

PRAVDĚPODOBNOST, ČAS A TEPLO ČERNÝCH DĚR

$$S = k \ln W$$

Boltzmannova rovnice vyjadřující termodynamickou entropii pomocí pravděpodobnosti ve statistické fyzice (1875)

Kromě velkých teorií, o kterých jsem tu již hovořil a jež popisují elementární součásti světa, najdeme ve fyzice ještě další velikou pevnost, která se od ostatních poněkud liší. Překvapivě povstala ze zdánlivě prosté otázky: „Co je teplo?“

Až do poloviny devatenáctého století se fyzikové snažili pochopit teplo tak, že o něm uvažovali jako o jistém druhu tekutiny zvané *kalorikum* anebo o dvou tekutinách, jedné horké a druhé studené. Ukázalo se však, že tato myšlenka je zcela chybná. Na věc nakonec přišli James Maxwell a Ludwig Boltzmann. To, co pochopili, bylo velmi krásné, podivné i hluboké – a zavedlo nás to též do oblastí, které jsou dosud z velké části neprobádané.

Přišli na to, že určitá substance není horká proto, že by obsahovala kalorickou tekutinu. Horká je taková substance, jejíž atomy se pohybují rychleji. Atomy a molekuly, malé shluky atomů spojených dohromady, jsou v neustálém neuspořádaném pohybu. Letí vpřed, vibrují, odrážejí se a tak dále. Chladný vzduch je takový, jehož atomy, či spíše molekuly, se pohybují pomaleji. Horký vzduch je takový, jehož molekuly se pohybují rychleji. Tím to však nekončí.

Teplo, jak dobře víme, vždy přestupuje z horkých věcí na věci chladné. Chladná čajová lžička vložená do horkého čaje se zahřeje. Jestliže se za mrazivého dne dobře neoblečeme, brzo ztratíme tělesné teplo a prochladneme. Ale proč teplo přechází z horkých věcí na chladné a nikoli naopak?

To je naprosto zásadní otázka, neboť se dotýká samé podstaty času. Jakmile nedochází ke vzájemné výměně tepla, anebo když je tato výměna zanedbatelná, pozorujeme, že budoucnost se chová úplně stejně jako minulost. Například pro pohyb planet ve sluneční soustavě je předané teplo téměř bezvýznamné a tentýž pohyb by opravdu mohl stejně dobře probíhat i naopak, aniž by došlo k porušení fyzikálních zákonů. Jakmile však do hry vstoupí teplo, budoucnost systému se od jeho minulosti začne lišit. Kdyby na-

příklad nebylo tření, mohlo by kyvadlo kmitat věčně. Kdybychom ho natočili a pustili záznam pozpátku, spatřili bychom pohyb, který je rovněž bez jakýchkoli problémů přípustný. V důsledku tření se však závěs kyvadla mírně zahřívá, tím ztrácí energii a jeho kmity se zmenšují. Tření produkuje teplo. A okamžitě jsme schopni rozlišit budoucnost (do níž se kmity kyvadla zmenšují) od minulosti. Nikdy jsme nespatriili, že by kyvadlo začalo z klidu kmitat tím, že by postupně absorbovalo tepelnou energii ze svých závěsů. Rozdíl mezi minulostí a budoucností existuje jenom tehdy, když do hry vstupuje teplo. Klíčovým jevem, jenž rozlišuje budoucnost od minulosti, je skutečnost, že teplo přechází z teplejších těles na tělesa, která jsou chladnější.

Takže znova: proč s tím, jak plyne čas, přechází teplo z horkých věcí na chladné a nikoli naopak?

Příčinu tohoto jevu objasnil Boltzmann a je překvapivě prostá: *jde čistě jen o náhodu.*

Boltzmannova myšlenka je rafinovaná a do celé problematiky vnáší pravděpodobnost. Teplo nepřechází z horkých věcí na studené kvůli nějakému absolutnímu zákonu, jenž by to prikazoval. Činí tak proto, že je to zkrátka velmi pravděpodobné. Je totiž statisticky pravděpodobnější, že se rychleji pohybující

atom horké substance srazí s chladnějším a předá mu trochu své energie nežli naopak. Při kolizích se celková energie zachovává, ale má tendenci se rovnoměrně rozdělovat na stejné dílky. Tímto procesem se vyrovnává teplota objektů, které jsou ve vzájemném kontaktu. Není nemožné, aby se horké těleso ještě více ohřálo kontaktem se studeným tělesem. Je to však extrémně nepravděpodobné.

