

FYZIKA

K vývoji didaktiky fyziky

OLDŘICH LEPIL

Přírodovědecká fakulta UP, Olomouc

Významným mezníkem ve vývoji didaktiky fyziky nejen jako vědecké disciplíny, ale i jako praktické součásti činnosti učitelů je rok 1958. V něm jednak vznikla organizace didaktiků fyziky v rámci Jednoty československých matematiků a fyziků, jednak byl jmenován první vysokoškolský profesor tohoto oboru u nás, což vytvořilo základní předpoklad pro institucionální rozvoj didaktiky fyziky. Padesátileté jubileum těchto událostí je příležitostí zamyslet se nad vývojem didaktiky fyziky několika stručnými poznámkami.

Vznik didaktiky fyziky

Prohloubení zájmu o didaktické problémy výuky fyziky můžeme od počátku spojit s postupnou diferenciací vzdělávání zejména na středních školách, na nichž se fyzika začala vyučovat jako samostatný předmět v 1. polovině 19. století. V této době také vznikaly první české učebnice fyziky, což můžeme považovat za počátek hlubšího zájmu o daný vyučovací předmět a způsob, jakým byl ve školách vyučován. Vedle učebnic, jejichž obsah a metodické zpracování bylo silně ovlivněno učebnicemi německými, byl podnětem ke vzniku didaktiky fyziky zájem učitelů středních škol o nové, modernější vyučovací postupy, především o názornější výklad podporovaný fyzikálními pokusy.

V této souvislosti sehrála významnou roli Jednota českých matematiků a fyziků (JČMF), založená v roce 1862. Její členy vždy spojovalo úsilí o zlepšování úrovně výuky, které vedlo i k reformním návrhům v oblasti fyzikálního vzdělávání (např. návrh reformy gymnázia z konce 19. století).

JČMF v letech 1872 až 1950 vydávala Časopis pro pěstování matematiky a fyziky a od 55. ročníku (1926) se součástí časopisu stala „Příloha didakticko-metodická“, věnovaná výuce matematiky a fyziky. Příloha měla sloužit jako diskusní fórum pro výměnu zkušeností s výukou a fyzika zde byla zastoupena také náměty k různým fyzikálním experimentům. JČMF byla i majitelem vydavatelství učebnic a odborné literatury s názvem Prometheus. Důraz kladený na názornou výuku fyziky se v první polovině 20. století projevil také vznikem specializovaných firem, které vyráběly učební pomůcky. Významné postavení mezi nimi měla firma Fysma, majetkově spojená rovněž s JČMF. Zájem učitelské veřejnosti o didaktické problémy dokládá i řada samostatných publikací jiných vydavatelů, mezi nimiž opět převažují návody k fyzikálním experimentům.

Očekávali bychom, že didaktika fyziky jako studijní disciplína bude i součástí přípravy budoucích středoškolských učitelů. Ti byly vzdělávání na univerzitách studiem fyziky, v němž až do poloviny 20. století nebylo rozlišováno studijní zaměření na učitelství a vědeckou práci ve fyzice. Teprve ve 30. letech 20. století bylo pro kandidáty učitelství zavedeno jednosemestrální metodické cvičení, vesměs zajišťované externě zkušenými učiteli ze středních škol. Tato výuka však byla převážně zaměřena na praktickou výuku a vycházela ze zkušeností středoškolských učitelů, kteří výuku zajišťovali. Větší pozornost byla také věnována demonstračnímu experimentu, o který se zajímali i někteří vysokoškolští učitelé (nejznámější z té doby je publikace profesora přírodovědecké fakulty MU v Brně *J. Zahradníčka* Základní pokusy fyzikální, vydaná v roce 1935). K prvním publikacím z didaktiky fyziky můžeme počítat také metodické materiály používané na učitelských ústavech k přípravě učitelů měšťanských škol. Byly to převážně práce shrnující na základě zkušeností návody k vyučování.

Svoje místo ve vzdělávání učitelů našla didaktika fyziky až ve 2. polovině 20. století. K tomu přispělo především zřízení pedagogických fakult, kde byl do přípravy budoucích učitelů zařazen předmět metodika fyziky, na který navazovaly semináře a cvičení z metodiky a zejména bylo zavedeno praktikum školních pokusů a školní praxe studentů. Odbornou pregraduální přípravu doplňovaly také pedagogicko-psychologické disciplíny. Pracovníci, kteří působili ve výuce studentů učitelství, se začali hlouběji zabývat řešením metodických otázek výuky fyziky a výsledky své práce začali ve větší míře publikovat. To jim umožnil vznik metodických časopisů, který iniciovalo přímo Ministerstvo školství, a jejichž vydáváním bylo pověřeno Státní pedagogické nakladatelství. Pro fyziku to byl nejprve ča-

sopis Matematika a fyzika ve škole, který vznikl v roce 1948. Od něj se fyzika již v roce 1949 odloučila a byla připojena k ostatním přírodním vědám – biologii a chemii, jimž se věnoval nový časopis Přírodní vědy ve škole. V roce 1962 pak na tento časopis navázal časopis Fyzika ve škole, který v roce 1970 opět splynul s matematikou v novém časopisu Matematika a fyzika ve škole. Jeho přímým pokračovatelem je od roku 1990 časopis Matematika – fyzika – informatika, vydávaný nyní v nakladatelství Prometheus. V menší míře se otázkami fyzikálního vzdělávání zabývá i členský časopis JČMF Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, který se v rubrice Vyučování nepravidelně věnuje i didaktickým problémům.

Institucionální základ didaktiky fyziky

Koncepce nově vznikající disciplíny navazovala jak na tradici fyzikálního vzdělávání z období mezi dvěma světovými válkami, tak se začal projevovat vliv koncepcí, které měly svůj původ ve školském systému bývalého Sovětského svazu. Vzhledem k tomu, že se rozšířil počet vysokých škol vzdělávajících učitele fyziky, přibýlo pracovníků, kteří se začali specializovat na problematiku fyzikálního vzdělávání na základních a středních školách a ve větší míře v této oblasti vznikaly práce výzkumného charakteru. V roce 1958 byl jmenován první vysokoškolský profesor pro obor didaktika fyziky, kterým se stal *PaedDr. Josef Fuka* (1907 – 1992), dlouholetý děkan a vedoucí katedry experimentální fyziky a didaktiky fyziky na přírodovědecké fakultě UP v Olomouci. To umožnilo v roce 1965 zařazení didaktiky fyziky jako „teorie vyučování fyzice“ mezi vědní obory, v nichž lze získávat vědeckou, popř. vědecko-pedagogickou kvalifikaci.

