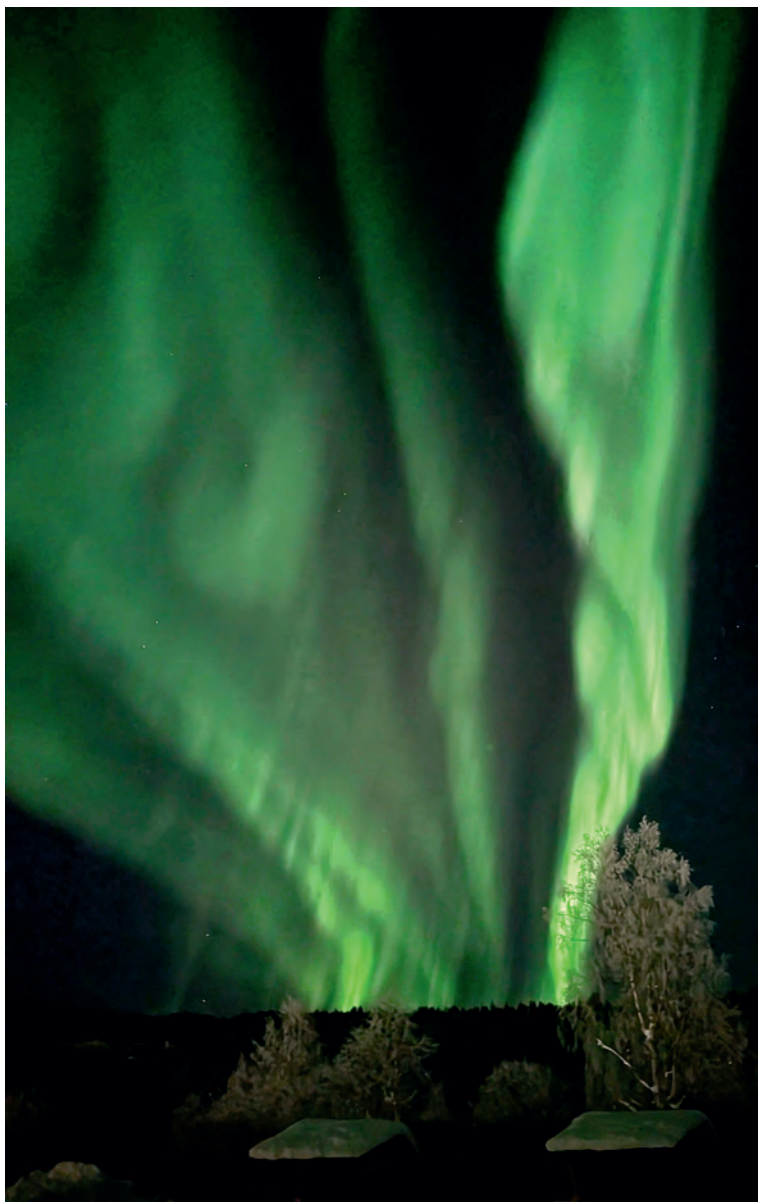
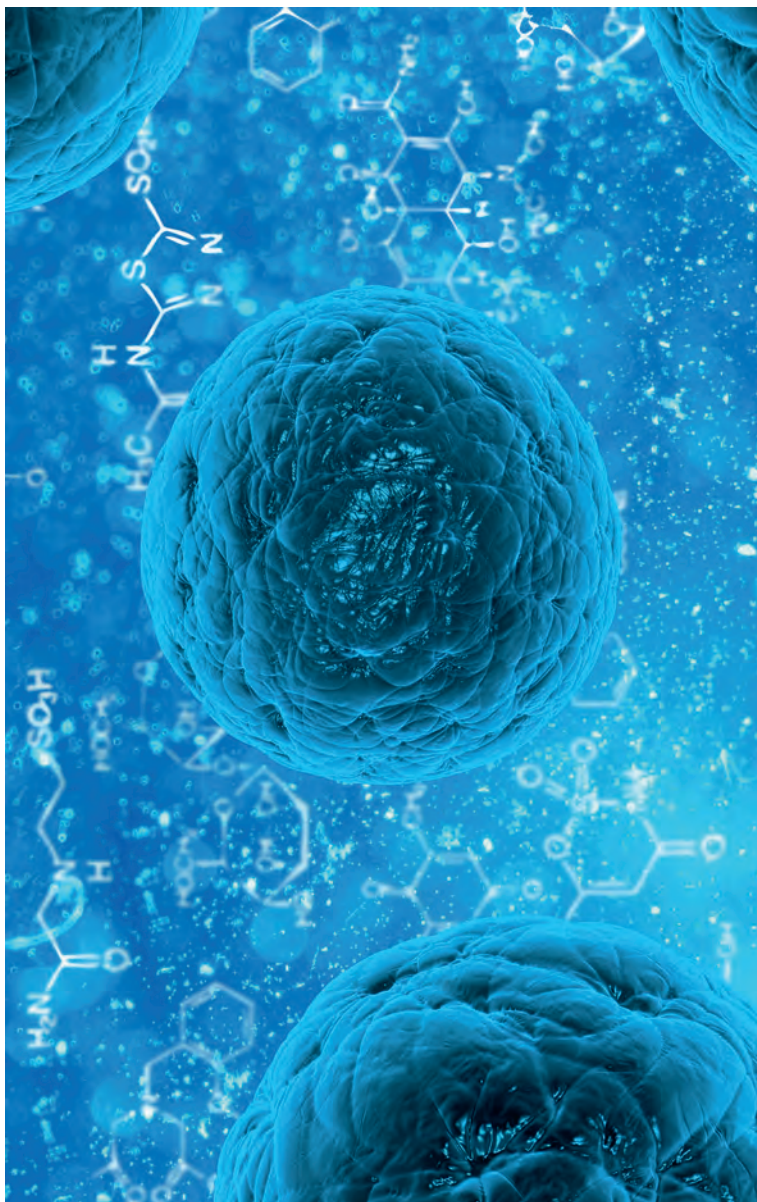


