Galileiho studium volného pádu

Jana Rybníčková, Přírodovědecká fakulta MU Brno*

Osobnost Galilea Galileiho (1564–1642) je dodnes pro širokou veřejnost přizdobena alespoň dvěma legendami. Ta známější praví, že nepokořený Galilei, odcházeje ze síně, v níž si vyslechl rozsudek Svatého oficia, zakazující mu nadále mluvit a přemýšlet o učení o pohybu Země, zamumlal si do vousů italskou větu *„Eppur si muove!" (A přece se točí!).* Ta méně známá popisuje Galileiho jako muže, jenž prý konal pokusy, při nichž shazoval ze šikmé věže v Pise různé předměty, aby důkladně prozkoumal zákonitosti volného pádu a vyvrátil tak základy Aristotelova učení o pohybu padajících těles.

Obě tyto „historické skutečnosti" jsou však zřejmě pouze legendami, i když mají jakési racionální jádro. Inkviziční proces proti Galileimu je velmi podrobně popsán například v knize [1], která na základě dobových dokumentů rekonstruuje celý jeho průběh.[1] Galilei dožil svůj život v domácím vězení pod dozorem Svatého oficia a jakýmkoliv prohlášením o pohybu Země by vyvolal znovuobnovení procesu, který by tentokráte již musel skončit jako hrdelní. Navíc přibližně od roku 1634, tj. rok po vyhlášení rozsudku, byl Galilei rozhodnut dokončit ještě jedno velké dílo, týkající se pozemské mechaniky; pro takovou práci ovšem potřeboval čas a klid. Tím dílem byla kniha *Discorsi e dimonstrazioni matematiche intorno a due nuove scienze attenenti alla mecanica & i movimenti locali (Rozpravy a matematické důkazy o dvou nových vědách, o mechanice a místních pohybech)* [4]. Galilei v ní shrnuje většinu vědomostí o mechanice, které během svého života načerpal na základě výpočtů, pozorování a experimentů. Jedna z kapitol této knihy se zabývá volným pádem těles, a tak se dostáváme i k zmiňované legendě o házení předmětů ze šikmé věže.

Galileo Galilei opravdu pobýval v Pise; jednak se v tomto městě roku 1564 narodil, jednak zde v letech 1589–1592 působil jako profesor na katedře matematiky. Matematika tou dobou neobsahovala pouze algebru a geometrii, ale její součástí bylo i to, co bychom dnes nazvali technickými aplikacemi: fyzika, obzvláště mechanika a balistika, a stavitelství. O programu Galileiho přednášek v Pise víme poměrně málo; pro své studenty sepsal traktát *Le Mecanice (Mechanika)* (1593), který se však zabývá spíše konstrukcí jednoduchých strojů a jako první formuluje „zlaté pravidlo mechaniky" (totiž že přírodu nemůžeme podvést, protože při použití jednoduchých strojů si práci pouze usnadníme, ale nezmenšíme množství práce, které je potřeba vykonat). Kromě toho se Galilei už tehdy zabýval problémy šikmého vrhu a volného pádu. Šikmá věž v Pise má výšku 58,36 m a její odklon od svislice je asi 2,3 m (v Galileiho době to mohlo být přibližně o 25 cm méně); byla by tedy ideálním místem pro experimenty s volným pádem. Galilei však pravděpodobně této příležitosti nevyužil; neexistují žádné důkazy, že by na této věži prováděl jakékoliv pokusy. V *Rozpravách* udává jako běžnou výšku, při níž prováděl měření dráhy volně padajících těles, čtyři až šest sáhů[2]; největší udávané výšky jsou sto a dvě stě sáhů (i když tyto hodnoty slouží spíše jako konkrétní příklady pro ilustraci argumentace a výpočtů), ale nikde není uveden údaj dvacet sáhů, což je výška šikmé věže.

