

Edice Kolumbus - poslední vyšlé svazky: S. J. Gould, Pandin palec - A. Bejblik, Život a dílo renesančního kavalíra - L. Thomas, Myšlenky pozdě v noci - K. Mejdříčková, Listy ze stromu svobody - I. Novikov, Černé díry a vesmír - L. N. Skrjagin, Tajemství námořních katastrof - Z. Kopal, O hvězdách a lidech - J. Macek, Tři ženy krále Vladislava - S. W. Hawking, Stručná historie času - K. Lorenz, Takzvané zlo - Z. Smetánka, Legenda o Ostojovi - M. Shostaková, Nisa, dcera Kungů - V. Vlnas, Jan Nepomucký - J. Lovelock, Gaia, živoucí planeta - I. Čornejová, Tovaryšstvo Ježíšovo - S. Hawking, Černé díry a budoucnost vesmíru - G. B. Schaller, Mlčící kameny - J. D. Barrow, Teorie všeho - V. a M. Hrochovi, Křížáci ve Svaté zemi - J. Grygar, Vesmír, jaký je - F. Crick, Věda hledá duši - F. Kavka, Poslední Lucemburk na českém trůně - S. Weinberg, První tři minuty - K. Spindler, Muž z ledovce - F. Kavka, Karel IV. - R. Dawkins, Sobecký gen - M. Lenderová, K hříchu i k modlitbě - E. Melmuková, Patent zvaný toleranční

Příští svazek:

Reinhold Messner, Yetti

Doporučená cena 189 Kč včetně DPH

Cena pro členy LK 159 Kč včetně DPH



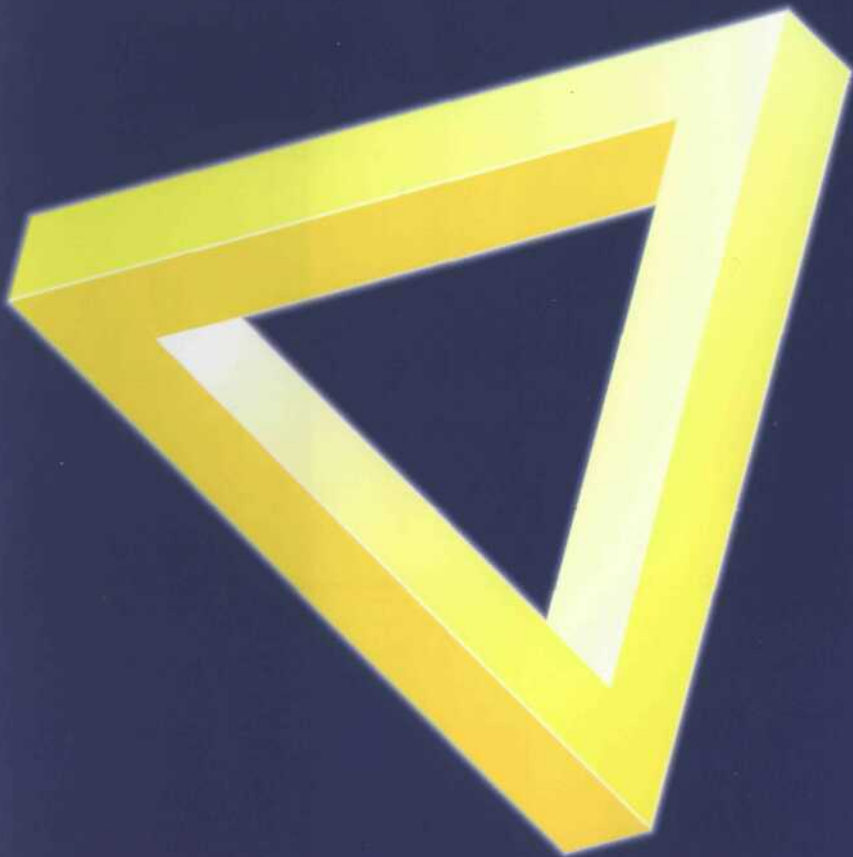
ROGER PENROSE
Makrosvět, mikrosvět a lidská mysl

ROGER PENROSE

Makrosvět, mikrosvět a lidská mysl



EDICE KOLUMBUS



Roger Penrose

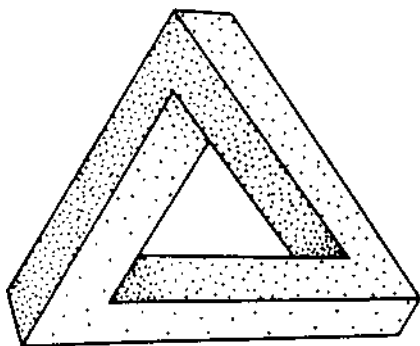
MAKROSVET, MIKROSVET
A LIDSKÁ MYSL

ABNER SHIMONY

NANCY CARTWRIGHTOVÁ

STEPHEN HAWKING

SESTAVIL MALCOM LONGAIR



MLADÁ FRONTA

*Nakladatelství Cambridge University Press děkuje za spolupráci
prezidentovi a členům cambridgeské Clare Hall,
pod jejichž záštitou se konaly v roce 1995 tannerovské přednášky
o lidských hodnotách, na nichž je kniha založena.*

© Cambridge University Press 1997
Translation © Jiří Langer, 1999

ISBN 80-204-0780-4

Předmluva

MALCOM LONGAIR

Jedním ze světlých jevů posledního desetiletí je, že se objevily knihy, v nichž se řada významných vědců pokouší sdělit laikům základní myšlenky svého oboru a podělit se spolu s nimi o radost a vzrušení, které jim vědecká práce přináší. Nejvýznačnějšími příklady takových děl jsou asi *Stručná historie času* Stephena Hawkinga, jejíž nakladatelský úspěch vstoupil do historie, *Chaos* Jamese Gleicka, kniha, která ukazuje, jak je možné velmi obtížnou látku podat s napínavostí detektivky, a *Snění o finální teorii* Slevena Weinberga, podivuhodně zpřístupňující výsledky a cíle současné fyziky elementárních částic.*

V této vlně popularizace zaujímá kniha Rogera Penrose *The Emperor's New Mind (Císařova nová mysl)* z roku 1989 postavení značně odlišné. Zatímco se ostatní autoři snaží čtenářům vyložit obsah současné vědy a podělit se s nimi o její krásu, Penroseova kniha je originální vizí, jak by se mohly různorodé aspekty fyziky, matematiky, biologie a vědy o vědomí sjednotit v nové, dosud nevytvořené teorii fundamentálních jevů. Není divu, že toto dílo vzbudilo řadu kontroverzních diskusí. Proto v roce 1994 vydal Penrose další knihu, *Shadows of the Mind (Stíny mysli)*, v níž se snažil vyrovnat s kritikou svých vývodů a poskytnout vhled do svých dále rozvinutých myšlenek. V sérii svých tannerovských přednášek v roce 1995 předložil přehled základních témat těchto dvou svých knih a pak veřejně diskutoval s Abnerem Shimonym, Nancy Cartwrightovou a Stephenem Hawkingem. Přednášky tvořící první tři kapitoly této knihy předkládají jádro jeho myšlenek, mnohem podrobněji vyložených ve dvou knihách předchozích. Příspěvky diskutujících, které tvoří tři kapitoly následující, shrnují řadu námitek, které byly proti Penroseovým myšlenkám vzneseny. V sedmé kapitole na ně Penrose odpovídá.

*1 Všechny knihy vyšly v českém překladu viz seznam literatury na konci knihy (pozn. překl.).

Penroseovy kapitoly sice hovoří dostatečně samy za sebe, několik úvodních slov může přece jen připravit scénu pro jeho zvláštní přístup k nejhlubším problémům současné vědy. Penrose je pokládán za jednoho z nejnadanějších světově uznávaných matematiků, ale hlavním předmětem jeho vědeckého zájmu byla problematika s fyzikální motivací. V astrofyzice a kosmologii vděčí za svůj věhlas řadě matematických vět z oblasti relativistické teorie gravitace. Na některých těchto problémech s ním spolupracoval Stephen Hawking. Jedna z vět, které dokázal, tvrdí, že podle klasické relativistické teorie gravitace, tj. obecné teorie relativity, musí být nevyhnutelně uvnitř černé díry fyzikální singularita, tj. oblast prostoročasu, kde prostorová křivost (nebo ekvivalentně hustota hmoty) nabývá nekonečných hodnot. Další jeho věta říká, že podle obecné teorie relativity je podobná fyzikální singularita v počátku kosmologických modelů s velkým třeskem. Tyto výsledky naznačují, že tyto teorie jsou v určitém smyslu závažně neúplné, protože každá rozumná fyzikální teorie se snaží singularity vyloučit.

To je ale jenom jedna z ukázek bohaté sbírky jeho výsledků z různých oblastí matematiky a matematické fyziky. Penroseovým procesem se nazývá ve fyzice mechanismus, jímž může částice získávat energii tak, že ji odebírá rotující černé díře. Při studiu chování hmoty v blízkosti černé díry i v řadě dalších problémů obecné relativity se užívá Penroseových diagramů. Penroseův přístup k většině problémů je podložen hlubokým smyslem pro geometrii a schopností převést tvrzení téměř do obrázkové podoby, o čemž vás ostatně přesvědčí i tato kniha. Laická veřejnost je s jeho dílem obeznámena především díky „nemožným“ obrazům Moritze C. Eschera a Penroseově dlažbě.

Je pozoruhodné, že to byly právě Penroseovy články a práce jeho otce L. S. Penrose, které se staly zdrojem inspirace pro řadu fischemických „nemožných“ kreseb. Escherova „Kruhová limita“ demonstruje v první kapitole nadšení Rogera Penrose pro hyperbolické geometrie.

Penroseovy dlažby jsou pozoruhodné geometrické konstrukce, pomocí nichž lze nekonečnou rovinu plně vydláždít několika málo druhy dlaždic různých tvarů. Nejpodivnějšími příklady jsou takové dlažby, které sice plně pokrývají nekonečnou rovinu, ale vzorek dláždění se nikde neopakuje. Tohoto tématu se dotýká kapitola třetí v souvislosti s otázkou, je-li určitou přesně definovanou sadu matematických operací schopen provést počítač.

Penrose tak přichází na pole nejhlubších problémů moderní fyziky s obdivuhodnou matematickou výzbrojí, provázen pověstí o svých úspěších jak v matematice, tak ve fyzice. O tom, že jde o skutečné a závaž-

ne problémy, nemůže být pochyb. Kosmologové mají dobré důvody věřit, že velký třesk je ten nejlepší obraz, který může vystihnout vlastnosti vesmíru ve velkém. Tento obraz ovšem trpí neúplností, a to hned v několika směrech. Většina kosmologů je přesvědčena, že dobře rozumíme fundamentální fyzice, kterou potřebujeme ke studiu globálních vlastností vesmíru mezi časem, kdy vesmír byl starý asi tisícinu sekundy, a dneškem. Obraz vesmíru v modelech s velkým třeskem však odpovídá pozorování pouze tehdy, nastavíme-li velmi pečlivě počáteční podmínky. Potíž je v tom, že jakmile chceme zkoumat vesmír v období před tou tisícinou sekundy, dostaneme se z oblasti ověřené fyziky a musíme se spoléhat na rozumnou extrapolaci známých fyzikálních zákonů. Víme s dost velkou jistotou, jak počáteční podmínky musely vypadat, ale proč takto vypadaly, je polem pro spekulace. Panuje obecná shoda, že jde o jeden z nejdůležitějších problémů současné kosmologie.

Standardním přístupem, v jehož rámci se snaží vědci zodpovědět tuto otázku, je inflační obraz raného vesmíru. Podle tohoto schématu se předpokládá, že za některé rysy vděčí náš vesmír tomu nejranějšímu období, Planckově epoše, kdy by se měla podstatně uplatňovat kvantová teorie gravitace. Planckova éra skončila, když byl vesmír starý pouze 10^{-43} sekundy. Takové úvahy se mohou zdát velmi odvážné, ale na základě dnešních znalostí jsme je nuceni brát vážně.

Roger Penrose přijímá konvenční obraz velkého třesku v takovém rozsahu, jak je to jen možné, inflační obraz nejranějšího období však odmítá. Tvrdí, že se zde uplatňuje jakási nová fyzika spojená se správnou kvantovou teorií gravitace, teorií, kterou dosud nemáme, třebaže se ji teoretičtí fyzikové snaží budovat už celou řadu let. Penrose však tvrdí, že se snažili vyřešit chybně postavený problém. Část jeho úvah je ovlivněna problémem entropie vesmíru jako celku. Protože entropie - nebo řečeno jednodušeji neuspořádanost - uzavřeného systému roste s časem, vesmír se musel začít vyvíjet z vysoce uspořádaného stavu, tedy stavu s entropií velice nízkou. Pravděpodobnost, že to bylo otázkou náhody, je zanedbatelně malá. Penrose uvádí důvody pro své přesvědčení, že tento problém vyřeší správná teorie kvantové gravitace.

Nutnost kvantovat gravitaci jej v druhé kapitole vede k rozboru problémů kvantové fyziky. Kvantová mechanika a její relativistické rozšíření v kvantové teorii pole byly fenomenologicky úspěšné při výkladu mnoha experimentálních výsledků ve fyzice elementárních částic a při výkladu vlastností atomů a molekul. Uběhla však řada let, než byl oceněn její plný fyzikální význam. Penrose ve svých přednáškách krásně

ilustruje, že ve struktuře této teorie je řada neintuitivních rysů, jímž neodpovídá nic podobného v klasické fyzice. Fenomén nelokality například znamená, že když se vytvoří pár částice-antičástice, každá z částic si zachová „vzpomínku“ na proces, jímž vznikla, v tom smyslu, že jedna nemůže být pokládána za zcela nezávislou na druhé. Penroseovými slovy: „Kvantová provázanost je velmi podivná věc. Znamená něco mezi plnou osamoceností a vzájemnou komunikací mezi objekty.“ Kvantová mechanika dovoluje též získat informace o procesech, které mohly nastat, ale nenastaly. Nejprekvapivějším příkladem, na kterém Penrose ukazuje, jak rozdílná je klasická a kvantová mechanika, je Elitzurův a Vaidmanův problém testování bomby.

Tyto neintuitivní rysy kvantové mechaniky jsou součástí její struktury. Kvantová teorie však obsahuje ještě daleko hlubší problémy. Roger Penrose se soustřeďuje zejména na způsob, jakým spojujeme jevy na kvantové úrovni s makroskopickým pozorováním při měření prováděném na kvantovém systému. Je to rozporuplná část teorie. Převážné části fyziků prostě slouží pravidla kvantové mechaniky jako výpočetní nástroj, který dává podivuhodně přesné výsledky srovnatelné s pozorováním. Pokud se tato pravidla použijí správně, získáváme správné odpovědi. Součástí tohoto postupu je však poněkud neelegantní procedura zobrazující jevy z jednoduchého lineárního světa kvantové teorie do světa skutečných experimentů, ve které vystupuje „kolaps vlnové funkce“ či „redukce stavového vektoru“. Penrose věří, že v konvenční kvantové mechanice chybí jakýsi fundamentální článek. Tvrdí, že potřebujeme zcela novou teorii, jejíž integrální součástí by bylo to, co nazývá „objektivní redukcí vlnové funkce“. Ve vhodném přiblížení musí tato teorie vést k obvyklé kvantové mechanice a kvantové teorii pole, pravděpodobně by však z ní mely vyplynout nové fyzikální jevy. Tato teorie by měla být řešením otázky kvantové teorie gravitace a měla by být rozhodující pro fyziku raného vesmíru.

Ve třetí kapitole se Roger Penrose snaží odhalit spojitosti mezi matematikou, fyzikou a lidskou myslí. Je překvapující, že některé úvahy ani té nejpřísněji logické disciplíny mezi vědami, abstraktní matematiky, nemohou být naprogramovány do digitálního počítače, byť by jeho paměť byla sebevětší. Počítač neumí odhalovat matematické pravdy způsobem, jakým to činí živi matematici. Tento udivující závěr je důsledkem jedné z variant Godelovy věty. Penrose tuto skutečnost vysvětluje tak, že proces matematického myšlení probíhá „nevýpočetním způsobem“, a tento závěr rozšiřuje na veškeré myšlení a vědomé chování. To se jeví jako velmi plodný klíč k problému vědomí, protože naše intuice

nám říká, že velká část našich vjemů má obdobně „nevýpočetní“ charakter. Právě tento závěr je základem jeho další argumentace, a proto více jak polovinu knihy *Shadows of the Mind* věnuje dokazování správnosti své interpretace Gódelovy věty.

Podle Penroseovy představy problémy kvantové mechaniky a problém, jak porozumět vědomí, spolu úzce souvisejí. Nelokalita a kvantová koherence dávají v principu možnost, jak by mohly koherentně pracovat velké oblasti mozku. Nevýpočetní aspekty vědomí by podle jeho předpokladu mohly být spojeny s nevýpočetním charakterem procesu objektivní redukce vlnové funkce k makroskopicky pozorovatelným veličinám. Nespokojuje se však jen s formulací obecných principů, nýbrž se snaží i identifikovat v mozku ty struktury, v nichž by se tyto nové druhy fyzikálních procesů mohly uskutečňovat.

Toto shrnutí však jen nedostatečně naznačuje originalitu a plodnost Penroseových myšlenek a oslnivost způsobu, jakým je v knize rozvíjí. Ve výkladu je několik základních témat určujících směr Jímž se autorovy myšlenky ubírají. Snad nejdůležitějším je pozoruhodná schopnost matematiky popisovat přirozený svět. Penrose to vyjadřuje tak, že fyzikální svět se v nějakém smyslu vynořuje z platónského světa matematiky. Ale nová matematika nevzniká z potřeby popsat svět a dosáhnout shody matematicky formulovaných pravidel s experimenty a pozorováním. Pochopení struktury světa může vyplynout z velmi obecných principů a matematiky samé.

Není divu, že se tyto Penroseovy odvážné myšlenky setkaly s rozpornými reakcemi. Duch námitek, vznášených odborníky s různým intelektuálním zázemím, ochucuje tuto knihu prostřednictvím příspěvků diskutujících. Abner Shimony souhlasí s Penrosem v řadě otázek - i on je toho názoru, že standardní formulace kvantové mechaniky je neúplná, a přijímá i myšlenku, že kvantová mechanika je důležitá pro pochopení lidské mysli. Zároveň však prohlašuje, že Penrose je „horolezec, který se pokusil vystoupit na nesprávnou horu“, a dává určité konstruktivní návrhy, jak se podívat na tutéž oblast alternativním způsobem. Nancy Cartwrightová klade zásadní otázku, zdaje tím správným východním bodem pro porozumění povaze vědomí právě fyzika. Dotýká se také ožehavého problému - v jakém smyslu mohou být zákony, které vládou v různých vědeckých disciplínách, odvozeny jedny z druhých. Nejkritičtěji ze všech diskutujících však vystupuje Stephen Hawking, Penroseův starý přítel a spolupracovník. Jeho postoj odpovídá v řadě ohledů tomu, co bychom mohli nazvat postojem „řadového“ fyzika, tedy postoji sdílenému většinou fyziků pracujících v této oblasti. Haw-

king vyzývá Rogera Penrose, aby vypracoval detailní teorii objektivní redukce vlnové funkce. Popírá, že fyzika má podstatnou hodnotu pro uchopení problému vědomí. Všechny vznesené námitky mají určité dobré opodstatnění, nicméně v poslední kapitole Penrose brání svůj názor proti těmto námitkám.

Penroseovi se podařilo vytvořit vizi či manifest deklarující, jakým směrem by matematická fyzika mohla vykročit v 21. století. V prvních třech kapitolách kreslí obraz základů současné fyziky a ukazuje, jak by mohly zapadnout do fyziky nového typu, do fyziky, která by respektovala to, na co klade základní důraz - měla by nevýpočetní charakter a zahrnovala by objektivní redukci vlnové funkce. Konečným testem těchto myšlenek zajisté bude, zda se Rogeru Penroseovi a ostatním opravdu podaří takový program realizovat. Avšak i kdyby tento program okamžitě úspěšný nebyl, nebudou v něm obsažené myšlenky plodné pro další vývoj fyziky a matematiky? Velice by mě udivilo, kdyby odpověď byla záporná.

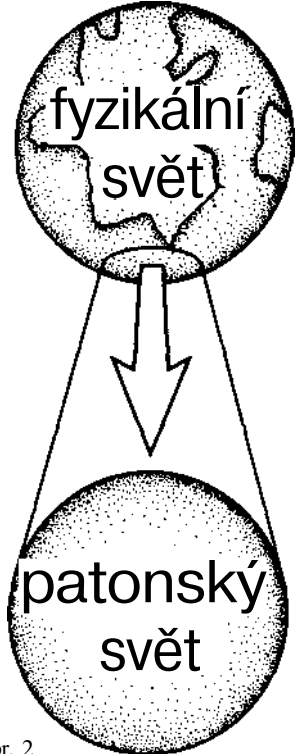
PROSTOROČAS A KOSMOLOGIE

Tato kniha nese název *Makrosvět, mikrosvět a lidská mysl*. První kapitola spolu s kapitolou následující pojednávají o našem fyzikálním vesmíru, který jsem schematicky znázornil na obrázku 1 jako kouli. Nebudou to však „botanické“ kapitoly, které by detailně popisovaly, co se kde v našem vesmíru nachází. Soustředím se v nich na výklad zákonů, jimiž se chod světa řídí. Jedním z důvodů, proč jsem rozbor fyzikálních zákonů rozdělil do dvou kapitol, jedné o „velkém“ a druhé o „malém“, je skutečnost, že zákony popisující chování světa velkých měřítek a zákony světa měřítek velmi malých se zdají být značně rozdílné. Jak sladit to, co se zdá být tak různé, je hlavním tématem kapitoly třetí. A právě zde vstupuje do naší diskuse lidská mysl. [„Physical“ překládám převážně „fyzikální“ - viz doslov.]

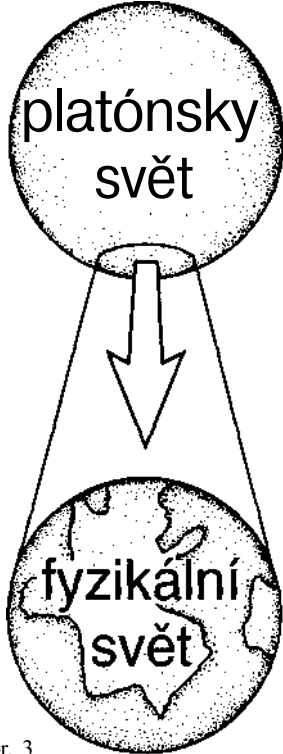


Obr.1

Protože budu mluvit o fyzikálním světě v jazyce teorií, které podkládají jeho chování, budu se muset zmínit i o světě jiném, o platónském světě absolutního, speciálně o světě matematické pravdy. Byť lze při-



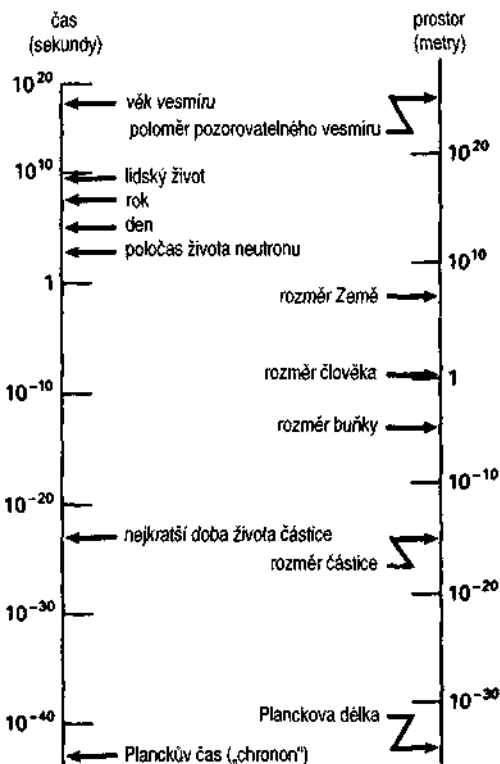
Obr. 2



Obr. 3

jmout též stanovisko, že „platónský svět“ obsahuje i jiná absolutna, jako je Dobro či Krásno, mne však bude zajímat pouze absolutno platónské matematiky. Některým lidem přijde zatěžko přiznat tomuto světu jeho samostatnou existenci, neboť na matematické pojmy pohlíží pouze jako na idealizaci našeho fyzikálního světa, a proto matematický svět chápou jako něco, co se vynořuje ze světa fyzikálního (obr. 2).

Takto se ale já na matematiku nedívám a myslím si, že tak na ni nepohlíží ani většina ostatních matematiků či matematických fyziků. Pojímají ji zcela jiným způsobem, jako strukturu ovládanou nadčasovými matematickými zákony. Proto je pro ně přirozenější chápat naopak fyzikální svět jako něco, co se vynořuje z („nadčasového“) světa matematiky, jak je znázorněno na obrázku 3. Tento obrázek bude důležitý pro to, o čem budu hovořit ve třetí kapitole, a ilustruje ve skutečnosti i většinu toho, co řeknu v prvních dvou kapitolách.



Obr. 4 Prostorová a časová měřítka ve vesmíru.

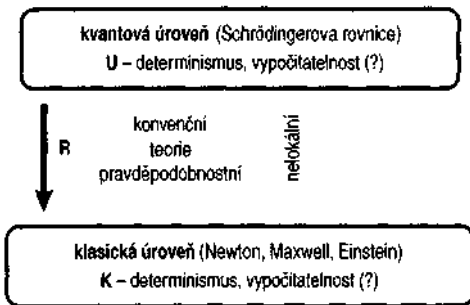
Jednou z pozoruhodných věcí na chování našeho světa je, s jakou neobyčejnou přesností mu vládou matematické zákony. Čím více se seznamujeme s fyzickým světem a čím hlouběji pronikáme do přírodních zákonů, tím více se nás zmocňuje dojem, že fyzický, či fyzikální svět se jaksí vypařuje a zůstává pouhá matematika. Čím hlubšího porozumění fyzikálním zákonům dosahujeme, tím více jsme pohlcováni světem matematiky a matematických pojmů.

Podívejme se na měřítka, která vystupují v popisu našeho vesmíru, a na naše postavení v něm. Tato měřítka jsem znázornil v jediném grafu na obrázku 4. Na levé straně je vyznačena časová škála a na straně pravé naopak měřítka prostorová. Na samém dně grafu nalevo vidíte nejmenší časový úsek, který má fyzikální smysl. Tento úsek má hodnotu 10^{-43} sekundy a často se o něm hovoří jako o *Planckově času* nebo

o *chrononu*. Jde o časový úsek nepředstavitelně kratší než jakýkoli jiný časový interval, s nímž se setkáme v částicové fyzice. Například rezonance, částice s nejkratší dobou života, se rozpadají za 10^{-23} sekundy. Značně výše je v diagramu vyznačena délka dne a roku a skoro nahoře vidíme současný věk vesmíru. (Graf je ovšem vynesena v logaritmické stupnici, takže například to, že mezi jednou sekundou a jedním rokem je v grafu zhruba stejná vzdálenost jako mezi rokem a stářím vesmíru, odpovídá tomu, že vesmír je starší než 10 miliard let.)

Na pravé straně grafu jsou naopak vyznačeny vzdálenosti, které odpovídají časovým intervalům na straně levé. Planckovu času či „elementárnímu kvantu času“, *chrononu*, je přiřazena *Planckova délka*. Pojmy Planckův čas a Planckova délka se přirozeně objeví jako základní veličiny v teorii, která se snaží spojit fyzikální teorie „velkého“ a „malého“, tj. Einsteinovu obecnou teorii relativity, popisující svět velkých rozměrů, a kvantovou mechaniku, popisující mikrosvět. Z levé strany diagramu na pravou se dostaneme tak, že příslušný časový úsek vynásobíme rychlostí světla, tedy rychlostí přibližně 300 000 kilometrů za sekundu či $3 \cdot 10^8$ metrů za sekundu, jinak řečeno, když určíme prostorový úsek, jež za příslušný čas světlo urazí.

Fyzikální objekty znázorněné v grafu dosahují rozměrů od 10^{-15} metru, což je charakteristický rozměr částice, až k hodnotě 10^{27} metrů, odpovídající poloměru pozorovatelného vesmíru v dnešní době, což je zhruba současný věk vesmíru vynásobený rychlostí světla. Jistě nás zajímá, kde se v diagramu nacházíme my, jaká měřítko odpovídají lidským bytostem. Co se týče rozměrů délkových, vidíme, že se nacházíme zhruba uprostřed osy diagramu. Jsme nepředstavitelně obrovští ve srovnání s Planckovou délkou, jsme nesmírně velcí i v porovnání s rozměrem částic. Proti rozměrům pozorovatelného vesmíru jsme naopak velmi nepatrní. Ve srovnání s tímto rozměrem jsme dokonce mnohem nepatrnější, než kolikrát naše velikost překonává rozměr částic. Co se však týče časové škály, je lidský život téměř tak dlouhý jako život vesmíru! Často se mluví o prchavosti naší existence, / grafu však vidíme, že žijeme „skoro stejně dlouho“, jako existuje vesmír. Samozřejmě, v grafu je to dáno tím, že je nakreslen v „logaritmickém měřítku“, takže věk vesmíru se jeví srovnatelný s dobou našeho pobývání na naší planetě, přestože je ve skutečnosti přibližně 200milionkrát větší. Logaritmická stupnice je však přirozená, pokud hovoříme o tak obrovských rozpětích. Vyjádřím-li svou myšlenku jinak, počet lidských životů, který by poskládal věk vesmíru, je mnohem a mnohem menší než počet Planckových časů, či dokonce i nejkratších dob života částic, které se vejdou do délky lidského života.

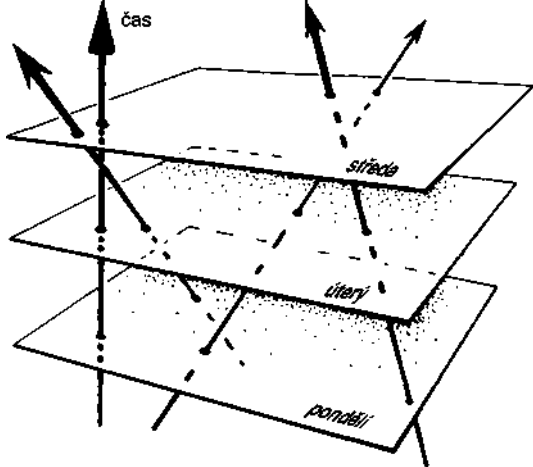


Obr. 5

Jaká fyzika se uplatňuje v těchto rozdílných měřítkách? Podívejme se na obrázek 5, znázorňující fyziku jako celek. Musel jsem zde samozřejmě pominout takové detaily, jako jsou matematické rovnice. Základní teorie, s nimiž fyzikové pracují, jsou tu však zachyceny.

Klíčovým bodem je, že fyzika užívá dvou velmi rozdílných postupů. K popisu chování ve velmi malých měřítkách slouží kvantová mechanika; to jsem v grafu 5 označil jako „kvantovou úroveň“. O kvantové mechanice se říká, že obsahuje neurčitost a je indeterministická, ale to není pravda. Pokud zůstáváte na kvantové úrovni, je kvantová mechanika deterministická a dává zcela přesné jednoznačné výsledky. Ve své nejnámější formulaci vypadá kvantová mechanika tak, že vývoj systému je popsán rovnicí zvanou Schrödingerova. Tato rovnice plně popisuje chování fyzikálního stavu kvantového systému, *kvantového stavu*, a je plně deterministická. K vyznačení aktivity na kvantové úrovni mi posloužilo písmeno „U“. Indeterminismus se do kvantové mechaniky dostává teprve v okamžiku, kdy „provedeme měření“; součástí procesu měření je však „zvětšení“ z kvantové úrovně na klasickou procesem R. (O tom si povíme podstatně více ve druhé kapitole.)

Chování na velkých měřítkách určuje klasická fyzika, která je též plně deterministická. Sem patří Newtonovy pohybové zákony i Maxwellovy rovnice elektromagnetického pole, popisující elektřinu, magnetismus i světlo. Dále sem náleží Einsteinovy teorie relativity, speciální, která se uplatňuje při velkých rychlostech, a obecná, jež se uplatní v silných gravitačních polích. [Zdůrazněme, že však nejde o nezávislé teorie, které platí v různých oblastech. Obecná teorie relativity zahrnuje speciální teorii relativity jako přiblížení, které platí právě ve slabých gravitačních polích, právě tak jako newtonovská fyzika je dobrým přiblížením speciální relativity při malých rychlostech a slabém gravitačním poli. Maxwellovská elektrodynamika je zabudována jak do speciál-



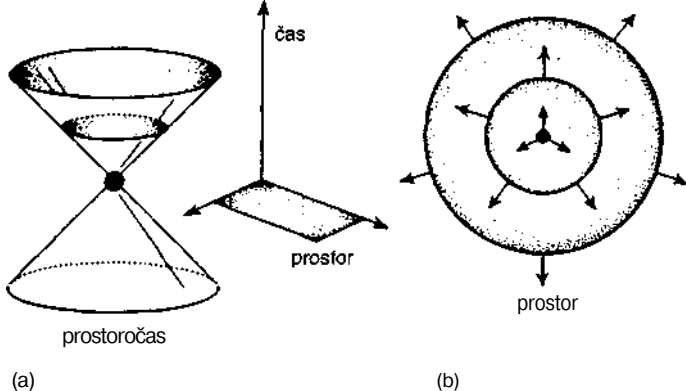
Obr. 6 Galileiovský prostor a čas: přímky představují historii rovnoměrně přímočaře se pohybujících částic.

ní, tak do obecné teorie relativity.] Na velkých měřítkách dávají tyto teorie velice přesné předpovědi.

Ještě si povšimněte, že jsem v obrázku 5 udělal poznámku o vypočitatelnosti v kvantové a klasické fyzice. Tato otázka není důležitá pro obsah této ani následující kapitoly, bude však velmi podstatná v kapitole třetí; tam se také podrobně vrátíme k jejímu smyslu.

Teď nás bude zajímat především Einsteinova teorie relativity. Všimneme si, jak tato teorie funguje, poukážeme na její neobyčejně dobrou shodu s pozorováním a řekneme si něco obecně o eleganci fyzikálních teorií. Nejdříve se však podívejme na teorii Newtonovu. Stejně jako teorie relativity i newtonovská teorie dovoluje prostoročasový popis. Jako první formuloval Newtonovu teorii prostoročasově Elie Cartan, nějakou dobu poté, co Albert Einstein předložil svou obecnou teorii relativity. Galileiho a Newtonovu fyziku lze vyjádřit prostoročasovým grafem s globální časovou souřadnicí. (Jejich odlišnost od teorie relativity spočívá právě ve skutečnosti, že takovýto globální čas lze zavést.) V obrázku 6 tato souřadnice směřuje nahoru. Každá konstantní hodnota času vymezuje prostorový řez - trojrozměrný euklidovský prostor. Podstatným rysem newtonovského prostoročasu je, že každý z těchto řezů reprezentuje jednoznačně určenou současnost.

Tak cokoli se stane v pondělí v poledne, se zobrazí v našem grafu na

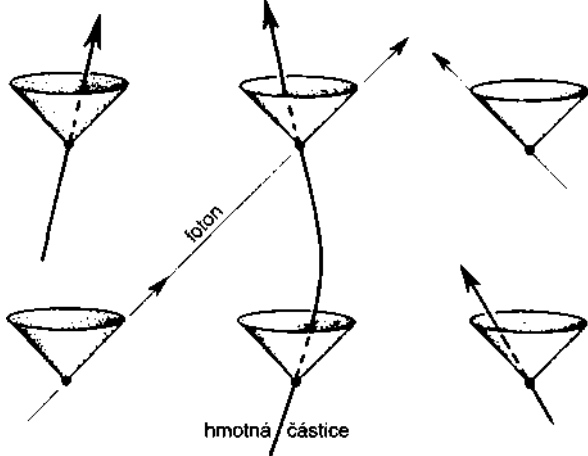


Obr. 7 Historie světelného záblesku, znázorněná (a) v prostoročasu, (b) v prostoru.

jednom určitém řezu. Události úterního poledne leží na dalším řezu o stupínek výše atd. Řezy konstantního času napříč prostoročasového diagramu následují jeden za druhým tak, jak čas ubíhá. Všichni pozorovatelé bez ohledu na to, jak se prostoročasem pohybují, se shodnou na tom, ve kterém čase určitá událost nastala, protože všichni užívají týchž řezů, jimiž měří, jak čas plyne.

Podle Einsteinovy speciální teorii relativity musíme však přijmout jiný obraz. Podle tohoto obrazu jsou prostoročasové diagramy zcela zásadní věci. Základní rozdíl proti obrazu newtonovskému spočívá v tom, že zde čas není univerzální veličinou. Abychom si jasně uvědomili, v čem tento rozdíl tkví, musíme pochopit význam základní struktury v teorii relativity - *světelných kuželů*.

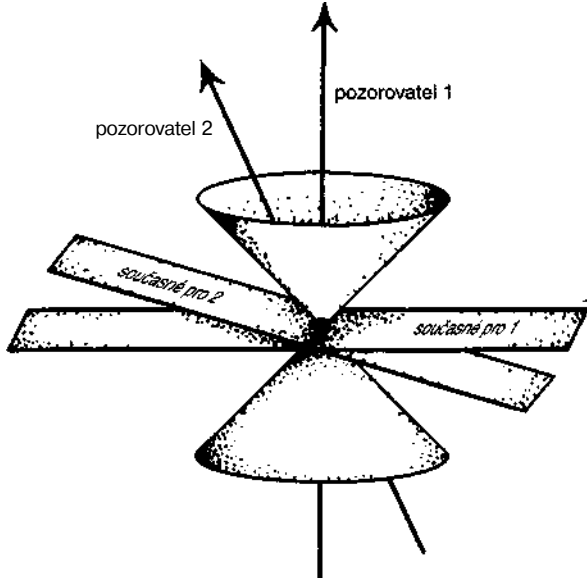
Co je to světelný kužel? Jeden takový světelný kužel je znázorněn na obrázku 7. Představme si světelný záblesk, který vznikl v určitém bodě v určitém okamžiku; jeho vznik představuje *prostoročasnou událost*. Z místa záblesku se na všechny strany šíří rychlostí světla světelné vlny; událost je tak zdrojem záblesku. Chceme-li zobrazit dráhu světla v čistě prostorovém obrázku, musíme znázornit kulovou plochu, která se rozpíná rychlostí světla, tedy nakreslit sérii kulových ploch o větším a větším poloměru (obr. 7(b)). Lépe to vystihneme v prostoročasovém diagramu (obr. 7(a)), v němž časová osa směřuje vzhůru a horizontální souřadnice odpovídají prostorovému posunu tak jako na předchozím, newtonovském obrázku (6). Bohužel v prostoročasovém diagramu 7(a)



Obr. 8 Pohyb částice v prostoročasu speciální teorie relativity, o němž se hovoří jako o prostoročasu Minkowského či Minkowského geometrii. V různých bodech prostoročasu jsou zakresleny světelné kužele; částice se mohou pohybovat pouze ve svých budoucích světelných kuželích.

můžeme nakreslit pouze dvě prostorové osy, protože třetí dimenze nám posloužila na znázornění osy časové; znázorněný prostoročas je tedy pouze tří- a ne čtyřrozměrný. V tomto grafu je záblesk (událost) znázorněn bodem v počátku a následná dráha světelných paprsků (vln) protíná horizontální prostor v kružnicích, jejichž poloměry vzrůstají rychlostí světla s rostoucím časem, tedy v diagramu směrem nahoru. Vidíme, že dráhy světelných paprsků vytvářejí v prostoročasovém diagramu kužel. Světelný kužel tedy představuje historii světelného pulzu - světlo se šíří zpočátku podél světelného kužele směrem do budoucnosti a sklon povrchy kužele charakterizuje velikost rychlosti, kterou světlo letí. Světelné paprsky lze prodloužit do minulosti - to odpovídá kulové vlnoploše, která se sbíhá do svého středu. Této části světelného kužele se říká minulý světelný kužel. Podél něho se dostávají k pozorovateli v prostorovém počátku všechny informace, které přijme v okamžiku odpovídajícím události ve vrcholu světelného kužele.

Světelné kužele jsou tou nejdůležitější strukturou v prostoročasu. Představují totiž hranice kauzálního, tj. příčinného, působení. Historie částice je v prostoročasovém diagramu zobrazena čarou směřující nahoru a tato čára musí ležet uvnitř světelného kužele, pokud prošla jeho vrcholem (obr. 8). To je jen jiný způsob, jak vyjádřit skutečnost, že žád-



Obr. 9 Relativita současnosti podle Einsteinovy speciální teorie relativity. Pozorovatelé 1 a 2 se pohybují prostoročasem tak, že se jejich vzájemná poloha mění. Události, které jsou současné pro pozorovatele č. 1, nejsou současné pro pozorovatele č. 2 a naopak.

na hmotná částice se nemůže pohybovat rychleji než světlo. Ven ze světelného kužele se nemůže šířit z události v počátku ani žádný jiný signál, takže světelný kužel je opravdu hranicí kauzálního působení.

Vlastnosti světelných kuželů mají některé pozoruhodné geometrické důsledky. Představme si dva pozorovatele, kteří se pohybují prostoročasem různými rychlostmi. Na rozdíl od newtonovské teorie, kde měla současnost stejný význam pro všechny pozorovatele, v teorii relativity absolutní současnost neexistuje. Pozorovatelé, kteří se pohybují rozdílnými rychlostmi, budou pokládat za současné různé události; ty se v prostoročarovém diagramu zobrazí jako různé (nerovnoběžné) roviny (jak ukazuje obr. 9). Existuje dobře definovaný způsob, jak přejít od jedné roviny k druhé, způsob matematicky vyjádřený *Lorentzovou transformací*. Všechny tyto transformace dohromady tvoří *Lorentzovu grupu*. Nalezení této grupy bylo podstatným krokem k objevu Einsteinovy teorie relativity. Základní vlastností Lorentzovy grupy je, že nechává invariantní, tedy neměnný, světelný kužel.

Podívejme se na Lorentzovu grupu ještě z jiného úhlu. Jak jsem zdůraznil, světelné kužele jsou základními strukturami prostoročasu. Představte si, že se nacházíte někde v kosmickém prostoru a rozhlížíte se kolem sebe po vesmíru. To, co vidíte, jsou paprsky světla z hvězd, které dopadají na sítnici vašich očí. Z prostoročasového hlediska pozorujete události, které jsou průsečíky světočar jednotlivých hvězd s vaším minulým světelným kuželem (jak znázorňuje obr. 10(a)). Podél vašeho světelného kužele pozorujete polohy hvězd v určitých bodech, které se vám zdají být umístěny na nebeské sféře kolem vás. Představte si nyní jiného pozorovatele, který se vzhledem k vám pohybuje velkou rychlostí. V okamžiku, kdy vás míjí, se oba díváte na nebe. Druhý pozorovatel vidí tytéž hvězdy jako vy, z jeho hlediska však na nebeské sféře zaujímají jiné polohy (obr. 10(b)). Takovému jevu se říká *aberrace*. Matematicky vyjádří vztah mezi oběma pohledy transformace, která vzájemně převádí na sebe pozorování těchto pozorovatelů (či pozorovatelek). Každá z těchto transformací je taková, že převádí kulovou plochu v kulovou plochu. Mají však ještě další velmi speciální vlastnost. Převádějí přesné kružnice opět v přesné kružnice a zachovávají úhly. Pokud pozorujeme na nebeské sféře kruhový obrazec, bude se jevit jako kruhový také jinému pozorovateli.

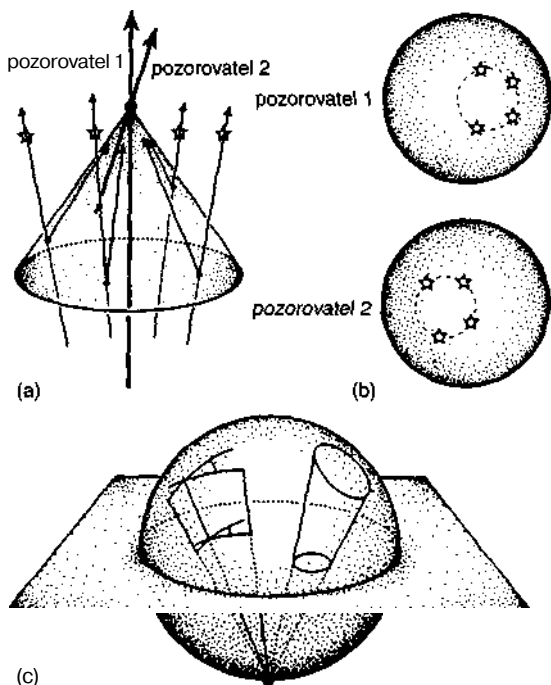
Jak to funguje, lze popsat velice hezky a mně to poslouží za příklad, kolik elegance je v matematice, která podkládá fyziku na její nejzákladnější úrovni. Na obrázku 10(c) je vyobrazena kulová plocha, jejímž rovníkem je proložena rovina. Na kulové ploše nakreslíme obrazec a pak jej promítneme z jižního pólu do rovníkové roviny. Na obrázku vidíme výsledek. Tato projekce, odborně *nazývaná stereografická*, má některé podivuhodné vlastnosti. Kružnice na kulové ploše se promítají opět do přesných kružnic a úhly mezi dvěma křivkami na sféře se promítají do stejně velkých úhlů na rovině.

Body v rovině lze určit pomocí pravoúhlých souřadnic; každému bodu je tak přiřazena dvojice čísel. Dvojici čísel můžeme dále přiřadit jedno komplexní číslo. Protože stereografická projekce přiřazuje každému bodu kulové plochy právě jeden bod v rovině, je tím zároveň přiřazeno komplexní číslo každému bodu kulové plochy. „Jižní pól“, z kterého se na obrázku 10(c) promítá, je přitom přiřazen bodům, které leží v „nekonečnu“ rovníkové roviny. Kulová plocha tím získá strukturu *Riemannovy sféry*. (Podrobněji o tom pojedná druhá kapitola.)

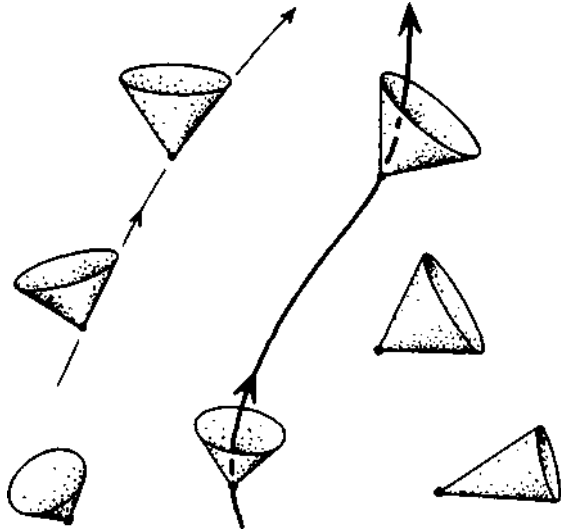
Pro ty čtenáře, kteří něco vědí o konformních transformacích, dodávám, že při takovéto parametrizaci komplexními čísly je aberrace popsána jednoduchou transformací

$$u - u' = \frac{\alpha u + \beta}{\gamma u + \delta},$$

kteřá patří do třídy Mobiových transformací a má tu vlastnost, že zachovává úhly a kružnicím přiřazuje opět kružnice. I bez znalosti této matematické teorie nám však neunikne jednoduchá elegancie aberačního vzorce, jíž se dosáhne právě popisem pomocí komplexních čísel.



Obr. 10 Co pozorují pozorovatelé 1 a 2 na nebeské sféře: (a) Oba pozorovatelé pozorují hvězdy podél minulého světelného kužele. Velkými černými tečkami jsou vyznačeny body, ve kterých světočáry hvězd protínají minulý světelný kužel. Šipky směřující k vrcholu kužele ukazují, jak se světlo šíří podél kužele k pozorovatelům. Pozorovatel č. 2 se pohybuje prostoročasem určitou relativní rychlostí vzhledem k pozorovateli č. 1. Obrázek (b) ukazuje, jak se jeví poloha hvězd na obloze pozorovateli č. 1 a č. 2, když se oba nacházejí v témže bodě prostoročasu (ale mají určitou relativní rychlost). Obrázek (c) ilustruje stereografickou projekci, která je názorným prostředkem, jak vyjádřit transformaci obrazů oblohy, jak je vidí oba pozorovatelé. Kružnice se zobrazují jako kružnice, zachovávají se úhly.

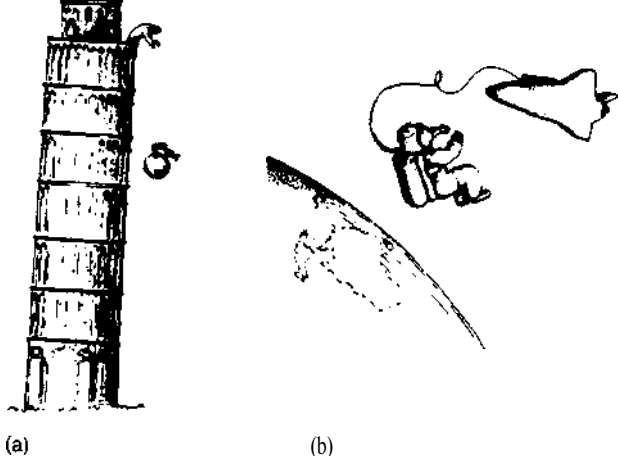


Obr. 11 Znázornění zakřivení prostoročasu.

