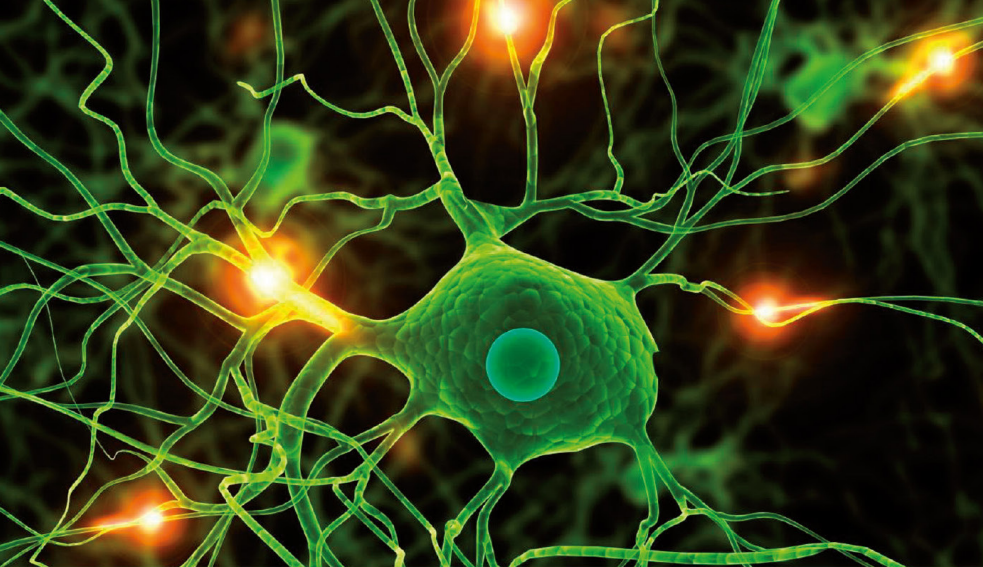




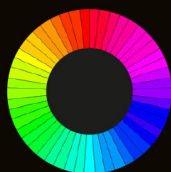
Jim Al-Khalili

Johnjoe McFadden

Život na hraně

Nadcházející věk
kvantové biologie

VYŠEHRAĐ



Život na hraně

Vyšlo také v tištěné verzi

Objednat můžete na
www.ivysehrad.cz
www.albatrosmedia.cz



Jim Al-Khalili, Johnjoe McFadden

Život na hraně – e-kniha
Copyright © Albatros Media a. s., 2019

Všechna práva vyhrazena.
Žádná část této publikace nesmí být rozšiřována
bez písemného souhlasu majitelů práv.


ALBATROS MEDIA



Jim Al-Khalili

Johnjoe McFadden

Život na hraně

Nadcházející věk
kvantové biologie

Jim Al-Khalili

Johnjoe McFadden

Život na hraně

Nadcházející věk

kvantové biologie

VYŠEHRA D

Copyright © 2014 by Jim Al-Khalili and Johnjoe MacFadden
Translation © Václav Šolc, 2019

ISBN tištěné verze 978-80-7429-985-8

ISBN e-knihy 978-80-7601-235-6 (1. zveřejnění, 2019)

Obsah

1. Úvod	9
2. Co je to život?	33
3. Motory života	69
4. Kvantový rytmus	112
5. Nemo hledá cestu domů	147
6. Motýl, octomilka a kvantová červenka	181
7. Kvantové geny	212
8. Mysl	247
9. Jak vznikl život	282
10. Kvantová biologie: život na okraji bouře	306
Epilog: Kvantový život	342
Poznámky 345	
Poděkování 355	
Jmenný rejstřík 359	

Kapitola 1

Úvod

Zimní mrazy přišly toho roku do Evropy brzy a večerním vzduchem proniká chlad. Hluboko v mysli mladé červenky počíná nabývat na síle neurčitý pocit cílevědomosti a odhodlání.

Posledních několik týdnů spořádala daleko víc hmyzu, pavouků, červů a bobulí než obvykle, a teď váží skoro dvakrát tolik než v srpnu, kdy její mláďata opustila hnízdo. Mohou za to zásoby tuku, který bude potřebovat jako palivo během namáhavé cesty, na niž se chystá vydat.

Bude to její první stěhování ze smrkového lesa ve středním Švédsku, kde strávila celý svůj krátký život a kde před pouhými několika měsíci vychovala svá mláďata. Měla štěstí, že předchozí zima nebyla příliš krutá, protože před rokem nebyla ještě zcela dospělá a dostatečně silná, aby mohla podstoupit tak dlouhou cestu. Ale nyní, když má své rodičovské povinnosti až do příštího jara odbyté, stará se pouze sama o sebe a je připravena utéct před nadcházející zimou na jih za teplejším podnebím.

Je pár hodin po západu slunce. Místo aby se uhníždila na noc, usadí se v narůstajícím šeru na vrcholku větve blízko paty stromu, který byl od jara jejím domovem. Otrepe se, podobna maratonskému běžci, který si před závodem protahuje svaly. Její oranžová hrud' se třpytí ve svitu měsíce. Úsilí a péče, které vložila do stavby hnízda – částečně skrytého za mechem porostlou kůrou stromu jen pár stop od ní – jsou nyní jen matnou vzpomínkou.

Není sama, kdo se chystá k odletu, i další červenky – samci i samičky – se rozhodly, že právě tohle je ta pravá noc pro to, vyrazit na dalekou cestu na jih. Z korun stromů všude okolo sebe

slyší pronikavý zpěv, který přehlušuje obvyklé zvuky ostatních nočních lesních tvorů. Vypadá to, jako by ptáci cítili povinnost oznámit všem svůj odchod, a tak posílají zprávu ostatním obyvatelům lesa, že by si měli dvakrát rozmyslet, jestli napadnou ptáčí území a prázdná hnízda, zatímco oni budou pryč. Červenky se totiž na jaře určitě vrátí.

Červenka zakrouží hlavou sem a tam, aby se ujistila, že vzduch je čistý, a vzlétne k večerní obloze. Jak se blíží zima, noci se prodloužily, a tak ji čeká dobrých deset hodin, než si bude moci znovu odpočinout.

Drží kurz 195° (15° západně od přímého směru na jih). Během nejbližších dní bude pokračovat v letu víceméně stejným směrem, a když bude mít dobrý den, uletí až tři sta kilometrů. Nemá žádnou představu, co ji na cestě čeká, a nemá ani ponětí, jak dlouho to bude trvat. Dobře zná terén okolo svého smrkového lesa, ale o několik kilometrů dál už poletí nad neznámou, měsícem ozářenou krajinou plnou jezer, údolí a měst.

Někde v oblasti Středomoří najde svůj cíl; ačkoli nemíří na nějakou konkrétní lokalitu, zastaví se, když narazí na vhodné místo, a zapamatuje si místní orientační body, takže se tam bude moci v příštích letech vracet. Pokud bude mít dostatek sil, může dokonce přeletět celé severoafrické pobřeží. Ale tohle je její první stěhování, a její jedinou prioritou je proto nyní uniknout mrazu blížící se severské zimy.

Vypadá to, že se nijak nestará o další červenky okolo, které všechny letí přibližně stejným směrem a z nichž některé podstoupily tuto cestu již mnohokrát. Její noční vidění je vynikající, přesto nehledá žádné orientační body – jak bychom činili my, kdybychom se vydali na takovou cestu – ani nesleduje pozici hvězd na jasném nočním nebi, aby ji porovнала se svou vnitřní nebeskou mapou, jak to dělá mnoho jiných nočních stěhovavých ptáků. Za schopnost podniknout to, z čeho se stane její každoroční podzimní cesta, tedy výpravu v délce tří tisíc kilometrů, vděčí namísto toho jistě své nevšední vloze a milionům let evoluce.