Obr. 15: Nahoře: Snímek Sluneční protuberance na vlnové délce 17 nm. Svit elektronů kopíruje magnetické siločáry. Dole: Rekonstrukce magnetických siločar ze snímku Slunce pořízeném na vlnových délkách 21 a 19 nm. Zdroj: SDO/AIA.



Obr. 16: Polární záře pozorovaná v severním Norsku při expedici Aurora 2026. Jde o typické čárové spektrum. Zelená barva je způsobena přechody v atomárním obalu kyslíku, který je excitován elektrony ze slunečního větru. Zdroj; Aldebaran.



Obr. 17: Vizualizace vztahu života a termodynamiky. Chemické vzorce v pozadí symbolizují organické molekuly, z nichž vznikly buňky v popředí v prostředí daleko od termodynamické rovnováhy. Zdroj: Science and Culture, Public Domain CC0.

11. Živé organizmy

*Nic v životě není jisté, kromě smrti, daní
a druhého termodynamického zákona.*

Seth Lloyd, americký strojní inženýr

Jednoho krásného rána jsem na levém lokti objevil temně rudou skvrnu o průměru asi centimetr. Nijak se sice neprojevovala, nesvědila ani nebolela, ale přece jen, pokud tam dřív nebyla, tak na loket nepatří. S obavami o své zdraví jsem začal skvrnu bedlivě sledovat. Ony se sice tradují různé zvěsti o chlapské rýmičce, ale taková skvrna, to je přímo hmatatelný důkaz podlomeného zdraví. Po několika dnech se skvrna zvětšila do velikosti pětikoruny. Podlehl jsem panice a v noci se probouzel zbrocený potem ze snů, v nichž skvrna rostla a rostla, až jsem se stal nevzhledným rudokožcem. Kvůli svému zdraví jsem ochoten občas zajít pro radu i k doktorem. S velkými obavami o svůj další osud jsem vyrazil za vyhlášenou kožní lékařkou.

