

CHIRALITA ZNÁMÁ I NEZNÁMÁ (DRUHÁ ČÁST)

Chirality Known
and Unknown
(Part Two)

OPEN ACCESS



JAROMÍR LITERÁK, literak@chemi.muni.cz, Ústav chemie Přírodovědecké fakulty Masarykovy univerzity, Kotlářská 2, Brno.

Abstract

The existence of an object, non-superimposable on its mirror image, constitutes the phenomenon of chirality. This phenomenon is often treated as a curiosity without broader practical consequences. This paper aims to show the significant implications of chirality for chemistry and biology. Chirality is inherent to all living organisms and is essential for their function. For instance, biomolecules are composed of chiral building blocks (amino acids, monosaccharides), which are chiral and occur predominantly with one sense of handedness (homochirality of life). The explanation of the evolution of the homochirality of life therefore helps answer one of the important questions connected with the origin of life. The paper concludes with a section devoted to current Czech stereochemical terminology. An experimental procedure describing the isolation of carvone enantiomers from natural sources is also included.

Klíčová slova

Chiralita, homochiralita života, optická aktivita, stereochemická terminologie, enantiomery karvonu.

Keywords

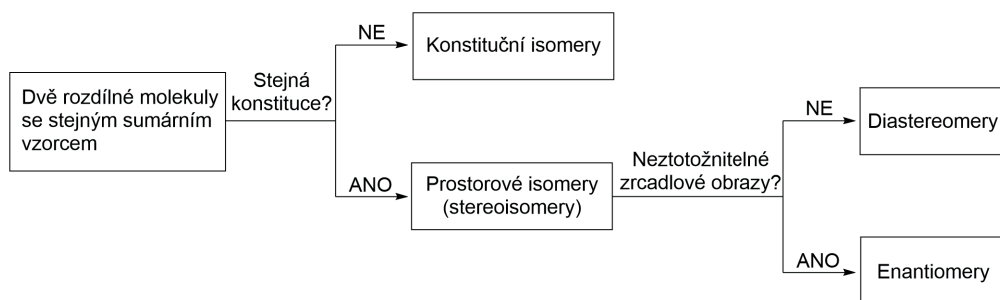
Chirality, homochirality of life, optical activity, stereochemical terminology, carvone enantiomers of carvone.

ÚVOD

Cílem tohoto článku je ukázat širší souvislosti chiralit a její význam pro živé organismy, prezentovat stručnou historii vědeckého poznání chiralit, které se úzce proplétá s rozvojem chemie, a upozornit na současnou českou terminologii. Následující text představuje druhou, závěrečnou část článku. V předchozí části byla definována chiralita a byly ukázány její širší souvislosti s chemií a biologií. V první části byly rovněž nastíněny historické milníky vývoje vědeckého pohledu na chiralitu v oblasti chemie.

VLASTNOSTI ENANTIOMERŮ

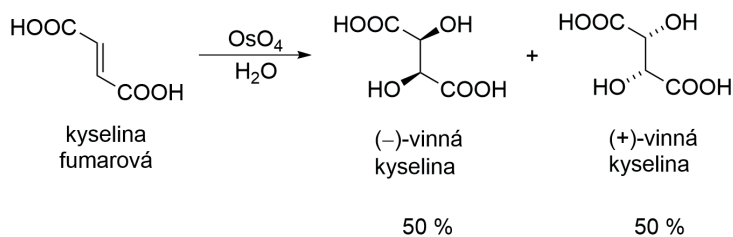
Připomeňme si zavedené dělení isomerů (**obr. 1**). Isomerní molekuly se mohou lišit konstitucí, nebo konstituci mají shodnou a odlišuje je prostorové uspořádání. Prostorové isomery (stereoisomery) se pak dělí na enantiomery a diastereomery. Mezi diastereomery zahrneme všechny prostorové isomery jiné než enantiomery (McMurry, 2007).



Obr. 1 Dělení isomerů a kritéria, podle kterých isomery do jednotlivých skupin zařazujeme.

