

Jan Obdržálek

## MACHOVY VÝHRADY K NEWTONOVÝM PRINCIPÍM – TEHDY A DNES

### Mach's Objections to Newton's Principia – Then and Now

The paper is based on Mach's *Die Mechanik in ihrer Entwicklung*, 1883. It especially analyses those parts of Chapter 2 in the textbook that critically assess Newton's approach in formulating the principles of mechanics in his Principia. It confronts Mach's objections to the views of present-day mechanics.



OBDRŽÁLEK, Jan. Machovy výhrady k Newtonovým Principiím – tehdy a dnes. In: DUB, Petr a Jana MUSILOVÁ. *Ernst Mach – Fyzika – Filosofie – Vzdělávání*. 1. vyd. Brno: Masarykova univerzita, 2010, s. 227–234. ISBN 978-80-210-4808-9. DOI: 10.5817/CZ.MUNI.M210-4808-2011-227.

# Machovy výhrady k Newtonovým Principiím – tehdy a dnes

Jan Obdržálek

## Úvodem

Ernst Mach napsal historicko-kritický výklad mechaniky ve svém díle *Die Mechanik in ihrer Entwicklung – historisch-kritisch dargestellt* (1883, Leipzig, F. A. Brockhaus, 484 stran). V něm podává mj. kritiku Newtonových představ a formulací vycházející z londýnského vydání Isaac Newton: *Philosophiae naturalis principia mathematica*, Londini 1687.

První kapitola Machovy učebnice se zabývá statikou, druhá – z našeho hlediska klíčová – dynamikou. Třetí kapitola se zabývá dalším využitím principů a deduktivním rozvojem mechaniky, čtvrtá formálním rozvojem mechaniky a závěrečná pátá vztahy mezi mechanikou a jinými oblastmi vědy, konkrétně fyzikou a fyziologií.

## Machův přístup ke vědě a k poznání

Machův přístup je co nejdůsledněji založen na pozorování a na pokusech, a to oproti metodě spekulativní (*speculative Methode*, jak ji nazývá v přemluvě, s. vii.). Proto Mach odmítá zejména ty pojmy v Newtonově přístupu, které nejsou našim smyslem přímo přístupné, totiž absolutní prostor a čas. Je známo, že svým přístupem, v němž uznává jedině relativní pohyb tělesa vůči jinému tělesu, otevřel cestu teorii relativity; Einstein sám Macha velmi vysoce hodnotil (termín „Machův princip“ pochází právě od Einsteina). Je ovšem také známo, že až k přijetí relativity Mach nedošel, naopak se důrazně postavil proti tomu, aby on sám byl pokládán za zakladatele této cesty v poznání prostoru a času. Jeho odpor proti relativitě, stejně jako jeho odpor proti atomové teorii hmoty, v němž setrval až do své smrti, vycházel z jeho hlubokého přesvědčení o experimentu a pozorování jako jediném (bezpečném) zdroji poznání.

Tento postoj však, jak se nám nyní jeví, význam experimentu a pozorování příliš absolutizuje, nebo lépe, nedoceňuje význam toho, v čem vlastně spočívá poznání a dojem pochopení pro člověka. My bychom asi s větším klidem připustili význam a nutnost

modelů – logických konstrukcí pro naše poznání. Máme k tomu ovšem mnohem širší pole vědomostí a zkušeností. Ze strany zkoumaného objektu, tedy přírody kolem nás, jsou i atomy, i teorie relativity přístupné přímému pozorování a relativita speciální i obecná jsou dokonce součástí našeho každodenního života, například v navigačním systému GPS. I ze strany subjektivního postoje nastal samozřejmě značný pokrok v našem poznání toho, jak my sami uvažujeme, pamatujeme, vnímáme. Zejména však – na rozdíl od dob Newtonových – mechanika přestala aspirovat na „nejhlubší poznání skutečnosti“, a s vědomím přístupů a možností kvantové mechaniky si můžeme dovolit budovat klasickou mechaniku s podstatně volnějšími rukama (a tím, doufejme, i vhodněji z jiných hledisek, ať už „čistoty axiomatiky“ anebo potřeb didaktických).

