

JEŠTĚ O ČASE

Jan Novotný

Katedra teoretické fyziky a astrofyziky PŘF UJEP
611 37 Brno, Kotlářská 2

Tento doplněk k mému příspěvku v Dialozích 1 (D1/31-38) je pokusem více vyhovět záměru organizátorů "zabývat se tím, jak by ve fyzikálním vzdělávání na různých úrovních měly být budovány, resp. zaváděny vybrané pojmy" /1/. Zároveň zahrnuje některé náměty, které přinesla diskuse v pracovní skupině A3.

Jak jsem se snažil ukázat, čas vystupuje v lidské zkušenosti i ve vědách zejména v těchto podobách:

- (1) Doba trvání objektu mezi dvěma událostmi - vlastní čas.
- (2) Datum umožňující - spolu s prostorovými souřadnicemi - identifikaci události - čtvrtá souřadnice.
- (3) Ukazatel směru vývoje od minulosti k budoucnosti - šipka času.
- (4) Hranice mezi tím, co se již stalo, a co se teprve stane, realizace události - přítomnost.

Aspekty (1) a (2) byly již fyzikou velmi hluboce pochopeny a popsány. Toto poznání, obsažené zejména v díle I. Newtona a A. Einsteina, lze považovat za pevný základ, který asi ani dalším vývojem fyziky nebude podstatně změněn, i když může být ze strany kvantové fyziky a kosmologie podložen hlouběji /2/. Proto je předmětem výuky na řadě úrovní. V našem náčrtu, jak by mohly být představy o čase zaváděny, se soustředíme hlavně na tento pevný základ (aspekty 1 a 2).

1. Vlastní čas

Doba trvání může být měřena hodinami, což je v nejobecnějším smyslu dostatečně hustá řada rozlišitelných událostí spojených s daným objektem. V souladu s naším spojitým vnímáním času a možností zjemňovat časovou stupnici vkládáním dalších událostí považujeme údaj hodin za reálné číslo. Zkušenost ukazuje, že hodiny založené na periodických procesech různého druhu mají - alespoň přibližně - tyto vlastnosti:

- (a) Poměry časových intervalů měřených různými hodinami zůstávají během jejich společného pohybu konstantní.
- (b) Tvzení (a) platí i v případě, že v mezidobích se hodiny pohybovaly různě.

První skutečnost je projevem nezávislosti fyzikálních zákonů na čase - homogenity času -, druhá vyjadřuje jeho integrabilitu - možnost jednoznačného přenosu zvolené časové jednotky.

Poznamenejme, že požadavky (a), (b) nejsou apriorní nutností. V historii fyziky sehrály roli i teorie s neintegrabilním časem /3/ či s rozdílnými mírami času /4/. Současná fyzika však ukazuje (např. /5, 6/), že jejich platnost je nejen s vysokou přesností zaručena u hodin atomových, ale potvrzuje se i teoreticky tím, že případné odchylky lze vysvětlit jako projev vnějších vlivů a mohou být korigovány. Tak dospíváme k pojmu ideálních hodin, které měří vlastní čas. Vlastní čas τ je (při zvolené časové jednotce) délkou světočáry, která již nemusí odpovídat reálnému pohybu hodin - je to doba trvání, kterou by směřily ideální hodiny, pokud by se daným způsobem pohybovaly. Znalost fyzikálních zákonů umožňuje extrapolovat pojem délky světočáry i do oblastí, v nichž ani atomové hodiny nemohou fungovat, jako je tomu v raných fázích kosmologického vývoje.

2. Čtvrtá souřadnice

Hodiny, které vyplňují dostatečně hustě jistou prostorovou oblast, definují v ní vstátný systém. (Předpokládáme, že jsou prakticky bodové a vzájemně se nestrážejí - může přitom jít o hodiny pouze myšlené, tj. o soubor parametrizovaných světočar.) Jednotlivé hodiny jsou rozlišeny trojicí prostorových souřadnic x^α ($\alpha = 1, 2, 3$), které mohou být křivočaré. Pro rozlišení událostí je třeba zadat ještě čtvrtou souřadnici, kterou je údaj na hodinách $t = x^4$, tedy souřadnicový čas. Tak dospíváme k pojmu čtyřrozměrného prostoročasového kontinua.

