Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

Bohumil Vybíral

K některým didaktickým problémům speciální teorie relativity

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 30 (1985), No. 1, 39–45

Persistent URL: `http://dml.cz/dmlcz/139162`

vyučování

K NĚKTERÝM DIDAKTICKÝM PROBLÉMŮM SPECIÁLNÍ TEORIE RELATIVITY

Bohumil Vybíral, Hradec Králové

Speciální teorie relativity se v průběhu 80letého vývoje stala neodmyslitelnou součástí nejen vědeckého systému fyziky, ale i didaktického systému vysokoškolské fyziky. V posledním desetiletí se dostaly její základy i do didaktického systému středoškolské fyziky. Na gymnáziu se dosud vyučovalo základům speciální teorie relativity v přírodovědné větvi [1]. V probíhající přestavbě středoškolského vzdělávání se navrhuje její zařazení, i když v jednodušší formě, jako základní učivo ve 4. ročníku gymnázia [2]. Kromě toho lze poznatky a aplikace speciální teorie relativity podstatně rozšířit v povinně volitelném předmětu Seminář a cvičení z fyziky ve 4. ročníku gymnázia.

Zařazení teorie relativity do didaktického systému vysokoškolské i středoškolské fyziky nebývá nejšťastnější: zpravidla bývá zařazována v závěrečných partiích fyziky. Důvody jsou jednak historické (teorie relativity společně s kvantovou a statistickou fyzikou se zpočátku chápaly jako doplňky ke klasické fyzice, které upřesňovaly, popř. omezovaly platnost zákonů klasické mechaniky), jednak didaktické (jde o disciplíny vyžadující jistý stupeň fyzikálního myšlení a potřebný matematický aparát). To však omezuje didaktické využití speciální teorie relativity např. pro výklad magnetismu jako relativistického efektu a pochopení faktu, že relativistické jevy nemusí být vždy spojeny jen s rychlostmi, které se blíží rychlosti světla.

Speciální teorie relativity v historickém Einsteinově vědeckém systému je opravdu obtížně pochopitelná (a to i pro většinu vysokoškolských studentů). Není to dáno prvním postulátem (speciálním principem relativity), ale druhým postulátem — zdánlivě jednoduchým principem stálé rychlosti světla ve vakuu. V této souvislosti je třeba si uvědomit, že speciální teorie relativity vznikla jako produkt čtvrt století trvající krize fyziky, vyvolané nekoncepčními éterovými hypotézami. Mezi různými hypotézami měl rozhodnout korunní Michelsonův experiment (r. 1881; ve zpřesněné verzi jako Michelsonův-Morleyho pokus z r. 1887). Einsteinův výklad neočekávaných výsledků pokusů, jeho formulace obou postulátů a zpracování jejich důsledků do speciální teorie relativity bylo v dané historické situaci r. 1905 jedině možné a jedině správné.

Vědecký systém, vybudovaný na historické posloupnosti poznatků, však zdaleka nemusí být nejvýhodnější pro didaktický systém. Pěkným příkladem je nynější výklad modelů atomu v učivu gymnázia [2], v němž se ani nedoporučuje podrobnější rozbor Bohrova modelu atomu, který byl ve své době velmi významný [3].

Existují snahy zjednodušit výklad některých poznatků speciální teorie relativity v didaktickém systému fyziky. Jsou to např. ve zmíněném experimentálním učebním textu [2] některé poznatky relativistické kinematiky (relativnost současnosti, dilatace času, kontrakce délek) odvozené myšlenkovými pokusy přímo z principu stálé rychlosti světla ve vakuu bez použití Lorenzových transformačních vztahů. V [2] se vůbec neodvozují základní poznatky z relativistické dynamiky (nebylo by to v dosavadním historizujícím didaktickém systému ani únosné). Zajímavé je, že ani ve vysokoškolských kursech fyziky, které nejsou specializované pro teorii relativity, se zpravidla neodvozuje závislost hmotnosti na rychlosti v inerciální vztažné soustavě. Nejpřístupnějším se v tomto klasickém výkladu STR jeví Tolmanovo odvození, spočívající na studiu přímého rázu dvou pružných koulí ve dvou různých inerciálních vztažných soustavách. Zpravidla se však vychází z tenzorového vyjádření STR, jehož pochopení však vyžaduje speciální průpravu. Cesta k nejdůležitějším výsledkům teorie relativity se tak zatemňuje. Student se pak ptá, proč je v nejzávažnějším poznatku fyziky 20. století ($E = mc^2$) právě rychlost světla. Odpověď, že je to důsledek platnosti postulátu stálé rychlosti světla ve vakuu, není většinou uspokojující.