Rádi bychom, aby si i čtenář, který nepochopil matematické detaily celého postupu, uvědomil, že díváme-li se na aberaci hvězd z hlediska speciální teorie relativity, výsledné vzorce jsou podstatně jednodušší, než chceme-li jev popsat pomocí newtonovské mechaniky. S tím se setkáváme ve fyzice velice často. Vybudujeme-li přesnější základní teorii, její matematické vyjádření je ve skutečnosti jednodušší, než byl matematický jazyk teorie staré, byť se při prvním pohledu může zdát komplikovanější. Krásným příkladem je právě rozdíl mezi Galileiho a Einsteinovým pojetím relativity pohybu.

Speciální relativita je tak teorií v mnoha ohledech jednodušší než mechanika newtonovská. Z matematického hlediska, zvláště z hlediska teorie grup, je to mnohem hezčí matematická struktura.

Prostoročas speciální teorie relativity je plochý a v důsledku toho jsou všechny světelné kužely v jednotlivých bodech prostoročasu uspořádány stejným způsobem, jak ukazuje obrázek 8. Postupme nyní o krok dále, k Einsteinově obecné teorii relativity, tj. k teorii prostoročasu za přítomnosti gravitace. Obraz světelných kuželů se na první pohled velmi pokazí. Nyní to vypadá jako na obrázku 11 - světelné kužely v jednotlivých bodech jsou vzájemně orientovány nejruznějším způsobem. Tvrdil jsem, že když přejdeme k hlubší teorii, matematika se zjed-



Obr. 12 (a) Galileo Galilei hází dva kameny (a videokameru) z šikmé věže v Pise. (b) Astronaut(ka) vidí kosmickou loď vznášet se před sebou, jako by na ni gravitace nepůsobila.

noduší, a podívejme se, co se nám zde stalo. Náš elegantní matematický obraz se náhle hrozně zkomplikoval. To se někdy stává; mějte však se mnou trochu trpělivosti, jednoduchost se za chvíli znovu vynoří.

Připomenu základní složky Einsteinovy teorie gravitace. Jednou z nich je Galileiho princip ekvivalence. Na obrázku 12 jsem nakreslil Galilea Galileiho, jak se naklání přes ochoz šikmé věže v Pise a pouští dolů malé kameny. Nevíme jistě, zda tento legendární pokus opravdu takto prováděl, ale rozhodně si byl dobře vědom toho, že pokud se zanedbá odpor vzduchu, libovolné dva kameny dopadnou na zem za stejný čas.

Kdybyste seděli na jednom kameni a pozorovali druhý, byl by vůči vám v klidu (nakreslil jsem na jeden z kamenů místo pozorovatele videokameru). Dnes, v době kosmických letů, je to dobře známý jev. Každý z vás asi viděl televizní záběry kosmonauta ve volném prostoru, vedle kterého se vznáší kosmická loď podobně jako velký kámen vedle malého na obrázku 12(a). Obojí je důsledek Galileiho principu ekvivalence.

Pozorujete-li tedy gravitaci správným způsobem, tj. ve volně padajícím vztažném systému, doslova vám zmizí před očima. To je ale jen poloviční pravda. Podle Einsteinovy teorie nezmizí gravitace, zmizí jen *gravitační síla*. Něco přece jen zůstane, a to *slapové účinky* gravitace.

Dovolte, abych do výkladu zavedl trochu více matematiky, ale opravdu jen trochu. Potřebujeme nějak charakterizovat zakřivení prostoročasu a k tomu slouží matematický objekt zvaný *tenzor*, který v následující rovnici označuji jako „Riemann“. Jeho plné jméno je Riemannův tenzor křivosti, ale já o jeho povaze neřeknu nic víc, než že se zapisuje pomocí velkého „R“ opatřeného čtyřmi indexy (ty znázorňuji tečkami u paty písmene). Riemannův tenzor křivosti se dá rozložit na dvě části. Jedna se nazývá *Weylova* křivost a druhá *Ricciho* křivost. Schematicky to můžeme vyjádřit rovnicí

$$\text{Riemann} = \text{Weyl} + \text{Ricci},$$

resp.

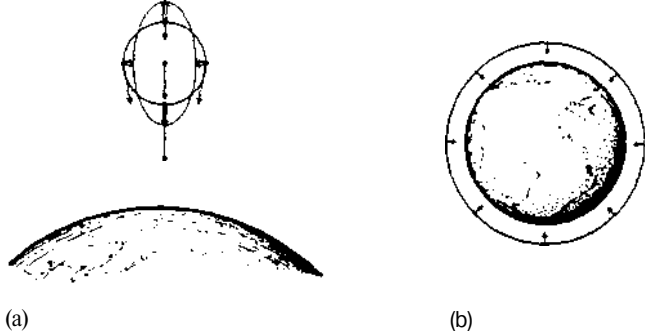
Zde *W.* ... označuje zmíněný Weylův tenzor, *R.* (pouze se dvěma indexy na rozdíl od Riemannova tenzoru) je tzv. Ricciho tenzor a *g.* metrický tenzor.

Právě Weylova křivost měří to, co nazýváme slapovými efekty. Co tím míníme? Řekli jsme, že z pohledu astronauta se zdá, že gravitace vymizela, ale ono to není tak docela pravda. Představme si, že astronaut je obklopen oblakem částic, které jsou v určitém okamžiku vzhledem k němu v klidu a všechny jsou od něho stejně daleko. V tomto počátečním okamžiku se tedy vznášejí na kulové ploše, v jejímž středu je astronaut. V různých bodech sféry se však zemská přitažlivost poněkud liší, proto urychluje jednotlivé částice rozličně. Celou situaci sice popisují newtonovským jazykem, to je ale v daném případě zcela přiměřené. Malé rozdíly ve zrychlení způsobí, že původní sféra částic se zdeformuje v elipsoid (viz obr. 13(a)).

Tato deformace má dvojí původ. Částečně je důsledkem toho, že gravitační přitažlivost Země působí silněji na částice, které jsou k ní blíže, částečně ji vyvolává skutečnost, že směr gravitační síly, která působí ke středu Země, se na různých místech sféry nepatrně liší.

Nahradíme-li v naší úvaze Zemi Měsícem, astronauta středem Země a sféru volně pohyblivých částic zemským oceánem, máme vysvětlení slapů, tedy přílivu a odlivu. Moře, které je blíže k Měsíci, je k němu přitahováno o něco více než střed Země, zatímco moře na opačné straně zeměkoule je přitahováno o trochu méně, takže je jakoby odpuzováno od zemského středu. Výsledkem je příliv, který se v daném místě vyskytne dvakrát za den. Odtud tedy název „slapový efekt“.

Z Einsteinova pohledu jsou skutečné účinky gravitace, tedy ty, jichž



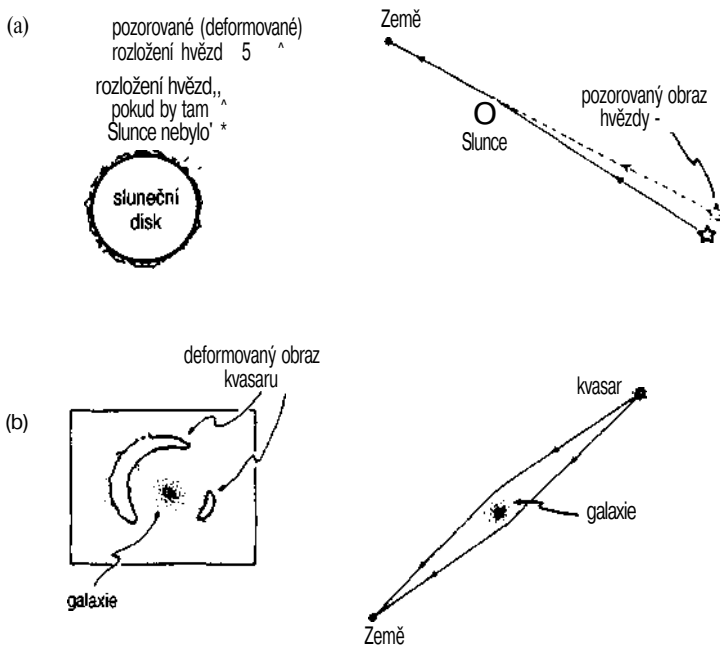
Obr. 13 (a) Slapové síly. Dvojitě šipky naznačují relativní zrychlení, (b) Pokud sféra obklopuje hmotu (zde Zemi), gravitační zrychlení směřuje dovnitř.

se nezbavíme ani ve volně padající laboratoři, dány právě slapovými účinky a ty zase určuje prakticky právě Weylova křivost, tedy část $W \dots$ Riemannova tenzoru. Tato část tenzoru křivosti zachovává objem. V našem příkladu to znamená, že objem původní koule ohraničené částicemi by byl stejný jako objem elipsoidu, v nějž se koule v počátečním okamžiku deformuje.

Zbývající část křivosti se nazývá Ricciho křivost a projevuje se zmenšováním či zvětšováním objemu. Na obrázku 13(b), kde Země je místo na spodku diagramu uprostřed kulové vrstvy částic, vidíme, že objem zaujímaný částicemi se bude zmenšovat spolu s tím, jak jsou částice urychlovány směrem do středu. Tato redukce objemu je mírou Ricciho křivosti. Podle Einsteinovy teorie je Ricciho křivost dána množstvím hmoty, které se nachází v malé kouli obklopující příslušný bod v prostoru. Jinými slovy - hustota hmoty v příslušném bodě určuje, jak jsou částice urychlovány směrem k příslušnému bodu. V tomto ohledu se Einsteinova teorie příliš neliší od teorie Newtonovy.

Předchozí popis odpovídá Einsteinově formulaci jeho teorie gravitace: gravitace je určena slapovými efekty, které jsou mírou lokálního zakřivení čtyřrozměrného prostoročasu. To schematicky ukazuje obrázek 11 - distorze (zkroucení) čar, které představují světočáry částic, ukazuje míru zakřivení prostoročasu. Einsteinova teorie je tedy ve své podstatě geometrickou teorií čtyřrozměrného prostoročasu - a to matematicky neobyčejně krásnou teorií.

Historie Einsteinova objevu obecné teorie relativity nám dává důležité ponaučení. Einstein dokončil její formulaci roku 1915. Důvodem



Obr. 14 (a) Přímý observační důkaz účinku gravitace na světlo. Weylova prostoročasová křivost se projevuje deformací obrazu pole vzdálených hvězd, zde v důsledku ohybu světelných paprsků gravitačním polem Slunce. Obraz hvězd ležících na kružnici se zdeformuje v elipsu, (b) Einsteinův efekt ohybu světla je dnes důležitý v pozorovací astronomii. Hmotu galaxie, kolem níž prochází světlo ze vzdáleného kvasaru, lze odhadnout právě z velikosti jeho ohybu.

jejího hledání nebyl žádný hrubý nesouhlas newtonovské teorie s pozorováním, nýbrž různé estetické, geometrické a fyzikální požadavky. Klíčovými prvky, které k ní vedly, byl Galileiho princip ekvivalence (který jsme ilustrovali na obrázku 12 pohybem kamenů s různou hmotou upuštěných v gravitačním poli) a myšlenka neeuklidovské geometrie, jež je přirozeným jazykem k popisu křivosti prostoročasu. V roce 1915 nebyla známa žádná pozorování, která by byla v takovém nesouladu s newtonovskou teorií, aby to vyžadovalo jejich změnu.

Teprve když byla obecná relativita vyslovena ve své konečné formě, se zjistilo, že ji podporují tři klíčové pozorovací testy. Perihelium dráhy Merkura se posunuje způsobem, který nelze vyložit účinkem ostatních planet

podle Newtonovy teorie. Obecná teorie relativity však předpovídá přesně pozorovaný výsledek. Světelné paprsky se ohýbají účinkem sluneční gravitace - změření tohoto efektu bylo cílem známé expedice Arthura Eddingtona při zatmění Slunce v roce 1919 a výsledek byl plně v souladu s Einsteinovou teorií. Třetím testem byla předpověď, že gravitační potenciál ovlivňuje rychlost chodu hodin - hodiny u paty věže jdou pomaleji než hodiny na jejím vrcholu. I tento efekt byl experimentálně změřen. Ani jeden z těchto testů však nepůsobil dostatečně přesvědčivě - všechny efekty byly nepatrné a zdálo se, že je mohou vysvětlit i jiné teorie.

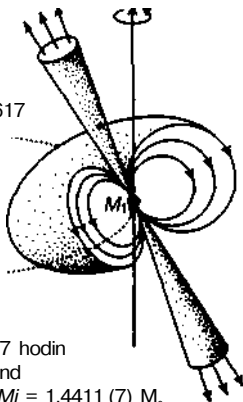
Dnes je situace dramaticky jiná. V roce 1993 byla udělena Nobelova cena Russelu A. Hulseovi a Josephu H. Taylorovi za velice pozoruhodná pozorování. Obrázek 15 znázorňuje binární pulzar nesoucí označení PSR 1513+16. Toto uskupení tvoří dvojice neutronových hvězd, jejichž hmotnosti se přibližně rovnají hmotnosti Slunce, ale jejichž průměry dosahují pouze několika kilometrů. Jde tedy o neobyčejně hutné hvězdy. Obě hvězdy obíhají kolem společného hmotného středu po značně výstředných eliptických drahách. Jedna z nich má velmi silné magnetické pole. Částice, které se pohybují v tomto poli, vysílají mohutné elektromagnetické záření, které putuje k Zemi, vzdálené asi 30 000 světelných let. Na Zemi pak toto záření pozorujeme ve formě dobře odlišených pulzů. Na těchto pulzech se prováděla velice přesná měření, takže známe velice přesně časy mezi jejich příchody. Pečlivě se též studovaly dráhy obou neutronových hvězd a vypočetly se i jemné korekce jejich předpovídaného tvaru podle obecné teorie relativity.

Podle obecné teorie relativity existuje jeden jev, jenž podle newtonovské teorie nenastává. Obecná relativita předpovídá, že takováto dvojhvězda vyzařuje energii prostřednictvím gravitačních vln. Vlastnosti těchto vln se v mnohém podobají vlastnostem elektromagnetických vln; na rozdíl od elektromagnetických vln, které můžeme chápat jako pohybující se zvrásnění elektromagnetického pole, představují gravitační vlny vrásky na prostoročasu. Tyto vlny odnášejí ze systému energii v množství, které může být podle Einsteinovy teorie přesně spočteno, a tento vypočtený výsledek velice přesně odpovídá úbytku energie neutronové dvojhvězdy zjištěnému pozorováním. Výsledky tohoto pozorování ukazuje obrázek 15(b), kde je znázorněno zrychlování orbitální periody neutronových hvězd za posledních dvacet let, během nichž se měření provádí. Časy příchodu jednotlivých signálů jsou určeny s takovou přesností, že za uvedených dvacet let lze zhodnotit výsledky tak, že pozorování se od předpovědi liší až na čtrnáctém desetinném místě. To činí obecnou teorii relativity jednou z nejpřesněji ověřených teorií, jaké věda zná.

binární pulzar
PSR 1913+16

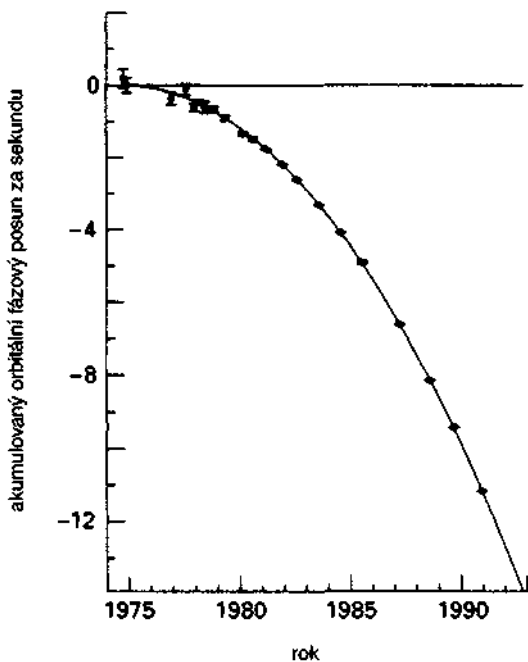
orbitální výstřednost $e = 0,617$

ftfcé



binární perioda = 7,751939337 hodin
perioda pulzaru = 59 milisekund
hmotnost neutronové hvězdy $M_1 = 1,4411 (7) M_\odot$
hmotnost neutronové hvězdy $M_2 = 1,3874(7) M_\odot$

(a)



(b)

Už jsme řekli, že historie obecné teorie relativity obsahuje poučební. Einstein nevěnoval osm či více let svého života jejímu nalezení z observačních či experimentálních důvodů. Často slyšíme argumentaci: „Fyzikové hledají nějaký řád ve svých experimentálních výsledcích a tak naleznou nějakou teorii, která těmto výsledkům vyhovuje. Možná že proto matematika a fyzika tak dobře spolupracují.“ Ale v tomto případě tomu tak vůbec nebylo. Teorie byla původně rozvinuta bez observační motivace, matematicky je však velmi elegantní a ukázalo se, že i velmi dobře podložena fyzikálně. Chtěl bych zde poukázat na to, že příslušná matematická struktura skutečně existuje v přírodě, že teorie je opravdu přítomná v prostoru, není to něco někým na přírodu vloženého. To je také jeden z podstatných bodů této kapitoly. Einstein objevil něco, co v přírodě skutečně existovalo. Navíc to nebyla jen nějaká nepodstatná věc, co objevil, ale jedna z nejjednodušších vlastností přírody, podstata prostoru a času.

Zde tedy máme velice jasný případ, na který se dobře hodí můj obrázek 3, ilustrující vztah mezi světem matematiky a fyzikálním světem. V obecné relativitě máme určitý druh struktury, která opravdu výborně vystihuje chování fyzikálního světa. Tyto fundamentální črty našeho světa se často neobjevují tak, že bychom se snažili postupně lépe a lépe vystihnout, jak se příroda chová. Jak se svět skutečně chová, je samozřejmě velmi důležité. Musíme být vždy připraveni zavrhnout teorii, která nevyhovuje faktům, byť by nás velice lákala z řady jiných důvodů. Zde ale máme teorii, která vyhovuje faktům s neobyčejnou přesností. Její výsledky se numericky shodují s pozorováním na dvojnásobný počet desetinných míst (tj. 14), než je tomu u teorie Newtonovy. Zlepšení přesnosti je zhruba stejně velké jako zlepšení znalosti přesnosti teorie Newtonovy v 17. století a dnes. Newton věděl, že jeho teorie se shoduje s pozorováním s přesností jedné tisícinou, kdežto dnes víme, že platí s přesností jedné desetimilióntiny.

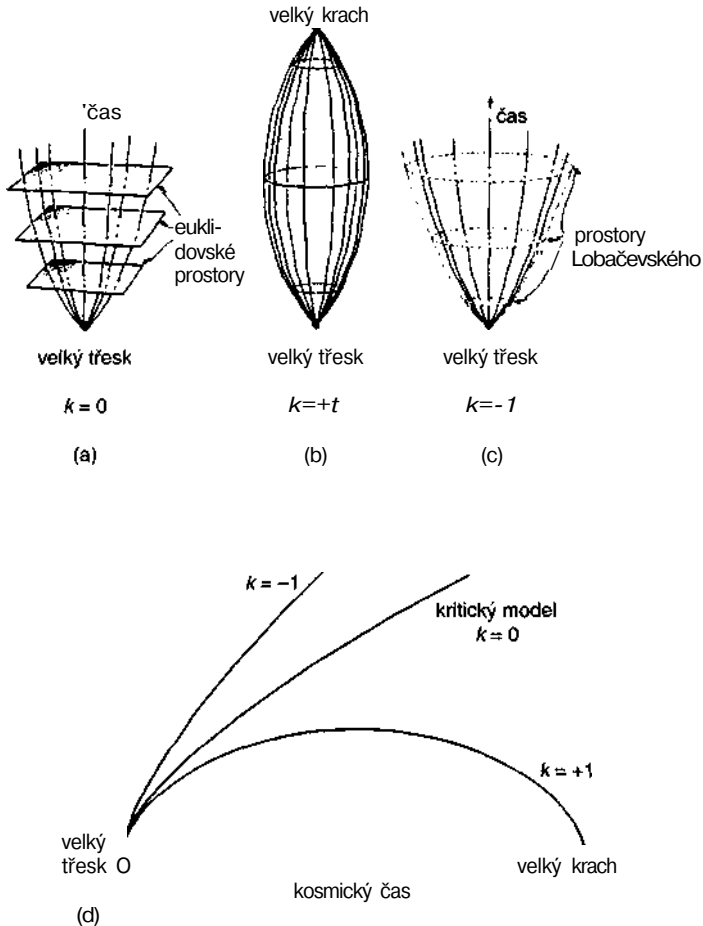
Obr. 15 (a) Schematické znázornění binárního pulzaru PSR 1913+16. Jedna z neutronových hvězd je pulzar. Vysílá rádiové záření podél osy magnetického dipólu, skloněné vzhledem k rotační ose hvězdy. Když kužel záření přechází přes pozorovatele, pozorujeme přesně časované pulzy. Díky přesnému měření času mezi jednotlivými pulzy se podařilo určit vlastnosti obou hvězd. Výsledky jsou ve shodě s Einsteinovou obecnou teorií relativity, (b) *Změna fáze příchodu pulzů z binárního pulzaru PSR 1913+16 porovnaná s teoretickou hodnotou danou úbytkem energie v důsledku emise gravitačního záření (plná čára).*

Einsteinova obecná relativita je ovšem jenom teorie. Jaká je ale struktura skutečného světa? Pokud mluvíme o vesmíru jako celku, máme právě jen jeden vzorek, ten vesmír, ve kterém žijeme.

Na základě Einsteinovy teorie se konstruuje tři typy standardních modelů vesmíru. Na obrázku 16 jsou rozlišeny různou hodnotou parametru k . V kosmologických úvahách se často objevuje ještě jeden parametr, kosmologická konstanta. Einstein ale nazval její zavedení do rovnic obecné relativity největším omylem svého života, tak se jí také vyhnu. Pokud ji ovšem budeme muset z observačních důvodů do rovnic opět vrátit, budeme se s tím muset smířit.

Pokud předpokládáme, že kosmologická konstanta je nulová, vedou Einsteinovy rovnice ke třem různým modelům homogenního izotropního vesmíru, tj. vesmíru, který má ve všech místech a ve všech směrech stejné vlastnosti. Tyto modely charakterizuje jeden parametr, označený na obrázku 16 jako k .

Grafy zobrazují možnosti odpovídající hodnotám $k = +1, 0, -1$; modely odpovídající jiným hodnotám k lze převést na tyto tři případy prostým přeškálováním. Kdybychom jednotlivé modely popisovali věkem či charakteristickým měřítkem vesmíru, závisely by možné modely na spojitém parametru a takováto charakteristika by situaci vystihovala detailněji. Tři uvedené modely odpovídají možným typům prostorového zakřivení homogenního vesmíru. Pokud mají prostorové řezy vesmíru plochou geometrii, mají křivost nulovou a $k = 0$ (obr. 16(a)). Mají-li prostorové řezy kladnou křivost, což znamená, že vesmír je zakřiven sám do sebe, je $k = +1$ (obr. 16(b)), případ $k = -1$ odpovídá záporné křivosti. Všechny uvedené modely mají počáteční singulární stav, „velký třesk“, který odpovídá počátku vesmíru. Avšak v případě $k = +1$ vesmír expanduje k určitému maximu a pak se opět hroutí do konečného singulárního stavu, *velkého krachu* [pro anglický termín „Big Crunch“ není ustálený odpovídající český termín, trochu s rozpaky přijímám termín „velký krach“, propagovaný Jiřím Grygarem, autorem dnes už ustáleného termínu „velký třesk“ pro „Big Bang“], zatímco v případě $k = -1$ se rozpíná neustále (obr. 16(c)). Příklad $k = 0$ je mezní možností mezi případy $f = -1$ a $f = +1$. Obrázek 16(d) vystihuje vztah mezi „poloměrem“ vesmíru a časem, přičemž poloměrem vesmíru se rozumí určitý typický rozměr, například vzdálenost mezi středy dvou vybraných kup galaxií. Názorněji než na předchozích obrázcích zde vidíme, že pouze v případě $k = +1$ se vesmír hroutí ve „velkém krachu“, zbývající dva typy modelů expandují věčně.

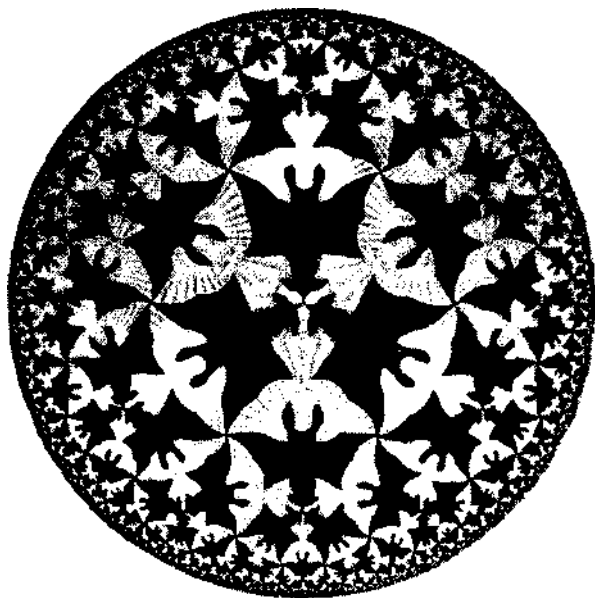


Obr. 16 (a) Prostorčasový diagram rozpínajícího se vesmíru s euklidovskými prostorovými řezy (v obrázku jsou znázorněny pouze dvě prostorové dimenze): $k = 0$. (b) Totéž jako v (a) je znázorněno pro vesmír, který se nejdříve rozpíná a potom hroutlí a který má „sférické“ prostorové řezy. (c) Diagram odpovídá stále expandujícímu vesmíru tak jako (a), nyní však je na prostorových řezech geometrie Lobačevského: $k = -1$. (d) Dynamika tří různých typů Friedmanových modelů.

Všimneme si podrobněji případu $k = -1$, jehož struktura je asi nejméně názorná. Existují dva dobré důvody, proč věnovat větší pozornost právě jemu. Předně tento případ nejlépe odpovídá v současné době

skutečně pozorovaným veličinám. Podle obecné teorie relativity je zakřivení prostoru určeno množstvím hmoty ve vesmíru *rozložené* a zdá se, že hmota není rozložena s takovou průměrnou hustotou, aby to stačilo k zakřivení vesmíru do sebe. Je sice možné, že ve vesmíru existuje velké množství skryté temné hmoty, o níž dosud nevíme; v tom případě by skutečný vesmír mohl odpovídat jednomu z druhých dvou modelů. Pokud však této hmoty není mnohem více, než jsme nuceni věřit, že se skutečně vyskytuje v optických obrazech galaxií, křivost vesmíru by odpovídala případu $k = -1$.

Tím druhým důvodem, proč se na něj zaměřuji, je, že se mi nejvíc líbí. Vlastnosti geometrie odpovídající $k = -1$ jsou obzvláště elegantní.



Obr. 17 „Kruhová limita 4“ Moritze C. Eschera - znázornění Lobačevského prostoru.

Jak to v takovém vesmíru odpovídajícím $k = -1$ vypadá? Prostorové řezy, tedy to, jak se vesmír jeví v jednom určitém okamžiku, zde mají geometrii, jíž říkáme hyperbolická nebo Lobačevského. [Tato trojrozměrná geometrie je zobecněním dvojrozměrné Lobačevského geometrie, stejně jako geometrie homogenního uzavřeného vesmíru je trojroz-

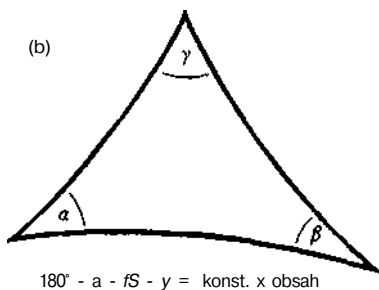
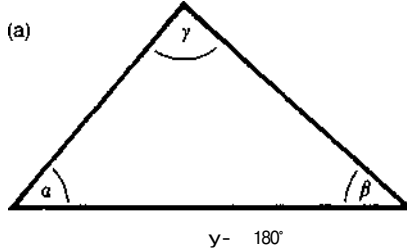
měrným zobecněním geometrie povrchu koule.] Abychom získali představu, co se míní Lobačevského geometrií, je nejlepší podívat se na jeden z Escherových tisků. Tento umělec vytvořil sérii grafik, které nazval „Kruhové limity“; na obrázku 17 je jeho „Kruhová limita 4“.

Escher nám namaloval vesmír plný andělů a ďáblů. Všimněme si, že v jeho obrázku je u hranice kruhu tlačénice. To proto, že hyperbolický prostor nakreslil na obyčejný list papíru, tedy že jej umístil v euklidovském prostoru. Musíte si představit, že všichni tito ďáblové jsou přesně stejní a právě tak andělé. Pokud bychom se v takovém vesmíru nacházeli v místě ležícím blíže okraje diagramu, vypadali by ďáblové (i andělé) v našem okolí stejně jako ti v jeho středu. [Směrem k okraji diagramu ovšem jejich počet roste k nekonečnu.] Obrázek dává představu, jak to vypadá v dvojrozměrné Lobačevského geometrii - pohybujete-li se od středu k okraji, zůstává geometrie kolem vás stále stejná; útvary blíže „okraji“ musí být zdeformovány, aby se jejich stále rostoucí počet na kružnicích opsaných kolem tohoto středu dal zobrazit do euklidovské roviny.

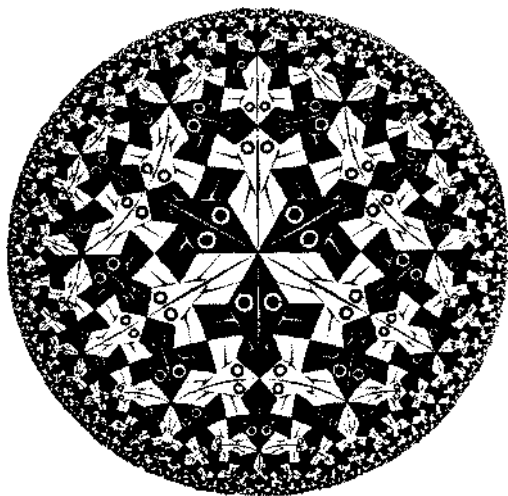
Lobačevského geometrie je příkladem dobře definované geometrie, která působí snad nejvíce udivujícím dojmem. Ovšem i sama Euklidova geometrie má řadu stejně podivuhodných rysů. Euklidovská geometrie je obdivuhodnou ilustrací vztahu mezi matematikou a fyzikou. Tato geometrie je součástí matematiky, ale Řekové ji zároveň pokládali za způsob vyjádření, jak svět vypadá. Tato geometrie opravdu popisuje skutečný svět s velikou přesností. Ne sice zcela dokonale, protože díky Einsteinově teorii víme, že prostoročas je lehce zakřiven různými způsoby, ale přece jen jej vystihuje obdivuhodně dobře.

Přesto se vědci v minulosti zamýšleli nad tím, zda mohou existovat ještě jiné geometrie. Starosti jim *dělal pátý Euklidův postulát* - tvrzení, že pokud v rovině vezmeme nějaký bod a přímku, která jím neprochází, pak k této přímce existuje právě jedna rovnoběžka procházející tímto bodem. Řada matematiků se domnívala, že tento postulát je ve skutečnosti důsledkem ostatních, názornějších, postulátů Euklidovy geometrie a může být na jejich základě dokázán. Ukázalo se však, že to možné není, a v této souvislosti se poprvé objevil koncept neeuklidovské geometrie.

V neeuklidovských geometriích není součet úhlů v trojúhelníku roven 180° . Zdálo by se, že ve srovnání s euklidovskou geometrií, kde součet úhlů v trojúhelníku je vždy 180° (obr. 18(a)), budou základní geometrické vztahy mnohem složitější.



Obr. 18 (a) Trojúhelník v euklidovském prostoru, (b) trojúhelník v Lobačevského prostoru.

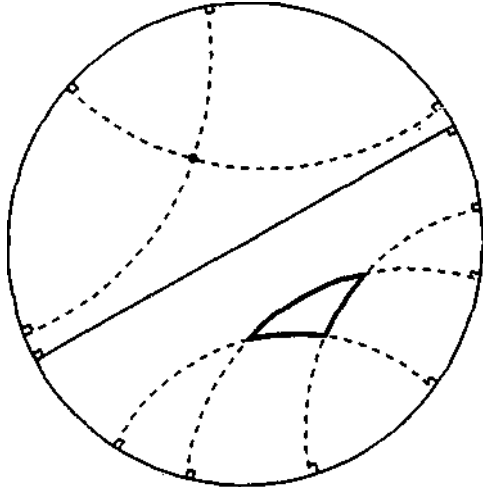


Obr. 19 „Kruhová limita I“ Moritze C. Eschera.

Zjistíte však, že v neeuklidovské geometrii platí jednoduchý vztah mezi součtem úhlů v trojúhelníku a jeho plochou: rozdíl mezi 180° a součtem úhlů je úměrný ploše. V euklidovské geometrii jsou vzorce určující plochu trojúhelníka pomocí délek stran a úhlů poměrně složité. V neeuklidovské Lobačevského geometrii platí pro určení plochy trojúhelníka podivuhodně jednoduchý vzorec, odvozený Johannem Lambertem (obr. 18(b)). Lambert svůj vztah odvodil ve skutečnosti dříve, než byla neeuklidovská geometrie objevena, což jsem nikdy zcela nepochopil.

Všimněme si v této souvislosti jiné otázky - otázky reálných čísel. Jsou pro euklidovskou geometrii zcela fundamentální. V základě byly zavedeny Eudoxem ve 4. století před naším letopočtem a jsou stále s námi. Tato čísla popisují celou naši fyziku. Později se setkáme s komplexními čísly, ta jsou však založena na číslech reálných.

Podívejme se teď na jinou s Escherových grafik, tu, která předvádí, jak Lobačevského geometrie funguje. Obrázek 19 je dokonce výstižnější pro pochopení Lobačevského geometrie než obrázek 17, protože je na něm lépe vidět, jak vypadají v této geometrii přímky. Představují je části kruhových oblouků, které protínají hraniční kružnici v pravých úhlech. Kdybyste byli Lobačevského bytosti a žili v takové geometrii, pokládali byste za přímky právě tyto oblouky. To je naznačeno na obrázku 19. Lobačevského přímky procházející středem se v euklidovském obrázku zobrazují opět jako přímky, ostatní se však zobrazují jako oblouky. Některé z těchto „přímek“ ukazuje obrázek 20. Nakreslil jsem zde bod mimo průměr. Tímto bodem mohou Lobačevského bytosti vést více než jednu rovnoběžku; naznačil jsem zde dvě. [Při sledování těchto úvah musíme mít na paměti, že celá nekonečná Lobačevského rovina je „escherovsky“ zobrazena na vnitřek kruhu za cenu deformace útvarů, které jsou ve skutečnosti stejně velké. „Přímky“ jsou definovány stejně jako v euklidovské geometrii, tj. jako nejkratší spojnice dvou bodů. Všimněme si, že oblouky označené jako obrazy „přímek“ opravdu protínají méně základních dlaždic Escherova obrázku, než by jich prořála přímá spojnice bodů, v nichž oblouky protínají obvodovou kružnici. Podobně je rovnoběžka k dané přímce definována jako přímka, která se s danou přímkou neprotíná. A vskutku, oblouky procházející uvedeným bodem průměr nikde neprotínají.] V této geometrii je tedy narušen postulát o rovnoběžkách euklidovské geometrie. Nakreslíme-li trojúhelník ohraničený částmi tří přímek, uvidíme, že vztahy mezi úhly a plochou trojúhelníka jsou jiné než v euklidovské geometrii. To nám dává určitý vhled do charakteru hyperbolické geometrie.

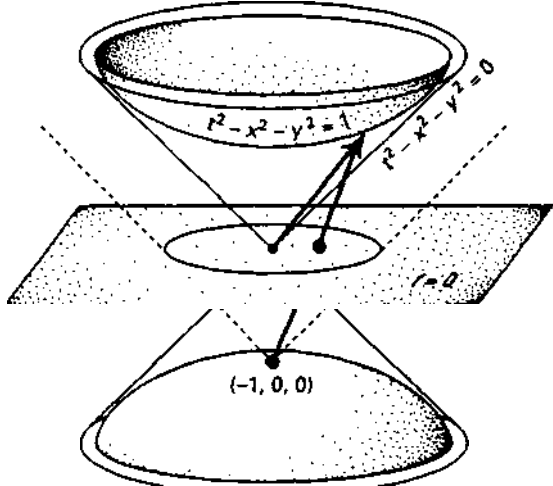


Obr. 20 Rysy geometrie Lobačevského (hyperbolického) prostoru, které vystihuje „Kruhová limita I“.

Nebo jiný příklad. Už jsem se přiznal k tomu, že hyperbolickou Lobačevského geometrii mám nejrady. Jedním z důvodů je i to, že její grupa symetrií je stejná jako ta, s níž jsme se už setkali, totiž Lorentzova grupa - grupa, která charakterizuje speciální teorii relativity či symetrii světelných kuželů v této teorii. Vidíme to z obrázku 21, na němž je světelný kužel s některými doplňky. V diagramu jsem musel potlačit jednu prostorovou dimenzi, abych jej mohl nakreslit jako trojrozměrný. Světelný kužel je popsán rovnicí uvedenou v diagramu,

$$x^2 + y^2 - z^2 = 0$$

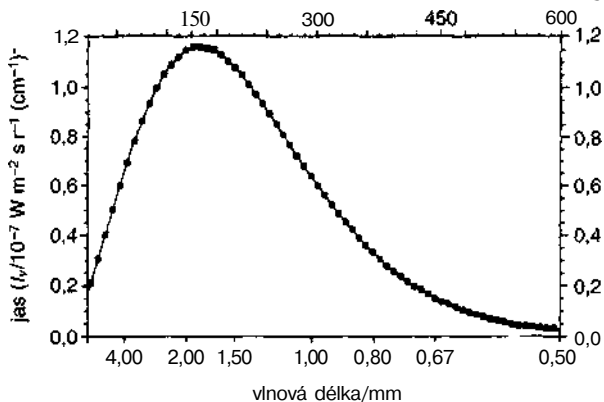
Miskovité útvary znázorněné nahoře a dole jsou tvořeny body, které se v Minkowského geometrii nacházejí v jednotkové vzdálenosti od počátku. (Tato „vzdálenost“ představuje ve skutečnosti v Minkowského geometrii čas - vlastní čas, který naměří pohybující se hodiny.) Znárodně povrchy tedy tvoří „sféru“ v Minkowského geometrii. Vnitřní geometrii této „sféry“ je však Lobačevského (hyperbolická) geometrie. Nakreslíte-li kouli v euklidovském prostoru, můžete ji potočit kolem jejího středu - příslušnou grupu symetrii reprezentují právě tyto rotace koule kolem středu. V geometrii na obrázku 21 je grupou symetrií gru-



Obr. 21 Lobačevského prostor vnořený jako část hyperboloidu do Minkowského prostoročasu. Stereografická projekce jej zobrazí na Poincarého disk, jehož hranicí je kružnice nakreslená v rovině $t = 0$.

pa symetrií sdružená s povrchem, znázorněným v diagramu, tedy jinými slovy Lorentzova grupa rotací. Tato grupa symetrií popisuje, jak se transformuje prostor a čas, je-li určitý bod prostoročasu zafixován, natáčíme-li prostoročas nejrůznějšími způsoby kolem tohoto bodu. Z toho vidíme, že grupa symetrií Lobačevského prostoru je v podstatě stejná jako Lorentzova grupa.

Náš obrázek 21 je variantou stereografické projekce předvedené na obrázku 10(c) a odpovídající Minkowského prostoru. Ekvivalentem jižního poluje nyní bod $(-1, 0, 0)$ a body z horní „misky“ nyní projektujeme do roviny $t = 0$, která je ekvivalentem ekvatoriální roviny v obrázku 10(c). Tímto postupem zobrazíme všechny body horního miskovitého útvaru na vnitřek disku v rovině $t = 0$, jemuž se někdy říká Poincarého disk. Přesně takto vznikly Escherovy obrázky z řady „Kruhové limity“ - celá hyperbolická (Lobačevského) plocha se zobrazila na Poincarého disk. Toto zobrazení má navíc stejné vlastnosti jako zobrazení z diagramu 10(c) - zachovává úhly a kružnice a vše vychází geometricky velmi pěkně. Teď se možná nechávám až příliš unášet svým nadšením - bohužel to se matematikům stává, když je něco doopravdy zajímavé.



Obr. 22 Průběh spektra kosmického mikrovlnného záření měřeného družicí COBE (označený kroužky) velmi přesně souhlasí s teoretickým průběhem spektra záření černého tělesa (vyznačeným plnou čarou).

Hyperbolická geometrie má v sobě něco obzvláště elegantního. Bylo by velmi krásné, alespoň podle mého vkusu, kdyby vesmír byl vybudován tímto způsobem. Mám ale kupu dalších důvodů pro to, abych tomu věřil. Řada jiných odborníků nemá tyto otevřené hyperbolické vesmíry ráda. Dává přednost uzavřenému vesmíru, znázorněnému na obrázku 16(b), který je hezký a útulný, byť i tento uzavřený vesmír je obrovský. Jiní mají zase v oblibě plochý model z obrázku 16(a), protože určitý typ teorií raného vesmíru - *inflační teorie* - napovídají, že vesmír by měl být plochý. Musím ovšem říci, že já těmito teoriím příliš nevěřím.

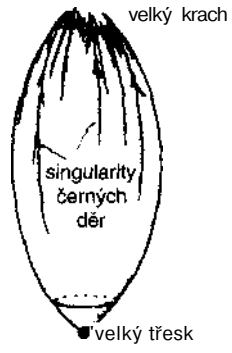
Třem standardním modelům vesmíru, které jsme uvedli, se říká *Friedmanovy modely*. Jejich základní vlastností je, že jsou velmi symetrické. Tyto modely se rozpínají, alespoň na počátku, v každém čase jsou ale všude dokonale stejné. Tento předpoklad je zabudován ve struktuře Friedmanových modelů a je znám jako *kosmologický princip*. V kterémkoli místě vypadá vesmír stejně, ať se díváte v jakémkoli směru. Pozorování ukazují, že skutečný vesmír je právě takový, s podivuhodným stupněm přesnosti. Pokud jsou Einsteinovy rovnice správné - a já jsem ukázal, že teorie souhlasí s pozorováním s pozoruhodnou přesností -, musíme brát Friedmanovy modely vážně. Všechny však předpovídají nepěknou událost na samém počátku vesmíru - velký třesk -, kde všechno je špatně. Vesmír je zde nekonečně hustý, nekonečně horký atd., což je pro teorii velice špatný rys. Přijmeme-li však, že tato fáze

obrovské teploty a hustoty skutečně nastala, můžeme předpovídat, jaké jsou tepelné podmínky materiálního obsahu vesmíru. Podle jedné z těchto předpovědí by měl být vesmír v současné době naplněn homogenním zářením přicházejícím se stejnou intenzitou ze všech stran a majícím spektrum záření černého tělesa. Přesně tento typ záření také objevil Arno Penzias s Robertem Wilsonem roku 1965. Nejnovější měření spektra tohoto záření, jež prováděla umělá družice COBE (její jméno je odvozeno z anglického termínu pro toto záření „COsmic microwave Background radiation“ a ze slova „Explorér“ = „výzkumník“), ukazují, že sleduje průběh spektra záření černého tělesa s vysokou přesností (obr. 22).

Všichni kosmologové interpretují existenci tohoto záření jako důkaz, že vesmír prošel horkou hustou fází. Toto záření nám tedy něco říká o povaze raného vesmíru - neříká sice všechno, ale ukazuje, že velký třesk skutečně nastal. Jinými slovy - vesmír musel tedy vypadat nějak tak, jak naznačuje obrázek 16.

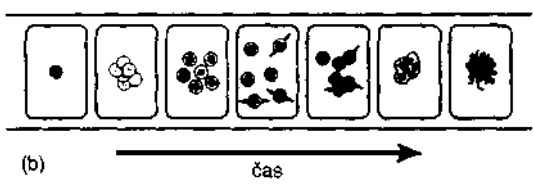
Družice COBE se zasloužila ještě o další významný objev. Ačkoli kosmické mikrovlnné záření je velice homogenní a jeho vlastnosti lze velmi elegantně matematicky vystihnout, není vesmír dokonale homogenní. V rozložení mikrovlnného záření na obloze jsou sice malé, ale měřitelné nepravidelnosti. Ve skutečnosti takové drobné nepravidelnosti musí v raném vesmíru být jako zárodek dnešních nehomogenit ve vesmíru - koneckonců, my jsme zde a vesmír pozorujeme a zcela určitě nejsme homogenně rozmazáni po prostoru. Skutečný vesmír vystihuje asi lépe obrázek 23. Abych prokázal svou nezaujatost, uvádím, jak by věci mohly vypadat jak v uzavřeném, tak otevřeném vesmíru.

V uzavřeném vesmíru se tyto nepravidelnosti v rozložení hmoty vyvinou postupně do skutečně pozorovaných struktur - hvězd, galaxií a podobně - a po nějaké době se začnou tvořit černé díry hroucením hvězd, nahromaděním hmoty v centrech hvězd a dalšími mechanismy. Všechny tyto černé díry se koncentrují k singularitě, jejíž vývoj je analogií vývoje vesmíru z velkého třesku, vzatého časově obráceně. Tak jednoduché to však není. Podle naší současné představy je velký třesk hezký symetrický homogenní stav, zatímco konečná fáze vývoje uzavřeného vesmíru je hrozný zmatek. Všechny černé díry se nakonec spojí a vytvoří při finálním „velkém krachu“ strašnou míchanici, jak ilustruje prostoročasový diagram na obrázku 23(a) nebo „filmový pásek“ na obrázku 23(b). V případě otevřeného vesmíru vznikají černé díry stále. Je zde počáteční singularita a singularity se neustále vytvářejí v centrech černých děr (obr. 23(c)).

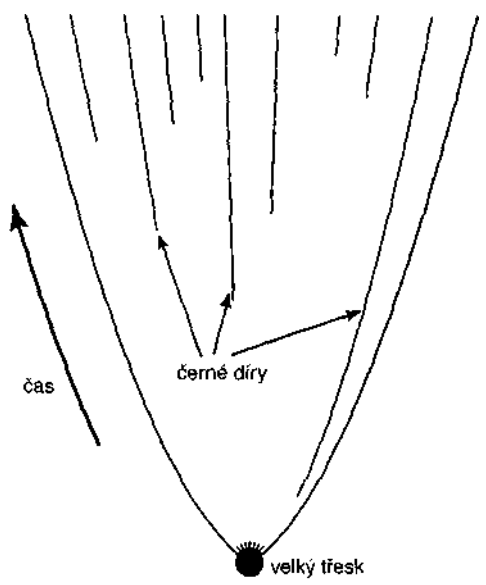


(a)

uzavřený vesmír

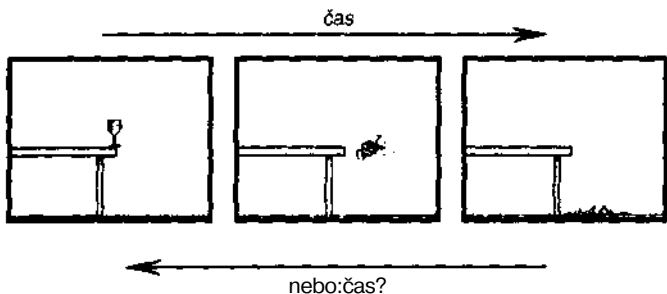


(b)



(c)

otevřený vesmír



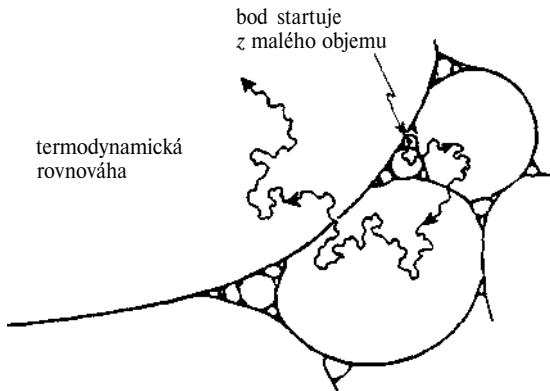
Obr. 24 Zákony mechaniky zachovávají svůj tvar, obrátíme-li v nich směr času. Přesto se nikdy nesetkáme se sledem situací, který by odpovídal časovému uspořádání událostí na obrázku zprava doleva, zatímco sled zleva doprava patří k běžné zkušenosti.

Zdůrazňuji tyto rysy standardních Friedmanových modelů proto, abych ukázal na veliký rozdíl mezi tím, co vidíme v počátečním stavu, a tím, co lze očekávat ve vzdálené budoucnosti. Tento problém je spojen se základním fyzikálním zákonem, jemuž říkáme druhá věta termodynamická.