## Machova kritika Principií

Z našeho hlediska je podstatná zejména druhá kapitola jeho učebnice, zabývající se dynamikou. Mach uvádí nejprve přínos Galileiho a Huyghensův; jejich experimentálně dokonale podložený popis a výklad volného pádu i pohybu kyvadla je Machovým ideám velice blízký. Stejně tak hodnotí i Newtonův postup odvození zákona všeobecné gravitace založený na experimentálních pozorováních, které provedl Tycho Brahe a interpretoval Johannes Kepler. Newtonův přínos pak charakterizuje čtyřmi body (s. 179):

- 1) Zobecnění pojmu síly
- 2) Výstavba (die Aufstellung) pojmu hmotnost
- 3) Pečlivé a obecné formulování vět o silovém rovnoběžníku (tedy o skládání sil)
- 4) Výstavba principu rovnováhy mezi akcí a reakcí

V dalším však kritizuje Newtona všude, kde Newton nevychází důsledně z experimentu a z pozorování (např. pojmy absolutní prostor a čas) nebo kde ho může obvinít ze „zdánlivých definicí“ (Scheindefinition), spíše skrytých definicí kruhem, např. definice hmotnosti pomocí její hustoty (s. 224).

Proberme Machovy námítky systematicky v souladu s jeho učebnicí.

## Kritika pojmu hmotnosti (Massenbegriff) a principu akce a reakce (Gegenwirkungsprinzip)

Mach vychází z toho, že hmotnost je konzistentně definována využitím principu akce a reakce. Dříve však zmiňuje jednak „hypotetické atomy“, které podle něj situaci nemění (v té době ostatně nebyly ještě do té míry přístupné přímému pozorování), jednak vážení ( $p$  značí sílu, nikoli hybnost):  $p = mg$ ,  $p' = m'g$ , tedy  $p/p' = m/m'$ , které umožňuje měřit hmotnosti „toutéž mírou“. S použitím principu akce a reakce zaručí rovnost sil působících na dva různé objekty s hmotnostmi  $m$ ,  $m'$ . Tím fakticky umožní převést měření jejich hmotností (prostřednictvím udělené změny hybnosti) na měření délky a času.

Mezitím však rozebírá otázku, zda má hmotnost vlastnost tranzitivní, tj. zda skutečně platí, že rovnost hmotností tělesa A s tělesem B a tělesa B s tělesem C skutečně implikuje rovnost hmotností těles A s C. Poznamenává zcela právem, že toto je otázka fyzikální, nikoli matematická, a rozebírá ji na příkladu pružného rázu těchto těles, jsou-li vázána na pohyb po kružnici.

## Kritika pojmů absolutního prostoru a času

Mach nejprve cituje Newtonovo zavedení jednak absolutního, pravého a matematického času plynoucího stále rovnoměrně bez jakéhokoliv vztahu k vnějším okolnostem, jednak času relativního, zdánlivého a obyčejného, který je naší praktickou, používanou mírou trvání, třebaže není ani pravý, ani rovnoměrný; astronomové nám pomáhají jeho nerovnoměrnost kompenzovat. Mach má za to, že v tomto přístupu zůstává Newton pod vlivem středověké filosofie. Ve skutečnosti (tj. měření) dokážeme totiž určovat čas opět jen porovnáváním různých těles: kyvadel, jejich délek, poloh vůči Zemi apod.