Stěhování je samozřejmě v živočišné říši běžným úkazem. Například každou zimu se v řekách a jezerech severní Evropy rodí z jiker mladí lososi, kteří poté plavou po proudu řeky do moře a do severního Atlantiku, kde rostou a dospívají; o tři roky později se tito mladí lososi vracejí klást jikry do stejných řek a jezer, kde se sami narodili. Monarchové stěhovaví, jedni z motýlů Nového světa, se každý podzim stěhují tisíce kilometrů jižním směrem přes celé Spojené státy. Oni sami nebo jejich potomci (protože se budou během cesty rozmnožovat) se později vrátí na sever na stejné stromy, kde na jaře vylétli z kukel. Karety obrovské, které se líhnou na březích ostrova Ascension v jižním Atlantiku, přeplavou tisíce kilometrů oceánu, aby se každé tři roky vrátili klást vajíčka přesně na tutéž skořápkami posetou pláž, kde se samy vylíhly. A takto bychom mohli pokračovat: mnoho druhů ptáků, velryby, karibu, langusty, žáby, mloci, a dokonce i včely, podnikají výpravu, která by byla tvrdým oříškem i pro ty nejzdatnější cestovatele.

Jak živočichové dokážou najít svou cestu přes polovinu světa, je po celá staletí záhadou. Dnes už víme, že využívají řadu metod: někteří používají během dne solární navigaci a během noci navigaci podle hvězd; někteří si dokážou zapamatovat orientační body; jiní umí dokonce svou cestu po planetě *vycítit*. Ale nejzáhadnější navigační systém ze všech je ten, kterým je obdařena červenka obecná: má schopnost detekovat směr a sílu zemského magnetického pole, jež je známá jako magnetorecepce. A přestože dnes už víme, že i řada dalších tvorů má tuto schopnost, nejzajímavější pro náš příběh je právě způsob, jakým si svou cestu po světě razí červenka obecná (*Erithacus rubecula*).

Mechanismus, díky němuž červenka zjistí, jak daleko a kterým směrem letět, je zakódován v DNA, kterou zdědila od svých rodičů. Tato schopnost je sofistikovaná a neobvyklá – je to šestý smysl, který používá ke stanovení svého kurzu. Stejně jako mnoho jiných druhů ptáků a také hmyzu a mořských tvorů, má schopnost vycítit slabé magnetické pole Země a čerpat z něj informace

o směru prostřednictvím vnitřního navigačního systému, což ovšem vyžaduje neobvyklý typ chemického kompasu.

Magnetorecepce je záhadou. Problém spočívá v tom, že magnetické pole Země je velmi slabé – asi 30 až 70 mikrotesel na povrchu: to stačí k vychýlení jemně vyvážené magnetky, při němž nedochází takřka k žádnému tření, ale je to jen setina síly typického magnetu na ledniče. A hádanka zní takto: aby živočich dokázal detekovat magnetické pole, musí toto pole ovlivňovat nějakou chemickou reakci někde v jeho těle – právě takhle přece všichni živí tvorové, včetně nás, vnímají každý signál z vnějšku. Ale množství energie, které dodává interakce zemského magnetického pole s molekulami uvnitř živých buněk, je menší než jedna miliardtina energie nutné k přerušení či vytvoření chemické vazby. Jak tedy může červenka vnímat magnetické pole?

Záhady, jakkoliv malé, jsou fascinující, protože vždycky existuje možnost, že jejich rozřešení by mohlo vést k zásadním změnám v našem chápání světa. V šestnáctém století například vedlo Koperníkovo rozvažování nad relativně drobným problémem týkajícím se geometrie ptolemaiovského geocentrického modelu sluneční soustavy k přemístění středobodu celého vesmíru mimo lidstvo. Darwinova posedlost geografickou distribucí živočišných druhů a záhadou, proč mají pěnkavy a drozdci z izolovaných ostrovů tendenci specializovat se, jej dovedla až k návrhu jeho evoluční teorie. A řešení záhady záření absolutně černého tělesa, týkající se horkých objektů vyzařujících teplo, dovedlo německého fyzika Maxe Plancka k tezi, že energie se přenáší v oddělených shlucích zvaných „kvanta“, čímž vznikla v roce 1900 kvantová teorie. Mohlo by tedy řešení záhady, která ptáci nacházejí své cesty po světě, vést k revoluci v biologii? Odpověď, jakkoliv bizarní se může zdát, zní: ano.

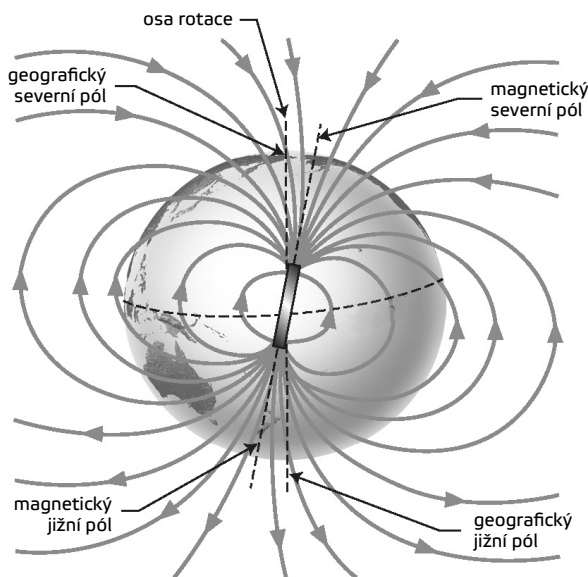
Jenže záhady, jako je tato, se stávají také oblíbeným předmětem zájmu pseudovědců a mystiků; jak uvedl oxfordský chemik Peter Atkins v roce 1976, „studium účinků magnetického pole na chemické reakce je již dlouhou dobu živnou půdou pro dová-

dění šarlatánů“.¹ Pro mechanismy, jichž stěhovaví ptáci užívají k orientaci na svých trasách, byla totiž v různých okamžicích navrhována snad všechna možná exotická vysvětlení od telepatie a starobyklých ley-lines (neviditelných drah spojujících různé archeologické nebo geografické lokality, které jsou údajně obdařeny duchovní energií) po „morfické rezonance“, což je pojem zavedený kontroverzním parapsychologem Rupertem Sheldrakem. Atkinsova rezervovanost v sedmdesátých letech byla tedy pocho-pitelná a odrážela skepsi obvyklou u většiny vědců té doby vůči jakémukoliv návrhu, že by snad živočichové mohli být schopni vnímat magnetické pole Země. Nezdálo se zkrátka možné, aby existoval kolivmolekulární mechanismus, který by to živočichům umožňoval – přinejmenším v oblasti poznatků biochemie.

Jenže ve stejném roce, kdy Peter Atkins vyjádřil svou skepsi, publikovali Wolfgang a Roswitha Wilschke, manželská dvojice německých ornitologů původem z Frankfurtu, průlomový článek v časopise *Science*, jednom z předních světových akademických periodik, v němž nade vši pochybnost dokázali, že červenky jsou skutečně schopny detekovat magnetické pole Země.² Ještě pozoruhodnější bylo ovšem zjištění, že ptačí smysl zřejmě nepracuje jako obyčejný kompas. Totiž zatímco kompas rozlišují rozdíl mezi magnetickým severním a jižním pólem, červenka dokáže rozeznat pouze pól a rovník.

Abychom porozuměli tomu, jak takový kompas může fungovat, musíme vzít v úvahu siločáry magnetického pole, tedy neviditelné stopy, které definují směr magnetického pole a podél kterých se magnetka vyrovnává, pokud je kdekoli v tomto poli umístěna – nejdůvěrněji je známe jako linie v obrazci vytvořeném železnými pilinami na listu papíru umístěném nad tyčovým magnetem. A teď si představte celou Zemi jako obří tyčový magnet se siločárami vystupujícími z jejího jižního pólu, roz-bíhajícími se směrem vně, zakřivujícími se dokola ve smyčkách a zanořujícími se do severního pólu (viz obr. 1.1). V blízkosti obou pólů je směr těchto siločar vůči Zemi téměř vertikální, ale

postupně se zplošťuje, a jak se blíží rovníku, jsou téměř rovnoběžné s povrchem planety. A proto kompas, který měří úhel mezi magnetickými siločarami a povrchem Země, takzvaný *inklinační kompas*, může rozlišit mezi směrem k pólu a směrem k rovníku; ale nedokáže rozeznat severní a jižní pól, neboť siločáry svírají s povrchem planety na obou polokoulích stejné úhly. Studie Wiltshkových z roku 1976 ukázala, že magnetický smysl červenky pracuje právě jako takový inklinační kompas. Problém spočíval v tom, že nikdo neměl tušení, jak by takový biologický inklinační kompas mohl fungovat, protože v té době neexistovaly žádné znalosti ani představy o mechanismu, který by mohl být zodpovědný za to, že lze v těle živočicha detekovat úhel magnetického pole Země. Ukázalo se, že odpověď se skrývá v jedné z nejvíce zarážejících vědeckých teorií moderní doby a má co do činění s podivnou vědou o kvantové mechanice.