Obsahu tohoto zákona snadno porozumíme odkazem na každodenní zkušenost. Představte si sklenku s vínem vybalancovanou na okraji stolu. Sklenka se může převážít a spadnout na podlahu, rozbít se a víno se rozlije po celém koberci. V newtonovské fyzice nic nebrání tomu, aby nenastal obrácený proces. Takový proces však ještě nikdo nepozoroval, nikdo neviděl, že by se sklenka na zemi složila dohromady a víno se z koberce znovu nasálo do scelené sklenice.

Pokud však bereme jen detailní zákony fyziky, jeden směr času je právě tak dobrý jako ten druhý. Abychom pochopili, kudy do skutečných dějů vstupuje rozdíl mezi oběma směry, potřebujeme druhou větu termodynamickou, která nám říká, že s časem roste *entropie* systému. Veličina zvaná entropie je nižší, když sklenice stojí na stole, a vzroste, leží-li jako střepy na zemi. Entropie systému tedy vzrostla v souladu s druhou větou termodynamickou. Řečeno velmi zhruba - entropie charakterizuje stupeň neuspořádanosti systému. Abychom tuto veličinu zavedli přesněji, musíme nejdříve zavést představu *fázového prostoru*.

Obr. 23 (a) V uzavřeném vesmíru se vytvářejí černé díry, když objekty různých typů dospějí ke konečnému stadiu svého vývoje. Vidíme, že při „velkém krachu“ lze očekávat hrozný zmatek. Sled událostí je zachycen také jako na filmovém pásku (b). (c) Vývoj otevřeného modelu, při kterém též dochází v různých časech k tvorbě černých děr.

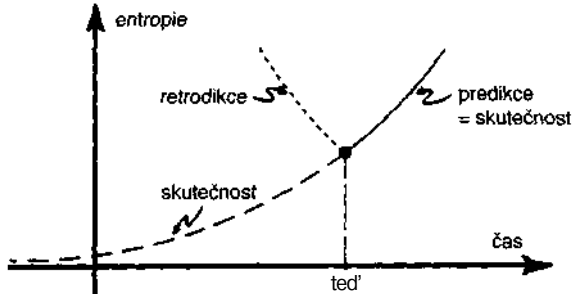


Ob. 25 Jak funguje druhá věta termodynamická. S růstem času přechází bod ve fázovém prostoru do stále větších a větších krabic, v důsledku čehož entropie neustále vzrůstá.

Fázový prostor je prostor o obrovském množství rozměrů a každý bod tohoto mnohorozměrného prostoru určuje polohu a hybnosti všech částic zkoumaného systému. Na obrázku 25 jsme vybrali bod v tomto obrovském fázovém prostoru, který v určitém okamžiku reprezentuje, kde jednotlivé částice jsou a jak se v tomto okamžiku pohybují. Když se systém částic s časem vyvíjí, tj. polohy a rychlosti jednotlivých částic se mění, tento reprezentativní bod se ve fázovém prostoru pohybuje; naznačil jsem jeho složitou dráhu ve fázovém prostoru.

Pokroucená vlnovka zatím odpovídá jen normálnímu vývoji systému. Dosud na ní není nic, co by souviselo s entropií. Abychom dostali do hry entropii, musíme kolem každého bodu naznačit malé bubliny, které obsahují ty různé stavy systému, jež neumíme od sebe rozlišit - pokud se v nich systém nachází, jeho makroskopicky měřitelný stav se jeví stejně.

To se může zdát poněkud obskurní. Co míníme tvrzením „neumíme rozlišit“? Záleží na tom, kdo se dívá a jak pozorně se dívá. Říci přesně, co entropií rozumíme, je skutečně jednou z poněkud komplikovaných otázek teoretické fyziky. V zásadě nejdříve seskupíme dohromady makroskopicky nerozlišitelné stavy a dostaneme tím „hrubozrné rozčlenění“. [Stavy vína ve sklenici, při nichž má víno stejnou teplotu, jeho hladina je stejně vysoko apod., ale jednotlivé molekuly alkoholu se budou uvnitř sklenice nacházet na různých místech, navzájem „makroskopicky“ nerozlišíme. Víno se nám ale jeví ve výrazně jiném stavu, je-li rozli-



Obr. 26 Použijeme-li úvahy naznačené na obrázku 25 zpětně v čase, dojdeme k závěru, „retrodikci“, že směrem do *minulosti* by měla entropie také růst ve srovnání s její hodnotou dnes. Takový závěr je však v hrubém rozporu s pozorováním.

té po koberci.] Tyto stavy zaujímají ve fázovém prostoru určité oblasti. Podíváme se na objem takové oblasti, vezmeme jeho přirozený logaritmus a vynásobíme konstantou, které se říká Boltzmannova, a výsledek nazveme entropií systému. Druhá věta termodynamická nám nyní říká, že tato veličina při vývoji [uzavřeného, tj. od svého okolí izolovaného] systému vzrůstá. To, co říká, vypadá nyní téměř samozřejmě. Podle ní se systém, který byl na počátku v malinké krabici, vyvíjí tak, že přechází do krabiček větších a větších. Zdá se velmi věrohodné, že se právě toto bude dít, neboť podíváme-li se na problém blíže, zjistíme, že velké krabice jsou mnohem větší než sousední krabice malé, a dostaneme-li se do některé velké krabice, máme hrozně malou šanci strefit se zpět do výchozí malé krabice. Systém se tak toulá po fázovém prostoru a dostává se do stále větších a větších krabic - takový je obsah druhé věty termodynamické. A to je všechno. Ale - je to opravdu všechno?

Ve skutečnosti je to jen poloviční vysvětlení. Říká nám, že známe-li stav systému teď, můžeme říci, jaký bude jeho nejpravděpodobnější stav v budoucnosti. Dává nám ale naprosto špatnou předpověď, pokusíme-li se uplatnit stejný argument směrem zpět. Předpokládejme, že sklenka spočívá na okraji stolu. Můžeme se ptát: „Jak se tam s největší pravděpodobností dostala?“ Pokud bychom našeho argumentu užili v časově obráceném směru, dostali bychom jako nejpravděpodobnější vysvětlení, že vše začalo velkým nepořádkem na koberci, ze kterého se sklenka poskládala na stůl. To samozřejmě není správné vysvětlení - správné vysvětlení zní, že ji tam někdo postavil. A ten, kdo ji tam po-

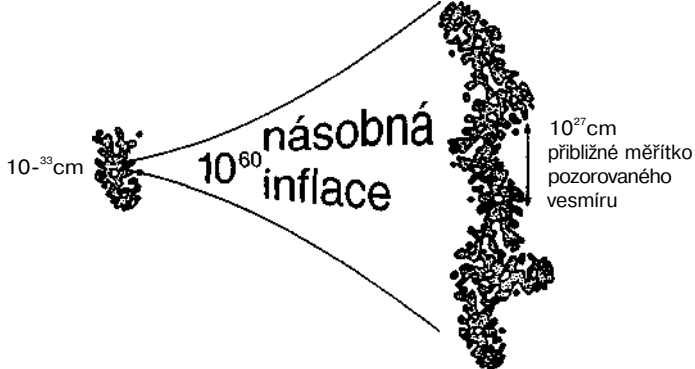
stavil, tak učinil z nějaké příčiny, a ta opět měla nějakou příčinu atd. Uvažovaný příčinný řetězec jde dále a dále do minulosti ke stavům s nižší a nižší entropií. Správná fyzikální křivka je „skutečná“ křivka naznačená na obrázku 26, ne „retrodikovaná“, tedy do minulosti určená, křivka časově symetrická ke křivce „predikované“ vzhledem k okamžiku „ted“ - směrem do minulosti entropie neustále klesá a klesá a klesá.

Růst entropie směrem do budoucnosti vysvětlujeme tak, že bod ve fázovém prostoru se přemísťuje do stále větších krabiček. To, že se však entropie směrem do minulosti stále menší, je jiná záležitost. V minulosti muselo být něco, co jí dalo malou počáteční hodnotu. Co zmenšilo entropii v minulosti? Jdeme-li postupně do minulosti, entropie je stále menší a menší, až nakonec skončíme u velkého třesku.

Podmínky, které panovaly při velkém třesku, musely být v něčem velmi speciální, ovšem o tom, čeho přesně se tato jejich zvláštnost týkala, se vedou spory. Existuje jedna velmi populární teorie, již - jak jsem už řekl - sám nevěřím, ale která se u řady vědců těší velké oblibě. Je to teorie inflačního vesmíru. Její základní myšlenkou je, že vesmír je tak homogenní na velkých měřítkách v důsledku něčeho, co se udalo v nejranější fázi rozpínání vesmíru. Podle této teorie prošel vesmír fází nesmírně rychlého rozpínání v době, kdy byl starý pouze asi 10^{-36} sekundy, a myšlenka spočívá v tom, že bez ohledu na to, jak vypadal na počátku tohoto velmi raného období, bude plochý, pokud se rozepne tak nesmírně, že se jeho původní objem vynásobí faktorem 10^{60} . Toto je také důvod, proč řada lidí upřednostňuje plochý vesmír.

Ve skutečnosti ale tento proces nedokáže udělat to, co se o něm předpokládá. Pokud začnete s obrovským nepořádkem, nesmírný nepořádek zůstane i poté, co dojde k tak velikému rozepnutí. Ve skutečnosti vypadá tento chaos po rozepnutí stále hůře, čím více se rozepne (obr. 27), takže jen tato myšlenka nevysvětlí, proč je vesmír tak homogenní. Potřebujeme teorii, která by nám řekla, jak velký třesk skutečně vypadal. Nevíme, jak taková teorie bude vypadat, víme však, že musí být kombinací fyziky na velkých a malých měřítkách. Nadto se domnívám, že z ní musí vyplynout, že velký třesk byl tak homogenní, jak se jeví pozorování. Možná bude jejím důsledkem hyperbolický vesmír, tj. vesmír s geometrií Lobačevského typu, který se mi líbí nejvíc, ovšem netrvám na tom.

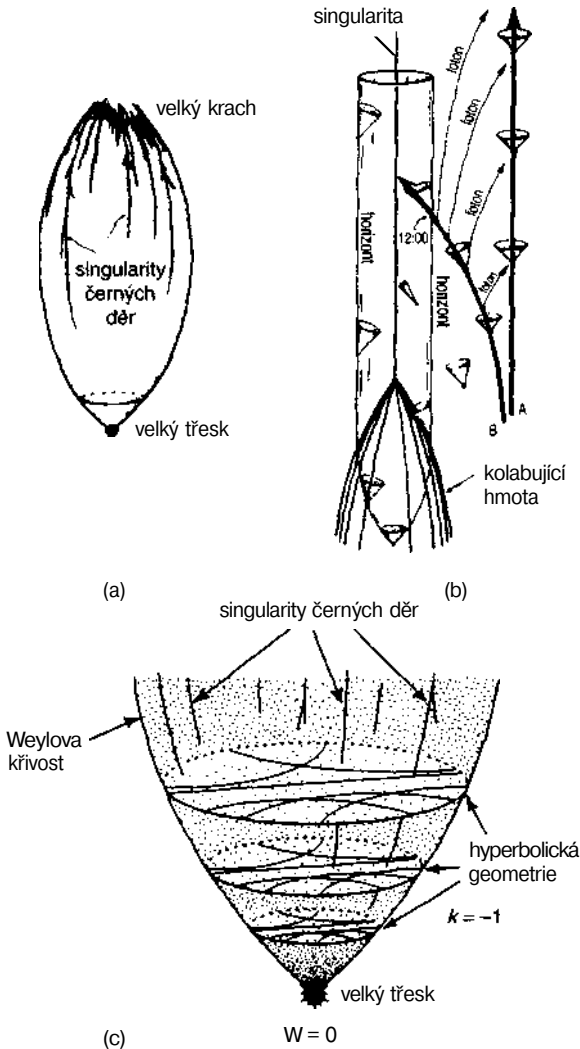
[Stejnorodost/wzorova«e7;o vesmíru vykládají inflační teorie tak, že část vesmíru, kterou dnes můžeme pozorovat, vznikla z oblasti, jejíž rozměr před inflační expanzí byl tak malý, že mohla být nějakým me-



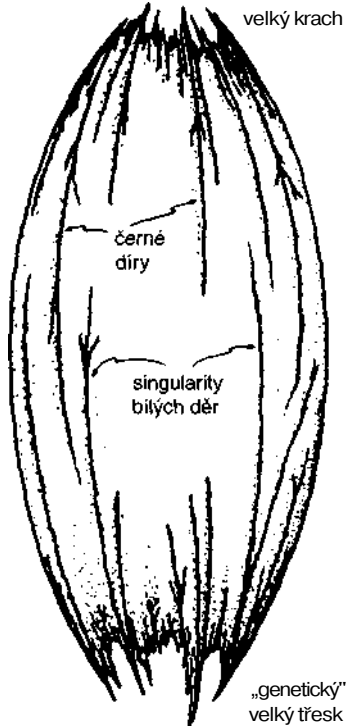
Obr. 27 Ilustrace problému „genericých“ nepravidelností v raném vesmíru.

chanismem homogenizována během nepatrné doby, jež uplynula mezi „počátkem vesmíru“ a počátkem inflace. Nepředpokládáme-li inflaci, je obtížné vysvětlit homogenitu vesmíru proto, že některé části pozorovaného vesmíru během jeho existence na sebe nikdy nepůsobily, vzhledem k tomu, že každá interakce se šíří nejvýše rychlostí světla a od počátku vesmíru k tomu prostě nebylo dost času. Podle inflačních teorií tedy vesmír není homogenní jako celek, homogenní je jen ta část, kterou jsme schopni pozorovat a která vznikla z oblasti rozměru řádově *rychlost světla x čas do počátku inflace*. Toto jistě neuspokojuje Penroseův cit pro matematickou eleganci, nehledě na chybějící detaily inflačních teorií.]

Obrázek 28 se znovu vrací k vývoji uzavřeného a otevřeného vesmíru, navíc jsem jej doplnil o diagram vývoje černé díry, odborníkům dobře známý. Hmota hroutící se do černé díry vytváří singularitu, znázorněné silnými čarami v diagramech vesmírů. Vyslovím hypotézu, které říkám *hypotéza o Weylově křivosti*. Tato hypotéza neplyne z žádné známé teorie. Jak už jsem však řekl, nevíme, jak ta pravá teorie vypadá, neboť zatím neumíme správně spojit fyziku velmi velkého a velmi malého. Předpokládám tedy, že až tuto teorii objevíme, bude jedním z jejích důsledků to, co jsem nazval hypotézou o Weylově křivosti. Vzpomeňme si, že Weylova křivost je ta část Riemannova tenzoru, která je zodpovědná za deformaci a slapové jevy. Moje hypotéza tedy zní, že z důvodu, který zatím neznáme, musí ta správná teorie vést k tomu, že v blízkosti velkého třesku Weylův tenzor buď vymizí, nebo bude alespoň omezen na velmi malou hodnotu.



Obr. 28 (a) Celá historie uzavřeného vesmíru, který svůj život začíná homogenním velkým třeskem s malou entropií a Weylovým tenzorem rovným nule a končí velkým krachem s vysokou entropií a Weylovým tenzorem rostoucím k nekonečnu. Je zde vyznačeno, že v průběhu vývoje vesmíru se vytvořilo mnoho černých děr. (b) Prostorčasový diagram kolapsu individuální černé díry. (c) Historie otevřeného vesmíru, na jejímž začátku je opět velký třesk s nízkou entropií a nulovým Weylovým tenzorem.



Obr. 29 Pokud neklademe počáteční podmínku, že Weylův tenzor vymizí, máme velký třesk, jemuž odpovídá velká entropie, a Weylův tenzor se na počátku též blíží nekonečnu. Takový vesmír by byl protkán černými dírami a v rozporu se zkušeností by v něm neplatila druhá věta termodynamická.

Důsledkem takové skutečnosti by byl vesmír vystižený obrázkem 28 (a), (b), a ne vesmír podobný tomu na diagramu 29. Hypotéza o Weylově křivosti je časově asymetrická a platí pouze pro singularitu v minulosti, ne pro singularitu v budoucnosti. Pokud dovolíme, aby Weylův tenzor měl „obecné“ hodnoty nejen v budoucím, ale i minulém vesmíru, dostaneme v případě uzavřeného vesmíru ošklivý obraz se stejným chaosem na počátku jako na konci. Tak určitě vesmír, ve kterém žijeme, nevypadá.

Jaká je pravděpodobnost, že počáteční singularita, alespoň vzdáleně připomínající tu, kterou vesmír má, vznikla čistě *náhodně*? Tato pravděpodobnost je pro uzavřený vesmír menší než $1/10^{10^{21}}$. Jak se dospělo

k takovému odhadu? Tento enormní výsledek vyplývá ze vzorce odvozeného Jacobem Beckensteinem a Stephenem Hawkingem pro entropii černé díry, pokud je aplikována v tomto speciálním kontextu. Hodnota závisí na tom, jak velký vesmír je, a pokud přijmeme mého favorita, neuzavřený hyperbolický vesmír, je toto číslo ve skutečnosti nekonečné.



Obr. 30 Aby Stvořitel nechal vzniknout vesmíru, který připomíná ten, v němž žijeme, musel se strefit do „buňky“ ve fázovém prostoru o nepředstavitelně malém objemu $1/10^{10^{23}}$. (Špendlík, který na obrázku drží, a tečku, do níž míří, je naprosto nemožné nakreslit ve správném měřítku.)

Co nám to říká o přesnosti, s jakou musí být nastaveny parametry velkého třesku? Je to opravdu velmi, velmi podivuhodné. Na obrázku 30 ilustruji nepravděpodobnost náhodného ustavení těchto parametrů obrázkem Stvořitele, který hledá nepatrný bod ve fázovém prostoru, bod představující počáteční podmínky, ze kterých se vesmír musel vyvinout, aby alespoň vzdáleně připomínal ten vesmír, v němž žijeme. Aby ho našel, musí tento bod lokalizovat v nepatrném objemu, jehož poměr k celkovému objemu je dán nepatrným číslem $1/10^{10^{23}}$. Je to nepředstavitelně malé číslo. Pokud bychom je napsali ve tvaru desetinného čísla, tedy 0, 000 ... 1, počet nul nahrazených tečkami by byl takový, že pokud bychom napsali jednu nulu na každou elementární částici v pozorovaném vesmíru, stále by nám tyto nuly k zápisu čísla nestačily.

Zatím jsem hovořil o přesnosti, o tom, jak neobyčejně přesně spolu souhlasí matematika a fyzika. Také jsem se zmiňoval o druhé větě termodynamické. Tento zákon se často pokládá za ne zcela striktní zákon,

protože hovoří o náhodnosti a pravděpodobnosti. Přesto je v něm skryto něco velmi přesného. Pokud jej aplikujeme na vesmír, říká nám o tom, s jakou přesností musely být nastaveny počáteční podmínky vesmíru. Tato neuvěřitelná akoratnost musí nějak souviset se sjednocením kvantové mechaniky a obecné teorie relativity, s teorií, kterou dosud nemáme. V příští kapitole si však řekneme něco o tom, co by tato teorie měla zahrnovat.

ZÁHADY KVANTOVÉ FYZIKY

V první kapitole jsem obhajoval názor, že fyzikální svět závisí velmi přesně na matematice, tak jak to symbolicky znázorňuje obrázek 3. Je opravdu pozoruhodné, jak dobře matematický popis vystihuje nejzákladnější aspekty fyziky. Eugene Wigner to v roce 1960 charakterizoval ve své proslulé přednášce jako „nepochopitelnou účinnost matematiky ve fyzikálních vědách“.

Seznam úspěchů matematických metod v popisu světa je velmi působivý:

Euklidovská geometrie je velmi přesně použitelná v měřítkách menších, než je průměr atomu vodíku, až do rozměrů mnoha metrů. Jak víme z první kapitoly, neplatí zcela přesně v důsledku efektů obecné teorie relativity, je však více než dostatečným přiblížením pro většinu praktických účelů.

I *kvantová mechanika*, která je předmětem této kapitoly, je velice přesně platnou teorií. Poměr výsledků předpovídaných kvantovou teorií pole, která spojuje kvantovou mechaniku s Maxwellovou elektrodynamikou a Einsteinovou speciální teorií relativity, a experimentálně zjištěných dat se obecně liší od 1 až na desátém desetinném místě. Například pro magnetický moment elektronu dává teorie v Diracových jednotkách hodnotu 1,001159652(46), zatímco experimentálně určená hodnota je 1,0011596521(93).

Zdůrazněme ještě jednu okolnost. Matematika užitá v těchto teoriích je nejen neobyčejně účinným nástrojem při popisu fyzikálního světa, ale i krásnou matematikou sama o sobě. V řadě případů se „čistá“ matematika inspirovala právě myšlenkami, které vycházely z potřeb fyzikálních teorií.

Uvedme několik příkladů takových matematických konceptů:

- reálná čísla
- euklidovská geometrie
- diferenciální počet a teorie diferenciálních rovnic

- diferenciální formy a parciální diferenciální rovnice
- Riemannova geometrie a Minkowského geometrie
- komplexní čísla
- Hilbertův prostor
- funkcionální integrály a další a další.

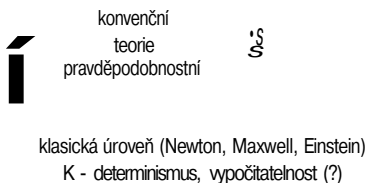
Nejvýznačnějším příkladem je snad objev diferenciálního počtu, který vybudoval Newton a další; pomocí tohoto nástroje vytvořil to, co dnes nazýváme newtonovskou mechanikou. Když se tyto matematické techniky později užily k řešení čistě matematických problémů, ukázaly svou plodnost i v „čisté“ matematice.

V první kapitole jsme klasifikovali objekty podle jejich velikostí a časových měřítek pro ně typických. Vyšli jsme od opravdu nesmírně malých prostorových a časových rozměrů, charakterizovaných Planckovou délkou a Planckovým časem, proti nimž jsou typická měřítka světa elementárních částic 10^{20} krát větší. Tato měřítka jsou zase zcela nepatrná ve srovnání s prostorovými i časovými měřítky typickými pro lidské bytosti. Poukázali jsme na skutečnost, že z vesmírného hlediska jsme my lidé vlastně neobyčejně stabilní struktury, a skončili jsme u maximální časové škály - u věku fyzického vesmíru.

Při této příležitosti jsem upozornil na znepokojivou skutečnost, totiž že náš popis základních fyzikálních zákonů se ubírá dvěma značně rozdílnými cestami podle toho, všímáme-li si struktur velkých rozměrů, nebo naopak struktur rozměrů velmi nepatrných. Diagram 31, který je totožný s obrázkem 5, vystihuje vztah mezi popisem na velmi malých měřítkách, k němuž slouží kvantová mechanika, a klasickou fyzikou, vystihující svět měřítek velkých. Pro kvantovou úroveň používám označení U, což značí „unitárnost“, klasickou úroveň popisu označuji jako K.

Když jsem se v první kapitole zabýval fyzikou velkých měřítek, zdůraznil jsem, že fundamentální zákony platné ve velkých a malých měřítkách se od sebe zásadně liší. Většina fyziků zastává stanovisko, alespoň jak se domnívám, že jakmile porozumíme kvantové teorii opravdu do hloubky, se nám podaří odvodit klasickou fyziku jako důsledek fyziky kvantové.

Moje argumentace se však bude ubírat jiným směrem. V praxi se totiž o vztah klasické a kvantové oblasti obvykle nezajímáme - *bud'* pracujeme na kvantové úrovni, *nebo* na úrovni klasické. Je to znepokojivě podobné způsobu, jakým pohlíželi na svět staří Pvekové. Pro ně existovala jednak sada zákonů aplikovatelná na Zemi a jednak rozdílná sada



Obr. 31

zákonů, jež jim sloužila k popisu nebes. Síla galileiovsko-newtonovského pohledu spočívala právě v tom, že se mu podařilo spojit tyto dvě sady a odvodit je jako důsledek jediné fyziky. Dnes se však zdá, že jsme na tom opět jako Řekové: jednu sadu zákonů máme pro kvantovou úroveň a jinou pro úroveň klasickou.

Rád bych předešel možnému nedorozumění, k němuž by mohl vést graf 31. Do rámečku nadepsaného „klasická úroveň“ se jmény Newton, Maxwell a Einstein jsem vepsal slovo „determinismus“. Tím nechci říci, že by tito vědci věřili, že svět jako celek je deterministický. Je opodstatněné se domnívat, že Isaac Newton a James Clark Maxwell tento názor nezastávali, i když Einstein zřejmě ano. Charakteristiky „determinismus“ a „vypočitatelnost“ se vztahují pouze k jejich teoriím, ne k tomu, jaká byla představa těchto vědců o chování skutečného světa. Do rámečku „kvantová úroveň“ jsem umístil „Schrödingerovu rovnici“, nemyslím si však, že by Schrödinger věřil, že celý svět se řídí po něm nazvanou rovnicí. Později se k právě k tomuto vrátím. Zatím jen zdůrazněme, že - stručně řečeno - lidé a teorie po nich nazvané jsou dvě rozdílné záležitosti.

Jsou ale popisy světa označené jako kvantová a klasická úroveň opravdu dvě zcela rozdílné věci? Můžeme si položit otázku: Nevládnou vesmíru právě jen kvantověmechanické zákony? Nemůžeme vysvětlit celý vesmír pouze na základě kvantové mechaniky? Abych se mohl pokusit na tuto otázku odpovědět, musím říci nejdříve alespoň něco o kvantové mechanice. Nejdříve předložím stručný seznam jevů, které kvantová mechanika vysvětlit dovede.

- *Stabilita atomů* Před objevem kvantové mechaniky bylo nepochopitelné, proč elektrony v atomech postupně nespádnou po spirální

dráze do jádra. Podle klasické fyziky by to měly udělat, protože elektrony obíhající jádro by měly ztrácet energii zářením.

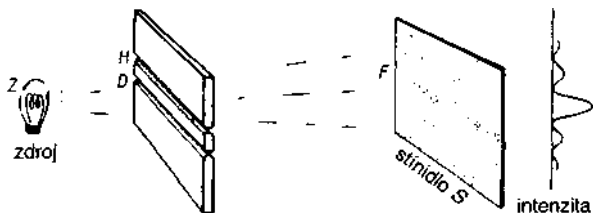
- *Spektrální čáry* Kvantované energetické hladiny v kvantovém modelu atomu vysvětlují rozložení emisních spektrálních čar a předpovědi teorie zde velice přesně souhlasí s pozorováním.
- *Chemické síly* Síly, které drží pohromadě molekuly, jsou plně kvantověmechanické povahy.
- *Záření černého tělesa* Kvantová teorie vysvětluje spektrum záření absolutně černého tělesa (tedy tělesa, které pohltí veškeré dopadající záření).
- *Mechanismus dědičnosti* Ten závisí na kvantověmechanickém chování molekul DNA.
- *Lasery* Záření laseru je důsledkem existence stimulovaných kvantových přechodů mezi kvantověmechanickými stavy molekul a kvantové (Boseho-Einsteřnovy) povahy světla.
- *Supravodivost a supratekutost* Tyto jevy, tj. vedení elektrického proudu při efektivně nulovém odporu a proudění tekutin bez vnitřního tření, pozorované při velmi nízkých teplotách, jsou důsledkem kvantové korelace na velké vzdálenosti mezi elektrony a jinými částicemi v různých látkách.
- A další a další a další.

Jinými slovy, kvantová mechanika je všudypřítomná i v podmínkách každodenního života a je jádrem mnoha oblastí pokročilých technologií včetně počítačové techniky. *Kvantová teorie pole*, kombinace Einsteinovy speciální teorie relativity s kvantovou mechanikou, je základem teorie elementárních částic. Výše jsme uvedli, s jakou přesností předpovídá kvantová teorie pole experimentální výsledky. Uvedený seznam ukazuje, jak obdivuhodnou a mocnou teorií kvantová mechanika je.

A teď alespoň v náčrtu, v čem je její podstata. Archetypální kvantověmechanický pokus nám ukazuje obrázek 32. Podle kvantové teorie je světlo částicemi zvanými *fotony*; na obrázku je vyznačen zdroj fotonů Z, o němž předpokládáme, že emituje jednotlivé fotony v určitém časovém odstupu. Dále je zde překážka se dvěma štěrbinami H a D a za ní stínidlo. Dopady fotonů na stínidlo se registrují jako jednotlivé události, zcela podobně, jako kdyby to byla normální tělíška. Podivné kvantové chování se pak projevuje následovně. Pokud je otevřená jen horní štěrbin a dolní štěrbin je uzavřená, mohou fotony dopadat na řadu míst na stínidle. Podobně je tomu, je-li naopak otevře-

na dolní a zavřená horní štěrbinu, a budou existovat místa, kam fotony dopadají nyní a kam dopadaly i při předchozím uspořádání.

Otevřeme-li však najednou obě štěrbinu, najdeme nyní na stínidle místa, kam žádný foton nikdy nedopadne, ačkoli tam fotony dopadaly, když byla otevřená jenom jedna z obou štěrbin. Jakýmsi záhadným způsobem se vyruší dvě věci, které by fotony *mohly* udělat. [Připomeňme, že fotony vyletují ze zdroje s takovým časovým odstupem, že na cestě je vždy jen jeden foton, neruší se tedy fotony, které zároveň prolétají oběma štěrbinami, nýbrž opravdu *možnosti* průletu.]



Obr. 32 Dvoušterbinový pokus s individuálními fotony monochromatického světla.

S něčím takovým se v klasické fyzice nesetkáváme. Buď nastane něco, nebo nastane něco jiného. Nikdy se nesetkáme s tím, aby dvě věci, které by se mohly přihodit, jaksi proti sobě konspirovaly. Výsledek tohoto pokusu vysvětluje kvantová teorie tak, že pokud foton cestuje od zdroje k stínidlu, není ve stavu odpovídajícím průchodu horní či ve stavu odpovídajícím naopak průchodu dolní štěrbinou, nýbrž v jakési záhadné kombinaci obou těchto stavů.

Váha, s jakou oba stavy přispívají k výsledku, je vyjádřena komplexním číslem. Matematicky vyjádřeno, stav fotonu je

$$w \times (\text{alternativa A}) + z \times (\text{alternativa B}),$$

kde w a z jsou komplexní čísla. (Za alternativu A zde můžeme vzít prostě „foton prochází po dráze ZHS“ a za alternativu B „foton prochází po dráze ZDS“.) Důležité je, že obě čísla udávající váhu, s jakou se prosazují obě alternativy, jsou komplexní, právě proto se může vyskytnout popsání vzájemné vyrušení.

Mohlo by se zdát, že chování fotonu bychom mohli popsat pravděpodobnostmi, že nastane jedna z obou alternativ. Pak by ovšem čísla z a w byla reálná, udávala by pravděpodobnostní váhu obou alternativ a ne-

docházelo by k vyrušení. Jde však o čísla komplexní a to je právě důležitý rys kvantové mechaniky. „Vlnový charakter“ částic nelze vysvětlit pomocí „vln pravděpodobnosti“ alternativ. Jde o *komplexní vlny* alternativ!

Komplexní čísla jsou matematické objekty, ve kterých vystupuje druhá odmocnina z minusjedné, $i = \sqrt{-1}$, a také čísla reálná. Můžeme je znázornit bodem v rovině (obr. 33(a)), přičemž x-ová souřadnice představuje reálnou *ayová* souřadnice ryze imaginární část daného komplexního čísla.

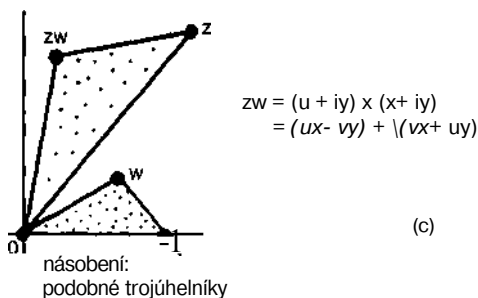
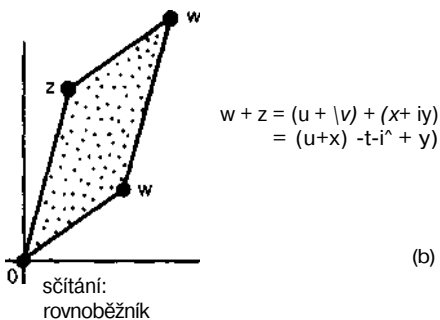
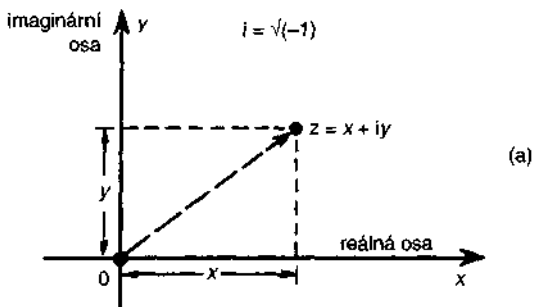
Na obrázku 33(a) je znázorněno komplexní číslo $x + \sqrt{-1}y = x + iy$. Rovině, na níž jsou v uvedeném smyslu zobrazena komplexní čísla, se říká Gaussova. Každé komplexní číslo se zobrazí v této rovině jako bod. Komplexní čísla se sčítají tak, že se sčítají zvlášť jejich reálné a imaginární části, čemuž v grafickém znázornění odpovídá „rovnoběžníkové pravidlo“ - jak vidíme na obrázku 33(b). Definici jejich násobení a odpovídající grafické znázornění vidíme na obrázku 33(c). Jakmile si zvyknete na grafické znázornění komplexních čísel a operací s nimi, změní se z abstraktní představy v něco zcela konkrétního.

Skutečnost, že komplexní čísla jsou zabudována do samých základů kvantové teorie, činí pro řadu lidí tuto teorii něčím příliš abstraktním a nepochopitelným. Stačí si však na komplexní čísla zvyknout, a hrávejte-li si se jejich grafickým vyjádřením v Gaussově rovině, stanou se čím-si „z masa a kostí“ a přestanou vás znepokojovat.

V základech kvantové teorie leží však něco víc než jenom superpozice stavů vážených kvantovými čísly. Stále totiž zůstáváme jen na kvantové úrovni, kde se uplatňují pravidla, která jsem označil jako U. Na této úrovni je stav systému určen komplexně váženou superpozicí všech možných alternativ. Časový vývoj kvantového stavu je dán *unitární* (nebo *Schrodingerovskou*) *evolucí*, proto označení U.

Základní vlastností tohoto *unitárního operátoru* U je linearita. To znamená, že superpozice dvou stavů se vyvíjí jako superpozice stavů vyvíjejících se individuálně, přičemž komplexní váhy obou stavů ve výsledném stavu jsou *konstantní v čase*. Tato linearita je základním rysem *Schrodingerovy rovnice*, již se unitární evoluce řídí. Na kvantové úrovni přispívají jednotlivé vyvíjející se stavy k výslednému stavu stále stejně, což je vyjádřeno právě časovou neměnností komplexních vah.

Jakmile ale provedete „zvětšení na klasickou úroveň“, pravidla se změní. Tímto „zvětšením“ míním přechod z úrovně U na úroveň K v obrázku 31. Fyzikálně to odpovídá například tomu, co se děje, když pozorujeme skvrnu na stínidle. Kvantové procesy na mikroskopické úrovni odstartují něco, co lze makroskopicky, tedy na klasické úrovni, skutečně pozorovat.



Obr. 33 (a) Zobrazení komplexních čísel v Gaussově rovině, (b) geometrické znázornění součtu komplexních čísel, (c) geometrické znázornění násobení komplexních čísel.

Ve standardní kvantové teorii tomu odpovídá proces, o němž se tak často nehovoří. Říká se mu *kolaps vlnové funkce* nebo *redukce stavového vektoru* (tento proces budu značit písmenem „R“). Je to něco zcela jiného než unitární evoluce. Jeho matematický popis vypadá tak, že

v superpozici dvou alternativ se podíváme na obě komplexní čísla představující jejich váhy a určíme druhé mocniny jejich modulů - to znamená vzdáleností od počátku bodů zobrazujících komplexní čísla v Gaussově rovině. Podíl těchto druhých mocnin pak určuje poměr pravděpodobností, že tyto alternativy nastanou. Ale k tomuto procesu dochází až v okamžiku, kdy „provedete měření“ či „provedete pozorování“.

Právě toto můžeme pokládat za proces „zvětšující“ jevy z úrovně U na klasičtější úroveň K v obrázku 31. A při tomto procesu nastává změna pravidel, lineární superpozice se při něm nezachová. Poměry čtverců modulů se najednou stanou pravděpodobnostmi.

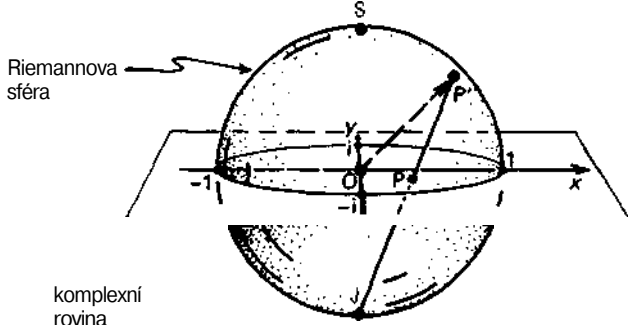
Je to právě přechod z úrovně U na úroveň K, tedy proces R, který do teorie zavede indeterminismus. Na úrovni U se všechno vyvíjí deterministicky, kvantová mechanika se stává indeterministickou teprve v okamžiku, kdy „provedeme měření“, jehož výsledek je určen jen s určitou pravděpodobností.

Takové je tedy základní schéma standardní kvantové mechaniky. Je to velmi zvláštní schéma pro fundamentální teorii. Kdyby to byla jen aproximace nějaké základnější teorie, dávalo by to větší smysl, ale všichni profesionálové se dívají právě na tuto hybridní proceduru jako na základní teorii! Řekněme si ještě trochu více o těch komplexních číslech v teorii. Na první pohled se zdá, že jsou to jakési abstraktní veličiny v teoretickém schématu, které získají jasný smysl teprve v okamžiku, když je umocníme jejich moduly a určíme tak odpovídající pravděpodobnosti. Často jim však lze dát pěknou geometrickou interpretaci, jak objasním na příkladu. Ještě dříve však řeknu ještě trochu více o kvantové mechanice.

Osvětlím smysl značení pomocí takových divně vypadajících závorek, které zavedl Paul Dirac. Znamenají zkratku pro zápis stavu systému: Když napíšeme $|A\rangle$, míním tím, že systém je v kvantovém stavu A. To, co je uvnitř závorek, v našem případě A, je určitým popisem příslušného stavu. Celkový stav kvantového systému, který je obecně superpozicí řady jiných stavů, se obvykle značí $|\psi\rangle$. V případě pokusu se dvěma šterbinami, kde jsme měli dvě alternativy, můžeme celkový stav zapsat

$$|\psi\rangle = w|A\rangle + z|B\rangle.$$

V kvantové mechanice nás vlastně nezajímají velikosti čísel, nýbrž jejich poměry. V kvantové mechanice platí pravidlo, že stav můžeme vynásobit komplexním číslem, aniž bychom změnili fyzikální situaci



Obr. 34 Riemannova sféra. Bod P , představující $u = z/w$ v komplexní rovině, se promítá z jižního pólu J do bodu P' na sféře. Přímka OP' určuje směr osy spinu superponovaného stavu dvou částic s polovičním spinem.

(pokud je toto číslo různé od nuly). Jinak řečeno, přímý fyzikální význam mají jenom poměry komplexních čísel stojících u jednotlivých stavů. Když vstoupí do hry proces R , zajímají nás pravděpodobnosti, a tedy poměry druhých mocnin modulů. Na kvantové úrovni se nám však podaří interpretovat i samotné poměry komplexních čísel.

Komplexní čísla se vhodně znázorňují pomocí *Riemannovy sféry* (obr. 10(c)). Přesněji řečeno, nás nyní nezajímá ani tak vyjádření samotných komplexních čísel, jako spíše jejich poměrů. S poměry čísel musíme být opatrní, neboť blíží-li se číslo ve jmenovateli nule, roste hodnota zlomku k nekonečnu. I tento případ však můžeme zahrnout do zobrazení na Riemannovu sféru.

Představme si, že Gaussova rovina prochází rovníkovou rovinou sféry o jednotkovém poloměru. Protíná tedy sféru na rovníku, tvořícím jednotkovou kružnici. Jestliže vedeme přímku jižním pólem a bodem v Gaussově rovině a tomuto bodu přiřadíme bod na sféře, v němž ji přímka protne, jižní pól sám bude při tomto zobrazení odpovídat *nekonečnu* Gaussovy roviny.

Pokud se kvantový systém může nacházet právě ve dvou alternativních stavech, různé stavy, které mohou vzniknout kombinací těchto dvou, jsou reprezentovány sférou - abstraktní sférou na této úrovni. V některých případech ji však můžeme skutečně vidět. Mně se velice líbí následující příklad.

Máme-li částici se spinem 5, například elektron, proton nebo neutron[^] můžeme různé kombinace spinových stavů vyjádřit geometricky. Částice s polovičním spinem má dva spinové stavy, jeden, ve kterém

rotační vektor ukazuje nahoru, a druhý, v němž ukazuje dolů. Superpozice těchto dvou stavů se dá vyjádřit symbolicky jako

$$|\uparrow\rangle = w |\uparrow\rangle + z |\downarrow\rangle.$$

Různé kombinace těchto spinových stavů odpovídají rotaci kolem některé jiné osy, a chceme-li vědět, která osa to je, vezmeme prostě poměr čísel w a z , tedy komplexní číslo $u = z/w$. Toto číslo u umístíme na Riemannovu sféru a směr průvodiče tohoto komplexního čísla nám pak udává směr rotační osy. Vidíte, že komplexní čísla nejsou tak abstraktní záležitost, jak se na první pohled jeví. Mají zcela konkrétní význam; někdy je sice trochu obtížné ho odhalit, ale v případě částic s polovičním spinem je zřejmý.

Analýza případu částic s polovičním spinem nám říká ještě něco jiného. Stav „spin nahoru“ „spin dolů“ nejsou nijak význačné. Za příslušnou osu můžeme zvolit například směr zleva doprava nebo zepředu dozadu, a nic podstatného by se nezměnilo. Dva stavy, s nimiž začnete, nejsou nikterak význačné, až na to, že musíte zvolit spinové stavy navzájem obrácené. Podle pravidel kvantové mechaniky je každá jiná sada opačných spinových stavů stejně dobrým základem jako ta, kterou jste si zvolili na počátku; náš příklad to názorně ilustruje.

Kvantová mechanika je krásná a jasně formulovaná; má však i řadu záhad, je to jistě tajemná disciplína a v mnoha aspektech nám připadá jako paradoxní. Chci zdůraznit, že jsou zde tajemná dvojího druhu; říkám jim tajemná Z a tajemná X .

Z-záhad označují věci, které ve fyzickém světě zcela jistě jsou, tj. existují takové experimenty, které ukazují, že kvantová mechanika chodí takovými tajemnými cestami. Některé z efektů, které kvantová teorie předpovídá, nejsou snad sice dosud plně experimentálně potvrzeny, ale obecně se nepochybuje, že kvantová mechanika je správná. K těmto tajemným patří jevy jako *vlnové-částicový dualismus*, o kterém jsem už hovořil, *nulová měření*, o nichž budu mluvit za chvíli, *spin*, který jsem právě popsal, a *nelokální efekty*, k nimž se ještě dostaneme, i u jistě o podivuhodné jevy, ale nepřipouštějí pochyby o své reálnosti - zcela jistě jsou součástí přírody.

X-záhad ale i problémy, které jsem nazval tajemný X , protože mají charakter *paradoxů*. Mému způsobu myšlení odpovídá, že se na ně dívám jako na indikaci skutečnosti, že teorie je neúplná, chybná nebo tak něco a že si každopádně zaslouží další pozornosti. Základním tajemným X

je *problém měření*, který jsem už přiblížil výše, jmenovitě skutečnost, že se pravidla hry mění z U na R , když vystupujeme z kvantové na klasickou úroveň. Porozumíme, jak tato R procedura vzniká, možná jen jako přiblížení, až lépe pochopíme, jak se chovají složité kvantové systémy?

Nejznámějším tajemným i je problém *Schrödingerovy kočky*. V tomto experimentu - zdůrazňují, že jde o myšlenkový experiment, protože Erwin Schrödinger byl velmi humánně založený - je zmíněná kočka zároveň ve stavu „živá“ i „mrtvá“. S takovými kočkami se ovšem ve skutečnosti nesetkáváme.

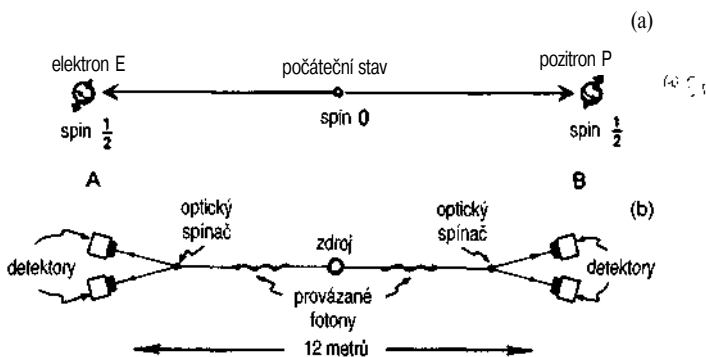
Podle mého názoru si na tajemná Z musíme zvyknout a naučit se s nimi spokojeně žít, zatímco tajemná X by měla v lepší budoucí teorii zmizet. Zdůrazňuji, že je to čistě můj osobní názor. Mnoho dalších lidí na (zdánlivé?) paradoxy kvantové teorie pohlíží jiným způsobem - měl bych snad raději říci *mnoha různými* způsoby.

Řekněme si ještě něco více o tajemnech Z , než se začneme zabývat mnohem závažnější otázkou paradoXů. Všimnu si dvou nejpodivuhodnějších problémů Z . Jedním je problém *kvantové nelokality* nebo - jak se mu též říká - problém *kvantové provázanosti*. [Pro anglické *quantum entanglement* dosud neexistuje ustálený český termín. Odborníci často přejímají (podobně jako v němčině) anglický termín a pak mluví například o „entanglovaných částicích“.] Jde o skutečně zvláštní jev. Myšlenka vyšla původně od Einsteina a jeho kolegů Borise Podolského a Nathana Rosena a je známá pod zkratkou EPR experiment. Jeho podstata je asi nejsrozumitelnější ve verzi předložené Davidem Bohmem.

Mějme částici s nulovým spinem, která se rozpadne na dvě částice s poločíselným spinem, například elektron a pozitron. Obě výsledné částice se pohybují v opačných směrech. Spin těchto navzájem se vzdalujících částic pak změřme ve dvou velmi vzdálených bodech, A a B . Výsledný celkový spin produktů rozpadu, tedy elektronu a pozitronu, musí být podle zákonů kvantové mechaniky stejný, jako měla původní částice, tedy nulový. Naměříme-li tedy u jedné částice spin „nahoru“, tedy $+\frac{1}{2}$, musí mít druhá částice spin „dolů“, tedy $-\frac{1}{2}$.

Podle velmi známé věty, dokázané Johnem Bellem, nelze sloučit předpovědi kvantové mechaniky týkající se vázané pravděpodobnosti výsledků měření v bodech A a B s „lokálním realistickým modelem“. „Lokálním realistickým modelem“ se zde míní to, že elektron v místě A je jedna „klasická“ věc a pozitron je jiná „klasická“ věc v místě B a obě nejsou spolu nijak spojeny. Za těchto předpokladů by výsledky měření měly odpovídat pravidlům pro vázanou pravděpodobnost měření, kte-

rá se provedou v místech *A* a *B*, ale to je v rozporu s kvantovou mechanikou. John Bell to zcela přesvědčivě dokázal. Jde o velmi důležitý výsledek a následné experimenty Alaina Aspecta v Paříži potvrdily předpověď kvantové mechaniky. Schéma experimentu je naznačeno na obrázku 35. Při experimentu se měřily polarizační stavy páru fotonů vyslaných ze společného zdroje v opačných směrech, pokus však přesně odpovídá našemu myšlenkovému experimentu s elektronem a pozitronem.



Obr. 35 (a) Částice s nulovým spinem se rozpadá na dvě částice s poločíselným spinem, elektron *E* a pozitron *P*. Měření spinu jedné částice s polovičným spinem zjevně *okamžitě* fixuje hodnotu spinu částice druhé,

(b) EPR experiment Alaina Aspecta a jeho spolupracovníků. Fotonový pár emitovaný ze zdroje je v provázaném stavu. Rozhodnutí, který směr polarizace fotonu se změří, padne, až když už fotony letí - příliš pozdě na to, aby od jednoho k druhému mohla o tom dojít zpráva.

Rozhodnutí, ve kterém směru se bude měřit polarizace fotonu, nepadlo dříve, než oba fotony už byly na cestě od zdroje k detektorům *A* a *B*. Výsledek těchto měření plně souhlasil s předpovědí kvantové mechaniky o pravděpodobnostech polarizačních stavů fotonů pozorovaných v *A* a *B*. V době provádění experimentu samozřejmě už skoro všichni fyzikové, i John Bell, věřili, že tak pokus musí dopadnout. Jenže tento výsledek je v rozporu s představou, která se zdá přirozená, že totiž oba fotony jsou zcela nezávislé objekty. Aspectův pokus prokázal efekt kvantové provázanosti na vzdálenost 12 metrů. Specialisté na tento problém mi sdělili, že dnes se už provádějí obdobné pokusy v souvislosti s kvantovou kryptografií na vzdálenostech řádově kilometrových.