Existuje však cesta, jak zpřístupnit výklad speciální teorie relativity a umožnit přitom lépe pochopit její fyzikální obsah a důsledky. Je to cesta založená na existenci gravitačního pole vesmíru jako celku. Osnovu tohoto výkladu navrhl již r. 1962 Z. Horák [4, 5, 6]. Naznačený postup je obsažen i ve vysokoškolské učebnici [7] a podrobně rozpracován na úrovni pochopitelné i vyspělejším středoškolským studentům v publikaci [8].

V této stati nejde o to ukázat v celé šíři problematiku megafyzikálního pojetí teorie relativity, ale jen o to naznačit, jak už student gymnázia může na základě poznatků získaných v 1. ročníku gymnázia podle nových osnov [9] pochopit odvození i ucelený fyzikální obsah dvou nejdůležitějších výsledků relativistické mechaniky: závislosti hmotnosti na rychlosti v inerciální vztažné soustavě a zákonu vzájemné vazby hmotnosti a energie. Podstatné přitom je, že se nevychází z klasických relativistických postulátů, z Lorentzových transformačních vztahů, ani z poznatků relativistické kinematiky.

Výklad předpokládá znalost a dobré pochopení:

1. základních poznatků elementární (Newtonovy) teorie gravitačního pole – intenzita, potenciální energie tělesa v gravitačním poli, potenciál;
2. prvních dvou Newtonových pohybových zákonů v obecném tvaru;
3. zákona zachování energie.

Podstatným výchozím předpokladem je požadovat, aby si student uvědomil, že existuje vesmír s ohromným množstvím svítící i nesvítící hmoty a že tato hmota je nositelem nezanedbatelného gravitačního pole. Lze např. uvést, že jen hmotnost svítících objektů poznané části vesmíru – metagalaxie – se odhaduje na 10^{54} kg a že největšími současnými dalekohledy lze za příznivých podmínek identifikovat objekty vzdálené až 10 miliard světelných let ($\sim 10^{26}$ m) a největšími radioteleskopy objekty ještě o řád vzdálenější. Není nutné a na střední škole ani možné zabývat se problematikou a popisem jednotlivých kosmologických modelů. Není nutné ani řešit otázku, zda je vesmír konečný, nebo nekonečný, i když je možné zdůraznit, že z hlediska marxistickoleninské filozofie je oprávněné vesmír chápat jako nekonečně hmotný – s nekonečně velkou hmotností, neomezený v čase a v prostoru. Rozhodně by však nebylo správné popisovat gravitační pole vesmíru užitím Newtonovy teorie gravitace v eukleidovském prostoru.

Jaké gravitační pole tedy vyvolávají blíže neurčené materiální objekty vesmíru? Odpověď na tuto otázku se zdá značně obtížná, ale není tomu tak. Stačí přijmout nelokální platnost prvního Newtonova pohybového zákona (resp. principu setrvačnosti) včetně podmínek, pro něž je vysloven: „Existuje takový vztažný systém, který nazveme inerciální, ve kterém se libovolná volná částice pohybuje rovnoměrně přímočaře.“ Toto znění ve skutečnosti postuluje reálnou existenci inerciálních vztažných soustav. Tak je také princip setrvačnosti správně interpretován v učebním textu [9].

Ve svých důsledcích nemůže být princip setrvačnosti (a tím i nelokální inerciální vztažný systém) obecně realizován na Zemi, v její blízkosti, ani ve sluneční soustavě (tak by se dalo ve výčtu vyšších vesmírných soustav pokračovat), protože nenulová intenzita „místních“ gravitačních polí těchto objektů by způsobila urychlování volných těles, které se v nich nacházejí. Dokonalý inerciální vztažný systém lze předpokládat až v gravitačním poli vesmíru jako celku, ve kterém si odmyslíme lokální gravitační pole, resp. kde celkové gravitační pole vyrovnáme. To znamená, že nelokální existence inerciálních vztažných systémů, resp. platnost principu setrvačnosti, je podmíněna *nulovou hodnotou intenzity gravitačního pole vesmíru jako celku.*

Nulové intenzitě pole mohou odpovídat dva fyzikální stavy: buď pole v daném prostoru neexistuje (ale tento případ musíme vyloučit, protože gravitační pole ohromného množství hmoty ve vesmíru prostě nelze zanedbat), anebo má toto pole *konstantní potenciál.* Z matematické teorie potenciálu je známo, že potenciál je určen až na konstantu. V daném případě však tuto konstantu nelze volit rovnou nule, protože by tento případ splýval s případem neexistence pole.