Tím se *pravděpodobnost* dostala do samého jádra fyziky a její užití k vysvětlení dynamiky tepla bylo zprvu pokládáno za absurdní postup. Jak tomu často bývá, nikdo nebral Boltzmannova vážně. Dne 5. září 1906 spáchal v Duinu poblíž Terstu sebevraždu oběšením. Nestal se tak svědkem následného všeobecného uznání platnosti svých idejí.

Ve druhé přednášce jsem popsal, kterak kvantová mechanika předpovídá, že pohyb každého maličkého objektu se řídí náhodou. Tím se pravděpodobnost rovněž dostává ke slovu. Avšak pravděpodobnost, kterou měl na mysli Boltzmann a jež tkví v kořenech tepla, je odlišné povahy a na kvantové mechanice nezávisí. Pravděpodobnost hrající roli v teorii tepla je v určitém smyslu spojena s naší *neznalostí*.

Nemusím znát věci s naprostou jistotou, ale mohu jim přiřadit větší či menší míru pravděpodobnosti.

Nevím například, jestli bude tady v Marseille zítra pršet, svítit slunce anebo sněžit, ale pravděpodobnost, že tu zítra bude sněžit – v Marseille v srpnu – je malá. Podobně je tomu i s většinou jiných fyzikálních záležitostí: víme cosi o jejich stavu, nikoli ale všechno, a můžeme proto činit jenom pravděpodobnostní předpovědi. Představte si balon napuštěný vzduchem. Můžu ho proměřit: určit jeho tvar, jeho objem, jeho tlak, jeho teplotu... Ale molekuly vzduchu uvnitř balonu se rychle nahodile hýbou a já neznám přesnou polohu a rychlost každé z nich. Proto nejsem schopěn přesně předpovědět, jak se bude balon chovat. Když například rozvážu uzel a nechám ho s pískotem splasknout, začne poletovat sem a tam způsobem, který nedokážu předvídat. Nedokážu to proto, že znám pouze jeho tvar, objem, tlak a teplotu. Poletování balonu sem a tam závisí na přesné poloze molekul uvnitř něj, kterou však já neznám. Ale i když nedokážu všechno přesně předpovědět, mohu stanovit pravděpodobnost, s jakou se to či ono stane. Například by bylo vysoce nepravděpodobné, aby balon vyletěl z okna, obletěl maják tamhle v dálce, vrátil se a přistál v mé ruce přesně v místě, kde jsem ho vypustil. Některé chování je zkrátka pravděpodobnější, zatímco jiné je nepravděpodobnější.

Ve stejném smyslu lze spočítat pravděpodobnost přechodu tepla z horkého tělesa na chladné, když se spolu srazí. Ukazuje se, že je mnohem větší nežli pravděpodobnost, že teplo přitom přejde z chladného tělesa na teplejší.

Vědní obor, který objasňuje tyto věci, se nazývá statistická fyzika. Jedním z jeho triumfů, počínaje Boltzmannovým dílem, bylo pochopení pravděpodobnostního charakteru tepla a teploty, tedy termodynamiky.

Na první pohled vypadá myšlenka, že naše neznalost může nějakým způsobem souviset s chováním světa, iracionálně: studená lžička se v horkém čaji zahřívá a balon po vypuštění poletuje bez ohledu na to, co o něm já vím anebo nevím. Co má moje znalost či neznalost společného se zákony ovládajícími svět? Tato otázka je legitimní a odpověď na ni rafinovaná.

Lžička i balon se chovají tak, jak musí, podle zákonů fyziky a zcela nezávisle na tom, co o nich my víme anebo nevíme. Predikovatelnost či nepredikovatelnost jejich chování se netýká jejich přesného stavu. Týká se jenom malé množiny jejich vlastností, s nimiž interagujeme. *Tato* množina vlastností závisí na *našem* specifickém způsobu interakce se lžičkou či balonem. Pravděpodobnost se tedy netýká vývoje

samotné hmoty. Týká se vývoje oněch specifických veličin, s nimiž interagujeme my sami. Znova před námi vyvstává hluboká relační povaha pojmů, jež používáme k vlastní organizaci světa.

Studená lžička se v horkém čaji zahřívá, protože čaj i lžička s námi interagují jen skrze omezený počet proměnných, jež jsou poskládány z bezpočtu proměnných, které přesně charakterizují jejich mikrostavy. Hodnoty *těchto* proměnných nestačí k přesnému předpovídání jejich budoucnosti (viz balon), postačují však k dosti spolehlivé předpovědi toho, že se lžička bude zahřívát.

Doufám, že popisem těchto jemných detailů jsem ještě neztratil čtenářovu pozornost...