Obecně konstituční isomery i diastereomery vykazují rozdílné vlastnosti, enantiomery, když zanedbáme nepatrný vliv porušení parity slabé interakce, jsou energeticky rovnocenné a mají stejné vlastnosti (vizte první část článku). Energetická rovnocennost enantiomerů také znamená, že když při reakci z achirálních reaktantů vzniká chirální produkt, vzniká racemát obsahující stejná množství jednoho i druhého enantiomeru. Hnací silou pro vznik racemátu

je obecná tendence k maximalizaci neuspořádanosti systému. Na **obrázku 2** je zachycena syn-dihydroxylace kyseliny fumarové pomocí OsO_4 . Obě výchozí látky jsou achirální, produkt jejich vzájemné reakce již chirální je. Reakce poskytuje oba isomery kyseliny vinné v rovnocenném zastoupení.



Obr. 2 Vznik racemátu kyseliny vinné syn-dihydroxylací kyseliny fumarové pomocí oxidu osmičelého. Oxidační činidlo (OsO_4) může přijít k molekule kyseliny fumarové se stejnou pravděpodobností z horní i spodní strany, proto bude zastoupení obou enantiomerů produktu ve směsi stejné.

Enantiomery jako takové mají stejné vlastnosti. Jednou z vlastností je bezesporu chuť. V roce 1885 italský chemik Arnaldo Piutti opakoval postup Pasteura a využil skutečnosti, že enantiomery aminokyseliny asparagin krystalizuje odděleně ve formě enantiomorfních krystalů, k získání čistých enantiomerů této aminokyseliny. Enantiomery ochutnal a zjistil, že proteinogenní L-asparagin je bez výrazné chuti, kdežto D-asparagin chutná intenzivně sladce (Gal, 2013). Podobně se i řada dalších aminokyselin liší chutí.

Poučka o rozdílných vlastnostech enantiomerů platí pouze v případě, že enantiomery se nacházejí v achirálním prostředí. Zkusme si na pomoc vzít příklad z makroskopického světa. Pokud vyzkoušíme

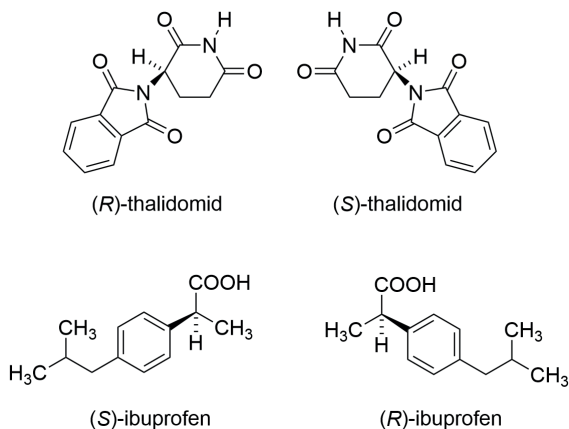
všechny možnosti, jak navléknout levou a pravou rukavici na levou a pravou ruku, získáme čtyři kombinace: levá ruka-levá rukavice, levá ruka-pravá rukavice, pravá ruka-levá rukavice a pravá ruka-pravá rukavice. Ve dvojici levá ruka-levá rukavice a pravá ruka-pravá rukavice bude navlékání fungovat stejně, i když jsou tyto situace svými zrcadlovými obrazy. Podobná bude interakce ve dvojici levá ruka-pravá rukavice a pravá ruka-levá rukavice. Když ale srovnáme navlékání levé a pravé rukavice na jednu ruku, bude jejich interakce s rukou odlišná. Pomocí jedné ruky – chirálního vlivu – můžeme tedy od sebe rozlišit levou a pravou rukavici. Podobně to funguje ve světě molekul. Podstatou rozdílné chuti enantiomerů asparaginu je chiralita receptoru, který přináší informaci o jeho chuti. Receptor je bílkovina

chirální díky svému tvaru v prostoru i přítomnosti pouze jednoho enantiomeru aminokyselin v molekule. Člověk disponuje pouze jedním enantiomerem tohoto receptoru, proto jeho interakce s jedním a druhým enantiomerem bude rozdílná. Komplexy receptoru s jedním a druhým enantiomerem jsou ve vztahu diastereomerů a mají rozdílné vlastnosti. Odpověď receptoru na jeden a druhý enantiomer se tak může lišit.