Čas t nemusí být vlastním časem. Po hodinách, které jej určují, požadujeme pouze, aby se nezastavovaly. Časová data na různých světočarách je však vhodné vázat podmínkou, která je dosti přísná. Existuje-li jistá mezní rychlost šíření signálů c (podle teorie relativity rychlost světla), nemělo by být možné spojit události o stejném t signálem o rychlosti $v \leq c$. Jinými slovy události o stejném t nemohou být příčinně spojeny (problémy ohledně existence tachyonů a jejich vztahu k příčinnosti zde necháváme stranou). Soubor hodiněk účastníků našeho semináře tuto podmínku určitě nesplňoval. Zvolíme-li pevně t na Zemi, pak interval, v jehož rámci může být voleno t na Měsíci, je asi 3 s. Pomalost našich relativních pohybů ve srovnání s rychlostí světla způsobuje, že vzdálenost k Měsíci se nám jeví "velká" ve srovnání se sekundou. Proto v běžném

životě i v předrelativistické fyzice je považována mezní rychlost za nekonečnou, což má za následek jednoznačné stanovení okamžiku $t = \text{konst}$ na všech hodinách, a tedy zavedení absolutní současnosti newtonovské fyziky.

Avšak i mimo newtonovskou fyziku by mohlo být výhodné podrobit časovou souřadnici podmínkám

- (i) čas t je identický s vlastním časem τ (se společnou jednotkou na všech hodinách) a
- (ii) současnost $t = \text{konst}$ je volena tak, aby odpovídala synchronizaci hodin pomocí výměny signálů o mezní rychlosti.

Vztažný systém s touto volbou časové souřadnice se nazývá systémem synchronním. V předrelativistické fyzice s jednoznačně určenou současností byla synchronizace ideálních hodin nezávislá na jejich pohybu. Proto jsou běžné představy o čase spjaty s jednoznačnou synchronizací hodin a překonání těchto představ v díle klasiků teorie relativity znamenalo překročení obtížné psychologické bariéry /7/. I podle obecné teorie relativity je možno synchronní systémy vždy najít, jsou však realizovány pomocí volně padajících hodin. Např. pro popis gravitačního pole Země je synchronní systém zpravidla méně výhodný než statický systém, v němž synchronizaci uskutečnit nelze.

V prostoročase bez gravitačního pole, jímž se zabývá speciální teorie relativity, existují synchronní systémy, v nichž se vzdálenost hodin s časem nemění a prostorová geometrie je eukleidovská. Těchto inerciálních systémů se pak většinou užívá. Také ve Friedmannových kosmologických modelech je výhodné užívat synchronního systému, vzhledem k němuž je izotropní reliktní záření. Synchronní systémy nám proto postačí pro výuku velké části fyziky, je však užitečné si uvědomit, že jejich existence není samozřejmá.

Naznačme ještě, jak lze uvedená fakta formulovat matematicky. (Podrobnější poučení najde čtenář např. v /8/ nebo /9/; v obou knihách je spojeno i s hlubokou fyzikální analýzou.) Prostoročas může být v okolí libovolné události pokryt čtveřicí souřadnic x^i . Nejdůležitější teorie prostoročasu předpokládají, že element vlastního času $d\tau$ (tj. délky křivky $x^i(s)$) může být vyjádřen jako

$$d\tau = \sqrt{\sum_{i,k} g_{ik} \frac{dx^i}{ds} \frac{dx^k}{ds}} ds \quad (A)$$

Vzhledem k nezávislosti $d\tau$ na souřadnicích jsou $g_{ik} = g_{ki}$ komponentami jistého tenzorového pole, které obecně závisí na souřadnicích.

Jak známo z algebry, může být matice g_{ik} v daném bodě uvedena na diagonální tvar. Aby diagonální komponenty odrážely ekvivalenci tří prostorových směrů a jejich odlišnost od směru časového, přicházejí v úvahu možnosti

$$g_{ik} = \begin{pmatrix} -1 & & 0 \\ & -1 & \\ 0 & & 1 \end{pmatrix}, \quad g_{ik} = \begin{pmatrix} 0 & & 0 \\ & 0 & \\ 0 & & 1 \end{pmatrix}. \quad (B_1, B_2)$$

Uveďme zde, že zvláště v souvislosti se snahami o sjednocení interakcí se dnes studují i teorie s vícerozměrným kontinuem (s rozměrem 5, 7, 11), v němž může být popřípadě i vícerozměrný čas. Fyzikální interpretace dalších dimenzí je ovšem dosud ne zcela jasná /10/.

