

24.2. FYZIKA: Kam kráčí kvantová mechanika?

Jiří Svršek

podle článku Johna Archibalda Wheelera a Maxe Tegmarka

Literatura a odkazy:

[X1] [John Archibald Wheeler, Max Tegmark: 100 Years of the Quantum](#). 17 Jan 2001. Published in the Feb. 2001 issue of Scientific American, p.68-75. Max Tegmark, Dept. of Physics, Univ. of Pennsylvania, Philadelphia, PA 19104; <mailto:max@physics.upenn.edu> John Archibald Wheeler, Princeton University, Department of Physics, Princeton, NJ 08544; <mailto:jawheeler@pupgg.princeton.edu> arXiv:quant-ph/0101077 e-Print archive. Los Alamos National Laboratory. US National Science Foundation.

[X2] [Charis Anastopoulos: Frequently Asked Questions about Decoherence](#). 30 Nov 2000. arXiv:quant-ph/0011123 e-Print archive. Los Alamos National Laboratory. US National Science Foundation.

[X3] [Scientific American](#).

"... během několika let všechny důležité fyzikální konstanty budou přibližně odhadnuty a [...] jediným zaměstnáním, které zůstane lidem vědy, bude provádět měření dalších desetinných míst", prohlásil na své inaugurační přednášce v roce 1871 **James Clerk Maxwell**. O 30 let později, 14. prosince 1900, **Max Planck** oznámil svůj známý vztah o záření absolutně černého tělesa, který stál u zrodu kvantové teorie.

Ultrafialová katastrofa

V roce 1871 měli fyzikové dobrý důvod ke svému optimismu. Klasická mechanika a elektrodynamika způsobily průmyslovou revoluci a zdálo se, že jejich rovnice popisují všechny fyzikální systémy s dostatečnou přesností. Zůstávalo jen několik detailů, které tento idylický obraz narušovaly. Množství energie potřebné k zahřátí velmi chladných těles bylo menší, než předpovídala teorie, a vypočtené spektrum rozžhavených těles neodpovídalo skutečnosti. Pokud bychom braly příslušné výpočty vážně, pak tyto výpočty předpovídaly tzv. ultrafialovou katastrofu: měli bychom oslepnout ultrafialovým zářením a zářením ještě kratších vlnových délek, pokud se podíváme do plamene svých kamen!

V roce 1900 **Max Planck** publikoval článek, v němž odvodil závislost monochromatického jasu absolutně černého tělesa na jeho termodynamické teplotě, který dnes nese jeho jméno. Planckův zákon neobsahuje ultrafialovou katastrofu. Na druhé straně Planck vycházel z tehdy bizarního předpokladu: energie světla se šíří v kvantech konečné velikosti. Tento předpoklad Maxe Plancka inspiroval k formulaci kvantové hypotézy. **Peter Debye** ukázal, že podivné tepelné chování chladných těles lze snadno vysvětlit, pokud předpokládáme, že vibrační energie pevných těles může existovat pouze v diskrétním množství. V roce 1905 **Albert Einstein** tuto hypotézu dále rozšířil. Předpokládal, že světlo může přenášet energii pouze po částech, "fotonech", a díky tomu vysvětlil fotoelektrický jev, který dnes mimo jiné využíváme v solárních článcích a v zobrazovacích senzorech digitálních kamer.

Zničení atomu vodíku

V roce 1911 fyzikové stáli před dalším závažným problémem. **Ernst Rutherford** tvrdil, že atomy se skládají z elektronů, které obíhají kladně nabitě atomové jádro, podobně jako planety obíhají kolem Slunce. Avšak podle teorie elektromagnetického pole takto obíhající elektrony musí trvale vyzařovat energii, tím se po spirále přibližovat ke kladně nabitému jádru, až po asi 10^{-12} sekundy na něj dopadnou a atom bude zničen. Jenže například atom vodíku je zcela stabilní. Tento výsledek lze dnes považovat za nejhorší kvalitativní selhání v historii fyziky.

Průlom učinil v roce 1913 **Niels Bohr**, který spolupracoval s Rutherfordem v Manchesteru. Postuloval, že velikost úhlového momentu v atomu je kvantována a elektrony v atomu mohou zaujímat pouze dráhy s diskrétním poloměrem, přičemž každé dráze odpovídá určité množství energie. Pokud elektron přechází z jedné dráhy na druhou, musí buď emitovat nebo absorbovat foton s energií rovnou rozdílu energií obou orbitů. Elektron na nejnižší dráze již má nejmenší možnou energii a nemůže nikam přejít. Proto je atom stabilní. Bohrova teorie

navíc úspěšně vysvětlila spektrální čáry pozorované u atomu vodíku, tedy Balmerovu, Lymanovu, Paschenovu, Brackettovu a další série spektrálních čar.

Nastupují rovnice

Přes úspěchy vysvětlení ultrafialové katastrofy, stability atomů a spektrálních čar atomů fyzikové kvantovým pravidlům příliš nedůvěřovali.

V roce 1923 **Louis de Broglie** ve své doktorské práci navrhl, že elektrony a další částice se chovají podobně jako stojaté vlny. Tyto vlny, podobné vibracím kytarové struny, mohou nabývat pouze diskrétních (kvantových) frekvencí. Myšlenka byla zcela nová a proto zkušební komise požádala o názor **Alberta Einsteina**. Albert Einstein vyjádřil příznivé stanovisko a práce proto byla přijata. V listopadu 1925 **Erwin Schrödinger** přednášel v Zürichu o de Broglieho práci. Když skončil, **Peter Debye** se zeptal: "Hovoříte o vlnách. Ale kde je vlnová rovnice?" Schrödinger brzy poté vytvořil a publikoval svoji známou vlnovou rovnici, která se stala klíčovým okamžikem moderní fyziky. Ekvivalentní formulaci pomocí matic vytvořili **Max Born, Pasquale Jordan a Werner Heisenberg**. Díky tomuto matematickému impulsu došlo k prudkému rozvoji kvantové mechaniky. Během několika let byla vysvětlena celá řada do té doby nevysvětlitelných měření a pozorování, včetně spekter složitých atomů a různých empirických veličin, popisujících vlastnosti chemických reakcí.

Avšak co vlastně popisuje "vlnová funkce", která je řešením Schrödingerovy vlnové rovnice? Tato ústřední záhada kvantové mechaniky přetrvává dodnes.

Max Born přišel s převratnou myšlenkou, že vlnovou funkci lze interpretovat pomocí teorie pravděpodobnosti. Pokud měříme polohu elektronu, pak pravděpodobnost jeho výskytu v určité oblasti závisí na intenzitě (velikosti) vlnové funkce v této oblasti. Tato interpretace tvrdí, že v samotných zákonech přírody se vyskytuje fundamentální nahodilost. **Albert Einstein** byl tímto názorem hluboce znepokojen, což vyjádřil slovy "*Nemohu uvěřit, že bůh hraje v kostky*".

Schrödingerova kočka a kvantové karty

Erwin Schrödinger také nebyl spokojen. Vlnové funkce mohou popisovat kombinace různých stavů, tzv. superpozice. Například elektron se může nacházet v superpozici několika různých poloh. Schrödinger tvrdil, že pokud mikroskopické objekty, jako jsou atomy, mohou zaujímat takové podivné superpozice, pak by takové superpozice mohly zaujímat také makroskopické objekty, které jsou z nich složeny. Zdánlivě nevinné "mikrosuperpozice" mohou přerůst v "makrosuperpozice". Jako příklad uvedl myšlenkový experiment, v němž je kočka uzavřena v krabici a zastřelena v okamžiku, kdy se rozpadne atom. Radioaktivní atom se ale nachází v superpozici nerozpadlého a rozpadlého atomu, proto kočka se musí nacházet v superpozici živé a mrtvé kočky.