Během dvacátého století byla termodynamika (tedy nauka o teple) a statistická mechanika (tedy nauka o pravděpodobnosti různých pohybů) úspěšně aplikována i na elektromagnetické a kvantové jevy. Rozšíření na gravitační pole se však ukázalo jako problematické. Chování gravitačního pole při zahřívání je dosud otevřený problém.

Víme, co se děje s horkým elektromagnetickým polem: třeba v troubě je horké elektromagnetické záření, které dokáže upéct koláč, a my to umíme popsat. Elektromagnetické vlny oscilují, náhodně si

předávají energii a tohle všechno si dokážeme představit v podobě plynu fotonů, které se pohybují jako molekuly vzduchu v horkém balonu. Ale co je to horké *gravitační* pole?

Jak jsme viděli v první přednášce, gravitační pole je prostor sám, vlastně prostoročas. Když se tedy teplo rozprostře do gravitačního pole, musí se rozvíbrovat čas i prostor... Stále ale nevíme, jak takovou věc správně popsat. Neznáme rovnice popisující tepelné vibrace horkého prostoročasu. Co to je vibrující čas?

Tyto úvahy nás vedou přímo k jádru problému času: co přesně je *plynutí* času?

Tento problém se vyskytl už v klasické fyzice a filozofové devatenáctého a dvacátého století to zdůraznili – ale v moderní fyzice se stal ještě akutnějším. Fyzika popisuje svět pomocí vzorečků, které nám říkají, jak se věci mění jakožto funkce „času“. Můžeme však napsat i vzorečky, které nám říkají, jak se věci mění vzhledem k jejich „poloze“ anebo jak se mění třeba chuť rizota jakožto funkce „proměnného množství másla“. Zdá se, že čas „plyne“, zatímco množství másla anebo poloha v prostoru „neplynou“. Odkud se bere tento zásadní rozdíl?

Jinou formulací téhož problému je zeptat se: Co je „současnost“? Říkáme, že věci existují jenom v sou-

časné chvíli: minulost už není a budoucnost ještě nenastala. Ve fyzice však nenajdeme nic, co by odpovídalo pojmu „nyní“. Srovnajte si „nyní“ s „tady“. „Tady“ označuje místo, kde se člověk právě nachází: pro dva různé lidi označují body „zde“ dvě různá místa. Význam slova „tady“ proto závisí na tom, kde je vysloveno. Odborný termín pro tento druh slov zní *deiktický výraz*. Slovo „nyní“ se rovněž vztahuje k okamžiku, kdy je vysloveno, a je také klasifikováno jako *deiktické*. Nikoho by však ani ve snu nenapadlo říct, že věci „tady“ existují, zatímco věci, které „tady“ nejsou, neexistují. Proč tedy tvrdíme, že věci „nyní“ existují, ale kdykoli jindy neexistují? Je současnost cosi, co je ve světě kolem nás objektivní, co „plyne“ a co způsobuje, že věci jedna po druhé „existují“, anebo je to jenom subjektivní koncept podobný pojmu „tady“?

Celé to může znít jako nesrozumitelný a ryze intelektuální problém. Avšak moderní fyzika z něj učinila ožehavé téma, neboť speciální relativita ukázala, že i pojem „současnost“ je subjektivní. Fyzikové a filozofové došli k závěru, že představa současnosti, jež by v celém vesmíru byla univerzálně platná, je pouhou iluzí a že též univerzální „plynutí“ času je abstrakcí, která neplatí. Když zemřel Einsteinův velký italský

přítel Michele Besso, napsal Einstein dojemný dopis jeho sestře: „Michele opustil tento podivný svět krátce přede mnou. Nic to neznamena. Lidé jako my, věřící ve fyziku, vědí, že rozdíl mezi minulostí, přítomností a budoucností není ničím jiným nežli neodbytnou, tvrdošijnou iluzí.“

Ať už jde o iluzi či nikoli, jak máme vysvětlit fakt, že čas pro nás „běží“, „plyne“, „pomíjí“? Tok času je nám všem zřejmý: naše myšlenky i naše řeč existují v čase. Sama struktura našeho jazyka plynutí času reflektuje – buď něco „je“ anebo „bylo“ nebo „bude“. Lze si představit svět bez barev, bez hmoty, a dokonce i bez prostoru, ale je obtížné představit si ho bez času. Německý filozof Martin Heidegger zdůrazňoval naše „bydlení v čase“, přebývání v něm. Je možné, aby plynutí času, jež Heidegger pokládal za primární, v popisu světa chybělo?