V přírodě se lze setkat s případy, kdy různé organismy produkují opačné enantiomery jedné látky. Přílohou k tomuto článku je návod na izolaci enantiomerů karvonu, které odlišně (a stále atraktivně) voní a je možné látek použít k demonstraci rozdílných účinků enantiomerů na živé organismy. Jeden enantiomer karvonu je dominantní složkou silice kmínu, druhý enantiomer je hlavní složkou silice máty. Člověk jejich vůni dokáže velmi dobře rozlišit.

Je velmi časté, že enantiomery látky vykazují rozdílné účinky na živé organismy. Velmi důležitým se tento fakt stává v případě léčiv. Jeden enantiomer může být aktivní a druhý nevykazuje požadovanou aktivitu, případně má jiné účinky. Například nesteroidní protizánětlivé léčivo ibuprofen (obr. 3) je výrazně aktivnější ve formě (*S*)-enantiomeru (Ceramella, 2022). Jsou známy i případy, kdy je jeden enantiomer léčivé látky toxický. Klasickým příkladem je látka thalidomid (obchodní název Contergan), která byla na přelomu 50. a 60. let dvacátého století užívána jako sedativum těhotnými ženami. Podání léčiva však vedlo k poškození vývoje končetin rostoucího embrya. Později se ukázalo, že jako sedativum působí (*R*)-enantiomer, kdežto (*S*)-enantiomer je pouze teratogenem (Smith, 2009). Až 56 % všech léků na trhu je chirálních, z toho jen asi 12 % je podáváno ve formě jednoho enantiomeru. Velkou snahou regulátorů a výrobců je zavádět enantiomerně čistá léčiva, aby se omezilo riziko nežádoucích efektů druhého enantiomeru (Ceramella, 2022). Získat jeden

enantiomer látky není snadné. Pokud má při reakci vzniknout většina jednoho enantiomeru, je potřeba opět do reakce vnést chirální vliv, například použitím jednoho enantiomeru chirálního katalyzátoru nebo chirálního činidla. Katalyzátorem s výbornou enantioselektivitou jsou často enzymy. Další možností je oddělit enantiomery z racemátu. Enantiomery necháme zreagovat s jedním enantiomerem určité látky, čímž vzniknou látky, které jsou vůči sobě ve vztahu diastereomerů a je možné je rozdělit, například pomocí chromatografie nebo rekrystalizace, protože se liší svými vlastnostmi. Klasickou metodou, kterou poprvé využil již Pasteur, je frakční krystalizace diastereomerních solí, která je vhodná pro chirální kyseliny nebo báze. Tato metoda je blíže vysvětlena v první části tohoto článku.

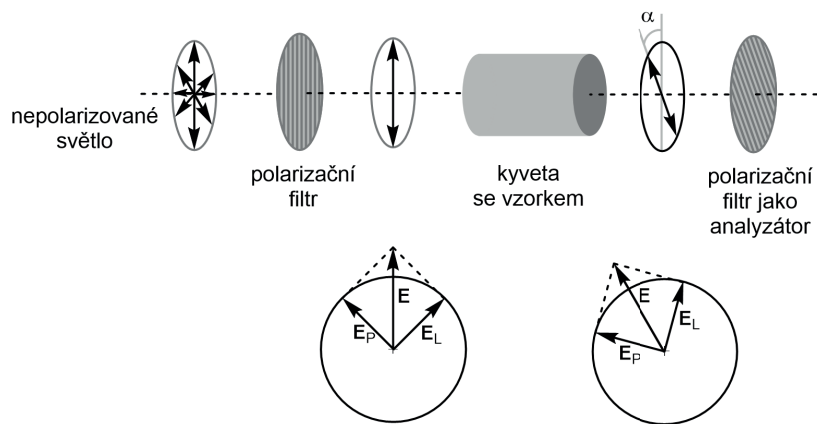


Obr. 3 Enantiomery thalidomidu a ibuprofenu.

