

# Prolegomena k metodologii axiomatického budování fyzikálních modelů

## I. Úvod

Budování fyzikálních modelů je spojeno s požadavkem na co možná největší podobnost realitě. Ten, kdo fyzikální model sestavuje, by si měl být vědom toho, že nejde o popis světa kolem nás, ale o vysvětlení principů, které v něm probíhají. Tak například Schrödinger může současně tvrdit, že existuje svobodná vůle, ale člověk nemůže být vyjmut z působení přírodních zákonů. [1]

Fyzika tak pracuje s modely, které se snaží na jedné straně co možná nejlépe popsat způsob fungování světa kolem nás, ale současně je si vědoma toho, že netvoří hermeneutiku tohoto světa, že její výpověď o celku je neúplná.

V následujícím se pokusíme podívat na tři velikány vědy a jejich způsob práce s fyzikálními modely a poznáním, především v kontextu jejich myšlenkového zázemí. Johannese Keplera, který hledal dokonalou harmonii světa, Nielse Bohra, který usiloval o spojení experimentu a teorie i za cenu případné dočasné nekonzistence teorie a v neposlední řadě Ernsta Macha, jenž postupoval přísně empiricky a axiomaticky.

Je asi zřejmé, že bude jen obtížné nalézt nějaký základ, jenž by mohl posloužit jako prolegomena pro každé další budování fyzikálního modelu, ale přesto se domníváme, že určité rysy budou v dílech všech tří osobností fyziky společné a snad právě je lze považovat za základ, na kterém je možné další fyzikální modely bezpečným způsobem budovat.

## II. Keplerovo hledání dokonalé Sluneční soustavy

Johannes Kepler si ještě během svého pedagogického působení ve Štýrském Hradci povšiml toho, že mezi sféry planet lze vložit tělesa tak, aby – jestliže budou v jedné sféře opsaná, budou ve druhé vepsaná.<sup>1</sup> Tento objev ho jednoznačně uchvátil, neboť mu nabízel pohled do dokonalosti vesmíru, který chápal jako dokonalý stroj. Tak jako je jeho Stvořitel dokonalý, musí i výtvar být jeho reflexí. Přitom bylo zřejmé, o jaká tělesa musí jít – již od dob Platóna

---

<sup>1</sup> Geneze objevu je mnohem složitější. Původně počítal s tím, že bude možné mezi sféry (které chápal jako hmotné, fyzicky existující) vložit rovinné mnohoúhelníky. Tento prvotní nápad se ukázal být jako nerealizovatelný a proto se rozhodl mezi trojrozměrné sféry vkládat trojrozměrná tělesa, v té době všeobecně známá a Platónem považovaná za ideální a dokonalá.

existoval seznam pěti dokonalých těles – čtyřtět, krychle, osmistět, dvanáctitět a dvacetitět. Nebylo pochyb o tom, že právě těchto pět těles může být vloženo mezi šest známých planet a tak dotvořit harmonii přírody. [2]

Bylo samozřejmě nutné rozhodnout, které z těles bude umístěno mezi jednotlivé sféry tak, aby byl pohyb planet možný a odpovídal pozorování. Keplerovo vlastní řešení bylo následující:

- mezi sféru Saturnu a Jupitera je umístěná krychle;
- mezi sféru Jupitera a Marsu čtyřtět;
- mezi sféru Marsu a Země dvanáctitět;
- mezi sféru Země a Venuše dvacetitět;
- mezi sféru Venuše a Merkuru osmistět.

Tato představa umožnila Keplerovy pokračovat ve výpočtech. Rozměry planetárních sfér bral Kepler – jinak ani nemohl – od Koperníka, což ale byla v té době mimořádně přesná a dokonalá data. Kepler vytvořil takový model sfér, aby se mezi ně nejen vešla dokonalá tělesa, ale aby rozměry odpovídaly tabulkovým údajům takovým způsobem, aby do jejich rozměrů mohla být zahrnuta jak jejich největší, tak také nejmenší naměřená vzdálenost od Slunce.<sup>2</sup> Dokonalost takto vypočtených drah nejlépe zachytí následující tabulka: [2]

	Koperník v Objezích	Kepler v Mystériu	Dnešní astronomie
Merkur	0,395	0,429	0,387
Venuše	0,719	0,762	0,723
Země	1,000	1,000	1,000
Mars	1,512	1,440	1,524