Podobným příkladem myšlenkového experimentu jsou kvantové karty, které se také soustřeďují na problém přechodu od mikrosuperpozice k makrosuperpozici. Představme si, že karta stojí na hraně na zcela rovném stole. Podle klasické mechaniky může karta stát na hraně v principu nekonečně dlouho (v praxi karta spadne na stůl díky sebemenšímu závanu vzduchu). Proto předpokládejme, že máme "ideální kartu", kterou z rovnováhy může vychýlit rozpad radioaktivního atomu. Podle Schrödingerovy rovnice taková "ideální karta" spadne na stůl během několika sekund kvůli Heisenbergovu principu neurčitosti, podle něhož kvantový objekt nemůže zaujmout přesnou polohu bez neurčitosti v hybnosti. Protože ale počáteční stav karty je symetrický, musí být také výsledný stav symetrický - karta musí spadnout současně lícem a rubem navrch v kvantové superpozici. Pokud provedete tento myšlenkový experiment, nepochybně dospějete k závěru, že klasická mechanika je chybná. Přesto ale stále pozorujete, že karta z hrany spadne buď lícem anebo na rubem navrch. Nikdy nebudete pozorovat, že karta spadne současně na obě strany, jak tvrdí Schrödingerova rovnice. Tento zjevný rozpor byl jádrem donedávna nerozřešené záhady kvantové mechaniky.

Kodaňská interpretace kvantové mechaniky, která vyplynula z diskuse mezi **Nielsem Bohrem a Wernerem Heisenbergem** koncem 20. let 20. století řeší tuto záhadu tvrzením, že pozorování nebo měření jsou zvláštním jevem. Dokud kartu stojící na hraně nepozorujeme, vlnová funkce se spojitě vyvíjí podle Schrödingerovy rovnice a hovoříme o unitární evoluci. Unitární evoluce umožňuje superpozici, v níž karta spadne současně rubem a lícem navrch. Pozorování karty tuto unitární evoluci přeruší a způsobí kolaps vlnové funkce, kdy pozorovatel vidí kartu buď lícem anebo rubem navrch. Realizuje se tedy pouze část vlnové funkce. Příroda zdánlivě sama rozhodne, který ze stavů se bude realizovat s pravděpodobností určenou modulem vlnové funkce.

Přestože kodaňská interpretace vede k velmi přesným výpočtům, někteří fyzikové mají pocit, že zde chybí rovnice, které by popisovaly, kdy a jak ke kolapsu vlnové funkce dojde. Někteří fyzikové se také domnívají, že v kvantové mechanice musí být něco od základů chybného a že kvantová mechanika bude brzy nahrazena fundamentálnější teorií, která takové rovnice bude obsahovat. V minulosti se však většina fyziků zabývala pouze praktickými aplikacemi kvantové mechaniky zejména v jaderné fyzice a nikoliv ontologickými důsledky jejich rovnic.

Pragmatický přístup ke kvantové mechanice byl neobyčejně úspěšný. Kvantová mechanika předpověděla existenci antihmoty, vedla k pochopení radioaktivity (což vedlo k jaderné fyzice), vysvětlila vlastnosti polovodičů (což vedlo k rychlému vývoji elektroniky a počítačové techniky), vysvětlila supravodivost, popsala interakce mezi hmotou a světlem (což vedlo k vývoji laserů) a interakce mezi atomem a radiovými vlnami (což vedlo k vývoji jaderné magnetické resonance). Obrovský úspěch kvantové mechaniky vedl k dalšímu jejímu rozšíření v kvantovou teorii pole, která se stala základem fyziky elementárních částic a jejími důsledky jsou mimo jiné současné výzkumy oscilace neutrin, hledání Higgsova bosonu a supersymetrie.

Mnoho světů nebo mnoho slov?

V 50. letech 20. století úspěch kvantové mechaniky byl zcela nepochybný a všem bylo jasné, že jde o fundamentální teorii. V polovině 50. let postgraduální student **Hugh Everett III** v Princetonu se ve své doktorské disertační práci zabýval kolapsem vlnové funkce. Položil si otázku, co když je časová evoluce celého vesmíru vždy unitární. Podle kvantové mechaniky lze celý vývoj a současný stav vesmíru popsat vlnovou funkcí (zřejmě neobyčejně složitou). V Everettově scénáři se vlnová funkce vždy vyvíjí deterministickým způsobem a není zde žádné místo pro kolaps vlnové funkce nebo pro Boha hrajícího v kostky.

Místo kolapsu vlnové funkce během měření dochází k zesílení původně nevinné mikroskopické superpozice do makroskopické superpozice stavů. Kvantová karta se nachází ve dvou stavech současně. Pozorovatel ale pozoruje vždy jen jeden stav. Podle Everettovy interpretace dojde k rozštěpení vesmíru, kdy v jednom vesmíru pozorovatel pozoruje, že karta padne lícem navrch, ve druhém vesmíru pozoruje, že karta padne rubem navrch. Situace je složitější a stále rozporná pro případ asymetrického rozdělení, kdy výsledky měření nastávají s různými pravděpodobnostmi.

Everettova hypotéza je často označována jako "mnohosvětová interpretace" kvantové mechaniky. Každá vědomá mysl má svůj vlastní svět, v němž dochází k jednomu výsledku měření z možných syperponovaných výsledků. Tato interpretace řeší problém kolapsu vlnové funkce a neočekává žádné nové fyzikální objevy, které by tento problém řešily. Na druhé straně ale tvrdí, že existuje jakési "paralelní vnímání reality".

Experimenty dokazují, že svět je opravdu podivný

Everettova interpretace byla v 60. a 70. letech 20. letů silně zpochybněna. Hlavní námitkou bylo, že je příliš podivná na rozdíl od přijatelné kodaňské interpretace. Řada fyziků věřila v objev nějaké hlubší teorie, která ukáže, že svět je v jistém smyslu klasický a neobsahuje takové podivnosti, jako je výskyt jednoho kvantového objektu na dvou místech současně. Tyto naděje ale zcela zmařila série nových experimentů.

Lze zjevnou kvantovou náhodnost nahradit nějakým druhem dosud neobjevených fyzikálních veličin, dosud neznámými náboji částic, tzv. "skrytými proměnnými"? Teoretický fyzik **John Bell** z CERN ukázal, že v tomto případě by hodnoty některých veličin, které lze změřit v jistých složitých experimentech, neměly odpovídat hodnotám předpovědaným standardní kvantovou mechanikou. Teprve po řadě let moderní technologie umožnila takové experimenty provést a hypotézu skrytých proměnných vyvrátit.

Experiment "opožděného výběru", který navrhl Max Tegmark v roce 1978, úspěšně realizovali **Carrol Alley, Oleg Jakubowics a William Wickes** v roce 1984. Experiment ukázal, že nejenže se foton může vyskytovat na dvou místech současně, ale můžeme se rozhodnout, zda se bude chovat klasicky nebo "schizofrenicky" zdánlivě poté, co k danému jevu došlo!

Jednoduchý experiment interference elektronů na dvoušterbině, který poprvé navrhl **Richard Feynman**, byl úspěšně zopakován pro řadu dokonce větších objektů, jako jsou atomy, malé molekuly nebo nedávno molekula C-60. Skupina **Antona Zeilinger**a ve Vídni se zabývá myšlenkou, jak tento experiment provést dokonce pro virus.

Pokud si tento experiment představíme jako myšlenkový pokus, pak malý virus představuje určitý primitivní typ vědomí a mělo by dojít k potvrzení Everettovy interpretace mnoha světů.

