

# Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

---

Kenneth Laws

Fyzika tance

*Pokroky matematiky, fyziky a astronomie*, Vol. 39 (1994), No. 1, 1--14

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/138629>

## Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1994

Institute of Mathematics of the Academy of Sciences of the Czech Republic provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This paper has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://project.dml.cz>

# Fyzika tance

*Analýza pohybů při tanci z hlediska Newtonovy mechaniky přináší proniknutí do podstaty jeho estetického projevu a mohou ji ocenit nejen studenti a učitelé, ale také i diváci tanečního představení.*

Kenneth Laws

Mnoho milovníků tance — tanečníků, učitelů a diváků — považuje tanec za čistě estetické umění, při kterém se lidské tělo pohybuje podle hudby. Dornívají se, že cílem tanečnicka je předávat vizuální obrazy určené choreografem a tanečníkem. Mnoho z nich si rovněž uvědomuje, že část požitku ze sledování tance závisí na správném pochopení obtížnosti provádění jednotlivých pohybů, při kterých se i fyzicky nesnadné kroky musí divákovi zdát plynulé a elegantní. Bohužel jen velice málo odborníků analyzuje hlouběji fyzikální stránku těchto pohybů a snaží se pochopit jejich obtížnost pro tanečnicka. Proč jsou některé pohyby velice obtížné? Zdá se, jako by některé pohyby porušovaly základní fyzikální zákony. Jakým způsobem se daří tanečníkovi vytvářet takový dojem? Jakým způsobem se tanečníci snaží využít a nikoli bojovat s fyzikálními zákony pohybu?

Například, bez ohledu na to, do jaké míry si tanečník přeje odrazit se od země a následně se začít otáčet (řekněme v případě *tour en l'air*, což je skok s otočkou), zákon zachování momentu hybnosti zcela brání takovému pohybu. Nicméně pochopení základních fyzikálních zákonů, které se skrývají za tímto pohybem, umožňuje tanečníkovi vytvořit působivý dojem skoku do vzduchu s následnou otočkou.

Existují oprávněné obavy z toho, že snaze o vědeckou analýzu umělecké formy padne za oběť estetický dopad tance. Taneční kritik komentující v novinách [1] vědeckou studii *piruet* — které ve studii byly popisovány jako otáčení tělesa na špičce nohy nebo otáčení míče na patě — nazval svůj článek *Chce redukovat balet na vědu*. (Vědec ovšem tuto zřejmou předpojatost s kritikem nesdělil.)

Redukování tance na vědu ignoruje estetickou dimenzi a podstatu komunikace s divákem. Jak uvádí Suzanne Langer [2]:

*Při sledování tance nevnímáte, co se fyzicky před vámi děje — lidé pobíhají a oláčejí svými těly; co vnímáte je zobrazení interakčních sil... Ale tyto síly... nejsou fyzikálními silami svalů tanečnicka... Síly, které se nám zdají, že je vnímáme přímo a přesvědčivě, jsou ve skutečnosti vytvořeny pouze pro naši představu a existují pouze v této představě.*

---

KENNETH LAWS je profesorem fyziky na Dickinsonově univerzitě v Carlisle ve státě Pennsylvania a zároveň se zabývá profesionálně baletem ve spolupráci s Ústředním pennsylvánským baletem mládeže v témže městě. Zákony uvedené v tomto článku byly převzaty z jeho knihy *Fyzika tance* (*Physics of Dance*) s laskavým dovolením nakladatele; ©1984 Schirmer Books, A Division of Macmillan, Inc. Článek byl publikován ve *Physics Today* v únoru 1985, str. 24–31. ©1985 American Institute of Physics.

Přeložil MILOŠ JANEČEK.

Existuje rovněž pocit, že vědecké zákonitosti ve skutečnosti neplatí pro estetické formy umění. Bart Cook, člen newyorského městského baletu prohlásil v časopise *Dancemagazine* [3]: „Je to vize svobody, kterou vytváříte, pokud se snažíte odporovat fyzikálnímu zákonu. . .“ A Lisa de Ribère, sólistka Amerického baletního divadla, která svůj talent nabídla vědeckému zkoumání, říká, že pochopení fyzikálních zákonů je užitečné při vývoji techniky tanečnicka, ale poslední věcí, na kterou myslí, když je na jevišti před publikem, je ovládat svůj moment setrvačnosti nebo se snažit maximalizovat svůj moment hybnosti při otáčení! V tomto okamžiku musí tanečnick věnovat maximální pozornost uměleckým pocitům.

Jestliže však snaha soustředit se výhradně na fyzikální analýzu může odvést pozornost od provádění nebo porozumění tanci jako umělecké formě, jaký smysl má potom taková analýza? Tanečníci, učitelé tance a lidé z lékařské profese nyní zjistili, že znalost anatomie umožňuje tanečnickům používat svá těla účinněji a bezpečněji. Znalost anatomie a pohybových možností lidského těla mohou pomoci maximalizovat schopnosti jednotlivce a zabránit některým zraněním, která přerušují kariéru mnoha nadějných tanečnicků. Pochopení práce svalů při tanečním pohybu, znalost omezení vyplývajících z funkce svalů a kostí a pochopení možného rozšíření pohybového rozsahu studenta tance daného těmito omezeními je velice cenným nástrojem každého učitele tance. Uvažujme *grand battement devant* — velké přednožení s napnutým kolenem. Rozsah pohybu kyčelního kloubu může bránit tanečnickovi v provedení této figury v ideálním roznožení, to znamená, udržením obou nohou pod úhlem  $180^\circ$ . Dobrý učitel zná a vysvětluje ideální pozice a postavení těla, ale uznává rozdíl mezi ideálním a možným. Učení tance představuje rovnováhu mezi dosažením nejlepší možné techniky od tanečnicků a respektováním omezených možností jejich těl.