Všimněme si, že v případě těchto *nelokálních* jevů se události odehrávají v oddělených bodech *A* a *B*, ale jejich provázanost se realizuje taju-

plným způsobem. Podstata jejich propojení či *provázání* je velmi subtilní věc. Výsledky měření jsou sice navzájem provázány, ale této skutečnosti nelze žádným způsobem využít k předání signálu z A do B či obráceně. [Jakmile pozorovatel v A zjistí, že jeho částice má spin nahoru, ví, že B naměřil spin své částice směrem dolů. Dozvěděl se tedy okamžitě na dálku výsledek měření v B ; pozorovatel v B však nemohl volně rozhodnout o výsledku svého měření, proto nemůže použít tohoto jevu k zakódování nějaké zprávy, která by se pak nekonečně rychle dostala k A .] To je velmi důležité pro soulad kvantové mechaniky s teorií relativity, která zakazuje poslat signál rychlostí větší, než je rychlost světla.

Kvantová provázanost je velmi zvláštní jev. Objekty nejsou ani zcela nezávislé, ani vzájemně spojené - tak něco mezi tím. Jde o čistě kvantověmechanický jev, který nemá v klasické fyzice žádnou analogii.

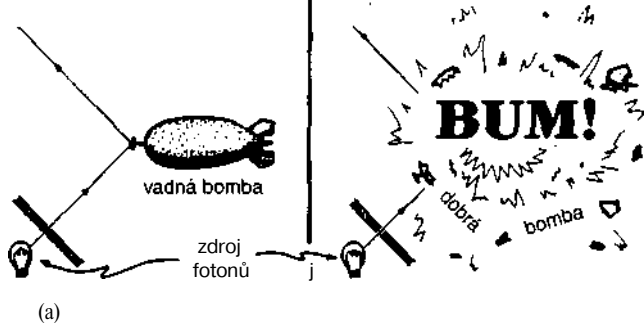
Druhým příkladem tajemná Z jsou *nulová* (neinterakční) měření. Pěkně je ilustruje *Elitzurův-Vaidmanův problém testování bomby*. Představte si, že patříte ke skupině teroristů a máte si vybrat bombu pro akci z velkého skladiště bomb. Každá z bomb má hypersenzitivní detonátor, tak citlivý, že i jediný foton viditelného světla, který dopadne na zrcátko na jeho čidle, vyvolá explozi. Jenže mezi bombami je spousta zmetků. Problém je v tom, že jemná jehlička, k níž je připevněno zrcátko a jejíž posunutí po dopadu fotonu vyvolá explozi, se u řady bomb při výrobě trochu ohnula, takže když foton dopadne na zrcátko, jehlička se nepohne - bomba proto nevybuchne (obr. 36(a)). U těchto zmetků funguje zrcátko prostě jako pevné zrcátko, na rozdíl od funkčních bomb, kde je pohyblivé a svým posunem iniciuje výbuch. Tak tedy stojí problém - vybrat bombu bez vady z řady vzorků, mezi nimiž jsou zmetky, ale tak, aby ji šlo ještě užít k pozdější akci. Klasická fyzika by nám žádnou možnost nedávala. Jedinou možností by bylo zkusit, zda se zrcátkem dá pohnout, pak ale nastane exploze, a máme po bombě.

Podivuhodným rysem kvantové mechaniky je, že nám umožňuje testovat, co by se *mohlo stát*, aniž se to opravdu stane. Kvantová mechanika testuje to, o čem filozofové hovoří jako o potencialitě.

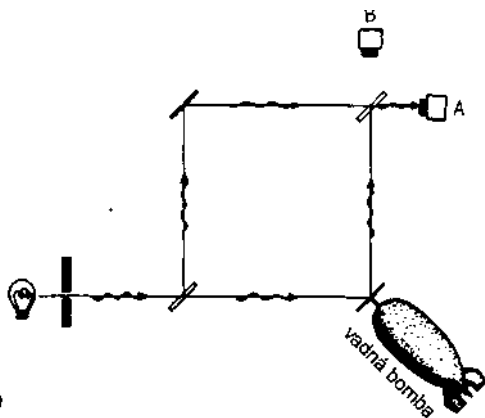
Jak řeší problém kvantová mechanika? Obrázek 36(b) ukazuje původní řešení Elitzura a Vaidmana z roku 1993.

Předpokládejme, že máme vadnou bombu, tedy bombu se zadrhnutým zrcátkem, které se chová jako upevněné, takže odrážející se foton nemůže vyvolat explozi.

Prohlédněme si nyní uspořádání pokusu na obrázku 36(b). Emitovanému fotonu jsme nyní postavili do cesty polopropustné zrcátko, kte-



(a)



(b)

Obr. 36 (a) Elitzurův-Vaidmanův problém testování bomby. Hypersenzitivní detonátor bomby uvede do činnosti jediný foton viditelného světla, pokud ovšem bomba není zmetek s poškozeným detonátorem. Úloha zní najít zaručeně fungující bombu mezi velkým souborem funkčních i zmetkových bomb. (b) Uspořádání umožňující splnění této úlohy. Pro kvalitní bombu funguje zrcátko napravo dole jako měřicí přístroj. Pokud naměří, že foton putoval druhou cestou, dovolí to detektoru *B* zaregistrovat foton, což se nestane, pokud je zrcátko na zmetkovém detektoru.

re odráží právě polovinu dopadajícího světla a polovinu propouští. Zdálo by se, že taková situace odpovídá skutečnosti, že se od zrcátka odráží právě polovina fotonů a druhá polovina jím projde.

Tak tomu ale vůbec není, pokud situaci popisujeme na kvantové úrovni projednotlivé fotony. Ve skutečnosti se každý foton, který vychází ze zdroje, nachází v kvantové superpozici stavů odpovídající oběma alternativám: průchodu, nebo odrazu. Zrcátko bomby leží na cestě pro-

cházejícího fotonu a je k ní skloněno pod úhlem 45° . Část fotonového svazku, která se od polopropustného zrcátka odráží, dopadá na plně odrazující zrcátko, také skloněné pod úhlem 45° , a oba svazky se znovu setkají na dalším polopropustném zrcátku. Na místech A a B jsou detektory fotonů.

Všimněme si teď, co se děje s jedním fotonem emitovaným ze zdroje, je-li bomba zmetek. Když se setká s prvním polopropustným zrcátkem, jeho stav se rozdělí na dva různé stavy, z nichž jeden odpovídá fotonu prošlému zrcátkem a směřujícím ke zmetkové bombě a druhý fotonu odraženému směrem k pevnému zrcátku vlevo nahoře. (Superpozice obou alternativních stavů odpovídá tomu, co se děje při pokusu na dvou šterbinách - obr. 32 -, a je to ve své podstatě stejný jev, k jakému dochází při sčítání spinu.) Předpokládejme, že polopropustná zrcátka jsou umístěna tak, že jejich středy leží ve vrcholech čtverce, jehož strany určují dráhy fotonů, a odraz se děje vždy na povrchu zrcátka (u zrcátka vpravo nahoře to znamená, že oba jeho povrchy jsou polopropustné, pokud světlo dopadá zvnějšku, ale plně propustné, prošlo-li světlo zrcátkem). Abychom se dozvěděli, v jakém stavu je foton, který dostihne detektory, musíme srovnat cesty obou fotonů, které mohou na oba detektory dopadnout, a uvážit, zda stavy odpovídající oběma cestám jsou v kvantové superpozici. Zjistíme, že stavy se vyruší v B , ale naopak v A se sčítají.

[Výsledek kvantové superpozice je stejný, jako když uvažujeme o makroskopických světelných vlnách procházejících popsané dráhy. Vlna, která procházela po horní dráze a která skončí v detektoru B , neprošla ani jedním ze zrcátek, zatímco vlna běžící po spodní dráze prošla oběma polopropustnými zrcátky. Optická dráha druhé vlny je tedy delší a tloušťku zrcátek lze zvolit tak, aby se obě vlny interferencí vyrušily. Naproti tomu obě vlny, které skončí v A , prošly jednou tloušťkou zrcátka, dopadají tedy do A ve stejné fázi a interferencí se zesilují.]

Právě zde je ale ten podstatný rozdíl oproti tomu, kdybychom chtěli testovat bombu pomocí klasických částic, které jsou „polopropustnými zrcátky“ posílány náhodně, ale se stejnou pravděpodobností, na alternativní dráhy. V takovém případě chybí jev interference. Do detektoru B by dospěla právě polovina částic, které dopadly na „zrcátko“ v pravém horním rohu, a polovina by skončila v detektoru A . Protože „zrcátko“ pracují náhodně, nemohli bychom předem vědět, která z částic vyletujících ze zdroje, jímž může být třeba puška vystřelující projektily s nepatrným rozptylem, dopadne do A a která do B , *stejně jako* to nevíme o kvantových částicích. *Na rozdíl* od kvantových částic by však po-

měr mezi počtem částic dopadajících do A a B nebyl nijak ovlivněn funkčností či nefunkčností bomby.]

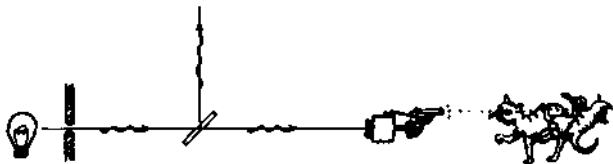
Vidíme tedy, že se může vyskytnout pouze signál, který aktivuje detektor A , nikdy ne signál, který by zaznamenal detektor B .

Předpokládejme teď, že nemáme zmetek, ale kvalitní bombu. Zrcátko na jejím čidle už není pevné, změnilo se v *měřicí přístroj*. Bomba měří, ve kterém stavu je foton na cestě - je to buď stav „foton dorazí k bombě“, nebo stav „foton nedorazí k bombě“. Předpokládejme, že foton prošel prvním polopropustným zrcátkem a zrcátko na čidle bomby skutečně změní, že dorazil. Pak jsme měli smůlu, bum! a je po bombě. Obstaráme si tedy jinou a zkusíme to znova. Tentokrát třeba bomba naměří, že se k ní foton nedostal, takže neexploduje. To je pro nás znamením, že foton procházel po drahé dráze. Provedli jsme nulové měření, protože foton s měřicím přístrojem vůbec neinteragoval, nulový údaj přístroje (ne bum!) nám však poskytl plnou informaci o stavu fotonu. Protože teď však víme s jistotou, že foton šel po horní dráze, nemá s čím interferovat, takže po odrazu od horního polopropustného zrcátka může aktivovat detektor B . Může také tímto zrcátkem projít a aktivovat detektorů, pak se o bombě nedozvíme nic, protože registruje fotony, i když je bomba zmetek. Pokud však zaregistruje foton detektor B , víme, že jsme našli bombu bez konstrukční vady.

Klíčovým bodem tohoto postupu je, že když jde o kvalitní bombu, funguje bomba jako měřicí přístroj, což zabrání destruktivní interferenci v S přesto, že foton s bombou vůbec neinteragoval - měření proběhlo jako *nulové*. Nešel-li foton jednou cestou, musel procházet cestou druhou! Když B zaregistruje foton, víme, že bomba pracovala jako měřicí přístroj a byla to tedy dobrá bomba. Dozvěděli jsme se to tak, že bomba vůbec nic neudělala, čímž fakticky prozradila, že foton musel letět druhou cestou.

Jde o jev vsutku pozoruhodný. Když v roce 1994 Zeilinger navštívil Oxford, sdělil mi, že pokus s testováním bomby fakticky provedl. Přesněji - on a jeho kolegové provedli pokus, jehož princip byl stejný, ale pracovali s něčím jiným než s bombou, podotýkám, že Zeilinger zcela jistě není terorista. Navíc mi tehdy řekl, že jeho kolegové Kwiat, Weinfurter a Kasevich přišli na vylepšený postup, při kterém se nepřichází o bomby či - přesněji - ztráty jsou zanedbatelné.

Opusťme nyní tento problém, který nám ale velmi výstižně ozřejmil podivuhodnou povahu kvantových tajemství Z . Problém je ale podle mého názoru v tom, že řadu lidí tajuplnost kvantové mechaniky jaksi hypnotizuje. Připadám jim, že když tak podivné jevy Z musíme přijmout



Obr. 37 *Schmdingerova kočka*. Kvantový stav je tvořen superpozicí odraženého a procházejícího fotonu. Procházející složka spustí zařízení, které kočku usmrtí, a v souladu s vývojem U kočka existuje v superpozici stavů živá a mrtvá.

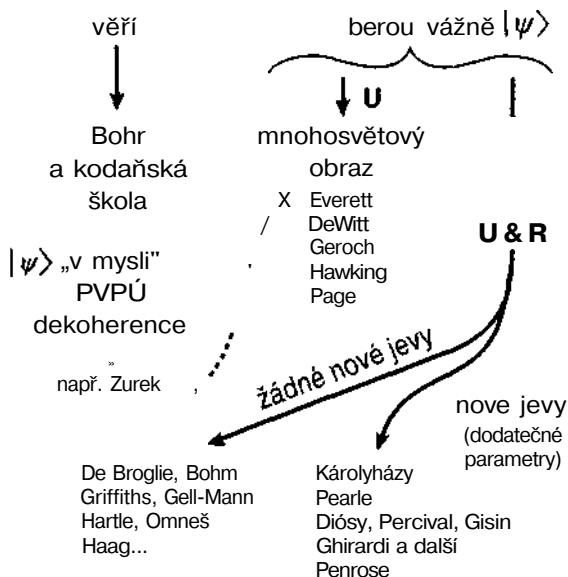
jako reálné jevy, protože máme pro ně experimentální důkazy, můžeme se vyrovnat i s tajemstvími X . Ale to je podle mne úvaha chybná!

Přibližme si nyní problém Schrödingerovy kočky. Myšlenkový pokus, jehož uspořádání vidíte na obrázku 37, není přesně totožný s původní Schrödingerovou verzí, pro naše účely však bude výhodnější. Opět zde máme zdroj fotonů a polopropustné zrcátko, které kvantový stav dopadajících fotonů změní na superpozici dvou stavů, jeden odpovídající odraženému fotonu a jeden fotonu procházejícímu zrcátkem. Na dráze procházejícího fotonu je detekční zařízení, které registruje dopad fotonu tím, že spustí kohoutek pistole, ta vystřelí a usmrtí kočku. Kočku můžeme pokládat za konečné registrační *zařízení* měřícího procesu. Tato měřicí procedura propojí událost z kvantové úrovně - dopad fotonu - do makroskopického světa, kde kočka může být jen ve dvou stavech, buď živá, nebo mrtvá. Pokud ovšem přijmeme, že kvantový popis je správný na všech úrovních až na úroveň koček atd., musíme přijmout i to, že skutečný stav kočky je superpozicí stavů „být mrtvá“ a „být živá“. Jádro věci spočívá v tom, že foton je v superpozici stavů odpovídajících jedné a druhé dráze fotonu, ale i detektor (pokládáme-li jej za kvantovémechanický systém) je v superpozici stavů „vypálená pistole“ a „nevypálená pistole“ a konečně i kočka je v superpozici stavů „živá“ a „mrtvá“.

Problém spojený s tímto myšlenkovým pokusem je znám už dávno. Jak se k němu stavějí různí lidé? Různých přístupů ke kvantové mechanice je pravděpodobně víc než kvantových fyziků. To, co jsem napsal, není omyl, protože někteří kvantoví fyzikové zaujímají hned několik stanovisek.

Podám nyní hrubý přehled základních stanovisek. Uvedu jej bonmotem Boba Walda: „Pokud skutečně *věříte* kvantové mechanice, nemůžete ji brát *vážně*.“ Je to opravdu výstižná poznámka o kvantové mechanice a vztahu fyziků k ní.

„Pokud skutečně věříte kvantové
mechanice, nemůžete ji brát vážně.“
(Bob Wald)



Obr. 38

Různé kategorie přístupů ke kvantové mechanice jsem naznačil na obrázku 38. Fyziky jsem rozdělil především na ty, kdo v ni *věří*, a ty, kdo ji *pojímají vážně*. Koho míním těmi, kdo ji berou vážně? Ty, kdo berou stavový vektor $|\psi\rangle$ tak, že skutečně popisuje reálný svět - že stavový vektor je realita. Naopak ti, kdo skutečně „věří“ v kvantovou mechaniku, si nemyslí, že toto je správný přístup k ní.

Do diagramu jsem vepsal různá jména. Jakto alespoň chápu, Niels Bohr a příslušníci kodaňské školy by v mé klasifikaci patřili k těm věřícím. Bohr bezpochyby věřil v kvantovou mechaniku, nebral však stavový vektor vážně jako popis světa. Stavový vektor $|\psi\rangle$ existoval pro něho v nějakém smyslu jen v naší mysli, byl to náš způsob popisu světa, ne svět sám. Takový přístup vede k tomu, co podle Johna Bella můžeme nazývat „PVPÚ“, což znamená „pro všechny praktické účely“. John

Bell si tento termín oblíbil pro jeho poněkud zlehčující příděch. Odpovídá přístupu založeném na „dekoherenčním stanovisku“, o kterém se ještě zmíním. Často ovšem při podrobnější diskusi s nejnadšenějšími příznivci PVPÚ zjistíte, že ustupují někam do středu diagramu. Co mám nyní na mysli „středem diagramu“?

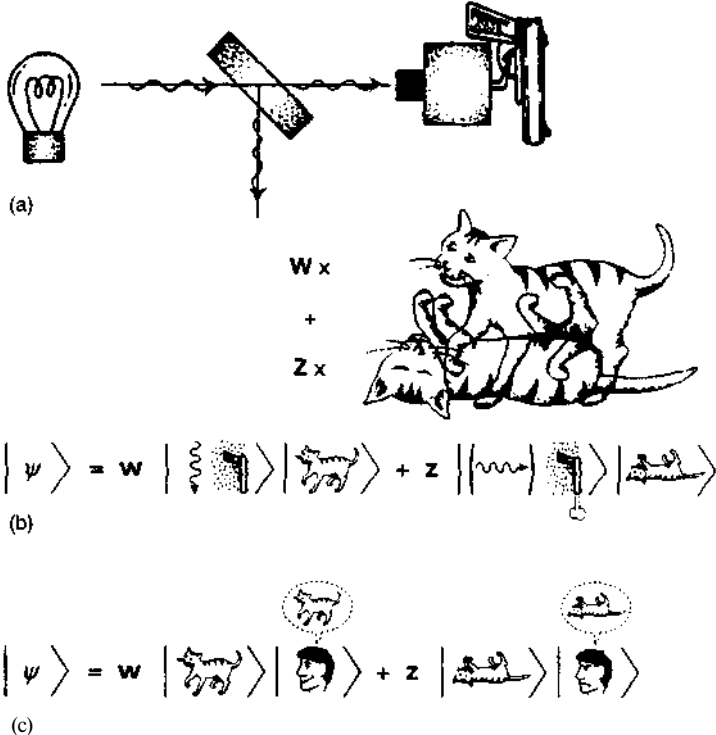
Ty, kdo berou kvantovou mechaniku vážně, jsem opět rozdělil do různých kategorií. Jsou takoví vědci, kteří věří, že v U je všechno - že všechno popisuje unitární evoluce. To vede k takzvané *mnohosvětové* interpretaci kvantové mechaniky. Podle této představy je kočka z našeho pokusu opravdu zároveň mrtvá a živá, ale jsou to ve skutečnosti dvě kočky, jedna živá a druhá mrtvá, které existují ve dvou různých vesmírech. I o tomto pohledu se ještě zmíním podrobněji, zatím jen uvedu, že příznivce mnohosvětového pohledu na kvantovou mechaniku kladu do středu svého diagramu. Zařadil jsem tam jména několika fyziků, kteří tento názor alespoň v nějakém stadiu svého myšlenkového vývoje zastávali.

Ti, kdo berou 11//) *skutečně vážně* (patřím mezi ně i já), věří, že jak U, tak R jsou reálné jevy. Nejenže unitární evoluce vládne, pokud je systém v nějakém smyslu malý, ale současně reálně probíhá něco jiného, co v podstatě odpovídá tomu, co jsem nazval R - nemusí to být přesně proces R, ale něco jemu podobného. Pokud v zásadě přijmeme toto stanovisko, máme dále opět dvě možnosti. Jednou alternativou je hledat interpretaci, která nebere v úvahu žádné nové jevy; do této skupiny jsem zařadil přístup Louise de Broglieho a Davida Bohma spolu se značně odlišným názorem Jerryho Griffithse, Murraye Gell-Manna, Johna Hartla a Rolanda Omnése. Ve všech těchto pojetích hraje sice proces R určitou roli, která doplňuje standardní U kvantovou mechaniku, ale nepředpokládá se, že by se objevily nějaké nové jevy, které standardní kvantová teorie nepředpovídá.

Pak jsou zde ale příznivci druhé alternativy „skutečně vážného“ pohledu, mezi něž se počítám i já. Ti se domnívají, že se celková struktura kvantové mechaniky musí v něčem podstatně změnit. Mezi R a U je skutečně podstatný rozdíl, vstupuje zde něco zcela nového. Jména těch, kdo se kloní k této variantě, jsem vepsal do pravého dolního rohu obrázku.

Jak se zmíněné různé interpretace vyrovnávají se Schrödingerovou kočkou? Rozeberu to nyní s trochou matematiky.

Vraťme se ke schématu problému kočky, nyní ale zahrňme vážení alternativ komplexními čísly w a z (obr. 39(a)). Stav fotonu se rozdělí na dva stavy, a berete-li kvantovou mechaniku vážně, věříte, že stavový



Obr. 39

vektor je něco reálného a že kočka musí být v nějakém smyslu superpozicí stavů „živá“ a „mrtvá“. Opět to velmi výstižně vyjádříme pomocí Diracova značení, jak jsem to udělal v obrázku 39(b). K označení stavů v Diracových závorkách nám mohou posloužit prostě obrázky kočky. Kočky samy nepopisují situaci úplně, je zde ještě pistole, foton a okolní vzduch, či jejich kvantověmechanické stavy, právě tak celé okolí, každá komponenta stavového vektoru je ve skutečnosti součinem stavů těchto věcí, ale pořád zde máme superpozici stavů.

Jak se s touto situací vyrovnává *mnohosvětová interpretace*? Podle ní někdo přijde, pohlédne na kočku a vy se zeptáte: „Proč ten člověk nevidí superpozici kočičích stavů?“ Věřící sekty „mnohosvětovců“ popíší situaci podle obrázku 39(c). Podle nich je jeden stav mrtvé kočky, který je provázen osobou vnímající živou kočku, a druhý stav mrtvé kočky,

provázený osobou vnímající mrtvou kočku. Tyto alternativy jsou superponovány: do diracovských závorek jsem umístil i stav mysli osob vnímajících kočku v obou stavech, který jsem se pokusil vyjádřit výrazem jejich tváří. Podle těchto sektářů je tedy všechno v pořádku; existují totiž dvě různé kopie téže osoby, z nichž jedna vnímá živou a druhá mrtvou kočku, ale tato dvě individua se nacházejí v „různých světech“ a navzájem o sobě nevědí. Můžete si představit, že jste jednou takovou kopií, ale máte dvojníka, který pozoruje druhou možnost, ale v jiném, paralelním světě. Jistě nám to nepřipadá jako nejekonomičtější způsob popisu světa, ale já se domnívám, že to ještě na mnohosvětové interpretaci není to nejhorší. Není to jen toto plýtvání světy, které mne zde znepokojuje. Hlavní obtíž je, že celý problém se zde ve skutečnosti neřeší. Proč nám například naše vědomí nedovolí vnímat makroskopickou superpozici? Podívejme se na speciální případ, ve kterém jsou w a z stejná komplexní čísla. Pak je tento stav dán superpozicí podle obrázku 40. Stav je součtem dvou členů. První tvoří „živá kočka plus mrtvá kočka“ spolu „s člověkem vnímajícím živou kočku“ a „člověkem vnímajícím mrtvou kočku“, druhý představuje „živá kočka“ minus „mrtvá kočka“ spolu s „člověkem vnímajícím živou kočku“ minus „člověk vnímající mrtvou kočku“. To je prostě výsledek jednoduché algebry. [Všimněme si, že pokud v grafu na obrázku 40 roznásobíme oba sčítance tak, jako by šlo o běžné algebraické výrazy, které známe ze školy, některé členy se vyruší a na pravé straně dostaneme výraz z grafu 39(c), pokud jsme tam položili $w = z = L$] Můžete namítnout: „To přece nejde, takto nevyjadávají stavy lidského vnímání!“ Proč by to ale nešlo? My přesně nevíme, co to vnímání je. Jak můžeme vědět, že nemohou existovat stavy představující vnímání živé a mrtvé kočky zároveň? Pokud nevíme, co to vnímání přesně je, a pokud nemáme dobrou teorii, která vysvětluje, proč jsou takové smíšené stavy vnímání zakázány (k tomu se vrátíme ve třetí kapitole), připadá mi, že jsme žádné vysvětlení nedostali. Nevysvětluje se, proč člověk vnímá buď jedno, nebo druhé, ale nemůže vnímat superpozici obou stavů. To se dá v teorii zařadit, ale je k tomu potřeba mít vybudovanou též teorii vnímání. Jinou námitkou je, že pokud w a z mohou být libovolná komplexní čísla, není jasné, proč pravděpodobnosti, které vycházejí, jsou pravděpodobnosti dané pravidly kvantové mechaniky, tj. určené čtverci modulů komplexních čísel, které jsme vysvětlili dříve. Tyto pravděpodobnosti jsou však něco, co může být velmi přesně testováno.

Podívejme se ještě trochu blíže na otázku kvantových měření. K tomu musím říci ještě něco o otázce *kvantové provázanosti*. V obrázku 41

$$\begin{aligned}
2 \left| \psi \right\rangle &= \left(\left| \begin{array}{c} \text{č.} \\ \text{vzhůru} \end{array} \right\rangle + \left| \begin{array}{c} \text{č.} \\ \text{dolů} \end{array} \right\rangle \right) \left(\left| \begin{array}{c} \text{č.} \\ \text{vpravo} \end{array} \right\rangle + \left| \begin{array}{c} \text{č.} \\ \text{vlevo} \end{array} \right\rangle \right) \\
&+ \left(\left| \begin{array}{c} \text{č.} \\ \text{vzhůru} \end{array} \right\rangle - \left| \begin{array}{c} \text{č.} \\ \text{dolů} \end{array} \right\rangle \right) \left(\left| \begin{array}{c} \text{č.} \\ \text{vpravo} \end{array} \right\rangle - \left| \begin{array}{c} \text{č.} \\ \text{vlevo} \end{array} \right\rangle \right)
\end{aligned}$$

Obr. 40

jsem naznačil popis EPR pokusu v Bohmově verzi; jak se pamatujeme, bylo to jedno z tajemství Z. Jak zde popisujeme stav částic s polovičným spinem, které se v pokusu rozlétají na dvě různé strany? Ze zákona zachování víme, že celkový spin částic musí být nulový. Proto zjistíme-li, že jedna z částic má v místě „zde“ spin „vzhůru“, musí mít druhá z částic „tam“ spin „dolů“. Kvantový stav kombinovaného systému bude tedy součinem stavů „vzhůru zde“ a „dolů tam“. Jenže zjistíme-li, že spin směřuje dolů „zde“, musí směřovat vzhůru naopak „tam“ (tyto dvě alternativy nastanou, pokud jsme rozhodli měřit v jednom místě hodnotu spinu ve směru vertikální osy). Jestliže chceme dostat kvantový stav celého systému, musíme superponovat obě tyto alternativy. Před druhým stavem (obr. 41) musí stát ve skutečnosti znaménko „minus“, pokud má být výsledný spin páru částic do libovolného směru nulový.

Předpokládejme nyní, že jsme se rozhodli provést měření spinu částice, která přichází k mému detektoru „zde“, přičemž druhá částice doletěla někam velmi daleko, třeba na Měsíc; tedy naše „tam“ je na Měsíci. Na Měsíci je můj kolega a ten měří spin své částice opět ve stejném směru jako já. Pravděpodobnost, že naměří „spin vzhůru“, je stejná jako pravděpodobnost, že naměří „spin dolů“. Najde-li on spin „vzhůru“, potom spinový stav mé částice musí být „dolů“, naměří-li spin „dolů“, spin mé částice musí být „vzhůru“. Proto mohu brát spinový stav mé částice jako kombinaci stavů „spin vzhůru“ a „spin dolů“, kde oba stavy vystupují se stejnou pravděpodobností.

Matematický aparát kvantové mechaniky obsahuje veličinu, která umožňuje pracovat s takovýmito pravděpodobnostními směsmi. Tato

veličina - či „operátor“ - se nazývá *matice hustoty*. Matice hustoty, kterou bych „já zde“ užíval v popsané situaci, je dána výrazem, který je symbolicky zapsán v obrázku 42. První 5 odpovídá pravděpodobnosti, že zde najdeme spin ve směru vzhůru, a druhá je pravděpodobnost najít spin směrem dolů. To jsou klasické pravděpodobnosti vystihující mou nejistotu o skutečném spinovém stavu částice, na které mám provést měření. Obyčejné pravděpodobnosti jsou reálná čísla s hodnotou mezi 0 a 1 a kombinace vyznačená na obrázku 42 není kvantová superpozice (ve které by koeficienty byla komplexní čísla), nýbrž prostě jakási kombinace vážená pravděpodobnostmi.

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \left| \begin{array}{c} \uparrow \\ | \\ \uparrow \\ Z \end{array} \right\rangle \left| \begin{array}{c} \downarrow \\ | \\ \downarrow \\ T \end{array} \right\rangle - \frac{1}{\sqrt{2}} \left| \begin{array}{c} \downarrow \\ | \\ \downarrow \\ Z \end{array} \right\rangle \left| \begin{array}{c} \uparrow \\ | \\ \uparrow \\ T \end{array} \right\rangle$$

výsledný spin

Obr. 41

$$D_Z = \frac{1}{2} \left| \begin{array}{c} \uparrow \\ | \\ \uparrow \\ Z \end{array} \right\rangle \left\langle \begin{array}{c} \uparrow \\ | \\ \uparrow \\ Z \end{array} \right| + \frac{1}{2} \left| \begin{array}{c} \downarrow \\ | \\ \downarrow \\ Z \end{array} \right\rangle \left\langle \begin{array}{c} \downarrow \\ | \\ \downarrow \\ Z \end{array} \right|$$

Obr. 42

Všimněme si, jak jsou formálně vytvořeny výrazy v grafu 42. První součinitel v obou výrazech je Diracův symbol, s nímž jsme se už setkali - vypadá jako drahá půlka špičaté závorky, jejíž špička směřuje doprava. Dirac ji nazval *ket vektor*. Vedle něho stojí něco, co vypadá jako první půlka špičaté závorky - špička míří doleva. Tento symbol se nazývá *bra vektor*. Bra vektor představuje to, čemu se říká komplexně sdružený vektor s vektorem ket [anglicky *bracketje* „závorka“].

Nechci zde zabředávat do podrobností matematického aparátu spojeného s představou matice hustoty. Jen si řekněme, že matice hustoty obsahuje veškerou informaci, která je potřebná k výpočtu pravděpodobnosti výsledku měření na část systému, přičemž se předpokládá, že informace o stavu zbytku systému jsou zcela nedostupné. V našem případě úplný stav znamená stav *páru* částic dohromady (provázaný stav) a předpokládáme, že pro mne „zde“ jsou nedostupné veškeré informace o měřeních, která mohou být provedena „tam“, na Měsíci, na partnerské částici té částice, kterou zkoumám „zde“.

Změňme teď poněkud situaci a předpokládejme, že můj kolega na Měsíci se chystá změřit spin jeho částice ne ve vertikálním směru, tj. ve stejném směru, v němž jsme oba měřili dosud, nýbrž ve směru horizontálním, tedy s možnostmi vpravo - vlevo. V tomto případě je vhodnější zapsat stav systému ve tvaru naznačeném na obrázku 43. Jde ve skutečnosti o přesně stejný stav jako předtím, tj. stav zapsaný na obrázku 41, jak ukáže trocha algebry založená na geometrii vysvětlené u obrázku 34, jen je tento stav rozdílně vyjádřen. Pořád nevíme, jaký výsledek dostane kolega pro své měření spinu ve směru vpravo - vlevo, víme ale, že pravděpodobnost, se kterou nalezneme spin doleva (v kterémžto případě já musím nalézt spin doprava), je j a právě tak je rovna pravděpodobnost, že nalezneme spin doprava (pak já musím naměřit spin doleva). V důsledku toho je matice D_2 dána výrazem uvedeným na obrázku 43 dole, musí ale ve skutečnosti vyjadřovat totéž jako matice D_z v předchozím případě, tj. matice hustoty (z de) zapsaná na obrázku 42. To je v pořádku. Jakákoli měření, která provede můj kolega na Měsíci, nesmějí ovlivnit *pravděpodobnosti* mých měření zde (pokud by tomu tak bylo, můj přítel z Měsíce by mi mohl posílat zprávy nadsvětelnou rychlostí prostě tak, že by svá sdělení zakódoval do své volby, ve kterém směru bude měřit spin své částice).

$$\begin{aligned}
 |\psi\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}} \left| \begin{array}{c} \uparrow \\ \text{Z} \end{array} \right\rangle \left| \begin{array}{c} \leftarrow \\ \text{T} \end{array} \right\rangle - \frac{1}{\sqrt{2}} \left| \begin{array}{c} \leftarrow \\ \text{Z} \end{array} \right\rangle \left| \begin{array}{c} \uparrow \\ \text{T} \end{array} \right\rangle \\
 &= \text{jako předtím} \\
 D_Z &= \frac{1}{2} \left| \begin{array}{c} \uparrow \\ \text{Z} \end{array} \right\rangle \left\langle \begin{array}{c} \uparrow \\ \text{Z} \end{array} \right| + \frac{1}{2} \left| \begin{array}{c} \leftarrow \\ \text{Z} \end{array} \right\rangle \left\langle \begin{array}{c} \leftarrow \\ \text{Z} \end{array} \right| \\
 &= \text{jako předtím}
 \end{aligned}$$

Obr. 43

Pokud znáte algebru, podle které se transformuje matice hustoty, můžete si ověřit přímo, že obě matice jsou stejné. Pak lépe pochopíte, o čem zde mluvím. Pokud tuto znalost nemáte, přijměte prostě mé tvrzení; vaše možnost sledovat dále mou argumentaci se tím nijak podstatně nesníží.

Popis pomocí matice hustoty je to nejlepší, čeho můžeme dosáhnout, je-li nám část systému nepřístupná. V matici hustoty vystupují

normální klasické pravděpodobnosti, ale v kombinaci s kvantově mechanickým popisem, ve kterém jsou kvantové pravděpodobnosti už skrytě zahrnuty. Tedy nemám-li žádnou vědomost o tom, co se děje „tam“, je to nejlepší popis stavu „zde“, který mohu udělat.

Těžko ale přijmout stanovisko, že matice hustoty popisuje *realitu*. Problém je v tom, že nemohu vyloučit, že třeba někdy v budoucnu dostanu od svého kolegy z Měsíce zprávu o tom, že skutečně měřil stav částice a naměřil to a to. Pak vím, jaký *skutečně* musí být stav mé částice. Matice hustoty mi neříká o stavu mé částice *všechno*. K úplné informaci potřebuji znát skutečný stav kombinovaného páru. Matice hustoty má tedy charakter jakéhosi provizorního popisu, pro nějž se někdy užívá dříve zmíněné zkratky PVPÚ - (dostačující) pro všechny praktické účely.

$$|\psi\rangle = w \left| \begin{array}{c} \text{kočka} \\ \text{Měsíc} \end{array} \right\rangle \left| \begin{array}{c} \text{částice} \\ \text{zde} \end{array} \right\rangle + z \left| \begin{array}{c} \text{kočka} \\ \text{země} \end{array} \right\rangle \left| \begin{array}{c} \text{částice} \\ \text{zde} \end{array} \right\rangle$$

Obr. 44

$$D = |w|^2 \left| \begin{array}{c} \text{kočka} \\ \text{Měsíc} \end{array} \right\rangle \left\langle \begin{array}{c} \text{kočka} \\ \text{Měsíc} \end{array} \right| + |z|^2 \left| \begin{array}{c} \text{kočka} \\ \text{země} \end{array} \right\rangle \left\langle \begin{array}{c} \text{kočka} \\ \text{země} \end{array} \right|$$

Obr. 45

Popis pomocí matice hustoty se ovšem zpravidla neuvžívá na tak jednoduché případy, na jakém jsme jej osvětlovali. Typickou situaci popisovanou pomocí matice hustoty najdeme ve spojení s naším problémem kočky, jak ji vidíme na obrázku 44. Zde nemáme „provázaný“ stav, rozdělený na to, co je přístupné mně „zde“, a to, co je přístupné mému kolegovi „tam“ na Měsíci. Stavem „zde“ je v tomto případě kočka, ať už živá či mrtvá, a stavem „tam“ je stav nějakého okolí kočky (stav „tam“ tedy může sídlit i v téže místnosti, co je kočka). Plný provázaný stavový vektor pak může představovat živá kočka spolu s určitým okolím plus živá kočka s určitým okolím. Příznivci sekty PVÚP tvrdí: Protože nemůžeme nikdy mít plnou informaci o okolí kočky, nemůžeme celou situaci popisovat pomocí stavového vektoru, nýbrž jen za pomoci matice hustoty, kterou máme vyjádřenou na obrázku 45.

Matice hustoty se chová jako směs vážená pravděpodobnostmi a kateřelé PVÚP proto říkají, že pro všechny praktické účely je kočka buď živá, nebo mrtvá. To může být sice pravda „pro všechny praktické účely“, ale nedává vám to obraz reality. Co když najednou přijde někdo

opravdu velice bystrý a napoví vám, jak získat informaci o okolí? V jistém smyslu je to dočasně platný pohled, který bude uspokojivý do té doby, dokud nikdo neumí získat chybějící informace. Můžeme ale udělat stejný rozbor případu kočky, jaký jsme udělali v případě částice vystupující v Einsteinově, Podolského a Rosenově (EPR) pokusu. Tam jsme ukázali, že stejné dobře můžeme k popisu užít stavy spin vlevo - spin vpravo jako stavy spin vzhůru - spin dolů. Stavy spin vlevo - spin vpravo získáme kombinováním stavů vzhůru - dolů podle pravidel kvantové mechaniky. Získáme provázaný stavový vektor pro částicový pár, jaký je na obrázku 43 nahoře, a matici hustoty, jaká je na obrázku 43 dole.

V případě kočky a jejího okolí (v situaci, kdy obě čísla w a z jsou stejné) se můžeme uchýlit ke stejnému matematickému postupu, přičemž nyní stav „živá kočka plus mrtvá kočka“ hraje úlohu stavu „spin napravo“ a stav „živá kočka minus mrtvá kočka“ zastupuje stav „spin nalevo“. Dojdeme tak ke stejnému stavu jako předtím (obr. 44 s $w = z$) a ke stejné matici hustoty jako předtím (obr. 45 s $w = z$). Jsou ale „živá plus mrtvá kočka“ a „živá minus mrtvá kočka“ stejně dobré stavy, jako byly „živá kočka“ a „mrtvá kočka“? To není tak zřejmé, ale matematika, která nás k tomu vede, je přímočará. Matice pro kočku bude stejná jako předtím, jak ukazuje obrázek 46. Znalost matice hustoty nám tedy nijak neusnadní rozhodnutí, je-li kočka skutečně mrtvá, nebo živá. Jinými slovy, živost, či neživost kočky není obsažena v matici hustoty, potřebujeme vědět více.

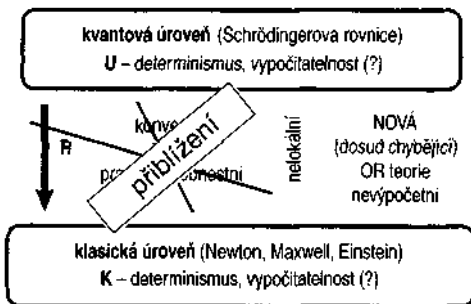
$$\begin{aligned}
 |\psi\rangle &= \frac{1}{2} \left(\left| \begin{array}{c} \text{živá kočka} \\ \text{mrtvá kočka} \end{array} \right\rangle + \left| \begin{array}{c} \text{mrtvá kočka} \\ \text{živá kočka} \end{array} \right\rangle \right) \left(\left| \begin{array}{c} \text{živá kočka} \\ \text{mrtvá kočka} \end{array} \right\rangle + \left| \begin{array}{c} \text{mrtvá kočka} \\ \text{živá kočka} \end{array} \right\rangle \right) \\
 &+ \frac{1}{2} \left(\left| \begin{array}{c} \text{živá kočka} \\ \text{mrtvá kočka} \end{array} \right\rangle - \left| \begin{array}{c} \text{mrtvá kočka} \\ \text{živá kočka} \end{array} \right\rangle \right) \left(\left| \begin{array}{c} \text{živá kočka} \\ \text{mrtvá kočka} \end{array} \right\rangle - \left| \begin{array}{c} \text{mrtvá kočka} \\ \text{živá kočka} \end{array} \right\rangle \right)
 \end{aligned}$$

(a)

$$\begin{aligned}
 D &= \frac{1}{4} \left(\left| \begin{array}{c} \text{živá kočka} \\ \text{mrtvá kočka} \end{array} \right\rangle + \left| \begin{array}{c} \text{mrtvá kočka} \\ \text{živá kočka} \end{array} \right\rangle \right) \left(\langle \begin{array}{c} \text{živá kočka} \\ \text{mrtvá kočka} \end{array} | + \langle \begin{array}{c} \text{mrtvá kočka} \\ \text{živá kočka} \end{array} | \right) \\
 &+ \frac{1}{4} \left(\left| \begin{array}{c} \text{živá kočka} \\ \text{mrtvá kočka} \end{array} \right\rangle - \left| \begin{array}{c} \text{mrtvá kočka} \\ \text{živá kočka} \end{array} \right\rangle \right) \left(\langle \begin{array}{c} \text{živá kočka} \\ \text{mrtvá kočka} \end{array} | - \langle \begin{array}{c} \text{mrtvá kočka} \\ \text{živá kočka} \end{array} | \right)
 \end{aligned}$$

(b)

Obr. 46



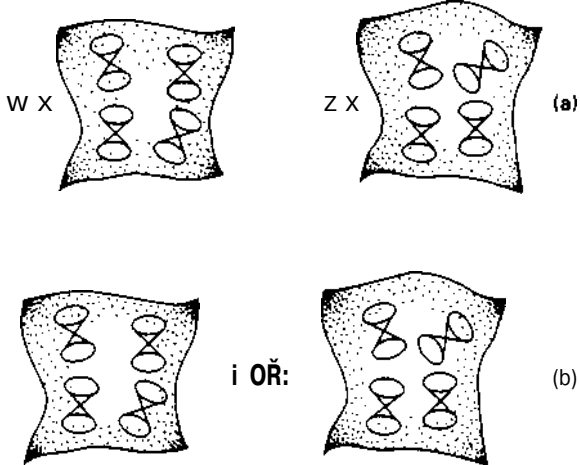
Obr. 47

A nejenže nám tento postup nevysvětlí, proč je kočka ve skutečnosti živá, nebo mrtvá. Nevysvětlí nám ani, proč ji *vnímáme* buď jako živou, nebo jako mrtvou. A navíc v případě obecných amplitud nevysvětluje ani, proč se relativní pravděpodobnosti rovnají w^2 a z^2 . Podle mne to tedy není uspokojivý přístup k problému.

Vraťme se zpět k diagramu zobrazujícímu koncepční schéma celé fyziky, nyní ale vyjadřujícímu mou představu, jak by se měla fyzika vyvíjet v budoucnosti (obr. 47). Procedura, kterou značím R, je podle mého názoru přiblížením něčeho, co dosud neznáme, totiž procedury, kterou budu označovat jako OŘ (což je zkratka pro *objektivní redukci*). Představuje něco objektivního - nějaká věc se objektivně buď přihodí, nebo nepřihodí -, ale příslušná teorie nám dosud chybí. V angličtině je OŘ hezký akronym (*oř* = „nebo“), protože vyjadřuje, že objektivně se děje to, nebo ono.

Kdy však nastává tento proces? Podle mého názoru je se superpozičním principem něco v nepořádku v tom případě, kdy se aplikuje na podstatně rozdílné *prostorčasové geometrie*. Pojmu prostorčasové geometrie jsme se věnovali v kapitole první a na obrázku 48(a) jsem ukázal dvě takové geometrie. V obrázku jsem také vyznačil superpozici obou geometrií podobným způsobem, jako jsme to dělali pro částice a fotony. Jakmile máte vzít v úvahu superpozici různých prostorčasů, narazíte na řadu problémů, protože světelné kužele v obou prostorčasích se mohou rozevírat v různých směrech. To je obrovský problém, s nímž se fyzikové potýkají, snaží-li se konzistentně kvantovat obecnou teorii relativity. Všichni, kdo se pokoušeli dělat fyziku na takto zvláštně superponovaných prostorčasech, odešli zatím na štítě.

Já tvrdím, že tyto porážky nejsou jen dočasně prohrané bitvy, nýbrž že je zde fundamentální důvod, že takto vedenou válku nelze vyhrát.

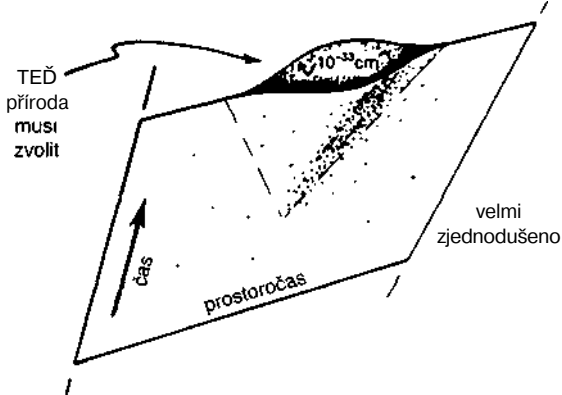


Obr. 48

Nějakým způsobem dojde k tomu, že se tato superpozice objektivně redukuje na jednu, nebo druhou možnost, a k této redukci dochází na prostoročasové úrovni (obr. 48(b)).

Můžete namítnout: „Ano, v principu je to snad pravda, ale proč se pokoušet míchat dohromady kvantovou mechaniku a obecnou teorii relativity, když toto jejich spojení se může projevovat až při tak nesmyslně malých dimenzích, jaké charakterizují čísla jako Planckova délka a Planckův čas, tedy dimenzích nepředstavitelně menších, než jsou ty, s nimiž se setkáváme ve fyzice elementárních částic. To nemůže mít nic společného s problémy objektů tak velkých, jako jsou kočky a lidé, jak by se zde mohly projevit efekty kvantové gravitace?“ Já ale přesto věřím, že zde hluboká souvislost je, právě vzhledem k fundamentálnímu charakteru problémů, které se snažíme řešit.

Jak může být důležitá Planckova délka 10^{-33} centimetru pro redukci kvantových stavů? Obrázek 49 velmi schematicky naznačuje, co nastává, štěpí-li se prostoročas do dvou větví či - jak se odborně říká - dochází-li k bifurkaci. Máme zde situaci, která vede k superpozici dvou prostoročasů, v jednom vystupuje kočka mrtvá a v druhém kočka živá a tyto různé prostoročasy mají být nějak superponovány. Nyní se ptáme, kdy jsou oba prostoročasy dostatečně rozdílné, abychom byli nuceni ke kroku, který jsme označili jako změnu pravidel. Hledejme, kdy rozdíl mezi oběma geometriemi je právě v nějakém dobře definovaném



Obr. 49 Jak důležitá je Planckova škála 10^{33} centimetru pro redukci kvantového stavu? Zhruba řečeno - redukce je ovlivněna tehdy, dochází-li mezi dvěma superponovanými vztahy k dostatečně velkému přenosu hmoty, aby rozdíl příslušných prostorochasů charakterizoval rozměr 10^{-33} centimetru.

smyslu řádu Planckovy délky. Když se obě geometrie začnou lišit právě o tolik, musíme se začít starat, co bude dál, a v tomto okamžiku může nastat změna pravidel hry. Zdůrazňuji, že to, co nás zde zajímá, je prostorochasová geometrie, nikoli jen prostorová geometrie. Prostorochasovému rozdílu Planckovy základní velikosti odpovídá delší čas, pokud je prostorové rozlišení menší, a kratší čas, je-li prostorové rozlišení větší. Potřebujeme kritérium, které by udávalo, kdy se dva prostorochasy podstatně liší, a to pak už vede k *časové škále*, na které Příroda mezi oběma alternativami volí. Zastávám stanovisko, že Příroda volí jedno, nebo druhé podle nějakého pravidla, byť toto pravidlo dosud neznáme.

Jak dlouho Přírodě trvá, než volbu provede? Tuto časovou škálu můžeme spočítat v některé jednoduché situaci, kdy dostačuje newtonovská aproximace Einsteinovy teorie a kdy je jasně definován rozdíl mezi dvěma gravitačními poli, jež jsou subjektem kvantové superpozice (předpokládá se, že příslušné komplexní amplitudy budou přibližně stejné).