Velký význam pro rozvoj vědecké práce v didaktice fyziky mělo zřízení školících pracovišť pro školení aspirantů z teorie vyučování fyzice. Jako první v Česku byla vytvořena školící pracoviště na matematicko-fyzikální fakultě UK v Praze (školitel *prof. RNDr. Emil Kašpar, DrSc.*) a na přírodovědecké fakultě UP v Olomouci (školitel *prof. PaedDr. Josef Fuka*). Na Slovensku bylo jako první zřízeno školící pracoviště na přírodovědecké fakultě Univerzity Komenského v Bratislavě (školitel *prof. RNDr. Ján Vanovič*).

Pro obhajoby kandidátských dizertací byla v Česku jmenována jen jedna komise, která měla šest stálých členů a při obhajobách v Praze jí předsedal prof. Kašpar a v Olomouci prof. Fuka. Na Slovensku byla samostatná komise, které po úmrtí prof. Vanoviče předsedal *prof. RNDr. Ján Fischer*.

První kandidátské dizertace z teorie vyučování fyzice předložili a vědeckou hodnost kandidáta pedagogických věd získali v roce 1966 *RNDr. Marta Chytilová* (Rozvíjení pojmů hmoty, síla, práce a energie v učivu základní a střední školy), *RNDr. Václav Müller* (Příspěvek k problému zvyšování aktivity posluchačů v laboratorních cvičeních úvodního kursu fyziky na vysokých školách) a v roce 1967 *RNDr. Jaroslav Vachek* (K některým otázkám úlohy matematiky ve vyučování fyzice) a *RNDr. Jitka Hnilíčková* (Formalismus ve fyzikálních vědomostech žáků).

Na přírodovědecké fakultě UP v Olomouci proběhly první obhajoby kandidátských dizertací v roce 1967 – *RNDr. Oldřich Lepil* (Problémy výkladu elektromagnetických kmitů a vlnění na střední škole) a *PaedDr. Jan Kunzfeld* (Příspěvek k modernizaci vyučovacích prostředků v akustice) a v roce 1969 – *Lubomír Vašek* (Prvky statistické fyziky ve středoškolském kursu fyziky).

Na přírodovědecké fakultě UK v Bratislavě jako první obhájili dizertaci v roce 1969 *RNDr. Jozef Janovič* (Štatistické prvky vo fyzike plynov na strednej škole) a v roce 1972 *RNDr. Stanislav Ondrejka* (Semimikrometóda fyzikálneho experimentu a jej uplatnenie vo vyučovaní stredoškolskej fyziky).

Změna vysokoškolského zákona v roce 1966 umožnila také získání akademického titulu RNDr., popř. PaedDr. z teorie vyučování fyzice na základě rigorózního řízení, jehož součástí bylo rovněž vypracování písemné rigorózní práce, což nesporně iniciovalo vznik řady prací, řešících otázky fyzikálního vzdělávání. První komise pro rigorózní zkoušky byly zřízeny na Pedagogické fakultě a Matematicko-fyzikální fakultě UK v Praze, na Přírodovědecké fakultě UP v Olomouci, na Přírodovědecké fakultě a Pedagogické fakultě UJEP (nyní MU) v Brně a na Přírodovědecké fakultě UK v Bratislavě.

Naléhavá potřeba řešit problémy spojené s organizací školského systému i s obsahem výuky vedla ke vzniku pracovišť mimo vysoké školy, na nichž byli také pracovníci zabývající se fyzikálním vzděláváním. Byly to především rezortní ústavy zřízené Ministerstvem školství – Výzkumný ústav pedagogický, Výzkumný ústav odborného školství a Ústřední ústav pro vzdělávání pedagogických pracovníků. Činnost těchto ústavů směřovala k řešení koncepčních otázek vyučování fyziky v rámci dané školské soustavy a k tvorbě dokumentace, o níž se opírala školská praxe (např. tvorba učebních osnov).

JČSMF iniciovala vznik specializovaného vědecko-výzkumného pracoviště Kabinetu pro modernizaci vyučování matematice a fyzice, který se

po třech letech existence v roce 1966 rozdělil na dva samostatné kabinety pro matematiku a fyziku. Vznik Kabinetu pro modernizaci vyučování fyziky (KMVF), který byl organizačně začleněn do Ústavu fyziky pevných látek ČSAV, významně přispěl k rozvoji vědecké práce v didaktice fyziky. Kabinet vedl až do roku 1976 významný funkcionář JČSMF *prof. RNDr. Miloslav Valouch* (1903–1976). Přímo v KMVF byly studovány základní teoretické otázky nového pojetí vyučování fyziky a v těsném kontaktu s KMVF spolupracovaly další pracovní skupiny zaměřené např. na hodnocení výsledků vyučování (*J. Fenclová*), na výzkum vyučování fyzikálním poznatkům v nižších ročnících ZŠ (*S. Nový*) a pracoviště na vysokých školách připravujících učitele fyziky (MFF UK Praha a PřF UP Olomouc). Tato činnost byla také do značné míry propojena s aktivitami Fyzikální pedagogické sekce JČMF.

Institucionální zázemí dané KMVF vytvořilo předpoklady pro lepší koordinaci a širší zaměření vědecké práce v didaktice fyziky, dané i zařazením teorie vyučování fyziky do seznamu vědních oborů v rámci Československé akademie věd. Didaktické problémy se staly součástí jednak rezortních výzkumných úkolů řízených Výzkumnými ústavem pedagogickými, jednak byly zařazeny do tzv. státního badatelského plánu, jehož dílčí úkoly pedagogického zaměření koordinoval Pedagogický ústav J. A. Komenského ČSAV.

S odstupem doby lze hodnotit jako nejprínosnější pro rozvoj didaktiky fyziky samostatný podúkol „Model perspektivního pojetí výuky fyziky“, který byl řešen v letech 1976 – 1980 jako součást státního badatelského plánu VIII-5-4. Úkol řešil tým didaktiků fyziky z různých pracovišť, převážně vysokých škol připravujících učitele fyziky, jejichž činnost organizoval a koordinoval Kabinet pro modernizaci vyučování fyziky. Činnost řešitelů se soustředila na problematiku didaktického systému fyziky s cílem připravit teoretické analýzy a realizovat didaktické experimenty jako základ perspektivního projektu výuky fyziky.