Experimenty tedy jasně dokazují, že podivnost kvantového světa je skutečná, ať se nám to líbí nebo ne. Existuje přitom řada praktických důvodů, abychom tuto podivnost přijali jako fakt, protože se brzy stane součástí moderních technologií. Nedávné odhady dokazují, že asi 30 procent hrubého národního důchodu Spojených států amerických pochází z objevů založených na kvantové mechanice. Pokud je fyzika skutečně unitární (vlnová funkce nikdy samovolně nezkolabuje), pak kvantové počítače mohou superpozice kvantových stavů využít pro mnohem rychlejší výpočty, než umožňují klasické algoritmy. Například **Peter Shor a Lov Grover** ukázali, jak lze rychleji prohledávat rozsáhlé seznamy. Kvantové počítače budou v principu paralelními počítači a budou provádět několik výpočtů současně v kvantové superpozici. Jak tvrdí David Deutsch, těžko bude možno odmítnout realitu všech těchto paralelních kvantových stavů, až budou první kvantové počítače v provozu.

Kvantová cenzura - dekoherence

Experimentální výsledky posledních desetiletí 20. století vedly k dalšímu průlomů v teoretickém myšlení. Everettova práce nezodpověděla dvě rozhodující otázky. Především, pokud svět skutečně obsahuje bizarní makrosuperpozice, proč je nevnímáme?

Odpověď se objevila v roce 1970 v práci **Dietera Zeha** z Univerzity v Heidelbergu. **Dieter Zeh** ukázal, že Schrödingerova rovnice v sobě obsahuje určitou cenzuru. Tento jev se označuje jako dekoherence, protože ideální superpozice se označuje jako koherentní. Dekoherencí se v následujících desetiletích podrobně zabývali **Dieter Zeh a Wojciech Zurek** z Los Alamos. Zjistili, že koherentní kvantová superpozice přetrvává pouze do té doby, dokud je skryta ostatnímu světu. Do padající kvantové karty neustále narážejí molekuly okolního vzduchu, fotony a další částice, které získávají informaci o tom, zda karta padá lícem nebo rubem navrch, a tím porušují (prostřednictvím dekoherence) superpozici a činí ji nepozorovatelnou. Tento jev se podobá jevu, kdy interference v klasické optice je narušena slabými poruchami na dráze fotonů, které mění fáze vln těchto fotonů.

Nejjednodušší způsob, jak pochopit kvantovou dekoherenci, je použít zobecnění vlnové funkce, matici hustoty pravděpodobnosti. Ke každé vlnové funkci existuje matice hustoty. K Schrödingerově rovnici pro vlnovou funkci lze sestavit podobnou rovnici pro matice hustot. Například matice hustoty padající kvantové karty v kvantové superpozici může vypadat následovně:

$$\begin{pmatrix} | a, b | \\ | c^*, b | \end{pmatrix}$$

kde c^* je číslo komplexně sdružené k číslu c . Čísla a, b představují pravděpodobnosti toho, že karta dopadne lícem navrch nebo rubem navrch. V našem případě jsou obě pravděpodobnosti rovné $1/2$. Matice hustoty ve tvaru

$$\begin{pmatrix} | a, 0 | \\ | 0, b | \end{pmatrix}$$

reprezentuje klasickou situaci, kdy karta dopadne lícem navrch nebo rubem navrch, ale my neznáme příčinu. Prvky matice mimo hlavní diagonálu (v našem případě c, c^*) představují rozdíl mezi kvantovou neurčitostí superpozice a klasickou neurčitostí (naší neznalostí).

Velmi významným výsledkem teorie kvantové dekoherence je vysvětlení, jak interakce mezi kvantovým objektem a jeho okolím změní prvky matice hustoty mimo hlavní diagonálu na nulu, tedy jak lze "pro všechny praktické účely" nahradit kvantovou superpozici čistě klasickou neznalostí. Pokud váš přítel pozoroval kartu, aniž vám sdělil výsledek, pak v souladu s kodaňskou interpretací zkolabuje její superpozice do klasické neznalosti (na vaší straně), kdy v matici hustoty se prvky mimo diagonálu změní v nulu. Stručně řečeno, teorie dekoherence nám ukazuje, že není potřeba vědomého pozorovatele, aby došlo ke kvantovému jevu.

Kvantová dekoherence vysvětluje, proč běžně nepozorujeme kvantové superpozice ve světě kolem nás. Není tomu proto, že kvantová mechanika nefunguje pro objekty větší než je určitá magická mez. Je tomu proto, že makroskopické objekty, jako jsou kočky a karty, nelze izolovat od okolního světa a tím zabránit kvantové dekoherenci. Mikroskopické objekty lze poměrně snadno izolovat od okolního světa a tím lze zachovat jejich kvantové tajemství a kvantové koherentní chování.

Druhá nezodpovězená otázka v Everettově práci je důmyslnější, ale neméně důležitá: jaký fyzikální mechanismus vede ke klasickým stavům, tedy v případě kvantové karty, že padne líc nebo rub? Z matematického hlediska jsou kvantové stavy "karta lícem navrch plus karta rubem navrch" (stav alfa) nebo "karta lícem navrch mínus karta rubem navrch" (stav beta) stejně reálné jako klasické stavy "karta lícem navrch" a "karta rubem navrch". Karta ve stavu alfa může zkolabovat do stavu "karta lícem navrch" anebo "karta rubem navrch". Pokud je karta ve stavu "lícem navrch", pak jde o stav $(\alpha + \beta)/2$. Proč ale karta z tohoto superponovaného stavu nemůže zkolabovat do stavu alfa, stavu beta nebo do jiného stavu, jehož dekompozicí je právě stav "karta lícem navrch"?

Dekoherence na tuto otázku dává odpověď. Výpočty ukazují, že klasické stavy lze definovat a identifikovat jako stavy, které jsou vůči působení okolního světa odolné. Jinými slovy, dekoherence je schopna učinit více, než jen odstranit nenulové prvky matice hustoty, které leží mimo hlavní diagonálu. Pokud stav alfa a stav beta naší karty vezmeme jako fundamentální základ, matice hustoty pro naši kartu bude diagonální a pro stav alfa má jednoduchý tvar

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Dekoherence může téměř okamžitě tento stav změnit na stav, jehož matice hustoty má tvar

$$\begin{pmatrix} 1/2 & 0 \\ 0 & 1/2 \end{pmatrix}$$

Pokud měříme, zda karta byla ve stavu alfa nebo ve stavu beta, dostaneme náhodné výsledky. Pokud ale karta je ve stavu "lícem navrch", zůstane v tomto stavu bez ohledu na dekoherenci. Podle Zureka kvantová dekoherence nám poskytuje "předpovědní síto", vybírající ty stavy, které mají určitou trvanlivost a které je schopna fyzika předpovědět.

Názorové posuny

Objev kvantové dekoherence a další experimenty, které dokazují kvantovou podivnost, způsobily výrazné názorové posuny v uvažování většiny fyziků. Zavedení nahodilosti a kolapsu vlnové funkce do kvantové fyziky bylo motivováno především snahami vysvětlit, proč vnímáme pravděpodobnosti jevů a nikoliv podivné makrosuperpozice. Dekoherence vysvětlila, proč nikdy nevnímáme nic podivného. Navíc potvrdila, že se nikdy nepodaří sestavit testovatelné deterministické rovnice, které by určovaly, kdy přesně dojde k záhadnému kolapsu vlnové funkce. Pokud bychom přijali Everettovo hledisko, že vlnová funkce nikdy nekolabuje, obecně vzato kvantová dekoherence vede k jevům, které vypadají jako kolaps vlnové funkce a vedou k podobným výsledkům.