Od mého rozhodnutí rázně s rostoucí skvrnou zatočit mě neodradila ani fronta pacientů v čekárně. Paní doktorka mě vyslechla, vytáhla ze stolku lupu a jala se skvrnu zkoumat. Za nesouhlasného pobrukování se na mě nakonec obrátila a vážně prohlásila, že tady je věda bezmocná. Okamžitě jsem podlehl panice a nasadil ztrápený výraz pacienta, který se právě dozvěděl, že v nejbližších minutách zemře. Paní doktorka mně ale vysvětlila, jak to myslí. Prý jde o pigmentovou skvrnu, s níž se nedá dělat vůbec nic a musím se s ní naučit žít.

Okamžitě jsem začal odporovat a vysvětlil paní doktorce, že skvrna značně rychle roste, každým dnem je větší a větší, z trpaslíka se stává obrem a že mám značné obavy, aby mě skvrna celého nepohltila. Paní doktorka nasadila ještě chmurnější výraz a pronesla: „Víte, taková skvrna může růst, může stagnovat a nebo se dokonce může

zmenšovat.“ Po tomto vyčerpávajícím rozboru mně v ordinaci před očima proběhl jednorozec v říji. Strašidelný výjev doprovázený troubením jen dokresloval můj nestabilní niterný stav.

Doma jsem ihned z internetu objednal zaručeně fungující mastičky, výtažky z nejrůznějších bylin a mnoho vitaminů nejasného původu. Založil jsem si deníček, do něhož jsem několikrát denně zapisoval údaje o rostoucí skvrně. Třeba bude deníček po mé smrti užitečný lidem, kteří onemocní podobně neléčitelnou, a proto strašlivou chorobou. Po několika dnech se začaly dít divné věci. Skvrna sice nadále zvětšovala svůj průměr, ale začala blednout. Její okraje postupně splývaly s okolím a po několika dalších dnech už nebylo možné rozměr skvrny spolehlivě zjistit. Nakonec se skvrna rozplynula a já se namísto rudokožce stal opět bledokožcem.

Na celém příběhu je zajímavé to, že ani specializovaná a vyhlášená lékařka nebyla schopná skutečný osud skvrny předpovědět. Živé organizmy jsou natolik složitou záležitostí, že popis jejich vývoje v lidské terminologii často selhává. V nadcházející kapitole se budeme věnovat chování živých struktur z hlediska termodynamiky, která se vine jako pojítko napříč celou touto knížkou.

Termodynamika a život

V poslední kapitole jsme se postupně vzdalovali od termodynamické rovnováhy. Nejprve jsme se seznámili s termodynamickou rovnováhou samotnou, poté jsme prozkoumali stavy v blízkosti termodynamické rovnováhy způsobující ustálené toky popsané Onsagerovými relacemi reciprocity. Nakonec jsme se věnovali stavům dosti vzdáleným od termodynamické rovnováhy, které vedou ke vzniku Prigožinových disipativních struktur. A právě takovou disipativní strukturou je jakýkoli živý organizmus.

Termodynamika hraje v živých organizmech klíčovou roli, termodynamické zákony určují pravidla, kterými se řídí veškeré metabolické procesy a fungování buněk. Organizmy získávají energii i stavební materiál z vnějšího prostředí, v žádném případě tedy

nejde o uzavřené systémy, pro něž by měla entropie a spolu s ní chaos v systému narůstat. Je to přesně naopak. S příjmem energie z okolí se pojí vznik vysoce organizovaných celků, které nejsou ničím jiným než Onsagerovými disipativními strukturami. V živém organismu proto entropie naopak klesá, z chaosu se rodí řád. Je to za cenu růstu entropie v okolí organismu. Rakouský fyzik Erwin Schrödinger, jeden z otců kvantové teorie, dokonce zavedl pojem *negentropie* – ve své knize „Co je život“ představuje živé organizmy jako požírače entropie. Popisuje, jak do nich z okolí vtéká záporná entropie neboli negetropie, která v nich zvyšuje uspořádání. Samozřejmě, že je jen otázkou volby popisu a úhlu pohledu, zda organismus předává chaos (entropii) do okolí, nebo zda do něho z okolí s trochou nadsázky a ironie vtéká pořádek, tedy záporná entropie.