Obrázek 1.1: Magnetické pole Země.

Skrytá záhadná realita

Kdybyste provedli průzkum mezi vědci a zeptali se jich, kterou teorii považují v rámci celé vědy za nejuspěšnější, nejdalekosáhlější a nejdůležitější, závisela by odpověď pravděpodobně na tom, jestli ti, koho se ptáte, pracují ve fyzice, či v biologii. Většina biologů pokládá za nejdůmyslnější nápad, jaký byl kdy koncipován, Darwinovu teorii evoluce přirozeným výběrem. Nicméně fyzik bude pravděpodobně namítat, že čestné místo by si zasloužila kvantová mechanika – koneckonců je to základ, na kterém stojí mnohé z fyziky i chemie, a poskytuje nám pozoruhodně ucelený obraz o stavebních kamenech celého vesmíru. Ve skutečnosti bychom přišli o mnohé z našich současných poznatků o tom, jak funguje svět, nemít teoretický aparát kvantové mechaniky.

Téměř každý někdy slyšel o „kvantové mechanice“ a představuje, že je to matoucí a složitá oblast vědy, srozumitelná jen malé, velmi inteligentní menšině lidí, je samozřejmou součástí popkultury. Ovšem pravda je taková, že kvantová mechanika už od počátku dvacátého století patří k našemu životu. Tato věda vznikla v polovině dvacátých let jako matematická teorie, jejímž cílem bylo uchopit svět velmi malých rozměrů (takzvaný mikrosvět), tedy postihnout chování atomů tvořících všechno, co vidíme kolem sebe, anebo vlastnosti dokonce ještě menších částic, z nichž se skládají samotné tyto atomy. Například popisem pravidel platících pro elektrony a jejich uspořádání uvnitř atomů podpírá kvantová mechanika celou chemii, vědy o materiálech, a dokonce i elektrotechniku. Navzdory své neobvyklosti spočívají její matematická pravidla v samém srdci většiny technologických inovací posledního půlstoletí. Bez kvantové mechanického výkladu toho, jak se v materiálech pohybují elektrony, bychom nerozuměli chování polovodičů, které jsou základem moderní elektroniky, a bez chápání polovodičů bychom nemohli vyvinout silikonový tranzistor a později mikročip nebo moderní počítač. A seznam pokračuje: bez pokroků v našich znalostech, za něž vděčíme kvantové mechanice, by neexistovaly lasery ani

přehrávače CD, DVD nebo Blu-ray; bez kvantové mechaniky bychom neměli chytré telefony, satelitní navigaci ani magnetickou rezonanci. Vlastně se odhaduje, že více než třetina hrubého domácího produktu v rozvinutém světě je závislá na aplikacích, které by zkrátka neexistovaly bez našeho pochopení mechaniky kvantového světa.

A to je jen začátek. Můžeme se těšit na kvantovou budoucnost – a je velmi pravděpodobné, že přijde ještě během našeho života –, v níž se laserem řízená jaderná fúze stane zdrojem téměř neomezeného množství elektrické energie; kdy širokou škálu úkonů v oblasti strojírenství, biochemie a medicíny budou provádět umělé molekulární stroje; kdy kvantové počítače budou vládnout umělou inteligencí; a kdy možná dokonce i technologie teleportace ze světa dnešní sci-fi bude rutinně používána k přenosu informací. Kvantová revoluce dvacátého století nabírá v jednadvacátém století na rychlosti a nepředstavitelným způsobem bude proměňovat naše životy.

Ale co to přesně je kvantová mechanika? To je otázka, nad kterou budeme v této knize bádát; pro ochutnávku nyní začneme s několika příklady skryté kvantové reality, která je oporou našich životů.

Náš první příklad ilustruje jeden z podivných rysů kvantového světa, pravděpodobně jeho definiční znak: dualitu částice a vlnění. Jsme obeznámeni se skutečností, že jak my, tak všechny věci kolem nás se skládají z mnoha malých, nespojitých částic, jako jsou atomy, elektrony, protony a neutrony. Možná jste si také vědomi, že energie, jako je světlo nebo zvuk, má spíše podobu vlnění, nikoliv částic. Vlny se rozprostírají, nedělí se na kousky; a protékají prostorem jako – zkrátka jako vlny, se svými vrcholy a údolími, jaké mají i vlny na moři. Kvantová mechanika se zrodila, když se v prvních letech dvacátého století zjistilo, že subatomární částice se mohou chovat jako vlnění a světelné vlnění se může chovat jako částice.

Ačkoliv dualita částice a vlnění není něco, o čem je třeba přemýšlet každý den, skrývá se za podstatou mnoha velmi důležitých

přístrojů, jako jsou například elektronové mikroskopy, které umožňují lékařům a vědcům pozorovat, identifikovat a studovat drobné objekty, příliš malé na to, aby se ukázaly v tradičních optických mikroskopech, například viry, které způsobují AIDS nebo běžnou chřipku. Inspirací pro vznik elektronového mikroskopu byl objev, že elektrony mají vlastnosti vlnění. Němečtí vědci Max Knoll a Ernst Ruska si uvědomili, že jelikož vlnová délka (vzdálenost mezi po sobě následujícími vrcholy a údolími každé vlny) u elektronů je mnohem kratší než vlnová délka viditelného světla, mikroskop založený na elektronovém zobrazování by měl být schopen rozeznat mnohem jemnější detaily než optický mikroskop. Příčinou toho je, že jakýkoliv drobný předmět nebo detail, který má rozměry menší než na něj dopadající vlny, nebude na dané vlnění žádným způsobem působit. Představte si oceánské vlny, jejichž vlnové délky jsou několik metrů, kterák smáčejí oblázky na pláži. Studium těchto vln byste se nemohli dozvědět vůbec nic o tvaru nebo velikosti jednotlivého oblázku. Potřebovali byste vlny s mnohem kratší vlnovou délkou, jako například ty vyráběné fyzikálními přístroji, na které každý narazí ve škole v hodinách přírodovědy, abyste „uviděli“ oblázek prostřednictvím toho, jak se od něj vlny odrazí, nebo jak se kolem něj zakříví. A tak v roce 1931 postavili Knoll a Ruska první elektronový mikroskop na světě a použili jej, aby vůbec poprvé pořídili snímky virů, za což byla Ernstu Ruskovi udělena roku 1986 (dva roky před jeho smrtí), poněkud opožděně, Nobelova cena.

Náš druhý příklad je ještě elementárnější. Proč Slunce svítí? Většina lidí si je pravděpodobně vědoma toho, že Slunce je v podstatě fúzní jaderný reaktor, v němž se spaluje vodík a uvolňuje se teplo a sluneční světlo, které udržuje veškerý život na Zemi; ale už méně lidí ví, že by Slunce vůbec nesvítilo nebýt pozoruhodné kvantové vlastnosti, která umožňuje částicím „procházet zdmi“. Slunce, a platí to vlastně pro všechny hvězdy ve vesmíru, je schopno emitovat tato velká množství energie, neboť jádra atomů vodíku, která jsou tvořena pouze jednou kladně nabitou částicí nazývanou proton, jsou schopna fúzovat a jako důsledek této

fúze se uvolňuje energie ve formě elektromagnetického záření, které nazýváme sluneční světlo. Dvě jádra vodíku musí mít možnost dostat se velmi blízko k sobě, aby zfúzovala; ale čím blíže sobě se ocitnou, tím silnější budou mezi nimi působit odpudivé síly, protože každé nese kladný elektrický náboj a stejné náboje se odpuzují. Aby se částice dostaly dostatečně blízko pro uskutečnění fúze, musí být ve skutečnosti schopné proniknout skrz subatomární ekvivalent cihlové zdi: zdánlivě neproniknutelnou energetickou bariéru. Klasická fyzika^a – postavená na zákonech Isaaka Newtona o pohybu, mechanice a gravitaci, které velmi dobře popisují každodenní svět kuliček, pružin, parních motorů (a dokonce i planet) – by předpověděla, že tohle by se nikdy nemohlo stát; částice by neměly mít schopnost pronikat zdmi, a tím pádem by Slunce nemělo svítit.

