589 (2007).
- Kondepudi D.: *Ecol. Psych.* 24, 33 (2012).
- Lin R., Zhang H., Li S., Chen L., Zhang W., Wen T. B., Zhang H., Xia H.: *Chem. Eur. J.* 17, 2420 (2011).
- Shibata T., Morioka H., Hayase T., Choji K., Soai K.: *J. Am. Chem. Soc.* 118, 471 (1996).
- Kondepudi D. K., Kaufman R. J., Singh N.: *Science* 250, 975 (1990).
- Matsuura T., Koshima H.: *J. Photochem. Photobiol., C* 6, 7 (2005).
- Lee C., Weber J. M., Rodriguez L. E., Sheppard R. Y., Barge L. M., Berger E. L., Burton A. S.: *Symmetry* 14, 460 (2022).
- Rodríguez B., Bruckmann A., Bolm C.: *Chem. Eur. J.* 13, 4710 (2007).
- Kraus C.: *Eur. J. Appl. Math.* 22, 393 (2011).
- Noorduyn W. L., Izumi T., Millemaggi A., Leeman M., Meekes H., Van Enkevort W. J. P., Kellogg R. M., Kaptein B., Vlieg E., Blackmond D. G.: *J. Am. Chem. Soc.* 130, 1158 (2008).
- Ostwald W.: *Z. Phys. Chem.* 22, 289 (1897).

43. Holaň J., Štěpánek F., Ridvan L.: Chem. Listy 108, 46 (2014).
44. Giurg A., Paidar M., Kodým R.: Chem. Listy 112, 372 (2018).
45. Čechal T.: *Ostwaldovo zrání – teoretický popis a simulace. Bakalářská práce.* FSI VUT, Brno 2008.
46. He Y. J., Qi F., Qi S. C.: Med. Hypotheses 56, 493 (2001).
47. Frank F. C.: Biochem. Biophys. Acta 11, 459 (1953).
48. Sun J. a 11 spoluautorů: Nat. Commun. 9, 2599 (2018).
49. Kondepudi D. K., Bullock K. L., Digits J. A., Hall J. K., Miller J. M.: J. Am. Chem. Soc. 115, 10211 (1993).
50. Sögütoglu L.-C., Steendam R. R. E., Meekes H., Vlieg E., Rutjes F. P. J. T.: Chem. Soc. Rev. 44, 6723 (2015).
51. Viedma C.: Phys. Rev. Lett. 94, 065504 (2005).
52. Viedma C., Ortiz J. E., de Torres T., Izumi T., Blackmond D. G.: J. Am. Chem. Soc. 130, 15274 (2008).
53. Randová A. a 12 spoluautorů: Sep. Purif. Technol. 141, 232 (2015).
54. van Ooyen J., Noack S., Bott M., Reth A., Eggeling L.: Biotechnol. Bioeng. 109, 2070 (2012).
55. Soai K. (ed.): *Amplification of Chirality* (Series: Topics in Current Chemistry, Vol. 284). Springer, Heidelberg 2008.
56. Palmans A. R. A., Meijer E. W.: Angew. Chem. Int. Ed. 46, 8948 (2007).
57. Miyagawa T., Yamamoto M., Muraki R., Onouchi H., Yashima E.: J. Am. Chem. Soc. 129, 3676 (2007).
58. Green M. M., Reidy M. P., Johnson R. D., Darling G., O'Leary D. J., Willson G.: J. Am. Chem. Soc. 111, 6452 (1989).
59. Eelkema R., Feringa B. L.: Org. Biomol. Chem. 4, 3729 (2006).
60. Štěpánek P., Dukh M., Šaman D., Moravcová J., Kniežo L., Monti D., Venanzi M., Mancini G., Drašar P.: Org. Biomol. Chem. 5, 960 (2007).
61. Monti D., Venanzi M., Gatto E., Mancini G., Sorrenti A., Štěpánek P., Drašar P.: New. J. Chem. 32, 2127 (2008).
62. Zelenka K. a 14 spoluautorů: Chem. Eur. J. 17, 13743 (2011).
63. Lettieri R., Cardová L., Gatto E., Mazzuca C., Monti D., Palleschi A., Placidi E., Drašar P., Venanzi M.: New J. Chem. 41, 639 (2017).
64. Liu M., Zhang L., Wang T.: Chem. Rev. 115, 7304 (2015).
65. Naaman R., Paltiel Y., Waldeck D. H.: Nat. Rev. Chem. 3, 250 (2019).
66. Nepil F.: *O Joklovi, Tomášovi a Evě*, v knize: *Kde jsi chodil satane?* Československý spisovatel, Praha 1966.

M. Jurášek^a, B. Kratochvíl^b, M. Kohout^c, F. Švec^d, and P. Drašar^a (^a Department of Chemistry of Natural Compounds, University of Chemistry and Technology, Prague, ^b Department of Solid State Chemistry, University of Chemistry and Technology, Prague, ^c Department of Organic Chemistry, University of Chemistry and Technology, Prague, ^d Department of Analytical Chemistry, Faculty of Pharmacy, Charles University, Hradec Králové, Czech Republic): **On the Separation and Strengthening of the Image Behind the Mirror (Deracemization and Chirality Amplification)**

The article describes the basic aspects of chirality, reflects on the origin of the chirality of chemical compounds and brings a view of the basic processes during deracemization. The article indicates the boundlessness of the topic of chirality, chiral coordination, association, and interaction, without making any entitlement to bring an exhaustive overview.

Full text English translation is available in the on-line version.

Keywords: chirality, symmetry, enantiomers, diastereomers, deracemization, homochirality



Užití tohoto díla se řídí mezinárodní licencí Creative Commons Attribution License 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode.cs>), která umožňuje neomezené využití, distribuci a kopírování díla pomocí jakéhokoliv média, za podmínky řádného uvedení názvu díla, autorů, zdroje a licence.