---

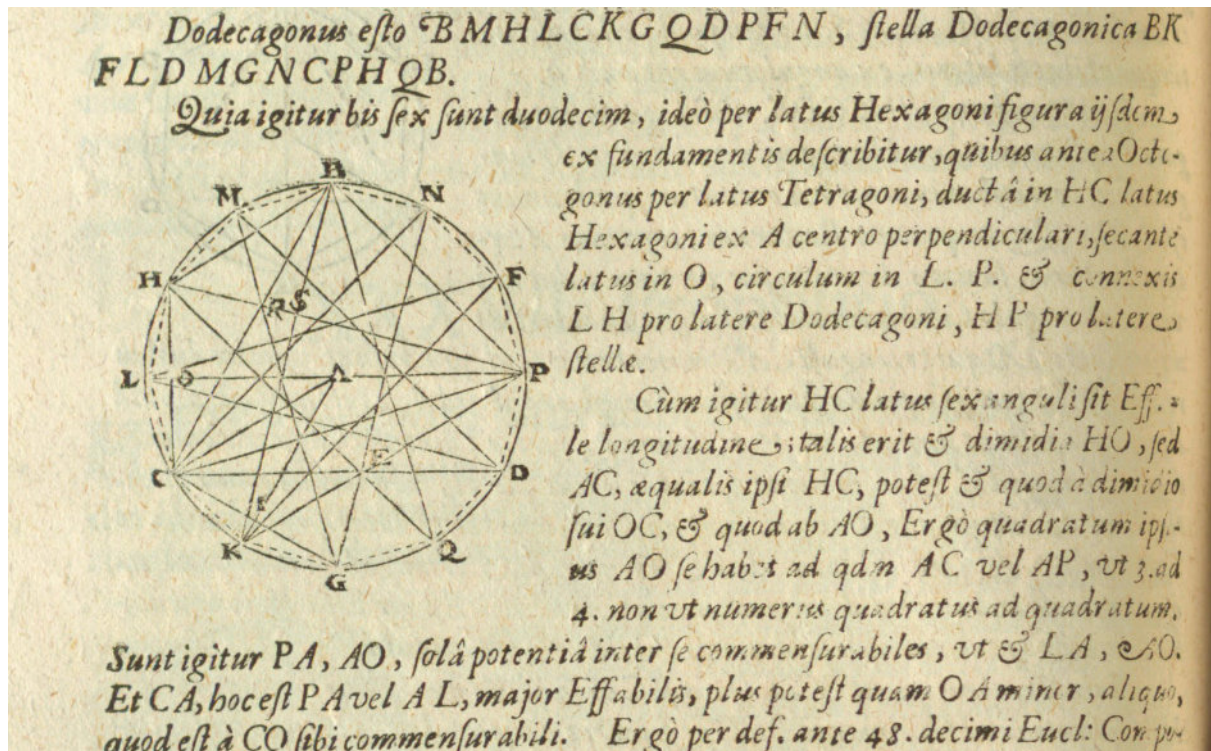
<sup>2</sup> Připomeňme, že představa Heliocentrického modelu Sluneční soustavy nebyla něčím všeobecně přijímaným. Keplerův budoucí spolupracovník Ticho Brahe ji například nikdy nepřijal.

Jupiter	5,219	5,261	5,203
Saturn	9,321	9,163	9,539

Je všeobecně známo, že Kepler u těchto představ neskončil. Díky svému pobytu na dvoře císaře Rudolfa získal přístup k datům, která za léta pozorování nashromáždil Tycho Brahe. Jeho cílem bylo vypočítat přesné vzdálenosti planet, což byl ostatně úkol, kterým si lámala hlavu celá tehdejší astrologie i astronomie. [3]

Skutečností je, že se svojí představou dokonalých těles bojoval ještě velice dlouho, než zjistil, že tvary sfér jsou elipsy, protože není možné nalézt ideální tělesa, která by mohla být současně opsána i vepsána. Přesto byl – stejně jako Koperník – veden primární základní představou toho, že Ptolemaiov model, který byl postupně zdokonalován rostoucím množstvím kružnic a epicyklů, které měly zajistit lepší soulad teorie s pozorováním, je příliš složitý a nedokonalý.

Naopak elipsa poskytla – spolu s několika jednoduchými zákony, které dodnes nesou Keplerovo jméno – jednoznačný a jednoduchý popis toho, jakým způsobem planety kolem Slunce obíhají. Rudolfínské tabulky, které dvorní astrolog a matematik dokončil až po smrti císaře, byly z tohoto pohledu pro vědu klíčové. Zatímco Kepler z naměřených dat vytvořil model, nyní mohl být model konfrontován s novými daty a měřeními, které jej jen potvrdila. [4] Ač nešlo o experiment v pravém slova smyslu, Keplerova ochota pravdivým způsobem verifikovat své modely a nikoli usilovat o stále další záplatování polofunkčních názorů, se staly rozhodujícím pro vývoj vědy a astronomie. Pro samotnou heliocentrickou představu šlo o klíčový argument, který již nebylo možné snadno smést ze stolu tím, že jiný model dává stejně dobré (či dokonce ještě lepší) výsledky.