Jenže částice, které podléhají zákonům kvantové mechaniky, jako například jádra atomů, mají v rukávu elegantní trik: mohou snadno procházet takovými bariérami díky procesu zvanému „kvantové tunelování“. A je to v podstatě dualita vlnění a částice, která jim to umožňuje. Vlny mohou proudit kolem objektů, jako jsou oblázky na pobřeží, ale stejně tak mohou také procházet skrz objekty; jako například zvukové vlnění, když prochází zdí a vy slyšíte televizor svého souseda. Samozřejmě že vzduch, který přenáší zvukové vlny, ve skutečnosti sám zdmi neprochází: jsou to vibrace vzduchu – zvuk –, které způsobí, že vaše společná stěna začne vibrovat, vibrace se přenesou na vzduch ve vašem pokoji, a ten dovede stejné zvukové vlny k vašemu uchu. Ale pokud byste se mohli chovat jako jádro atomu, pak byste občas byli schopni projít jako duch přímo skrz pevnou stěnu.^b Vodíkové jádro uvnitř Slunce přesně toto dokáže: může se samo „rozptýlit“ a „proniknout“ skrz energetickou bariéru jako fantom, dostat se blízko

^a Obecně vzato, deterministické fyzikální teorie, které předcházely kvantové mechanice, včetně obecné a speciální relativity, jsou souhrnně označovány jako klasická fyzika – aby se odlišily od neklasické kvantové mechaniky.

^b Ovšem bylo by chybou domnívat se, že kvantové tunelování má za následek pronikání fyzikálních vln bariérami; spíše se jedná o abstraktní matematické vlny,

ke svému partnerovi na druhé straně zdi a fúzovat. Takže až se budete příště opalovat na pláži a pozorovat vlny dorážející na pobřeží, věnujte myšlenku záhadným, vlnám podobným pohybům kvantových částic, které vám nejen dovolují užívat si slunečního svitu, ale umožňují existenci veškerého života na naší planetě.

Třetí příklad souvisí s předcházejícím, ale poukazuje na odlišný, a dokonce ještě podivnější rys kvantového světa: jde o jev zvaný *superpozice*, díky němuž mohou částice provádět dvě – nebo sto, anebo milion – věcí současně. Tato vlastnost je zodpovědná za to, že náš vesmír oplývá tolika složitými a zajímavými vlastnostmi. Nedlouho po Velkém třesku, v němž vesmír započal svou existenci, byl prostor zaplaven jen jedním druhem atomu: tím nejjednodušším co do struktury, vodíkem, který je tvořen jedním kladně nabitým protonem a jedním negativně nabitým elektronem. Bylo to poněkud nudné místo, bez hvězd a planet, a rozhodně bez živých organismů, protože základní stavební kameny všeho okolo nás, včetně nás, jsou tvořeny nejen vodíkem, ale také těžšími prvky, jako jsou uhlík, kyslík a železo. Naštěstí tyto těžší prvky byly „upečeny“ uvnitř hvězd plných vodíku; a jejich výchozí látka, forma vodíku známá jako deuterium, vděčí za svou existenci troše kvantové magie.

První krok tohoto receptu jsme právě popsali, totiž že se dvě vodíková jádra, protony, dostala dostatečně blízko k sobě pomocí kvantového tunelování, přičemž by se uvolnila energie, která se změní na sluneční záření, jež ohřívá naši planetu. Dále se tyto dva protony musí svázat dohromady, a to není jednoduché, protože síly mezi nimi nepředstavují dost silné lepidlo. Všechna atomová jádra se skládají ze dvou typů částic: protonů a jejich elektricky neutrálních partnerů, neutronů. Jestliže jádro obsahuje příliš mnoho částic jednoho nebo druhého typu, pak zákony

které nám stanovují pravděpodobnost nalezení kvantové částice na druhé straně bariéry v určitém okamžiku. Snažíme se v této knize nabídnout intuitivní analogie, kdekoli jimi lze vysvětlit kvantové jevy, ale skutečnost je taková, že kvantová mechanika je naprosto neintuitivní a existuje nebezpečí přílišného zjednodušení v důsledku snahy o srozumitelnost.

kvantové mechaniky prikazují, že musí být nastolena rovnováha a nadbytečné částice se promění: protony se změní v neutrony, anebo neutrony v protony, a to prostřednictvím procesu zvaného beta-rozpad. Tohle je přesně to, co se stane, když se k sobě přiblíží dva protony: složenina ze dvou protonů nemůže existovat a jeden z nich se beta-rozpadem přemění na neutron. Zbývající proton a nově transformovaný neutron se pak mohou spojit dohromady do podoby objektu zvaného deuteron (jádro atomu těžkého izotopu^a vodíku zvaného deuterium), přičemž následné další jaderné reakce umožní budovat složitější jádra dalších prvků těžších než vodík, počínaje heliem (se dvěma protony a buď jedním, nebo dvěma neutrony) přes uhlík, dusík, kyslík a tak dále.

Klíčovým bodem je, že deuteron vděčí za svou existenci své schopnosti existovat ve dvou stavech současně na základě kvantové superpozice. Podstata spočívá v tom, že proton a neutron mohou držet pohromadě dvěma různými způsoby, které se odlišují tím, jak *rotují*. Později uvidíme, že tento pojem „kvantové rotace (spinu)“ se ve skutečnosti velmi liší od obvyklého chápání rotace velkého objektu, jako je tenisový míček; ale pro tuto chvíli budeme pokračovat s naší klasicky intuitivní představou rotující částice a představovat si proton a neutron společně rotující v deuteronu v pečlivé choreografii kombinující pomalý intimní waltz a rychlejší jive. Koncem třicátých let bylo objeveno, že v rámci deuteronu tyto dvě částice netančí dohromady *bud'* jeden, *anebo* druhý z těchto dvou tanců, ale oba tance ve stejnou chvíli – tančí nejednoznačně waltz i jive současně – a to je to, co jim umožňuje svázat se dohromady.^b

^a Všechny chemické prvky se vyskytují v odlišných variantách zvaných izotopy. Prvek je definován počtem protonů v jádrech svých atomů: vodík má jeden, helium dva a tak dále. Ale počet neutronů, které jádro obsahuje, může být různý. Vodík se vyskytuje ve třech variantách (izotopech): atomy normálního vodíku obsahují jen samotný proton, zatímco atomy těžších izotopů, deuteria a tritia, navíc obsahují jeden, resp. dva neutrony.

^b Z technického hlediska deuteron vděčí za svou stabilitu vlastnosti jaderné síly, která drží proton a neutron pohromadě, zvané „tenzorová interakce“, která nutí pár setrvávat v kvantové superpozici dvou momentů hybnosti, zvaných S-vlny a D-vlny.

Obvyklá reakce na toto prohlášení zní: „Jak to víme?“ Jistě, atomová jádra jsou příliš malá, než abychom je viděli, nebylo by proto rozumnější předpokládat, že našemu porozumění jaderným silám cosi schází? Odpověď zní ne, protože mnohými laboratoři bylo znovu a znovu potvrzeno, že pokud proton a neutron předváděli *bud'* kvantovou dobu waltzu, *anebo* kvantovou dobu jivu, pak jaderné „lepidlo“ mezi nimi nebylo dostatečně silné, aby je spojilo dohromady; pouze když jsou tyto dva stavy navzájem v superpozici – dvě skutečnosti existují ve stejném čase – je přitažlivá síla dostatečně silná. Představte si dvě superponované reality tak trochu jako dvě barvy, modrou a žlutou, jejichž smícháním získáte kombinovanou výslednou barvu, zelenou. Přestože víte, že zelenou tvoří dvě primární barevné složky, sama není ani první, ani druhou z nich. A mísení modré a žluté v odlišných poměrech povede ke vzniku rozlišných odstínů zelené. Stejně tak deutron vzniká, když jsou proton a neutron z větší části upoutány ve waltzu, pouze s malým množstvím jivu nádavkem.