Označíme-li gravitační potenciál vesmíru φ_*, musí na základě platnosti principu setrvačnosti platit

$$\varphi_* = \text{konst.} \tag{1}$$

Než se budeme zabývat velikostí této konstanty, uvědomíme si napřed dvě skutečnosti.

1. Rozměr gravitačního potenciálu je

$$[\varphi_g] = \left[\frac{E_p}{m}\right] = \mathrm{L}^2 \,.\, \mathrm{T}^{-2}\,,$$

je tedy roven druhé mocnině rozměru rychlosti $\mathrm{L.T^{-1}}$.

2. Gravitační síly jsou vždy přitažlivé, a proto potenciál gravitačního pole je vždy záporný.

Můžeme proto pro konstantu v (1) psát konst. $= -c_*^2$ neboli výraz (1) formálně psát ve tvaru

$$\varphi_* = -c_*^2\,, \tag{2}$$

kde c_* je pro nás dosud neznámá rychlost (co do velikosti i fyzikálního významu).

Studentovi je známo, že na základě definice gravitačního potenciálu lze zpětně vyjářit potenciální energii částice v gravitačním poli:

$$E_p = m\varphi_g\,. \tag{3}$$

Rovněž lze diskutovat, jak lze dosáhnout změny potenciální energie částice v gravitačním poli. Při daném zdroji gravitačního pole jsou dvě možnosti:

1. Změnou potenciálu, tedy změnou polohy částice v gravitačním poli, není-li $\varphi_g = \text{konst.}$
2. Změnou hmotnosti částice (není nutné diskutovat, jak této změny dosáhnout).

Částice v gravitačním poli vesmíru má – analogicky výrazu (3) – potenciální energii

$$E_* = m\varphi_*\,. \tag{4}$$

Označíme-li kinetickou energii částice ve zvolené inerciální vztažné soustavě E_k, musí na základě zákona zachování mechanické energie pro celkovou energii částice v gravitačním poli vesmíru platit:

$$(5) \qquad E_k + E_* = \text{konst.}$$

Má-li dojít ke změně pohybového stavu částice ve zvolené inerciální vztažné soustavě, musí na částici působit podle druhého Newtonova pohybového zákona síla

$$(6) \qquad \boldsymbol{F} = \frac{\mathrm{d}\boldsymbol{p}}{\mathrm{d}t},$$

která na elementární dráze $\mathrm{d}\boldsymbol{r}$ vykoná práci $\mathrm{d}A = \boldsymbol{F} \,.\, \mathrm{d}\boldsymbol{r}$, která se projevuje přírůstkem kinetické energie částice v uvažované vztažné soustavě:

$$(7) \qquad \mathrm{d}E_k = \frac{\mathrm{d}\boldsymbol{p}}{\mathrm{d}t} \,.\, \mathrm{d}\boldsymbol{r} \equiv \boldsymbol{v} \,.\, \mathrm{d}\boldsymbol{p} = v\,\mathrm{d}p\,,$$

protože rychlost $\boldsymbol{v} = \mathrm{d}\boldsymbol{r}/\mathrm{d}t$ a hybnost $\boldsymbol{p} = m\boldsymbol{v}$ jsou vektory souhlasně rovnoběžné.

Podle (5) se změna kinetické energie musí projevit změnou potenciální energie:

$$(8) \qquad \mathrm{d}E_k = -\,\mathrm{d}E_*\,,$$

kde podle (4) bude

$$(9) \qquad \mathrm{d}E_* = \varphi_*\,\mathrm{d}m\,,$$

protože $\varphi_* = \text{konst.}$ Pak po dosazení (7) a (9) do (8) je

$$v\,\mathrm{d}p = -\varphi_*\,\mathrm{d}m$$

neboli po vynásobení rovnice hmotností

$$(10) \qquad p\,\mathrm{d}p = -\varphi_* m\,\mathrm{d}m\,.$$

Rovnice (10) je jednoduchá diferenciální rovnice se separovanými proměnnými (tuto skutečnost není třeba středoškolskému studentovi zdůrazňovat), kterou lze snadno integrovat (dále ukážeme, že lze integraci nahradit jiným postupem). Uvažujeme-li, že částici urychlujeme z klidového stavu v pozorovací inerciální vztažné soustavě, je dolní integrační mez pro levou stranu $p = 0$ a pro pravou stranu $m = m_0$. Uvažujeme-li výsledný pohybový stav obecné velikosti, budou horní integrační meze $p \equiv mv$ a m. Tedy

$$\int_0^p p\,\mathrm{d}p = -\varphi_* \int_{m_0}^m m\,\mathrm{d}m\,,$$

$$\frac{p^2}{2} = -\frac{\varphi_*}{2}\left(m^2 - m_0^2\right),$$

tj.