V červenci 1999 na konferenci o kvantovém počítání v Ústavu Isaaca Newtona v Cambridge proběhla anketa s následujícími výsledky:

1. Věříte, že nová fyzika porušující Schrödingerovu rovnici znemožní konstrukci velkých kvantových počítačů? (*ano: 1, ne: 70, nerozhodnuto: 24*)
2. Věříte, že všechny izolované systémy se řídí Schrödingerovou rovnicí (vyvíjejí se unitárně)? (*ano: 59, ne: 6, nerozhodnuto: 31*)
3. Která interpretace kvantové mechaniky je nejbližší vašemu názoru?
 - a. Kodaňská interpretace nebo konzistentní historie (obsahující postulát explicitního kolapsu): (4)
 - b. Modifikovaná dynamika (Schrödingerova rovnice modifikovaná tak, aby vedla k explicitnímu kolapsu): (4)
 - c. Mnohosvětová interpretace a konzistentní historie bez kolapsu vlnové funkce: (30)
 - d. Bohmova interpretace (ontologická interpretace, kde pomocná "pilotní vlna" umožňuje, aby částice měly dobře definované polohy a rychlosti): (2)

e. Žádná z výše uvedených a nerozhodnutí: (50)

Je třeba být velmi opatrný, při hodnocení různých názorů. Není nezvyklé, že dva fyzikové, kteří se snaží popsat kodaňskou interpretaci, se neshodnou, co svým popisem myslí. Podobně někteří chápou interpretaci s "konzistentními historiiemi" (kde fundamentálními objekty jsou konzistentní množiny klasických historií) jako v principu náhodnou, v níž Bůh hraje v kostky, zatímco jiní tuto interpretaci chápou v deterministickém kontextu "mnohsvětové interpretace".

Uvedený dotazník naznačuje, že nastal čas zmodernizovat současné učebnice kvantové mechaniky. Přestože většina z těchto učebnic považuje explicitní neunitární kolaps vlnové funkce za základní postulát, řada fyziků, přinejmenším těch, kteří se zabývají kvantovými počítači, tento postulát nebere vážně. Kolaps vlnové funkce je nepochybně důležitým nástrojem při výpočtech, ale zároveň není nějakým základním procesem, který porušuje Schrödingerovu rovnici.

Rakouský etolog **Konrad Lorenz** (etologie je nauka o chování zvířat) kdysi uvedl, že důležité vědecké objevy procházejí třemi fázemi vývoje. V první fázi jsou zcela ignorovány. V další fázi jsou podrobeny ostré kritice a útokům. Teprve ve třetí fázi jsou všeobecně přijaty. Přestože při studiu dekoherence bude třeba ještě řada kvantitativních experimentů, zřejmě dekoherence postoupila do své třetí fáze. Řada fyziků zabývajících se kvantovými počítači se soustředila na omezení dekoherence v kvantových výpočtech. Výsledky ankety naznačují, že řada fyziků se z první fáze postojů k dekoherenci přesouvá do druhé a třetí fáze.

Jak to všechno funguje?

Pokud unitaritu a dekoherenci chápeme vážně, pak se vesmír rozpadá do třech částí. Jednou částí je subjekt, další je objekt a poslední je prostředí.

Subjekt působí na objekt vědomou akcí, tedy provádí měření a pozorování a tím působí "kolaps vlnové funkce". Objekt působí na subjekt výsledky měření a pozorování.

Subjekt působí na prostředí subjektivní dekoherencí, tedy dokončením svého rozhodnutí. Objekt pak působí na prostředí objektivní dekoherencí.

Richard Feynman ukázal, že kvantová statistická mechanika rozděluje vesmír (jeho stupně volnosti) na dva podsystemy: uvažovaný objekt a všechno ostatní (prostředí). Abychom pochopili proces měření, musíme použít ještě třetí podsystem, subjekt, představující mentální stav pozorovatele. Užitečnou standardní metodou je rozdělit Schrödingerovu rovnici, popisující časový vývoj vesmíru jako celku, na členy, které popisují vnitřní dynamiku každého zmíněného podsystemu, a na členy, které popisují interakce mezi těmito podsystemy. Tyto členy mají kvalitativně velmi odlišné vlastnosti.

Člen popisující dynamiku objektu je obvykle nejdůležitější, zatímco ostatní členy jsou obvykle ignorovány. Uvažujme znovu kvantové karty s objektem, jímž je "poloha karty". V tomto případě dynamikou objektu je skutečnost, že karta spadne na svoji lícni nebo rubovou stranu v superpozici. Když se pozorovatel dívá na kartu, interakce mezi objektem a subjektem vede k superpozici stavu karty s mentálním stavem pozorovatele. Tato superpozice ale nezpůsobí nějaký "schizofrenický" stav mysli, protože interakce mezi objektem a prostředím způsobí rychlou dekoherenci a tato superpozice zůstane naprosto nepozorovatelná. Tuto dekoherenci nelze ani v principu odstranit. Představme si ideální kartu v ideálním prostředí ve vakuu, bez vlivu jakýchkoliv vnějších polí a záření. Přinejmenším jeden neuron v optických nervech pozorovatele bude v superpozici své aktivity a pasivity při pohledu na kartu. Tato superpozice podlehe dekoherenci za dobu asi 10^{-20} sekundy podle současných výpočtů.

Problémem zůstává, že myšlenkové procesy (vnitřní dynamika subjektu) mohou vytvářet superpozice mentálních stavů, které nemůžeme vnímat. **Roger Penrose** a někteří další proto navrhnou, že myšlenkové procesy v našem mozku probíhají podobně jako výpočty v kvantových počítačích. Neurony podlehnou dekoherenci mnohem rychleji, než jsou schopny zpracovat jakoukoliv informaci (změna stavu neuronu vyžaduje nejméně 10^{-3} sekundy). Pokud složité neuronové obrazce v našem mozku mají souvislost s vědomím, pak kvantová dekoherence zabraňuje, abychom si podivné superpozice uvědomovali.

Jak bylo uvedeno dříve, uvědomujeme si pouze takové aspekty fyzikálního světa, které jsou odolné vůči dekoherenci. Naše pozorování a vnímání prochází do neuronů ze sensorických orgánů. Neurony podléhají

dekoherenci a tento proces vytváří principiální rámec našeho vnímání reality. Zde Dieter Zeh vidí oprávnění používat postulát o kolapsu vlnové funkce jako užitečný návod pro výpočty. Počítejme pravděpodobnosti, jako kdyby docházelo ke kolapsu vlnové funkce, když pozorujeme objekt. Přesněji řečeno, naše neurony trvale přecházejí do superpozice různých mentálních stavů, ale dekoherence zabraňuje, abychom si tyto superpozice jakkoliv uvědomovali. Subjektivně jsme přesvědčeni, že vnímáme určité malé nahodilosti, které tolik trápily **Alberta Einsteina**.

Základní otázka zůstává: lze kvantovou mechaniku pochopit prostřednictvím nějakých hlubších principů? Kam kráčí kvantová mechanika?

Pohled do budoucnosti

Přestože úvahy o ontologii a nejhlubší podstatě přírody často přinesly své plody v diskusích, jak interpretovat kvantovou mechaniku, jde zřejmě jen o malou část větší hádanky. Všechny vědecké teorie přírodních a humanitních věd jsou navzájem těsně provázány a přinejmenším v principu lze každou teorii odvodit z teorií základnějších.

Všechny teorie mají dvě části: matematické rovnice a slovní popis, který vysvětluje, jak souvisejí s tím, co pozorujeme. Kvantová mechanika, jak je obvykle popisována v učebnicích, má obě tyto části: některé rovnice, stejně jako její tři základní postuláty, lze vysvětlit slovním popisem. Na každé úrovni této hierarchie poznání jsou zaváděny nové koncepty (jako protony, atomy, buňky, organismy nebo kultury), protože vystihují podstatu a obsah teorií, aniž by bylo nutné se odkazovat na teorie na nižších úrovních. Je třeba mít vždy na paměti, že lidé zavádějí nové koncepty a jejich slovní popisy. **John Archibald Wheeler a Max Tegmark** věří, že v principu lze všechno odvodit z nějaké fundamentální teorie, avšak pochybují, že by takový extrémní redukcionismus měl nějaký praktický význam. Poměr rovnic ke slovnímu popisu směrem k humanitním vědám klesá a v medicíně nebo v psychologii dosahuje téměř nuly. Naproti tomu fyzikální teorie na nejnižší úrovni reality jsou čistě matematické a fyzikové často bojují s chápáním jejich konceptů a vyjádření, jemuž bychom my ostatní mohli alespoň zhruba porozumět.