Nabízím následující odpověď. Kočku nahradím malým kouskem hmoty - kočka už se pro nás napracovala dost, a tak ji popřejme trochu odpočinku. Jak velký bude tento kousek, jak daleko se bude pohybovat a jaká je časová škála pro výsledný kolaps kvantového stavového vektoru (obr. 50)? Na superpozici obou stavů kousku se budu dívat jako na nestabilní stav, který se po čase rozpadne - je to jistá analogie s uranovým jádrem či něčím podobným, co se může rozpadnout v to či ono,



Obr. 50 Místo určování stavu kočky můžeme měřit prostý pohyb hmotné kuličky. Jak hmotná musí kulička být a jak daleko se musí pohybovat, než proběhne proces R?

a rozpad charakterizuje určitá časová škála. To, že stav je nestabilní, je hypotéza, ale tato hypotéza by měla být nakonec důsledkem právě té fyziky, kterou zatím neznáme.

Abychom odhadli příslušnou časovou škálu, uvažme energii E , která je potřeba k tomu, abychom jednu „kvantovou kopii“ kousku odnesli z gravitačního pole druhé. Charakteristický čas rozpadu T by pak měl být dán jako podíl redukované Planckovy konstanty h , tj. Planckovy konstanty dělené 2π , a této energie, tedy

S takovým typem uvažování se setkáváme v mnoha schématech aspirujících na kvantovou teorii gravitace, byť se v detailech liší.

Jsou zde ještě další důvody, proč schéma této povahy založené na zahrnutí gravitačních jevů stojí za úvahu. Jedním z nich je, že každé jiné explicitní schéma redukce kvantových stavů, které se snaží řešit problém kvantových měření zavedením nových fyzikálních jevů, naráží na problémy s jedním ze základních fyzikálních zákonů, zákonem zachování energie. Možná že tento zákon skutečně narušován je. Ale gravitační schéma se zdá poskytovat výbornou možnost se tohoto problému zcela zbavit. Třebaže zatím nejsem s to nabídnout detailní řešení, dovoluji mi ukázat, co mám na mysli.

V obecné teorii relativity jsou hmotnost a energie zvláštní věci. Předně, hmotnost je rovna energii (dělené druhou mocninou rychlosti světla), a proto gravitační potenciální energie přispívá (záporně) k hmotnosti. Máme-li tedy dva kousky hmoty daleko od sebe, má celý systém 0 trochu větší hmotnost, než když jsou oba kousky velmi blízko (obr. 51). I když hustoty hmotnosti-energie (měřené tenzorem energie a hybnosti) jsou nenulové jen uvnitř obou kousků a jejich velikosti nezávisí pod-



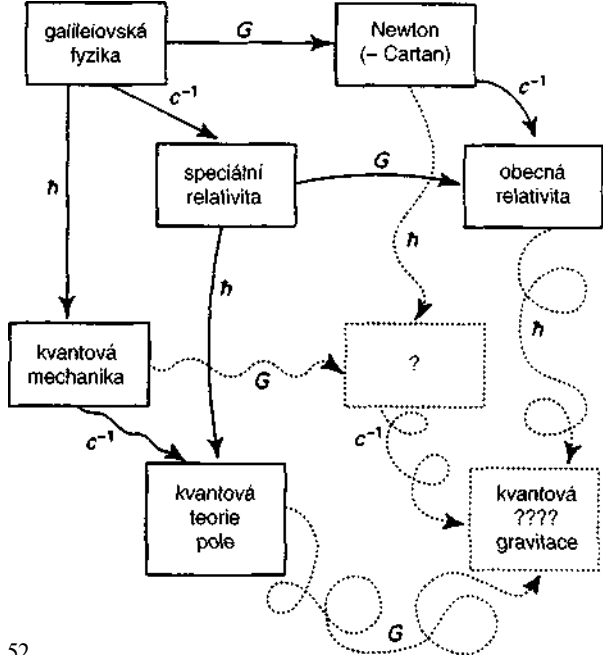
velká hmotnost-energie

malá hmotnost-energie

Obr. 51 Gravitace přispívá k celkové hmotnosti-energii nelokalizovatelnou energií, tj. energií, o které nemůžeme říci, kolik jí je v určitém objemu.

statně na přítomnosti druhého kousku, *celková energie* je ve dvou případech naznačených na obrázku 51 rozdílná. Celková energie není lokální veličina. Nelokalita energie v obecné relativitě má fundamentální charakter. Ilustrujme to na příkladu binárního pulzaru, o němž jsme se zmínili v první kapitole. Gravitační vlny odnášejí z tohoto systému pozitivní energii a hmotnost, ale tato energie sídlí nelokálně v prostoru kolem obou těles, která systém tvoří. Gravitační energie je těžko postižitelná věc. Domnívám se, že pokud se nám podaří správně skloubit obecnou relativitu s kvantovou mechanikou, můžeme slušně obejít potíže s energií, kterými trpí dosavadní teorie kolapsu stavového vektoru. Jádro myšlenky spočívá v tom, že v superponovaných stavech musíme vzít v úvahu gravitační příspěvek k energii v superpozici. Jenže gravitačnímu příspěvku k energii nemůžeme dát lokální smysl, a tak je v gravitační energii základní neurčitost, neurčitost řádově stejně velká jako energie E popsána výše. Právě takové je to s nestabilními částicemi. Nestabilní částice má neurčitou hmotnost-energii a tato neurčitost souvisí s dobou života této částice.

Jak je to s časovou škálou, která se objevuje v přístupu, jež propagují? K problému se ještě vrátím ve třetí kapitole. Jaké jsou poločasy rozpadu pro reálné systémy, v nichž se uplatňují tyto prostoročasové superpozice? Poločas rozpadu protonu (zatím jej pokládejme za tuhou kuličku) vychází na několik milionů let. To je dobré, protože z interferenčních měření s jednou částicí víme, že se s tímto jevem nesetkáme, proton se jeví jako stabilní. Takže tato předpověď je v souladu s experimentem. Vezmeme-li kapku vody o poloměru asi 10^{-5} centimetru, poločas rozpadu by byl několik hodin. Při mikronovém poloměru by to byla už jen dvacetina sekundy a při poloměru rovném tisícině centimetru pouhá milióntina sekundy. Z těchto čísel si můžeme udělat určitou představu, na jakých škálách by tato fyzika mohla být důležitá.



Obr. 52

Zatím jsem se ale nezmínil o jednom podstatném dodatečném prvku. Sice jsem si trochu dělal legraci z přístupu PVPÚ, tedy přístupu „pro všechny praktické účely“, ale jedna idea, a to důraz na úlohu prostředí, je v něm opravdu velmi důležitá. Prostředí, které hraje v těchto úvahách zásadní roli, jsem zatím zcela ignoroval. Ve skutečnosti je situace podstatně složitější, než jsem vylíčil. Nestačí totiž vzít v úvahu pouze jeden hmotný kousek „zde“ v superpozici s kouskem „tam“, nýbrž kousek s jeho okolím „zde“ v superpozici s kouskem s jeho okolím „tam“. Musíme pečlivě zkoumat, zda je hlavní efekt dán poruchami od okolí, nebo od pohybu kousku. Pokud jde o vliv okolí, poruchy budou náhodné a nedostaneme nic nového oproti standardní proceduře. Něco rozdílného oproti standardní kvantové mechanice můžeme dostat tehdy, lze-li prostředí dostatečně odizolovat. Bylo by velmi zajímavé, kdyby se podařilo navrhnout vhodné experimenty - a já vím o různých hypotetických možnostech -, jimiž bychom mohli zjistit, zda navržené schéma je pravdivé, či zda konvenční kvantová mechanika opět přežije, a budeme opravdu muset přijmout, že tyto kousky - nebo kočky - se vyskytují v superpozicích stavů.

Na obrázku 52 shrnuji to, co jsem se snažil ukázat. Umístil jsem zde různé teorie do rohů pokroucené krychle. Tři její osy odpovídají základním fyzikálním konstantám: gravitační konstantě G (vodorovná osa), převrácené hodnotě rychlosti světla c^{-1} (diagonální osa) a Planckově konstantě Ti (svislá osa). Každá z těchto konstant odpovídá velice malému číslu a v mnoha případech je můžeme položit rovny nule. Položíme-li je rovny nule všechny tři, dostaneme to, co nazývám galileiovskou fyzikou (vlevo nahoře). Pokud bereme gravitační konstantu jako nenulovou, dostáváme se do království newtonovské fyziky (jejíž matematikou prostoročasovou formulaci podal mnohem později Elie Cartan). Přiřkneme-li nenulovou hodnotu naopak konstantě c^{-1} , dostáváme Poincarého-Einsteinovu-Minkowského teorii speciální relativity. Horní podstavu krychle dokončí nenulové obě předchozí konstanty, které do zbývajících rohů umístí Einsteinovu obecnou teorii relativity. Toto zobecnění však není vůbec přímočaré a já jsem to v grafu naznačil deformací horního čtverce.

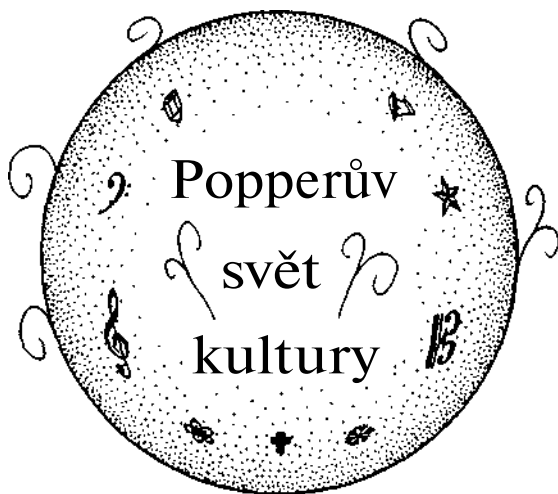
Vrátíme-li se opět k nulovým G a c^{-1} , vezmeme však nenulovou h , dostaneme standardní kvantovou mechaniku. Zobecněním, které opět není zcela přímočaré, lze přidat i konečné c , což vede ke kvantové teorii pole. Tím je dokončena levá stěna krychle - zase jsem ji trochu pokroutil, abych naznačil nepřímoučarost cest z jednoho vrcholu do druhého.

Mohli byste teď říci, že už nám zbývá jen krychli dokončit, a budeme znát všechno. Bohužel se ukazuje, že základy fyziky gravitace jsou v příkrém rozporu se základy kvantové mechaniky. To se ukáže dokonce i v případě, kdy se snažíme sloučit kvantovou mechaniku s Newtonovou teorií gravitace (když tedy zůstáváme u hodnoty $c^{-1} = 0$) v jejím prostoročovém rámci nalezeném Eliem Cartanem, ve kterém se užívá *Einsteinova principu ekvivalence*. (Podle tohoto principu je konstantní gravitační pole nerozlišitelné od zrychlení soustavy.) Upozornil mne na to Joy Christian, který mne též inspiroval k obrázku 52. Dosud se nepodařilo vyhovujícím způsobem sjednotit kvantovou mechaniku s newtonovskou gravitací nebo - přesněji - s takovou verzí gravitační teorie, která bere plně v úvahu Einsteinův princip ekvivalence, jak to činí zmíněná Cartanova geometrie. Já jsem přesvědčen, že toto sjednocení zahrne jev *redukce kvantového stavu* zhruba podle myšlenkového schématu OŘ, nastíněného v této kapitole. Už toto částečné sjednocení, které by doplnilo zadní stranu krychle z obrázku 52, nebude zdaleka přímočaré. Plná teorie, která by zahrnovala všechny tři konstanty - h , G a c^{-1} - a zkompletovala celou krychli, bude něčím ještě hlubším a matematicky komplikovanějším. A to je úkol pro budoucnost.

Kapitola třetí

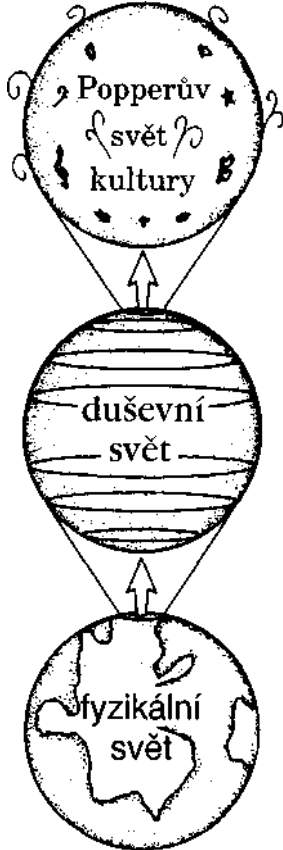
FYZIKA A MYSL

První dvě kapitoly se zabývaly fyzickým světem a matematickými pravidly, která jej popisují. Viděli jsme, jak jsou tato pravidla přesná a jak podivná se někdy zdají. Ve třetí kapitole se zaměříme na *duševní svět*, jmenovitě na to, jak je spjat se světem fyzickým. Biskup George Berkeley si zřejmě myslel, že fyzický svět se v nějakém smyslu vynořuje ze světa duchovního, zatímco nejčastější názor vědců je opačný, že duševno je projevem jakési fyzikální struktury.



Obr. 53 „Třetí svět“ Karla Poppera.

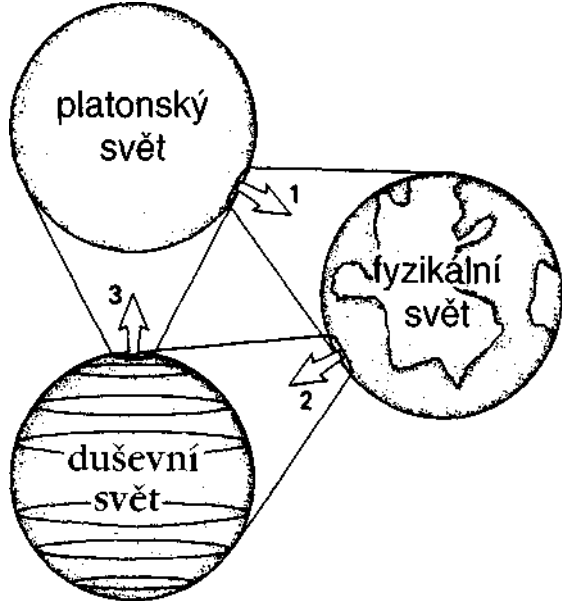
Karl Popper zavedl ještě třetí svět, *svět kultury* (obr. 53). Pohlížel na něj jako na produkt světa duševního - a došel k hierarchii světů zobrazené na obrázku 54. V tomto obraze je psychický svět v nějakém smyslu svázán s fyzikálním světem („vynořuje“ se z něho?) a kultura se vynořuje z duševna.



Obr. 54

Chtěl bych se nyní podívat na tuto otázku trochu jinak. Na rozdíl od Poppera věřím spíše tomu, že tyto světy jsou vzájemně provázány tak, jak jsem naznačil na obrázku 55. Navíc můj „třetí svět“ není ve skutečnosti světem kultury, ale světem platónských absoluten - jmenovitě světem absolutní matematické pravdy. V tomto smyslu je do tohoto nového schématu zabudováno uspořádání naznačené na obrázku 3, které vyjadřovalo hlubokou závislost fyzikálního světa na přesných matematických zákonech. [Opakuji, že „physical“ znamená „fyzický“ i „fyzikální“. Autor oba pojmy v podstatě ztotožňuje.]

Velká část této kapitoly se zabývá vztahy mezi těmito různými světy. Zdá se mi, že myšlenka duševna vyrůstajícího z fyzického naráží na závažný problém, a filozofové mají dobré důvody, proč je tato myšlenka



Obr. 55 Tři světy a tři tajemství.

znepokojuje. Věci, o kterých hovoříme ve fyzice, jsou látka, fyzické věci, hmotné objekty, částice, prostor, čas, energie atd. Jak mohou naše city, naše vnímání červené barvy nebo pocit štěstí mít něco společného s fyzikou? Já to pokládám za velké tajemství, záhadu. Za záhady můžeme pokládat šipky, které propojují různé světy na obrázku 55. Záhadě číslo jedna, vztahu mezi matematikou a fyzikou, jsem věnoval první dvě kapitoly. Uvedl jsem tam Wignerovu poznámku o tomto vztahu; zdál se mu podivuhodný a za podivuhodný jej pokládám i já. Proč se fyzikální svět řídí tak přesně matematickými zákony, nebo se alespoň zdá, že tomu tak je? Nejenom to, ale matematika, jíž se řídí náš fyzikální svět, je neobyčejně plodná a mocná i jako matematika sama o sobě. Tento vztah pokládám za hluboké tajemství.

Rád bych teď osvětlil trochu záhadu číslo dvě, záhadu vztahu mezi fyzikálním světem a světem duševním. Ale zároveň s tímto problémem si budeme muset všimnout tajemství číslo tři: čemu vdčíme za naši schopnost odhalovat matematickou pravdu. Když jsem se v prvních dvou kapitolách zmiňoval o platónském světě, měl jsem v prvé řadě na mysli matematiku a matematické pojmy, které nám slouží k popisu fy-

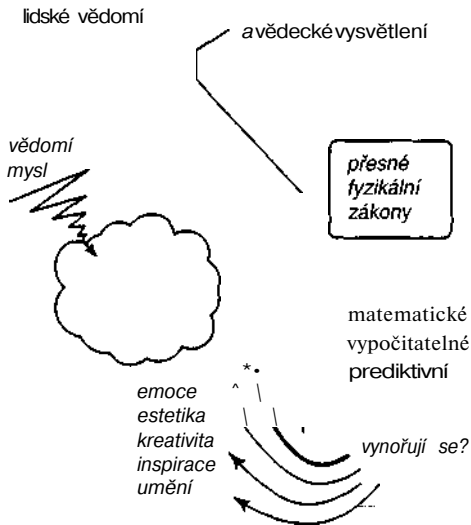
získáního světa. Člověk má pocit, že tato matematika někde skutečně je, že prostě existuje. Panuje ovšem rozšířený názor, že matematika je výtvorem našich duševních schopností, že je to produkt lidské mysli. Můžeme se sice takto na matematiku dívat, ale není to způsob, jak se v hloubi duše opravdu dívají na matematické pravdy matematici; ani já se tak na ni nedívám. Byl jsem tedy spojil duševní svět s platónským světem šipkou, nemínil jsem tím naznačit, že tato i ostatní šipky znamenají, že některý z uvedených světů se prostě vynořuje /jiného. Možná že tomu tak v nějakém smyslu je; šipky reprezentují jen tu skutečnost, že mezi jednotlivými světy existuje nějaký vztah.

Důležitější je to, že obrázek 55 ilustruje mé tři výchozí předpoklady. Prvním z nich je, že fyzikální svět je schopna úplně popsat, alespoň v principu, matematika. Netvrdím, že veškerá matematika se při fyzikálním popisu uplatní. Říkám jen, že vybereme-li správné partie matematiky, popíšeme s jejich pomocí fyzikální svět velmi přesně - takže se fyzikální svět opravdu řídí matematikou. Alespoň malá oblast platónského světa tedy ovládá náš fyzikální svět. Právě tak netvrdím, že všechno ve fyzickém světě má duševno. Spíše zastávám názor, že se kolem nás nevznášejí nějaké duchovní objekty, které by nebyly založeny na něčem fyzickém. To je můj druhý výchozí předpoklad. Konečně můj třetí výchozí předpoklad se týká našeho chápání matematiky. Domnívám se, že našim duševním schopnostem je v nějakém smyslu dostupný každý individuální prvek platónského světa.

Mnozí budou tento můj poslední předpoklad kritizovat, řadě lidí se nebude líbit žádný z mých předpokladů. Musím přiznat, že teprve když jsem tento diagram nakreslil, jsem si uvědomil, že odráží tato tři má přesvědčení. (K diagramu se ještě později vrátím.)

A teď něco o *lidském vědomí*. Především si položíme otázku, zda má vůbec smysl hledat jeho vysvětlení vědeckou metodou. Myslím si, že má. Šipku spojující fyzikální a duševní svět beru velmi vážně. Řečeno jinými slovy - snahu o pochopení duševního světa v pojmech světa fyzikálního beru jako vážnou výzvu.

Některé z charakteristik fyzikálního a duševního světa jsem vyznačil na obrázku 56. Napravo máme *aspekty fyzikálního světa*; jeví se nám tak, že je ovládán přesnými matematickými a fyzikálními zákony, tak jak jsme rozebírali v prvních dvou kapitolách, nalevo vědomí, které řadíme do *duševního světa* a v souvislosti s nímž se často užívají slova jako „duše“, „duch“, „náboženství“ atd. Dnes ale lidé dávají přednost vědeckému vysvětlování těchto pojmů. A nejen to. Rada lidí se domnívá, že libovolné vědecké vysvětlení lze převést do tvaru vhodného pro počítač. Mají před-



Obr. 56

stavu, že pokud lze něco popsat matematicky, automaticky to znamená, že v principu to lze svěřit počítači; ten že si s tím už poradí. Takovému názoru budu *silně oponovat*, a to i přes svou fyzikální podjatost.

Fyzikální zákony jsem v obrázku 56 *označil jako prediktivní, vypočitatelné*, a jejich význam souvisí s otázkami, zda jsou fyzikální zákony *deterministické* a zda jsou tedy počítače s to simulovat účinek těchto zákonů. Na jedné straně existuje názor, že o emocích, představě krásna, kreativitě, inspiraci a umění můžeme těžko předpokládat, že by se nějak vynořily z výpočetního popisu. Opačným „vědeckým“ extrémem je názor, že jsme jenom počítače; sice ještě nevíme, jak tyto věci správně popsat, ale nějak platí, že pokud bychom znali správný druh výpočtu, který je třeba provést, uměli bychom vyčerpávajícím způsobem popsat všechny duchovní pojmy uvedené v obrázku 56. V této souvislosti se často mluví o „vynořování“. Kvalita „vynořit se“ z fyzikálního popisu znamená podle příznivců tohoto názoru výsledek určitého druhu výpočetní aktivity.

Co je to *vědomí*? Přiznávám, že nevím, jak je definovat. Myslím si však, že teď ještě není ten správný čas pro jeho definici, protože stále opravdu nevíme, co to vlastně je. Sám sice věřím, že to je pojem zvládnutelný fyzikálními metodami, přesto si však myslím, že pokud vymyslíme nějakou určitou definici vědomí, bude nutně chybná. Budu ale vědomí do určitého stupně popisovat.

Najedno straně existují *pasivní* projevy vědomí, zahrnující *uvědomování si*. Do této kategorie zařazují třeba vnímání barev nebo harmonie, užívání paměti apod. Pak jsou zde ale *aktivní* projevy vědomí, do nichž patří pojmy jako svobodná vůle a jednání na základě svobodné vůle. Toto rozdělení naznačuje různé aspekty našeho vědomí.

Zde se však soustředím na jiný podstatný rys vědomí, který nespadá ani do kategorie aktivních, ani kategorie pasivních projevů, na rys, který je něčím mezi nimi. Mám na mysli pojem *porozumění*, nebo snad výstižněji *vhled*. Ani tyto pojmy nebudu definovat, také nevím, co přesně znamenají. Nerozumím plně ani dalším dvěma slovům, *uvědomování si a inteligence*.

Proč se tedy zabývám něčím, o čem nevím, co to znamená? Pravděpodobně proto, že jsem matematik a matematici se takovým problémem zase tolik netrápí. Nepotřebují přesné definice pojmů, s nimiž pracují, pokud mohou něco říci o *souvislostech* mezi nimi.

Prvním klíčovým bodem se mi zde zdá, že inteligence je něco, co vyžaduje porozumění. Užívat pojem inteligence v kontextu, kdy popíráme přítomnost jakéhokoli porozumění, je podle mne nerozumné. Porozumění zase vyžaduje určitý stupeň uvědomování si věcí a opět - mluvit o porozumění bez jakéhokoli uvědomování si věcí je v podstatě nesmysl. I když tedy nedefinuji žádný z těchto pojmů, zdá se mi rozumné trvat na těchto vztazích mezi nimi.

Tabulka 1

- A Veškeré myšlení je jen výpočet. Pocit vědomí je vyvolán čistě provedením příslušného výpočtu.
- B Uvědomování si je rysem fyzikální aktivity mozku. Avšak zatímco sama fyzikální aktivita se dá simulovat početně, počítačová simulace pocit vědomí nevyvolá.
- C Příslušná fyzikální aktivita vyvolává pocit vědomí, ale tuto aktivitu nelze plně simulovat výpočetně.
- D Vědomí se nedá vysvětlit pomocí fyzikálních, infromatických nebo jiných vědeckých pojmů.

Ke vztahu mezi vědomým myšlením a výpočtem je možné zaujímat řadu stanovisek. V tabulce 1 jsem shrnul čtyři přístupy k uvědomování si a označil jsem je A, B, C a D.

Hledisko označené jako A, jemuž se někdy říká představa *silné umělé inteligence* (silná AI, *artificial intelligence*) nebo *výpočetní funkcioná-*

Hsmus, říká, že veškeré myšlení je jakýmsi typem výpočtu. Pokud tedy provedeme správný výpočet, uvědomování si bude výsledkem.

Podle stanoviska označeného jako B lze v principu simulovat akci mozku, která provází pocit uvědomování si. Rozdíl mezi A a B je v tom, že podle B lze sice tuto aktivitu simulovat, simulace sama však nebude mít žádné pocity nebo uvědomění - probíhá ještě něco jiného, něco, co má co do činění s fyzikální konstrukcí objektu. Takže mozek složený z neuronů bude mít pocit vědomí, zatímco počítač simulující mozkovou aktivitu si nic uvědomovat nebude. To je hledisko, pokud mu rozumím, propagované Johnem Searlem.

Jako C jsem označil názor, k jehož stoupencům se počítám i já. Toto stanovisko říká v souladu s B, že v akci mozku je navíc nějaký fyzikální prvek, který je zodpovědný za uvědomování si. Jinými slovy, ve fyzice je něco, co musíme vzít v potaz a co se nedá výpočetně plně simulovat. Ve fyzikální aktivitě mozku je něco, co leží za hranicí vypočitatelnosti.

Pak je zde samozřejmě ještě hledisko D, podle něhož je vůbec chyba snažit se zvládnout problém vědomí za pomoci přírodovědných pojmů. Možná se pocit vědomí přírodovědeckými metodami ani vysvětlit nedá.

Jsem silným zastáncem stanoviska C. Tento názor má ovšem zase řadu variant. Můžeme rozlišovat *slabé stanovisko C* a *silné stanovisko C*. Podle slabého stanoviska C existuje ve známé fyzice něco, co při pečlivém zkoumání vede k důsledkům, které jsou za výpočetními možnostmi. Když říkám „za výpočetními možnostmi“, měl bych hned vysvětlit, co tím myslím, což také za malou chvíli udělám. Podle slabého stanoviska C tedy nemusíme hledat nic za hranicemi známé fyziky, abychom našli příslušný nevypočitatelný proces. Silné stanovisko C naopak tvrdí, že je třeba nalézt určité rozšíření současné fyziky; naše současná fyzika nestačí k popisu procesu uvědomování si. Znamená to, že současná fyzika je stále v něčem podstatném neúplná, a jak jste pochopili v druhé kapitole, já si opravdu myslím, že náš fyzikální obraz světa neúplný je - vzpomeňme na obrázek 47. Z hlediska silného C by budoucí fyzika měla podstatu vědomí vysvětlit, současná věda na to zatím nestačí.

Do obrázku 47 jsem vepsal i slova, jejichž význam jsem tehdy nevy světloval, jmenovitě slovo *vypočitatelnost*. V standardním obraze se setkáváme v zásadě s vypočitatelnou fyzikou na kvantové úrovni; i klasická fyzika je pravděpodobně vypočitatelná, byť jsou zde některé technické problémy týkající se přechodu od diskrétních systémů ke spojitém. Právě v těchto neurčitostech však musejí pátrat zastánci slabého C, pro

všech úrovních porozumění. V šachu to asi jde. Šachy jsou vypočítatelná hra, takže není nemožné naprogramovat úplně všechny možnosti, potřebujeme k tomu jen neobyčejně výkonný počítač. Dnešní počítače takovou kapacitu dosud zdaleka nemají, ale v principu to možné je. Přesto máme pocit, že „porozumění“ znamená ještě něco víc než pouhé přímé počítání. Způsob, jak řešíme šachové úlohy my, se v každém případě liší od toho, jak k nim přistupují počítače.

Máme ještě nějaké pádnější důvody pro tvrzení, že v naší schopnosti porozumět věcem je něco víc než výpočet? Skutečně máme. Nechci zde s tím strávit příliš mnoho času. Je to však ve skutečnosti úhelný kámen celé diskuse, takže se mu přece jen trochu věnovat musím, přestože to vyžaduje uchýlit se k matematickým prostředkům. Podrobně jsem se jím zabýval ve své knize *Shadows of the Mind*, prvních dvě stě stránek tam věnuji důkazu, že v argumentu, který teď naznačím, nejsou trhliny.

Nejdříve co rozumím termínem *výpočet*. Výpočet je to, co dělá počítač. Reálný počítač je limitován omezenou pamětí, já budu ale hovořit o idealizovaném počítači zvaném *Turingův stroj*, který se od normálního počítače liší jen tím, že má nekonečně velkou paměť a může počítat nekonečně dlouho, aniž udělá chybu nebo přestane fungovat. Uvedu příklad výpočtu. Výpočet nemusí sestávat jen z aritmetických operací, mohou v něm být obsaženy i logické operace. Vezměme takovouto úlohu:

- *Najděte číslo, které není součtem čtverců tří čísel.*

Čísla se opět myslí *přirozená čísla*, tj. celá nezáporná čísla, 0, 1, 2, 3, 4, 5, ..., a „čtverci čísel“ rozumím jejich druhé mocniny, tedy v našem případě 0^2 , 1^2 , 2^2 , 3^2 , 4^2 , 5^2 , ____ Tuto úlohu lze vyřešit postupem, který by v praktickém užití sice nebyl ten nejvhodnější a nejvtipnější, demonstruje nám však, co rozumíme výpočtem.

Začneme s číslem 0 a zkusíme, je-li součtem čtverců tří přirozených čísel. Vyzkoušíme všechna čísla, jejichž čtverce jsou menší nebo rovny nule, ale takovým číslem je pouze 0. Zkusíme tedy napsat

$$0 = 0^2 + 0^2 + 0^2,$$

což je ovšem pravda, a proto vidíme, že 0 je součtem tří čtverců.

Zkusíme dále 1. Napíšeme všechny čtverce čísel, které jsou menší nebo rovny 1, a zkusíme, zda nějaký součet tří z nich dá 1. Zjistíme, že

$$1 = 1^2 + 0^2 + 0^2.$$

Tímto zdlouhavým způsobem můžeme pokračovat tak dlouho, dokud nedojdeme k číslu 7, pro které neexistuje taková kombinace tří čtverců čísel, aby jejich součet dal toto číslo. Všechny možné kombinace čtverců jsou uvedeny v tabulce 2. Řešením je tedy číslo 7 - je to nejmenší číslo, které není součtem čtverců tří čísel. Toto je příklad výpočtu.

Tabulka 2

zkus 0	čtverce < 0 jsou	0^2	$0 = 0^2 + 0^2 + 0^2$
zkus 1	čtverce < 1 jsou	$0^2, 1^2$	$1 = 0^2 + 0^2 + 1^2$
zkus 2	čtverce < 2 jsou	$0^2, 1^2$	$2 = 0^2 + 1^2 + 1^2$
zkus 3	čtverce < 3 jsou	$0^2, 1^2$	$3 = 1^2 + 1^2 + 1^2$
zkus 4	čtverce < 4 jsou	$0^2, 1^2, 1^2$	$4 = 0^2 + 0^2 + 2^2$
zkus 5	čtverce < 5 jsou	$0^2, 1^2, 2^2$	$5 = 0^2 + 1^2 + 2^2$
zkus 6	čtverce < 6 jsou	$0^2, 1^2, 2^2$	$6 = 1^2 + 1^2 + 2^2$
zkus 7	čtverce < 7 jsou	$0^2, 1^2, 2^2$	$7 * 0^2 + 0^2 + 0^2$ $7 * 0^2 + 0^2 + 1^2$ $7 / 0^2 + 0^2 + 2^2$ $7 \# 0^2 + 1^2 + 1^2$ $7 * 0^2 + 2^2 + 2^2$ $7 * 1^2 + 1^2 + 1^2$ $7 * 1^2 + 2^2 + 2^2$ $7 * 2^2 + 2^2 + 2^2$

V tomto případě jsme měli štěstí, protože výpočet skončil po konečném počtu kroků. Existují ovšem výpočty, které ve skutečnosti nikdy neskončí. Jako jiný příklad vezměme lehce pozměněnou předchozí úlohu:

- *Najděte číslo, které není součtem čtyř čtverců.*

Podle jisté slavné věty, kterou dokázal proslulý matematik 18. století Joseph Louis de Lagrange, lze každé číslo napsat jako součet čtyř čtverců. Snažíme-li se bez dalšího přemýšlení postupovat stejnou metodou jako v předchozím případě, počítač prostě stále poběží, aniž někdy najde odpověď. Máme tedy příklad výpočtu, který nikdy neskončí.

Důkaz Lagrangeovy věty je velice vtipný, ale není snadné jej srozumitelně předvést. Uvedu jiný příklad, který bude, doufám, pochopitelný každému:

- *Najděte liché číslo, kteréje součtem dvou sudých čísel.*

I v tomto případě, kdybychom nechali počítač ověřovat pro větší a větší čísla, zda nenastal hledaný případ, by výpočet běžel do nekonečna, protože víme, že sečtením dvou sudých čísel dostaneme opět vždy číslo sudé.

Další příklad je rafinovanější:

- *Najděte sudé číslo větší než 1, které není součtem dvou prvočísel.*

Skončí někdy výpočet v tomto případě? Obecně se soudí, že ne, že takové číslo neexistuje. Jenže je to jen hypotéza, říká se jí Goldbachova hypotéza a zatím se jí nikomu nepodařilo dokázat (ale ani vyvrátit). Její důkaz bude zřejmě neobyčejně obtížný, takže nikdo zatím neví s jistotou, zda platí. Máme zde tedy příklady tří (pravděpodobně) nekončících výpočtů, jeden odpovídá jednoduchému problému, druhý obtížnějšímu a třetí natolik obtížné úloze, že nikdo zatím neví, zda výpočet opravdu neskončí, či zda dojde k cíli.

A teď si položíme otázku:

Užívají matematici opravdu nějakého výpočetního algoritmu (říkejme mu \wedge), chtějí-li se přesvědčit, že nějaký výpočet neskončí?

Měl třeba Lagrange v hlavě nějaký druh počítačového programu, který ho nakonec dovedl k závěru, že každé číslo je součtem čtyř čtverců? Abyste došli k témuž závěru, nemusíte být přímo Lagrangem, stačí, když dokážete sledovat Lagrangeův argument. V tuto chvíli mi nejde o otázku originality, pouze o otázku porozumění. Proto jsem položil předchozí otázku právě v této formulaci - „přesvědčit se“ znamená dojít k porozumění.

Odborným termínem se tvrzení toho typu, jaká jsme výše uvedli, označují jako n -věty. Tvrzení, že určitý výpočet nikdy neskončí, je Tli-větou. Abyste pochopili následující argument, stačí zabývat se tvrzeními tohoto typu. Mým cílem je přesvědčit vás, že žádný takový algoritmus A neexistuje.

Abych to dokázal, budu hovořit poněkud obecněji. Zavedu pojem výpočtu, který závisí na přirozeném čísle n . Zde je několik příkladů:

- *Najděte přirozené číslo, které není součtem n čtverců.*

Podle Lagrangeovy věty víme, že pokud je n číslo 4 nebo větší [platí-li tvrzení pro $n = 4$, platí i pro n větší, protože vždy můžeme přidat

ke sčítancům nuly], výpočet se nikdy nezastaví, pro menší n se však zastaví.

- *Najděte liché číslo, které je součtem n sudých čísel.*

Zde nezáleží na tom, jak velké n je, výpočet se nezastaví pro žádné n . Rozšířená Goldbachova hypotéza vede k problému:

- *Najděte sudé číslo větší než 2, které není součtem nejvýše n prvočísel.*

Pokud Goldbachova hypotéza platí, pak se výpočet nezastaví pro žádné n (kromě 0 a 1). [Prvočísla jsou přirozená čísla větší než 1 dělitelná pouze jedničkou a sebou samými, tedy 2, 3, 5, 7, ... Například číslo 20 je součtem prvočísel 17 a 3 nebo 7 a 13, tedy *dvou* prvočísel. Je tedy také součtem *nejvýše* tří čtyř ... prvočísel. Platí-li hypotéza pro $n = 2$, platí tedy automaticky pro větší n . Protože zvolené číslo 20 lze rozložit mnoha způsoby na součet dvou sudých čísel a každé z nich lze rozložit na součet dvou prvočísel, naskýtá se mnohem více možností, položíme-li $n = 4$, což napovídá, že s rostoucím n je problém snazší.] Problém je matematicky tím snazší, čím větší n je. Domnívám se, že existuje určité dostatečně velké «, pro které je známo, tj. dokázáno, že výpočet se nezastaví.

Důležitým rysem těchto typů výpočtů je právě to, že závisí na přirozeném čísle n . To je totiž ústředním bodem argumentu známého jako *Gódelův*. Podám ho v základní podobě, kterou mu dal Alan Turing, použijí jej však trochu jiným způsobem než on. Pokud nemáte rádi matematické důkazy, můžete na chvíli vypnout a přijmout jen výsledek, ten je skutečně důležitý. Argument však není příliš obtížný, pokud mu věnujeme plnou pozornost.

Výpočty, které působí na určité číslo n , lze v podstatě chápat jako počítačové programy. Můžete udělat seznam počítačových programů a každému z nich přiřadit číslo, řekněme p . Takže do svého univerzálního počítače vložíte nějaké číslo p , počítač se rozběhne a provede p -tý výpočet pro jakékoli číslo n , které jste zvolili. Číslo p klademe v našem zápisu jako spodní index. Podám nyní seznam těch počítačových programů nebo výpočtů, které působí na číslo n , jeden za druhým:

$$C_0(n), C_1(\ll), C_2(n), C_3(\ll), \dots - C_p(n), \dots$$

Budeme předpokládat, že je to seznam *všech* možných výpočtů $C_p(ri)$, a navíc, že umíme najít takový efektivní způsob uspořádání těchto počítačových programů, že číslo p značí p -tý program v tomto uspořádání. Tedy $C_p(n)$ představuje p -tý program, který operuje s přirozeným číslem n .

Nyní předpokládejme, že máme nějakou výpočetní proceduru, číj jak říkáme, algoritmus[^], který operuje s dvojicí přirozených čísel (p, n) , a že když tato procedura proběhne, poskytne nám platný důkaz toho, že výpočet $C_p(ri)$ nikdy neskončí. Algoritmus[^] nemusí nutně vždy fungovat v tom smyslu, že mohou existovat výpočty $C_p(n)$, které jsou nikdy nekončící a přitom $A(p, \ll)$ nedojde ke konci také. Jsme si však jisti, že A nedělá chyby, to znamená, pokud $A(p, n)$ proběhne do konce, jsme si jisti, že $C_p(n)$ je opravdu nekončící.

Představme si, že člověk-matematik postupuje při rigorózním důkazu nějaké matematické věty, například TTi-věty, podle nějaké výpočetní procedury A . Předpokládejme, že v_i , co tato procedura obnáší, a *věří* v její správnost. Teď si představme, že procedura A zahrnuje *všechny* postupy, které má člověk-matematik k dispozici k prokázání, že se výpočty nikdy nezastaví. Procedura[^] funguje tak, že se nejdřív podívá na číslo p , aby se zvolil počítačový program, a potom se podívá na číslo n , aby zjistila, se kterým číslem se má pracovat. Jestliže výpočetní procedura A doběhne do konce, znamená to, že výpočet $Q(\ll)$ nikdy neskončí. Tedy platí:

Pokud $A(p, n)$ skončí, pak $C_p(ri)$ neskončí.

To je tedy, co dělá A - nezvratně nás přesvědčí, že určitý výpočet nikdy neskončí.

Předpokládejme nyní, že položíme;? = n . Vypadá to jako zvláštní trik, ale je to známý postup - *Cantorův diagonální postup* - a můžeme jej zde bez obav užít. Dojdeme k následujícímu závěru.

Pokud $A(n, n)$ se zastaví, pak se $C_p(n)$ nezastaví.

Nyní/e ale $A(n, n)$ funkcí jediného čísla a musí tedy být někde mezi počítačovými programy $C_p(n)$, protože jsme předpokládali, že tento seznam programuje úplný, že zahrnuje všechny výpočty, které působí na jediné číslo n . Předpokládejme, že tento program, který je identický s $A(n, n)$, je v našem seznamu označen indexem k . Pak tedy platí, že

$$A(n, n) = C_k(n).$$

Položíme-li tedy číslo $n = k$, zjistíme, že

$$A(k, k) = C_k(k).$$

Podívejme se ale znovu na tvrzení „Pokud $A(p, n)$ skončí, pak C/n neskončí“. Na jeho základě můžeme učinit závěr:

Pokud $seA(k, k)$ zastaví, $Ck(k)$ se nezastaví.

$MaA(k, k)$ je totéž jako $Ck(k)$. Došli bychom tedy k logickému sporu: pokud se $Ck(k)$ zastaví, pak se nezastaví. To je jasný logický závěr. My jsme ovšem předpokládali, že procedura A je taková, že v některých případech $seA(p, n)$ nezastaví a $C_p(n)$ se také nezastaví. To tedy musí nastat v případě $A(k, k) = Ck(k)$. Protože se však výpočet A nezastavil, „nevíme“, zda se $Ck(k)$ zastaví. [Pokud se nějaký výpočet stále nezastavuje, není to důkaz, že se nezastaví někdy v budoucnu. Vezmeme-li si za úkol vydělit číslo tvořené 10^n trojkami číslem 10^{100} , pak budeme-li postupovat podle běžného pravidla pro dělení celý život, budeme dostávat stále týž výsledek, jako když dělíme 1 číslem 3. První výpočet však jednou skončí, výsledek je 0, 333... 3, přičemž poslední trojka je na 10^n desetinném místě, zatímco druhý výpočet je opravdu nekonečný. U některých výpočtů umíme dokázat, že se nikdy nezastaví, aniž počítáme nekonečně dlouho, jako právě v tomto případě. Právě k tomu slouží algoritmus A , který však, jak se ukazuje v předchozím argumentu, někdy selhává.] Určitá výpočetní procedura tedy nemůže plně zahrnout veškeré matematické uvažování vedoucí k rozhodnutí, zda se určité výpočty nezastaví, tedy k stanovení pravdivosti TCi-vět. To je jádro Gódelova-Turingova argumentu v té formě, v jaké jej budu potřebovat.

Můžeme se ptát po jeho opravdové síle. Jasně z něho vyplývá skutečnost, že matematický vhléd nemůže být zakódován do nějakého výpočtu, o kterém bychom si byli jisti, že je správný. Tento závěr bývá sice někdy zpochybňován, mně se však zdá nezvratný. Je zajímavé si přečíst, co o něm řekl Alan Turing a Kurt Godel. Zde je Turingův výrok:

„Jinými slovy, pokud předpokládáme, že stroj nikdy nechybuje, pak nemůže být zároveň inteligentní. Existuje několik matematických vět, které říkají zhruba právě toto. Tyto věty neříkají však nic o tom, kolik inteligence může stroj vykázat, pokud slevíme z požadavku neomylnosti.“

Zastával tedy názor, že Gódelův-Turingův argument je možné smířit s myšlenkou, že matematici jsou v podstatě počítače, pokud algoritmické procedury, podle nichž postupují, jsou ve svém základě *nesprávné*.

Můžeme se omezit na aritmetické výroky, například Tli-věty, což je značně omezující typ výroků. Myslím, že Turing se domníval, že lidská mysl užívá algoritmů, ale tyto algoritmy jsou prostě chybné, tedy ve své podstatě nejisté. Takový přístup se mi moc nelíbí, protože v tuto chvíli se nezabýváme otázkou, jak člověk získává inspiraci, nýbrž problémem, jak může sledovat určitou argumentaci a rozumět jí. Proto se mi Turingův názor nezdá přijatelný. V mém schématu by Turing patřil do kategorie osob A.

Podívejme se, co říkal Gódel. Ten by v mém schématu byl osobou D. Vidíme, že třebaže oba, Turing i Gódel, vycházeli ze stejného matematického důkazu, došli k zcela opačným závěrům, co se týče jeho obecných důsledků. Nicméně ačkoli Gódel ve skutečnosti nevěřil, že matematický vhled se dá redukovat na nějaký výpočet, neuměl tuto možnost rigorózně vyloučit. Tvrdí:

„Na druhé straně to, co bylo až dosud dokázáno, nevylučuje možnost, že by mohl existovat (a dokonce být empiricky objeven) stroj dokazující matematické věty, což^e ve skutečnosti ekvivalentní matematické intuici. Nelze však dokázat, že tomu tak je, ani dokázat, že by vytvářel pouze *správné věty* v konečné číselné teorii.“

Podle jeho názoru existuje klíčka, jak obejít přímé užití Gódelova-Turingova argumentu k odmítnutí „computacionalismu“ či funkcionalismu: matematici možná užívají algoritmické procedury, které jsou správné, nemůžeme však s jistotou vědět, že opravdu správné jsou. Podle Gódelova tedy zmíněná klíčka spočívá v *rozpoznatelnosti*, zatímco podle Turinga ve *správnosti*.

Já však soudím, že ani jedna z obou cest, jak se vyhnout uvedenému důsledku Gódelovy věty, není přijatelná. Gódelův-Turingův argument říká pouze, že jakmile o jakékoliv algoritmické proceduře (pro dokazování Tli-vět) zjistíme, že je správná, můžeme okamžitě ukázat na něco, co se jí vymyká. Může to být tak, že ve skutečnosti užíváme určitou algoritmickou proceduru, o níž nevíme, zda je správná, a přitom existuje nějaké výukové zařízení, které nám umožňuje vyvinout tuto schopnost. Tímto tématem a řadou dalších se do omrzení zabývám ve své knize *Shadows of the Mind*. Zde se do těchto spleťostí nechci pouštět. Zmíním se pouze o dvou otázkách.

Jak mohl tento předpokládaný algoritmus vzniknout? V případě lidských bytostí se pravděpodobně vyvinul přírodním výběrem, v případě robotů by musela být umělá inteligence záměrně vytvořena. Nebudu se zde pouštět do detailů, přiblížím je však dvěma kresbami ze své zmíněné knihy.

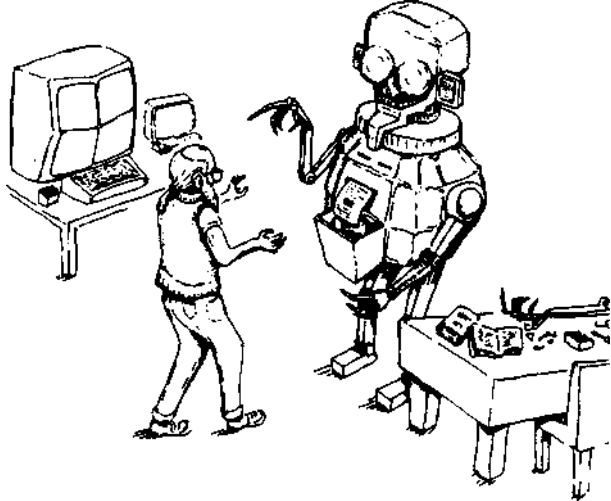


Obr. 59 Pro naše dávné předky byla schopnost vymýšlet hlubokou matematiku stěží nějakou výhodou v darwinovském přírodním výběru. Mohla jí však být obecná schopnost *rozumět* věcem.

První / kreseb (obr. 59) se *týká přírodního výběru*. Vidíme na ní, že vyobrazený matematik se nenachází zrovna v tom nejlepší postavení z hlediska přírodního výběru, protože se na něj právě chystá zaútočit tygr šavlozubý. Na druhé straně jeho bratraci v jiné části kresby chytají mamuty, stavějí domy, pěstují obilí. Tyto věci v sobě zahrnují porozumění, ale nejsou specifické pro matematiku. Kvalita schopnosti porozumět může být tedy věcí, pro kterou jsme byli vybráni, těžko jí však může být specifický algoritmus pro pěstování matematiky.

Druhá kresba (obr. 60) se *týká umělé inteligence* a do své výše uvedené knihy jsem zařadil drobnou historku o diskusi mezi expertem na umělou inteligenci a robotem někdy v budoucnosti. Úplný argument v knize je dosti dlouhý a komplikovaný, nepokládám za nezbytné se do něj zde pouštět. Můj původní způsob uplatňování Gódelova-Turingova argumentu byl napadán nejrůznějšími lidmi z nejrůznějších úhlů a na všechny tyto různé názory jsem musel reagovat. Většinu této diskuse jsem se v uvedené knize snažil zahrnout právě do diskuse mezi odborníkem na umělou inteligenci a robotem.