Případ (B_1) odpovídá teorii relativity. V tomto případě, doplníme-li v (A) pod odmocninou znak absolutní hodnoty, můžeme podle daného stavu počítat i prostorové vzdálenosti. Dochází tak k nerozlučnému spojení prostorových a časových vzdáleností, které zdůrazňoval H. Minkowski /7/. (Zejména v astronomickém měřítku je i prakticky vhodné měřit prostorové vzdálenosti časem, jak ukazuje už název "světelný rok".) Veličiny g_{ik} nazýváme v tomto případě složkami metrického pole a mluvíme o riemannovské (přesněji pseudoriemannovské) geometrii prostoročasu. Ve speciální teorii relativity lze dát složkám g_{ik} tvar (B_1) v celém prostoročase. V učebnicích se podrobně ukazuje, jak tento tvar vede k relativitě současnosti, dilataci času, existenci mezní rychlosti nezávislé na volbě vztažného systému apod.

Podle obecné relativity jsou veličiny g_{ik} v gravitačním poli natěsně závislé na souřadnicích. V jistém okolí však lze vždy zavést synchronní systém, v němž platí

$$g_{ik} = \begin{pmatrix} 0 & & & \\ g_{\alpha\beta}(x^\alpha) & 0 & & \\ & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (C)$$

Je to umožněno tím, že čtyřmi transformacemi souřadnic lze dát čtyřem komponentám g_{ik} předem zadané hodnoty. Z geometrického hlediska znamená synchronní systém kolmost "hyperploch současnosti" $\tau = \text{konst}$ na světočáry vztažného systému $x^\alpha = \text{konst}$.

Dodejme ještě, že v obecné teorii relativity se setkáváme s případy, kdy délky některých (popř. všech) světočar jsou v jednom (popř. v obou) směrech konečné a nelze je dále prodloužit. Ani nekonečnost tedy není apriorní vlastností času.

Newtonovské fyzice odpovídají komponenty ϵ_{ik} tvaru

$$\epsilon_{ik} = \frac{\partial T}{\partial x^i} \frac{\partial T}{\partial x^k}, \quad (D)$$

kde T je Newtonův absolutní čas. Zvolíme-li T za čtvrtou souřadnicí, dostáváme zřejmě (B_2), přičemž $\tau = t = T$. Zde vlastní čas splývá se souřadnicovým a je navíc synchronizován. V tomto případě ovšem (A) neumožňuje počítat prostorové vzdálenosti a spojení prostoru s časem je proto méně těsné.

Myslím, že zde nastíněné myšlenky a poznatky by měly mít místo ve studiu každého posluchače vysokoškolské fyziky (i učitelské). Poskytují sjednocující pohled na zdánlivě odtržené oblasti fyziky, pomáhají oprostit se od apriorních dogmat a "samozřejmostí" a rozvíjejí tak studentovu fyzikální kulturu bez ohledu na to, že jich snad ve své práci přímo nepoužije. Jako dílo geniálních tvůrů mají také velkou hodnotu filozofickou a estetickou.

O zbývajících aspektech času se zmíníme jen stručně.

3. Šipka času

Na obtížnost sloučení mechanicko-geometrického pojetí času s jeho vývojovými aspekty poukazovali zejména filozofové, ale i řada fyziků jako např. Eddington /11/ a v současné době Prigogine /12/. Je nepochybné, že pochopení původu "směru času" by přispělo k sblížení věd o živé a neživé přírodě a k vysvětlení kontrastu mezi neměnností přírodních zákonů a vývojem, který vytváří nové kvality. I porovnání názorů nejvyšších autorit (např. /13, 14, 15/) naznačuje, že je to problém otevřený a fascinující již tím, jak překračuje hranice specializací i vědních oborů. Myslím však, že vědomí existence otevřených problémů je pro studenty neméně cenné jako "pozitivní" poznatky. Problém směru času může být dobrou příležitostí, jak toto vědomí rozvíjet, což ovšem vyžaduje hluboké a všestranné vzdělání a neustále obnovovaný kontakt s novými myšlenkami ze strany pedagoga.

4. Přítomnost

Poslední aspekt je v čistě vědeckých diskusích zpravidla opomíjen. Tím více však zasahuje naše úvahy o tom, co vědecké poznání lidstvu nakonec přinese. Mluvíme-li např. o odpovědnosti vědců, vyhýbáme se zpravidla otázce, co znamená slovo "odpovědnost" v čistě přírodovědeckém obraze světa. Obyvatel planety Tralfamadore v románu K. Vonneguta, který vnímá čas "vědecky", říká /16/:

"Pozemšťané velice rádi všechno vysvětlují. Vysvětlují, proč tato událost probíhá právě takto a ne jinak. Říkají, jak je možno další události způsobit anebo se jim vyhnout. Jsem Tralfamadořan, vidím čas jako celek, tak jako vy vidíte hřeben Skalistých hor. Celý čas je celý čas. Nemění se. Nelze před ním varovat ani jej vysvětlit. Prostě je. Rozeberte si to okamžik po okamžiku a zjistíte, že jsme všichni, jak jsem už řekl, brouci v jantaru."