$$m^2 v^2 = -\varphi_*\left(m^2 - m_0^2\right).$$

Odtud při uvážení (2) dostáváme hledanou závislost hmotnosti částice na její rychlosti v uvažované inerciální vztažné soustavě

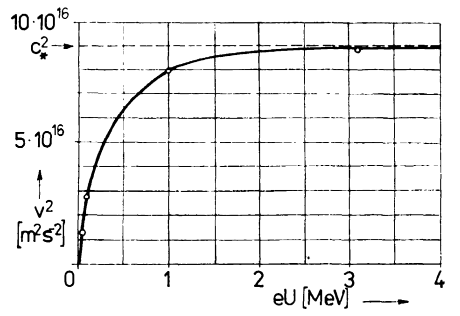
$$(11) \qquad m = \frac{m_0}{\sqrt{(1 + v^2/\varphi_*)}} = \frac{m_0}{\sqrt{(1 - v^2/c_*^2)}}\,.$$

Odtud ihned plyne fyzikální význam rychlosti c_*: aby m bylo reálné, musí pro $m_0 \neq 0$ být vždy $v < c_*$; v limitním případě pro $m_0 = 0$ je $v = c_*$. Formálně zavedená rychlost c_* ve vztahu (2) dostává tedy význam *mezní rychlosti* materiálních objektů. Tato rychlost je podle (2) určena gravitačním potenciálem vesmíru:

$$(12) \qquad c_* = \sqrt{-\varphi_*}\,.$$

Protože však φ_* neznáme, musíme c_* určit experimentálně.

Z didaktického hlediska by nebylo nejsprávnější nyní hned říci, že tuto mezní rychlost mají fotony, protože jejich rychlost ve vakuu nelze měnit. Nejprůkaznější je určení mezní rychlosti z experimentálního studia pohybu elektronů v elektrickém poli — elektrony mají malou klidovou hmotnost a relativně velký náboj (elektrony mají velký měrný elektrický náboj), a lze tedy snadno měnit jejich rychlost až do velkých hodnot. Lze je také snadno registrovat. Z experimentální závislosti



Obr. 1.

druhé mocniny rychlosti elektronů na jejich energii eU (obr. 1) je zřejmé, že mezní rychlost je $c_* \approx 3{,}0 \,.\, 10^8 \text{ m} \,.\, \text{s}^{-1}$. Nyní už je možné uvést, že mezní rychlost je totožná s rychlostí fotonů ve vakuu, protože jde o částice, u nichž nebyla spolehlivě zjištěna nenulová klidová hmotnost (resp. jejichž klidová hmotnost se považuje za nulovou). Tedy

$$c_* = c = (2{,}997\,924\,56 \pm 0{,}000\,000\,01) \,.$$
$$.\, 10^8 \text{ m} \,.\, \text{s}^{-1} ,$$

a gravitační potenciál vesmíru má tedy experimentálně ověřenou hodnotu

$$\varphi_* = -(8{,}987\,551\,67 \pm 0{,}000\,000\,06) \,.$$
$$.\, 10^{16} \text{ m}^2 \,.\, \text{s}^{-2} .$$

Nyní k druhému problému – k zákonu vzájemné vazby hmotnosti a energie. V megafyzikálním pojetí je řešení tohoto problému jednoduché. Spojíme-li vztahy (8) a (9), dostaneme rovnici

$$\text{(13)} \qquad \mathrm{d}E_k = -\varphi_* \,\mathrm{d}m ,$$

kterou již lze snadno integrovat:

(14)

$$E_k = -\varphi_* \int_{m_0}^{m} \mathrm{d}m = -\varphi_*(m - m_0) = $$
$$= c_*^2(m - m_0) .$$

Zapíšeme-li tento vztah ve tvaru

$$E_k = E - E_0 ,$$

dostaneme hledané Einsteinovy vztahy pro celkovou a klidovou energii částice v uvažované vztažné soustavě:

$$\text{(15)} \qquad E = mc_*^2 ,$$
$$E_0 = m_0 c_*^2 .$$

Fyzikální obsah těchto vztahů je sice stejný jako obsah Einsteinových vztahů $E = mc^2$, $E_0 = m_0c^2$, avšak jejich interpretace s mezní rychlostí c_*, danou gravitačním potenciálem vesmíru, je pro pochopení přijatelnější a cesta k jejich vyvození je podstatně jednodušší.