## Fyzika a tanec

Analýza fyzikální stránky tance může ještě fundamentálněji přispět k rozvoji tanečnickovy dovednosti. Přestože tanečníci nemohou sami sebe chápat ve fyzikálních pojmech — jako hmotná tělesa pohybující se prostorem za působení dobře známých sil a poslouchající fyzikální zákony — nemohou si dovolit tato hlediska pohybu ignorovat. Alleger Fuller Snyder říká:

*Tanec je více než umění. Je jedním z neúčinnějších nástrojů na spojení dvou nezávislých funkcí mozku — logické a intuitivní. Je spojením analytických a smyslových počtů, spojením holistického chápání s postupným myšlením. Je disciplínou, která se v rámci sebe sama zabývá základním chápáním lidské zkušenosti a konceptualizmu.*

Jak nejlépe ilustrovat fyzikální stránku tance? Tanec se skládá z klidových i pohybových poloh; má dynamická i statická hlediska. Většina aplikací fyziky se týká odezvy lidského těla na síly, které způsobují pohyb. K jakému aspektu lze přiřadit estetickou kvalitu? Lidské oko sleduje pohyb a okamžitou polohu. Otázkou je, zda vnímá obojí současně, nebo zda se v lidském vědomí zdůrazní jedna nebo druhá složka v určité době. Tato otázka mi vždy připomínala princip komplementarity Nielse Bohra — že člověk může zřetelně pozorovat vlnové vlastnosti látky (pohyb) pouze tehdy, jestliže se

v témže okamžiku vzdá pozorování jejích částicových vlastností (polohy). Možná, že pohyb a poloha jsou podobně komplementární, pokud jsou sledovány okem a vědomím.

Jedním z úkolů při zkoumání technických aspektů tance je použití vhodného slovníku a terminologie. Co může být základem pro vytvoření spojení mezi tak různorodými obory, jako je fyzika a tanec? Jako fyzikové víme, že náš obor je založen na přesných definicích příslušných pojmů. Snažíme se, aby tyto definice byly co nejobjektivnější proto, aby byly použitelné všeobecně, nezávisle na specifické interpretaci jednotlivců. Fyzikové se nemusí shodnout na interpretaci pozorování, ale jsou závislí na přijaté shodě definic pojmů.

Lidé zabývající se tancem používají jazyk k vytváření obrazů podle chápání těla a pohybu jednotlivými tanečníky. Učitel tance může používat slova, která jsou objektivně definována, ale pokud si studenti nedokáží přenést tato slova do obrazů, je takový přenos informací abstraktní a neúčinný.

Jednotliví studenti mají vzhledem k různému věku a vzdělání různou úroveň i druh chápání. Učitelé tance, kteří se často setkávají s mladými lidmi s nedostatečně bohatou slovní zásobou, vytvářejí obrazy budováním běžného chápání toho, jaký mají pocit při provádění určitého pohybu nebo dosažení jisté polohy těla. Při vysvětlování *piruety* může instruktor říkat takovému studentovi: „Snaž si představit, že tvoje tělo je vmáčknuto do brčka na pití.“ Tento obraz odpovídá fyzikální myšlence: „Při provádění kontrolované otočky se snaž zachovat kompaktní postavení kolem vertikální osy.“ Nebo ještě fyzikálněji: „Snaž se minimalizovat svůj moment setrvačnosti vzhledem k vertikální ose tak, abys minimalizoval moment hybnosti nutný pro danou rychlost otáčky.“ Sdělení je stejné, ale vzdělání studentů rozhoduje o formě jeho předání.

Při učení nebo zlepšování určitého pohybu obvykle tanečník vychází ze tří metod: z metody pokusů a chyb při nácviu základních pohybů, z příkladu zkušeného tanečníka, který provádí daný pohyb správně, a z pokynů učitele nebo kolegy. Tyto pokyny jsou obvykle založeny na intuitivním pocitu, jak má vypadat „správný“ pohyb. Přestože platnost těchto tradičních metod výuky byla historicky prověřena, jsou nyní k dispozici vylepšené postupy výuky tance. Vyšší stupeň analytického chápání příspěvku určité polohy těla nebo jeho konfigurace k požadované figuře obohacuje metody výuky tance.

Nyní můžeme rozšířit příklad týkající se postavení při piruetě, který jsme již uvedli. Instruktor může říci studentovi, aby si stoupl vertikálně, zatíženou nohou tlačil do podlahy a hlavou se snažil dosáhnout na strop. Student zjistí, že pokud drží tělo pevně a dokonale vertikálně, provádí piruetu snáze a že tanečníci se slabými nebo kulatými zády mají s piruetou potíže. Fyzikální analýza ukáže, proč tyto aspekty držení těla přispívají k úspěšnému provedení piruet. Pokud je tělo správně „vytaženo“, jeho hmota je soustředěna těsně kolem osy rotace, snižuje se moment setrvačnosti a lze dosáhnout dostatečnou rychlost otáček. Takové držení těla je tedy nezbytné nejen z estetických důvodů, ale také pro dosažení rozumné rychlosti otáček.

Přestože obtížné fyzické výkony jsou často uskutečněny silou a hbitostí, bývá často pravdou, že dojem z provádění určitých pohybů je iluzorní a že tanečník používá hlubší dovednosti při vytváření těchto dojmů. Pochopení vycházející z fyzikálních analýz

pohybu poskytuje tanečníkovi nebo učiteli základ pro rozvoj techniky vytváření nebo zvyšování divákova dojmu, že vidí nemožné.

Je rovněž pravda, že pozorovatel sledující taneční představení ocení pohyby mnohem hlouběji, pokud chápe omezení daná fyzikálními zákony a roli iluze. Taneční pohyby často v pozorovateli vyvolávají respekt, nejen vlivem krásy pohybujícího se lidského těla, ale rovněž proto, že tanečník jako by se vymykal fyzikálním omezením, která příroda klade na pohybující se předměty. Pochopení příslušných fyzikálních zákonů umožňuje divákovi rozlišovat mezi možnými a nemožnými pohyby a ocenit kultivované schopnosti tanečníka působícího dojemem, že provádí nemožné.