Tralfamadořany proto netíží, že vesmír bude zničen (z hlediska pozemšťanovy interpretace) při jejich nezdařeném experimentu, anebo že v jejich historii se vyskytnou období válek stejně krutých jako na Zemi. "Jsme proti nim bezmocní, tak se na ně prostě nedíváme."

Myslím, že "tralfamadorská" povaha času dobře zapadá do obrazu Newtonovy fyziky, který byl podán na našem semináři /17/. Teorie relativity těsnějším spojením prostoru a času tuto stránku ještě zvýraznila, což našlo odraz i v Einsteinově filozofii /18/. Naproti tomu kvantová teorie vnáší do našich představ nový aspekt, který se projevuje v debatách o procesu měření a úloze pozorovatele, započatých N. Bohrem /19, 20/. Tyto úvahy však dosud nevedly k závěrům, které by nám mohly v našem "lidském" chápání času pomoci. Nepomohlo by nám chápání tralfamadorské? Člověk sice nemůže nazírat čas vcelku jako hřeben Skalistých hor a uchýlovat se před přítomností do jeho idylickějších oblastí. Ale představa, že je v něm přesto uložen jako brouk v jantaru, by mu mohla být útěchou (Tralfamadore lze chápat jako vizí válečného zajatce, který přežil bombardování Drážďan) a život odpovídající této představě by ho uchránil od mnoha vnitřních i vnějších konfliktů. Přesto takovou představu jako vodítko pro svůj život přijmout nemohu - a jedině tímto subjektivním výrokem jsem schopen ukončit debatu o aspektu (4).

Literatura

1. Dialogy 4, str. 286.
2. Kopczyński W., Trautman A.: Czasoprzestrzeń i grawitacja. PWN, Warszawa 1981. Kap. XV.
3. Weyl H.: Raum-Zeit-Materie. J. Springer, Berlin 1923.
4. Milne E. A.: Relativity, Gravitation and World Structure. Oxford 1935.
5. Vremja i sovremennaja fizika. Sborník. Mir, Moskva 1965.
6. Marcke R., Wheeler J.: Gravitacija kak geometrija. In: Gravitacija i otnositelnost', ed. H. Chiu and W. W. Hoffmann. Mir, Moskva 1965.
7. Princip otnositelnosti. Sborník klasičeských prací. Atomizdat, Moskva 1973.

8. Landau L. D., Lifšic E. M.: Teorija polja. Nauka, Moskva 1973. Kap. I, X.
9. Syge J. L.: Relativity: the special theory. North-Holland P. C., Amsterdam 1956. Kap. I.
10. Vladimirov J. S.: Sistemy otačeta v teorii gravitacii. Energoizdat, Moskva 1982. Část IV.
11. Eddington A.: The nature of the physical world. London 1948.
12. Prigogine I.: Ot suščestvujuščego k vznikajuščemu. Nauka, Moskva 1985.
13. Landau L. D., Lifšic E. M.: Statističeskaja fizika. Nauka, Moskva 1964. Kap. I.
14. Penrose R.: Singuljarnosti i asimetrija vo vremeni. In: Obščaja teorija otноситelnosti, ed. S. Hawking and W. Israel. Mir, Moskva 1983.
15. Zeldovič J. E., Novikov I. B.: Strojenije i evoljucija Vselennoj. Nauka, Moskva 1975. Kap. 23, § 14, 20.
16. Vonnegut K.: Bitúnok č. 5. Bratislava 1973. Str. 69, 92.
17. Horáký Z.: Janusovaká tvář Newtonovy fyziky. In: (a) Pocta Newtonovi. OS Pedagogická fyzika FVS JCSMF a katedry fyziky UJEP, Erno 1986. (b) Dialogy 5.
18. Einstein A.: Sobranije naučnych trudov IV. Nauka, Moskva 1967. Str. 103.
19. Bohr N.: Izbrannyje naučnyje trudy II. Nauka, Moskva 1971. Str. 398, 495, 513 aj.
20. Davies P.: Slučajnaja Vselennaja. Mir, Moskva 1985. Kap. V.

*Pedagog. - fyz. dialogy, Štalský dvůr 1986,
ed. Ped. skup. FVS JCSMF, sv. 5.*