OPTICKÁ AKTIVITA CHIRÁLNÍCH LÁTEK

Zajímavá je také otázka, proč enantiomery stáčí rovinu lineárně polarizovaného světla. Průchod lineárně polarizovaného světla prostředím s enantiomerem je velmi obtížné rozpoznat jako chirální vliv, který jinak interaguje s jedním a druhým enantiomerem. Vysvětlení nabídl už v 19. století francouzský fyzik Augustin-Jean Fresnel. Lineárně polarizované záření si můžeme představit jako superpozici dvou cirkulárně polarizovaných záření, která se pohybují stejným směrem, mají stejnou fázi, stejnou amplitudu, ale mají opačný smysl polarizace. Vznik cirkulárně polarizovaného záření je demonstrován na **obrázku 2b** v první části tohoto článku. Levotočivě

a pravotočivě polarizovaná složka světla se prostředím šíří různou fázovou rychlostí, protože jde o interakci enantiomeru s chirálním vlivem, zde představovaným levotočivou nebo pravotočivou šroubovicí. Výsledkem je rozdílný index lomu a odlišná rychlost šíření levotočivě a pravotočivě polarizovaného záření ve zmíněném prostředí s jedním enantiomerem. V důsledku rozdílné rychlosti šíření dojde k rotaci roviny polarizace, jak je ukázáno na **obrázku 4** (Noller, 1947).



Obr. 4 Zjednodušené schéma polarimetru. Průchodem přes polarizační filtr je získáno lineárně polarizované světlo. Elektrickou složku záření, která osciluje v jedné rovině E , si můžeme představit jako výsledek skládání elektrické složky levotočivě a pravotočivě polarizovaného záření o stejné amplitudě a fázi (E_L a E_P v dolní části obrázku). Levotočivě a pravotočivě polarizovaná záření mají v prostředí, kde převládá jeden enantiomer, rozdílné indexy lomu (fázové rychlosti) a tím i jiné vlnové délky. V důsledku toho dojde k fázovému posunu a stočení výsledného vektoru E . Při pohledu směrem ke zdroji světla se jeví, že na obrázku se rovina polarizace E stáčí proti pohybu hodinových ručiček, vzorek je tedy levotočivý (-).

V literatuře i na internetu lze nalézt mnoho návodů na sestavení jednodušších nebo složitějších polarimetrů, které mohou být použity k jednoduché demonstraci jevu optické aktivity, případně i k měření úhlu stočení roviny lineárně polarizovaného světla. Jako zdroje lineárně polarizovaného světla lze využít LCD monitor počítače nebo display chytrého telefonu a jako analyzátoru 3D brýle (Patrick, 2018). K polarizaci světla a k následné analýze lze využít rovněž polarizační filtry používané fotografy (da Camara, 2021), případně komerčně dostupné polarizační folie (Kolář, 2020). Při konstrukci polarimetru může být využit 3D tisk (Bernard, 2020) nebo stavebnice typu Lego (Kvittingen, 2020).

HOMOCHIRALITA ŽIVOTA

Jak již bylo zmíněno, v živých organismech dominují D-sacharidy definované orientací -OH skupiny ve Fischerově projekci na posledním centru chiralidy doprava, a L-aminokyseliny, které při zakreslení konfigurace α -atomu uhlíku do Fischerovy projekce mají -NH₂ skupinu vlevo. V předchozím textu jsme se také snažili ukázat, jak je struktura a funkce živých organismů těsně spojena s chiralitou a se schopností rozlišovat enantiomery a enantiomorfy. Připomeňme si také, že když z achirálních látek vznikají chirální produkty, vzniká stejné množství jednoho i druhého enantiomeru. Vznik homochiralidy, tedy jak z achirálních látek mohl vzniknout homochirální život, je tak jednou z prominentních otázek, které musejí být položeny při zkoumání mechanismů vzniku života.