Mezi fyzikální zákony, na nichž je založena analýza tance, patří samozřejmě Newtonovy pohybové zákony, které tvoří základ analýzy pohybu hmotných pružných těles. Základ naší analýzy tvoří zákony zachování momentu hybnosti při přímočarém a křivočarém pohybu a vztah mezi silami nebo momenty sil a výslednými pohybovými stavy.

Taneční pohyby lze rozdělit do dvou kategorií podle metod potřebných pro jejich analýzu. Některé pohyby zahrnují vertikální nebo horizontální pohyby těla jako celku, při kterých lze zanedbat rotace. Tyto pohyby lze studovat pomocí jednoduchých lineárních pohybových rovnic ve třech rozměrech. Tato analýza vede k poznání a pochopení některých zajímavých triků a technik, jako je iluze horizontálního vznášení při *grand jeté* — což je velký skok, při kterém se přenáší váha těla z jedné nohy na druhou.

Analýza rotačních pohybů vyžaduje jiné přístupy, při kterých se uvažuje způsob rozložení hmoty těla, různé osy rotace pro různé typy pohybu a zdroje sil a momentů, které vytváří rotační pohyb. Nejjednoduššími rotačními pohyby jsou piruety, existují však i jiné pohyby spojené s rotací. Například, *tour en l'air* — tanečník se snožmo odrazí, 1–3krát se ve vzduchu vertikálně otočí a dopadne na stejné místo.

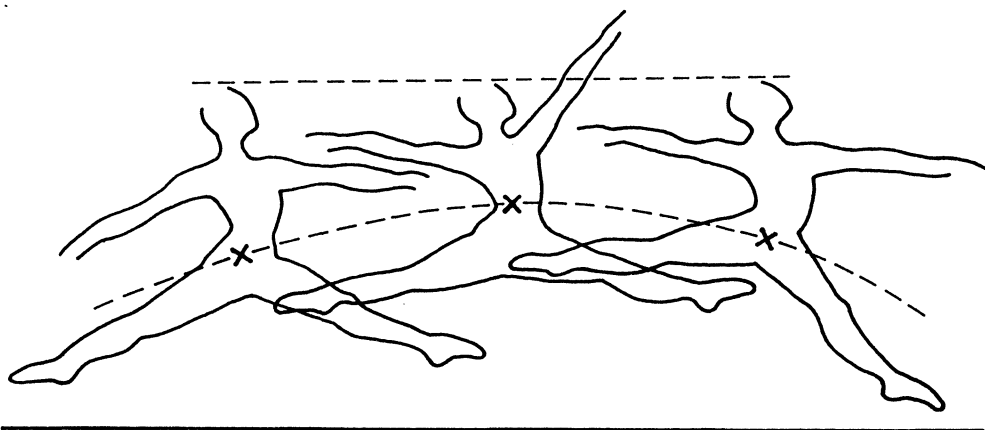
Fyzikální analýza může vysvětlit vliv velikosti tanečníka na prováděnou figuru. Mnoho choreografů a učitelů ví, že malí tanečníci se pohybují jinak než vyšší, ale otázkou je, co je fyzikální podstatou těchto rozdílů. Jakým způsobem se mohou učitelé vyhnout tomu, aby od vysokých tanečníků očekávali nemožné, nebo jak mohou choreografové s maximální účinností využít různě vysokých tanečníků? Existují fyzikální zákony, podle kterých by byli štíhlí dlouhonozí tanečníci „Balanchina“ zejména vhodní pro jeho choreografii? Existuje způsob, jak komponovat tance speciálně pro talentované, ale „nevysoké“ tanečníky, kteří jsou schopni přehrát své vyšší partnery v určitých pohybech a rychlých rytmech? Fyzikální analýza může dát odpověď na mnohé z těchto otázek.

## Grand jeté — iluze vznášení

Tanečníci mohou vytvořit zajímavý dojem změnou polohy svého těla během letu vzduchem. Často lze spatřit impresivní *grand jeté*, při kterém se zdá, že tanečník porušuje zákony gravitace tím, že v okolí vrcholu dráhy skoku se pohybuje horizontálně a nikoliv po parabolické dráze. Víme, že jakmile těleso ztratí styk s podložkou, jeho

těžiště se pohybuje po dráze, která je zcela závislá na počátečních podmínkách pohybu. Tanečník může měnit tvar a konfiguraci těla během letu — při tomto manévru může vytvořit určité dojmy — ale v žádném případě nemůže měnit dráhu pohybu svého těžiště. Tato dráha bude odrazem konstantní horizontální rychlosti a vertikálního pohybu spojeného se skokem — pohyb nahoru s klesající rychlostí, okamžik bez vertikálního pohybu a následný pád s rostoucí rychlostí.

Je pravda, že skok provedený při horizontálním pohybu může být vyšší než jednoduchý vertikální skok, protože tanečník při něm může přenést část své horizontální hybnosti na vertikální. Extrémní případ tohoto přenosu nastává u skokana o tyči, který k přenosu horizontální hybnosti na vertikální používá pružnou tyč ze skleněných vláken.



Obr. 1. Iluze vznášení. Hmotný střed tanečnickova těla se pohybuje po parabolické dráze, ale mění svou polohu v těle v závislosti na tom, jak tanečník pohybuje rukama a nohama. To umožňuje, aby se hlava tanečníka krátce pohybovala po vodorovné dráze.

Dojem vznikající při grand jeté je částečně způsoben tím, že vertikální pohyb těla je rychlý na začátku i na konci skoku a pomalý v místě maximální výšky skoku, kde se vertikální složka rychlosti zmenšuje k nule a mění znaménko při klesání dolů v druhé části skoku. Ve skutečnosti polovinu celkové doby skoku stráví skokan výše, než jsou dvě třetiny maximální výšky skoku. Například: pokud se těžiště dostane při grand jeté do výšky o dvě stopy větší a celková doba skoku je 0,7 sekundy, polovinu této doby neboli 0,35 sekundy stráví skokan výše než dva palce pod vrcholem skoku. Tanečník může pohybovat svým tělem tak, že dojem letu bude ještě silnější.