V průběhu řešení výzkumného projektu se uskutečnila řada pravidelných pracovních seminářů, převážně na tehdejšími školícím středisku Ministerstva školství ve Štítně u Prahy. Pro účastníky těchto seminářů byly přínosem nejen referáty řešitelů a pozvaných odborníků z řady dalších disciplín, ale i obsáhlé diskuse řešené problematiky, které směřovaly k jistému sjednocení pohledů řešitelů na další vývoj výuky fyziky u nás. Vůdčí osobností těchto seminářů byla *prof. RNDr. J. Fenclová (Brockmeyerová)*,

CSc., která promyšleným výběrem problematiky a vymešováním dílčích úkolů pro jednotlivé řešitele dokázala vytvořit velmi dělné prostředí a zasloužila se v podstatě o rozvoj metodologických základů celé disciplíny. Ty pak našly konkrétní reflexi v nejvýznamnějším teoretickém díle J. Fenclové Úvod do teorie a metodologie didaktiky fyziky [1] a také ve studii K perspektivám fyzikálního vzdělávání v didaktickém systému přírodních věd [2], která je v podstatě realizačním výstupem uvedeného výzkumného úkolu.

Pro formování vědecké disciplíny je důležité, aby vznikly publikace, které by zachycovaly základní koncepce disciplíny a staly se východiskem pro další diferencovanou publikační tvorbu v daném oboru. Pro didaktiku fyziky lze za takovou základní publikaci považovat, kromě zmíněné publikace [1], první u nás knižně vydanou vysokoškolskou učebnici didaktiky fyziky [3]. I když nebyl zcela naplněn záměr širšího autorského kolektivu zpracovat nejen obecné otázky vyučování fyzice s ohledem na soudobé modernizační snahy, ale i tolik potřebnou konkrétní metodiku výkladu jednotlivých témat fyziky, získala odborná veřejnost touto knihou podnětný materiál jak pro teorii, tak pro praxi vyučování fyzice. Publikace v podstatě navazovala na jedno z prvních teoreticky koncipovaných děl v tomto oboru, kterým byly práce prof. Kašpara Kapitoly z didaktiky fyziky [4].

Další zásadnější publikace měly podobu vysokoškolských skript a s pracemi na nových projektech výuky fyziky na střední škole těsně souvisela skripta vydaná na Univerzitě Palackého [5], [6], jejichž základem byly metodické příručky zpracované pro potřeby výzkumného ověřování nově vznikajících učebních textů pro gymnázium. K těmto studijním materiálům později přibýly ještě další obecněji zaměřené publikace, které propracovávaly koncepci didaktiky fyziky především jako studijní disciplíny v přípravě učitelů fyziky. Jsou to např. publikace [7], až [11].

Didaktika fyziky v JČMF

Vedle institucionálních změn se pozitivně do rozvoje didaktiky fyziky promítly aktivity Jednoty československých matematiků a fyziků, jejíž činnost byla obnovena v roce 1956. Jednou z prvních velkých konferencí této vědecké společnosti byl 1. sjezd československých fyziků, který proběhl 23. až 28. září 1957 v Praze za účasti 500 čs. fyziků a 20 zahraničních hostů. Jednání sjezdu probíhalo ve 12 sekcích, z nichž osmá sekce byla zaměřena na otázky pedagogické. Překvapivý a ovšem potěšitelný byl velký zájem,

s nímž se setkala dvoudenní zasedání této sekce. Jak řada referátů, tak bohatá diskuse k nim dokumentovala nejen šíři problematiky, ale naznačila i potřebu určitého soustředění a systematického postupu v otázkách fyzikálního vzdělávání. Proto byl již v prosinci 1957 ustaven organizační výbor vedený E. Kašparem, jehož úkolem bylo připravit na rok 1958 pracovní konferenci o vyučování fyzice na všeobecně vzdělávacích školách. Cílem konference bylo řešit problémy, na jejichž naléhavost poukázalo jednání pedagogické sekce 1. sjezdu čs. fyziků.

Konference se uskutečnila ve dnech 8. až 12. září 1958 v Praze za účasti téměř 120 učitelů a dalších pracovníků, kteří se podíleli přímo nebo nepřímo na vyučování fyzice. Jednání konference analyzovalo stav vyučování fyzice na základních i středních školách a účastníci konference konstatovali, že jednou z příčin neuspokojivého stavu vyučování fyzice je zastarání obsahu školské fyziky vzhledem k bouřlivému rozvoji fyziky jako vědy a jejích technických aplikací. Z referátů a diskuse na konferenci vyplynul návrh, aby při JČSMF byla zřízena stálá pedagogická komise, která by byla iniciátorkou a koordinačním orgánem při realizaci modernizačních snah ve výuce fyziky. V roce 1958 pak byla ustavena Ústřední pedagogická komise pro fyziku (ÚPKF), jejímž předsedou se stal prof. J. Fuka a místopředsdou prof. J. Vanovič. Konkrétní úkoly, na nichž od počátku ÚPKF pracovala, záhy vedly k formulaci širších a obecnějších cílů komise, které měly být orientovány na didaktické a metodické problémy, na získávání zájmu o matematiku a fyziku mezi žáky škol a na pomoc učitelům fyziky. Sílily zejména tendence věnovat maximum pozornosti novému pojetí vyučování matematice a fyzice.

Činnost ÚKVF byla od jejího vzniku poměrně bohatá a prakticky každý rok se uskutečnila nějaká významnější akce jak k aktuální problematice výuky fyziky, tak v oblasti dalšího vzdělávání učitelů. JČSMF se stala přirozenou platformou, na níž se nejen řešily aktuální problémy fyzikálního vzdělávání, ale k jejich řešení se aktivizovala a názorově sjednocovala celá odborná veřejnost. Nejúplnější přehled aktivit JČMF v oblasti fyzikálního vzdělávání lze nalézt na webových stránkách Fyzikální pedagogické společnosti JČMF [12].