Svatým Grálem teoretické fyziky je objevit finální teorii, fyzikální "teorii všeho". Pokud taková teorie existuje, měla by sjednotit teorii gravitace (tedy obecnou teorii relativity) s kvantovou mechanikou. Abychom se vyhnuli nekonečné řadě teorií, kde každý koncept teorie vyšší úrovně je vysvětlován pomocí pojmů teorie na nižší úrovni, teorie všeho zřejmě nebude obsahovat žádné koncepty. Jinými slovy, teorie všeho bude čistě matematickou teorií a nebude obsahovat žádná vysvětlení nebo "postuláty", jako je tomu v kvantové mechanice. Poznamenejme, že matematikové často studují čistě abstraktní matematické struktury bez jakékoliv vazby k fyzikální realitě. Nekonečně inteligentní matematik by byl schopen odvodit všechny teorie ze základních rovnic teorie všeho.

Za sto let své existence kvantová mechanika dosáhla zcela ojedinělého pokroku. Avšak před fyzikou stojí nové zásadní otázky týkající se kvantové gravitace a základní povahy přírody. 21. století bude zřejmě plné nových překvapení.

Max Tegmark je docentem fyziky na Pennsylvánské univerzitě. **John Archibald Wheeler** je emeritním profesorem fyziky v Ústavu pro pokročilá studia v Princetonu. Mezi jeho žáky patřili mimo jiné **Richard Feynman a Hugh Everett III.** V roce 1997 obdržel Wolfovu cenu za fyziku za svoji práci na jaderných reakcích, v kvantové mechanice a v teorii černých děr.

Pokud život považujeme za jev, který vznikl v měřítku velmi vzdáleném od subatomového a kosmologického měřítko, pak fakt, že hodnoty fundamentálních fyzikálních konstant a kosmologické charakteristiky našeho vesmíru jsou tak přesně vyladěny, aby umožnily vznik života, je velmi nepravděpodobný a záhadný. **John Archibald Wheeler** [6] napsal, že nejen člověk je přizpůsoben vesmíru, ale vesmír je přizpůsoben člověku. Pokud si představíme

vesmír, v němž se jedna ze základních bezrozměrných fyzikálních konstant změnila o několik procent, pak v takovém vesmíru by člověk nikdy nemohl vzniknout a ani by nemohl existovat. To je ústředním bodem anthropického principu. Podle tohoto principu někde uvnitř celého mechanismu a struktury vesmíru musí existovat faktor, který umožnil vznik života.

Podle druhé interpretace existuje velký počet vesmírů a náš vesmír je jedním z těch, v němž jsou podmínky vhodné pro vznik a vývoj života. Existují tři variace této interpretace mnoha vesmírů. Podle první z nich existuje mnoho paralelních vesmírů, které jsou na sobě zcela nezávislé. Podle druhé z nich existuje mnoho sekvenčních, tedy po sobě jdoucích vesmírů. Podle této hypotézy cyklického vesmíru **Johna Archibalda Wheelera** každým velkým třeskem je náhodně vybrán nový soubor fyzikálních zákonů a nový soubor fundamentálních fyzikálních konstant. Podle třetí variace existuje mnoho domén v jednom supervesmíru, přičemž fundamentální fyzikální konstanty jsou v každé doméně různé. Jiné domény našeho supervesmíru nejsme schopni detekovat, protože jsou od nás vzdáleny více než 14 miliard světelných let, což je největší vzdálenost, jíž světlo mohlo proletět od Velkého třesku.

V roce 1971 John Archibald Wheeler pojmenoval takové objekty jako černé díry, protože z nich nemůže uniknout ani světlo. Astronomové začaly černé díry hledat podle různých kritérií (obvykle se zkoumaly hvězdné soustavy, v nichž zřídka složka se pohybovala kolem neviditelného objektu, nebo soustavy s výrazným rentgenovým zářením, které je způsobeno ohříváním plynu tekoucího ze světlicí složky na černou díru).

JOHN ARCHIBALD WHEELER

Čas - to je prostě způsob, jakým příroda zajišťuje, aby se všechno neodehrálo najednou.

<http://dvouvelicinovyvesmir.wz.cz/b/b25.doc> 31.05.2004

<http://astronuklfyzika.cz/GravitaceB-3.htm> V.Ullmann

B.3. Wheelerova geometrodynamika. Gravitace a topologie.

V jistém smyslu pokračovatelem Einsteinových snah o vytvoření unitární teorie pole, avšak poněkud jinou cestou, se stal americký fyzik John Archibald Wheeler, který s dalšími spolupracovníky, především Ch.Misnerem, vyšel z původní (ověřené a osvědčené)

Einsteinovy obecné teorie relativity. Ukázal, že k tvoření klasické unitární teorie pole (a daleko dokonalejší než byly předchozí snahy) není třeba do obecné teorie relativity zavádět žádné umělé a neopodstatněné změny, stačí jen plně využít všech geometrických a topologických možností, jež obecná teorie relativity poskytuje.

V kapitole 2 jsme si ukázali, že obecná teorie relativity svrhla prostor a čas z postavení jakési nezúčastněné "scény", na níž se odehrávají fyzikální děje, a učinila prostoročas přímým účastníkem fyzikálního dění. Gravitační pole je podle OTR projevem křivosti prázdnoho prostoročasu - máme tedy jakousi "**gravitaci bez gravitace**".

Jak bylo ukázáno v §2.5, Einsteinovy rovnice gravitačního pole $R_{ik} - 1/2 g_{ik}R = 8\pi T_{ik}$ mají tu důležitou vlastnost, že popisují chování nejen gravitačního pole, ale nepřímo (přes zákony zachování energie a hybnosti $T^{ik}_{;k} = 0$) i jeho zdrojů. Vezmeme-li tedy elektromagnetické pole ve vakuu, pak z Einsteinových rovnic jím buzeného gravitačního pole

$$R_{ik} - 1/2 g_{ik} R = 2 F_{il} F^l_k - 1/2 g_{ik} F_{lm} F^{lm} \quad (B.7)$$

plynou i Maxwellovy rovnice tohoto elektromagnetického pole $F^{ik}_{;k} = 0$. Pokud je zakřivení prostoročasu způsobeno elektromagnetickým polem, potom stopa Einsteinova tenzoru na levé straně (B.7) musí být rovna nule, což dává $R = 0$ a dále kvadrát Ricciho tenzoru $R^m_i R^k_m = \delta^k_i \cdot (1/2 R_{lm} R^{lm})$ je násobkem jednotkové matice.

Einsteinovy a Maxwellovy rovnice (což jsou soustavy rovnic 2.řádu) se tedy dají **sloučit** do jedné soustavy rovnic 4.řádu [213], která v geometrickém tvaru obsahuje jak Maxwellovu elektrodynamiku (bez nábojů) v zakřiveném prostoročase, tak i Einsteinovy rovnice udávající zakřivení prostoročasu tímto elektromagnetickým polem *). Elektromagnetické pole zanechává na geometrii prostoročasu charakteristické "stopy", z nichž jej lze "poznat" a jejichž chováním je určeno. Elektromagnetické pole (které je takto určeno výrazem obsahujícím odmocniny Ricciho tenzoru křivosti R_{ik}) lze tedy plně popsat pomocí pouze gravitačních veličin, v konečném důsledku pomocí složek metrického tenzoru. Maxwellovy rovnice jsou pak dány vztahem mezi Ricciho křivostí a rychlostí, s jakou se tato křivost mění; zákony elektrodynamiky tak nabývají čistě **geometrický charakter**. Dostáváme jakýsi "**elektromagnetismus bez elektromagnetismu**", v němž elektromagnetické pole je projevem prázdnoho zakřiveného prostoročasu.