Navzdory tomu, že těžiště těla tanečníka se pohybuje po zakřivené dráze určené počátečními podmínkami při odskoku z podlahy, může tanečník měnit polohu těžiště vzhledem k tělu. Podobně jako při výše popsaném skoku předpokládejme, že tanečník má při odskoku, kdy jsou nohy i ruce relativně nízko, těžiště v oblasti břicha. Jakmile se těžiště posune o něco dále po své parabolické dráze, nohy i paže se zvednou a těžiště se posunuje v těle směrem vzhůru, asi někam do oblasti žaludku nebo výše. Pokud

je skok správně načasován, trup i hlava se skutečně budou pohybovat horizontálně v době, kdy těžiště bude v okolí vrcholu své parabolické dráhy. Protože oko diváka spíše sleduje hlavu a trup, vytváří tanečník na krátký okamžik dojem horizontálního letu! K naplnění tohoto dojmu je nezbytné, aby tanečník ve vrcholu skoku rozkročil nohy, v ideálním případě aby provedl úplný „provaz“. Tanečník musí načasovat okamžik rozkročení přesně do místa vrcholu zakřivené dráhy jeho těžiště, aby vytvořil co nejlepší dojem horizontálního pohybu. Toto rozkročení je často součástí působivého grand jeté, ale v současné době se na ně hledí nejen jako na přídatný elegantní prvek, který nemá žádný vztah ke skoku samému, nýbrž jako na součást pohybu, která přímo přispívá k dojmu „vznášení“.

## Otáčka v arabesce

*Otáčka v arabesce*, pokud je správně provedena, představuje v klasickém baletu krásnou figuru. Při této figurě se tanečník otáčí ve stoji na jedné noze a druhá noha je napnutá směrem dozadu. U studentů, kteří se učí tento pohyb, lze pozorovat jednu společnou chybu, za kterou se skrývá jeden velice zajímavý fyzikální důvod.

Otáčka v arabesce je obvykle otáčkou „dovnitř“ („*en dedans*“), při které se tanečník otáčí ve směru ke stojící noze. To vyžaduje, aby oběma nohama vyvinul otáčivý moment na podlaze a potom zdvihl nezatíženou nohu do horizontální polohy dozadu, kde ji nevidí. Poté, co noha dosáhne horizontální polohy, má silnou tendenci klesnout dolů, jako je tomu při *grand battement derrière* (vymrštění jedné nohy do výše vzad, při kterém druhá noha zůstává na zemi) nebo při kopu. Je-li noha vztyčena do horizontální polohy, představuje značný příspěvek k momentu setrvačnosti těla tanečníka, což způsobí pokles úhlové rychlosti vzhledem k velikosti momentu hybnosti, která odpovídá počátečnímu otáčivému momentu. Poklesne-li noha, přiblíží se více k ose rotace a moment setrvačnosti klesne. Takto snížený moment setrvačnosti zvýší úhlovou rychlost a provedení otáčky se bude zdát jednodušší, rychlejší a přijatelnější. Protože tanečník má tuto klesající nohu za sebou, nevidí ji, pokud nestojí před zrcadlem.

Nyní vzniká zajímavý jev. Protože úhlová rychlost vzrostla, vzrostla i odstředivá síla působící ve směru od osy otáčení, která se snaží vrátit nohu zpět do původní horizontální polohy! Noha tanečníka se může pohybovat nahoru do horizontální polohy, potom dolů a znovu nahoru a tento pohyb se bude při vícenásobné arabesce několikrát opakovat. Ve skutečnosti lze tyto oscilace pozorovat u studentů, kteří se nesoustředí na udržení zafixované nohy v poloze arabesky proprioceptivními smysly, což jsou vnitřní smysly, které používá vědomí k určení polohy těla bez vizuálních podnětů. Člověk si může položit otázku, zda tento syndrom kmitající nohy je skutečně špatný; možná, že choreografové se opravdu snaží o jeho dosažení! Ale tradiční otáčka v arabesce v baletu, představující běžnou a působivou figuru, se provádí ideálně s napnutou nohou zafixovanou v horizontální poloze.

Při jaké frekvenci otáčení může vytrčená noha oscilovat nahoru a dolů? Problém není jednoduchý, protože vliv odstředivé síly, která působí na nohu ve směru od těla,

závisí na úhlové rychlosti otáčení těla; tato úhlová rychlost však závisí na úhlu, který svírá napnutá noha s vertikálním směrem.

Fyzikální analýza tohoto problému je provedena v dodatku na str. 9. Analýza zahrnuje mnoho předpokladů, prvním z nich je modelování nohy jako válce jedné tloušťky pro stehno a menší tloušťky pro dolní část nohy. Celá noha je schopna kmitat z kyčle ve vertikální rovině kolem kloubu, který leží na vertikální přímce nad opěrným bodem (chodidlo vertikální stojící nohy). V dodatku je ukázáno, že moment setrvačnosti zanožené nohy je funkcí úhlu, který svírá s vertikálou. Tento moment setrvačnosti určuje okamžitou úhlovou rychlost, která zase určuje odstředivou sílu a tato síla v kombinaci s tíhovou silou působící na zanoženou nohu umožňuje určit úhel, který noha svírá s vertikálou. Výsledná rovnice je řešitelná za předpokladu, že celkový moment hybnosti je takový, že rovnovážný úhel, který noha svírá s vertikálním směrem, je  $45^\circ$  a že oscilace kolem tohoto úhlu jsou malé. Výsledkem pro nohu obvyklé délky je rovnice vyjadřující vztah mezi frekvencí kmitů nohy a frekvencí otáčení těla.