Didaktika fyziky a modernizační hnutí

Významným impulsem k rozvoji didaktiky fyziky byly modernizační tendence v oblasti fyzikálního vzdělávání, které vznikly jako reakce na kri-

tiku školství v USA poté, co v bývalém SSSR byla vypuštěna 1. umělá družice Země (tzv. *sputnik šok*). Ukázalo se, že je třeba modernizovat pojetí, obsah i metody výuky fyziky tak, aby absolventi amerických vysokých škol mohli lépe konkurovat v oblasti fyzikální vědy a od ní se odvíjejících technologií. Výsledkem těchto modernizačních snah byl vznik několika velkých, detailně propracovaných vzdělávacích projektů, které následně ovlivnily koncepcce fyzikálního vzdělávání a tím i problémové oblasti didaktiky fyziky na celém světě. Z těchto velkých projektů připomeňme alespoň proslulý kurs PSSC (*Physical science study committee*), jehož učebnice *Physics* vyšla v 1. vydání již v roce 1960 [viz 13].

Modernizační snahy ve světě, které byly reakcí na výtky, že školní vzdělávání dostatečně nesleduje rozvoj vědeckého poznání ve fyzice a že předávané poznatky neodpovídají úrovni vědy ani jejím praktickým aplikacím, našly svůj odraz i v naší didaktice fyziky. Počáteční iniciativa byla opět na straně JČSMF, která v roce 1963 uspořádala Pracovní konferenci o modernizaci vyučování fyzice (Liblice u Mělníka, prosinec 1963), na kterou pak navázala řada pravidelných seminářů k dílčím otázkám modernizace výuky fyziky. Za přímý výstup těchto aktivit lze považovat vytvoření nových projektů výuky fyziky na základní škole (pod vedením dr. M. Chytilové) a inovace vybraných témat středoškolské fyziky.

Výsledkem těchto snah bylo rozšíření obsahu výuky o poznatky tzv. „moderní fyziky“, kterou se ovšem rozuměly hlavně fundamentální fyzikální poznatky 1. poloviny 20. století – speciální teorie relativity, základy kvantové fyziky a poznatky fyziky mikrosvěta (atomová a jaderná fyzika). I když byla řešena rovněž problematika moderních metod a prostředků výuky (problémové a skupinové vyučování, didaktické testy, materiály pro programované učení, využití moderních audiovizuálních prostředků aj.), praxe škol tím byla ovlivněna jen v malé míře. Tyto práce však vedly k přesnějšímu vymezení problémových oblastí, které určují pojetí a obsah didaktiky fyziky jako vědní disciplíny.

Klíčovým problémem didaktiky fyziky se stalo vytvoření didaktického systému fyziky, který by vycházel ze struktury současné fyzikální vědy a současně byl koncipován jako otevřený systém, v němž každý stupeň fyzikálního vzdělávání navazuje na žákovy zkušenosti a poznatky z předcházejícího stupně. Dalším požadavkem bylo posílení významu výuky fyziky pro vzdělání žáků a jeho diferenciaci s ohledem na uplatnění v praxi a optimální rozvíjení fyzikálního myšlení žáků. Modernizace metod a prostředků výuky by měla žákovi umožnit, aby si místo encyklopedických

znalostí samostatně osvojoval vědomosti a dovednosti a učil se je správně užívat. Podrobně o těchto přístupech pojednává M. Chytilová v publikaci [14].

V duchu zmíněných koncepčních záměrů postupně krystalizovaly základy nového pojetí výuky fyziky na základní i střední škole a didaktika tak díky uvedeným iniciativám byla připravena na zvládnutí konkrétního úkolu, kterým se stala tvorba nových výukových projektů fyziky pro základní školu a pro gymnázium v rámci probíhající přestavby školské soustavy. Na práce probíhající v podobě výzkumných úkolů i formou aktivit JČSMF tak ve druhé polovině 70. let navázala činnost dvou pracovních skupin v rámci Výzkumných ústavů pedagogických v Praze, kde byl připravován projekt základní školy, a v Bratislavě, kde vznikala projekt pro gymnázium.

Ve vývoji fyzikálního vzdělávání u nás neměly vznikající projekty obdobu jak z koncepčního hlediska, tak metodologicky. Navržené koncepty byly nejen ve všech detailech diskutovány v pracovních skupinách obou VÚP, ale byly vytvořeny experimentální učební texty, které byly podrobeny výzkumnému ověřování na řadě škol. Výsledkem bylo vytvoření nových učebních osnov fyziky pro základní školu i pro gymnázium a zahájení tvorby nového souboru učebnic pro oba typy škol. Tyto práce pokračovaly prakticky až do konce 80. let a jejich výsledkem je rozsáhlý soubor učebnic jak pro povinnou, tak pro volitelnou složku výuky. Např. pro gymnázium bylo vytvořeno celkem 16 učebnic a příruček pro žáky (4 učebnice pro povinnou výuku, 4 pro volitelný seminář a cvičení, 5 pro výběrové semináře, 2 sbírky úloh z fyziky a Přehled středoškolské fyziky). Od tohoto projektu se v podstatě odvíjí i současná koncepce výuky včetně tematických učebnic fyziky pro gymnázium vydávaných nakladatelstvím Prometheus. Většina autorů těchto učebnic se také na realizaci zmíněného projektu podílela.

Didaktika fyziky a současnost

Významně ovlivnily vývoj didaktiky fyziky společensko politické změny po roce 1989. Počáteční období nového společenského uspořádání znamenalo pro didaktiku fyziky v ČR určitý útlum. Došlo ke zrušení Kabinetu pro modernizaci vyučování fyzice, ministerstvo školství ukončilo vydávání časopisu Matematika a fyzika ve škole, skončila vědecká příprava k získání kvalifikace CSc. v oboru teorie vyučování fyzice aj. Postupně se však situace konsolidovala a nové podněty pro řešení problémů fyzikálního vzdě-

lávání vyplynuly z podstatně větší celkové liberalizace ve školství, z vytvoření prostoru pro požadovanou volnost v projektování výuky, ve výběru a uspořádání učiva, v modernizaci výuky s využitím moderních technologií atd.