*) Ukázalo se však [281], že při integraci těchto rovnic mohou příslušné Cauchyovy okrajové podmínky odpovídat současně více než jednomu maxwellovskému poli. Uvedená metoda geometrického popisu elektrodynamiky se tím stává nejednoznačnou.

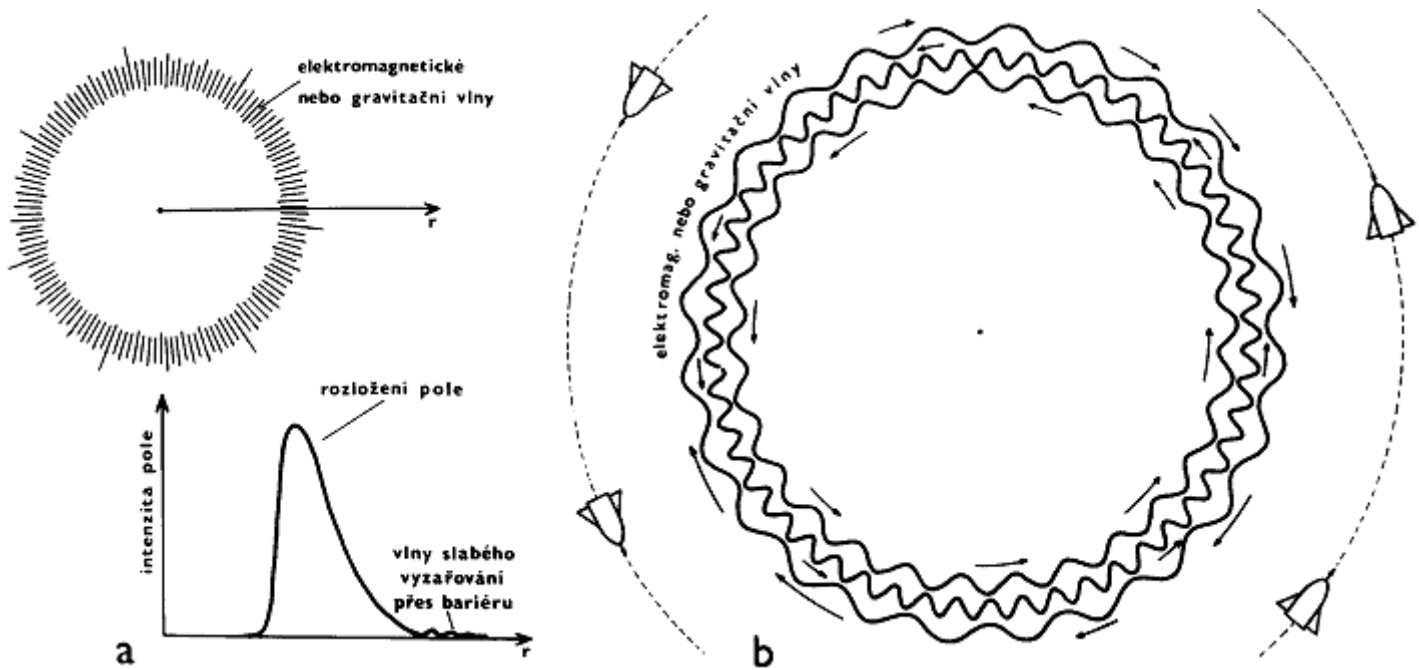
Misner a Wheeler (s použitím dřívějších výsledků Rainicha) tedy dospěli k závěru, že již původní Einsteinova obecná teorie relativity do značné míry splňuje to, oč se Einstein do

konce života bezúspěšně snažil: jednotný popis gravitačního a elektromagnetického pole. A přitom popis zcela přirozený a nenásilný, při němž se dosavadní teorie nijak nemění.

Na začátku tohoto dodatku (§B.1) jsme zdůraznili neuspokojivost koncepce, podle níž je pole buzeno zdrojem odlišným od pole. Pro elektromagnetické pole jako zdroj gravitace byla situace shora úspěšně vyřešena (aspoň v zásadě), avšak v klasické fyzice je zdrojem gravitace též (a především) obecná, blíže nespecifikovaná a nestrukturovaná hmota - objekty (tělesa, částice) mající hmotnost. V předchozích unitárních teoriích se částice pokoušeli interpretovat jako nějaké zvláštnosti (singularities) v poli, což však vede k řadě potíží (srovnej §3.7), nebo jako nějaké spojité struktury mající své zákony vnitřního pohybu; tyto zákony vnitřního pohybu však byly zavedeny zvenčí a nebylo jasné, jak je odvozovat v rámci uzavřené teorie. Jinak je tomu v geometrodynamice.

Vezmeme-li Schwarzschildovu geometrii v prázdném asymptoticky rovinném prostoročase, bude ve velkých vzdálenostech od středu platit obyčejný gravitační zákon stejně, jako kdyby ve středu byla reálná hmota. Jedná se tedy o prázdný zakřivený prostor, v němž působí gravitační přitažlivost, takže Schwarzschildova geometrie je nejjednodušším geometrodynamickým modelem "hmoty bez hmoty". Je to ale model s topologií odlišnou od eukleidovské a obsahuje singularitu (§3.4).

Zákony obecné teorie relativity však připouštějí existenci objektů s obvyklou eukleidovskou topologií a bez singularit, chovajících se jako skutečná hmota (budící gravitační pole i na toto pole reagující), přičemž tyto objekty jsou složeny čistě ze samotného pole. Šíří-li se prostorem elektromagnetické vlny, budí kolem sebe gravitační pole - zakřívují prostoročas v němž se šíří, a to nezůstává bez vlivu na jejich pohyb. Podle obecné teorie relativity mohou velmi mohutné elektromagnetické vlny kolem sebe vytvořit tak silné gravitační pole, že jím budou nuceny trvale se pohybovat po uzavřených drahách. Elektromagnetické vlny si tak samy vytvářejí kolem sebe akýsi gravitační "vlnovod" ze zakřivené geometrie prostoročasu (z gravitačního pole), v němž trvale cirkulují - obr.B.2a. Takový útvar z elektromagnetických vln, udržovaný pohromadě vlastní gravitací, se nazývá (elektromagnetický) **geon** [284].



Obr.B.2. Mohutné elektromagnetické nebo gravitační vlny mohou kolem sebe vytvořit tak silné gravitační pole (zakřivit prostoročas), že jím budou trvale nuceny cirkulovat v uzavřeném "gravitačním vlnovodu" - vzniká metastabilní hmotný útvar **geon**.

a) Průměrné rozložení pole v geonu.

b) Svými gravitačními účinky se geon chová jako každá jiná hmota (třebas planeta) - můžeme např. na oběžnou dráhu kolem geonu uvést družici.

Ke geonu je možno dospět např. následujícím myšleným pokusem: Mějme černou díru hmotnosti \underline{M} , na jejíž fotonovou sféru $r=3M$ (§4.3) budeme posílat mohutné dávky elektromagnetických vln. S rostoucím množstvím energie elektromagnetických vln obíhajících po fotonové sféře budou tyto vlny stále více přispívat k celkovému gravitačnímu poli které je udržuje, takže o příslušnou hodnotu můžeme zmenšit hmotnost černé díry (ve skutečnosti je to však zakázáno 2.zákonem dynamiky černých děr - viz §4.6). Při dostatečně velkém nahromadění elektromagnetických vln můžeme černou díru již zcela odstranit, protože energie~hmotnost samotných vln již stačí vytvořit dostatečně silné gravitační pole aby udržovala samu sebe na "fotonové sféře".