Pro typickou výšku a hmotnost tanečnicků a běžnou úhlovou rychlost otáčení v arabesce dávají výpočty zajímavý výsledek. Frekvence kmitů nohy je rovna frekvenci otáčení, pokud tanečník provede jednu celou otáčku asi za dvě sekundy. Tato rezonance obou frekvencí může způsobit značné potíže při překonávání problému kmitající nohy, protože přirozená frekvence těchto oscilací vede právě k jednomu „kmitu“ nohy při každé otáčce. Správná poloha arabesky nastane v určité orientaci těla a potom znovu, když se tělo vrátí zpět přesně do této orientace. Mezitím je noha níže a tanečník se otáčí rychleji.

## Příspěvky do budoucnosti

Fyzika existuje již mnoho století a tanec existuje od dob, kdy se lidé poprvé snažili vyjádřit své zážitky pohybem. Protože fyzika studuje vlastnosti a příčiny pohybu, proč by tyto dva obory nemohly přispívat jeden druhému mnohem užitečněji? Z jakých důvodů bychom měli očekávat změnu této situace?

Aplikace biomechaniky ve sportu představují živý a všemi přijímaný obor. Proč by nemohl tanec postupovat podobnou cestou? Jednou odpovědí je, že kvalitu sportovního výkonu lze měřit, zatímco v tanci závisí úsudek o kvalitě na estetickém výkladu. Dnes však zjišťujeme, že nedostatek chápání platných fyzikálních zákonů způsobuje rezervy a omezení pro tanečníky podobně jako u atletů. Tanečník, který dokáže využít těchto znalostí při dosažení značné výšky skoku, ostřejší otáčky při *tour jeté* nebo hladšího přistání při *tour en l'air*, má více nástrojů, se kterými může pracovat, a je pružnější při dosažení estetických cílů.

S rozvojem vědy tance mohou vzniknout nejrůznější směry. Stále více vědců studuje určité detaily jednotlivých pohybů a používá přitom moderních technických prostředků, jako je vysokorychlostní kinematografie a počítačová analýza. To je bezpochyby užitečný směr a tyto studie vytvoří základy, na kterých mohou učitelé, tanečníci a ostatní vědci budovat lepší chápání tance jak pro čisté vědění, tak i pro zlepšování



techniky tance. Tyto studie však musí být doplněny fyzikální analýzou, která podá přehled o pohybu při tanci. Tento přehled by měl zahrnovat kvalitativní analýzy mnoha různých figur s důrazem na chápání toho, jaké základní fyzikální zákony platí, jakým způsobem může tělo využít těchto fyzikálních zákonů a jaké vazby existují mezi různými pohyby při tanci a jinými pohyby lidského těla. Při zkoumání „stromů“ jednotlivých pohybů nesmíme ztratit „les“ širšího fyzikálního kontextu.

Dozrál čas pro rozšíření našeho zájmu o analýzu tance. Tanečníci, zejména baletní, obvykle začali svůj obor v příliš mladém věku na to, aby byli schopni pochopit abstraktní fyzikální zákony a aplikovat je na pohyby lidského těla. V době, kdy tanečníci rozvinuli své analytické schopnosti, jsou nuceni o své práci přemýšlet jako o činnosti naučené a motivované více instinktem, pocity a napodobováním vzorů, a nikoli otázkami a analýzou. V současné době děti vyrůstají ve světě, který mnohem snáze přijímá analytické přístupy k nejrůznějšímu lidskému úsilí, od ekonomiky k politice, od literatury k hudbě. Lidé rychle objevují ohromné možnosti počítačů a ostatních technických vymožeností, které přispívají k našim znalostem v širokém spektru oborů. Děti jsou stále více vystavovány analytickým způsobům myšlení. Někteří lidé odmítají snahu vyniknout, být vynuceným zlem, se kterým se „ostatní“ musí vyrovnat, jiní tyto principy snadno přijímají. Pochopí tanečníci prospěch z analytického přístupu pro tvůrčí a estetické umění v této stále se zvětšující dichotomii?

Učitelé tance stále více zjišťují, že analytické chápání může spíše doplnit existující metody a nikoli je nahradit. Někteří studenti mají kladnou odezvu k tomuto přístupu, ale někteří nikoli. Učitelé tak však budou mít k dispozici další nástroje, které jim pomohou učit jejich studenty tanec.

Nebezpečí, že tanec se stane příliš analytický a že se důraz posune k atletickým výkonům a nikoli k estetické kvalitě, existovalo od té doby, co se objevili pozorovatelé tance, kteří nebyli citliví na jeho uměleckou stránku. Tradice tance vždy byly dostatečně silné, aby tomuto nebezpečí odolaly. Existují rovněž lidé, kterým nové přístupy nejsou příjemné a cítí se jimi ohroženi. Snad se tito lidé přesvědčí, až uvidí příklady, kdy vědecký přístup byl užitečný a nikoli škodlivý. Vědci, kteří pracují v této oblasti, jsou odpovědní za to, aby stále přinášeli nové myšlenky a zachovávali jejich spojení se světem skutečných tanečnicků z masa a krve.

Na koho se mají obrátit lidé, kteří se chtějí více naučit o fyzikálních analýzách tanečního pohybu? Většina literatury v tomto oboru je nyní orientována na čisté chápání a nikoli na aplikace ke zlepšení techniky tance. Protože se tímto oborem zabývá stále více lidí, zejména těch, kteří mají zkušenosti s výukou tance, budou tyto analýzy přeneseny do tradic výuky tance. Stále více pracovních setkání, konferencí a publikací se bude zabývat těmito analýzami. Například informační bulletin Kineziologie tance (*The Kinesiology for Dance*) je neformální publikace, která rozšiřuje svůj rozsah a zvyšuje počet výtisků. (Čtenáři, kteří mají zájem o toto periodikum, se mohou obrátit na autora tohoto článku.) S velkým očekáváním se můžeme těšit na pokrok v tanečním umění, který může být výsledkem spojení technické a estetické, rozumové a citové stránky — vědomí a těla.