Teorie původu homochiralidy lze rozdělit do dvou skupin. V první skupině najdeme mechanismy abiotické, které předpokládají, že vznik stavebních kamenů života s nerovnoměrným zastoupením enantiomerů předcházela vzniku života a že život se vyvinul z těchto neracemických stavebních

kamenů. Byla navržena řada mechanismů, jak k této preferenční tvorbě jednoho enantiomeru mohlo dojít. Jsou například známy anorganické látky, které krystalují ve formě enantiomorfních krystalů (například již v textu zmiňovaný křemen – SiO₂, **obrázek 3a** v první části článku). Stavební kameny života mohly vzniknout na povrchu jednoho enantiomorfu krystalu, který představoval chirální vliv. Vznik jednoho nebo druhého enantiomorfu krystalu u achirálních látek je náhodný, jednou vzniklý krystal však může sloužit jako zárodek tvorby dalších krystalů, takže v krystalizující směsi mohou převládnout krystaly jen jednoho enantiomorfu, případně může být preference pro tvorbu jednoho krystalu způsobena vnějším chirálním fyzikálním vlivem. Příkladem může být krystalizace NaClO₃ z vodného roztoku. Nerušená krystalizace poskytuje směs obou enantiomorfů krystalu v podobném zastoupení, při míchání, kdy se prvotní krystal může rozrušit a díky míchání se takto vzniklé zárodky krystalizace roznesou do zbytku roztoku, je pozorována téměř výhradní tvorba jednoho enantiomorfu. Zajímavý byl experiment, při kterém byla sledována krystalizace NaClO₃ z roztoku, který byl bombardován polarizovaným β -zářením. Toto záření představovalo vnější chirální vliv. Během experimentu bylo pozorováno, že vystavení roztoku tomuto záření vede opakovaně k přednostní tvorbě jednoho enantiomorfu krystalů (Mahurin, 2001). Další možností mohla být tzv. absolutní asymetrická syntéza, kdy chirálním vlivem je fyzikální pole nebo kombinace polí. Je například známo, že neutronové hvězdy jsou zdrojem cirkulárně polarizovaného světla (Sallembien, 2022). Z pozemských experimentů vyplývá, že fotochemickým rozkladem aminokyselin pomocí cirkulárně polarizovaného UV záření dochází k přednostní degradaci jednoho jejich enantiomeru (Sharma, 2022). Skutečně v některých meteoritech se podařilo identifikovat α -aminokyseliny extraterestriálního původu vykazující malý nadbytek L-enantiomerů (Barron, 2008).

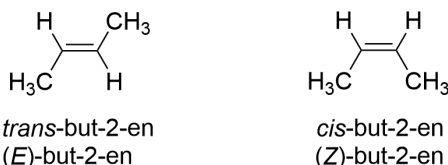
Druhou skupinu vysvětlení původu homochiralita spojuje předpoklad, že nejdříve vznikly živé organismy a až následně došlo k preferenci jednoho enantiomeru aminokyselin a monosacharidů. Bohužel tuto hypotézu je obtížné prokázat nebo vyvrátit experimentálně (Weissbuch, 2011).

Uvedené příklady ukazují jen velmi úzký výsek rozmanitých navržených scénářů a experimentů, které mohou být relevantní pro vysvětlení původu homochiralita života. Zájemci o toto téma si mohou přečíst souhrnný článek (Sallembien, 2022).

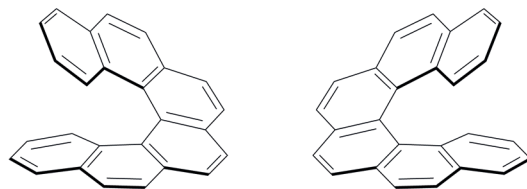
TERMINOLOGIE VE STEREOCHEMII

Enantiomery jsou skupinou prostorových isomerů. Při popisu stereoisomerů se užívají termíny, které je vhodné zavést nebo si definovat jejich význam. V molekulách prostorových isomerů můžeme často identifikovat část molekuly, která umožňuje existenci prostorových isomerů. Tato část molekuly se označuje jako tzv. stereogenní centrum. Stereogenní centrum nese čtyři ligandy (atomy nebo skupiny atomů). Pokud mezi sebou vyměníme dva ligandy připojené k jednomu atomu, získáme jiný prostorový isomer (Eliel, 1994). Na **obrázku 5** vidíme *cis*- a *trans*-but-2-en. Tyto molekuly jsou ve vztahu prostorových isomerů. Podle dělení uvedeného na **obrázku 1** jednoduše určíme, že jsou ve vztahu diastereomerů.¹ Existenci prostorových isomerů but-2-enu umožňuje přítomnost dvojné vazby v molekule, dvojná vazba je tedy v tomto případě stereogenním centrem. Výměnou atomu vodíku a methylové skupiny na jednom atomu uhlíku dvojné vazby získáme jiný prostorový isomer. Přítomnost stereogenního cen-