Pro život je charakteristické, že je vždy daleko od termodynamické rovnováhy a v takovém prostředí snad i vznikl. Proto mnoho vědců uvažuje o prvopočátku života v hlubinách moře, kde se nacházejí tzv. *černí kuřáci*, hydrotermální skalní prúduchy ohříváné magmatem z podloží, v nichž je obrovský spád teploty i chemického složení. Právě v takovém prostředí, velmi daleko od termodynamické rovnováhy, jsou podmínky, které Prigožin požaduje pro vznik disipativních struktur, tj. složitých celků, pro něž je typická samoorganizace. Je třeba ale zároveň přiznat, že vznik života je pro současnou vědu nevysvětleným fenoménem. V obřích mlhovinách v hlubinách vesmíru se nachází řada organických molekul, ale způsob jejich přeměny v žijící organizmy je nejasný. Samotná přítomnost organických molekul ve vesmíru žádným tajemstvím není. Ve vesmíru se nejvíce vyskytuje vodík, helium, kyslík, neon, uhlík a dusík. Vodík a helium zde byly od počátku, jádra ostatních prvků vznikala ve hvězdách. Pomineme-li helium s neonem, neboť se jen velmi obtížně slučují s ostatními prvky (mají zaplněné elektronové slupky), zbývá vodík, uhlík, kyslík a dusík. Právě tyto prvky tvoří molekuly, kterým říkáme organické.

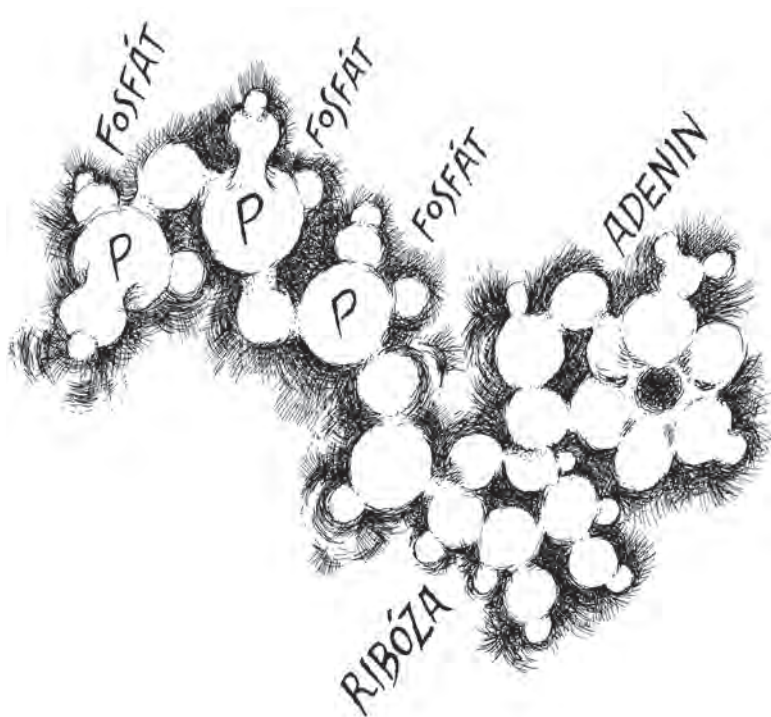
Samotný Prigožin považuje vznik vysoce organizovaných struktur ze základních organických molekul za zcela přirozený důsledek existence fluktuací, které se v prostředí daleko od rovnováhy díky

nelineárním procesům zesilují a přeměňují ve stabilnější uspořádání. Mělo by docházet k *autokatalýze*, tj. k procesu, v němž produkty reakce urychlují svůj vlastní vznik. Prigožinova teorie překlenuje mezeru mezi chemií popisující neživé systémy a biologií věnující se živým organismům. Předpokládá, že vznik složitých makromolekul a následně života není statisticky nemožnou náhodou, ale pravděpodobným výsledkem vývoje nestabilních chemických systémů. K tomu by měly postačit jen tři podmínky: 1) existence nelineárních procesů s kladnou zpětnou vazbou; 2) prostředí daleko od termodynamické rovnováhy s neustálou výměnou energie a částic s okolím; 3) spontánní vznik společného chování struktur (samoorganizace).