## Poděkování

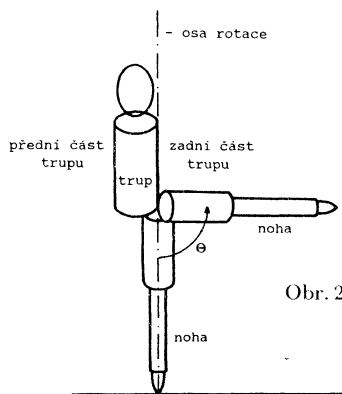
Překladaatel děkuje panu Petru Zuzkovi, členu baletu Národního divadla, za odborné rady a připomínky, které pomohly objasnit některé nejasnosti při překladu.

## Literatura

- [1] D. WEBSTER: *Philadelphia Inquirer*, 4, duben 1978.
- [2] S. K. LANGER: In *Problems of Art*. Scribners, New York (1957), str. 5.
- [3] *Dancemagazine*, září 1978.
- [4] S. PLAGENHOEF: *Patterns of Human Motion*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J. (1971), kap. 3; S. PLAGENHOEF, podle W. T. DEMPSTER, WADC Tech. Report 55, 159 (1955); S. PLAGENHOEF, podle K. KJELDSSEN: *Body Segment Weights of College Women*. MSc. práce, University of Massachusetts (1969).

## Dodatek — Analýza otáčky v arabesce

Při analýze otáčky v arabesce a problému kmitající nohy předpokládáme, že lidské tělo se skládá ze tří hlavních částí podle obr. 2. Příspěvek paží k momentu setrvačnosti zanedbáme, neboť jsou velmi lehké; zanedbáme rovněž příspěvek zatížené nohy, neboť její hmotnost je soustředěna blízko k ose rotace, o které předpokládáme, že leží ve vertikální přímce podél okraje válcovitého trupu a hlavy. Předpokládáme, že jde o tanečnici, jejíž výška je 1,60 m, hmotnost 44 kg a trup má efektivní poloměr 12 cm. Rozměry ostatních částí těla jsou uvedeny v tabulce 1.



Obr. 2. Otáčka v arabesce.

Celkový moment setrvačnosti válce rotujícího kolem osy procházející jeho stěnou je

$$I_b = 3/2Mr^2 = 0,66 \text{ kg m}^2.$$

Moment setrvačnosti zanožené nohy svírající s vertikální osou úhel  $\theta$  je

$$I_l = I_0 \sin^2 \theta.$$

Moment setrvačnosti  $I_0$  horizontálně napřímené nohy je 1,44 kg m<sup>2</sup>.

Tabulka 1. Anatomické údaje tanečnicka

Část těla	Muž		Žena	
	Hmotnost	Délka	Hmotnost	Délka
Trup	48,3	30,0	50,8	30,0
Hlava	7,1		9,4	
Stehno	10,5	23,2	8,3	24,7
Holeň	4,5	24,7	5,5	25,6
Chodidlo	1,5		1,2	
Horní paže	3,3	17,2	2,7	19,3
Předloktí	1,9	15,7	1,6	16,6
Ruka	0,6		0,5	

Hmotnosti a délky jsou uvedeny v procentech celkové hmotnosti nebo délky těla. Uvedené údaje představují průměrné hodnoty šesti gymnastek a 35 gymnastů ve věku studentů university. (Převzato od Stanleyho Plagenhoefa [4].)

Vliv odstředivé síly působící na nohu lze popsat pomocí otáčivého momentu podél horizontální osy procházející bokem, který má za následek zvětšení úhlu  $\theta$ . Tento otáčivý moment je úměrný kvadrátu úhlové rychlosti  $\omega$  a je dán numericky jako

$$T_1 = (1,44 \text{ kg m}^2) \omega^2 \sin \theta \cos \theta.$$

Otáčivý moment, jehož výsledkem je zmenšení úhlu  $\theta$  (vzhledem k stojné noze tanečnicka), je způsoben tíhovou silou působící v těžišti nohy tanečnicka a je dán

$$T_2 = (25,5 \text{ kg m}^2/\text{s}^2) \sin \theta.$$

Celkový otáčivý moment působící na nohu, který zvětšuje úhel mezi ní a vertikálním směrem, lze vyjádřit v jednotkách SI ve tvaru

$$T = 1,44 \omega^2 \sin \theta \cos \theta - 25,5 \sin \theta.$$

Předpokládáme, že moment hybnosti rotujícího tělesa je konstantní; to znamená, že zanedbáváme zrychlující nebo zpomalující otáčivé momenty mezi stojnou nohou a podlahou. Jaký je tento moment hybnosti? Zvolme frekvenci otáčení 0,8 otáčky za sekundu a předpokládejme, že zanožená noha je při této frekvenci v rovnovážné poloze, to znamená, že tanečnick nemusí k jejímu udržení z kyčle vyvíjet žádný otáčivý moment. (Jde o umělý případ: Většina tanečnicků působí jistým otáčivým momentem, aby pomohla udržet nohu ve správné výši. Tento otáčivý moment budeme uvažovat později jako poruchový faktor v jednodušší analýze.)

Položíme-li v předchozí rovnici celkový otáčivý moment roven nule, můžeme nalézt rovnovážný úhel  $\theta_0$ , který odpovídá předpokládané hodnotě úhlové rychlosti  $\omega$ . Výsledný úhel je

$$\theta_0 = 45^\circ.$$

Pomocí tohoto úhlu lze z první rovnice nalézt celkový moment setrvačnosti a moment hybnosti potom je

$$L = 6,95 \text{ kg m}^2/\text{s}.$$

Pokud je tento moment hybnosti konstantní, pak nezávisle na tom, zda se mění úhel  $\theta$  a rychlost otáčení, můžeme  $\omega$  z rovnice pro celkový otáčivý moment vyloučit. Úhlová rychlost je dána vztahem

$$\omega = \frac{L}{I} = \frac{6,95}{I_b + I_0 \sin^2 \theta} = \frac{4,84}{0,46 + \sin^2 \theta}.$$