Řešiteli problémů, před nimiž nově stála didaktika fyziky, se tak stali především pracovníci fakult připravujících učitele fyziky. Nový systém financování výzkumných prací formou grantů se velmi rychle vžil a prakticky na všech fakultách se řeší formou projektů dílčí problémy související převážně s aktivitami jednotlivých pracovišť. Jako nedostatek je ovšem možné chápat roztržitost této výzkumné činnosti a malou její koordinovanost. K jistému soustředění na konkrétní problematiku tak dochází v souvislosti se změnami ve školském systému, např. při řešení problematiky standardů fyzikálního vzdělávání, vymezení požadavků na společnou část státní maturitní zkoušky, vytváření Rámcových vzdělávacích programů pro různé typy škol a při metodické pomoci učitelům v souvislosti s povinným projektováním výuky v podobě Školních vzdělávacích programů.

Obrat k lepšímu lze zaznamenat i z hlediska vědecké přípravy nových pracovníků v didaktice fyziky. Tuto kvalifikaci v podobě doktorského studia k získání titulu Ph.D. lze nyní získat studiem na několika pracovištích v ČR v různých studijních programech. Na MFF UK v Praze a Přírodovědecké fakultě MU v Brně je to program Obecné otázky fyziky, v němž lze obhajovat i práce z didaktiky fyziky. Na Pedagogické fakultě ZČU v Plzni, Pedagogické fakultě UHK v Hradci Králové a Přírodovědecké fakultě OU v Ostravě se realizuje společný studijní program v oboru Teorie vzdělávání ve fyzice a na Přírodovědecké fakultě UP v Olomouci je to program Didaktika fyziky. Kromě toho je možné předkládat práce zaměřené na didaktiku fyziky v doktorském studiu pedagogiky na Pedagogické fakultě MU v Brně.

Zlepšilo se i kádrové obsazení jednotlivých pracovišť a v současné době působí na vysokých školách připravujících učitele fyziky 3 profesori didaktiky fyziky (E. Mechlová, E. Svoboda a I. Volf), 13 docentů s pracovním zaměřením na tuto disciplínu a řada dalších pracovníků s vědeckou hodností.

L i t e r a t u r a

- [1] *Fenclová, J.*: Úvod do teorie a metodologie didaktiky fyziky, SPN, Praha 1982.
- [2] *Fenclová, J. a kol.*: K perspektivám fyzikálního vzdělávání v didaktickém systému přírodních věd, Academia, Praha 1984.

- [3] *Kašpar, E. a kol.*: Didaktika fyziky. Obecné otázky, SPN, Praha 1978.
- [4] *Kašpar, E.*: Kapitoly z didaktiky fyziky, I. díl, SPN, Praha 1960, II. díl, SPN, Praha 1963.
- [5] *Fuka, J. – Lepil, O. – Bednařík, M.*: Didaktika fyziky, 1. vyd., UP, Olomouc 1981.
- [6] *Fuka, J. – Lepil, O. – Bednařík, M.*: Konkrétní didaktika fyziky A a B, 1. vyd., UP, Olomouc 1983.
- [7] *Vachek, J. – Ouhrabka, M. – Volf, I.*: Vybrané problémy z didaktiky fyziky, SPN, Praha 1981.
- [8] *Mechlová, E.*: Didaktika fyziky I, Pedagogická fakulta, Ostrava 1983.
- [9] *Janás, J. a kol.*: Konkrétní didaktika fyziky, SPN, Praha 1987.
- [10] *Janovič, J. a kol.*: Didaktika fyziky, UK, Bratislava 1990.
- [11] *Janás, J.*: Kapitoly z didaktiky fyziky, MU, Brno 1996.
- [12] <http://www.kfy.vslib.cz/fps/historie.htm>
- [13] Physics, Physical Science Study Committee (ed. Killian, J. R.), D. C. Heath and Comp., Boston 1960 (viz <http://libraries.mit.edu/archives/exhibits/pssc/index.html>)
- [14] *Chytilová, M.*: Příspěvek k novému pojetí obsahu a metod vyučování fyzice na základní škole, SPN, Praha 1972.

Volný pád a první kosmická rychlost

FRANTIŠEK JÁCHIM

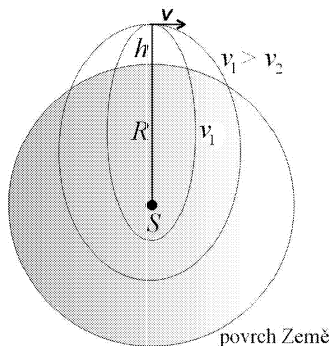
VOŠ a SPŠ Volyně

Volně puštěné těleso padá svisle^{*)}, tj. směrem ke středu Země. Při vrhu vodorovném je trajektorií tělesa kuželosečka, která vzniká složením dvou pohybů: pohybu rovnoměrného přímočarého ve směru vodorovném a volného pádu. Podle Keplerova zákona je touto kuželosečkou část elipsy, v jejímž vzdálenějším ohnisku se nachází střed Země (obr. 1).

Jak daleko od místa vrhu dopadne těleso na povrch Země záleží na počáteční rychlosti, kterou je těleso vodorovně vrženo, a také na výšce nad povrchem Země, odkud je vrženo. S větší rychlostí dosáhneme většího doletu tělesa. Těleso pak poletí po části větší elipsy. Tato elipsa již není tak

^{*)} Přesněji vzato: při tomto pohybu se jeho trajektorie od svislého směru odchyluje vlivem Coriolisovy síly.

štíhlá jako elipsa pro těleso vržené menší rychlostí, jinak řečeno: její excentricita je menší. S rostoucí počáteční rychlostí vrhu se dále excentricita elipsy zmenšuje, až je nulová a těleso se pohybuje po kružnici. Hledejme takovou počáteční rychlost tělesa, aby keplerovská elipsa přešla ve speciální případ – kružnici, tudíž jakou rychlostí musí být těleso vodorovně vrženo, aby opsalo kolem Země kružnici. Takové těleso na povrch Země nedopadne, stává se její družicí. Rychlost, kterou je toho možné dosáhnout, se nazývá *rychlost kruhová* neboli *první kosmická rychlost*.