Ano, tak nějak by snad mohlo ke vzniku života z náhodných fluktuací dojít. Stále jde ale o mechanismus, který funguje v neživé přírodě a není jasné, zda byl opravdu spouštěcím mechanismem pro vznik prvních živých organismů na Zemi (viz obrázek 17 barevné přílohy). Stále je totiž ve hře i představa, že byl na Zemi život zanesen z jiných částí vesmíru, například spolu s kometami, jejichž látka na Zemi hojně dopadala v období před 4,1 až 3,8 miliardami let – jde o tzv. *pozdní velké bombardování*. První nezvratné důkazy o životě na Zemi (mikrobiální fosilie) pocházejí z doby před přibližně 3,5 až 3,8 miliardami let, což těsně navazuje na konec tohoto bombardování. Představa o zanesení života z okolního vesmíru problém jeho vzniku nijak neřeší, jen ho odsouvá dále od Země a do vzdálenější minulosti. V této kapitole se vznikem života samotného zabývat nebudeme. Budeme se věnovat zajímavým procesům probíhajícím v živých organizmech, které jsou beze zbytku řízeny termodynamickými zákony.

Energetické toky

Všechny organizmy vyměňují energii s vnějším prostředím, a to ve shodě s termodynamickými zákony. Termodynamika umožňuje popsat, jak organizmy získávají, přeměňují a využívají energii. Podle prvního termodynamického zákona energie v organizmech nevzniká ani nezaniká. Pouze se přeměňuje z jedné formy na druhou. Podle druhého termodynamického zákona vykazují organizmy



Adenosintrifosfát (ATP), základní úložiště energie v žijících organizmech

vysokou míru uspořádanosti díky tomu, že z okolí čerpají energii a převádějí do něj odpadní teplo a nepotřebné produkty reakcí, čímž zvyšují chaos ve vnějším prostředí.

Základní energetickou jednotkou organismů – rostlin i živočichů – je molekula ATP, které se s trochou nadsázky někdy říká energetické platidlo organismů. ATP je zkratkou ze slova *adenosintrifosfát*. Tato organická molekula je složena ze třech částí: adeninu, který tvoří základní kostru složenou z atomů dusíku a uhlíku, ribózy (cukru složeného z pěti uhlíků) a tří fosfátových skupin, v nichž vazby molekul fosforu s periferním kyslíkem akumulují energii pro další potřeby organismů. Energii lze z ATP velmi snadno získat za pomoci obyčejných vodních molekul, hovoříme o hydrolýze ATP.

Vodní molekuly oddělí z ATP jednu fosfátovou skupinu. Vznikne adenosindifosfát (ADP) obsahující jen dvě fosfátové skupiny. Přitom se uvolní potřebná energie. Molekulu ADP lze opětovně nabít energií, tj. připojit zpět fosfátovou skupinu a do chemických vazeb uložit další energii.

Věnujme se nejprve živočichům, k nimž patříme i my, lidé. Dvěma klíčovými činnostmi pro získávání a zpracování energie jsou příjem potravy a dýchání. S potravou se do těl živočichů dostávají důležité zdroje energie – cukry, tuky a bílkoviny. Jejich energie se přeměňuje na energii vazeb ATP v mitochondriích, specializovaných buněčných orgánech (tzv. organelách). Mitochondrie se nacházejí všude tam, kde je v těle energie zapotřebí. Nalezneme je ve svalcích, v játrech, v mozku, ale i ve spermích, kde jich je nejvíce v bičíku, který potřebuje energii k zajištění pohybu spermie. Nejvíce mitochondrií obsahuje srdeční sval, jehož fungování je energeticky nejnáročnější. V jediné buňce srdečního svalu je přibližně 5 000 až 8 000 mitochondrií.