tra implikuje existenci prostorových isomerů, existují ale molekuly, které existují ve formě prostorových isomerů, přestože neobsahují stereogenní centrum. Jako příklad mohou sloužit enantiomery hexahelicenu na **obrázku 6**, který je chirální díky šroubovicové stavbě celé molekuly.



Obr. 5 Prostorové isomery but-2-enu. Stereogenní centrum můžeme v této látce ztotožnit s dvojnou vazbou.



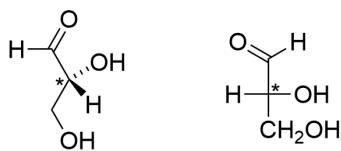
Obr. 6 Enantiomery hexahelicenu. V molekule hexahelicenu nelze najít stereogenní centrum, přesto molekula tvoří prostorové isomery (enantiomery) díky šroubovicové stavbě celé molekuly.

Stereogenním centrem v molekule glyceraldehydu je druhý atom uhlíku v řetězci, který nese čtyři různé substituenty. Tento atom je na **obrázku 7** označen hvězdičkou. Pro tento druh stereogenního centra zavedl van't Hoff označení asymetrický uhlík, které se používá dodnes. Asymetrický atom uhlíku je jedním příkladem tzv. centra chiralita (chirálního centra). Odborná definice centra chiralita zní, že se jedná o atom, který je díky prostorovému uspořádání li-

¹ V textu uváděná klasifikace je obecná. Pro označení existence prostorových isomerů vyplývající z přítomnosti vhodně substituované dvojné vazby se také často používá termín *cis/trans* isomerie, případně *E/Z* isomerie. Termín geometrická isomerie označuje IUPAC jako zastaralý a jeho další používání nedoporučuje („Geometric isomerism“, 1997).

gandů, které jej obklopují, neztotožnitelný se svým zrcadlovým obrazem („Chirality centre“, 1997). Definice přesně nespecifikuje, jak musejí být ligandy v prostoru rozloženy, ale na půdě organické chemie se typicky setkáme s tetraedrickou koordinací typickou například pro sp^3 hybridizovaný atom uhlíku.

Při označování atomu, který je centrem chiralidy, panuje v našem prostředí zmatek. Český překlad učebnice organické chemie od McMurryho uvádí termín asymetrický uhlík jako zastaralý a doporučuje dále používat jen označení centrum chiralidy (McMurry, 2007). V literatuře (a školní praxi) se hojně potkáme také s označením chirální atom uhlíku, což je termín jednoznačně chybný, protože přídatné jméno chirální by mělo být v souladu s doporučením IUPAC používáno pro označení vlastnosti celé molekuly, nikoliv její části („Chiral“, 1997).



(+)-glyceraldehyd

Obr. 7 Jeden enantiomer glyceraldehydu. Stereogenním centrem (centrem chiralidy) je atom uhlíku označený hvězdičkou. Konfigurace stereogenního centra je znázorněna pomocí klínkového vzorce a Fischerovy projekce.

Rozdílného tvaru molekuly v prostoru můžeme dosáhnout konformačním pohybem (rotací kolem σ -vazby) nebo změnou konfigurace. Konfigurace je tedy určitý rys v prostorovém uspořádání molekuly,