O Galileim se často hovoří jako o zakladateli moderní přírodovědy. Toto čestné označení je projevem uznání především za vytvoření a důsledné uplatňovaní postupu, který dnes nazýváme experimentální metodou: experiment má být podle něj podkladem k vytvoření hypotézy, jejíž pravdivost je pak třeba ověřit další sadou experimentů. Tento postup se dá názorně

---

* janar@physics.muni.cz

[1] Stručnější Galileiho životopis přináší též kniha [2]. Velmi zajímavý je také článek [3], který popisuje i vybrané Galileiho astronomické objevy a jejich přínos k vyvrácení Ptolemaiova modelu sluneční soustavy.

[2] 1 toskánský sáh = 2,915 m [8]

demonstrovat na ukázkách z *Rozprav*, které pojednávají o volném pádu. Galileo zde napadá názory peripatetické školy[3]; proto nebude na škodu si nejprve připomenout závěr, který o pádu těles vyslovil sám Aristoteles (384–322 př. n. l.) ve svém díle *Fyzika* [5]:

> *„... Vidíme totiž, že to, co má větší sílu, ať už tíže, nebo lehkosti, pakliže všechno ostatní se chová stejně, pohybuje se skrze stejný prostor rychleji, a to podle poměru, v němž jsou k sobě velikosti věcí. A tak by tomu muselo být i v prázdnu.*
>
> *Ale to je nemožné. Neboť z které příčiny by se pohybovalo rychleji? Musí však tomu tak býti v plnu, neboť co je větší, svou silou je rychleji rozdělí; buď je rozdělí svým tvarem, nebo svojí tíží, kterou má to, co je v pohybu, nebo to, co je vrženo. Tedy v prázdnu bude všechno stejně rychlé. Ale to je nemožné... “*

Proti celkovému vyznění této ukázky nemůžeme v podstatě nic namítnout; dnešního čtenáře sice zaráží především velmi volné zacházení s fyzikálními pojmy, ale závěr plynoucí z této ukázky, totiž že tělesa pohybující se ve vakuu by padala stejně, je správný, a ve shodě jak s našimi názory, tak i s názory Galileiho. Co tedy Galilei vytýká aristotelovské fyzice?

Galileiho odpor není namířen proti uvedenému původnímu Aristotelovu textu, ale proti „aristotelovským“ (čili peripatetickým) argumentům; Aristotelovo učení bylo za těch téměř dva tisíce let, které Galileiho od Aristotela dělily, pozměněno nebo zcela zkresleno řadou peripatetiků. Galilei v důsledku toho zřejmě znal pouze první odstavec uvedené citace, v němž slovo velikosti bylo nahrazeno slovem hmotnosti. Proto Salviati, který v *Rozpravách* vystupuje jako hlasatel Galileiho názorů, se snaží tvrzení, že tělesa se v prázdném prostoru pohybují rychlostmi, které jsou v poměru jejich hmotností, vyvrátit. Protože nemůže provést přímý experimentální důkaz, argumentuje nejprve výsledky pozorování (všechny následující ukázky jsou z *Rozprav* [4], ale jejich český překlad je uveden i v [1] na stranách 158–163):

> *„... Viděli jsme, že rozdíly v rychlosti těles o rozličné váze se stávají mnohem větší, úměrně k růstu odporu kladeného jejich pohybu. Vyjádřeme to lépe: zlato klesá ve rtuti ke dnu nejenom mnohem rychleji než olovo, ale dokonce jen ono klesá, zatímco ostatní kovy a všechny kameny zůstávají na hladině a plavou. Naopak ve vzduchu bude rozdíl v rychlostech mezi koulemi zlata, olova, mědi, porfyru a ostatních těžkých látek takřka neměřitelný, protože koule ze zlata, která bude padat sto sáhů, předstihne měděnou kouli stěží o čtyři prsty... “*

a formuluje novou hypotézu:

> *„Když jsem to všechno viděl, dospívám k tomu názoru, že kdyby byl úplně vyloučen odpor prostředí, všechna tělesa by padala stejnou rychlostí... “*

Platnost této hypotézy bude v dalším textu ověřovat:

> *„... Klademe si za úkol zkoumat, co by se přihodilo pohybujícím se tělesům o velmi rozdílné váze v prostředí, jehož odpor by byl nulový, takže rozdíly rychlostí, které*

[3] Slovem peripatetik (*περιπαθε'σ* = vášnivě diskutovat, hovořit se zanícením) byli původně označováni Aristotelovi žáci; později se používalo k označení jakéhokoliv vykladače Aristotelova díla; v Galileiho době již téměř významově splynulo se slovem scholastik, což byl zastánce filosofie, která doporučovala při zkoumání jevů raději citovat uznávané autority (např. Aristotela či Písmo svaté) než používat k vysvětlení jevů vlastního rozumu a logiky. Galilei se scholastickým přístupem nesouhlasil: *„Je zpozdilostí chodit hledat smysl věcí přírody do papírů toho nebo onoho, místo do díla přírody... “* [6].

by byly mezi těmito pohybujícími se tělesy naměřeny, by se mohly odvozovat pouze od rozdílů jejich váhy.

Pouze prostor, který je zcela vzduchoprázdný a který je prost jakéhokoliv jiného tělesa, byť i velmi řídkého a prostupného, by nám umožňoval pozorovat to, co hledáme; protože však nemáme takový prostor k dispozici, budeme pozorovat, co se stane v prostředích, která jsou řidší a kladou menší odpor ve srovnání s prostředími, jež jsou méně řídká a kladou odpor větší....“

Galileiho argumentace je opravdu podmíněna neexistencí funkční vývěvy, s jejíž pomocí by mohl (jako dnes téměř každý středoškolský učitel) prokázat, že ve vyčerpané trubici padají všechna tělesa se stejným zrychlením. První funkční vývěvu sestrojil totiž Otto von Guericke (1602–1686) [7] pravděpodobně v letech 1650–1654, čili až po Galileiho smrti (1642). Proto zkoumá Galilei pohyb lehkého měchýře naplněného vzduchem a olověné koule stejné velikosti ve vzduchu a ukazuje, že na dráze čtyř až šesti sáhů nebude předstih olova před měchýřem v poměru hmotností, čili 1:1000, ale v poměru menším.

Simplicio, který hraje v *Rozpravách* úlohu stoupence peripatetické školy, argumentuje proti uvedeným výsledkům odkazem na první odstavec citované ukázky z Aristotelova díla:

„Znamenitě. Ale jestliže rozdíl vah u pohybujících se těles o různé váze nemůže podle vaší úvahy určit variace [způsobit změnu] poměru rychlostí za předpokladu, že se váha nemění, pak prostředí, o němž předpokládáme, že je vždycky stejné, také nebude moci způsobit žádnou změnu v tomto poměru.“

Salviati, působící jako hlasatel Galileiho názorů, odpovídá na uvedenou Simpliciovu protiargumentaci téměř dnešními metodami: vyjmenovává totiž síly, které na těleso působí, a komentuje vliv těchto sil na rovnoměrnost či nerovnoměrnost pohybu tělesa. Je velmi zajímavé porovnat tyto Galileiho závěry s druhým odstavcem Aristotelova textu, který Galilei pravděpodobně neznal, a samozřejmě i s tím, co už ví dnešní čtenář:

„...těžké těleso v sobě od přírody obsahuje hybný princip, který ho nese k společnému středu těžkých těles, to znamená ke středu našeho zemského glóbu, a to stále a vždy rovnoměrně se zrychlujícím pohybem, takže ve stejných časových údobích dochází ke stejnému přidávání nových impulsů a nových stupňů rychlosti. Ale toto, rozumějme tomu dobře, se uskutečňuje pouze za podmínky, že jsou vyloučeny všechny náhodné a vnější překážky; je však jedna, kterou vyloučit nemůžeme, totiž odpor prostředí, které musí těleso při svém pádu před sebou otevírat a podél sebe odsouvat. Prostředí, i kdyby bylo kapalné, snadno prostupné a v klidu, klade pohybujícímu se tělesu, které jím prochází, větší nebo menší odpor, podle toho, musí-li se stát průchodným pro pomaleji nebo rychleji se pohybující těleso. Pohybující se těleso, které, jak jsme již řekli, se od přírody pohybuje tak, že stále zrychluje svůj pohyb, se střetá se stále rostoucím odporem a tedy se pohyb zpomalí; nová rychlost, které dosáhne v každém dalším okamžiku svého pádu, se zmenší natolik, že na konci dráhy klesne jeho rychlost za současného růstu odporu prostředí tak, že se obojí navzájem vyrovná, zrychlení se vyloučí a pohyb tělesa se zredukuje na rovnoměrný pohyb, který se nadále bude stále zachovávat. Důvodem růstu odporu prostředí není tedy změna v jeho podstatě, nýbrž zvýšení rychlosti, s jakou se musí rozevřít a rozestoupit, aby poskytlo místo pro průchod těžkého tělesa, jehož pád se postupně zrychluje. Když na druhé straně vidím, jak velký je odpor vzduchu vůči slabému úsilí měchýře a jak malý je proti značné váze olova, nabývám jistoty, že kdyby byl tento odpor úplně odstraněn – což by znamenalo po-

skytnout měchýři mnohem větší a olovu mnohem menší výhodu – pak by obě tělesa padala stejně rychle.“

Tímto Galilei dokazuje platnost své hypotézy o stejném pohybu těles ve vakuu; chce však ještě zjistit, jaké vztahy platí mezi rychlostmi těles, která se pohybují v různých prostředích. Galilei zapojuje nyní do své argumentace i matematický výpočet, který je (narozdíl od původní Aristotelovy dedukce uvedené v [5]) dnešnímu fyzikovi velmi blízký:

„Nuže, je-li stanoveno jako princip, že v prostředí, které by nekladlo žádný odpor rychlosti pohybu, protože by bylo úplně prázdné, nebo z nějakého jiného důvodu, by rychlosti všech pohybujících se těles byly stejné, pak můžeme oprávněně stanovit vztahy mezi rychlostmi sobě navzájem podobných i nepodobných pohybujících se těles v témž prostředí nebo v různých prostředích, která nejsou prázdná a tedy kladou odpor; a dospějeme k tomu tím, když prozkoumáme, kolik tíže prostředí odejme na tíži pohybujícího se tělesa, přičemž toto bude nástrojem, kterým si pohybující se těleso razí cestu, odsouvajíc podél svých boků částice prostředí, což je operace, k níž ve vzduchoprázdnu nedochází, takže tady nevyplývá žádný rozdíl z rozdílu tíže; a protože je zjevné, že prostředí nadlehčuje tělesa, která se v něm nacházejí, o váhu objemu, která se rovná jeho hmotě, dosáhneme hledaného výsledku zmenšením – ve stejném poměru – rychlostí pohybujících se těles, které by byly stejné v prostředí bez odporu, jež uvažujeme jako předpoklad. Uvažujme jako příklad, že olovo je desettisíckrát těžší než vzduch a eben jenom tisíckrát [4] a že rychlost těchto dvou těles, uvažovaná absolutně, to znamená bez ohledu na jakýkoliv odpor, by byla stejná, pak odpor vzduchu ubere desetitisícinu rychlosti u olova a tisícinu u ebenu; když tedy budou olovo a eben padat z nějaké výšky vzduchem, pak na této dráze, kterou by urazily oba předměty ve stejné době, kdyby nebylo zpoždění, způsobeného odporem vzduchu, odpor vzduchu sníží o jednu desetitisícinu rychlost olova a o deset desetitisícin rychlost ebenu. Což je totéž, jako bychom řekli, že je-li dráha pádu rozdělena na deset tisíc částí, pak eben, když olovo dopadne na zem, se bude nacházet pozadu o deset, či spíše o devět z těchto deseti tisíc částí dráhy. A co jiného to znamená, než že olověná koule padající z věže o výšce dvou set sáhů předstihne přinejmenším o čtyři prsty ebenovou kouli padající z téže výše? ...“