Servisním procesem pro ukládání energie do ATP je dýchání. Plíce jen vyměňují plyny, na energetických procesech se nepodílejí. Z vnějšího prostředí přijímají kyslík a akumulují ho v plicních sklípcích. Z nich se jejich stěnami kyslík dostává do krevních kapilár. V krvi je navázán uvnitř červených krvinek na červené krevní barvivo nazývané hemoglobin a okysličenou krví je dopravován k cílovým tkáním. Kyslík se z hemoglobinu uvolní a difúzí se dostane až k mitochondriím. V nich dochází k tzv. buněčnému dýchání. Kyslík se váže na molekuly živin a přitom dochází k uložení jejich energie do molekul ATP. Odpadním produktem vznikajícím při rozkladu živin je oxid uhličitý CO_2 , který difunduje do krevního řečiště a je červenými krvinkami dopravován do plicních sklípků, z nichž tento plyn vydechujeme.

Z jedné jediné molekuly glukózy, jednoduchého cukru, lze v mitochondriích připravit zhruba 30 molekul ATP s akumulovanou energií pro další využití. Celý proces vnějšího dýchání (v plicích) a vnitřního dýchání (v tkáních) lze zjednodušeně popsat rovnicí,

v níž na vstupu je molekula cukru a šest molekul kyslíku a na výstupu je šest molekul oxidu uhličitého, šest molekul vody a energie uložená v chemických vazbách molekul ATP. Vdechujeme kyslík a vydechujeme oxid uhličitý a vodní páru. Přeměna energie do vazeb ATP má omezenou účinnost danou termodynamickými zákony. Zhruba 60 % původní energie se mění na nevyužitě odpadní teplo, kterého se organismus zbavuje.

A jak probíhá energetická výměna s okolím v rostlinách? Rostliny získávají energii především ze slunečního záření. Z dopadajícího světla využijí jen několik procent energie. Celému procesu, který lze rozdělit do dvou fází, říkáme *fotosyntéza*. První fáze probíhá vždy za přítomnosti světla, a to ve specializovaných organelách, kterým říkáme chloroplasty. Jejich součástí je zelené barvivo chlorofyl, které dává rostlinám jejich charakteristickou barvu. Nejvíce chloroplastů je v listech. Za přítomnosti světla dochází ke štěpení molekul vody a energetickému nabití molekul ATP. Současně se energií nabíjejí i další molekuly označované NADPH (nikotinamid-adenin-dinukleotid-fosfát). Kyslík vzniklý při štěpení molekuly vody je v tomto případě odpadním plynem, který ovšem ke svému životu naopak potřebuje většina organismů z živočišné říše. Druhá fáze fotosyntézy není na přítomnosti světla závislá. Energie uložená v ATP a NADPH se využívá k přeměně oxidu uhličitého na glukózu, na transport živin a na zabudovávání uhlíku do rostlinné tkáně, což umožňuje rostlině růst.

Podobně jako u živočichů lze i rostlinnou výměnu energie popsat zjednodušenou rovnicí: na vstupu je světlo, 6 molekul vody a 6 molekul oxidu uhličitého. Na výstupu je glukóza a šest molekul kyslíku. Z následující tabulky je dobře patrné, jak se v přírodě energetické cykly živočichů a rostlin vzájemně doplňují.

| organismus | vstup | výstup |
|------------|--|---|
| živočich | $6 \text{ O}_2 + \text{glukóza}$ | $6 \text{ CO}_2 + 6 \text{ H}_2\text{O} + \text{ATP}$ |
| rostlina | $\text{světlo} + 6 \text{ H}_2\text{O} + 6 \text{ CO}_2$ | $\text{glukóza} + 6 \text{ O}_2$ |