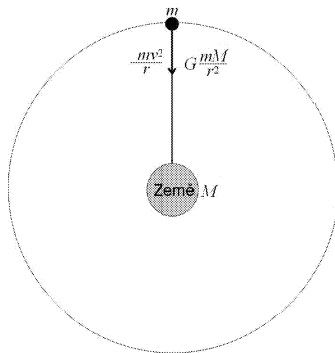
Obr. 1

Její velikost vypočteme na základě následující úvahy. Aby těleso opisovalo kružnici se středem ve středu Země (obr. 2), musí být pod vlivem síly. Jinak by se podle prvního Newtonova zákona muselo pohybovat rovnoměrně přímočaře (nebo být v klidu). Na těleso o hmotnosti m působí dostředivá síla $F_d = mv^2/r$ zakřivující jeho pohyb, a tato síla je rovna gravitační síle působící mezi tělesem a Zemí. Nachází-li se toto těleso ve výšce h nad povrchem Země (jejíž poloměr označme R a hmotnost M), lze rovnost sil zapsat takto

$$\frac{mv^2}{R+h} = G \frac{Mm}{(R+h)^2},$$

kde G je gravitační konstanta ($G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ kg}^{-1} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$). Odtud plyne pro velikost rychlosti

$$v = \sqrt{\frac{GM}{R+h}}. \quad (1)$$



Obr. 2

Pro těleso ve výšce h nad povrchem Země (pro potřeby tohoto článku budeme uvažovat $h = 100,00$ m, poloměr Země $6\,378\,000,00$ m, hmotnost Země $5,98 \cdot 10^{24}$ kg), lze po dosazení do vztahu (1) provést výpočet velikosti rychlosti

$$v = \sqrt{\frac{6,67 \cdot 10^{-11} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot 5,98 \cdot 10^{24} \text{ kg}}{6,378\,1 \cdot 10^6 \text{ m}}} \doteq 7,91 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Nyní si ukážeme jinou úvahu, jíž lze velikost první kosmické rychlosti vypočítat. Již Isaac Newton v 17. století při zkoumání pohybu Měsíce přišel na skutečnost, že jednou složek pohybu planet kolem Slunce (a měsíců kolem planet) je volný pád k ústřednímu tělesu. Kdyby Měsíc M Zemi neobíhal, padal by k ní volným pádem (s počátečním zrychlením $0,27 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2}$). Za jistý čas by volně padající Měsíc urazil dráhu MP (obr. 3). Protože však se pohybuje přibližně po kružnici, dostane se za stejný čas do bodu Q , přičemž „pokles“ jeho dráhy vzhledem k tečně v bodě M je v obou případech stejný, a to o úsek $MP = NQ$. Přitom v bodě Q je stejně vzdálen od středu Země jako v bodě M . Lze také říci, že při tomto vodorovném vrhu, Měsíc zakřivuje svoji dráhu tak, jak se „pod ním“ zakřivuje povrch Země.

Aby vodorovně vržené těleso sledovalo zakřivení Země, musí na vzdálenosti $\Delta x = 10$ km klesnout o $\Delta y = 6\,378\,100,00 \text{ m} - 6\,378\,092,16 \text{ m} = 7,84 \text{ m}$. Tuto výšku uletí volně padající těleso za čas

$$t = \sqrt{\frac{2h}{g}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 7,84 \text{ m}}{9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}}} = 1,264 \text{ s}.$$

Za stejný čas musí stihnout urazit dráhu $\Delta x = 10$ km ve vodorovném směru, musí být tedy vrženo rychlostí

$$v = \frac{\Delta x}{t} = \frac{10 \text{ km}}{1,264 \text{ s}} \doteq 7,91 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}.$$

Bude-li těleso vrženo větší rychlostí než je rychlost kruhová, jeho dráha bude opět nejprve eliptická (tentokrát s bližším ohniskem ve středu Země), až při překonání rychlosti $v > v_k \sqrt{2}$ se elipsa „otevře“ a dráha bude parabolická.

Je tu ještě jedna souvislost mezi volně padajícím tělesem a tělesem pohybujícím se po kružnici kolem Země. Volně padající těleso nemá tíhu. Pustíme-li závaží zavěšené na pružině, během volného pádu nebude pružina napnutá. Stejnou – nulovou – sílu by ukazoval siloměr se závažím v kosmické lodi pohybující se po kruhové dráze kolem Země. Kosmonaut v ní pobývající by prožíval stav beztlíže, podobně jako parašutista do doby, než se mu otevře padák.

Cestovanie vesmírom so zrýchlením 1 *g*

JÁN BEŇAČKA

Fakulta prírodných vied UKF, Nitra, Slovensko

1 Úvod

Je jasné, že ľudstvo sa v relatívne blízkej budúcnosti nutne musí dostať k surovinovým zdrojom vo vesmíre, inak hrozí kríza civilizácie. Scenár je jasný: raketový motor urýchli vesmírnu loď na cestovnú rýchlosť, potom sa

vypne, a loď bude pokračovať ďalej rovnomernou cestovnou rýchlosťou, až kým sa nepriblíži k cieľu a nezačne brzdiť, aby sa dostala na obežnú dráhu okolo telesa alebo pristála na ňom. Predpokladá sa, že tieto expedície budú trvať dlho, napr. doba expedície Zem – Mars je odhadovaná na 520 dní [1]. Taký dlhý stav beztiaže môže mať vážne následky pre zdravie posádky.

Je tu jedna možnosť ako sa vyhnúť tomuto problému – urýchľovať alebo brzdiť loď so zrýchlením $1\ g$, čo by simulovalo pozemskú gravitáciu.

V článku budeme analyzovať uvedený letový režim, a to z hľadiska dĺžky trvania, maximálnej rýchlosti, ale hlavne vlastností raketového pohonu.

Problém patrí do dynamiky telies s premennou hmotnosťou. Riešenie vyžaduje vyššie matematické vedomosti. Úloha je vhodnou témou na výberový seminár z fyziky v štvrtom ročníku gymnázia po tom, ako žiaci na matematike prebrali integrálny počet.

2 Riešenie v 1. ročníku strednej školy

Predpokladajme, že loď sa pohybuje po priamke. Počiatočná rýchlosť je nulová. V prvej polovici dráhy loď zrýchľuje so zrýchlením $1\ g$. Potom sa motor vypne, loď sa otočí o 180° (dobu otočenia zanedbáme), motor sa zapne, a loď spomaľuje so spomalením $1\ g$ až na nulovú rýchlosť.