Vraťme se ale k otázce, o co vlastně jde. Gódelův argument se *týká určitých speciálních výroků o číslech*. Co nám Godel říká, je, že žádný systém početních pravidel nemůže plně charakterizovat všechny vlastnosti *přirozených čísel*. Přestože taková pravidla neexistují, každé dítě ví, co to přirozená čísla jsou. Naučí se tomu tak, že mu ukazujete různé počty předmětů, jak je naznačeno na obrázku 61, a po nějaké chvíli dojde z těchto partikulárních případů k abstrakci pojmu přirozené čís-



Obr. 60 Urban Imperátor v konfrontaci s Matematicky oprávněným kybersystémem. V *Shadows of the Mind* se prvních dvě stě stránek vyrovnávám s kritikou užívání Gódelova-Turingova argumentu. Jádrem mých nových argumentů je shrnuto v dialogu odborníka na umělou inteligenci Urbana Imperátora s robotem.

lo. Děti nemusíte dávat sadu početních pravidel - jen se snažte, aby „pochopilo“, co to přirozená čísla jsou. Vidím to tak, že dítě je schopno navázat jakýsi druh „kontaktní“ s platónským světem matematiky. Někteří vědci nemají tento způsob vyjadřování o matematickém vhledu rádi, já však mám za to, že nějaký takový pohled je k popisu toho, co se děje, nutný. V nějakém smyslu přirozená čísla už „někde“ jsou, nějak existují v platónském světě, a my máme přístup do tohoto světa díky své schopnosti být si vědomi věcí. Kdybychom byli prostě počítače bez myšlky, takový přístup by nám zůstal uzavřen. Početní pravidla nejsou to, co nám umožňuje pochopit povahu přirozených čísel, jak právě ukazuje Gódelova věta. Pochopení, co to přirozená čísla jsou, je dobrým příkladem platónského kontaktu.

Tvrdím tedy, že matematické porozumění není obecně výpočetní věc, ale něco naprosto jiného, něco, co je založeno na naší schopnosti být si vědomi věcí. Někdo může namítnout: „Dobře, tvrdíte, že jste dokázal, že matematický vhled není výpočetní věc. To však mnoho neříká o jiných formách vědomí.“ Já se ale domnívám, že to zcela stačí. Není dobrý důvod proto, abychom mezi matematickým porozuměním

					--
					--
					--
--	--	--	--	--	--
0	1	2	3	4	--

Obr. 61 Platónský pojem přirozených čísel může dítě abstrahovat z několika málo jednoduchých příkladů.

a jinými formami porozumění vedli dělicí čáru. Právě to jsem se snažil naznačit na mé první kresbě (obr. 59). Porozumění není něco, co je specifické pro matematiku. Lidské bytosti si vyvinuly tuto kvalitu obecného porozumění a *není* to vypočitatelná kvalita, protože takovou kvalitou není ani matematické porozumění. Nekladu hranici ani obecně mezi lidským porozuměním a lidským vědomím. Byl jsem tedy tvrdil, že nevím, co to lidské vědomí je, zdá se mi, že lidské porozumění věcem je jeho příkladem, nebo je alespoň něčím, co vědomí potřebuje. Nekladu ani jasnou dělicí čáru mezi lidským vědomím a vědomím zvířat. To bych se mohl dostat do sporu s řadou lidí. Zdá se mi však, že lidé se podobají mnoha jiným živočišným druhům, a třebaže je nám dán lepší stupeň porozumění věcem než řadě našich bratranců, přece i jim je dán určitý druh chápání a musí mít i určité vědomí.

Tedy nevýpočetní charakter *některých* aspektů vědomí, jmenovitě matematického porozumění, silně napovídá, že nevýpočetnost by měla být rysem *veškerého* vědomí. Takový je můj názor.

Co vlastně nevýpočetností rozumím? Hodně jsem o tom mluvil, ale měl bych dát nějaký příklad. Tomu, co popíši, se často říká *model vesmíru na hraní* - je to něco, čím se fyzikové zabývají, když nemají zrovna na práci něco lepšího. (Ve skutečnosti to není zase tak špatná čin-

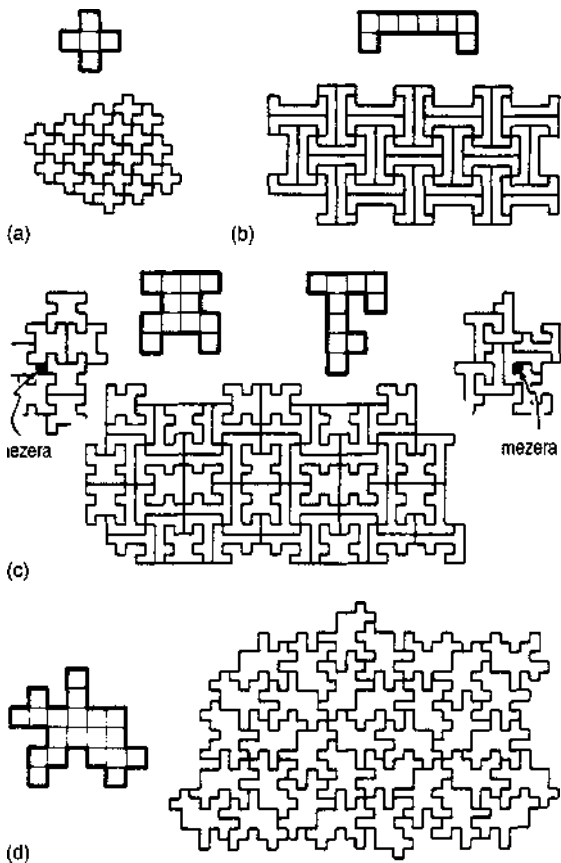
Předpokládejme, že v určitém časovém okamžiku je stav našeho vesmíru určen dvojicí polyominových množin (S_n, S_p) . Dynamika tohoto „vesmíru“, se řídí pravidlem, že pokud rovinu lze pokrýt polyominou z množiny S_q , přejdeme k následující množině S^{+i} , takže stav vesmíru je v následujícím okamžiku určen dvojicí (S_q+i, S_p) . Pokud to nejde, prohodí se navíc pořadí obou množin ve dvojici, a vesmír v takovém případě přejde do stavu (S_n, S_o+i) . Je to velmi jednoduchý, nudný vesmír. Co tímto příkladem sledují?

Podstatné je to, že byť je celý vývoj zcela deterministický - uvedl jsem vám jednoduché, absolutně deterministické pravidlo, podle kterého se vyvíjí -, je *nevypočitatelný*. Je to důsledek věty dokázané Robertem Bergerem, podle níž neexistuje žádný počítačový proces, který by mohl simulovat vývoj tohoto vesmíru, protože neexistuje žádná počítačová rozhodovací procedura, která by určila, zda nějaká polyominová množina vydláždí rovinu.

Příklad tedy ilustruje skutečnost, že vypočitatelnost a determinismus jsou dvě různé věci. Příklady polyominového dláždění máme na obrázku 63. V případě (a) a (b) mohou nakreslené tvary kompletně vydláždít rovinu tak, jak je naznačeno. Tvary nakreslené na obrázku (c) na levé a pravé straně samy rovinu vydláždít nemohou - v obou případech zůstávají v dlažbě mezery. V případě použití obojího typu dlaždic to však jde, jak je z obrázku patrné. I útvarem nakresleným v příkladu (d) lze rovinu vydláždít - právě jen tím jedním způsobem naznačeným na obrázku. Příklad dokazuje, jak komplikovaná může hledaná dlažba být.

Obsahuje-li množina více než jednu dlaždici, problém se komplikuje ještě mnohem více. Podívejme se na obrázek 64 - Bergerova věta je založena právě na existenci dlaždic toho typu, jež jsou zde nakresleny. Třemi dlaždicemi z horní části obrázku sice lze rovinu vydláždít, ale jen tak, že se vzorek dláždění nikdy neopakuje. Ať pokračujete v kterémkoli směru, vzhled dlažby se neustále proměňuje. Není vůbec snadné ukázat, že úlohu lze skutečně splnit, ale je tomu opravdu tak. A právě existence takových dlaždic, jež musíte klást nikdy se neopakujícím způsobem, abyste rovinu beze zbytku vydláždili, je základem Bergerova důkazu, že žádný počítačový program nemůže simulovat vývoj našeho vesmíru na hraní.

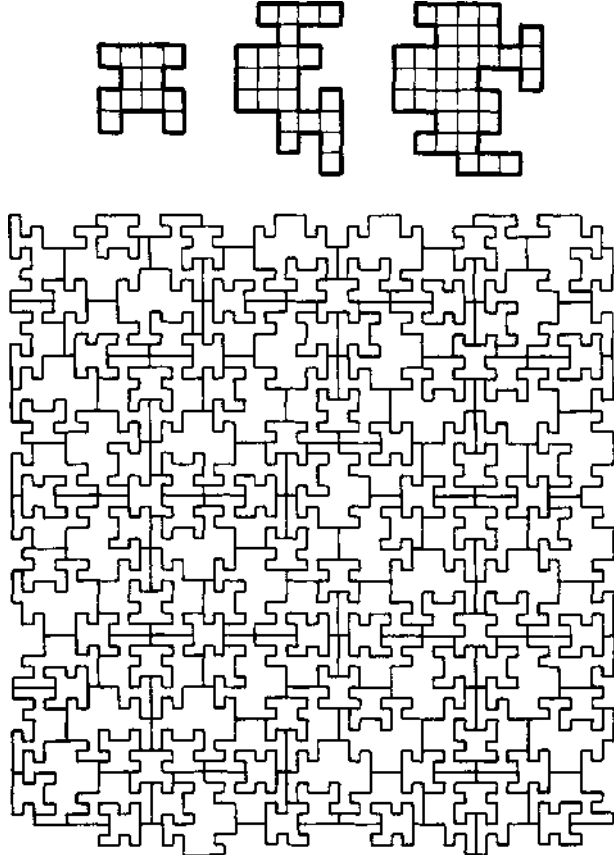
Jak je to se skutečným vesmírem? V druhé kapitole jsem tvrdil, že v naší fyzice něco fundamentálního chybí. Je nějaký fyzikální důvod pro to, abychom předpokládali, že tato dosud neobjevená fyzika má v sobě nějaký rys nevypočitatelnosti? Já věřím, že má. Domnívám se,



Obr. 63 Různé množiny polyominů, které vydláždí nekonečnou euklidovskou rovinu (zrcadlově symetrické dlaždice jsou dovoleny). Polyominy v obrázku (c) vzaté každý zvlášť však rovinu nevydláždí, je třeba je kombinovat.

že plná kvantová teorie gravitace by nevypočitatelná mohla být. Tato myšlenka nespada jen tak z nebe. Ukáží, že nevypočitatelnost je rysem dvou rozdílných přístupů ke kvantové gravitaci. Obaj jsou významné tím, že zahrnují kvantovou superpozici čtyřrozměrných prostorů. V řadě dalších přístupů se pracuje se superpozicí pouze trojrozměrných prostorů.

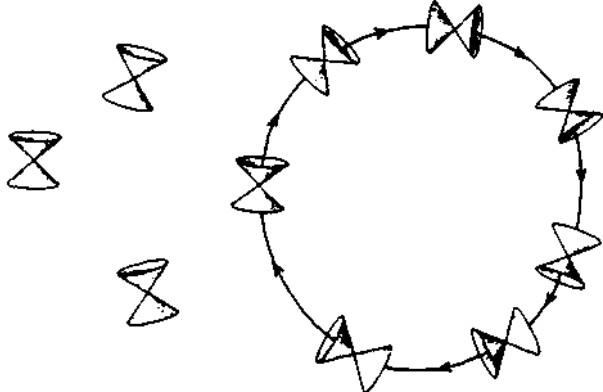
Prvním z nich je Gerochovo-Hartlovo schéma kvantové gravitace, která má v sobě nevypočitatelný prvek díky tomu, že se zde určitým způsobem počítá přes čtyřrozměrné topologické variety, a ty nejsou, jak



Obr. 64 Tato množina tří polyominů vydláždí rovinu pouze neperiodicky.

ukázal M. A. Markov, spočítatelně klasifikovatelné. Nebudu zabíhat do technických podrobností, ale ukazuje se zde, že se rys nevypočítatelnosti objevuje naprosto přirozeným způsobem při pokusu kombinovat obecnou teorii relativity s kvantovou mechanikou.

Jiným příkladem přístupu ke kvantové gravitaci, kde vstupuje do hry nevypočítatelnost, je práce Davida Deutsche. Jeho argument se objevil v preprintu jeho článku, v konečné verzi práce, která vyšla tiskem, však k mému zklamání chyběl. Na můj dotaz, proč jej vynechal, mne ujistil, že ne proto, že by byl chybný, ale proto, že nebyl důležitý pro zbytek článku.



Obr. 65 Při velkém vzájemném sklonu světelných kuželů v prostoročase se mohou vyskytnout uzavřené světočáry časové povahy.

Podle Deutsche je třeba v této podivné superpozici prostoročasů alešpoň uvažovat o možných vesmírech, ve kterých se mohou vyskytovat uzavřené časové čáry či světočáry (viz obr. 65). V takových vesmírech se vše chová zcela ztřeštěně, minulost a budoucnost je vzájemně promíchána a kauzální (příčinné) působení se děje v časových smyčkách. I když takové vesmíry neodpovídají pozorovanému, mohou přesto ovlivnit to, co se reálně děje. Je to určitá analogie testování bomby z druhé kapitoly. Neříkám, že tento argument je zcela jasný, je to však další známka, že ve správné teorii, pokud ji někdy najdeme, může být něco nesoucího rys nevypočitatelnosti. [Termín *non-computability* překládám doslovně jako *nevypočitatelnost*. V odborné české literatuře se používá termín *algoritmická nerozhodnutelnost*.]

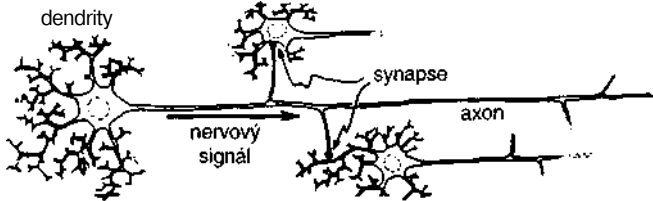
Pozastavme se nyní u jiného aspektu problému. Už jsem zdůraznil, že determinismus a vypočitatelnost jsou dvě různé věci. To má i určitý dopad na otázku *svobodné vůle*. Ve filozofických diskusích se problém svobodné vůle vždy pojímal jako otázka, zda svět je, či není deterministický. Jinými slovy, filozofové se tázali, zda je budoucnost určena naší minulostí, či rozebírali problémy podobné povahy. Mně se ale zdá, že existuje řada jiných otázek, které by bylo třeba v této souvislosti vznášet, například zda je budoucnost určena přítomností *vypočitatelně* - a to je však zcela odlišný problém.

Tyto úvahy navozují řadu dalších otázek. Pouze je vyslovím, určitě se na ně nepokusím odpovědět. Kupříkladu se vedou velké diskuse na téma, do jaké míry jsou naše aktivity určeny *dědičností* a do jaké míry

naším *prostředím*. Vstupuje sem, což se často kupodivu nezdržuje, *prvek náhody*. V jistém smyslu se však tyto otázky vymykají možnosti naší kontroly. Můžete se zeptat: „Existuje něco, snad věc zvaná *našeya*, která nic z toho neovlivňuje a svou podstatou se liší od věcí, které na zmíněných vlivech závisí?“ Taková otázka má i svůj aspekt právní. Hovoříme-li o právech a zodpovědnosti, máme na mysli, že se nějak týkají právě tohoto „já“. Jde o velice subtilní problém. Problém, co značí *determinismus* versus *indeterminismus*, je formulován poměrně přímočaře. Indeterminismem obvykle míníme to, že ve hře jsou určité náhodné prvky - a to nám s nastíněnou otázkou příliš nepomůže. Tyto náhodné prvky totiž také nemáme pod kontrolou. Jejich úlohu můžeme nahradit *nevypočitatelností*. Zde může vstupovat do hry *nevypočitatelnost vyššího řádu*. Podivuhodnou věcí na gódelovských argumentech je to, že je lze uplatnit na různých úrovních. Mohou být aplikovány na úrovni, které Turing říká *věštecký stroj* — gódelovský argument je ve skutečnosti podstatně obecnější, než jsem ho zde nastínil. Měli bychom se tedy zabývat otázkou, zda do vývoje našeho skutečného vesmíru nevstupuje nějaký druh nevypočitatelnosti vyššího řádu. Náš pocit svobodné vůle možná souvisí právě s tímto problémem.

Mluvil jsem o kontaktu s určitým druhem platónského světa. Jaká je povaha tohoto „platónského kontaktu“? Určitá slova v nás vzbuzují pocit, že jsou v nich obsaženy určité nevypočitatelné prvky. Jsou to pojmy jako úsudek, zdravý rozum, vhled, estetická vnímavost, soucit, morálka To se zdají být věci, které nejsou jen výsledkem výpočtu. Až dosud jsem mluvil o platónském světě především v termínech matematiky, jsou však další pojmy, které sem též můžeme zahrnout. Platon by určitě tvrdil, že nejenom pravda, ale i dobro a krása jsou absolutní (platónské) pojmy. Pokud skutečně existuje nějaký kontakt s platónskými absolutními idejemi, který nám naše schopnost vnímat umožňuje navázat a který nemůže být vysvětlen prostřednictvím výpočetního chování, představuje podle mého názoru důležitý problém.

A jak je to s našimi duševními schopnostmi? Na obrázku 66 je nakreslen malý kousek mozku. Hlavní složkou mozku je systém *neuronů*. Důležitou částí každého neuronu je dlouhé vlákno zvané *axon*. Každý axon se v různých místech větví do jednotlivých pramenů, z nichž každý končí *synapsí*. Tyto synapse jsou spojky, styčné body, kudy se za pomoci chemických substancí zvaných neurotransmitery (neuropřenašeče) přenášejí signály z každého neuronu (především) k jiným neuronům. Některé synapse jsou excitační, snaží se vybudit následující neuron, jiné jsou naopak inhibiční, zpomalující, tlumící přenos dalším neu-

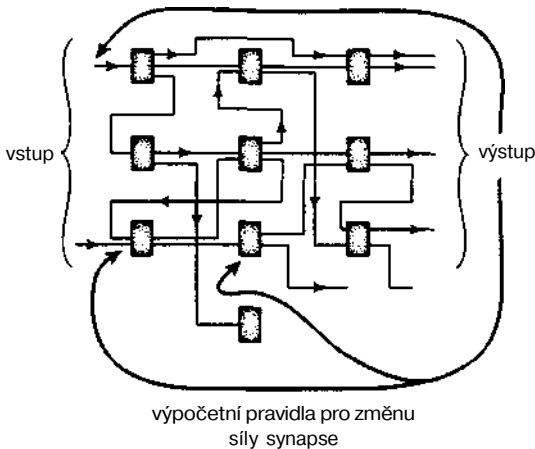


Obr. 66 Náčrt neuronu spojeného s jinými neurony prostřednictvím synapsí.

ronem. Spolehlivost, s níž určitá synapse předá zprávu od jednoho neuronu k druhému, se dá chápat jako *síla* synapse. Pokud by všechny synapse měly stejnou sílu, mozek by pracoval velmi obdobně jako počítač. Je ale jisté, že síla synapsí se může měnit, a to, jak se mění, objasňuje řada teorií. Jedním z prvních návrhů teorie tohoto procesu byl například Hebbův mechanismus. Podstatnou skutečností ale je, že všechny tyto mechanismy vyvolávající změny jsou výpočetního charakteru, i když s určitým pravděpodobnostním prvkem. Máme-li tedy nějaké výpočetně-pravděpodobnostní pravidlo, které určuje, jak se mění síla synapsí, můžeme simulovat činnost neuronů a synapsí na počítači, protože i pravděpodobnostní prvky vystupující v pravidle počítač snadno simuluje. Výsledkem je systém, jehož schéma je zachyceno na obrázku 67.

Jednotlivé prvky zobrazené na obrázku 67 (mohou jimi být tranzistory) mohou hrát úlohu neuronů v mozku. Vezměme jako příklad elektronické zařízení známé jako *umělá neuronová síť*. Neuronové sítě jsou zkonstruovány podle jistých pravidel, určujících, jak se mění síla synapsí, volených zpravidla tak, aby se zlepšila kvalita určitého výstupu. Jde však vždy o pravidla výpočetního charakteru. Že tomu tak je, je zřejmé právě proto, že jejich činnost se na počítačích skutečně simuluje. To je test tohoto tvrzení. Můžete-li model vložit na počítač, pak je vypočítatelný. Gerald Edelman například má určitou představu, jak mozek pracuje, a tvrdí, že tento mechanismus je nevypočítatelný. Na čem své tvrzení zakládá? Má počítač, na kterém všechny tyto své představy simuluje. Pokud se tedy jeho teorie dá simulovat počítačem, je to důkaz, že mechanismus je vypočítatelný.

Jak pracují individuální neurony? Chovají se opravdu pouze jako počítačové prvky? Neurony jsou buňky a buňka je velice důmyslná věc. Je v podstatě vytvořena tak, že i s jedinou buňkou lze podnikat velice komplikované úkony. Například jednobuněčný prvek trepka umí plavat za potravou, ustupovat před nebezpečím, obcházet překážky a zřej-



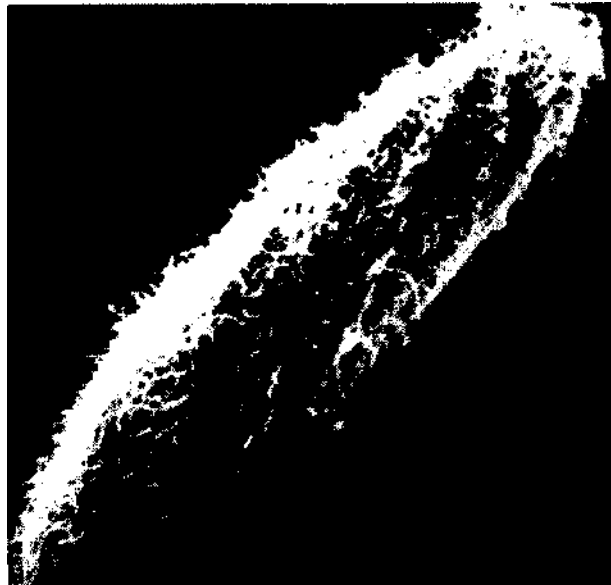
Obr. 67

mě se i učit ze zkušenosti (obr. 68). To všechno jsou kvality, u nichž bychom předpokládali, že vyžadují nervový systém, ale trepka žádný nervový systém nemá. Nejvýše bychom si mohli představit, že trepka je sama jakýmsi neuronem! Uvnitř žádné neurony nemá, protože je tvořena jedinou buňkou. Totéž platí o měňavce. Jak tyto organismy dělají všechny popsané úkony?

Jedna z teorií předpokládá, že komplikované činnosti jednobuněčných organismů řídí jejich *cytoskelet*, který mimo jiné dává buňce tvar. U trepky jsou krátké vlásky, brvy, které jí slouží k plavání, právě výběžky cytoskeletu. Jsou tvořeny drobnými trubkovitými strukturami, *mikrotubuly*. Cytoskelet je tvořen těmito mikrotubuly, aktinem a intermediálními vlákny. I měňavky se pohybují pomocí mikrotubulů — mikrotubuly postrkují jejich panožky.

Mikrotubuly jsou struktury hodné podivu. Už jsme řekli, že brvy, které umožňují trepce plavat, jsou v jádře tvořeny právě svazky mikrotubul. Mikrotubuly jsou však velmi důležité při mitóze, buněčném dělení. To ovšem platí o obyčejných buňkách, ne o neuronech, protože neurony se nedělí - to je od jiných buněk velmi podstatně odlišuje.

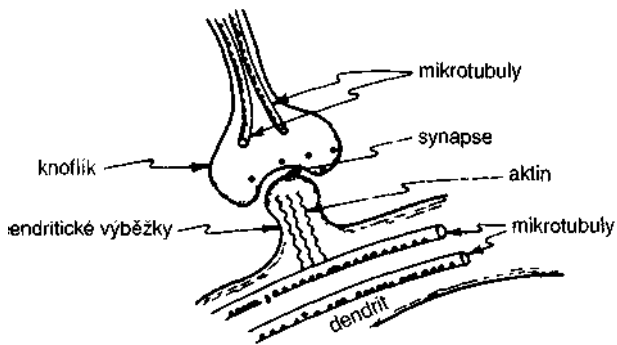
Řídicím centrem cytoskeletu živočišné buňky je struktura zvaná *centrozom*, jejíž nejdůležitější část, *centriola*, sestává ze dvou svazků mikrotubulů ve tvaru oddělených „T“. V kritické fázi, když se centrozom dělí, vyroste z každého válečku v centriole nový váleček, takže se vytvoří dvě centriolová „T“; ta se pak oddělí a jakoby s sebou odtáhnou



Obr. 68 Trepka. Všimněte si krátkých vlásků, brv, které jí slouží k plavání. Jejich základem jsou výběžky jejího *cytoskeletu*.

svazek mikrotubulů. Tato mikrotubulová vlákna nějak spojují dvě části rozděleného centrozomu s dvěma vlákny DNA v jádru buňky a ty se pak oddělí. Tento proces iniciuje buněčné dělení.

Toto však neprobíhá v neuronech, protože neurony se nedělí; mikrotubuly zde tedy musí mít jinou funkci. Jakou? Mají na svých bedrech zřejmě řadu činností, mimo jiné zprostředkovávají transport molekul synaptického přenašeče, neurotransmiteru, uvnitř buňky. Jsou však, zdá se, zodpovědné ještě za jednu důležitou věc - závisí na nich síla synapsí. Na obrázku 69 je nakreslen výběžek neuronu se synapsí a také zhruba naznačena poloha mikrotubulů a aktinových vláken. Jednou z možností, jak by mikrotubuly mohly ovlivňovat sílu synapse, je, že nějak určují povahu *dendritických výběžků* (také zachycených na obr. 69). Tyto výběžky se vyskytují na řadě synapsí a mohou zřejmě růst, zmenšovat se či se jinak měnit. Takové změny mohou být způsobeny změnami v nich obsaženého aktinu, který hraje podstatnou roli v mechanismu stahování svalů. Sousední mikrotubuly mohou silně ovlivňovat aktin ve výběžcích a ten zase může zapříčiňovat změny tvaru a dielektrických vlastností synaptických spojů.

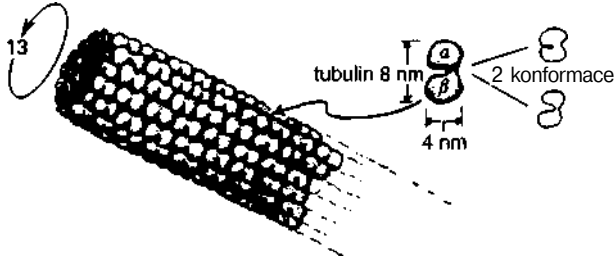


Obr. 69 Výběžek neuronu se synapsí.

Jsou však ještě nejméně dva další způsoby, jak mohou mikrotubuly ovlivňovat sílu synapsí. Zcela jistě ovlivňují transport chemických látek, které tvoří synaptické přenašeče zprostředkující přenos signálu od jednoho neuronu k druhému. Právě po mikrotubulech putují neurotransmitery podél axonů a dendritů, aktivita mikrotubulů může tudíž ovlivňovat koncentraci těchto látek na koncích axonů a v dendritech. Tím může být zase ovlivněna síla synapsí. Mikrotubuly mohou působit i na růst a degeneraci neuronu a měnit tak samotnou síť neuronových spojů.

Co to vlastně ty mikrotubuly jsou? Náčrtek mikrotubulů máme na obrázku 70. Jsou to malé trubičky tvořené proteinem (bílkovinou) zvaným *tubulin*. Mikrotubuly mají řadu zajímavých rysů. Protein tubulin se může vyskytovat nejméně ve dvou rozdílných stavech (konformacích) a jedna konformace může přecházet v druhou. Trubička může zřejmě přenášet signál. Stuart Hameroff a jeho kolegové vyslovili zajímavý názor o tom, jakým způsobem se mohou signály podél trubiček šířit. Podle Hameroffa se mikrotubuly chovají jako jakési *buněčné mikroprocesory* a mohou tak přenášet velmi komplikované signály. Dvě rozdílné konformace molekuly tubulinu můžeme totiž pokládat za realizaci stavů „0” a „1” digitálního počítače. Každý jednotlivý tubul se tedy může chovat jako mikropočítač. To musíme mít na paměti, když se snažíme pochopit, jak neurony fungují. Jednotlivý neuron se nechová jen jako vypínač; protože obsahuje mnoho a mnoho mikrotubulů, je schopen velmi komplikovaných úkonů.

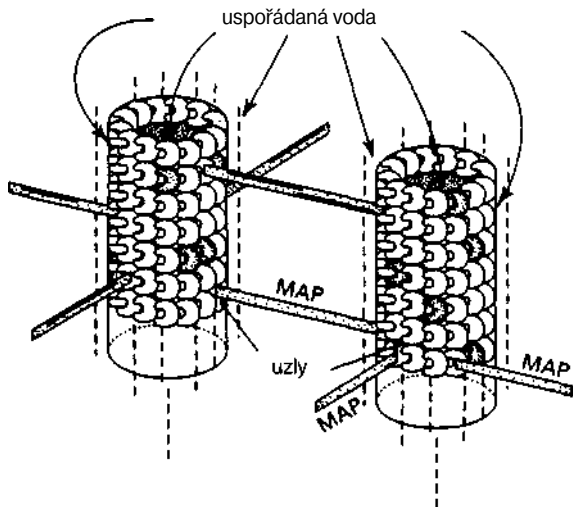
A zde naváží svými vlastními myšlenkami. Možná že pro porozumění těmto procesům je důležitá kvantová mechanika. Jedna z vlastností



Obr. 70 Mikrotubul je dutá trubička, obvykle sestávající z třinácti sloupců dimeru tubulinu. Každá molekula tubulinu se může nacházet (nejméně) ve dvou konformacích.

mikrotubul, která mne nejvíce upoutává, je skutečnost, že jsou to *trubičky*. Díky tomu jsou možná schopny izolovat to, co se děje v jejich vnitřku, od náhodných procesů v jejich okolí. Ve druhé kapitole jsem uváděl důvody pro to, proč potřebujeme nějakou novou formu OŘ fyziky, i pro to, že v relevantních situacích musí existovat kvantově superponované pohyby hmot, které jsou dobře izolované od okolí. V trubičkách by docela dobře mohl existovat nějaký druh kvantových koherentních procesů ve velkých měřítkách, jako je tomu například v supravodiči. Významný pohyb hmotnosti by se uskutečňoval jen tehdy, pokud by tyto procesy byly vázány nějakým způsobem k tubulinovým konformacím (Hameroffova typu), přičemž by nyní samotné chování jako „buněčný mikroprocesor“ podléhalo kvantové superpozici. Jak by celá věc mohla vypadat, je naznačeno na obrázku 71.

Součástí této představy je, že v trubičkách existují jakési koherentní kvantové kmity a že tento proces probíhá v značně rozsáhlé oblasti mozku. Už před hodnou řádkou let uvažoval podobně Herbert Frólich; ukazoval, že představa existence obdobného procesu v biologických systémech je vcelku přijatelná. Mikrotubuly se zdají být dobrým kandidátem na strukturu, ve které by mohl probíhat koherentní kvantový proces velkého měřítka. Když hovořím o procesu ve velkém měřítku, vzpomene si na efekty kvantové nelokality, o nichž jsem se zmiňoval v druhé kapitole v souvislosti s EPR problémem. Viděli jsme tam, že některé efekty, k nimž dochází ve velkých vzdálenostech od sebe, nelze považovat za separované. Takovéto nelokální efekty, při jejichž výkladu nemůžeme chápat dva vzdálené objekty jako nezávislé, podle kvantové mechaniky existují, musíme proto připustit, že existují určité globální procesy.



Obr. 71 Systém mikrotubulů v neuronech - či jejich souboru - může být nositelem kvantově koherentních procesů na velkých měřítkách, přičemž jednotlivé OR události představují události vědomí. Vyžaduje to efektivní izolaci od okolí, zajišťovanou možná uspořádanými molekulami vody, která mikrotubul obklopuje. Propojující systém proteinů sdružených s mikrotubulem (MAP - microtubule associated proteins), připínajících se k mikrotubulů v „uzlech“, může tuto aktivitu „ladit“.

Podle mého *názoru* je vědomí cosi globálního. Proto jakýkoli fyzikální proces, který by měl být zodpovědný za vědomí, by měl mít globální povahu. Kvantová koherence tomuto požadavku bezpochyby vyhovuje. Aby mohla nastat koherence v tak velkých měřítkách, potřebuje vysoký stupeň izolace a ten mohou poskytnut stěny mikrotubulů. Mají-li být však do procesu zahrnuty i konformace tubulinu, je nutná další izolace. Izolujícím prostředím by mohly být uspořádané molekuly vody obklopující mikrotubuly. Uspořádaná voda (*je* známo, že v živých buňkách opravdu existuje) by pravděpodobně mohla být i důležitým činitelem kvantových koherentních kmitů uvnitř trubiček. I když zde činíme řadu silných předpokladů, není snad zcela nerozumné se domnívat, že takhle nějak by tomu mohlo být.

Kvantové oscilace v trubičkách musí být nějak svázány s funkcí mikrotubulů, především s činností „buněčného mikropočítače“, o němž mluví Hameroff. Nyní ale musí být jeho myšlenka kombinována s kvantovou mechanikou. Teď tedy potřebujeme nejen výpočetní pochod

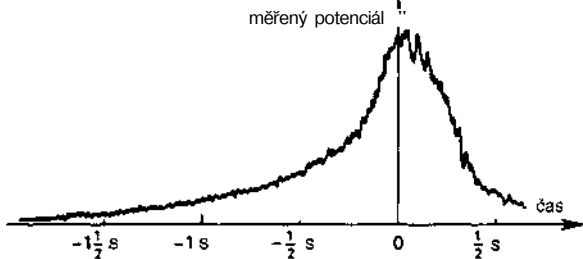
v obvyklém smyslu, nýbrž i kvantový výpočet, který zahrnuje superpozici takových jednotlivých pochodů. Pokud by to už bylo vše, pohybovali bychom se stále na kvantové úrovni. V určitém okamžiku se může kvantový svět provázat s okolím. Pak bychom přeskočili na klasickou úroveň zdánlivě náhodným způsobem v souladu s obvyklou R procedurou kvantové mechaniky. To ale není to pravé, chceme-li, aby do hry vstoupila skutečná nevypočitatelnost. K tomu je třeba, aby se projevil samy nevýpočetní aspekty OŘ, což vyžaduje dokonalou izolovanost. Tvrdím proto, že potřebujeme v mozku něco dostatečně izolovaného, aby nová OŘ fyzika měla šanci hrát důležitou úlohu. Potřebujeme, aby předpokládané mikrotubulární výpočty byly dostatečně dobře izolovány, jakmile začnou probíhat, aby nová fyzika mohla opravdu přijít ke slovu.

Předkládám tedy následující obraz. Kvantový výpočet, který jsem popsal, probíhá po nějakou dobu a zůstává dostatečně dlouho izolován od vlivu okolního materiálu - řádově snad po dobu blížíící se jedné sekundě -, takže jsou splněna kritéria, o kterých jsem mluvil, na místo obvyklých kvantových procedur nastoupí nevýpočetní ingredience - a dostaneme výsledek podstatně odlišný od toho, k čemu vede standardní kvantová teorie.

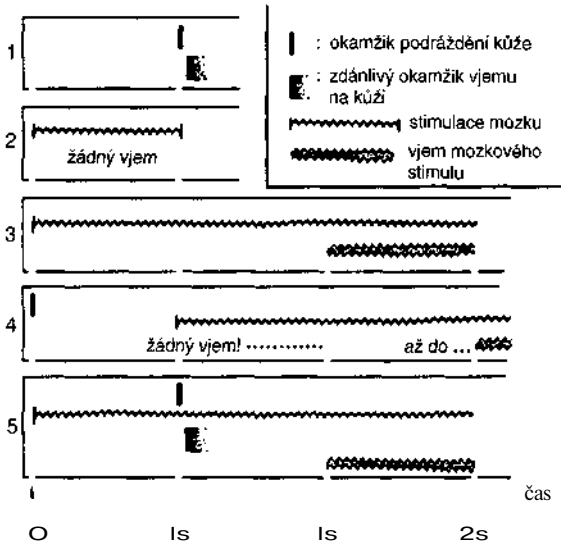
V těchto úvahách je samozřejmě notný díl spekulací. Poskytují však skutečně dobrý výhled směrem k mnohem určitějšímu a kvantitativnějšímu obrazu vztahu mezi vědomím a biologickými procesy, než byl zatím dostupný z jiných přístupů. Můžeme přinejmenším začít počítat, kolik neuronů musí být zahrnuto, aby příslušný OŘ proces měl význam. Co potřebujeme, je určitý odhad T , časové škály, o níž jsem mluvil na konci druhé kapitoly. Jinými slovy - pokud předpokládáme, že události vědomí jsou ve vztahu k takovýmto OŘ událostem, jaký odhad z toho plyne pro časový interval T ? Jakou dobu vyžaduje vědomí?

Existují dva typy experimentů, které se k tomuto problému vztahují. Jeden se zabývá svobodou vůle (neboli aktivním vědomím), druhý zkoumá vnímání, tedy pasivní vědomí.

Podívejme se nejdříve na svobodnou vůli. V pokusech Benjamina Libeta a H. H. Kornhubera má subjekt zmáčknot knoflík v čase určeném plně jeho (nebo jejím) volným rozhodnutím. Na hlavě má subjekt umístěny elektrody snímající elektrickou aktivitu mozku. Výsledky vzniklé zprůměrováním měření z mnoha pokusů, které jsou znázorněny na obrázku 72(a), jasně naznačují, že elektrická aktivita se začíná projevovat plnou sekundu předtím, než se subjekt domnívá, že skuteč-



(a)



(b)

Obr. 11 (a) Kornhuberův pokus, později opakovaný a zjemněný Libetem a jeho spolupracovníky. Rozhodnutí ohnout prst se zdá být provedeno v čase 0, ale záznam signálu z mozku (zprůměrovaný přes mnoho pokusů) naznačuje, že zde existuje „předběžná znalost“ záměru prst ohnout, (b) Libetův pokus. (1) Podnět aplikovaný na kůži se zdá být pocíten přibližně ve stejném čase, kdy skutečně nastal. (2) Podnět v mozkové kůře kratší než půl sekundy není vnímán. (3) Podnět v mozkové kůře trvající více než půl sekundy začne být pocíťován až po uplynutí poloviny sekundy. (4) Takový korový stimul může zpětně potlačit předchozí podráždění kůže, což naznačuje, že v době, kdy došlo ke kořovému stimulu, si subjekt ještě toto podráždění *neuvědomil*. (5) Dojde-li k podráždění kůže krátce *po* kořovém stimulu, pak se navrátí uvědomění si kožního stimulu, ale uvědomění si kořového podnětu bude opožděné.

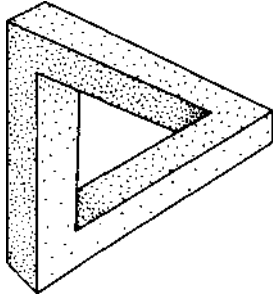
nil akt rozhodnutí. Takže svobodné rozhodnutí zřejmě zahrnuje určité časové zpoždění, řádově sekundové.

Pozoruhodnější jsou pasivní experimenty, mnohem obtížnější proveditelné. Zdá se, že naznačují, že teprve asi po půlsekundě mozkové aktivity si osoba něco pasivně uvědomí (obr. 72(b)). Při těchto experimentech se daří určitým způsobem zablokovat uvědomění si určitého stimulu kůže až do doby půl sekundy *poté*, kdy byl stimul vyvolán. V těch případech, kdy nebyla užita blokovací procedura, subjekt věří, že zkušenost podráždění kůže se vyskytla ve skutečném čase, kdy byl stimul proveden. Přesto ale může být jeho uvědomění zablokováno ještě půl sekundy po jeho skutečném vyvolání. Toto jsou neobyčejně podivuhodné pokusy, obzvláště uvážíme-li je dohromady. Naznačují, že vědomý volní akt potřebuje k realizaci asi sekundu, uvědomění si vnějšího podnětu asi půl sekundy. Uvážíme-li, že vědomí je něco, co něco dělá, máme před sebou téměř paradox. Abyste si nějakou událost uvědomili, potřebujete k tomu půl sekundy. A další sekundu potřebujete na to, aby vaše svobodná vůle toto něco učinila - celkově tedy na svou odpověď na daný podnět potřebujete půldruhé sekundy. Tomu se dá jen těžko věřit, zamyslíme-li se například nad průběhem běžného rozhovoru. I když velká část odpovědí může být automatická a nevědomá, tomu, že k uskutečnění *vědomé* odpovědi potřebujete půldruhé sekundy, se mi ani nechce věřit.

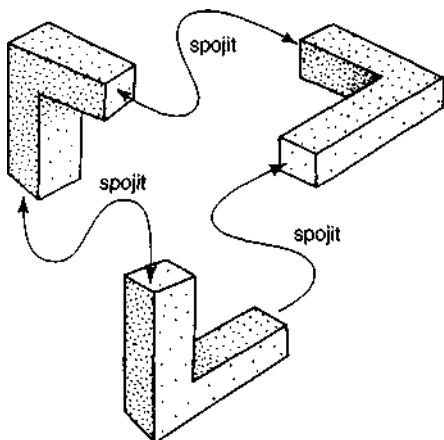
Osobně mám za to, že možná při interpretaci takovýchto pokusů mlčky předpokládáme, že věci se chovají podle klasické fyziky. Vzpomeňme si na problém testování bomby. Zde jsme mluvili o událostech, které mohou ovlivňovat věci, ačkoli ve skutečnosti nenastaly, pouze *mohly* nastat. Naše obvyklá logika nás může oklamat, pokud nejsme dostatečně pozorní. Musíme mít na paměti, jak se chovají kvantové systémy, takže podivné časové vztahy v popsáných experimentech mohou být důsledkem kvantové nelokality a kvantového ovlivňování neuskutečněnými událostmi.

Kvantové nelokalitě je velmi obtížné porozumět v rámci speciální teorie relativity. Já osobně se domnívám, že kvantové nelokalitě plně porozumíme teprve v rámci radikálně nové teorie. Tato nová teorie by nebyla jen lehkou modifikací kvantové teorie, od standardní kvantové teorie by se lišila tak radikálně, jako se odlišuje obecná teorie relativity od newtonovské teorie gravitace. Taková teorie by měla zcela rozdílnou pojmovou strukturu a kvantová nelokalita by v ní byla zabudována.

Ve druhé kapitole jsme ukázali, že přes svou záhadnost se dá kvantová nelokalita dobře matematicky popsat. Podívejte se na „nemožný“



Kde je nemožná část?



Obr. 7.3 Nemožný trojúhelník. Jeho „nemožnost“ se nedá lokalizovat; přesto ji lze definovat v přesných matematických pojmech jako abstrakci „pravidel lepení“ užitých při konstrukci.

trojúhelník z obrázku 73. Můžeme se zeptat: „V čem ta jeho nemožnost spočívá? Můžeme ji lokalizovat?“ Zakryjeme-li kteroukoli část obrázku, jeho „nemožnost“ rázem zmizí. Nemůžete říci, že nemožnost je vlastnost některého určitého kousku obrázku - nemožnost je vlastností celé struktury. Přesto existuje přesný matematický přístup, jak o takovýchto strukturách hovořit. Můžeme si představit celý objekt rozlámaný a pak postupně slepený dohromady naznačeným způsobem. Detailní struktura, jak jsou části slepeny dohromady, nám poslouží k vybudování jistých abstraktních matematických pojmů. V daném případě hovoříme

o *kohomologii*. Tento pojem nám poskytne prostředek k tomu, abychom vyhodnotili stupeň nemožnosti takového obrázku. Je to typ nelokální matematiky, která může být zahrnuta do naší nové teorie.

To, že se obrázek 73 podobá obrázku 55, není náhoda. Obrázek 55 jsem nakreslil právě takto, abych ve vztahu „tří světů“ zdůraznil určitý prvek paradoxu. V jejich vzájemném vztahuje opravdu něco tajemného: jako by se každý z nich „vynořoval“ z malé části svého předchůdce. Přesto se nám možná něco z tohoto tajemství podaří vysvětlit, či alespoň se s ním vyrovnáme, tak jako se to daří u obrázku 73. Je důležité umět rozpoznat hádanky, když na ně narazíme. Ale i když se něco jeví jako velmi záhadné, neznamená to, že jednou nenajdeme správný výklad.

O DUŠEVNU, KVANTOVÉ MECHANICE A AKTUALIZACI POTENCIÁLNÍHO

ABNER SHIMONY

Pár slov úvodem

Na díle Rogera Penrose nejvíce obdivuji duch jeho vědecké práce - kombinaci hlubokých odborných vědomostí, smělosti a odhodlání proniknout k jádru problému. Penrose je z těch, kdo se řídí velkou pobídkou Davida Hilberta: „*Wir müssen wissen, wir werden wissen*“ („Musíme vědět, budeme vědět“)."

Co se týče jeho výzkumného programu, shodují se s ním ve třech základních tezích. Předně, že duševní jevy mohou být zkoumány vědecky. Za druhé, že myšlenky kvantové mechaniky jsou důležité pro problém vztahu mysli a těla. Konečně za třetí, že kvantověmechanický problém aktualizace potenciálního, tedy jak se skutečně realizuje některá z možností, je skutečný fyzikální problém, na nějž nelze dát odpověď bez úpravy současné kvantové teorie. Jsem však skeptický k mnoha detailům způsobu, jakým Roger Penrose tyto teze rozpracovává, a doufám, že moje kritika jej bude stimulovat k jejich vylepšení.

Statut duševního v přírodě

Přibližně třetinu první až třetí kapitoly a asi polovinu své knihy *Shadows of the Mind* věnuje Penrose prokázání nealgoritmického charakteru lidských matematických schopností. Hilary Putnám píše ve své recenzi této knihy,²¹ že v jeho argumentaci nalézá určitou mezeru. Tvrdí, že Penrose zanedbává možnost existence programu pro Turingův stroj, programu, o němž nelze dokázat korektnost, a možnost, že takový program je natolik složitý, že lidská mysl jej prakticky nemůže pochopit.

Penroseova odpověď na tutu recenzi mne sice nepřesvědčila,³¹ na druhou stranu však nejsem dostatečně zběhlý v teorii důkazů, abych mohl spor kvalifikovaně rozsoudit. Zdá se mi ale, že problém se vlastně netýká jeho hlavního cíle a že Penrose je ve skutečnosti v postavení horolezce, který se pokusil vystoupit na nesprávnou horu. Jeho ústřed-

ní teze, že na duševní činnosti je něco, čeho se nedá docílit jakýmkoli umělým počítačem, totiž nezávisí na tom, zda se podaří, či nepodaří prokázat nealgoritmickou povahu matematických operací, které provádí člověk. Ke svému dlouhému gódelovskému argumentu připojuje Penrose úvahu Johna Searla o „čínském pokoji“, podle níž korektní výpočet automatu ještě ne/namená porozumění. Jádro Searlova argumentu je takové, že člověk může být vytrénován, aby se choval jako robot, takže behavioristicky sleduje příkazy akusticky předávané v čínštině, třebaže čínštině nerozumí a ví, že tomu tak je. Subjekt, který korektně provedl výpočet tak, že sledoval tyto pokyny, může porovnat normální zkušenost při matematickém výkonu prováděném s porozuměním s abnormální zkušeností, když počítá jako robot. Matematická pravda stanovená takovými postupy může být zcela triviální, nicméně rozdíl mezi mechanickým výpočtem a porozuměním je intuitivně jasný.

To, co obhajuje Searle v souvislosti s matematickým porozuměním - a Penrose s tím souhlasí -, lze vztáhnout i na jiné oblasti vědomé zkušenosti, na smyslové vjemy, pocit bolesti a příjemnosti, pocit volního chování, intencionalitu (zaměření na předměty, pojmy či výroky, jež vstupují do naší zkušenosti) atd. V rámci obecné filozofie fyzikalismu, tedy představy redukce všech jevů na jevy fyzikální, se k zahrnutí těchto jevů přijímají různé strategie.⁴¹

V teoriích dvou aspektů se tyto zkušenosti pojmají jako aspekty specifických stavů mozku. V jiných teoriích se duševní zkušenost identifikuje s třídami stavů mozku, přičemž tyto třídy jsou tak jemně rozlišené, že nelze podat jejich jednoznačnou fyzikální charakteristiku, čímž se vylučuje jednoznačná „redukce“ mentálních pojmů na pojmy fyzikální. Funkcionalistické teorie identifikují duševní zkušenost s formálním programem, který může být v principu realizován mnoha rozdílnými fyzikálními systémy, i když náhodou je realizován systémem neuronů. Běžným fyzikalistickým argumentem - zdůrazňovaným především přívrženci teorií dvou aspektů, ale užívaným i jinými příznivci fyzikalismu - je, že entita charakterizovaná určitou sadou vlastností může být identická s jinou entitou, charakterizovanou zcela jinou sadou vlastností. Tyto charakteristiky mohou znamenat, že jsou určeny různými smyslovými orgány nebo že jedna jejich sada může být smyslová a druhá mikrofyzikální. Úvaha pak pokračuje tím, že totožnost duševních stavů se stavy mozku (nebo s třídou stavů mozku či s programem) se prohlásí za příklad této obecné logiky identity.