který odlišuje prostorové isomery a který se nemění v důsledku konformačního pohybu („Configuration (stereochemical)“, 1997). Na **obrázku 5** jsou zachyceny dva prostorové isomery molekuly but-2-enu. V každé z těchto molekul může docházet k rotaci kolem σ -vazeb uhlík-uhlík, které spojují první a druhý a také třetí a čtvrtý atom uhlíku v řetězci. Touto rotací můžeme odvodit mnoho různých uspořádání molekuly v prostoru, různých konformací. Naprostá většina konformací je nestabilních, konformace také mezi sebou konformačním pohybem rychle přecházejí. Naopak mezi atomy uhlíku číslo 2 a 3 k rotaci díky existenci dvojné vazby docházet nemůže. Atomy vodíku a methylové skupiny na atomech dvojné vazby tak jsou drženy ve dvou možných prostorových uspořádáních (*cis* a *trans*), které nelze konformačním pohybem změnit. Toto uspořádání na dvojné vazbě pak v tomto případě označíme za konfiguraci.

Pro popis konfigurace se používají tzv. deskriptory. V případě isomerů but-2-enu na **obrázku 5** jsme pro označení konfigurace dvojné vazby použili deskriptory *cis* a *trans*, mohli bychom také použít obecnější deskriptory *E* a *Z*. K popisu absolutní konfigurace (tedy skutečného rozložení ligandů v prostoru) centra chiralidy se užívají deskriptory *R* a *S*. Odvození a pravidla použití těchto stereochemických deskriptorů lze nalézt v mnoha učebnicích organické chemie. V literatuře se ovšem setkáme i s tím, že konfigurace enantiomeru je popsána deskriptory *D* a *L*.² Jedná se o deskriptory zavedené Fischerem a Rosanoffem na začátku 20. století, jejichž použití je v současné době omezeno jen na α -aminokyseliny a monosacharidy, případně vzácně i na látky od nich odvozené. Nejedná se tudíž o obecně použitelné deskriptory konfigurace centra chiralidy (Eliel, 1994).

² Deskriptory *D* a *L* se uvádějí jako kapitálky, což je řez písma, u kterého má písmeno tvar majuskule („velkého písmena“), ale velikost minuskul („malých písmen“). V nápovědě konkrétního textového procesoru lze obvykle najít, jak kapitálky napsat.

Termíny chiralita a enantiomorf poprvé použil roku 1884 v poznámce ke své přednášce na Johns Hopkins University Lord Kelvin (publikována byla ovšem až v roce 1904). V chemii chiralita pevně zakořenila až v šedesátých letech 20. století, zvláště zásluhou Kurta Mislowa a jeho učebnice *Introduction to Stereochemistry* (Cintas, 2007). Z nástinu historického vývoje náhledu na chiralitu vyplynulo, že chiralita je v říši molekul těsně spojena s jevem optické aktivity. Proto nepřekvapuje, že dlouhou dobu byla existence prostorových isomerů, které se liší optickou aktivitou, označována jako optická isomerie. Enantiomery byly pak označovány jako optické an-

tipody. Optický antipod však nemůže být brán jako synonymum slova enantiomer. Například se nepodařilo experimentálně prokázat optickou aktivitu enantiomerů 4-ethyl-4-methyloktanu (Wynberg, 1974). V současné době IUPAC považuje termíny optická isomerie a optické isomery/antipody za zastaralé a nedoporučuje jejich další používání („Optical antipodes“, 1997; „Optical isomers“, 1997).