Nech je celková doba letu t_T . Zrýchľovanie trvá $t_T/2$, takže dosiahnutá rýchlosť (maximálna rýchlosť letu) a celková dráha sú

$$v_T = g \frac{t_T}{2}, \quad d_T = \frac{1}{2}g \left(\frac{t_T}{2} \right)^2. \quad (1)$$

Spomaľovanie trvá opäť $t_T/2$, takže prekonaná dráha je rovnaká. Celková dráha je

$$d_T = \frac{1}{2}g \left(\frac{t_T}{2} \right)^2 + \frac{1}{2}g \left(\frac{t_T}{2} \right)^2 = \frac{gt_T^2}{4}. \quad (2)$$

Potom

$$t_T = 2\sqrt{\frac{d_T}{g}}, \quad (3)$$

a následne

$$v_T = \sqrt{gd_T}. \quad (4)$$

Pre vzdialenosť Zem – Mesiac $3,8 \cdot 10^5$ km [2] dostávame $t_T \approx 3,5$ h, $v_T \approx 61$ km/h, pre vzdialenosť Zem – Mars $7,5 \cdot 10^7$ km [3] je $t_T \approx 2$ dni, $v_T \approx 858$ km/s, a pre vzdialenosť Zem – Pluto $5,8 \cdot 10^9$ km [4] je $t_T \approx 18$ dní, $v_T \approx 7542$ km/s.

Hodnoty času t_T sú zaujímavo malé. Využívanie planét ako surovinných zdrojov môže teda začať. Lenže, nevieme nič o kozmickej lodi. Aké vlastnosti musí mať raketový motor? Aké sú energetické nároky? Sú tieto lety vôbec možné?

3 Riešenie v štvrtom ročníku gymnázia

Sila ideálneho raketového motora (tlak v ústí dýzy sa rovná okolitému tlaku) je [5]

$$F = v_v m_s, \quad (5)$$

kde m_s je hmotnosť plynov prúdiacich z dýzy za sekundu (t.j. spotreba paliva za sekundu) a v_v je ich rýchlosť vzhľadom k rakete. Predpokladajme, že v_v je konštanta, a že m_s je funkciou $m_s(t)$ času. Nech M je hmotnosť lode v čase $t = 0$. Hmotnosť m rakety v čase t je potom

$$m = M - \int_0^t m_s(z) dz. \quad (6)$$

Chceme, aby sa raketa pohybovala s konštantným zrýchlením g . Použijeme zákon sily

$$F = gm. \quad (7)$$

Po dosadení z (5, 6) dostávame

$$v_v m_s = g \left(M - \int_0^t m_s(z) dz \right),$$

z čoho po derivácii

$$v_v \frac{dm_s}{dt} = -gm_s,$$

a po úprave

$$\frac{dm_s}{m_s} = -\frac{g}{v_v} dt.$$

Po integrovaní dostávame

$$\ln m_s = -\frac{g}{v_v} t + C \quad (8).$$

Nech M_s je sekundová spotreba paliva v čase $t = 0$. Potom $C = \ln M_s$, a rovnica (8) nadobudne tvar

$$m_s = M_s e^{-\frac{g}{v_v} t}. \quad (9)$$

Rovnica (7) pri štarte vyzerá nasledovne

$$F = gM,$$

a po dosadení z (5)

$$v_v M_s = gM.$$

Po úprave dostávame

$$M_s = \frac{gM}{v_v},$$

a po dosadení do (9) máme

$$m_s = \frac{gM}{v_v} e^{-\frac{g}{v_v} t}. \quad (10)$$

Hmotnosť m_f spáleného paliva v čase t_T trvania letu je

$$\begin{aligned} m_f &= \int_0^{t_T} m_s dt = \frac{gM}{v_v} \int_0^{t_T} e^{-\frac{g}{v_v} t} dt = -M \left[e^{-\frac{g}{v_v} t} \right]_0^{t_T} = \\ &= M \left(1 - e^{-\frac{g}{v_v} t_T} \right). \end{aligned} \quad (11)$$

Relatívna hmotnosť paliva vzhľadom k štartovacej hmotnosti M je

$$m_{fr} = \frac{m_f}{M} = \left(1 - e^{-\frac{g}{v_v} t_T} \right),$$

z čoho

$$t_T = -\frac{v_v}{g} \ln(1 - m_{fr}). \quad (12)$$

Poznámka: $(1 - m_{fr}) \in (0, 1)$, preto $\ln(1 - m_{fr})$ je záporné číslo, takže $t_T > 0$.

Ak by loď zrýchľovala s $1\ g$ po celú dobu t_T , rýchlosť po vyhorení paliva by bola

$$v_T = gt_T - v_v \ln(1 - m_{fr}). \quad (13)$$

To je v súlade s Ciolkovského rovnicou [6]

$$\begin{aligned} v_T &= v_v \ln \left(\frac{M}{M_0} \right) = v_v \ln \left(\frac{M}{M - m_f} \right) = v_v \ln \left(\frac{1}{1 - \frac{m_f}{M}} \right) = \\ &= v_v \ln \left(\frac{1}{1 - m_f} \right) = v_v \ln (1 - m_f). \end{aligned}$$

kde M_0 je hmotnosť lode bez paliva.

4 Minimálna výtoková rýchlosť plynov z motora

Kozmická loď v úlohe zrýchľuje po dobu $t_T/2$. Maximálna rýchlosť je (viď (1))

$$v_T = g \frac{t_T}{2} = -\frac{v_v}{2} \ln(1 - m_{fr}). \quad (14)$$

Polom loď spomaľuje. Celková vzdialenosť je (viď (2))

$$d_T = \frac{gt_T^2}{4} = \frac{v_v^2}{4g} \ln^2(1 - m_{fr}).$$

Následne

$$v_T = -2 \frac{\sqrt{gd_T}}{\ln(1 - m_{fr})}.$$

Pre vzdialenosti Zem – Mesiac, Zem – Mars, Zem – Pluto dostávame:

ak $m_{fr} = 99\ \%$, potom $v_v \approx 27\ \text{km/s}$, $v_v \approx 370\ \text{km/s}$, $v_v \approx 3300\ \text{km/s}$;
 ak $m_{fr} = 90\ \%$, potom $v_v \approx 53\ \text{km/s}$, $v_v \approx 750\ \text{km/s}$, $v_v \approx 6600\ \text{km/s}$;
 ak $m_{fr} = 50\ \%$, potom $v_v \approx 180\ \text{km/s}$, $v_v \approx 2500\ \text{km/s}$, $v_v \approx 22000\ \text{km/s}$.