Takže pokud by částice nedovedly tančit jive a waltz současně, náš vesmír by zůstal polévkou z vodíkového plynu a nic víc – nezazářily by hvězdy, nedošlo by k vytvoření žádného dalšího chemického prvku a vy byste nečetli tato slova. Existujeme díky schopnosti protonů a neutronů chovat se tímto neintuitivním kvantovým způsobem.

Poslední příklad nás zavede zpět do světa technologií. Charakter kvantového světa lze využít nejen k zobrazení nepatrných objektů, jako jsou viry, ale také k pohledu do nitra našich těl. Magnetická rezonance (MRI) je medicínská snímací technika, která vytváří úžasně detailní snímky měkkých tkání. MRI skeny se rutinně používají k diagnostice různých onemocnění, a to zejména pro detekci nádorů uvnitř vnitřních orgánů. Většina netechnických popisů MRI se vyhýbá zmínce o skutečnosti, že tato technologie je závislá na podivném způsobu, jakým funguje kvantový svět. MRI používá velké silné magnety, aby vyrovnaly osy rotace jader vodíkových atomů v těle pacienta. Pulzy

radiových vln potom tyto atomy přepínají a nutí vyrovnaná jádra existovat v tomto podivném kvantovém stavu rotace v obou směrech najednou. Dokonce je zbytečné pokoušet se představit si, co to znamená, protože se jedná o něco mimořádně vzdáleného naší každodenní zkušenosti! Důležité je, že když se jádra atomů uvolní zpět do svého původního stavu – stavu, ve kterém se nacházela předtím, než dostala pulz energie, která je postrčila do kvantové superpozice –, uvolňují tuto energii a ta je následně zachycena elektronikou v MRI skeneru a použita k vytvoření oněch krásně detailních snímků vašich vnitřních orgánů.

Takže pokud se někdy ocitnete vleže v MRI skeneru, přičemž budete možná naslouchat zvukovým vlnám v podobě hudby přiváděné do sluchátek, věnujte chvilku přemýšlení o neintuitivním kvantovém chování subatomárních částic, které existenci této technologie umožňují.

Kvantová biologie

Co mají všechny tyto kvantové podivnosti co dělat s navigačním systémem, který používá červenka obecná při letu kolem světa? Dobrá, jistě si vzpomenete, že výzkum Wiltschkosových z počátku sedmdesátých let prokázal, že magnetický smysl červenky pracuje stejným způsobem jako inkлинаční kompas. To se tehdy jevilo jako mimořádně matoucí, neboť v té době neměl nikdo ponětí o tom, jak by biologický inkлинаční kompas mohl vypadat. Nicméně v té samé době se německý vědec jménem Klaus Schulten začal zajímat o to, jak se přemisťují elektrony v průběhu chemických reakcí, jichž se účastní volné radikály. Jedná se o molekuly, které mají ve vnější vrstvě svého elektronového obalu přítomny osamělé elektrony, což kontrastuje s většinou elektronů, jež se nacházejí spárované v atomových orbitalech. Toto je důležité s ohledem na podivnou kvantovou vlastnost zvanou spin, jelikož spárované elektrony mají tendenci rotovat v opačných směrech, takže jejich celkový spin se vyruší

na nulu. Ale bez dvojčete vyrušujícího spin mají osamělé elektrony ve volných radikálech určitý spin, který jim dává magnetické vlastnosti: jejich rotace může být vyrovnána v magnetickém poli.

Schulten tvrdil, že *páry* volných radikálů, generované procesem známým jako *rychlá tripletová reakce*, by mohly být s příslušnými elektrony „kvantově provázané“. Nenápadné příčiny, jako je choulostivý kvantový stav dvou oddělených elektronů, které by měly být vyjasněny později, způsobují jejich vysokou citlivost na směr jakéhokoliv vnějšího magnetického pole. Schulten tedy pokračoval návrhem, že tajemný ptačí kompas by mohl využívat právě tento druh mechanismu chemického provázání.

Kvantové provázání (nelokalitu) jsme dosud nezmínili, protože je to pravděpodobně nejpodivnější rys kvantové mechaniky. Umožňuje částicím, které se kdysi vyskytovaly pospolu, zůstat téměř jako zázrakem v bezprostřední vzájemné komunikaci, přestože je dělí obrovská vzdálenost. Například částice, které byly kdysi blízko sebe, ale později byly oddáleny natolik, že se nacházejí na opačných stranách vesmíru, mohou setrvávat, přinejmenším principiálně, stále ve spojení. Lze říct, že dloubnutí do jedné částice by vedlo k tomu, že by její vzdálený partner *okamžitě* povyskočil.^a Provázení bylo prokázáno průkopníky kvantové fyziky, přirozeně vyplynulo z jejich rovnic, ale jeho důsledky byly tak mimořádné, že dokonce i Einstein, který dal světu černé díry a zakřivený časoprostor, je odmítl přijmout a posmíval se mu jako „záhadnému působení na dálku“. A je to právě toto záhadné působení na dálku, co tak často využívají ke svým intrikám „kvantoví mystici“, kteří kladou na kvantové provázání extravagantní nároky, například že je původcem paranormálních „jevů“, jako je telepatie. Einstein byl skeptický, protože se zdálo, že provázání porušuje jeho teorii relativity, která tvrdí, že žádné působení nebo signál nikdy nemůže cestovat prostorem rychleji než rychlostí

^a Měli bychom si ujasnit, že kvantoví fyzici tento druh zjednodušujícího jazyka nepoužívají. Správně se o dvou vzdálených, stále provázaných částicích říká, že jsou ne-lokálně spojené, protože jsou částmi stejného kvantového stavu. Jenže říkat to takhle moc nepomáhá, že?

světla. Vzdálené částice by neměly, podle Einsteina, disponovat okamžitým záhadným propojením. V tomto se Einstein mýlil: nyní máme ověřeno empiricky, že kvantové částice mohou skutečně mít bezprostřední spojení na dlouhé vzdálenosti. Ale čistě pro případ, že vás to zajímá, telepatii rozhodně neumožňuje.

Představa, že podivná kvantová vlastnost provázání sehrává nějakou roli v běžných chemických reakcích, byla počátkem sedmdesátých let považována za bizarní. V té době mnoho vědců spolu s Einsteinem pochybovalo o tom, zda provázané částice vůbec existují, poněvadž nikdo je zatím nedetekoval. Ale během desetiletí uplynulých od té doby potvrdily mnohé geniální laboratorní experimenty reálnost těchto záhadných spojení; a nejslavnější z nich byl proveden již v roce 1982 týmem francouzských fyziků vedeným Alainem Aspectem na Univerzitě Paříž-Jih.

Aspectův tým generoval páry fotonů (částic světla) s provázanými stavy polarizace. S polarizací světla jsme pravděpodobně nejbližší obeznámeni prostřednictvím nošení polarizovaných slunečních brýlí. Každý foton světla má typ směrovosti, svůj úhel polarizace, který trochu připomíná vlastnost spin, s nímž jsme se už seznámili.^a Fotony ve slunečním světle mají všechny možné úhly polarizace, ale polarizované sluneční brýle je filtrují, tedy umožňují projít jenom fotonům s jedním konkrétním úhlem polarizace. Aspect vygeneroval páry fotonů polarizovaných tak, že byly nejen rozdílné – řekněme, že jeden směřoval vzhůru a druhý dolů – ale také provázané; a podobně jako naši předchozí taneční partneři, ani jeden z provázaného páru nesměruje ve skutečnosti jednoznačně tím či oním směrem: oba směřují oběma směry současně, *dokud se neprovede měření*.

Měření je jednou z nejzáhadnějších – a jistě nejdiskutovanějších – stránek kvantové mechaniky, zejména kvůli otázce, která jistě napadla už i vás: proč všechny objekty, které pozorujeme,

^a Nicméně protože světlo si lze představit jako vlnění, ale stejně tak jako částice, pojem polarizace (na rozdíl od kvantového spinu) si lze snadněji představit jako směr, v němž světelná vlna osciluje.

neprovádějí všechny tyhle podivné věci, které dokážou kvantové částice? Odpověď zní, že dole v mikroskopickém kvantovém světě se částice mohou chovat takto podivně, například vykonávat dvě věci najednou, být schopny procházet zdmi, nebo navazovat záhadná spojení, pouze když se na ně nikdo nedívá. Jakmile jsou pozorovány nebo měřeny, ztrácejí svou podivnost a chovají se jako klasické objekty, které vidíme okolo sebe. Ale to potom samozřejmě vede pouze k další otázce: co je tak zvláštního na měření, že umožňuje změnit kvantové chování na klasické?^a Odpověď na tuto otázku je pro nás klíčová, protože měření se nachází na hranici mezi kvantovým a klasickým světem, na kvantové hraně, na níž se podle nás – jak můžete vytušit z názvu knihy – odehrává i sám život.