Podobně podrobuje Mach kritice Newtonovo pojetí absolutního prostoru a absolutního pohybu, a oproti nim relativního prostoru a relativního pohybu. Cituje Newtonův výklad známého pokusu s rotujícím vědrem s vodou, kde podle tvaru hladiny můžeme poznat, že se vědro točí vůči absolutnímu prostoru. Uvádí, že se zde Newton prohřešuje proti svému záměru zkoumat pouze skutečné věci („*Es scheint, [...] als ob er seiner Absicht, nur das Thatsächliche zu untersuchen, untreu würde,*“ s. 208, podobně s. 213), protože o absolutním prostoru a času nelze nic vypovídat; jsou to „pouhé smyšlenky“ („*blosse Gedankendinge*“, s. 213), na které nelze poukázat ze zkušenosti. Zpochybňuje i pokus tím, že jde opět jen o relativní pohyb, a není vůbec jasné, jak by děj probíhal, kdyby stěny vědra byly tlustší a hmotnější, až i třeba mnoho kilometrů. Rovněž upozorňuje na záludnost volby vztahovat pohyby pozemských těles vůči stálícím, které ovšem představují rovněž jisté objekty, nikoli „absolutní prostor“. Zejména však otázka popisu pohybu těles je klíčová v tom, že jde vždy o vzájemný pohyb těles vůči sobě (my bychom řekli relativní pohyb a volba vztažné soustavy); konkrétní volba vztažného tělesa může zápis zjednodušit, nelze však říci, že by jiná volba byla nesprávná. Podobně namísto výroku, že směr a rychlost tělesa (my bychom uvažovali hmotný bod) s hmotností  $\mu$  se nemění, lze říci, že je nulové jeho střední zrychlení vůči vzdáleným tělesům  $m, m', m'', \dots$  ve vzdálenostech  $\vec{r}, \vec{r}', \vec{r}'', \dots$ , tedy  $\frac{d^2}{dt^2} \frac{\sum m\vec{r}}{\sum m} = \vec{0}$ . Toto Machovo pojetí bychom interpretovali jako pokus vysvětlit setrvačnost tělesa vlivem vzdálených objektů. Z dnešního hlediska bychom ovšem namítli, že konečná rychlost šíření jakékoli interakce, známá ze speciální relativity, by tuto myšlenku značně zkomplikovala.

## Kritika Newtonových formulací

Mach cituje osm Newtonových definicí, následující výklad a tři (pohybové) zákony. Připomeňme jen stručně volným a zkráceným překladem uvedené definice (s. 222–223):

Definice 1. Množství hmoty se měří z její hustoty a objemu. – Toto množství budeme v dalším nazývat tělesem nebo hmotností, a je známo skrze jeho váhu. [...]

Definice 2. Velikost pohybu se měří spojením (součinem) jeho rychlosti a množství hmoty.

Definice 3. Hmota má vlastnost odporu; proto setrvává každé těleso [...] ve stavu klidu nebo rovnoměrného přímočarého pohybu.

Definice 4. Síla je snažení změnit stav tělesa, na které působí, buďto stav klidu, nebo rovnoměrného přímočarého pohybu.

Definice 5. Dostředivá síla působí, že je těleso přitahováno k jistému bodu coby centru nebo k němu směřuje jakýmkoliv způsobem.

Definice 6. Absolutní veličina dostředivé síly je větší či menší měrou těže, podle poměrů působící příčiny, která se od středu šíří k okolním částicím.

Definice 7. Velikost urychlující dostředivé síly je úměrná rychlosti dosažené v daném čase.

Definice 8. Velikost hnací dostředivé síly je úměrná velikosti pohybu (hybnosti), která je dosažena v dané době.

Mach uvádí, že definice 1 je jen zdánlivá (Scheindefinition), protože pojem hmotnosti se s ní nevyjasní: hustota představuje jen hmotnost v objemové jednotce. (Jde tedy o skrytou definici kruhem.) Skutečnou definici hmotnosti lze podle Macha dát jen pomocí dynamických účinků na tělesa. Proti definici 2 nemá námitek, naproti tomu definice 3 je zbytečná, protože plyne z dalších definic 4 až 8. Definice 4 vysvětluje sílu jako příčinu zrychlení nebo jako úsilí o zrychlení (čímž lze použít koncept síly i na případ více sil, deformace tělesa konečných rozměrů apod.). Definice 5 vysvětluje a následující definice podrobněji rozebírají sílu dostředivou; jejich volba je dle Macha jen otázkou formy a vkusu, principiální námítky nemá.