Súčasný raketový motory majú maximálne $v_v \approx 4,4\ \text{km/s}$ [7]. Pre $m_{fr} = 90\ \%$ dostávame z rovníc (12, 13, 14) $t_T = 1000\ \text{s}$, $v_T \approx 5\ \text{km/s}$, $d_T \approx 2700\ \text{km}$. Dráha je príliš malá, takže uvedený spôsob cestovania bude možný, až keď sa budú používať principiálne nové raketové motory založené nie na chemických princípoch (horenie paliva), ale fyzikálnych (urýchľovanie iónov, atď.) [8, 9].

5 Energetické požiadavky

Práca, ktorú vykoná motor počas doby t_T je

$$W = \int_0^s \mathbf{F} d\mathbf{s} = \int_0^{t_T} \mathbf{F} \mathbf{v} dt = \int_0^{t_T} F v dt.$$

Sila motora je daná rovnicami (5, 10), rýchlosť lode v čase t je $v = gt$, takže

$$W = g^2 M \int_0^{t_T} t e^{-\frac{g}{v_v} t} dt = M v_v^2 \left[1 - \left(1 + \frac{gt_T}{v_v} \right) e^{-\frac{gt_T}{v_v}} \right].$$

Hmotnosť m_f paliva je daná rovnicou (11). Požadované množstvo energie pripadajúce na 1 kg paliva (t. j. výhrevnosť, alebo energetická hustota) je

$$W_{fu} = \frac{W}{m_f} = v_v^2 \frac{1 - \left(1 + \frac{gt_T}{v_v} \right) e^{-\frac{gt_T}{v_v}}}{1 - e^{-\frac{g}{v_v} t_T}} = 4gd_T \frac{m_{fr} + (1 - m_{fr}) \ln(1 - m_{fr})}{m_{fr} \ln^2(1 - m_{fr})}.$$

Pre vzdialenosti Zem – Mesiac, Zem – Mars, Zem – Pluto dostávame:

ak $m_{fr} = 99 \%$, potom $W_{fu} \approx 6,7 \cdot 10^8$ J/kg, $W_{fu} \approx 1,3 \cdot 10^{11}$ J/kg, $W_{fu} \approx 1,0 \cdot 10^{13}$ J/kg;

ak $m_{fr} = 90 \%$, potom $W_{fu} \approx 2,1 \cdot 10^9$ J/kg, $W_{fu} \approx 4,1 \cdot 10^{11}$ J/kg, $W_{fu} \approx 3,2 \cdot 10^{13}$ J/kg;

ak $m_{fr} = 50 \%$, potom $W_{fu} \approx 9,5 \cdot 10^9$ J/kg, $W_{fu} \approx 1,9 \cdot 10^{12}$ J/kg, $W_{fu} \approx 1,5 \cdot 10^{14}$ J/kg.

Najväčšiu výhrevnosť z fosílnych palív má benzín, a to $W_{fu} \approx 4,7 \cdot 10^7$ J/kg [10]. Tekutý vodík má maximálnu výhrevnosť zo všetkých palív, a to $W_{fu} \approx 1,4 \cdot 10^8$ J/kg. Energetická hustota uránu U 235 pri štiepení jadier je $W_{fu} \approx 7,7 \cdot 10^{13}$ J/kg. Energetická hustota vodíka pri fúzii jadier je $W_{fu} \approx 3,0 \cdot 10^{14}$ J/kg. Ako vidieť, cestovanie na uvedené vzdialenosti so zrýchlením 1g je možný len s použitím jadrových technológií.

Celkom nakoniec, vzorec $E = mc^2$ dáva $W_{fu} \approx 9 \cdot 10^{16}$ J/kg. To znamená, že 1 g cestovanie je možné s motorom anihilujúcim hmotu i na ďaleko väčšie vzdialenosti. Pre vzdialenosť Zem – Pluto vychádza $m_{ff} \approx 0,13 \%$ (ako 2 litre benzínu v osobnom aute).

5 Záver

Ak predpokladáme, že pohonná látka predstavuje 50 % z hmotnosti lode pri štarte, potom nutnými podmienkami pre uskutočnenie ciest na vzdialenosti Zem – Mesiak, Zem – Mars a Zem – Pluto so zrýchlením $\pm 1 g$ sú:

- a) Raketové motory s výtokovými rýchlosťami okolo 180 km/s, 2 500 km/s, a 22 500 km/s;
- b) Pohonná látka s energetickou hustotou 10 GJ/kg, 2 TJ/kg a 150 TJ/kg, čo spĺňajú len štiepne materiály, alebo vodík pri fúzii jadier.

Literatúra

- [1] <http://www.imbp.ru/Mars500/Mars500-e.html>. Eetrieved 10:30, July 2, 2007.
- [2] Moon. In Wikipedia, The Free Encyclopedia. Retrieved 10:36, July 2, 2007, from <http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Moon&oldid=141805733>.
- [3] Mars. In Wikipedia, The Free Encyclopedia. Retrieved 10:38, July 2, 2007, from <http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Mars&oldid=141969984> [2].
- [4] Pluto. In Wikipedia, The Free Encyclopedia. Retrieved 10:38, July 2, 2007, from <http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Pluto&oldid=141528650>.
- [5] <http://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/rockth.html>. Retrieved 10:32, July 2, 2007.
- [6] Tsiolkovsky rocket equation. In Wikipedia, The Free Encyclopedia. Retrieved 10:33, July 2, 2007, from http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Tsiolkovsky_rocket_equation&oldid=140956051.
- [7] Space Shuttle main engine. In Wikipedia, The Free Encyclopedia. Retrieved 10:39, July 2, 2007, from http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Space_Shuttle_main_engine&oldid=141241061.
- [8] <http://www.grc.nasa.gov/WWW/ion/overview/overview.htm>. Retrieved 10:39, July 2, 2007.
- [9] Rocket engine. In Wikipedia, The Free Encyclopedia. Retrieved 10:40, July 2, 2007, from http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Rocket_engine&oldid=141073495.
- [10] Energy density. In Wikipedia, The Free Encyclopedia. Retrieved 10:42, July 2, 2007, from http://en.wikipedia.org/wiki/Energy_density.