Zdá se mi, že v této úvaze je hluboký omyl. Když se identifikuje ob-

jekt, jehož charakteristika je dána vzhledem k vjemům jednoho smyslového orgánu, s objektem charakterizovaným jiným druhem vjemů, oba vnímané objekty odpovídají různým příčinným řetězcům. Oba tyto řetězce končí na jedné straně u téhož objektu a na druhé straně v jevišti vědomí vnímajícího, ale každý z nich má rozdílné příčinné spoje s okolním prostředím a smyslovým a kognitivním aparátem vnímajícího. Pokud se identifikuje stav mozku a stav vědomí, jak se to činí ve fyzikalistických teoriích dvojího aspektu, je zřejmé, co se pokládá za cílový objekt. Je to stav mozku, protože fyzikalismus předpokládá ontologickou prvotnost fyzikálního popisu [ontologie - nauka o bytí]. Chybí zde ale druhý cílový objekt, jeviště vědomí vnímající osoby. Snad lze říci, že je zde všeprostupující dvojnáčetnost, protože společné jeviště se mlčky pokládá za místo kombinací a srovnávání fyzikálního a duševního aspektu. Má-li ovšem fyzikalismus pravdu, toto jeviště nemá žádný nezávislý statut.

S tím spojený argument proti fyzikalismu spočívá na principu, který nazývám „fenomenologickým principem“ (uvítal bych však lepší název, pokud v literatuře existuje nebo jej někdo navrhne). Tento princip říká, že ať už nějaká koherentní, tj. bezrozporná, filozofie uznává jakoukoli ontologii, musí tato ontologie brát v úvahu jevy. Důsledkem tohoto principu je, že fyzikalismus je nekoherentní. Fyzikalistova ontologie může postulovat, a většinou skutečně postuluje, ontologickou hierarchii, kde základní úroveň zpravidla představují elementární částice či pole a vyšší úrovně jsou tvořeny formami složenými z těchto elementárních entit. Tyto kompozitní formy mohou být charakterizovány různými způsoby. „Jemnozrnný popis“ - či mikroskopický popis - určuje detailně mikrostav, zatímco při „hrubozrnném popisu“, který též můžeme nazvat makroskopickým, se berou průměrné hodnoty či integrované hodnoty, které odpovídají popisu mikroskopickému. Konečně může být dána vztahová charakteristika, která závisí na příčinných vztazích mezi kompozitními systémy, které nás zajímají, a na přístrojích, pomocí nichž pozorujeme. Kam ale do této koncepce přírody zapadá, jak nám věci zprostředkovává smyslové vnímání? Nezapadají do jemnozrnného popisu, pokud se do pojmů fundamentální fyziky nepropašují mentální vlastnosti, což je proti duchu programu fyzikalismu. Nepřísluší do hrubozrnného popisu, pokud nepoužijeme něčeho jako teorie dvou aspektů, jejíž slabiny jsem ukázal v předchozím, a nelze je zahrnout ani do relačních charakteristik, pokud objekt není příčinně spojen se smyslovým subjektem. V souhrnu - smyslové jevy nejsou ve fyzikalistické ontologii obsaženy.

Tyto dva argumenty proti fyzikalismu jsou jednoduché, ale silné. Bylo by těžké jim čelit a dívat se na mysl jako na něco ontologicky odvozeného, nebýt některých přesvědčivých a obdivuhodných úvah v tomto směru. První z nich je, že pro existenci duševna odděleného od vysoce vyvinutého nervového systému nejsou žádné důkazy. Jak Penrose říká, „pokud je mysl něco zcela vnějšího k tělu, je těžké pochopit, proč se tolik jejích atributů dá tak úzce spojit s vlastnostmi fyzického mozku“ (*Shadows of the Mind*, str. 350). Druhou skutečností je, že máme velké množství důkazů svědčících o tom, že nervové struktury jsou výsledkem vývoje z primitivních organismů, které takové struktury postrádají, a pokud je správný program prebiotické evoluce, tedy vývoje před vznikem života, tato genealogie může být vysledována zpět k neorganickým molekulám a atomům. Třetí věc, kterou je třeba vzít v úvahu, je, že těmto anorganickým konstituentům nepřipisuje fundamentální fyzika žádné mentální vlastnosti.

„Filozofie organismu“ Alfreda Northa Whiteheada⁵¹ (jejíž předchůdkyní je Leibnizova monadologie) obsahuje mentalistickou ontologii, která bere uvedené tři skutečnosti v úvahu, ale s jistými jemnými výhradami. [Podle Gottfrieda Wilhelma Leibnize (1647-1716) je svět složen z „duchovních“ monád. Monády nejsou příčinně propojeny, panuje však mezi nimi předem určená harmonie.] Jeho „konečnými entitami“ jsou „skutečné události“, které nejsou trvajícimi entitami, nýbrž prostoročasnými kvanty, a každá z nich je vybavena, obvykle na velmi nízké úrovni, vlastními mentálními charakteristikami, takovými, jako je „zkušenost“, „subjektivní vědomí“, „žádostivost“. Smysl těchto pojmů je odvozen z mentality vysoké úrovně, kterou známe na základě introspekce, zkoumání našeho vlastního nitra, je však dalekosáhle extrapolován ze svého obvyklého základu. Fyzikální elementární částice, které Whitehead pojímá jako časový řetězec událostí, mohou být charakterizovány pojmy obvyklé fyziky; dojde při tom jen k malé ztrátě, protože jejich zkušenost je nezřetelná, monotónní a opakující se. Přesto k určité ztrátě dochází: „Pojem fyzikální energie, která je základním konceptem fyziky, musí být chápán jako abstrakce vycházející z komplexní energie, emoční a cílevědomé, inherentní v subjektivní formě finální syntézy, ve které se každá událost kompletuje.“⁶¹ Pouze vyvine-li se vysoce organizovaná společnost událostí, dovolí primitivní mentalitě získat intenzitu, koherenci a plné vědomí: „Fungování neorganické hmoty zůstává intaktní uprostřed fungování živé hmoty. Zdá se, že v živých tělech se dosáhlo koordinace, která činí zřetelnými určité funkce inherentní v konečných událostech.“⁷¹

Whiteheadovo jméno není uvedeno v rejstříku knihy *Shadows of the Mind*, najdeme je pouze v Penroseově knize *The Emperor's New Mind*,[^] když se odkazuje na Russellovy a Whiteheadovy *Principia Mathematica*. Nevím, proč ho Penrose nezmiňuje, mohu však uvést některé z vlastních námitek proti Whiteheadově filozofii, s nimiž by Penrose mohl souhlasit. Whitehead se snaží svou mentalistickou ontologií napravit „bifurkaci (rozvětvení) přírody“ do vědomí postrádajícího světa fyziky na jedné straně a do mysli s vysokým stupněm vědomí na straně druhé. Nízká úroveň protomentality, jakéhosi zárodku duševna, má překlenout tuto obrovskou mezeru. Není však srovnatelná bifurkace mezi protomentality elementárních částic a vysokou úrovní zkušenosti lidské bytosti? A existuje vůbec nějaký přímý důkaz této protomentality nízké úrovně? Je nějaký jiný důvod postulovat tuto představu, než aby se dosáhlo kontinuity mezi raným vesmírem a dnešním vesmírem, vesmírem obydleným živými organismy? A pokud opravdu žádný jiný důvod není, má slovo „protomentality“ jasný význam? Nestává se celá filozofie organismu jen sémantickým trikem, kdy se vezme problém a přejmenuje se na řešení? A dále, není představa světa tvořeného událostmi jako konečnými entitami vesmíru jakýmsi druhem atomismu, sice bohatšího, než je atomismus Demokritův či Gassendiho, přece však jen neslučitelný s holistickým [*holos* (řeč.) znamená „celek“] charakterem mysli, který odhaluje naše zkušenost vysoké úrovně?

V následující části dávám návrh, jak odpovědět alespoň do určité míry na tyto námítky v rámci jakéhosi modernizovaného whiteheadismu používajícího pojmy z kvantové mechaniky.⁹

Kvantová teorie a problém vztahu mysli a těla

Nejradikálnějším rozdílem mezi uvažováním v rámci klasické a kvantové teorie je skutečnost, že k popisu úplného stavu systému - tedy takového stavu, který maximálně určuje systém - nestačí katalog skutečných vlastností systému, je třeba zahrnout i potenciality, možnosti. Myšlenka potenciality je už vlastně skryta v principu superpozice. Je-li specifikována vlastnost A kvantového systému a jeho stavový vektor (pro jednoduchost předpokládejme, že má jednotkovou normu), pak tento vektor může být vyjádřen ve tvaru $\sum c_i u_i$, kde každý z členů u_i představuje stavový vektor s jednotkovou normou, reprezentující stav, ve kterém má A určitou hodnotu a_i . Koefficienty c_i jsou komplexní čísla, přičemž součet jejich absolutních hodnot $\sum |c_i|^2 = 1$. (Symbol \sum značí součet.) Stavový vektor je tedy superpozicí $\sum c_i u_i$, s vhodnými vahami,

a pokud suma obsahuje více než jeden člen, je hodnota veličiny A ve stavu reprezentovaném vektorem neurčitá. Je-li kvantový stav interpretován realisticky jako reprezentace systému, jaký skutečně je, a je-li popis kvantového systému úplný, to znamená že nemůže být upřesněn dodáním nějakých „skrytých proměnných“, pak má tato neurčitost objektivní charakter. Navíc pokud systém interaguje se svým okolím tak, že A získá určitou hodnotu, například při měření, pak výstup je objektivně náhodný a pravděpodobnosti různých možných výstupů $|c|^2$ jsou objektivní pravděpodobnosti. Tyto vlastnosti objektivní neurčitosti, objektivní náhodnosti a objektivních pravděpodobností mohou být shrnuty do tvrzení, že stavový vektor v sobě skrývá síť potencialit.

Druhým závažným rysem kvantové teorie je provázanost. Jsou-li M , stavové vektory s jednotkovou normou, které popisují stavy systému I s nějakou vlastností A , reprezentovanou veličinou, která nabývá v těchto stavech různých hodnot, a jsou-li v , stavové vektory systému II s nějakou vlastností B , již odpovídají různé hodnoty v těchto stavech, potom existuje stavový vektor $X = X/C, -H/V$ (součet $|c|^2$ je opět roven jedné) složeného systému (I + II), který má zvláštní vlastnosti. Ani I, ani II nejsou každý zvlášť v čistém kvantovém stavu. Speciálně, I není superpozicí pouze vektorů w , a II není superpozicí pouze v ; taková superpozice by nepopisovala, jak jsou vektory w a v navzájem korelovány. Stav popsaný X je tedy holistickým (na stavy systému I a II nerozložitelným) stavem, říkáme mu provázaný. Kvantová teorie má tedy pravidlo skládání, které nemá analogii v klasické fyzice. Uskuteční-li se proces, při kterém se aktualizuje například a , že má hodnotu a , aktualizuje se automaticky i B a bude mít hodnotu b . Provázanost tedy zaručuje, že potenciality I a II se aktualizují v závěsu za sebou.

Modernizovaný whiteheadismus, o kterém jsem poněkud tajuplně hovořil na konci předchozí kapitoly, vstřebává představu potenciality a provázanosti podstatným způsobem. Potentialita je nástroj, který může přemostit pobuřující bifurkaci mezi nezřetelnou protomentální a vědomím vysoké úrovně. I komplexní organismus s vysoce vyvinutým mozkem může vědomím ztratit. Přejít mezi vědomím a nevědomím nemusí být interpretován jako změna ontologického statutu, nýbrž jako změna stavu a vlastnosti mohou přecházet od určitosti k neurčitosti a obráceně. V případě tak jednoduchého systému, jako je elektron, si nedovedeme představit nic většího než přechod z naprosté neurčitosti k minimálnímu záblesku „protomentality“. V tomto okamžiku však přistupuje druhý koncept, provázanost. Systém mnoha částic v provázaném stavu nabízí mnohem bohatší prostor pozorovatelných vlastnos-

ti než jednotlivá částice a spektra kolektivních pozorovatelných veličin jsou zpravidla mnohem rozmanitější než spektra jednotlivých částic, které systém tvoří. Je dobře myslitelné, že provázanost elementárních systémů, z nichž každý má velice úzký obor mentálních atributů, může vytvářet mnohem širší obor, obor odpovídající stavům od úplné nepřítomnosti vědomí až po vědomí na vysoké úrovni.

Jak se tento moderní whiteheadismus srovnává s Penroseovou aplikací myšlenek kvantové mechaniky na problém mysl - tělo? V sedmé kapitole *Shadows of the Mind* a v druhé a třetí kapitole této knížky používá Penrose podstatným způsobem právě pojmy potenciality a provázanosti. Potentialita vystupuje v jeho hypotéze, že v systému neuronů probíhá kvantový výpočet, přičemž v každé větvi superpozice probíhá výpočet nezávisle na těch, které probíhají v ostatních větvích. Provázanost (o které obvykle hovoří jako o „koherenci“) vystupuje v několika klíčových bodech jeho návrhu. Mikrotubuly v buněčných stěnách mají mít organizační úlohu ve funkci neuronů, a proto se postuluje provázaný stav mikrotubulu. Dále předpokládá, že mikrotubuly jednotlivých neuronů jsou v provázaných stavech, a konečně předpokládá provázaný stav velkého počtu neuronů. V *Shadows of the Mind* uvádí, že „jednota jednotlivé myslí může v tomto popisu vzniknout jenom tak, že existuje kvantová koherence rozprostírající se na značné části mozku“, postuluje tedy provázanost na velkých měřítkách. Ve prospěch přijatelnosti této hypotézy argumentuje Penrose analogií s jevy supratekutosti a supravodivosti, obzvláště supravodivosti při vysokých teplotách, a také Fröhlichovými výpočty, podle kterých v biologických systémech o tělesné teplotě může provázanost na velkých měřítkách existovat.

V Penroseově teorii vystupuje ještě jedna myšlenka navíc; není vzata ze standardní kvantové mechaniky, nýbrž z kvantové teorie budoucnosti, jejíž vznik předpovídá. Je to myšlenka objektivní redukce superpozice, OŘ, která provede výběr skutečné hodnoty pozorovatelné A z široké škály hodnot možných. Náзор, že takováto aktualizace je nezbytná pro teorii myslí, podporuje nepochybná skutečnost zcela určitých pocitů a myšlenek, které známe ze zkušenosti s naším vědomím. Je potřebná i v tom případě, že existuje předpokládaný „kvantový výpočet“, protože na konci paralelně probíhajících procesů v jednotlivých větvích se čte zcela určitý „výsledek“. A právě tato OŘ procedura vnáší podle Penrose nevípočetní, nealgoritmický aspekt do duševní aktivity.

Co v tomto přístupu z hlediska modernizovaného whiteheadismu chybí, je skutečnost, že Penrose ve své teorii myslí úmyslně či neúmyslně

ně nechápe duševno jako ontologicky fundamentální jsoouco ve vesmíru.

Penroseův výklad podezřele připomíná kvantovou verzi fyzikalismu. V té verzi fyzikalismu, o které jsem hovořil v první kapitole, jsou duševní vlastnosti chápány jako strukturální vlastnosti stavu mozku či jako program, podle něhož probíhají výpočty v souboru neuronů. Penrose přidává k fyzikálnímu popisu duševna další ingredience, jmenovitě kvantovou koherenci na velkých měřítkách a předpokládanou modifikaci kvantové dynamiky, která má zajistit redukci superpozic. Ale toto zjemnění argumentace neoslabuje mnou už v první kapitole uvedené jednoduché, ale pádné námitky proti fyzikalismu. Jevy našeho duševního života nemají místo ve fyzikalistické ontologii a fyzikalismus vyba-vený kvantovými pravidly je stále fyzikalismus.

Whiteheadova filozofie organismu je naopak radikálně nefyzikalistická, neboť připisuje duševní vlastnosti i nejprimitivnějším entitám ve vesmíru, čímž hypoteticky obohacuje jejich fyzikální popis. Modernizovaná verze whiteheadismu, již se pokouším navrhnout, nechce užívat kvantovou teorii jako náhražku fundamentálního ontologického stavu duševna, nýbrž jako intelektuální nástroj pro zvládnutí obrovské škály projevů duševna ve světě, od úplného potlačení vnitřního duševna až po jeho zvýraznění na vysoké úrovni.

Kontrast, o který jde, lze formulovat ještě jinak. Kvantová teorie je aparát, který pracuje s pojmy jako stav, pozorovatelná, superpozice, pravděpodobnost přechodu a provázanost. Fyzikové aplikovali tento aparát velmi úspěšně na dvě značně rozdílné ontologie - na ontologii částic a ontologii polí. V prvním případě, ve standardní nerelativistické kvantové mechanice, pracují s představou elektronů, atomů, molekul a krystalů. Ontologie polí vystupuje v kvantové elektrodynamice, kvantové chromodynamice a obecné kvantové teorii polí. Lze si však představit kvantovou teorii aplikovanou na zcela jiné ontologie, jako je například ontologie myslí, dualistická ontologie či ontologie jsooucen obdařených protomentality. Obvyklá fyzikalistická aplikace kvantové teorie byla mimořádně úspěšná při výkladu pozorovatelných jevů složených systémů, včetně makroskopických, za pomoci mikroskopických veličin. Mně se zdá, že Penrose se pokouší o něco podobného, když se snaží vyložit duševní jevy ve fyzikalistické ontologii prostřednictvím delikátního užívání kvantových pojmů.

Modernizovaný whiteheadismus naopak aplikuje aparát kvantové teorie na ontologii, která je *ab initio* [od začátku] mentalistická. Je třeba přiznat, že modernizovaný whiteheadismus je v počátcích, působí

impresionisticky a nedává žádné teoretické předpovědi schopné experimentálního ověření, které by mu dodaly důvěryhodnosti jako „slibné“ teorii. Jeho velkou předností je však rozpoznání neodvoditelnosti duševna, která chybí ve všech variantách fyzikalismu. Možná jsem Penrose špatně četl a špatně poslouchal a ve skutečnosti je větším kryptowhitheadovcem, než jsem byl schopen rozpoznat. Je-li tomu tak, nebo ne, by vyjasnilo jeho vyjádření k této otázce.

Pokud má moderní forma Whiteheada nebo jakékoli kvantové teorie mysli dosáhnout vědecké zralosti a uznání od vědecké obce, je třeba věnovat velkou pozornost psychologickým jevům. Určité jevy z této oblasti mají „kvantovou příchutí“. Například přechod od periferního k ohniskovému vidění, přechod od vědomí do bezvědomí, pronikání mysli tělem, intencionalita, anomálie v časovém zařazování duševních událostí či sjednocování a mnohoznačnosti ve freudovské symbolice. Vyšetřování těchto jevů s „kvantovou příchutí“ se zabývá několik důležitých knih o vztahu mezi kvantovou teorií a myslí, jmenovitě kniha Lockwoodova¹⁰⁾ a Stappova¹¹⁾. Penrose sám některé z těchto jevů, například Kornhuberovy a Libetovy pokusy o časovém vnímání aktivního a pasivního vědomí, popisuje.

Vážná aplikace kvantové teorie na myšlení vyžaduje také důkladný rozbor matematické struktury prostoru stavů a množiny pozorovatelných. To aparát kvantové teorie automaticky neposkytuje. V případě nerelativistické kvantové mechaniky a kvantové teorie pole jsou tyto struktury určeny rozmanitými způsoby: určením reprezentací prostoročasových grup, heuristickým způsobem vycházejícím z klasické mechaniky a klasické teorie pole a samozřejmě experimentem. Jeden z velkých Schrödingerových článků o vlnové mechanice z roku 1926 uvádí plodnou analogii: geometrická optika se má k vlnové optice jako klasická částicová mechanika k hypotetické mechanice vlnové. Možná může být užitečné uvést jinou analogii: klasická mechanika se má ke kvantové mechanice jako klasická psychologie k hypotetické kvantové psychologii. Velkou obtíží při snaze využít této analogie ovšem je, že terén „klasické psychologie“ je mnohem hůře probádaný a svou podstatou méně určitý, než tomu bylo s klasickou mechanikou.

A ještě jedna poznámka. Možná lze kvantový aparát aplikovat v psychologii, ale ne s tak určitou geometrickou strukturou jako v kvantové fyzice. I v případě, že existuje něco jako prostor duševních stavů, můžeme předpokládat, že má strukturu projektivního Hilbertova prostoru? Jmenovitě, bude definován skalární součin mezi dvěma duševními stavy, který by určoval pravděpodobnost přechodu jednoho v druhý?

Nemůže to být tak, že v přírodě existují slabší struktury, byť jde o struktury kvantového typu? V jistém zajímavém článku ukazuje Bogdan Mielnik,¹²¹ že minimálním kvantovým konceptem je vyjádřitelnost „smíšeného“ stavu více způsoby jako konvexní kombinace čistých stavů, zatímco v klasické statistické mechanice je taková kombinace určena jednoznačně. Další mou spekulací je, že příkladem užití Mielnikovy myšlenky může být fenomenologie barev - světlo, jehož barvu vnímáme jako bílou, se dá vytvořit mnoha různými způsoby míšením barevných světél.

Problém aktualizace potenciálního

V druhé kapitole zařadil Penrose problém aktualizace potenciálního (též nazývaný problém redukce vlnového svazku a problém měření) mezi tajemná X , tedy paradoxy. Je to problém, který podle jeho názoru nemůže být vyřešen bez radikální změny teorie a jehož se nezbavíme tím, že si na něj zvykneme. Já s ním plně souhlasím. Pokud kvantová teorie popisuje objektivně fyzikální systém, existují pozorovatelné veličiny tohoto systému, které jsou v určitém stavu objektivně neurčité, stanou se však určitými, jakmile se provede měření. Jenže lineární charakter kvantové teorie nedovoluje, aby se aktualizace uskutečnila prostřednictvím měření. Lineární charakter kvantové teorie má za následek, že po provedení měření se složený systém tvořený objektem a měřicím přístrojem octne ve stavu, jenž je superpozicí členů, kdy „ručička“ přístroje ukazuje různé hodnoty. Sdílím Penroseovy pochybnosti, že toto tajemství může být odstraněno jen určitou interpretací, například na základě mnohosvětového obrazu, dekoherence, skrytých proměnných apod. Na nějakém stupni se zhroutí unitární evoluce kvantového stavu a nastane aktualizace. Ale na kterém stupni? Zde je řada možností.

Tento stupeň může být fyzikální a může se k němu dospět v okamžiku, kdy je makroskopický přístroj provázán s mikroskopickým objektem nebo když je s materiálním systémem provázána prostoročasová metrika. Nebo tento stupeň může být mentální a uskutečnit se v psýše pozorovatele. Penroseovou hypotézou je, že jde o fyzikální proces a že se uskuteční v důsledku nestability superpozice dvou či více stavů prostoročasové metriky. Čím větší je rozdíl energií mezi superponovanými stavy, tím kratší je doba života superpozice. Nicméně spojení této hypotézy s Penroseovým zámyslem vysvětlit takto skutečné zkušenosti našeho vědomí klade určitá nepříjemná omezení. Penrose potřebuje superpozici stavů mozku, jak bylo řečeno dříve, aby vysvětlil globálnost

mysli, přitom je však třeba vyloučit takové strašidelnosti, jako je vnímání superpozice červeného a zeleného záblesku, nebo takové události musí být tak krátkodobé, aby nestačily vědomí ovlivnit. Penrose tvrdí - je to ale jen další předpoklad -, že rozdíl energií stavů odpovídajících takovýmto rozdílným počítkům je dostatečně velký, aby zaručil velice krátkou dobu života takovýchto superpozic. Na řadě míst v *Shadows of the Mind* však přiznává, že balancuje na napjatém laně, protože na jedné straně potřebuje udržet koherenci, aby vysvětlil globálnost mysli, na druhé straně potřebuje narušení koherence pro určitost událostí vědomí. Jak toto fungování mozku a mysli podle Penroseova schématu může být úspěšné, je však pro mne záhadou.

Možnosti různých modifikací kvantové dynamiky pro účely objektivního pojmání aktualizace potencialit nebyly ještě plně prozkoumány ani Penrosem, ani jinými badateli. Zmíním se o dvou cestách, jež mi připadají nadějně. Penrose se zmiňuje o modelu spontánní redukce Ghirardiho-Riminiho-Webera a dalších autorů a odmítá ho. Třeba však existují varianty této dynamiky, které by byly proti jeho námitkám odolné. Druhou možností, o které se nezmiňuje, je, že v přírodě platí „superselekční pravidlo“, které zabraňuje tomu, aby se vyskytly superpozice určitých izomerů a konformací makromolekul. Pro takovou hypotézu mluví skutečnost, že makromolekuly v buňkách standardně fungují jako vypínače, zapínají nebo vypínají některé procesy podle molekulární konformace. Pokud by došlo k superpozici dvou molekulárních konformací, měli bychom buněčnou analogii Schrödingerovy kočky a příslušný proces by byl v rozpolceném stavu mezi uskutečněním a neuskutečněním. Pokud by takové superselekční pravidlo v přírodě opravdu existovalo, tato potíž by byla odstraněna, ale důvod jeho existence by byl záhadný. Proč by příroda nepřipouštěla superpozice konformačních stavů komplexních molekul, když je dovoluje pro jednoduché molekuly, a kde potom leží dělicí čára? Takové superselekční pravidlo by však vysvětlovalo aktualizace všech potencialit, pro které máme empirické důkazy, a mělo by tu přednost, že by bylo testovatelné molekulární spektroskopii.^{13'}

Konečně je třeba dodat, že z whiteheadovského pohledu není hypotéza, že k aktualizaci potencialit dochází až v psýše pozorovatele, zdaleka tak nesmyslná, antropocentrická, mystická a nevědecká, za jakou je běžně pokládána. Podle Whiteheada něco jako duševno prostupuje celou přírodou, ale duševno vysoké úrovně je vázáno na vývoj speciálních hostitelských komplexů událostí. Schopnost systému aktualizovat potenciality, díky nimž je modifikována lineární dynamika kvantové

mechaniky, může prostupovat přírodu, ale je nezanedbatelná pouze v systémech s vědomím vysoké úrovně. Tuto toleranci bych však omezil a schopnost superpozice kvantových stavů bych zařadil do oblasti psýchy teprve tehdy, až budou rozpracovány důsledky tohoto předpokladu pro širokou škálu psychologických jevů. Teprve pak bude možné takovou hypotézu cílevědomě experimentálně zkoumat.

Kapitola pátá

PROČ FYZIKA?

NANCYCARTWRIGHTOVÁ

Penroseovou knihou *Shadows of the Mind* jsme se zabývali na dlouhodobém společném semináři London School of Economics and Political Science a londýnské King's College. Začnu stejnou otázkou, kterou mi položil jeden z účastníků semináře: „Z jakých důvodů se Roger Penrose domnívá, že odpovědi na otázky týkající se mysli a vědomí se naleznou ve fyzice, a ne v biologii?“ Já sama sledávám v Penroseových pracích celkem tři důvody různého druhu, kterými svůj názor podkládá:

Za prvé: Tato cesta představuje velmi slibný program výzkumu. To je ten nejpádňější argument, který lze ve prospěch projektu toho typu, jako je Penroseův, uvést. Protože jsem pozitivistka a jako taková odmítám od samého počátku metafyzický a transcendentální výklad, jsem připravena hájit názor, že je to jediný druh argumentu, jemuž má být přikládána skutečná váha. Nakolik jej lze ovšem opravdu užít ve prospěch projektu, závisí na tom, zda je to nápad skutečně slibný a jak detailně je propracovaný. Jedno je jasné. Penroseova myšlenka - postulovat makroskopickou kvantovou koherenci pro mikrotubuly cykloskeletu a pak hledat vysvětlení nevýpočetních rysů vědomí v novém druhu kvantově-klasické interakce - detailním programem není. Jeho slibnost nespočívá v tom, že by šlo o přirozený další krok úspěšně postupujícího výzkumného programu. Shledává-li jej někdo slibným, je to spíše pro jeho myšlenkovou smělost a přesvědčení, že nějaká takováto nová interakce je stejně nezbytná, chceme-li se plně vyrovnat s kvantovou mechanikou. Navíc si to vyžaduje apriorní silné přesvědčení, že pokud se podaří najít vědecké vysvětlení vědomí, pak to rozhodně bude *fyzikální* vysvětlení. Domnívám se, že právě ta poslední argumentace hraje rozhodující roli v úvahách těch, kdo pokládají Penroseův program za slibný. Samotná skutečnost, že program vypadá slibně, však ještě není dostatečným důvodem pro tvrzení, že to bude fyzika, a ne jiná přírodní věda, která sehraje při vysvětlení vědomí rozhodující úlohu.

Za druhé: Dalším důvodem pro přesvědčení, že konečné vysvětlení bude záležitostí fyziky, je nepochybně skutečnost, že fyzika - především elektromagnetismus - přispívá k pochopení procesů v mozku. Předávání signálů dnes standardně popisuje pomocí pojmů z teorie elektrických obvodů. Část Penroseovy myšlenky spočívá na poměrně nedávném objevu z oblasti elektromagnetismu: různé stavy elektrické polarizace v dimeru tubulinu jsou pravděpodobně zodpovědné za rozdíly v geometrickém uspořádání, které způsobují, že dimery jsou vzhledem k mikrotubulu skloněny pod různými úhly. Tento argument však neobstojí. Skutečnost, že fyzika podává část vysvětlení, ještě neznamená, že poskytuje vysvětlení celé. Jako příklad jiné přírodní vědy, která zde hraje svou roli, se často uvádí chemie. Nikdo samozřejmě nepochybuje o tom, že v mozkových funkcích se promítá řada chemických pochodů. Chemie - a jmenovitě její části relevantní pro náš problém - se ale dnes často pokládá za součást fyziky. Tak o ní mluví i Penrose: „Chemické síly, které zprostředkují vzájemné působení atomů, jsou kvantověmechanické povahy a jsou to především chemické procesy, které určují chování *neurotransmitterů*, látek, které přenášejí signály od jednoho neuronu k druhému přes úzké mezery zvané *synaptické štěrbin*y. Podobně potenciály, které fyzikálně ovládají nervový přenos signálů, jsou kvantověmechanické povahy" (*Shadows of the Mind*).

Chemie tedy přichází do hry při obraně fyziky proti mé námitce, že mezi závěrem „Fyzika přispívá k vysvětlení“ a závěrem „Fyzika je celé vysvětlení“ je veliká mezera. Podobný skok v argumentaci se nám však nyní objevuje o jednu úroveň níže. Ve skutečnosti neumíme plně redukovat chemii na fyziku, ať už kvantovou, nebo klasickou.¹ Kvantová mechanika je pro vysvětlení chemických procesů důležitá, ale kvantové koncepty se vždy užívají spolu se *sui generis* [svého druhu] - tj. neredukovanými - pojmy z jiných oblastí. Samy o sobě jevy nevysvětlují.

Za třetí: Třetí důvod pro přesvědčení, že fyzika vysvětlí myšlenkové pochody, je metafyzický. Snadno nahlédneme sled Penroseových úvah. Funkci mozku nechceme pokládat za něco záhadného. To znamená, že ji chceme vysvětlit pomocí vědeckých pojmů, což opět znamená, že to musí být *fyzikální* pojmy. Známý statistik James Durbin položil na mém semináři otázku: „Proč by to nemohla být biologie?“ To je podle mého mínění příznačné. Durbin je statistik, a proto žije v pestrobarevném světě. Zkoumá strukturu údajů, které pocházejí z nejrůznějších oblastí, jak vědeckých, tak praktických. Zato Penroseovým světem je

jednotný systém a základem tohoto sjednocení je fyzika. Důvodem tohoto fyzikalismu je můj přesvědčení, že jiná metafyzika není uspokojivá, že bez takového jednotného systému bychom se ocitli v zajetí určitého nepřijatelného - Penroseovými slovy tajemného - dualismu. Právě tohoto problému bych se ráda dotkla,²¹ protože si myslím, že toto přesvědčení o neexistenci rozumné alternativy sdílí mnoho fyziků. Je to pocit, že pokud někdo bere fyziku vážně, musí věřit v její hegemonii.

Proč? Svět kolem nás má zjevně velice mnoho rozmanitých rysů. Některé studuje jedna vědecká disciplína, druhé zase jiná, některé jsou na pomezí různých věd a většinou z nich se věda nezabývá vůbec. Co vede k přesvědčení, že pod zdánlivě rozdílným zevnějškem mají všechny jeden společný základ, že jsou vlastně stejné? Patrně dvě věci: jednak nadměrná důvěra v systémovost jejich vzájemného působení a jednak nadměrné oceňování toho, co fyzika dokázala.

Poznamenávám, že taková omezená metafyzická představa, podle které je možný jen jakýsi druh fyzikalizujícího monismu (představy existence jediného základního principu, z něhož se vše ostatní odvozuje), je rozšířená i mezi těmi, kdo se snaží odolávat pokušení redukovat všechny přírodovědné disciplíny na fyziku. Vezměme filozofii biologie, v níž dlouhou dobu redukcionismus nebyl v módě a kde nyní opět začíná být brán vážně jakýsi „emergenticismus“, tedy filozofie „vynořování“, spočívající v přesvědčení, že na každé vyšší úrovni komplexnosti a organizace se vynořují nové vlastnosti a zákony. Většina filozofů se nevymaňuje z jistého monismu, protože trvají na tom, že zákony vyšší úrovně vyplývají ze zákonů úrovně nižší. Zhruba to znamená to, že pokud jsou dvě situace totožné po stránce fyzikálních vlastností, jsou totožné i co se týče vlastností biologických.

To neznamená, říkají přívrženci tohoto přístupu, že biologické zákony jsou redukovány na fyzikální zákony, protože biologické vlastnosti nemusí být možné definovat ve fyzikálních pojmech. Znamená to však, že biologické vlastnosti nejsou samostatné a nezávislé vlastnosti, protože jsou určovány vlastnostmi fyzikálními. Jakmile jsou fyzikální vlastnosti dány, biologické musí být už takové, jaké jsou. Biologické vlastnosti nemají plně nezávislý statut, jsou to druhořadí občané.

Brát však naopak vážně, že biologické vlastnosti jsou jiné vlastnosti než fyzikální, nijak neprotivořečí experimentální evidenci. Za zaručené pokládám to, co ve vědě opravdu pozorujeme: fyzika někdy pomáhá vysvětlit, k čemu v biologických systémech dochází. Platí zde ale totéž, co jsem řekla o chemii: zřídka k tomu dochází bez použití i neredukovaného biologického popisu *sui generis*. Ve zkratce vyjádřeno, po-

kud v základech biologie zcela vyloučíme, to, co postavíme, nebude biologie.*¹

To, co ve skutečnosti pozorujeme, se dá popsat jako interakce me/i fyzikálními a biologickými charakteristikami, které se navzájem ovlivňují. Sledujeme zde i to, že identifikace fyzikálního či biologického popisu závisí na kontextu, a můžeme hovořit i o kauzální spolupráci. Tím míním, že efekty společného působení určitých fyzikálních a biologických vlastností nelze popsat jako výsledek působení jedněch či druhých. Za této situace je přechod k tvrzení, že ve skutečnosti „všechno je fyzika“, tak obrovským skokem v uvažování, že jej nevidím jako oprávněný. To, co pozorujeme, *může* být konzistentní s představou, že všechno je fyzika, ale jistě to není jediný možný závěr a pozorovaná fakta se zdají ukazovat spíše opačným směrem.³

Jedním z důvodů pro víru, že všechno se dá redukovat na fyziku, je

*1) Na toto téma zazněla během diskuse následující poznámka Abnera Shimonyho: „Nancy Cartwrightová prosazuje názor, že problém mysli má být zkoumán v kontextu biologie, a ne fyziky. Tleskám pozitivní části jejího vystoupení. Plně souhlasím, že o povaze mysli se musíme dozvědět co nejvíce z evoluční biologie, anatomie, neurofyzologie atd. Nesouhlasím však s tvrzením, že zkoumání vztahu mysli k fyzice je neplodné. Vztahy mezi různými vědeckými disciplínami je třeba zkoumat do takové hloubky, jak je to jen možné. Nevíme *a priori*, k čemu takové zkoumání povede, a v různých oblastech vědy může mít různé výsledky. Například Bellova věta a pokusy, které ji inspirovaly, ukazují, že korelace mezi provázanými systémy nemůže být popsána teorií, která připisuje určité stavy individuálním systémům. To lze chápat jako velký triumf holismu. Onsagerův důkaz týkající se fázového přechodu dvourozměrného Isingova modelu magnetismu ukazuje, že v tomto systému se může ustavit uspořádanost na velkých měřítkách, i když navzájem interagují jen nejbližší sousedé. To lze naopak pokládat za triumf analytického přístupu, který podporuje myšlenku redukovatelnosti makrofyziky na mikrofyziku. [Isingův model předpokládá, že v uzlových bodech nekonečné mříže jsou elementární magnety, jež mohou být orientovány pouze dvojím způsobem, buď nahoru, nebo dolů. Pokud v jedné oblasti mříže budou všechny například nahoru a ve zbytku budou magnety orientované náhodně, vzájemnou interakcí nejbližších sousedů se souhlasná orientace bude rozšiřovat na celou mříž. Makroskopicky to odpovídá „fázovému přechodu“, mříž s náhodně orientovanými a mříž se souhlasně orientovanými magnety má rozdílné makroskopické magnetické vlastnosti.] Obojí typ objevu - ať už odpovídá floristickému či analytickému pohledu - odhaluje něco důležitého o světě. Zkoumání vztahů mezi disciplínami nezbavuje platnosti fenomenologické zákony platné v jednotlivých vědních odvětvích. Může ovšem mít heuristickou, objevitelskou, cenu pro zpřesnění fenomenologických zákonů a vést k jejich hlubšímu chápání. Když Louis Pasteur navrhl, že za stáčení polarizační roviny světla procházejícího roztokem je zodpovědná chiralita molekul, tj. jejich levo- či pravotočivost, založil stereochemii.“

podle mého mínění představuje uzavřenost fyziky. Pojmy a zákony dobré fyzikální teorie mají tvořit do sebe uzavřený systém. To znamená, že taková teorie obsahuje vše potřebné, abychom mohli dělat předpovědi v rámci jejího pojmového rámce. Myslím, že je to nesprávný - anebo přinejmenším přehnaně optimistický - pohled na úspěchy fyziky. Zhruba ve stejné době, kdy ve filozofii převládla myšlenka vynořování se, převládla také myšlenka speciálních věd. V podstatě všechny přírodovědné disciplíny kromě fyziky jsou pokládány za speciální vědy. To znamená, že jejich zákony platí přinejlepším *ceteris paribus* (za jinak stejných podmínek). Platí pouze tehdy, nevstupuje-li rušivý vliv něčeho ležícího mimo rámec dané teorie.

Co je ale zdrojem důvěry, že fyzikální zákony jsou něčím více než *ceteris paribus* zákony? Nic takového nevyplývá z laboratorních úspěchů současné fyziky, jakkoli oslňující jsou. Nevyplývá to z Newtonova úspěšného výkladu planetární soustavy, který tak hluboce zapůsobil na Immanuela Kanta. A nevyplývá to ani z celého obrovského technického exportu fyziky, k jehož vzorkům patří taková zařízení, jako jsou elektronky, tranzistory nebo SQUID magnetometry. Všechna tato zařízení jsou sestrojena právě tak, že žádná interference s vnějšími rušivými vlivy nemůže nastat. Netestují, zda zákony, na nichž jsou založena, stále platí, pokud hrají roli i faktory ležící mimo oblast, pro niž byla teorie vytvořena. Panuje samozřejmě obecné přesvědčení, že v případě fyziky může být narušení způsobeno zase jen činiteli, které lze popsat v jazyce fyziky a které se podrobují jejím zákonům. Jenže právě toto je bod, o který nám jde.

Na závěr poznámka o realismu. Snažím se zde razit jakýsi pluralistický názor, podle kterého jsou všechny vědní disciplíny v základě rovnocenné a navzájem se ovlivňují různými typy interakcí mezi činiteli, kteří vystupují v jednotlivých oblastech. Takový pohled je často provázen přesvědčením, že celá věda je jen lidská konstrukce a ve skutečnosti neobráží přírodu.

To ale není nezbytný závěr. Immanuel Kant například argumentoval právě opačně. Právě proto, že jsme to my, kdo vytváříme vědu, není jednotný obraz světa jenom možný, nýbrž je i nezbytný.

Dnes však ale bývá pluralismus často spojován se sociálním konstruktivismem. Proto je důležité zdůraznit, že z pluralismu nevyplývá antirealismus. Tvrzení, že fyzikální zákony jsou zákony *ceteris paribus*, neznamená, že by nebyly pravdivé. Znamená to pouze, že nejsou všemu nadřazené. Pluralismus není tedy ve sporu s realismem, ale s imperialismem. Nechci zde rozvíjet diskusi o vědeckém realismu. Ráda bych

pouze, aby Penrose vysvětlil důvody svého metafyzického přesvědčení, že to bude fyzika, která vypracuje konečné dílo. Toto totiž musí předcházet celou diskusi o tom, zda to bude taková či onaká fyzika. Otázka nestojí tak, zda jsou fyzikální zákony pravdivé či zda určitým způsobem ovlivňují myšlenkové pochody, nýbrž tak, zda je to ta jediná základní pravda a zda fyzika musí nést hlavní zátěž vysvětlení, jak tyto pochody probíhají.

NÁMITKY BEZOSTYSNEHO REDUKCIONISTY

STEPHEN HAWKING

Hned na samém začátku musím přiznat, že jsem přesvědčený redukcionista a nestydím se za to. Věřím, že biologické zákony lze redukovat na zákony chemické. Už jsme viděli, co přinesl objev struktury DNA. A dále věřím, že na fyzikální zákony mohou být redukovány i zákony chemické.

Spolu s Rogerem Penrosem jsem pracoval na problémech struktury prostoru a času ve velkých měřítkách, do nichž spadaly i problémy singularit a černých děr. Jsme v plné shodě v otázkách, jež se týkají klasické obecné relativity, rozdíl v názorech vyvstane v okamžiku, kdy se dostaneme ke kvantové gravitaci. Dnes se náš přístup ke světu jak fyzikálnímu, tak duševnímu velmi liší. On je v zásadě platonik, věří, že existuje jediný svět idejí, který popisuje jedinou fyzikální realitu. Já jsem zase pozitivista, který věří, že fyzikální teorie jsou jen námi zkonstruované modely a že nemá dobrý smysl ptát se, zda odpovídají realitě. Že má pouze smysl ptát se, zda správně předpovídají výsledky pozorování.

Tento rozdíl v náhledu vedl Rogera Penrose v prvních třech kapitolách této knihy k vyslovení tří tvrzení, s nimiž já silně nesouhlasím. Prvním z nich je, že kvantová gravitace zapříčiní to, co nazývá OŘ, objektivní redukci vlnové funkce. Tím druhým je, že tento proces hraje důležitou úlohu v práci mozku - ovlivňuje koherentní toky v mikrotubulech. A konečně třetím Penroseovým tvrzením, s nímž nesouhlasím, je, že v důsledku Gódelovy věty potřebujeme něco jako objektivní redukci k tomu, abychom vysvětlili sebeuvědomění.

Začnu s kvantovou gravitací, v té se totiž vyznám nejlépe. Penroseova objektivní redukce vlnové funkce má charakter dekoherence. Dekoherence může nastat v důsledku interakce s okolím nebo s fluktuacemi v topologii prostoročasu. Zdá se ale, že Penroseovi nestačí žádný z těchto mechanismů. Místo toho předpokládá, že k objektivní redukci dochází díky drobnému zakřivení prostoročasu způsobenému hmotou malých objektů. Podle dosud přijímaných představ však takové zakři-

vení nebrání hamiltonovskému vývoji, to znamená vývoji, při kterém dekoherence či objektivní redukce nenastává. Možná že tyto přijaté představy o úloze gravitace, tedy zakřivení prostoročasu, v kvantové teorii jsou chybné. Roger Penrose však nepředložil detailní teorii, která by dovolila skutečně vypočítat, kdy objektivní redukce nastane.

Motivem, který Penrose vede k představě objektivní redukce, je - zdá se - snaha zachránit ubohou Schrödingerovu kočku z jejího stavu napůl mrtvá napůl živá. V dnešních dnech, kdy přátelé zvířat mají takový vliv, by se samozřejmě už nikdo neodvážil navrhnout takovou proceduru jako Erwin Schrödinger ani coby myšlenkový pokus. Penrose ovšem uvádí, že jeho objektivní redukce je tak slabý efekt, že by ji nebylo možné experimentálně rozlišit od dekoherence způsobené interakcí s okolím. Je-li však tomu tak, pak k vysvětlení Schrödingerovy kočky stačí dekoherence interakcí s okolím a není potřeba vtahovat do hry kvantovou gravitaci. Pokud objektivní redukce nepředstavuje natolik silný efekt, aby mohl být experimentálně měřen, nemůže způsobovat to, co podle Penrose způsobovat má.

Druhým Penroseovým tvrzením je, že objektivní redukce má podstatný vliv na mozek, možná svým účinkem na koherentní toky mikrotubuly. Nejsem odborníkem na funkci mozku, ale zdálo by se mi to velmi nepravděpodobné i v případě, že bych věřil v objektivní redukci (v níž nevěřím). Nemyslím si, že mozek obsahuje systémy, které jsou natolik izolované, že je objektivní redukci možné odlišit od dekoherence způsobené okolím. Pokud by byly tak dobře izolovány, nemohly by interagovat tak rychle, aby se mohly podílet na duševních procesech.

Konečně třetím tvrzením Rogera Penrose je, že objektivní redukce je něco, co nutně potřebujeme k výkladu vědomí, protože vědomá mysl má v důsledku Gódelovy věty nevýpočetní charakter. Jinak řečeno - Penrose má za to, že vědomí je něco specifického pro živé bytosti a nemůže být simulováno počítačem. Plně však neobjasnil, jak může být objektivní redukce odpovědná za vědomí. Argumentuje spíše tím způsobem, že vědomí je záhada a kvantová gravitace je jiná záhada, takže musí spolu nějak souviset.

Já osobně musím přiznat, že jsem celý nesvůj, když lidé, a obzvláště teoretičtí fyzikové, mluví o vědomí. Vědomí není kvalita, kterou by bylo možné měřit zvenčí. Zaklepe-li nám zítra u dveří malý zelený mužíček, nemáme žádný způsob, jak rozhodnout, zda má vědomí a uvědomuje si sám sebe, nebo je-li to jen robot. Raději hovořím o inteligenci, neboť takovou kvalitu můžeme měřit zvnějšku. A já nevidím žádný důvod, proč by nemohla být na počítači simulována inteligence. Lidskou inte-

ligenci samozřejmě zatím simulovat neumíme, jak ukázal Penrose svým šachovým problémem. Ale i Penrose přiznává, že mezi lidskou a zvířecí inteligencí nevede žádná jasná dělicí čára. Stačí tedy uvažovat o intelektu žížaly. A já nepochybuji, že žížalí intelekt lze simulovat na počítači. Godelův argument v tomto případě není důležitý, protože žížala se o Tli-věty nestará.

Přepokládá se, že vývoj od intelektu žížaly k intelektu lidskému se udal darwinovským přírodním výběrem. Při tomto výběru rozhodovala kvalita, jak uniknout nepřítelům, ne kvalita, jak pěstovat matematiku. Takže z tohoto hlediska Gódelova věta opět není něčím, co je nutno brát do úvahy. Problém spočívá jen v tom, proč inteligenci, jež je potřebná pro přežití, lze užívat i ke konstrukci matematických důkazů. Ale tvůrčí postup matematiků se zdá být silně otázkou pokusu a omylu. Neznáme žádný standardní správný návod, jak při budování matematiky postupovat.

Uvedl jsem, proč nesouhlasím s třemi základními Penroseovými tvrzeními: že existuje objektivní redukce vlnové funkce, že tento proces hraje základní úlohu v činnosti mozku a že je nezbytný pro vysvětlení vědomí. Teď si počkám na Rogerovu odpověď.

ROGER PENROSE ODPOVÍDÁ

Jsem vděčný Abneru Shimonymu, Nancy Cartwrightové a Stephenu Hawkingovi za jejich komentáře a chci jim odpovědět několika poznámkami, a to každému z nich zvlášť.

Abneru Shimonymu

Předně Shimonyho kritické poznámky neobyčejně vítám a pokládám za velice cenné. Uvádí však, že tím, že se soustřeďuji na nevýpočetní charakter myšlení, se možná snažím vystoupit na nesprávnou horu. Pokud touto poznámkou chce říci, že existuje řada jiných důležitých projevů mentality než nevýpočetní charakter myšlení, pak s ním vřele souhlasím. Souhlasím s ním i v tom, že Searlův příklad čínskému pokoje představuje přesvědčivý argument proti „silnému AI hledisku“, tedy hledisku, že samotný výpočet může představovat duševno s vědomím. Původní Searlův argument se týkal duševní kvality „porozumění“, podobně jako moje gódelovská diskuse, ale příklad čínskému pokoje lze aplikovat (možná dokonce přesvědčivěji) i na takové duševní kvality, jakými je vnímání hudebního zvuku nebo počitek červené barvy. Ve své diskusi jsem se neuchyloval k této argumentaci proto, že má zcela negativistický charakter a nedává žádný reálný klíč k tomu, co to skutečné vědomí je, ani nenaznačuje směr, jímž bychom se měli ubírat při pokusech nalézt vědecký základ pro duševno.