Dále rozebírá tři Newtonovy pohybové zákony. Připomíná, že tyto zákony vyžadují *další doplňky*, a to: princip skládání sil (tj. že síly se chovají jako vektory), u principu akce a reakce odkaz na dosaženou hybnost, skutečnost, že síly působící v zákonu akce a reakce nemění polohu těžiště, odkaz na relativní pohyb. Všechny tyto připomínky lze plně pochopit a akceptovat, stavíme-li se na empirickou pozici Machovu.

S těmito doplňky se dle Macha stávají 1. pohybový zákon (zákon setrvačnosti) a 2. pohybový zákon (zákon síly) pouhými důsledky předchozích definic, podle nichž bez síly není žádné zrychlení, a zůstává tedy jen klid či rovnoměrný přímočarý pohyb. Je-li jednou zrychlení určeno jako míra působící síly, je jen tautologií tvrzení, že síla uděluje tělesu zrychlení. Jde přitom o vlastnost poznanou ze zkušeností. Rovněž 3. zákon (akce a reakce) je dle Macha jen zdánlivým zákonem, protože je nesrozumitelný bez správného pojmu hmotnosti, kterou Mach odvozuje právě použitím tohoto zákona. Mach tvrdí, že uvedené doplňky obsahují skutečně něco nového: první postuluje aditivitu sil působících od různých těles, druhý skládání sil a zbývající jsou deduktivní, matematické výsledky z předcházejících pojmů a zákonů.

## Machův návrh formulací zákonů mechaniky

Mach chce v dalším vyjít rovněž z Newtonových východisek, ale bez jeho nedokonalostí, které vidí zejména v pojmech absolutního prostoru a času. Navrhuje proto následující formulace (jednoduché závorky používá Mach ve svých formulacích). ((Dvojitě závorky vymezují mé doplňky)):

a) Zkušební věta: ((Dvě)) na sebe působící tělesa získávají za jistých okolností vyvozených z experimentální fyziky vůči sobě obráceně orientovaná zrychlení ve směru jejich spojnice. (V tom je již obsažen zákon setrvačnosti.)

b) Definice. Poměr hmot ((hmotností)) dvou těles je záporně vzatý převrácený poměr jejich zrychlení.

c) Zkušební věta. Poměry hmot ((hmotností)) jsou nezávislé i na druhu fyzikálního stavu urychlovaných těles (zda jsou elektrická, magnetická atd.), i na tom, zda zrychlení získávají přímo, či zprostředkovaně.

d) Zkušební věta. Zrychlení, která způsobují vícera tělesa A, B, C, [...] jedinému tělesu K, jsou na sobě nezávislá. (Odtud plyne bezprostředně věta o rovnoběžníku sil ((síly jsou vektory)).)

e) Definice. Hnací síla je součin hmotnosti tělesa a zrychlení hnací silou způsobeného.

Nyní mohou podle Macha následovat další víceméně libovolné definice „velikosti pohybu“, uvživé síly (v současné terminologii hybnosti, kinetické energie) apod., které však nejsou nikterak nezbytné. Mach konstatuje úhrnem, že Newton učinil velký pokrok formulací pojmů i vět, které byly se zárukou postačující pro další rozvoj mechaniky. Bere za přirozené, že při novosti a obtížnosti problematiky, při odporu vrstevníků a při šířce problematiky došlo k jisté „rozervanosti představ“ (*Zerrissenheit der Darstellungen*, s. 228), takže se např. objevila některá vlastnost v mechanickém postupu vícekrát. Částečně ale byly prokazatelně nejasné význam a zejména zdroje poznání jeho tvrzení, což by ovšem nemělo vrhnout dle Macha ani nejmenší stín na Newtonovu duševní velikost. Machův empiriokriticismus – směje-li tak nazývat nejpoctivější snahu vycházet jen a jen z empirie a pečlivě upozorňovat na vše, co z empirie nevychází, a hrozí tedy nějakým tím „zamlčeným předpokladem“, stereotypem, ze setrvačnosti respektovanou autoritou a podobně – je otevřeně formulován v závěru 7. odst. 2. kapitoly (s. 228):