I když uvedený postup odvození je jednoduchý, vyžaduje znalost elementů diferenciálního a integrálního počtu, což můžeme vyžadovat nejspíše od studenta 4. ročníku gymnázia.

Výklad lze studentům zpřístupnit, když nekonečně malé změny veličin nahradíme konečnými diferencemi a ve vztahu (7) budeme pracovat přímo s velikostmi vektorů. Pak budou mít rovnice (10) a (13) tvar

$$\text{(17)} \qquad p\Delta p = -\varphi_* m\Delta m ,$$

$$\text{(18)} \qquad \Delta E_k = -\varphi_* \Delta m .$$

Sumaci rovnice (18) v daných mezích (m_0, m) je možné provést přímo. Na obou stranách rovnice (17) jde o funkce typu $x\Delta x$. U sumace této rovnice jde tedy o stejný problém, jaký se řeší při výpočtu potenciální energie napnutého pružného vlákna. Po vyjádření grafické závislosti funkce lze sumaci převést na výpočet obsahu lichoběžníka (trojúhelníka). Nebo lze – po vyjádření diferencí – problém řešit sumací aritmetické řady, např. pro pravou stranu rovnice (17) – viz obr. 2:

$$\Delta m_i = \frac{m - m_0}{n}, \quad \varphi_* m_i =$$

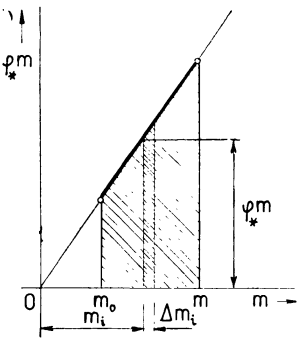
$$= \varphi_* \left(m_0 + \frac{m - m_0}{n} i \right),$$

$$- \sum_{i=1}^{n} \varphi_* m_i \Delta m_i =$$

$$= -\varphi_* (m - m_0) \sum_{i=1}^{n} \left(m \frac{i}{n^2} + m_0 \frac{n - i}{n^2} \right) =$$

$$= -\varphi_* (m - m_0) \left[\frac{m}{2} \left(1 + \frac{1}{n} \right) + \right.$$

$$\left. + \frac{m_0}{2} \left(1 - \frac{1}{n} \right) \right].$$



Obr. 2.

V mezním případě, kdy počet dílků $n \to \infty$, bude mít výraz hledanou hodnotu

$$-\tfrac{1}{2}\varphi_*(m^2 - m_0^2).$$

Uvedený postup, který vedl k odvození dvou nejdůležitějších výsledků STR (11) a (15), lze případně dále rozvinout. Provede-li se integrace rovnice (10) v mezích pro hybnost $p' = m'u'$, $p = mu$ a odpovídající hmotnost m', m, dostaneme rovnici

$$(19) \qquad m^2(u^2 + \varphi_*) = m'^2(u'^2 + \varphi_*).$$

Studujeme-li setrvačný pohyb částice ze dvou různých inerciálních vztažných soustav S, S' a zvolíme-li počáteční podmínky tak, že trajektorie částice prochází společným počátkem příslušných soustav souřadnic v okamžiku $t = t' = 0$, bude

$$u^2 = \frac{x^2 + y^2 + z^2}{t^2}.$$

$$u'^2 = \frac{x'^2 + y'^2 + z'^2}{t'^2}.$$

Po dosazení do (19) dostaneme

$$(20) \qquad x^2 + y^2 + z^2 + \varphi_* t^2 =$$

$$= \xi^2(x'^2 + y'^2 + z'^2 + \varphi_* t'^2),$$

kde

$$\xi = \frac{m't}{mt'}.$$

Protože se vzhledem k homogenitě vesmíru (podrobněji viz např. [8], str. 208) nemůže fyzikálně projevit záměna čárkované soustavy za nečárkovanou, musí být $\xi = 1$. Z toho pak plyne (ve zvláštním případě $u' = 0$, $u = v$) známý výraz pro dilataci času dvou soumístných událostí:

$$(21) \qquad t = \frac{t_0}{\sqrt{(1 - v^2/c_*^2)}}.$$

Pak při uvážení $\varphi_* = -c_*^2$, má rovnice tvar

$$x^2 + y^2 + z^2 - c_*^2 t^2 =$$

$$= x'^2 + y'^2 + z'^2 - c_*^2 t'^2,$$

který je výchozím bodem Einsteinova výkladu speciální teorie relativity (pro $c_* = c$).