Nyní můžeme odvodit výraz pro otáčivý moment, který způsobuje změnu úhlu nohy  $\theta$  pomocí pouze jediné proměnné, kterou je právě tento úhel  $\theta$ . Protože moment otáčení je součin momentu setrvačnosti nohy vzhledem k horizontální ose kyče a úhlového zrychlení  $\alpha$  kolem této osy, dostáváme výsledný vztah

$$1,44 \alpha = 1,44 \left( \frac{4,84}{0,46 + \sin^2 \theta} \right)^2 \sin \theta \cos \theta - 25,5 \sin \theta.$$

Toto je netriviální diferenciální rovnice, kterou lze řešit za předpokladu, že úhel  $\theta$  je blízký úhlu  $\theta_0$ . Numerické řešení pro funkci  $\theta(t)$  dává frekvenci kmitů nohy asi 1,1 cyklu za sekundu. Tato frekvence je dosti blízká frekvenci otáčení 0,8 otáček za sekundu. To znamená, že při uvážení určitých nepřesností v analýze dostáváme přibližně stejnou hodnotu obou frekvencí. To způsobuje „rezonanci“, při které noha během jednoho úplného otočení těla provede kmit nahoru–dolů–nahoru. Existuje pravděpodobně ještě psychické zvýraznění kmitu nohy, při kterém se otáčení těla zpomalí pokaždé, když se tanečník dostane do původního směru.

Nyní uvažujme znovu náš odvážný předpoklad o zanedbatelném otáčivém momentu z kyče. Předpokládejme, že kyčel způsobuje určitý konstantní zdvižný otáčivý moment, který způsobuje zvednutí nohy na úhel  $75^\circ$  od vertikálního směru. Otáčivý moment, který je nutný k provedení téměř horizontální polohy při arabesce, lze vypočítat a jeho číselná hodnota je

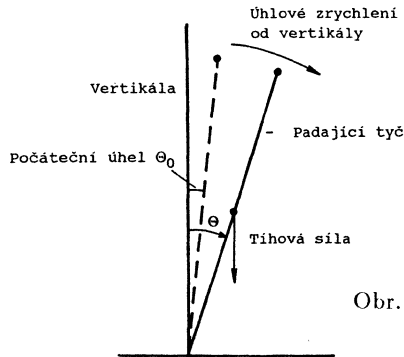
$$T_H = 15,6 \text{ N m.}$$

V tomto případě je celkový konstantní moment hybnosti větší, neboť noha se napřimuje dále od osy rotace. Ve vztahu mezi úhlovým zrychlením nohy kolem kyčelního kloubu a úhlem  $\theta$  je třeba uvážit dodatečný otáčivý moment v kyčli. Řešení upravené rovnice dává frekvenci oscilací 0,9 cyklu za sekundu, která je o něco pomalejší než v případě menšího úhlu  $45^\circ$ . Tato frekvence kmitů je ještě bližší k frekvenci otáčení, což implikuje ještě těsnější sepětí mezi otáčením těla a kmity nohy.

Výsledek je důležitý v tom, že přirozená snaha o zpomalení otáčky nebo zastavení po každém jejím dokončení je zvýšena „syndromem klesající nohy“, při kterém je nejprve noha vysoko a otáčení pomalé; potom noha klesá a otáčka se zrychluje; a potom asi po dokončení jedné otáčky se noha opět zvedá, aby ji zpomalila v okamžiku, kdy tělo dosáhlo své původní polohy. Skutečnost, že tanečník při pohybu tento nežádoucí pohyb nohy neregistruje, komplikuje korekci této chyby, což má značně negativní vliv na estetickou úroveň provedení arabesky během otáčení.

## Ztráta a vyrovnávání rovnováhy

Při analýze rovnováhy si představte, že tělo se podobá holi, která je poněkud těžší v horní části než v dolní. Tato hůl je v rovnováze ve vertikální poloze na podlaze. Vychýlíme-li hůl z rovnovážné polohy o nepatrný úhel  $\theta_0$ , začne se kácet a úhel  $\theta$  se bude zvyšovat s rostoucí rychlostí tak, jak je naznačeno na obr. 3.



Obr. 3. Ztráta rovnováhy.

Tíhová síla působí v těžišti, a kdykoli je hůl vychýlena z vertikální polohy, vyvolává otáčivý moment kolem bodu, na kterém stojí. Rovnice popisující vztah úhlového zrychlení ve směru od vertikály a otáčivý moment způsobený gravitací má tvar

$$mgR_c \sin \theta = I\alpha = mR_g^2\alpha.$$

V tomto vztahu je  $m$  hmotnost tělesa,  $g$  je gravitační zrychlení,  $R_c$  je vzdálenost stojného bodu od těžiště,  $I$  je moment setrvačnosti kácejícího se tělesa vzhledem k ose procházející stojným bodem,  $R_g$  je poloměr setrvačnosti (definovaný jako  $\sqrt{I/m}$ ) a  $\alpha$  je úhlové zrychlení kácejícího se tělesa. Pokud je úhel  $\alpha$  malý, můžeme nahradit  $\sin \theta$  přímo úhlem  $\theta$  a dopustíme se pouze nepatrné chyby. Výsledkem je jednoduchá diferenciální rovnice, jejímž řešením s uvážením počáteční podmínky je funkce hyperbolického kosinu:

$$\theta = \theta_0 \cosh(\sqrt{gR_c/R_g^2} t).$$

Pro běžnou hůl délky 1,78 m bude těžiště v jejím středu, takže  $R_c = 0,89$  m a  $R_g$  bude 1,03 m. Za předpokladu, že těleso je hmotnější v horní části, zvětšíme každou z těchto veličin odhadem o 15 %. Tedy  $R_c = 1,02$  m a  $R_g = 1,18$  m. Časový koeficient  $t$  v předchozí rovnici je potom roven

$$\sqrt{gR_c/R_g^2} = 2,7/s.$$

Všimněte si, že tento koeficient je větší pro menší osobu, takže zrychlení ve směru od vertikály, jak lze očekávat, bude v tomto případě vyšší než pro vyšší osobu.