Literatura

- Barron, L. D. (2008). Chirality and Life. *Space Science Reviews*, 135(2008), 187. <https://doi.org/10.1007/s11214-007-9254-7>
- Bernard, P., & Mendez, J. D. (2020). Low-Cost 3D-Printed Polarimeter. *Journal of Chemical Education*, 97(4), 1162. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.9b01083>
- Ceramella, J., Iacopetta, D., Franchini, A., De Luca, M., Saturnino, C., Andreu, I., Sinicropi, M. S., & Catalano, A. (2022). A Look at the Importance of Chirality in Drug Activity: Some Significant Examples. *Applied Sciences*, 12(21), 10909. <https://doi.org/10.3390/app122110909>
- Cintas, P. (2007). Tracing the Origins and Evolution of Chirality and Handness in Chemical Language. *Angewandte Chemie, International Edition*, 46(22), 4016. <https://doi.org/10.1002/anie.200603714>
- Configuration (stereochemical) (1997). In *IUPAC. Compendium of Chemical Terminology, 2nd ed. (the „Gold Book“)*. 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. Získáno z <https://goldbook.iupac.org/terms/view/C01249>
- Da Camara, C. A. G. (2021). Construction of a Low-Cost Polarimeter for Educational Purposes. *Química Nova*, 44(3), 361. <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170661>
- Eliel, E. L., Wilen S. H., & Mander, L. N. (1994). *Stereochemistry of Organic Compounds*. Hoboken: Wiley.
- Gal, J. (2013). Molecular Chirality in Chemistry and Biology: Historical Milestones. *Helvetica Chimica Acta*, 96(9), 1617. <https://doi.org/10.1002/hlca.201300300>
- Geometric isomerism (1997). In *IUPAC. Compendium of Chemical Terminology, 2nd ed. (the „Gold Book“)*. 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. Získáno z <https://goldbook.iupac.org/terms/view/G02620>
- Chiral. In *IUPAC. Compendium of Chemical Terminology, 2nd ed. (the „Gold Book“)*. 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. Získáno z <https://goldbook.iupac.org/terms/view/C01057>
- Kolář, J. (2020). Pokusy do školy: Vyrobt si polarimetr. In *Pokusy na doma i do školy. Ústav experimentální botaniky AV ČR, v. v. i.* Získáno z <http://www.ueb.cas.cz/cs/content/vyrobt-si-polarimetr>

- Kvittingen, L., & Sjursnes, B. J. (2020). Demonstrating Basic Properties and Application of Polarimetry Using a Self-Constructed Polarimeter. *Journal of Chemical Education*, 97(8), 2196. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.9b00763>
- Mahurin, S., McGinnis, M., Bogard, J. S., Hulett, L. D., Pagni, R. M., & Compton, R. N. (2001). Effect of beta radiation on the crystallization of sodium chlorate from water: A new type of asymmetric synthesis. *Chirality*, 13(10), 636. <https://doi.org/10.1002/chir.10007>
- McMurry, J. (2007). *Organická chemie* (1. vyd.). Brno: Nakladatelství VUTIUM.
- Noller, C. R. (1947). Models illustrating the principles of optical activity. *Journal of Chemical Education*, 24(12), 600. <https://doi.org/10.1021/ed024p600>
- Optical antipodes (1997). In IUPAC. *Compendium of Chemical Terminology, 2nd ed. (the „Gold Book“)*. 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. Získáno z <https://goldbook.iupac.org/terms/view/O04304>
- Optical isomers (1997). In IUPAC. *Compendium of Chemical Terminology, 2nd ed. (the „Gold Book“)*. 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. Získáno z <https://goldbook.iupac.org/terms/view/O04308>
- Sallembien, Q., Bouteiller, L., Crassous, J., & Raynal, M. (2022). Possible chemical and physical scenarios towards biological homochirality. *Chemical Society Reviews*, 51(9), 3436. <https://doi.org/10.1039/D1CS01179K>
- Sharma, A. (2022). Enantiomeric excess of amino acids in interstellar ice analogues-asymmetric photolysis of precursors by circularly polarized UV light. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 517(4), 6112. <https://doi.org/10.1093/mnras/stac2718>
- Smith, S. W. (2009). Chiral Toxicology: It's the Same Thing... Only Different. *Toxicological Sciences*, 110(1), 4. <https://doi.org/10.1093/toxsci/kfp097>
- Thomson, P. I. T. (2018). Is That a Polarimeter in Your Pocket? A Zero-Cost, Technology-Enabled Demonstration of Optical Rotation. *Journal of Chemical Education*, 95(5), 837. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.7b00767>
- Weissbuch, I., & Lahav, M. (2011). Crystalline Architectures as Templates of Relevance to the Origins of Homochirality. *Chemical Reviews*, 111(5), 3236. <https://doi.org/10.1021/cr1002479>
- Wynberg, H., & Hulshof, L. A. (1974). Optical activity of some hydrocarbons. *Tetrahedron*, 30(13), 1775. [https://doi.org/10.1016/S0040-4020\(01\)97312-0](https://doi.org/10.1016/S0040-4020(01)97312-0)