Někteří filozofové, včetně nejoddanějších Heideggerových stoupců, tvrdí, že fyzika není schopna popsat nejzákladnější aspekty reality, a zavrhnou ji proto coby zavádějící formu poznání. V minulosti se však už mnohokrát prokázalo, že nepřesná je naopak naše bezprostřední intuice: kdybychom u ní setrvali, pořád ještě bychom věřili, že Země je placatá a že Slunce obíhá kolem ní. Naše intuice se vyvinula z na-

šich omezených zkušeností. Podíváme-li se o něco dál, objevíme, že svět není takový, jakým se nám jeví: Země je kulatá a v Kapském Městě mají lidé vůči nám opravdu nohy nahoře a hlavu dole. Věřit jenom bezprostřední intuici spíše nežli kolektivnímu zkoumání světa, jež je racionální, pečlivé a inteligentní, to není moudrost: je to jen domněnka starce, který odmítá uvěřit, že obrovský svět ležící za hranicí jeho vlastní vesnice, je v něčem odlišný od toho, co celý život viděl.

Přestože plynutí času subjektivně vnímáme velice živě, nemusí nutně reflektovat fundamentální aspekt reality. Není-li však fundamentální, kde se bere naše živá osobní zkušenost s plynutím času?

Domnívám se, že odpověď tkví v hluboké souvislosti mezi časem a teplem. Měřitelná odlišnost mezi minulostí a budoucností existuje jenom tehdy, když dochází k přestupu tepla. Teplo souvisí s pravděpodobností. A pravděpodobnost je spojena s faktem, že naše interakce se zbytkem světa nezaznamenává všechny detaily reality. Plynutí času se tím vynořuje z fyziky, nikoli však v kontextu přesného popisu věcí, jaké jsou. Vynořuje se spíše v kontextu statistiky a termodynamiky. V tom může být hlavní klíč k tajemství času. „Současnost“ neexistuje v objektivním smyslu

o nic více nežli pojem „tady“, ale mikroskopické interakce ve světě způsobují časované jevy, vynořují se v systému (třeba v nás), jenž navzájem interaguje prostřednictvím bezpočtu proměnných.

Naše paměť i naše vědomí stojí na těchto statistických jevech. Pro hypotetickou bytost s nesmírně citlivým vnímáním by čas „neplynul“: vesmír by pro ni byl jednolitým blokem minulosti, přítomnosti a budoucnosti. Kvůli omezenosti našeho vědomí však vnímáme jenom rozostřený obraz světa, a proto žijeme v čase. Abych parafrázoval svého italského vydavatele: „Co není zjevné, je mnohem rozsáhlejší nežli to, co zjevné je.“ Z tohoto omezeného, rozmazaného obrazu světa vzniká naše vnímání toku času. Je to jasné? Ne, není. Zbývá nám toho pochopit ještě spoustu.

Čas tkví v samém srdci spleti problémů, jež nacházíme na průsečíku gravitace, kvantové mechaniky a termodynamiky. Spleti problémů, ve které se stále ještě nevyznáme. Snad začínáme čemusi rozumět v kvantové gravitaci, jež kombinuje dva ze tří dílů této skládačky, ale nemáme zatím teorii, která by dokázala spojit dohromady všechny tři fundamentální oblasti našeho poznání světa.

Jedním z dílčích klíčů k řešení je výpočet, který provedl Stephen Hawking, fyzik známý tím, že ve

špičkovém fyzikálním výzkumu pokračoval i přesto, že ho stále horší zdravotní stav upoutal na kolečkové křeslo a znemožnil mu mluvit bez mechanických přístrojů.

Pomocí kvantové mechaniky Hawking úspěšně ukázal, že černé díry vždy obsahují „teplo“. Vysílají teplo podobně jako pec. Je to první konkrétní projev povahy „horkého prostoru“. Nikdo nikdy toto tepelné záření nespatriil, protože pro reálné černé díry, které jsme dosud identifikovali, je nesmírně slabé. Ale Hawkingův výpočet je přesvědčivý a byl různými způsoby zopakován. Reálnost tepla černých děr je všeobecně přijímaný fakt.

Teplo černých děr je kvantový jev objektů, které jsou ze své podstaty ryze gravitační. Jsou to samotná kvanta prostoru, jeho elementární zrnka, vibrující „molekuly“ prostoru, jež ohřívají hranici černých děr a produkují jejich teplo. Tento jev v sobě zahrnuje všechny tři aspekty problému: kvantovou mechaniku, obecnou relativitu a nauku o teple. Teplo černých děr je cosi jako Rosettská deska fyziky, zapsaná kombinací tří různých jazyků - kvantového, gravitačního a termodynamického. Stále ještě ale čeká na své rozluštění, které nám odhalí pravou podstatu času.