Tabulka 2. Vychýlení z rovnováhy

Výška	Čas (v sekundách)		Úhel vychýlení		
	0	0,5°	1°	2°	4°
5 stop 10 palců	0,5	1,0°	2,1°	4,1°	8,2°
	1	3,7°	7,5°	15°	30°
	1,5	14°	29°	57°	>60°
	2	55°	>60°	>60°	>60°
5 stop	0,5	1,0°	2,3°	4,5°	9,0°
	1	4,6°	9,1°	18°	36°
	1,5	20°	39°	>60°	>60°
	2	>60°	>60°	>60°	>60°

Údaje ukazují rostoucí vychýlení z vertikální polohy pro vysoké a malé osoby při pádech z různých počátečních úhlů vychýlení.

V tabulce 2 jsou uvedeny časové závislosti úhlů vychýlení z vertikální polohy pro několik hodnot počátečních úhlů vychýlení pro tanečníka vysokého 178 cm (5 stop a 10 palců) a pro druhého, který je o 15 % menší (měří přesně 5 stop).

*Vyrovnaní rovnováhy.* Může tanečník nějakým způsobem vyrovnat ztracenou rovnováhu? Můžeme se domnívat, že nikoli, protože jediným zdrojem horizontální síly je místo, na kterém tanečník stojí. Často však vidíme tanečníky, jak se krotí a vrávorají ve snaze získat znovu ztracenou rovnováhu. Ve skutečnosti totiž můžeme posunout tělo tak, abychom zapůsobili horizontální silou proti podlaze a na základě její reakce vyrovnali ztracenou rovnováhu.

I když si tanečníci intuitivně uvědomují, že lze vyrovnat ztracenou rovnováhu při stožení na jedné noze, neuvědomují si, že k vyrovnání nedochází pohybem těla, ale horizontální silou působící do podlahy, která způsobí posuv těžiště těla. To znamená, že pro vyrovnávání rovnováhy (nebo její ztrátu) jsou neúčinnější pohyby těla, které maximalizují horizontální sílu působící na stojnou nohu.

Jaké pohyby těla jsou účinné při vyrovnávání rovnováhy? Pokud jste někdy šli po kolejnici na železniční trati, pozorovali jste instinktivně v praxi velice důležitý jev. Pokud jste začali padat napravo, nahnuli jste okamžitě horní polovinu těla doprava. Někteří lidé tvrdili, že tato reakce je nevhodná, a připomínali tanečníkům, aby se snažili tento instinkt překonat a snažili se pohnout tělem zpět (v tomto příkladu doleva). Připomeňme však, že skutečně je třeba vyvinout horizontální sílu na kolejnici ve směru doprava tak, aby kolejnice na naše tělo působila ve směru doleva, což vede k působení na těžiště ve směru doleva, a tím k vyrovnání ztracené rovnováhy.

Náhly pohyb těla doprava bude mít za následek, že nohy vyvinou sílu na kolejnici nebo podlahu ve směru doprava. To je zejména jasné v extrémním případě pohybu doprava s přitažením nohou k tělu. Pokud bychom tento pohyb prováděli na ledě, ujely by nám nohy doprava. Kolejnice působí třecí silou ve směru doleva, a tím brání tomuto sklouznutí, a proto tlačí tělo zpět doleva. Naše instinkty jsou tedy správné.

Tanečník musí samozřejmě provádět tyto pohyby v nepatrně malém rozsahu, aby nezkažil dojem rovnováhy v klidu a zároveň se vyhnul trhání těla, které by bylo

nepřirozené. Tělo musí být citlivé i na nepatrné odchylky od rovnováhy, aby bylo schopno ji drobnými pohyby udržovat. Pokud bude horní část těla tuhá, nebude tělo schopno reagovat na drobné změny polohy a bude obtížné tyto výchylky korigovat drobnými pohyby. Naopak, nezpěvněná stojná noha, kyčle a dolní polovina těla budou vadit při účinném udržování rovnováhy na pevné podložce jemnými pohyby. Součástí přijaté techniky pro účinné udržování rovnováhy je zpevnění dolní poloviny těla a uvolnění horní poloviny těla, která je pak citlivá na drobné odchylky od rovnováhy, aniž by došlo k porušení rovného postoje. Tato metoda je nejen „správná“ z estetického a konvenčního hlediska; zároveň dává i smysl z hlediska fyzikálních zákonů rovnováhy.

## Johann Bernoulli (1667–1748): Deset neklidných let v Groningen

Gerard Sierksma

### Úvod

Groningen je hlavním městem severovýchodní provincie Nizozemí. Ve druhé polovině 17. století se zde rozvinulo nepřátelství mezi městskými radními a zákonodárci provincie. Bylo způsobeno náboženskými rozdíly a projevilo se v letech 1648–1717 i na místní univerzitě. Pět profesorů odešlo a dokonce i sté výročí univerzity proběhlo bez povšimnutí. Katedry zůstaly neobsazené, katedra matematiky již roku 1669.

Je pozoruhodné, že věhlasný matematik Johann Bernoulli přišel do Groningen v době této krize a že tam v letech 1695–1705 setrval. I když nebyl vždy přijímán s pochopením, měl jeho pobyt v Groningen značný vliv na rozvoj a rozšíření „nové metody“.

### Leibnizova „Nova Methodus“

V říjnu 1648 uveřejnil Leibniz v časopise *Acta Eruditorum* svůj vynikající článek *Nova Methodus Pro Maximis et Minimis*, v němž položil základy infinitezimálního počtu. Leibniz nenapsal článek příliš srozumitelně. Nepochybně se tím snažil udržet si náskok před konkurenty, aby byl uznán jako jediný objevitel nové metody. Byl si totiž dobře vědom skutečnosti, že Newton v Anglii rozvinul podobné myšlenky.

---

GERARD SIERKSMA: *Johann Bernoulli (1667–1748): His Ten Turbulent Years in Groningen*. The Mathematical Intelligencer Vol. 14, No. 4, pp. 22–31.

©1992 Spinger Verlag New York

Přeložila JITKA ZICHOVÁ.