Kvantovým měřením se budeme zabývat na různých místech této knihy a doufáme, že se s rafinovanostmi tohoto procesu postupně vypořádáte. Pro tuto chvíli zkrátka vezmeme v úvahu nejjednodušší interpretaci daného jevu a řekneme, že když je kvantová vlastnost, například stav polarizace, měřena vědeckými přístroji, pak je bezprostředně donucena zapomenout své kvantové schopnosti, jako třeba směřování do mnoha směrů zároveň, a musí přijmout podobu konvenční klasické vlastnosti, jako je směřování pouze jedním směrem. Když tedy Aspect zjišťoval polarizaci jednoho z členů kterékoliv dvojice provázaných fotonů a pozoroval, zda projde polarizovanými čočkami, tato částice okamžitě ztratila své záhadné spojení se svým partnerem a zvolila si pouze jeden směr polarizace. A totéž platí i pro jejího partnera, a to bez ohledu na to, jak daleko se nacházel; tohle rovnice

^a Opět platí, že ve snaze o srozumitelnost zde věci záměrně příliš zjednodušujeme. Měření jistě vlastnosti kvantové částice, řekněme její pozice, znamená, že si již nejsme nejistí, kde se nachází – v tom smyslu, že se na ni zaměříme a ona přestává být rozostřená. Nicméně to neznámá, že od teď se chová jako klasická částice. Podle Heisenbergova principu neurčitosti nyní nemá pevnou hybnost. Ve skutečnosti bude částice, v určité pozici a v daném okamžiku v čase, v superpozici pohybu všemi možnými rychlostmi do všech možných směrů. A pokud jde o kvantový spin, neboť tato vlastnost se nachází pouze v kvantovém světě, měřit jej rozhodně nepřiměje částici chovat se klasicky.

kvantové mechaniky přinejmenším předpovídaly, a ovšem právě to znepokojovalo Einsteina.

Aspect a jeho tým provedli svůj slavný experiment s páry fotonů, které oddělovalo několik metrů v jejich laboratoři, což je dost daleko na to, aby mezi nimi nemohl přejít ani jediný impulz pohybující se rychlostí světla – a teorie relativity nám říká, že nic se nemůže pohybovat rychleji než rychlostí světla –, kterým by navzájem koordinovaly svou polarizaci. Přesto byla měření v rámci páru částic ve vztahu: když polarizace jednoho fotonu směřovala vzhůru, polarizace druhého mířila dolů. Od roku 1982 byl experiment opakován dokonce i s částicemi oddělenými stovkami kilometrů, přičemž si vždy své záhadné spojení, které Einstein nedokázal přijmout, udržely.

Do Aspectova experimentu chybělo ještě skoro deset let, když přišel Schulten s myšlenkou, že kvantové provázání hraje roli v ptačím kompasu, čímž vyvolal řadu sporů. Navíc Schulten neměl žádnou představu, *jak* by taková obskurní chemická reakce mohla umožnit července vidět magnetické pole Země. Říkáme „vidět“, kvůli jiné zvláštnosti objevené Wiltschkovými. Přestože červenka obecná odlétá v době stěhování v noci, aktivace jejího magnetického kompasu vyžaduje malé množství světla (blízko modrého konce viditelného spektra), což naznačuje, že v tom, jak kompas funguje, hrají významnou roli ptačí oči. Ale jak by mohly oči kromě zraku zahrnout také magnetický smysl? Ať už s mechanismem párových radikálů počítáme, nebo ne, tohle byla naprostá záhada.

Teorie o tom, že ptačí kompas je založen na kvantovém mechanismu, na několik desetiletí zapadla. Schulten se vrátil do Spojených států, kde založil velmi úspěšnou skupinu teoretické chemické fyziky na Univerzitě Illinois v Urbana-Champaign. Ale na svou bizarní teorii nikdy nezapomněl a neustále přepisoval článek, v němž hovořil o podezřelých biomolekulách (vyráběných živými buňkami), které by mohly vytvářet páry radikálů nutné pro rychlou tripletovou reakci. Ale žádná z nich neměla všechny potřebné vlastnosti a schopnosti: buď nemohla vytvářet

páry radikálů, nebo nebyla přítomná v očích ptáků. Ale v roce 1998 se Schulten dočetl, že v očích živočichů byl nalezen tajemný světelný receptor zvaný kryptochrom. V tom okamžiku se roz-zvonil jeho vědecký alarm, protože kryptochrom byl známý jako protein, který by možná mohl generovat páry radikálů.

Nedávno se k Schultenově laboratoři připojil talentovaný doktorand jménem Thorsten Ritz. Během studia na Univerzitě ve Frankfurtu slyšel Ritz přednášet Schultena o ptačím kompasu a toto téma se stalo jeho posedlostí. Když se naskytla příležitost, chopil se jí a pracoval na svém doktorátu v Schultenově laboratoři, přičemž zpočátku se věnoval fotosyntéze. Když se objevila záležitost s kryptochromem, přesměroval svůj zájem k práci na magnetorecepci a v roce 2000 napsali se Schultenem článek nazvaný „Model magnetorecepce u ptáků závislé na fotorecepci“, popisující, jak by mohl kryptochrom obstarat ptačímu oku kvantový kompas. (Více se tomuto tématu budeme věnovat v kapitole 6.) O čtyři roky později se Ritz spojil s Wiltschkovými, aby společně provedli studii na červenkách, která poskytla první experimentální důkazy na podporu teorie, že ptáci používají kvantové provázání k navigaci při pohybu po světě. Schulten, jak se zdálo, měl celou dobu pravdu. Jejich článek z roku 2004, publikovaný v prestižním britském časopise *Nature*, vyvolal obrovský zájem a ptačí kvantový kompas se okamžitě stal maskotem nové vědy, kvantové biologie.

Když nás nerozhodí kvantová mechanika, proč by měla kvantová biologie?

Již dříve jsme popsali kvantové tunelování a kvantovou superpozici, a to jak v nitru Slunce, tak v technologických zařízeních, jako jsou elektronové mikroskopy a přístroje využívající magnetické rezonance. Tak proč bychom měli být překvapeni, když se kvantové jevy objeví v biologii? Biologie je koneckonců svého druhu aplikovaná chemie a chemie je vlastně určitý druh aplikované fyziky. Znamená to tedy, že není možné popsat vše, včetně nás samotných a ostatních živých bytostí, pomocí prosté fyziky, když se chceme dobrat skutečných základů? Tohle je ostatně



1.2: Účastníci kvantově biologického workshopu v Surrey roku 2012. Zleva doprava: autoři, Jim Al-Khalili a Johnjoe McFadden; Vlatko Vedral, Greg Engel, Nigel Scrutton, Thorsten Ritz, Paul Davies, Jennifer Brooksová a Greg Scholes.

argument mnoha vědců, kteří připouštějí, že kvantová mechanika musí hrát v organismech na hlubší rovině nějakou roli; nicméně trvají na tom, že tato její úloha je triviální. Chtějí tím říct, že jelikož pravidla kvantové mechaniky řídí chování atomů, a živý svět koneckonců zahrnuje interakce atomů, pak pravidla kvantového světa musí v těch nejmenších měřítcích působit také v rámci organismů – ale právě *jenom* na těchto drobných škálách a s tím důsledkem, že budou mít jen malý, anebo vůbec žádný vliv na procesy ve větších měřítcích, které jsou pro život důležité.