Galilei dokončuje argumentaci řadou obdobných příkladů, popisujících rychlosti pohybů různých těles ve vzduchu a ve vodě. Sadu experimentů a výpočtů provedených podle pravidla, uvedeného v předchozí ukázce, komentuje větou:

„Budeme-li se řídit tímto pravidlem, myslím, že zkušenost se bude shodovat s naším výpočtem mnohem přesněji nežli s Aristotelovým.“[5]

Převeďme Galileiho výpočet do jazyka současné fyziky a matematiky. Galilei uvažuje o tom, že na každé padající těleso působí gravitační síla $\vec{F}_g$, která směřuje do středu Země. Tuto sílu nahraďme pro upřesnění silou tíhovou, jež směřuje svisle dolů a lze ji vyjádřit jako

[4] Ve skutečnosti je hustota vzduchu $\rho_{vzduch} = 1{,}2932\ \mathrm{kg\cdot m^{-3}}$, hustota olova $\rho_{olovo} = 11341\ \mathrm{kg\cdot m^{-3}}$ a hustota ebenového dřeva $\rho_{eben} = 1200\ \mathrm{kg\cdot m^{-3}}$ [9], a tedy jsou tyto poměry uvedeny téměř přesně (na základě těchto číselných hodnot získáme 8 770:1 a 928:1).

[5] Galilei se opět odkazuje na citovanou ukázku z Aristotelovy *Fyziky* [5], konkrétně na to, že by poměr rychlostí padajících těles měl být stejný jako poměr jejich hmotností.

$\vec{F}_G = m \cdot \vec{g}$, kde m je hmotnost tělesa a $\vec{g}$ je vektor tíhového zrychlení. Dále na těleso padající v odporujícím prostředí působí síla vztlaková, jejíž velikost je dána Archimedovým zákonem: $\vec{F}_{vz} = -V \cdot \rho_p \cdot \vec{g}$, kde V je objem tělesa a ρ_p je hustota prostředí, ve kterém se těleso pohybuje; v tomto vztahu můžeme nahradit objem V tělesa výrazem $V = \frac{m}{\rho_t}$, kde ρ_t je hustota tělesa. Použijeme-li druhý Newtonův zákon

$$m \cdot \vec{a} = \vec{F}_G + \vec{F}_{vz},$$

získáme pro vektor zrychlení vztah

$$\vec{a} = \vec{g} \cdot \left(1 - \frac{\rho_p}{\rho_t}\right);$$

směr zrychlení bude svislý a dolů za předpokladu, že $\rho_p < \rho_t$. Pro velikost rychlosti a dráhu takovéhoto pohybu pak platí vzhledem k nulovosti počáteční rychlosti

$$v = a \cdot t \qquad s = \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2.$$

Pro poměr velikostí rychlostí a drah padajícího ebenu a olova ve vzduchu pak získáme

$$\frac{v_{eben}}{v_{olovo}} = \frac{s_{eben}}{s_{olovo}} = \frac{a_{eben}}{a_{olovo}} = \frac{g \cdot \left(1 - \frac{\rho_{vzduch}}{\rho_{eben}}\right)}{g \cdot \left(1 - \frac{\rho_{vzduch}}{\rho_{olovo}}\right)}.$$

Dosazením Galileiho hodnot je tento číselný poměr roven $\frac{999}{1000} : \frac{9999}{10000}$, což se dá interpretovat přesně tak, jak to provedl Galilei.