„Souhlasíme tedy s právem proslulým fyzikem W. Thomsonem v jeho úctě a obdivu k Newtonovi. Naproti tomu názor sira W. Thomsona, že Newtonovy názory jsou i dnes to nejlepší a nejvíce filosofické, co můžeme mít, je nám těžko srozumitelný.“

## Současný pohled

Je mimo veškerou pochybnost, že Machův postoj, přístup a jednání obohatil mechaniku jako takovou; z historie nejen fyzikální víme ostatně, že jakýkoliv slepý obdiv k autoritám z jakékoliv oblasti se velmi snadno stane brzdou a konečkonců přítěží pro danou oblast; stačí vzpomenout Aristotela. Nám paradoxní konzervatismus Machův jak vůči

relativitě, tak i vůči atomům se jeví jako přirozený důsledek jeho nanejvýš poctivé snahy o čistě experimentálně orientovaný, a nikoli spekulativní přístup. Chceme-li však, bez ohledu na Macha, zkusit formulovat dnešní přístupy k mechanice, máme před sebou hned více možností. Jistý logický postup byl použit při formulaci norem (ISO/IEC řada 80000 a VIM), jiný bude přístup pedagoga (a ovšem rozlišený podle zaměření a úrovně jeho posluchačů), jinak bychom mechaniku axiomatizovali – více způsoby – a toto vše by bylo různé, pokud bychom setrvali vědomě na úrovni klasické fyziky, nebo pokud bychom vzali v úvahu fyziku kvantovou, relativitu speciální anebo obecnou. Bylo by nepochybně nemístné např. „vyvracet“ Machovu definici hmotnosti z jeho *zkušenostní věty*  $c$  obsahující nezávislost hmotnosti na elektrickém či magnetickém stavu poukazem na dodatečnou elektromagnetickou energii polarizované látky a tím způsobený nárůst hmotnosti podle vztahu  $E = mc^2$ .

V každém případě lze velmi ocenit a inspirovat se Machem v jasném vymezení úlohy experimentu a pozorování při tvorbě a formulaci teorií, aniž přitom převezmeme jeho odmítavé stanovisko ke „spekulacím“ – tedy k tvorbě modelů. Stačí si jen uvědomit, že měření samo má vždy jen omezenou přesnost, a to nejen kvůli omezeným možnostem našich měřicích přístrojů i našeho měření jakožto procesu, ale i proto, že *jakákoli* veličina charakterizující měřený objekt je definována a charakterizována pouze v rámci jistého modelu. Nynější norma pro měření GUM a Mezinárodní slovník pro metrologii VIM 3 berou za výchozí stanovisko *nikoli* představu, že třeba délka či poloha předmětu má svou přesnou, byť neznámou hodnotu, kterou my zjišťujeme s jistou chybou měření, ale že existuje už neurčitost i oněch základních veličin daná právě tím, že jsou vždy definovány jen v rámci jistého modelu. (Anebo věříte, že tloušťka cihly má svou exaktní, věrnou a přesnou hodnotu stanovitelnou třeba v pikometrech?)

Bylo by myslím zcela přiměřené parafrázovat citovaný závěr Machovy kapitoly i na něj samého:

„Souhlasíme tedy s úctou a obdivem k Machovi. Naproti tomu představa, že jeho názory i dnes jsou to nejlepší a nejvíce filosofické, co můžeme mít, by nám byla těžko přijatelná.“

## Dodatek

Dovolil bych si zde navrhnout jakousi středně jednoduchou koncepci pro výklad mechaniky, kompromis mezi axiomatikou, důrazem na empirii a srozumitelností. Vyjádřil bych však nejprve, co rozumím výkladem.