Tito vědci mají samozřejmě přinejmenším zčásti pravdu. Biomolekuly, například DNA nebo enzymy, jsou tvořeny elementárními částicemi jako protony a elektrony, jejichž interakce se

řídí kvantovou mechanikou. Jenže totéž platí pro struktury, jako jsou kniha, kterou čtete, nebo židle, na níž sedíte. Způsob, jakým chodíte nebo mluvíte nebo jíte nebo spíte, nebo i myslíte, musí nakonec záviset na kvantově mechanických silách ovládajících atomy, elektrony, protony a ostatní částice, stejně jako fungování vašeho auta nebo vašeho toustovače závisí v konečném důsledku na kvantové mechanice. Ale tohle celkem vzato nemusíte vědět. Automechanici nejsou povinni navštěvovat přednáškové kurzy o kvantové mechanice a většina biologických osnov neobsahuje žádnou zmínku o kvantovém tunelování, provázání nebo superpozici. Většina z nás se obejde bez toho, aby věděla, že na základní úrovni funguje svět podle zcela jiných pravidel, než jsou ta, která důvěrně známe. Podivné kvantové jevy, které lze pozorovat na velmi malých škálách, obvykle nerozlišují mezi velkými objekty, jakými jsou auta nebo toustovače, které vidíme a používáme každý den.

Proč ne? Fotbalové míče neprocházejí skrz zdi; lidé nemají záhadná spojení (navzdory falešným tvrzením o telepatii); a je to smutné, ale nemůžete být ve stejnou chvíli doma i v kanceláři. Avšak elementární částice uvnitř fotbalového míče nebo člověka to všechno dokáže. Proč existuje dělicí čára, hrana, mezi světem, který vidíme, a světem, o kterém fyzikové vědí, že skutečně existuje pod jeho povrchem? Tohle je jeden z nejhlubších problémů v celé fyzice a souvisí s fenoménem kvantového měření, který jsme si představili už dříve. Když kvantový systém interaguje s klasickým měřicím zařízením, jako byly polarizační čočky v experimentu Alaina Aspecta, ztrácí svou kvantovou zvláštnost a chová se jako klasický objekt. Ale měření prováděná fyziky nemohou být odpovědná za způsob, jakým se nám jeví svět, který vidíme kolem sebe. Co tedy funguje jako destruktor kvantového chování mimo fyzikální laboratoř?

Odpověď má co dočinění s tím, jak jsou částice uspořádány a jak se pohybují uvnitř velkých (makroskopických) objektů. V nitru neživých pevných předmětů bývají atomy a molekuly náhodně rozptýleny a chaoticky vibrují; v kapalinách a plynech se

také nacházejí v konstantním stavu náhodného pohybu v důsledku působení tepla. Tyto randomizační faktory – rozptyl, vibrace a pohyb – způsobují, že vlnové kvantové vlastnosti částic se velmi rychle vytratí. Tohle je tedy kombinovaný účinek všech kvantových složek těla, které provádí „kvantové měření“ každé z nich a všech zároveň, což vede k tomu, že svět, který vidíme okolo nás, vypadá normálně. K pozorování kvantové podivnosti musíte buď jít na neobvyklé místo (jako je vnitřek Slunce), nahlédnout hluboko do mikrosvěta (s pomocí nástrojů jako jsou elektronové mikroskopy), nebo opatrně vyrovnat kvantové částice tak, že pochodují stejným krokem (jak se tomu děje se spinem jader vodíku ve vašem těle, když se nachází uvnitř MRI skeneru – dokud se magnet nevypne, kvantová soudržnost se zase nezruší a spinová orientace se nestane opět nepravidelnou). Stejný druh molekulární randomizace je zodpovědný za to, že se po většinu času můžeme obejít bez kvantové mechaniky: všechny kvantové podivnosti se stírají uvnitř náhodně orientovaných a neustále se pohybujících molekulárních niter viditelných neživých objektů, které pozorujeme okolo sebe.

Po většinu času... ale ne vždycky. Schulten objevil, že průběh rychlé tripletové reakce by bylo možno vysvětlit právě s ohledem na onu zvláštní a těžko postižitelnou vlastnost kvantového provázání. Ale rychlá tripletová reakce probíhá... velmi rychle. A přitom se týká pouze několika molekul. To, co odpovídá za ptačí navigaci, by ovšem muselo mít neustálý vliv na celou červenku. Náзор, že v ptačím magnetickém kompasu hraje úlohu kvantové provázání, působil proto daleko silněji než teze, že provázání působí v exotických chemických reakcích týkajících se jen několika částic, a narážel na značnou nedůvěru. O živých buňkách se předpokládalo, že se skládají převážně z vody a biomolekul ve stavu konstantního molekulárního promíchávání, od něhož se očekávalo, že bezprostředně provádí „měření“ a rozptyluje podivné kvantové účinky. „Měřením“ zde samozřejmě nemáme na mysli, že jej molekuly vody nebo biomolekuly provádějí v tom smyslu, jako měříme hmotnost nebo teplotu nějakého objektu

my, přičemž získané hodnoty neustále zaznamenáváme na papír nebo na pevný disk počítače, nebo dokonce jenom ve svém mozku. Mluvíme o tom, co se stane, když molekula vody narazí do jedné částice z provázaného páru: její následný pohyb bude ovlivněn stavem této částice, takže kdybyste studovali následný pohyb molekuly vody, mohli byste odvodit některé vlastnosti částice, do které narazila. V tomto smyslu tedy molekula vody provedla „měření“, protože její pohyb zajistil záznam stavu provázaného páru, ať už je nebo není přítomen někdo, kdo by to zkoumal. Tento druh *náhodného* měření obvykle postačuje, aby zničil provázané stavy. Teze, že jemně uspořádané kvantově provázané stavy by mohly přecházet v teplém a komplexním nitru živých buněk, tak byla mnohými považována za výstřední nápad hraničící s šílenstvím.

V posledních letech jsme se však co do znalostí v této oblasti posunuli notně kupředu – a nejen co se týče ptáků. Kvantové jevy, jako jsou superpozice a tunelování, byly pozorovány v mnoha jevech biologických, počínaje způsobem, jakým rostliny zachytávají sluneční světlo, a konče tím, jak si všechny naše buňky vyrábějí biomolekuly. Dokonce i náš čich, anebo geny, které jsme zdědili od našich rodičů, mohou být odkázány na podivný kvantový svět. Na stránkách nejprestižnějších světových vědeckých časopisů se nyní pravidelně objevují nové články z oblasti kvantové biologie; a existuje malá, ale neustále rostoucí skupinka vědců, kteří trvají na tom, že záležitosti kvantové mechaniky sehrávají ve fenoménu života vskutku nezanedbatelnou, ba dokonce klíčovou roli. Jsou přesvědčeni, že život si tyto podivné vlastnosti uchovává proto, že se nachází v jedinečné pozici na hraně kvantového a klasického světa.

Že je těchto vědců ve skutečnosti jen nemnoho, to vyšlo najevo v září roku 2012, když jsme pořádali mezinárodní workshop kvantové biologie na Univerzitě v Surrey a podařilo se nám namačkat většinu těchto odborníků do malého přednáškového sálu. Ale náš obor se rychle rozrůstá a pohání jej vzrušení z objevů týkajících se role kvantové mechaniky v každodenních biologických jevech.

A jednou z nejpozoruhodnějších oblastí výzkumu – tou, která může mít dalekosáhlé důsledky pro rozvoj nových kvantových technologií – je nedávné částečné rozřešení záhady, jak dokážou kvantové podivnosti přetrvat v horkých, vlhkých a zaneřádaných živých tělech.

Ale abychom plně ocenili význam těchto poznatků, musíme si nejprve položit zdánlivě jednoduchou otázku: co je to život?

Kapitola 2

Co je to život?

Jedna z nejúspěšnějších vědeckých misí všech dob začala dne 20. srpna 1977, kdy se od země odlepila a k nebi nad Floridou zamířila sonda Voyager 2, následovaná o dva týdny později svou sesterskou lodí, Voyagerem 1. Dva roky nato dosáhl Voyager 1 svého prvního cíle, planety Jupiter, kde pořídil fotografie oblačných vírů a slavné velké červené skvrny tohoto plynného obra, načež pokračoval v přeletu nad ledovým povrchem jednoho z Jupiterových měsíců, Ganymeda, a stal se svědkem vulkanické erupce na měsíci Io. Voyager 2 mezitím cestoval po jiné trajektorii a poté, co v srpnu 1981 doputoval k Saturnu, začal posílat domů překrásné fotografie prstenců planety, prozrazující, že mají podobu spleteného náhrdelníku tvořeného miliony drobných balvanů a tzv. pastýřských měsíců. Ale uplynulo téměř celé další desetiletí, než dne 14. února 1990 přinesl Voyager 1 jeden z nejpozoruhodnějších snímků, co byly kdy pořízeny; obrázek malé modré tečky na zrnitém šedém pozadí.