Searlova argumentace se týká čistě rozdílu mezi přístupem A a B v terminologii, kterou jsem přijal ve třetí kapitole (srv. též *Shadows of the Mind*, str. 12-16). To znamená - John Searle se snaží ukázat, že vnitřní aspekty vědomí nelze vyjádřit výpočtem. To však pro můj účel nestačí, neboť já chci ukázat, že ani vnější projevy vědomí nejsou dosažitelné pomocí výpočtu. Mou strategií je nezabývat se v této fázi mnohem obtížnějším vnitřním problémem, nýbrž udělat na začátku něco mnohem skromnějšího. Pokusit se porozumět, jaká fyzika by

mohla přijatelně vést ku vnějššímu chování, které vykazují bytosti obdařené vědomím. V této fázi mne tedy zajímá rozdíl mezi A a C, případně mezi B a C, a hájím názor, že zde lze dosáhnout určitého pokroku. Souhlasím, že ještě nejsem připraven k útoku na skutečný vrchol, věřím však, že pokud vybudujeme základní tábor na jeho důležitém úpatí, budeme pak schopni nalézt cestu ke skutečnému vrcholu.

Shimony hovoří o mých odpovědích na Putnamovu recenzi *Shadows of the Mind*. Ve skutečnosti jsem se ani nesnažil odpovědět Putnamovi detailně, protože se mi stránka dopisů v časopise nezdála právě vhodným místem pro hlubší diskusi. Chtěl jsem jen konstatovat, že recenzi Hilaryho Putnama pokládám za paskvil. Jeho poznámky byly iritující obzvláště proto, že zřejmě nečetl ty části knihy, které se týkají jím podtrhávaných bodů. Mnohem detailnější odpověď na různé recenze *Shadows of the Mind* uveřejním v (elektronickém) časopise *Psyché* a doufám, že tam plně odpovím na i otázky, které trápí Abnera Shimonyho.*

Věřím, že můj „gódelovský“ argument je ve skutečnosti velmi silný, byť jej řada lidí odmítá. Nerad bych se vzdával něčeho, o čem věřím, že je v základě správné, jen proto, že to někdo není s to pochopit. Jsem přesvědčen, že tento „gódelovský“ argument nám poskytuje jistý klíč k tomu, jak asi musí vypadat fyzika, která je základem jevu vědomí, i když jen z něho nevyčteme správnou teorii.

Domnívám se, že v zásadě souhlasím s pozitivními body příspěvku Abnera Shimonyho. Diví se, proč jsem se nezmínil o filozofických pracích Alfreda Northa Whiteheada ani v knize *The Emperor's New Mind*, ani v *Shadows of the Mind*. Hlavním důvodem byla má neznalost. I když znám obecnou Whiteheadovu filozofickou pozici, představující jakousi formu „panpsychismu“, podrobněji jsem jeho filozofické dílo nečetl. Proto bych se jej neodvážil komentovat, ale ani hodnotit blízkost našich stanovisek. Domnívám se, že mé obecné stanovisko se opravdu nevymyká obecné charakteristice, kterou Abner Shimony podává, byť jsem ve svých knihách a přednáškách svou pozici jasně nevyjádřil, částečně proto, že nemám úplně jasno v tom, čemu opravdu věřím.

Shimonyho „modernizovaný whiteheadismus“ na mne silně zapůso-

*) Zmíněná odpověď je od ledna 1996 na www síti pod adresou http://psyche.cs.monash.edu.au/psyche-index-v2_1.html. V tištěné podobě vyšla v MÍT press (1996).

bil a má v sobě sugestivní věrohodnost. Nyní si uvědomuji, že někde na dně myslí jsem měl něco podobného, co Abner Shimony tak výstižně vyjádřil. Nadto má jistě pravdu, když říká, že provázanost na velkých škálách je nezbytná, má-li se jednotlivá mysl vynořit jako nějaká forma kolektivního kvantového stavu. I když jsem ani v knize *The Emperor's New Mind*, ani v *Shadows of the Mind* výslovně nenapsal, že „duševno je ontologicky fundamentální jsoucno ve vesmíru“, domnívám se, že něco takového je v přírodě skutečně nezbytné. Nepochybně s každou událostí, při které dochází k objektivní redukci, je spojen jakýsi druh protomentality, který však musí být v určitém smyslu neobyčejně „nepatrný“. Bez široce rozprostřené provázanosti s určitou vysoce organizovanou strukturou, dokonale přizpůsobenou „schopnosti zpracování informace“, jaká se vyskytuje v mozku, se nemůže skutečné duševno objevit. Bezpochyby jen proto, že mé myšlenky jsou tak špatně formulovány, jsem nevyjádřil své stanovisko k této záležitosti jasněji. Děkuji Abneru Shimonymu za jeho vyjasňující poznámky.

Souhlasím také s tím, že prostřednictvím možných analogií a experimentálních výsledků z oblasti psychologie můžeme získat důležitý vhled do problému. Pokud jsou pro naše vědomé myšlení opravdu fundamentální kvantové jevy, pak bychom měli pozorovat určité důsledky této skutečnosti na aspektech našeho myšlení. Na druhé straně bychom měli být při takovýchto diskusích výjimečně opatrní a neměli bychom přijímat ukvapené závěry a nesprávné analogie. Celá tato oblast je plná potenciálních pastí. Možná však lze navrhnout určité jasně formulované experimenty a bylo by velmi zajímavé tyto možnosti prozkoumat. Možná jsou proveditelné i experimenty ověřující mikrotubulovou hypotézu.

Shimony se zmiňuje o Mielnikově nehilbertovské kvantové mechanice. Tento typ zobecnění kvantové mechaniky jsem vždycky považoval za velice zajímavý a domnívám se, že je to něco, co zasluhuje dalšího studia. Nejsem si však jist, že je to ten typ zobecnění, který potřebujeme. Na této myšlence mne znepokojují dvě věci. Jednou z nich je, že stejně jako mnoho jiných pokusů o zobecnění kvantové mechaniky popisuje realitu maticí hustoty namísto stavovým vektorem. V obvyklé kvantové mechanice představuje prostor *matic hustoty* konvexní množinu a „čisté stavy“ leží na hranici této množiny. [V euklidovské rovině tvoří konvexní množinu obrazec, jehož libovolné dva body lze spojit úsečkou, která celá leží uvnitř obrazce; kruh nebo vnitřek čtverce představují tedy konvexní množiny, pěticípá hvězda ne. V případě prostoru stavů konvexnost spočívá v možnosti vyjádřit

daný stav jako lineární kombinaci stavů z této množiny.] Tento obraz je důsledkem struktury obvyklého Hilbertova prostoru, zmíněný prostor je podmnožinou tenzorových součinů Hilbertova prostoru a prostoru komplexně sdruženého (tj. duálního). V Mielnikově zobecnění je zachována představa obecného popisu pomocí „matice hustoty“, není zde však původní lineární Hilbertův prostor, ze kterého je konvexní množina konstruována. Myšlenka generalizace lineárního Hilbertova prostoru se mi sice líbí, vadí mi však ztráta holomorfních (komplexně analytických) aspektů kvantové teorie, jež se zdá být nutně obsažena v tomto přístupu. V Mielnikově přístupu není zachován plně určený stavový vektor, nýbrž jen stavový vektor s neurčenou fází. Tím se stává kvantová superpozice, tvořící základ kvantové teorie, něčím velmi obskurním. Lze jistě tvrdit, že je to právě superpozice, která činí potíže na makroskopické úrovni. Na kvantové úrovni je však princip superpozice principem naprosto základním a já mám obavu, že při takovémto zobecnění kvantové teorie můžeme ztratit její nejpodstatnější pozitivní část.

Druhý zdroj mých pochybností vyvěrá ze skutečnosti, že jsem přesvědčen, že nelineární aspekty zobecněné kvantové teorie by se měly vyrovnat s prvkem *časové nesytnetrie*, který je spojen s procesem měření, jak jsem to rozebíral v knize *The Emperor's New Mind*. Nezdá se mi, že by tento aspekt hrál nějakou roli v Mielnikově schématu, alespoň jak zatím stojí.

Konečně bych chtěl vyjádřit plnou podporu myšlence hledání lepšího teoretického schématu zobecnění kvantové mechaniky a zároveň požadavku, že takovéto zobecnění musí být experimentálně odlišitelné od konvenční kvantové mechaniky. Zatím jsem však nepřišel na takový proveditelný experiment, který by mohl testovat specifický typ schématu navrženého v druhé kapitole. Současná experimentální technika by musela zvýšit svou citlivost o několik řádů, aby byl takový experimentální test v principu možný. Možná však, že někdo přijde s nějakou zcela novou myšlenkou.

Nancy Cartwrightové

Je pro mne povzbuzující, že se o *Shadows of the Mind* vážně diskutovalo na společných seminářích London School of Economics and Political Science a King's College, jak o tom hovořila Nancy. Jak ovšem uvedla, velmi skepticky pohlíží na to, že by se otázky týkající se mysli měly zodpovídat pomocí pojmového aparátu fyziky, a ne biologie. Mu-

sím především zdůraznit, že se rozhodně nedomníám, že by biologie nebyla důležitá v našich pokusech vyrovnat se s těmito otázkami. Do konce si myslím, že v nejbližších letech se dosáhne v tomto směru větších úspěchů na poli biologie než na poli fyziky. A to proto, že ve fyzice bychom potřebovali určitou velikou revoluci, a kdoví kdy ta přijde.

Jenže takovéto konstatování z mé strany ji asi neuspokojí, není to uznání, že to bude naopak biologie, která poskytne ten „fundamentální prvek“ pro naše pochopení vědomí vědeckými metodami.

Já se totiž skutečně domníám, že bychom mohli mít entitu vybavenou vědomím, která vůbec není biologická, pokud biologii chápeme v jejím dnešním smyslu. Ale jakýkoli systém by nemohl mít vědomí, pokud by do hry nevstupoval určitý *typ fyzikálního* procesu, který pokládám za podstatný.

Když jsem toto vyslovil, nevím, zda tím Nancy Cartwrightové odporuji, protože mi vůbec není jasné, kde vidí přesnou hranici mezi biologií a fyzikou. Zdá se mi, že je v tomto ohledu dosti pragmatická. Říká, dobře, je v pořádku pohlížet na vědomí jako na fyzikální problém, pokud to přinese nějaký pokrok. Mohu naznačit určitý výzkumný program, podle kterého může spíše fyzik než biolog přispět k řešení otázky nějakým zásadním způsobem, táže se. Domníám se, že moje schéma vede k mnohem určitějšímu programu, než se ona domnívá. Tvrdím, že musíme hledat v mozku struktury, které mají zcela určité fyzikální vlastnosti. Tyto struktury musí dovolit existenci dobře stíněných kvantových stavů, jejichž doba života se pohybuje obecně v řádu sekundy, a v těchto stavech vystupuje provázanost rozprostřená po velkých oblastech mozku, zahrnujících najednou tisíce neuronů. Pro existenci takových stavů potřebujeme biologické struktury s velmi přesnou vnitřní konstrukcí, pravděpodobně se strukturou podobnou krystalu, která může podstatným způsobem ovlivňovat sílu synapsí. Nedomníám se, že tuto úlohu může plnit obyčejný mechanismus nervového přenosu, protože zde není šance dosáhnout potřebné izolace. Takové mechanismy, jako je presynaptická váčkovitá přenosová síť, jak navrhuje F. Beck a John Eccles, mohou hrát svou roli, ale já soudím, že cykloskeletové mikrotubuly mají mnohem vhodnější vlastnosti. Je možné, že na těchto škálách existuje řada dalších struktur, které jsou nutné k úplnému obrazu. Nancy Cartwrightová namítá, že moje schéma není příliš detailně propracováno. Mám však za to, že je mnohem propracovanější než kterékoli jiné, s nímž jsem se setkal, a že dává možnost další práce určitým směrem s mnoha příležitostmi pro experimentální testování. Souhlasím s tím, že než se přiblížíme k „úplnému“ obrazu, nás

čeká ještě spousta práce, domnívám se však, že musíme postupovat vpřed velmi opatrně. Neočekávám, že by se rozhodující testy uskutečnily v blízké budoucnosti. V tomto směru je třeba vykonat ještě pořádný kus práce.

Závažnější námitka, kterou Nancy Cartwrightová vznáší, se týká názoru na roli fyziky v celkovém obraze světa. Nabyl jsem dojmu, že podle ní se úloha fyziky přeceňuje. Možná je její role přeceněná, nebo přinejmenším fyzikální obraz světa, jež současná fyzika nabízí, může být velmi nadhodnocen co do své úplnosti a možná i správnosti.

Nancy Cartwrightová vidí současnou fyziku jako pestrobarevný koberec slátaný z dílčích teorií (a v tom má podle mne pravdu) a domnívá se, že to tak zůstane napořád. Možná že konečný cíl fyziků viděný jako úplně sjednocený obraz je nedosažitelným snem. Nancy Cartwrightová však pojímá jako metafyziku, a ne jako vědu i samotné vytyčení takového cíle.

Já sám si nejsem zcela jist svou pozicí vzhledem k této otázce. Snaha o sjednocování je trvalým celkovým trendem ve fyzice a já mám všechny důvody věřit tomu, že tento trend bude pokračovat. Odvrhnout toto přesvědčení vyžaduje značnou dávku skepticismu. Vezměme jako příklad to, co já pokládám za nejošklivější místo zmíněné fyzikální textilie. Nelíbí se mi, jak jsou sešity klasická a kvantová úroveň popisu. Tento šev je z mého pohledu nejen ošklivý, ale jsem i přesvědčen, že nemůže navždy vydržet. Můžeme přijmout stanovisko, že se musíme naučit žít s dvěma v zásadě neslučitelnými teoriemi, které se aplikují na dvou různých úrovních (takový názor, jak se domnívám, víceméně zastával Niels Bohr). Tento pohled nám třeba vystačí řadu let, která jsou před námi, ale jakmile se zpřesní měřicí technika tak, aby nám umožnila experimentálně zkoumat oblast kolem hranice mezi oběma úrovněmi, začne nás zajímat, jak si příroda v této hraniční oblasti počíná. A je možné, že chování mnoha biologických systémů kriticky závisí právě na tom, co se děje na této hranici. Podle mého názoru tou správnou otázkou je, zda lze očekávat, že bude nalezena krásná matematická teorie, která si poradí s tím, co se dnes zdá být nepěkným zmatekem, nebo zda je fyzika „skutečně“ na této úrovni tak zmatená a pokusy o hledání elegantnější teorie jsou předem odsouzeny k nezdaru. Ne, určitě tomu tak není! Zde pochybnosti nemám, říká mi to můj instinkt.

Z poznámek Nancy Cartwrightové jsem však nabyl dojmu, že je takovýto nepřijemný zmatek ve fyzikálních zákonech ochotna prostě při-

jmout.*' Možná právě toto je jedním z aspektů jejího názoru, že biologie není redukovatelná na fyziku.

Samozřejmě, v biologických systémech může hrát na této úrovni důležitou úlohu velká řada komplikovaných neznámých parametrů. Abychom mohli s takovými systémy zacházet vědecky efektivně, může být v praxi nezbytné udělat řadu odhadů, užít přibližných a statistických metod a možná uplatnit i nové matematické myšlenky, a to i v tom případě, že základní fyzikální principy budou známy. Ale z pohledu standardní fyziky ta skutečnost, že biologické zákony mohou připadat nepříjemně zamotané, neznamena nejasnost samotných základních fyzikálních zákonů. A jsou-li fyzikální zákony v tomto smyslu úplné, „biologické vlastnosti jsou důsledkem vlastností fyzikálních“.

Já ovšem tvrdím, že standardní fyzikální zákony v tomto smyslu úplné nejsou. Co horšího, domnívám se, že právě v těch aspektech, které by mohly být důležité pro biologii, nejsou zcela správné. Standardní teorie má určitou mezeru - proces, který převádí jevy z kvantové na klasickou úroveň; zavedl jsem pro něj označení R a schematicky jej znázornil na obrázku 5. Při obvyklé interpretaci z něho vzniká skutečná náhodnost. Je těžké si představit, jak by zde nějaký nový „biologický“ princip mohl hrát roli, aniž se naruší skutečnost této nahodilosti - a to by znamenalo změnu fyzikální teorie. Podle mého názoru je však situace ještě horší. Proces R je nekompatibilní s unitární evolucí (U). Stručně řečeno, U-evoluční proces je v jádru *neslučitelný* se zjevnými poz-

*) Během diskuse Nancy Cartwrightová své stanovisko upřesnila:

„Roger Penrose pokládá fyziku, která neumí zacházet s otevřenými systémy, za špatnou fyziku. Já si naopak myslím, že to může být velice dobrá fyzika - pokud přírodní zákony tvoří pestrobarevnou skládačku, jak se domnívám, že tomu je. Je-li svět plný vlastností, které nejsou redukovatelné na vlastnosti fyzikální, avšak kauzálně interagují s těmi, které na ně proveditelné jsou, pak nejvýstižnější fyzikou bude *ceteris paribus* taková fyzika, jež úplně popíše pouze uzavřené systémy.“

Který z těchto názorů je správný? Podle mne jde o metafyzickou otázku, metafyzickou v tom smyslu, že každá odpověď na ni daleko překračuje empirická svědectví, která máme k dispozici, včetně historie vědy. Zastávám názor, že takovému druhu metafyziky bychom se měli všemožně vyhýbat, a když už metodologické důvody vyžadují vsadit na určité stanovisko, měli bychom svou volbu co nejpečlivěji zvažovat. A jde-li o sázku, můj odhad pravděpodobnosti se podstatně liší od odhadu těch, kdo plně vsázejí na fyziku. Moderní věda je pestrobarevná skládanka, není to jednotný systém. Když už musíme vsadit na určitou představu o struktuře reality, je podle mne nejlepší vycházet z jejího nejlepšího obrazu, který máme k dispozici, a tím je moderní věda, jaká skutečně je, a ne jak si představujeme, že by mohla vypadat.“

rovatelnými skutečnostmi. Při standardním pohledu se tato skutečnost obchází různými prostředky, jež jsou různě věrohodné, ale holý fakt zůstává. Podle mne jde o fyzikální problém bez ohledu na to, jaký vliv by mohl mít na biologii. Názor, že příroda může být opravdu takto slepená dohromady, je sice asi bezrozporný, alespoň zatím nevede ke sporu s experimentem, hluboce však pochybuji, že by náš svět opravdu takto vypadal.

Kromě toho prostě nerozumím tomu, jak by mohla vypadat biologie, která nevyplývá z fyziky, a totéž se týká chemie. Z mé strany to neznamená sebemenší neúctu k těmto disciplínám. Někteří kolegové mi řekli něco podobného ohledně fyziky formulované pomocí „nevýpočetných“ zákonů. Ani oni si nedovedou představit, jak by taková teorie mohla vypadat. Chápu jejich pocity, ale model „vesmíru na hraní“, který jsem popsal ve třetí kapitole, dává určitý obraz takového popisu. Proto mohu tuto myšlenku pojímat vážně.

Ale ještě k hlavní otázce, kterou Nancy Cartwrightová klade, totiž proč věřím, že k vědeckému vysvětlení vědomí je třeba hledat novou fyziku. Odpovídám ve stručnosti tak, že v našem současném fyzikálním obrazu světa nevidím prostor pro vědomé duševno, a biologie a chemie je součástí tohoto obrazu. Podrobněji jsem tuto otázku rozebíral v diskusi s Abnerem Shimonym. Nadto nevidím způsob, jak pozměnit biologii tak, aby nebyla součástí tohoto obrazu, aniž současně změníme fyziku. Budeme stále chtít nazývat obraz světa fyzikálním, bude-li na základní úrovni obsahovat určité prvky protomentality, jak to spolu s Whiteheadem nazývá Abner Shimony? To je záležitost terminologie, ale takový pohled na svět mi alespoň v této chvíli vyhovuje.

Stephenu Hawkingovi

Z toho, že se Stephen Hawking hlásí k pozitivismu, by se dalo očekávat, že bude sympatizovat se „skládankovým“ obrazem světa. Přesto však pokládá standardní princip U v kvantové mechanice za neměnný, jak alespoň mohu soudit z jeho vlastního přístupu ke kvantové gravitaci. Skutečně nechápu, proč ho tak popuzuje možnost, že by unitární evoluce byla nahrazena něčím lepším. Pro mne je přijatelná myšlenka, že je to určitá aproximace lepší teorie, tak jako neobyčejně přesná Newtonova teorie gravitace je přiblížením Einsteinovy teorie. To ale má podle mého názoru málo co dělat s otázkou příklonu k platonismu či pozitivismu.

Nesouhlasím s tím, že samotná dekoherence způsobená interakcí

s okolím vyřeší problém superpozice u Schrödingerovy kočky. Můj názor na účinek této dekoherence je takový, že jakmile se stav okolí „entangluje“, prováže, se stavem kočky (nebo jiného uvažovaného systému), není už prakticky důležité, které schéma objektivní redukce budeme sledovat. Ale bez nějakého schématu objektivní redukce, byť by to bylo třeba jen prozatímní schéma „pro všechny praktické účely vyhovující“, zůstane stav kočky superpozicí.

Možná že vzhledem k jeho „pozitivistickému“ postoji Hawkingovi příliš nezáleží na tom, jaký je skutečný unitárně vyvinutý stav kočky, a že dává přednost popisu „reality“ pomocí matice hustoty. Tím se ale problém kočky neřeší. Jak jsem ukázal v druhé kapitole, popis pomocí matice hustoty nedává mrtvou, nebo živou kočku namísto superpozice obou stavů.

Co se týče mé myšlenky vyložit objektivní redukci (OŘ) jako efekt kvantové gravitace, má Stephen Hawking samozřejmě pravdu, že „podle dosud přijímaných představ však takové zkřivení nebrání hamiltonovskému vývoji“. Potíží je v tom, že pokud do hry nevstoupí OŘ proces, rozdíl mezi různými prostoročasovými komponentami může stále narůstat (podobně jako je tomu s kočkou), což se zdá vést k nesouhlasu se zkušeností. Já věřím, že přijaté představy musí být v tomto stadiu chybné. Navíc, i když mé vlastní myšlenky o tom, co se děje na této úrovni, nejsou propracované do podrobností, nabídl jsem kritérium, které může být v principu experimentálně testováno.

Pokud jde o věrohodnost toho, že tyto procesy jsou důležité pro pochopení činnosti mozku, souhlasil bych, ze je to velmi nepravděpodobné, nebýt skutečnosti, že v mozku vybaveném vědomím probíhá opravdu něco velmi zvláštního. Tak to připadá nejen mně, ale i Abneru Shimonymu. To je samozřejmé negativní argument a je třeba s ním zacházet nadměru opatrně. Domnívám se, že je důležité studovat skutečnou neurofiziologii mozku a další biologické aspekty a mimořádně pečlivě zkoumat, co se v mozku opravdu děje.

Konečně je zde můj gódelovský argument. Na způsobu, jak s ním zacházím, je podstatné to, že jde o něco, co lze měřit zvnějšíku. (Snažím se zde tedy rozlišit mezi pohledem A versus C nebo B versus C, ne mezi A a B, jež pozorováním zvnějšíku rozlišit nelze. Nadto, co se týče přírodního výběru, jsem zdůrazňoval, že schopnost pěstovat matematiku nebyla vlastností, která se při něm uplatňovala. Pokud by tomu tak bylo, svazovala by nás gódelovská svěrací kazajka, tak tomu však ve skutečnosti není. Jádro mého argumentu spočívalo v tvrzení, že vlastností, jíž se řídil přírodní výběr, byla obecná schopnost rozumět a je náhod-

nou skutečností, že tuto schopnost lze uplatnit i k chápání matematiky. V důsledku godelovského argumentu musí být tato schopnost nealgoritmická, ale lze ji využít pro řadu jiných cílů, než je matematika. Nevím, jak je to s žížalami, jsem však přesvědčen, že slonům, psům, veverkám a řadě dalších zvířat se jí dostalo v nezanedbatelné míře.

Literatura k první až třetí kapitole

- Albrecht-Buehler, G. (1981), Does the geometrie design of centrioles imply their function? *CellMotility* 1, s. 237-245.
- Albrecht-Buehler, G. (1991), Surface extensions of 3T3 cells towards distant infrared light sources, *J. Cell Biol.* 114, s. 493-502.
- Aspect, A., Grangier, R, a Roger, G. (1982), Experimental realization of Einstein-Podolsky-Rosen-Bohm *Gedankenexperiment*: a new violation of Bell's inequalities, *Phys. Rév. Lett.* 48, s. 91-94.
- Beckenstein, J. (1972), Black holes and the second law, *Lett. Nuovo Cim.* 4, s. 737-40.
- Bell, J. S. (1987), *Speakable and Unspeakeable in Quantum Mechanics* (Cambridge University Press, Cambridge).
- Bell, J. S. (1990), Against measurement, *Physics World* 3, s. 33-40.
- Berger, R. (1966), The undecidability of the domino problém, *Memoirs Amer. Math. Soč.*, 66 (s.72).
- Bohm, D., a Hiley, B. (1994), *The Undivided Universe* (Routledge, London).
- Davenport, H. (1968), *The Higher Arithmetíc*, 3. vyd. (Hutchinson's University Library, London).
- Deeke, L., Grótzinger, B., a Kornhuber, H. H. (1976), Voluntary finger movements in man: cerebral potentials and theory, *Biol. Cybernetics*, 23, s. 99.
- Deutch, D. (1985), Quantum theory, the Church-Turing principle and the universal quantum computer, *Proč. Roy. Soč. (Lond.) A* 400, s. 97-117.
- DeWitt, B. S., a Graham, R. D., ed. (1973), *The Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics* (Princeton University Press, Princeton).
- Diósi, L. (1989), Models for universal reduction of macroscopic quantum fluctuations, *Phys. Rév. A* 40, s. 1 165-1 174.
- Frohlich, H. (1968), Long-range coherence and energy storage in biological systems, *Int. J. of Quantum. Chem.*, II, s. 641-649.
- Gell-Mann, M., a Hartle, J. B. (1993), Classical equations for quantum systems, *Phys. Rév. D* 47, s. 3 345-3 382.
- Geroch, R., a Hartle, J. (1986), Computability and physical theories, *Found. Phys.* 16, s. 533.
- Gódel, K. (1931), Uber formal unentscheidbare Sätze der Principia Mathematica und verwandter Systéme 1, *Monatshefte für Mathematik und Physik* 3 8, s. 173-198.
- Golomb, S. W. (1966), *Polyominoes* (Scribner & Sons, London).
- Haag, R. (1992), *Local Quantum Physics: Fields, Particles, Algebras* (Springer-Verlag, Berlin).
- Hameroff, S. R., a Penrose, R. (1996), Orchestrated reduction of quantum co-

- herence in brain microtubules - a model for consciousness, in: *Toward a Science of Consciousness: Contributions from the 1994 Tuscon Conference*, ed. S. Hameroff, A. Kaszniak a A. Scott (MT Press, Cambridge MÁ).
- Hameroff, S. R., a Penrose, R. (1996), Conscious events as orchestrated space-time selections, *J. Consciousness Studies* 3, s. 36-53.
- Hameroff, S. R, a Watt, R. C. (1982), Information processing in microtubules, *J. Theor. Biol.* 98, s. 549-561.
- Hawking, S. W. (1975), Particle creation by black holes, *Comm. Math. Phys.* 43, s. 199-220.
- Hughston, L. R, Jozsa, R., a Wootters, W. K. (1993), A complete classification of quantum ensembles having a given density matrix, *Phys. Letters* A183, s. 14-18.
- Károlyházy, F. (1966), Gravitation and Quantum mechanics of macroscopic bodies, *Nuovo Cim.* A42, s. 390.
- Károlyházy, F. (1974), Gravitation and quantum mechanics of macroscopic bodies, *Magyar Fizikai PolyoirMat* 12, s. 24.
- Károlyházy, F., Frenkel, A, a Lukács, B. (1986), On the possible role of gravity on the reduction of the wave function, in: *Quantum Concepts in Spáče Time*, ed. R. Penrose a C. J. Isham (Oxford University Press, Oxford) s. 109-128.
- Kibble, T. W. B. (1981), Is a semi-classical theory of gravity viable?, in: *Quantum Gravity 2: A Second Oxford Symposium*; ed. C. J. Isham, R. Penrose a D. W. Sciama (Oxford University Press, Oxford) s. 63-80.
- Libet, B. (1992), The neural time-factor in perception, volition and free will, *Reviert de Métaphysique et de Morale* 2, s. 255-272.
- Libet, B., Wright, E. W., jr, Feinstein, B., a Pearl, D. K. (1979), Subjective referral of the timing for a conscious sensory experience, *Brain*, 102, s. 193-224.
- Lockwood, M. (1989), *Mind, Brain and the Quantum* (Basil Blackwell, Oxford).
- Lucas, J. R. (1961), Minds, Machines and Godel, *Philosophy* 36, s. 120-124; reprint Alan Ross Anderson (1964), *Minds and Machines* (Prentice-Hall, New Jersey).
- Majorána, E. (1932), Atomi orientati in campo magnetico variable, *Nuovo Cimento* 9, s. 43-50.
- Moravec, H. (1988), *Mind Children: The Future of Robot and Human Intelligence* (Harvard University Press, Cambridge MÁ).
- Omneš, R. (1992), Consistent interpretations of quantum mechanics; *Rév. Mód. Phys.*, 64, s. 339-382.
- Pearle, P. (1989), Combining stochastic dynamical state-vector reduction with spontaneous localisation, *Phys. Rév.*, A39, s. 2 277-2 289.
- Penrose, R. (1989, *The Emperot's New Mind: Concerning Computers, Minds, and the Laws of Physics* (Oxford University Press, Oxford).
- Penrose, R. (1989), Difficulties with inflationary cosmology, in: *Proceedings of the 14th Texas Symposium on Relativistic Astrophysics*, ed. E. Fennes, *Annals of NY Acad. Sci.* 571, s. 249 (NY Acad. Science, New York).

- Penrose, R. (1991), On the cohomology of impossible figures [La cohologie des figures impossibles], *Structural Topology [Topologie structurale]* 17, s. 11-16.
- Penrose, R. (1994), *Shadows of the Mind: An Approach to the Missing Science of Consciousness* (Oxford University Press, Oxford).
- Penrose, R. (1996), On gravity's role in quantum state reduction, *Gen. Rel. Grav.* 28, s. 581.
- Percival, I. C. (1995), Quantum spacetime fluctuations and primary state diffusion, *Proč. R. Soč. Lond.* A451, s. 503-513.
- Schrödinger, E. (1935), Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik, *Naturwissenschaften*, 23, s. 807-812, 823-828, 844-849 (překl. J. T. Trimmer (1980), in: *Proč. Amer. Phil. Soč.* 124, s. 323-338).
- Schrödinger, E. (1935), Probability relations between separated systems, *Proč. Camb. Phil. Soč.* 31, s. 555-563.
- Searle, J. R. (1980), Minds, Brains and Programs, in: *The Behavioral and Brain Sciences*, vol. 3 (Cambridge University Press, Cambridge).
- Seymore, J., a Norwood, D. (1993), A game for life, *New Scientist* 139, č. 1889, s. 23-26.
- Squires, E. (1990), On an alleged proof of the quantum probability law, *Phys. Len.* A145, s. 67-68.
- Turing, A. M. (1937), On computable numbers with an application to the Entscheidungsproblem, *Proč. Lond. Math. Soč. (ser. 2)* 42, s. 230-265.; opr. 43, s. 544-546.
- Turing, A. M. (1939), Systems of logic based on ordinals, *P. Lond. Math. Soč.*, 45, s. 161-228.
- voň Neumann, J. (1995), *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics* (Princeton University Press, Princeton).
- Wigner, E. P. (1960), The unreasonable effectiveness of mathematics in the physical sciences, *Commun. Pure Appl. Math.* 13, s. 1-14.
- Zurek, W. H. (1991), Decoherence and the transition from quantum to classical, *Physics Today* 44 (č. 10), s. 36-44.

Literatura a poznámky ke čtvrté kapitole

- 1) Náhrobní nápis velkého německého matematika Davida Hilberta (1862-1944).
- 2) Hilary Putnam, recenze *Shadows of the Mind*, *The New York Times Book Review.*, Nov. 20, 1994, s. 1.
- 3) Roger Penrose, dopis do *The New York Times Book Review*, Dec. 18, 1994, s. 39.
- 4) Ned Block, *Readings in Philosophy of Psychology*, vol. 1, část 2. a 3. (Harvard University Press, Cambridge MA 1980).

- 5) Alfred North Whitehead, *Adventures of Ideas* (Macmillan, London 1933), *Process of Reality* (Macmillan, London 1929).
- 6) Alfred North Whitehead, *Adventures of Ideas*, kap. 11, odd. 17.
- 7) Alfred North Whitehead, *Adventures of Ideas*, kap. 11, odd. 6.
- 8) Roger Penrose, *The Emperor's New Mind* (Oxford University Press, Oxford 1989).
- 9) Abner Shimony, Quantum physics and philosophy of Whitehead, ve sb. Max Black (ed.), *Philosophy in America* (George Allen & Unwin, London 1965); přetištěno v A. Shimony, *Search for a Naturalistic World View*, sv. 2., s. 291-309 (Cambridge University Press, Cambridge 1993); Shimon Malin, Whiteheadian approach to Bell's Correlations, *Foundations of Physics*, 18 (1988) s. 1035.
- 10) M. Lockwood, *Mind, Brain and the Quantum* (Blackwell, Oxford 1989).
- 11) Henry P. Stapp, *Mind, Matter and Quantum Mechanics* (Springer Verlag, Berlin 1993).
- 12) Bogdan Mielnik, Generalized quantum mechanics, *Communications in Mathematical Physics*, 13 (1974), s. 221.
- 13) Martin Quack, Structure and dynamics of chiral molecules, *Agnew. Chem. Int. Ed. Engl.* 28(1989), s. 571.

Literatura a poznámky k páté kapitole

- 1) Viz Hendry, R. E, Approximations in quantum chemistry, in: Niall Shanks, ed., *Idealisation in Contemporary Physics*, Poznaň Studies in the Philosophy of the Sciences and Humanities, Rodopi, Amsterdam, 1997; Woolley, R. G., Quantum theory and molecular structure, *Advances in Physics*, 25 (1976), s. 27-52.
- 2) Detaily argumentů proti jedinému systému viz: Dupre, J., *The Disorder of Things: Metaphysical Foundations of Disunity of Science* (Harvard University Press, Cambridge MA 1993); Neurath, O., *Unified Science*, Viena Circle Monograph Series, přel. H. Kael (D. Reidel, Dordrecht 1987).
- 3) Další diskusi tohoto bodu viz: Cartwright, N., Is natural science natural enough? Odpověď Phillipu Allportovi, *Synthese*, 94 (1993), s. 291; Cartwright, N., Fundamentalism vs the patchwork of laws, *Proceedings of the Aristotelian Society* (1994); Cartwright, N., Where in the world is the quantum measurement problem?, *Physik, Philosophie und die Einheit der Wissenschaft, Philosophia Naturalis*, Kreuger, L., a Falkenburg, B., ed. (Spectrum, Heidelberg 1995).

Pramen ilustrací

- R. Penrose, *The Emperor's New Mind*, Oxford University Press, Oxford 1989: obr. 6, 8, 11, 12, 13, 16(a,b,c), 18, 19, 24, 25, 26, 28 (a,b), 29, 30, 32, 35(a), 72.
- R. Penrose, *Shadows of the Mind*, Oxford University Press, Oxford 1994: 14, 33, 34, 35(b), 36, 37, 49, 50, 59, 60, 62, 63, 64, 65, 66, 68, 69, 70.
- M. S. Longair, *High Energy Astrophysics*, vol. 2, Cambridge University Press. Cambridge 1994: 15, 22.
- S laskavým svolením Cordon Art-Baarn-Holland © 1989: 17, 19.

Literatura v českém jazyce

- Barrow, J. D., *Teorie všeho*, MF, Praha 1996.
- Crick, E., *Věda hledá duši*, MF, Praha 1998.
- Gleick, J., *Chaos - vznik nové vědy*, Andopublishing, Brno 1996.
- Grygar, J., *Vesmír, jaký je*, MF, Praha 1997.
- Hawking, S. W., *Stručná historie času*, MF, Praha 1991.
- Hawking, S., *Černé díry a budoucnost vesmíru*, MF, Praha 1995.
- Fischer, J., *Průhledy do mikrokosmu*, MF, Praha 1986.
- Novikov, I., *Černé díry a vesmír*, MF, Praha 1989.
- Weinberg, S., *První tři minuty*, MF, Praha 1998.
- Weinberg, S., *Snění o finální teorii*, Hynek, Praha 1996.

Doslov - a tak trochu návod k použití

V předmluvě řadí Malcolm Longair tuto knížku mezi literaturu popularizující vědu, poukazuje však na její zvláštní charakter. Knižka je populární svou formou, tj. prakticky se v ní nevyskytují matematické vzorce, zároveň však předkládá Penroseovu představu řešení některých otevřených otázek současné vědy a plnější pochopení těchto problémů přece jen vyžaduje od čtenáře jisté fyzikální vědomosti a trénink v logickém uvažování. Proto si dovolím dát čtenáři určitá doporučení, jak knihu číst a mít z její četby nemalý intelektuální zisk i v případě, že ne všechny vyslovené myšlenky plně pochopí.

Abner Shimony ve svém komentáři přirovnává Rogera Penrose k horolezci, který se snaží vystoupit na nesprávnou horu. Přidržím se tohoto příoměru. Předně bych řekl, že na tom, zda vrchol, který má autor před očima, je skutečně ten pravý vrchol světa a zda jej lze dosáhnout cestou, kterou si vytkl, zase tolik nezáleží. Z horolezeckého hlediska neexistují nedůležité vrcholy, pokud představují opravdový problém. Výstup na Matterhorn, průstup severní stěnou Eigeru, zdolání první himalájské osmitisícovky - tyto výkony, které předznamenaly úspěch Hillaryho a Tenzinga na Everestu, byly možná hodnotnější než samotné dobytí vrcholu světa.

O tom, že kvantová teorie gravitace a s ní spojené otázky interpretace a zobecnění kvantové teorie, otázka, proč je vesmír takový, jaký je, a další Penroseovy „záhady“ jsou *závažné* vědecké problémy, nepochybují ani Penroseovi oponenti, třebaže se nedomnívají, že přes jejich vyřešení vede cesta k nejvyššímu vrcholu - k poznání, co je to poznání. Penrose během své vědecké kariéry díky svému hlubokému matematickém vhledu už přispěl k vyřešení obrovské řady zásadních fyzikálních problémů. Jak říká Longair v předmluvě, bylo by udivující, kdyby i tento Penroseův program nepřinesl přinejmenším inspirující myšlenky.

Zde však chci hodnotit spíše popularizační stránku knížky, a proto si zdůrazněme, že do Penroseova základního tábora pro vlastní výstup nás zavedou jednotlivé kapitoly vždy až na samotném konci. Teprve zde

autor vyslovuje nové vědecké hypotézy. Předtím nás vede zkušenou rukou dobře probádaným, sice nelehce schůdným, ale přesto nádherným terénem Einsteinovy obecné teorie relativity, kvantové mechaniky a matematické logiky. Při troše pozornosti získáme dobrý vhled alespoň do některých rysů těchto disciplín, a především se neubráníme tomu, abychom nesdíleli průvodcovo nadšení nad jejich krásou.

Stojí ale námaha výstupu skutečně za to? Penroseovým cílem je porozumění otázce, co je to lidská mysl a vědomí. Kdo by si občas obdobnou otázkou nepoložil bez ohledu na svou profesi či okruh zájmů? Co je to svobodná vůle, či přinejmenším z čeho pramení náš *pocit* svobodné vůle? Kdyby nám kniha dala konečnou odpověď, jistě bychom nepochybovali, že ta trocha práce se vyplatí. Stojí však za to se seznámit jen s náznakem odpovědi? Náznakem, který nadto nemusí být správný, ať už proto, že autorův model biologických struktur je zjednodušen, nebo ze zásadnějšího důvodu - že se fyzika 21. století bude přece jen vyvíjet jinak, než Penrose předpokládá? Jsem přesvědčen, že pozorný čtenář bude souhlasit s tím, že stojí.

To, s čím nás Penrose seznamuje, nejsou detaily či podrobné důsledky teorie relativity, kvantové teorie či matematické logiky, je to spíše duch těchto disciplín a jejich význam, překračující rámec fyziky v úzkém smyslu. Ve dvacátých letech se Werner Heisenberg, jeden z tvůrců kvantové teorie, vyjádřil, že nejvýznamnější událostí ve filozofii našeho století je moderní fyzika. To nebyl projev „fyzikálního imperialismu“, z něhož nepřímo viní Rogera Penrose filozofka vědy Nancy Cartwrightová ve svém kritickém komentáři - Heisenberg rozhodně ve svých spisech na toto téma neredukoval filozofii na fyziku. Chtěl jen zdůraznit, jak hluboce ovlivnila moderní fyzika chápání tradičních filozofických pojmů, jako je prostor, čas, příčinnost.

A to nejen svými výsledky. Jsem přesvědčen, že ta hlavní metodologická lekce, kterou nám dala moderní fyzika, spočívá v tom, že ukázala, jak přesně je nutno formulovat otázky, chceme-li dostat rozumnou odpověď. Už ve 3. století před naším letopočtem ukázal Euklides, že celou stavbu po něm nazývané geometrie lze vyvodit logickými operacemi z několika základních předpokladů — axiomů. Trvalo ale celé dva tisíce let, než se pochopilo, že tyto axiomy nejsou „samozřejmé“, že jako matematickou teorii lze vytvořit geometrii obecnější. A opět jinou záležitostí bylo porozumět otázce, jaká je geometrie světa kolem nás. Stručný výklad v první kapitole nás nemůže seznámit se všemi vlastnostmi neeuklidovských geometrií, krásně však objasňuje smysl otázky po geometrii prostoru či prostoročasu.

Domnívám se, že by Heisenberg souhlasil s tím, že k nejvýznamnějším filozofickým výsledkům století patří i věta o neúplnosti, kterou o něco později dokázal brněnský rodák Kurt Gódel a jejíž rozbor tvoří podstatnou část třetí kapitoly. Vnesla totiž zrnko, či spíše pořádnou hroudu soli do naděje, že veškeré naše poznání bude jednou možné založit na omezeném počtu základních předpokladů. Tento obecný aspekt nechci dále rozebírat, protože se mu nevěnuje ani autor. Chtěl jsem jen upozornit na to, že věta, jejíž základní obsah Penrose mistrně osvětluje, má ještě širší důsledky než ty, o kterých autor hovoří. Populární výklad této věty je velice obtížný. Autorův rozbor sice vyžaduje velmi pozorné čtení, ale prakticky žádné předběžné matematické znalosti.

Vystihnout základní obsah jednotlivých témat se autorovi daří i tím, že si pomáhá neobvykle velkým počtem výstižných grafů a ilustrací. Kniha - či přednášky, na nichž je založena - se s trochou nadsázky dá označit za textem provázený obrázkový seriál. Velké množství vyobrazení není však typické jen pro Penroseovy knihy určené širší veřejnosti. „Myšlení v obrázcích“ je typickým rysem i jeho vědecké práce. Když Longair představuje vědeckou osobnost Rogera Penrose, hovoří o některých jeho významných výsledcích. K většině z nich patří dnes už učebnicové obrázky, které výstižně shrnují základní myšlenku důkazů, byť důkazy samy i nové metody, kterými Penrose obohatil matematickou fyziku, jsou velice náročné. Promyšlený graf je pro něho stejně důležitou součástí matematického zápisu jako vzorec či rovnice.

Právě tento způsob myšlení činí z Penrose nejen velikého matematika či matematického fyzika, ale i vynikajícího popularizátora. Obecnou teorií relativity se zabývá řada populárních knih. Málokterá však poskytuje tak jasný geometrický vhled. Kvantová teorie je popularizována podstatně méně, neboť její výklad bez matematického aparátu je ještě obtížnější, než je tomu u teorie relativity. Penroseův výklad samozřejmě nemůže nahradit učebnici kvantové mechaniky, ale jeho schémata nám přiblíží právě ty nejpodivuhodnější rysy kvantové teorie.

Položme ovšem důraz na to „přiblíží“. Řadě čtenářů nebudou možná srozumitelné připomínky Stephena Hawkinga či Abnera Shimonyho, ve kterých se objevují termíny jako „hamiltonovský vývoj“ či „projektivní Hilbertův prostor“. I když jsem někde vkládal do hranatých závorek drobné vysvětlivky, smysl těchto připomínek stručně osvětlit nelze. Je třeba si uvědomit, že „obrázkový“ výklad nám nedá výzbroj pro sledování skutečně odborné diskuse. I když ale ryze odbornou argumentaci vynecháme, diskuse nám přece jen k pochopení problému pomůže.

Zdůrazňoval jsem, jakou důležitost má v dnešní fyzice přesné klade-
ní otázek či právě hledání správných otázek. Penroseovým konečným
cílem, a samozřejmě nejen jeho cílem, je nalezení vědeckého výkladu
lidské mysli a duševna. Byli jsme zvyklí slyšet, že myšlení je projev vy-
soce organizované hmoty, v kontrastu k názoru, že je to projev „dušev-
na“. Tato odpověď ale neříká skoro nic, pokud neřekneme, jak tato or-
ganizace „hmoty“ vede k pocitu vědomí, a přes veškeré (zdůrazněme,
že nemalé) úspěchy fyziologie mozku cítíme, že řada velikých kroků
zde stále chybí, podle Penrose ten krok podstatný. Cítíme také, alespoň
to cítím já, že vlastně nemáme jasnou představu, jak by vyčerpávající
odpověď mohla vypadat, a že současně s jejím hledáním musíme upřes-
ňovat obsah otázek.

Ještě malá poznámka k některým názorům prosloveným oponenty.
Nancy Cartwrightová odmítá myšlenku redukce vědy na fyziku a vůbec
myšlenku hledání jednotného systému, Abner Shimony propaguje
představu „protomentality“. Vráťím se k svému horolezeckému přímě-
ru. Řada význačných hor, Mount Everest, Mont Blanc i „polonaše“
Sněžka, leží na státní hranici. Vystupuje-li se na Everest z Nepálu, ces-
ta začíná v rozdílné krajině i kulturním prostředí než při nástupu z Ti-
betu. Tam u vrcholu však tyto rozdíly mizí. Penrose je jistě přesvědčen,
že náš konečný obraz světa bude mít ve svém jádře hlubokou jednotu,
v tomto smyslu je určitě stejně „bezostyšným redukcionistou“ jako
Hawking. Asi by však souhlasil, že u vrcholu světa mají národnostní
diskuse malý smysl. Zda je sen o jednotném obrazu světa reálný, je za-
tím nerozhodnutá otázka, Penrose však nás znova přesvědčuje, že má
v sobě hlubokou krásu.

Penroseovým jednotícím pohledem jsem se řídil i při překladu slova
„physical“, které lze přeložit buď jako „fyzikální“, nebo „fyzický“. Pře-
kládal jsem je převážně jako „fyzikální“, i když uznávám, že Nancy
Cartwrightová a samozřejmě i jiní by dali přednost slovu „fyzický“.

Nakonec bych chtěl poděkovat RNDr. Fatimě Cvrčkové, CSc.,
z Přírodovědecké fakulty Univerzity Karlovy za přehlédnutí biologické
terminologie.

12. dubna 1999

Jiří Langer

Obsah

PŘEDMLUVA

Malcom Longair

– 5 –

KAPITOLA PRVNÍ

Prostoročas a kosmologie

– 11 –

KAPITOLA DRUHÁ

Záhady kvantové fyziky

– 50 –

KAPITOLA TŘETÍ

Fyzika a mysl

– 83 –

KAPITOLA ČTVRTÁ

Abner Shimony: O duševnu, kvantové mechanice
a aktualizaci potenciálního

– 119 –

KAPITOLA PÁTÁ

Nancy Cartwrightová: Proč fyzika?

– 131 –

KAPITOLA ŠESTÁ

Stephen Hawking: Námitky bezostyšného redukcionisty

– 137 –

KAPITOLA SEDMÁ

Roger Penrose odpovídá

– 140 –

LITERATURA A POZNÁMKY

– 150 –

DOSLOV-A TAK TROCHU NÁVOD K POUŽITÍ

– 155 –

Roger Penrose

MAKROSVĚT, MIKROSVĚT A LIDSKÁ MYSL

Z anglického originálu *The Large,
the Small and the Human Mind*

vydaného The Press Syndicate of the University of Cambridge
v Cambridgi roku 1997

přeložil a doslovem doprovodil doc. RNDr. Jiří Langer, CSc.

Přebal a vazbu navrhl Miroslav Kloss

Grafická úprava a technická redakce Petr Čížek

Vydala Mladá fronta jako svou 5867. publikaci

Edice Kolumbus, svazek 144

Odpovědná redaktorka Věra Amelová

Výtvarný redaktor Bohuslav Holý

Vytiskla tiskárna FINIDR, s. r. o., Český Těšín

160 stran. Vydání první. Praha 1999

Doporučená cena 189 Kč včetně DPH

Cena pro členy LK159 Kč včetně DPH

Knihy Mladé fronty

si můžete objednat na adrese:

Mladá fronta, obchodní oddělení,

Chlumova 10, 130 00 Praha 3