Jestliže geon celkové hmotnosti \underline{M} bude sféricky symetrický, bude vzbuzovat sféricky symetrické gravitační pole a prostoročasová metrika bude (srovnej s §3.4)

$$ds^2 = - g_{tt} dt^2 + g_{rr} dr^2 + r^2(d\vartheta^2 + \sin^2\vartheta d\varphi^2) .$$

Radiální složka metriky má obvyklý Schwarzschildovský tvar $g_{rr} = 1/[1 - 2m(r)/r]$, kde $m(r)$ je hmotnost~energie obsažená uvnitř koule o poloměru r . Časová složka metriky vně geonu

má též Schwarzschildovský tvar $g_{tt} = 1 - 2M/r$, uvnitř geonu má hodnotu $g_{tt} = 1/9$ (čas uvnitř geonu plyne třikrát pomaleji než daleko od geonu). Geon není stabilní, ale pouze metastabilní - část energie vln proniká přes odstředivou a gravitační bariéru, geon se pomalu rozplývá (tím pomaleji, čím větší je počet vlnových délek po obvodu), nebo naopak může zkolabovat a vytvořit černou díru. Pro vzdáleného pozorovatele bude geon vykazovat gravitační účinky jako každá jiná hmota (třebas planeta) - můžeme např. na oběžnou dráhu kolem geonu uvést družici (obr.B.2b).

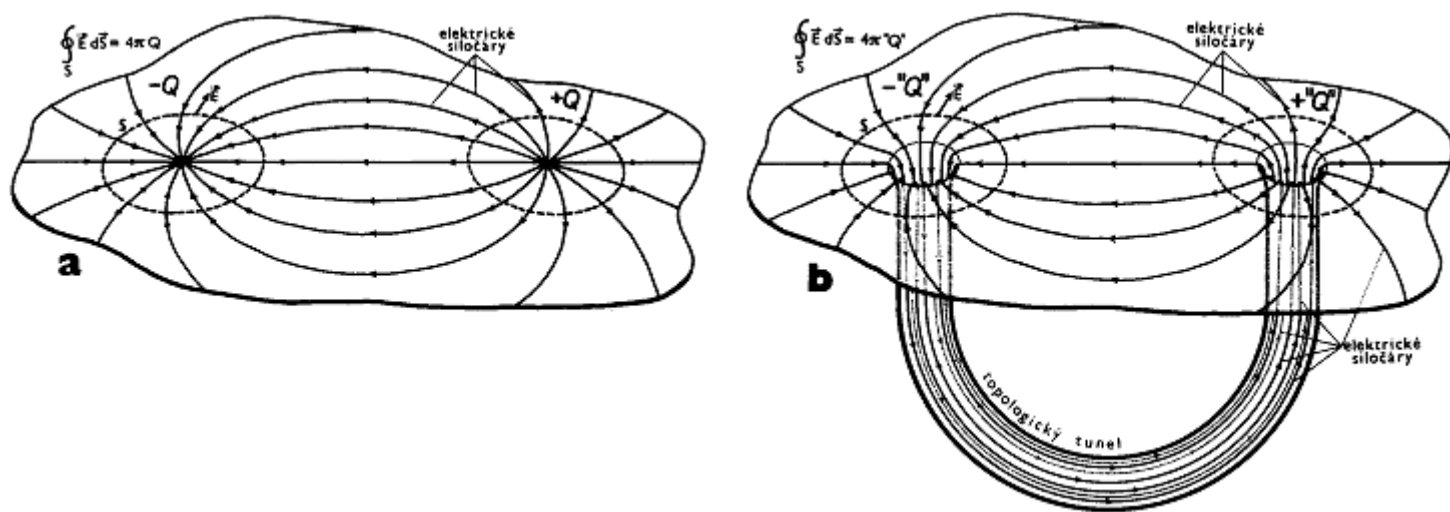
Taková hmota složená z elektromagnetických vln se nám může zdát sice zvláštní, avšak hmotná povaha elektromagnetických vln je dostatečně vžitá. Ještě sugestivnější obraz dostaneme, když nahradíme elektromagnetické vlny vlnami gravitačními. Gravitační vlny rovněž přenášejí energii (§2.7 a 2.8), zakřivují prostoročas (univerzální buzení gravitace) a podle obecné teorie relativity mohou též vytvořit "gravitační" geon, který se bude navenek svými gravitačními účinky projevovat jako skutečná hmota.

Co jsou to však gravitační vlny? Gravitační vlny jsou vlněním gravitačního pole, tedy fluktuacemi geometrie prázdného prostoročasu. Vnější pozorovatel se tak stává svědkem zajímavé věci: vlnící se křivost prázdného prostoročasu "bez hmoty" se bude jevit jako hmotný útvar! Gravitační geon je tedy názorným modelem jakési "**hmoty bez hmoty**", hmoty utvořené doslova z "prázdnoty" prostoru s vlnící se křivostí. Zde je třeba říci, že celá koncepce geometrodynamiky se setkává s určitými filosoficko-metodologickými problémy; neznamená to však, že by uvedené koncepce odporovaly základním postulátům materialistické filosofie *), která je přirozenou platformou fyziky a přírodovědy vůbec. *) Sledujeme-li totiž hmotu buď ve stále menších měřítcích mikrosvěta, nebo naopak ve stále větších měřítcích megasvěta, bude hmota postupně ztrácet některé atributy na něž jsme zvyklí z běžné zkušenosti našeho makrosvěta a případně se začnou objevovat atributy nové. Vždy však zůstává základní znak hmoty - být **objektivní realitou**.

Hypotetický geon je však jen určitým extrémním příkladem konstrukce hmotného objektu z geometrie prostoročasu; fakticky každá gravitační vlna popsaná svým **Isaacsonovým tenzorem nelokální energie-hybnosti** (viz §2.8) je takovou "hmotou bez hmoty", složenou z "vakua" chápaného v obvyklém smyslu. To, jak se i v "prázdném" prostoru bez obvyklých hmotných zdrojů objeví jakási efektivní hmota mající globální gravitační účinky, je ostatně podobné situaci v elektrodynamice, kde se i ve vakuu bez nábojů (a proudů) pro nestacionární elektromagnetické pole objevuje **Maxwellův posuvný proud** mající magnetické účinky stejné jako "skutečný" proud elektrických nábojů.

Topologická interpretace elektrického náboje

Všimněme si nyní **elektrických nábojů**. Elektrické náboje (a jejich proudy) jsou zdroji elektromagnetického pole, avšak jsou zároveň čímsi cizorodým v teorii samotného elektromagnetického pole - jakási substance odlišná od pole. V místech kladných elektrických nábojů elektrické siločáry začínají a vycházejí na všechny strany, do míst záporných elektrických nábojů siločáry ze všech stran vstupují a tam končí (obr. B.3a); Maxwellovy rovnice pole zde neplatí. Celkový elektrický náboj v libovolné části prostoru lze podle Gaussovy věty zjistit tak, že vyšetřovanou oblast obklopíme (myšlenou) uzavřenou plochou S a změříme intenzitu E elektrického pole ve všech místech této uzavřené plochy - určíme "počet siločar" které jdou dovnitř nebo ven (obr. B.3a).