Mise Voyager a další průzkumné sondy umožnily lidstvu v průběhu uplynulého půlstoletí chodit po Měsíci, na dálku prozkoumat údolí Marsu, podívat se na horké pouště Venuše, a dokonce být svědky komety sestupující plynnou atmosférou Jupiteru. Ale hlavně objevily kamení... Spoustu kamení. Ve skutečnosti by se dalo říct, že zkoumání našeho sesterského planetárního tělesa znamenalo převážně výzkum hornin, od přibližně tuny minerálů přivezených z Měsíce astronauty z mise Apollo, přes mikroskopické fragmenty komety získané díky misi Stardust, kterou NASA

vyslala v roce 2006 ke kometě Wild 2, po analýzu povrchu Marsu provedenou vozítkem Curiosity – mnoho a mnoho kamení.

Kameny z vesmíru jsou samozřejmě fascinující objekty, jejich struktura a složení poskytují vodítka k původu sluneční soustavy, vzniku planet, a dokonce i ke kosmickým událostem, které se datují ještě před dobu vzniku našeho Slunce. Ale pro většinu ne-geologů se chondrit (typ kamenného, nekovového meteoritu) z Marsu příliš neliší od troktolitu (meteoritu bohatého na železo a hořčík) z Měsíce. V naší sluneční soustavě nicméně existuje místo, kde se pospolu vyskytují základní složky a tvoří skály a kameny nejrůznějších forem, funkcí a chemického složení, takže pouhý jeden gram výsledného materiálu překonává co do rozmanitosti veškerou ostatní hmotu ve známé části vesmíru. Tímto místem je samozřejmě bledě modrá tečka vyfotografovaná Voyagerem 1, planeta, kterou nazýváme Země. Nejpozoruhodnější je, že ony nejrůznější suroviny, které činí povrch naší planety tak jedinečným, společně vytvořily život.

Život je pozoruhodný. Už jsme objevili úžasný smysl pro magnetorecepci, kterým je obdařena červanka obecná, ale tato zvláštní dovednost je jen jednou z mnoha jejích rozmanitých schopností. Dokáže vidět, cítit, slyšet, chytat mouchy; dokáže poskakovat po zemi anebo mezi větvemi stromu; a dokáže vystoupat do vzduchu a uletět stovky kilometrů. Nejpozoruhodnější ze všeho je, že s mírnou výpomocí svého druhu může stvořit celé sobě podobné mládě, a to ze stejných látek, které tvoří všechno kamení. A naše červanka je jen jedním z bilionů živých organismů, které jsou schopny podávat řadu těchto výkonů a ještě mnoho dalších, neméně ohromujících.

Dalším pozoruhodným organismem jste samozřejmě vy. Díváte se na noční oblohu a fotony světla vstupují do vašich očí, aby se pomocí sítnice přeměnily do podoby malých elektrických proudů, které se přenášejí vašim optickým nervem, dokud nedosáhnou nervové tkáně mozku. Tam generují třepotavý obrazec nervových impulzů, které zakoušíte jako hvězdy zářící na obloze nad vámi. V tu samou chvíli registrují vláskové buňky vašeho

vnitřního ucha nepatrné změny tlaku o velikosti menší než jedna miliardina tlaku atmosférického a generují signály sluchového nervu, které vás informují, že v korunách stromů šumí vítr. Hrstka molekul vstupujících do nosu je zachycena specializovanými čichovými receptory a jejich chemická identita je předávána do vašeho mozku, což vám sděluje, že je léto a že kvete zimolez. A každý nepatrný pohyb vašeho těla, jak se díváte na hvězdy, posloucháte vítr a čicháte vzduch, je důsledkem koordinované činnosti stovek svalů.

Avšak fyzické výkony předváděné tkáněmi našich těl, jakkoliv mimořádné, blednou ve srovnání s těmi, které provádí mnoho z našich kolegů z říše živých tvorů. Samotářský mravenec je schopen unést náklad vážící třicetkrát více, než je jeho vlastní hmotnost, což odpovídá tomu, kdybyste nesli na zádech auto. A mravenec se sklapovacími kusadly je schopen urychlit pohyb svých čelisti z 0 na 230 km/h za pouhých 0,13 ms, zatímco závodnímu autu ze soutěže Formule 1 trvá dosažení stejné rychlosti asi čtyřicet tisíc krát déle (asi pět sekund). Amazonský elektrický úhoř může vygenerovat potenciálně smrtící elektřinu o napětí 600 voltů. Ptáci mohou létat, ryby umí plavat, červi se dokážou zavrtat a opice se umí přehoupnout ze stromu na strom. A jak jsme už zjistili, mnoho zvířat, včetně naší červenky obecné, dokáže najít svou tisíce kilometrů dlouhou cestu pomocí zemského magnetického pole. Ve schopnostech biosyntézy zatím nic nekonkuruje zelené odrůdě života na Zemi, která montuje dohromady molekuly ze vzduchu a vody (plus několik minerálů), díky čemuž vzniká tráva, duby, mořské řasy, pampelišky, obří sekvoje a lišejníky.

Každý živý organismus má své osobité dovednosti a zvláštnosti, jako jsou například magnetorecepční smysl červenky nebo rychlé chňapnutí mravence se sklapovacími kusadly, ale existuje jeden lidský orgán, jehož výkon nemá obdoby. Výpočetní dovednosti šedé masité hmoty uzavřené v našich kostěných lebkách převyšují schopnosti každého počítače na planetě a stvořily pyramidy, obecnou teorii relativity, *Labutí jezero*, Rgvědu, *Hamleta*, keramiku z dynastie Ming a kačera Donalda. A co je snad

ze všeho nejpozoruhodnější, lidský mozek vykazuje schopnost *vědět*, že sám existuje.

Jenže všechna ta rozmanitost živé hmoty, s jejími nesčetnými formami a nekonečnou řadu funkcí, je do značné míry tvořena ze stejných atomů, jaké se nalézají v úlomcích chondritu z Marsu.

Největší vědecká otázka, která je zásadní pro tuto knihu, zní, jak se inertní atomy a molekuly v horninách každý den transformují do běžajících, skákajících, létajících, navigujících, plavajících, rostoucích, milujících, nenávídících, toužících, strachujících se, myslících, směřících se, plačících, *žijících* hmoty. Tato mimořádná transformace nám připadá známá a všední, ale je třeba připomenout, že ani ve věku genetického inženýrství a syntetické biologie lidé nikdy nevytvořili nic živého výhradně z neživé hmoty. To že se naší technologii dosud nepodařilo zvládnout přeměnu, kterou na naší planetě bez námahy vykonávají i ti nejjednodušší mikrobi, naznačuje, že naše znalosti o tom, co je zapotřebí pro vznik života, jsou neúplné. Přehlédli jsme snad nějakou rozhodující jiskru, která oživuje živé a není přítomna u neživého?

To ovšem neznamená, že budeme tvrdit, že ke vzniku života vede jakási životní síla, duše nebo magická přísada. Náš příběh je daleko zajímavější. Budeme se namísto toho zabývat nedávným výzkumem ukazujícím, že přinejmenším jeden z chybějících kousků ve skládačce života se nalézá ve světě kvantové mechaniky, kde se objekty mohou vyskytovat na dvou místech najednou, navazují záhadná spojení a cestují skrz zjevně neproniknutelné bariéry. Zdá se, že život stojí jednou nohou v klasickém světě každodenních předmětů, zatímco druhá noha se noří do zvláštních a podivných hlubin světa kvantového. Tvrdíme, že život existuje na kvantové hraně.

Ale mohou se červenky, lidé, zvířata, rostliny a mikroorganismy skutečně řídit přírodními zákony, o kterých jsme si doposud mysleli, že popisují pouze chování elementárních částic? Jistěže živé organismy skládající se z bilionů částic jsou makroskopické objekty. Ty, stejně jako fotbalové míče, auta nebo parní vlaky, by mělo být možné dostatečně popsat pomocí klasických