Komentáře a ilustrace uvádím pro přehlednost petitem.

1) Výklad jakékoli problematiky od kohokoli (pro úsporu místa ho nazýváme učitelem) jakémukoli posluchači (žákovi) předpokládá, že žák má jednak jisté obecné znalosti, které pokládá za pravdivé, zná jisté postupy, které pokládá za správné, a v principu se moc nebrání tomu být poučen.

Tyto „samozřejmosti“ nemusí být splněny třeba u pubertálního dítěte nesouhlasícího se vším, co se mu řekne, nebo u politika, jehož cílem není porozumět v diskusi, ale znemožnit protivníka apod.

2) Učitel chce popsat jistý model: teorii, chování čehosi kolem nás, praktický návod apod. Přitom s klidem může připustit i existenci jiných modelů, ale s tím, že pro dané požadavky (praktickou stavbu zařízení, snadné pamatování, souvislost s jiným poznáním...) je právě ten jeho model zvláště výhodný.

3) Je věcí učitele, aby co možná využil faktů a postupů akceptovaných žákem k tomu, aby ukázal, že žák může vlastně s učitelovým modelem souhlasit. Ta žákova fakta a ty postupy, které by byly v rozporu s tím, co má být vysvětleno, je žádoucí uvést do rozporu s jinými fakty či postupy žákem uznávanými.

Lákavá aristotelovská představa o tom, že věci mají svá „přirozená místa“ a že jakýkoliv jejich pohyb je jen projevem snahy dostat se na tato místa a tam zůstat v klidu, musí být zviklána a pak vyvrácena. Ale jinými chybnými či naivními představami se není nutno zabývat.

Co se týče systematiky a axiomatiky, musí žák během výkladu respektovat, že nelze používat jen pojmů dříve definovaných, jak by bylo ideálem třeba zadavatelů norem. Je nutné připustit i výskyt „obecně známých faktů“, byť ovšem jen v míře co nejmenší a jen nezbytně nutné.

Kdyby to nebyla pravda, kterou položkou by měla začít norma používající jen položky dříve definované?

A co se týče pedagogiky, lze jen doporučit Macchiaveliho Vladaře radícího, že všechna zla má úspěšný vladař vykonat co možná na samém začátku své kariéry, chce-li se udržet u moci dlouho.

Takže *úvod do klasické mechaniky* by mohl začít „hříšnými spekulacemi“ asi takto:

a) Víme, že žijeme ve trojrozměrném prostoru, umíme ho měřit, umíme spočítat vzdálenost (kartézská vztázná soustava v euklidovském prostoru, polohový vektor  $\vec{r}$ ). Víme, že čas plyne, a umíme ho měřit (měření doby  $t$  mezi dvěma okamžiky).

Otázky „co je čas“, „co je prostor“ je třeba odmítnout s tím, že odpověď na otázku „co je X“ předpokládá existenci něčeho jednoduššího než X, na co lze X převést. Pokud žák na otázce trvá, ať napřed navrhne sám, co zná jednoduššího.

b) Každá věc kolem nás – ve fyzice zvaná těleso – má v každý čas  $t$  svou polohu  $\vec{r}$ . Pro jednoduchost zavádíme pojem hmotný bod či částice, kde k charakteristice polohy uvedená veličina  $\vec{r}$  zcela stačí. Můžeme popisovat polohu a pohyb i jiných objektů, třeba stínu. Každé těleso má ale navíc charakteristiku zvanou hmotnost, popsateľnou kladnou veličinou  $m$ . Přířkneme-li hmotnost třeba atomům (v něž nyní každý žák věří) a předpokládáme-li, že hmotnost soustavy je součtem hmotnosti jejich částí, můžeme v principu převést měření na přepočítávání atomů, i když praktičtější budou metody jiné.