Celá argumentace má bohužel jednu vadu: zrychlení vypočtené touto metodou je sice pro každé padající těleso rozdílné, ale zůstává stále konstantní v čase; těleso se tedy bude pohybovat po celou dobu rovnoměrně zrychleně, a tedy nedojde k *„vyloučení zrychlení"* a *„redukci pohybu tělesa na rovnoměrný pohyb"*. Byl si Galilei tohoto nedostatku vědom? Možná že ano, protože tvrdí, že *„...zkušenost* se *bude s naším výpočtem shodovat mnohem přesněji..."*, nikoliv, že dojde k přesné shodě. Mohl však Galilei tuto nepřesnost ve výpočtu odstranit? Z ukázky je zřejmé, že Galilei na základě pozorování správně usuzoval na existenci síly dynamického odporu $\vec{F}_{odp}$, která má opačný směr, nežli je směr rychlosti tělesa, a je velikosti této rychlosti úměrná. Galilei však tuto sílu při výpočtu nepoužil. Mohl se tak rozhodnout proto, že vliv této síly na pád koulí z malých výšek se mu zdál zanedbatelný; anebo proto, že nebyl schopen (a ani my dodnes nejsme) zapsat přesný tvar této síly a poté určit zrychlení padajícího tělesa za předpokladu, že síla dynamického odporu působí. Vysokoškolsky vzdělaný fyzik ví, že jsme schopni odporovou sílu analyticky vyjádřit jen v určité aproximaci; protože chceme popisovat pád tělesa z malé výšky, stačí použít lineární aproximaci $\vec{F}_{odp} = -const \cdot \vec{v}$, a tak získáme z druhého Newtonova zákona diferenciální rovnici, která popisuje pád tělesa ve svislém směru (daném kladným směrem osy x, platí $a = \frac{\mathrm{d}^2 x}{\mathrm{d}t^2}$ a $v = \frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}$):

$$\frac{\mathrm{d}^2 x}{\mathrm{d}t^2} + \frac{const}{m} \cdot \frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t} - g \cdot \left(1 - \frac{\rho_p}{\rho_t}\right) = 0.$$

Řešením takovéto rovnice (s přihlédnutím k počáteční podmínce $v_{(t=0)} = 0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) získáme vyjádření pro rychlost, které je závislé na hmotnosti m a tvaru (obsažen v koeficientu *const*) padajícího tělesa

$$v = \frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t} = g \cdot \left(1 - \frac{\rho_p}{\rho_t}\right) \cdot \frac{m}{const} \cdot \left(1 - e^{-\frac{const}{m} \cdot t}\right);$$

tento výsledek je slovně popsán jak v Galileiho *Rozpravách*, tak i v druhém odstavci citátu z Aristotelovy *Fyziky* („*těleso rozdělí prostředí svým tvarem nebo svojí tíží*"). Provedeme-li však rozvoj exponenciální funkce $e^{-\frac{const}{m} \cdot t} = 1 - \frac{const}{m} \cdot t + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{const}{m} \cdot t\right)^2 - \frac{1}{3!} \cdot \left(\frac{const}{m} \cdot t\right)^3 + \ldots$ a omezíme se pouze na první dva členy, získáme přibližné řešení $v = g \cdot \left(1 - \frac{\rho_p}{\rho_t}\right) \cdot t$, které odpovídá výpočtu provedenému Galileim. Pokud navíc uvažujeme, že prostředí má nulovou hustotu ($\rho_p = 0$) a neklade odpor ($const \to 0$), přechází uvedené řešení diferenciální rovnice limitně na vztah

$$v = \frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t} = \lim_{const \to 0} g \cdot \frac{m}{const} \cdot \left(1 - e^{-\frac{const}{m} \cdot t}\right) = g \cdot t,$$

čili $v = g \cdot t$, který užívá pro popis volného pádu ve vakuu každá středoškolská učebnice.