Naznačený výklad speciální teorie relativity vystačí jen s jedním Einsteinovým postulátem: speciálním principem relativity. Druhý Einsteinův postulát, totiž princip stálé rychlosti světla ve vakuu (vlastně princip stálé mezní rychlosti), je důsledkem konstantního potenciálu vesmíru, stejného ve všech inerciálních vztažných soustavách, a ten je přímým důsledkem platnosti principu setrvačnosti. Michelsonův pokus je pak možno v didaktickém systému fyziky chápat jako verifikační pokus, který ve svém důsledku ověřuje princip setrvačnosti (prostřednictvím mezní rychlosti fotonů, kterou nelze pohybem zdroje ani pozorovatele překročit).

Z didaktického hlediska má naznačený postup výkladu STR proti běžnému (historizujícímu) výkladu několik předností:

1. Propojuje obecné zákony mechaniky s teorií relativity.
2. Vystačí jen s jedním výchozím postulátem (principem speciální teorie relativity).
3. Jednoduše dospívá k nejvýznamnějším výsledkům STR (11), (15) a (21), a to bez aplikace Lorentzovy transformace.
4. Dává výsledkům a důsledkům STR názornější a úplnější fyzikální obsah.

Přitom tento výklad STR, respektující gravitační pole vesmíru jako celku, neodporuje Einsteinovu vědeckému systému STR. Naopak umožňuje lépe pochopit nejen výsledky STR, ale i vazbu STR a OTR (viz [6] a [11]). Einsteinova speciální teorie relativity vznikla v jiných historických souvislostech a navíc poznatky o vesmíru v době před 80. lety ve srovnání s dnešními byly velmi malé. Vždyť první objekty existující vně naší Galaxie byly prokázány Hubblem až po roce 1924.

Jsem přesvědčen, že naznačený výklad teorie relativity, respektující gravitační pole vesmíru jako celku, je perspektivní a že je didakticky vhodný už pro středoškolskou fyziku.

Literatura

[1] Fuka, J.: *Doplněk k učivu fyziky pro IV. ročník gymnázia.* SPN, Praha, 1974

[2] Lehotský, D. a kol.: *Fyzika pro IV. ročník gymnázia.* Experimentální učební text. SPN, Praha, 1982

[3] Bartuška, K.: *K modelům atomu v učivu gymnázia.* Matematika a fyzika ve škole *14* (1983), č. 2, str. 106.

[4] Horák, Z.: *Distant Cosmic Matter and Relativity.* Bull. Astr. Inst. of Czechoslovakia *14* (1963), č. 3, str. 117

[5] Horák, Z.: *Cosmic Potential — a Fundamental Physical Constant.* Bull. Astr. Inst. of Czechoslovakia *14* (1963), č. 4, str. 119

[6] Horák, Z.: *Rychlost elektromagnetických vln a gravitační potenciál vesmíru.* Elektrotechnický obzor *52* (1963), str. 157

[7] Horák, Z. - Krupka, F.: *Fyzika.* SNTL/SVTL, Praha 1966, upravené vydání 1976 a 1981

[8] Vybíral, B.: *Fyzikální pole z hlediska teorie relativity.* SPN, Praha 1976; upravené a rozšířené slovenské znění: SPN, Bratislava 1980

[9] Vachek, J. a kol.: *Fyzika pro I. ročník gymnázia.* SPN, Praha, 1984

[10] Horák, Z.: *Inertia, Relativity and Cosmology.* Czech J. Phys. *B19* (1969), str. 703

[11] Horák, Z.: *Machian Interpretation of General Relativity.* Bull. Astr. Inst. of Czechoslovakia *21* (1970), č. 2, str. 96

Ľudské poznanie a ľudská moc sú jedno a to isté, pretože neznalosť príčiny marí výsledok. Príroda sa dá totiž premôcť len poslušnosťou; čo platí pri uvažovaní ako príčina, pri konaní platí ako pravidlo.

Človek, služobník a vykladač prírody, môže vykonať a vedieť len toľko, koľko na základe skúsenosti alebo rozumom odpozoroval z poriadku prírody, viac nevie a nemôže.

Francis Bacon