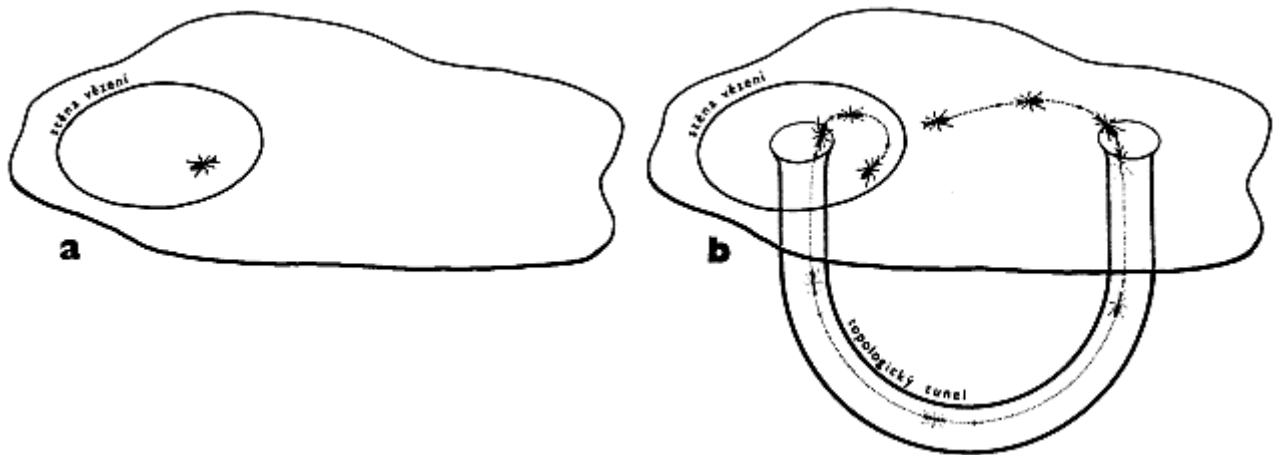


Obr.B.3. Klasická a topologická interpretace elektrických nábojů.

- a) Obvyklé chápání elektrického náboje Q jako "substance"; z níž vycházejí (nebo do níž vcházejí) siločáry buzeného elektrického pole.
- b) Topologická interpretace elektrického náboje - neexistuje žádný "skutečný" náboj jako substance, siločáry nikde nezačínají ani nekončí, jsou jen zachyceny a procházejí topologickým tunelem, jehož hrdla se pak jeví jako "zdánlivé" náboje " Q ".

Nemohou se však siločáry, které jdou dovnitř, nějak "nepozorovaně" dostat zase ven aniž bychom to zaznamenali na uzavřené ploše tento vnitřek ohraničující (nebo podobně siločáry jež jdou ven se dostat zpět dovnitř)? Na první pohled se taková otázka zdá být absurdní. Uzavřeme-li přece někoho ze všech stran do vězení, je podle zdravého rozumu nemyslitelné, aby se dostal ven aniž by musel projít stěnou svého vězení (probourat zeď, otevřít v ní dveře).

Nakresleme si tuto situaci v dvojrozměrném případě na kus papíru; místo lidí si myslíme mravence, které zde budeme považovat za dvojrozměrné bytosti (obr.B.4). Na obr.B.4a má dvojrozměrný svět mravenců obvyklé vlastnosti a vězeň nacházející se uvnitř uzavřené křivky se skutečně nijak nemůže dostat ven aniž by prošel touto hranicí svého vězení.



Obr.B.4. Vliv topologických vlastností prostoru na možnosti pohybu.

- a) Vězeň (mravenec) obklopený ze všech stran stěnou vězení se v prostoru (zde dvojrozměrném) s obvyklými topologickými vlastnostmi nijak nemůže dostat ven, aniž projde stěnou vězení.
- b) V prostoru s vícenásobně souvislou topologií lze opustit uzavřené vězení bez nutnosti projít jeho stěnou. Mravenec může projít topologickým tunelem a podívat se zvenku na neporušenou stěnu svého vězení.

Co však když dvojrozměrný svět mravenců vypadá topologicky tak, jak je to znázorněno na obr. B.4b? Mravenec uvězněný v oblasti ze všech stran obklopené uzavřenou křivkou (stěnou vězení) může projít "tunelem" a podívat se zvenku na svoje vězení bez toho, že by musel projít v některém místě uzavřenou stěnou svého vězení. Z hlediska trojrozměrného okolí, do něhož je tato konstrukce vnořena, na tom není nič divného - mravenec, i když se pohybuje stále v rámci své dvojrozměrné plochy (svého světa), "podleze" stěnu svého vězení tak říkajíc přes "další rozměr". Z hlediska samotných dvojrozměrných mravenců, pro které žádný "třetí rozměr" neexistuje, se však stal jakýsi zázrak: vězeň ze všech stran obklopený zdí se najednou odněkud zvenku přišel podívat na neporušenou stěnu svého vězení! Příčina je v tom, že uvedený dvojrozměrný prostor má **jiné topologické vlastnosti** než na obr.B.4a. Je vícenásobně souvislý. Uzavřená křivka zde již nemusí být hranicí oblasti uvnitř! Lokální geometrické vlastnosti v každém místě přitom mohou být zcela obvyklé (jen mírné zakřivení).

Nyní se již můžeme opět vrátit k elektrickým nábojům. Na obr.B.3a je obvyklým způsobem v dvojrozměrném nákresu znázorněn kladný a záporný elektrický náboj - z kladného náboje podle dohody siločáry vycházejí a končí na záporném náboji. Obklopíme-li náboj myšlenou uzavřenou plochou S , můžeme "spočítáním" siločar jež vcházejí nebo vycházejí stanovit hodnotu náboje Q uvnitř. Tam však žádný "skutečný" elektrický náboj nemusí být! Při vhodné topologii prostoru (jak je znázorněno na obr.B.3b) sice budou uzavřenou plochou S siločáry vstupovat dovnitř, tam však nebudou končit, ale topologickým "tunelem" **projdou do jiného místa prostoru**, odkud budou zase vycházet a vracet se zpět. Vnějšímu

pozorovateli, který bude měřit elektrické pole, se jedno "ústí tunelu" bude jevit jako záporný náboj $-Q$ (siločáry jdou dovnitř) a druhé hrdlo tunelu jako kladný náboj $+Q$ (siločáry jdou ven). Elektrické pole, jehož siločáry procházejí topologickým tunelem, všude vyhovuje Maxwellovým rovnicím. V důsledku toho se celkový tok intenzity elektrického pole přes ústí tunelu nemůže měnit s časem, pokud se nemění topologie; nezáleží přitom na proměnnosti elektromagnetického pole, zakřivení prostoru, změnách "průřezu" topologického tunelu ani vzdálenosti obou jeho ústí. Tok elektrického pole každou uzavřenou plochou \underline{S} obklopující tunel

$$\oint_{\underline{S}} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = 4\pi Q$$

tedy vyhovuje zákonu zachování elektrického náboje a Gaussově větě elektrostatiky.

Taková **topologická interpretace elektrického náboje** je vlastně "**nábojem bez**

náboje": žádné "skutečné" elektrické náboje neexistují, elektrické siločáry nemají začátky ani konce, jsou pouze zachyceny a procházejí topologickým tunelem prostoru, jehož jednotlivá ústí se pak jeví jako kladné a záporné náboje Q . Tedy volné elektromagnetické pole ve vakuu bez nábojů může vlivem vhodné topologické struktury prostoru vytvářet (efektivní) elektrické náboje. Elektrický náboj se v této teorii objevuje jako nelokální vlastnost elektrodynamiky (bez zdrojů) ve vícenásobně souvislém prostoru.

*****.

a) Everetova-Wheelerova interpretace kvantových zákonitostí

Existuje nekonečně mnoho vesmírů v konfiguračním prostoru kvantové mechaniky. Při každé interakci se realizuje nejen výsledný stav v našem vesmíru, ale i všechny ostatní možné stavy v jednotlivých vesmírech - realizují se všechny "promarněné šance" z našeho vesmíru.