Později ukážeme, že hmotnost se projevuje dvojím způsobem (gravitační a setrvačná). Jími můžeme hmotnost měřit stejně, jako vysoce abstraktní teplotu můžeme zprostředkovaně měřit délkou (rtuťového sloupečku).

c) Tělesa se navzájem ovlivňují (interakce); v mechanice je k popisu interakce vhodný pojem síly popsateľný vektorovou veličinou  $\vec{F}$ . Sílu tedy zavedeme jako další základní pojem, vedle tělesa, prostoru a času (nikoli např. jako součin  $m\vec{a}$ , jak tomu někdy bylo v technické literatuře).



I měření síly převedeme na měření jejich účinků, ať už statických (deformace pružiny) či dynamických (měřením uděleného zrychlení).

Potud model – chcete-li, spekulace, které předkládáme pro mechanický popis světa kolem nás.

Dále budeme hledat čistě experimentálně vztahy mezi veličinami  $\vec{r}$ ,  $t$ ,  $\vec{F}$ . Měření provádíme u pana učitele v laboratoři; ta je středem světa, žádná Země se netočí ani kolem své osy, ani kolem Slunce.

Dnes je každému žákovi jasné, že je to nějaká ta básnická nadsázka, a žák bude nejspíš ochoten vyčkat, co se z toho vyvine, když to je zřejmé až takhle neudržitelné. Přitom je to vlastně Newtonův absolutní prostor a čas; v něm platí to, co budeme dále tvrdit a brát za ověřené měřením. Nazvěme ho také rovnou „inerciální systém“. Máme v něm mimo jiné klidné zázemí pro ověření, že měření hmotnosti (síly, hybnosti,...) potvrzuje očekávanou aditivitu této veličiny.

Přislíbíme, že časem z toho učitelského laboratorního sebevědomí dost slevíme.

Velmi záhy zjistíme, že inerciální je každý systém, pohybující se vůči našemu rovnoměrně přímočaře.

Měření nejprve zjistíme, že volný hmotný bod (bez tření) v laboratoři buď stojí, nebo se pohybuje rovnoměrně přímočaře.

Je to ovšem 1.N.z. Později ho vezmeme jako experimentální ověření, že vůbec nějaký inerciální systém opravdu existuje. Ještě později se obědeme i bez toho.

Dále naměříme, že síla udílí tělesům zrychlení závislé na jejich hmotnosti (2.N.z.).

Síla nám popisuje působení mezi dvěma tělesy; zjistíme, že platí zákon akce a reakce (3.N.z.).

Tím máme vybudovanou mechaniku na základě „absolutního prostoru a času“, a přitom experimentálně.

Dále zbývá opustit berličku absolutního prostoru a času: je-li náš systém inerciální, pak z transformací souřadnic plyne, že inerciální je i každý jiný pohybující se vůči našemu rovnoměrně přímočaře, i s libovolnou orientací os. (Galileovský princip relativity.) Tím je hotova výstavba základních pojmů klasické mechaniky. Dále, transformací do neinerciálního systému nám vyjde, jaký výraz musíme doplnit do 2.N.z., aby i nadále platil. Máme zdánlivé síly: setrvačnou, odstředivou, Coriolisovu a Eulerovu, a hned můžeme připustit celkem nevýznamné postavení naší Země (i učitelské laboratoře) ve vesmíru s tím, že však to, co jsme v ní měření zjistili a odvodili, nám může podat výklad jevů mnohem obecnějších, pozemských i nebeských.

Experimentálním faktem stálé rychlosti světa se dostaneme snadno do speciální teorie relativity.

Konečně připuštěním, že gravitace je univerzální, neodstítnelná síla, a jejím zahrnutím do metriky prostoru dostaneme obecnou teorii relativity.

A pokud po tom všem nějaký žák dostane chuť ty podezřelé spekulace na začátku našeho výkladu vyškrtnout a něčím nahradit nebo je vylepšit, pak chvála Bohu: jednak se nám podařilo vzbudit u žáka zájem o fyziku a jednak – co třeba když se mu to opravdu povede?!