Co tedy říci závěrem? Tvrzení, že Galilei programově vyvracel Aristotelovy závěry, je silně zjednodušené, alespoň co se pozemské mechaniky týká; například na pád tělesa v odporujícím prostředí měli Aristoteles i Galilei velmi podobné názory, které se shodovaly i s názory našimi. Zásadní rozdíl v úvahách o volném pádu spočívá v tom, že Aristoteles [5] považoval pohyb ve vakuu za jev nemožný[6], zatímco Galilei pouze za jev nedosažitelný jemu dostupnými prostředky. Proto bývá chybou označovat Galileiho za Aristotelova odpůrce; Galilei nenapadal Aristotelovy názory, ale interpretace jeho učení, které neodpovídaly pozorování a experimentu.[7] Myslím, že nejlépe to osvětlují následující řádky z Galileiho dopisu Fortuniovi Licettimu [1], které jsou aktuální i pro dnešního fyzika:

> „*...Soudím (a věřím, že se připojíte k mému názoru), že být skutečně peripatetikem spočívá především ve filozofování podle Aristotelova učení; nuže, jeho metoda, pravdivé předpoklady a principy, o něž se opírá, mají vědecký charakter.*
>
> *Mezi předpoklady, které nás Aristoteles učí ve své Dialektice, jsou takové, jimiž nás varuje před klamnými řečmi: vede nás ke správnému uvažování, abychom mohli z daných premis dedukovat nevyhnutelný závěr. Domnívám se, že jsem použitím této metody dosáhl nesčetných pokroků v čisté matematice a nikdy jsem nedospěl k žádnému klamnému závěru. Přímočarost v důkazu mě uchránila před upadnutím do dvojsmyslnosti. Takže až dosud jsem peripatetikem vlastně já.*
>
> *Mezi jisté prostředky, jak dosáhnout pravdy, náleží opírat každé uvažování o přísnou zkušenost (...), protože není možné, aby byla smyslová zkušenost protichůdná pravdě. A toto je rovněž Aristotelův recept, o němž se již dlouho soudí, že má víc*

---

[6] Tento závěr lze získat rozborem několika stran Aristotelovy *Fyziky* [5], které předcházejí citované ukázce. Galilei se však na tento Aristotelův text nikde v *Rozpravách* neodvolává.

[7] Na další aspekty Galileiho studia volného pádu, především na jeho důležitost pro další vývoj fyziky, upozorňují i [10] a [11].

platnosti a síly než „autorita" všech velkých tohoto světa; víte sám, že nejenom nemáme trpět autoritu jiných, ale že musíme nedůvěřovat naší vlastní autoritě vždycky, když zkušenost oponuje úvaze..."

Literatura

[1] Namer É.: *Případ Galilei.* Mladá fronta, edice Prameny č. 43, Praha 1982.

[2] Smolka J.: *Galileo Galilei: Legenda moderní doby.* Prométheus, edice Velké postavy vědeckého nebe, sv. 7, Praha 2000.

[3] Macháček M.: *Život, odsouzení a rehabilitace Galilea Galileiho.* Čs. čas. fyz. **43** (1993) 117.

[4] Galilei G.: *Unterredungen und mathematishe Demonstrationen über zwei neue Wissenzweige, die Mechanik und die Fallgesetze (1638), Erster und zweiter Tag.* Akademische Verlagsgeselschaft, edice Ostwald's Klassiker, Leipzig 1917.

[5] Aristoteles: *Fyzika.* P. Rezek, Praha 1996.

[6] Galilei G.: *Il Saggiatore (Prubíř).* Citovaná věta je uvedena ve sborníku Mudry A.: *Galileo Galilei, Schrifte, Briefe und Dokumente.*, Rütten & Loening, Berlin 1987.

[7] von Guericke O.: *Neue Magdeburische Versuche über den leeren Raum (1672).* Akademische Verlagsgesellschaft, edice Ostwald's Klassiker, Leipzig 1894.

[8] Chvojka M., Skála J.: *Malý slovník jednotek měření.* Mladá fronta, Praha 1982.

[9] Brož J., Roskovec V., Valouch M.: *Matematické a fyzikální tabulky.* SNTL, Praha 1980.

[10] Arons A. B.: *Cesta k přírodovědné vzdělanosti I.* Čs. čas. fyz. A 35 (1985) 58.

[11] Arons A. B.: *Teaching Introductory Physics.* John Wiley & Sons, New York 1997.