Obrázek 1: Z Keplerova díla *Harmonices mundi*.

Spor vedený o dokonalost světa byl jedním ze základních motivů, které se v této diskusi objevovaly. Pokud se podíváme na Koperníkovy výpočty, nebyly o nic lepší či přesvědčivější, než výpočty konkurenční. Rozhodujícím argumentem se tak stala (nejen pro Koperníka) krása a jednoduchost. Jistě není bez zajímavosti, že stejný argument užil také Newton o několik let později. Ve slavné třiadvacáté otázce v *Optice* se ptá, zda není oheň, který žhne ve hvězdách týž, jaký hoří zde na Zemi. Je-li Bůh dokonalý (o čemž nikdo nepochyboval) není důvodu, aby tvořil dva mechanismy pro tutéž věc různé. [5] V hoření je cosi dokonalého, teleologického, a musí být stejné zde i ve vesmíru. Slavné spojení nebeské a pozemské mechaniky v jeho díle tak má zásadní náboženský podtext.

### III. Ernst Mach a jeho mechanika

Dílo brněnského rodáka Ernsta Macha je možné považovat v dějinách vědy za mimořádné hned z několika důvodů. Byl především skvělým experimentátorem a pedagogem, ale také fyzikem, filosofem, psychologem. Jeho dopad na myšlení lidí, kteří patřili do okruhu jeho přátel a kolegů, byl mimořádný. Za všechny lze uvést obdiv, který k němu měl Albert Einstein, jenž právě diskutím s Machem přikládal klíčový význam během budování teorie relativity. [6]

[7]

Přínos Macha byl hned v několika oblastech, které se úzce vztahují k budování fyzikálních teorií a modelů. Předně svojí Mechaniku (dost možná nejslavnější učebnici fyziky všech dob), ale i další díla, začíná co možná nejpečlivějším budováním pojmů. Existují-li pojmy jako je hybnost, síla, hmotnost či energie, mělo by být prvořadým zájmem fyziky, aby usilovala o jejich vysvětlení a popis. Je s podivem, že se v žádné středoškolské učebnici mechaniky student nedozví co to je síla či hmotnost. Neznalost těchto pojmů přitom vede k chybné fyzikální intuici a problémům s pochopení fyzikálních zákonů jako takových.

Mach tedy vychází z potřeby pokusit se definovat základní fyzikální pojmy. Zvláště slavný je jeho rozbor hmotnosti, která je současně pěknou ukázkou toho, jak fyzikální pojmy budovat. Sám Mach se ptá, z čeho by měl vlastně fyzik ve své práci vycházet. Odpověď nachází v experimentu. Tak hmotnost zavádí na základě studia pohybu těles během kmitů na vodorovné pružině:

$$F = -k \cdot x \quad (1)$$

$$z = m \cdot a \quad (2)$$

Na jedné straně tedy stojí Hookův zákon, na straně druhé vztah pro zhybnění. V rámci experimentu tak můžeme sledovat, co se bude dít se zrychlením, budeme-li měnit tělesa. Ukazuje se, že jeho velikost bude záležet na specifické fyzikální veličině, která charakterizuje těleso – totiž na hmotnosti. Tím překonává jeden z velkých problémů klasické fyziky – Newtonovu definici hmotnosti, která je provedena kruhem. Současně je dobré říci, že ne vše se mu podařilo definovat správně, kupříkladu tvrdí, že síla je součin hmotnosti a zrychlení, což zjevně je definicí zhybnění, nikoli síly. [7]

S tím souvisí také druhý prvek budování fyzikálních teorií v podání Macha a to totiž radikální vyžadování zkušeností a experimentů, ze kterých lze vyvozovat teoretické závěry. Tento jeho empiriokriticismus<sup>3</sup> se snažil ve všech svých poznatcích důsledně uplatňovat. Odmítal koncept atomu, protože nebyl k dispozici žádný přesvědčivý důkaz pro jejich existenci v podobě experimentu. [8] Stejně tak nepřijal závěry teorie relativity, ale neustále ji podroboval kritice, protože nebyla pokusem podložená. Slavný Machův princip, který lze

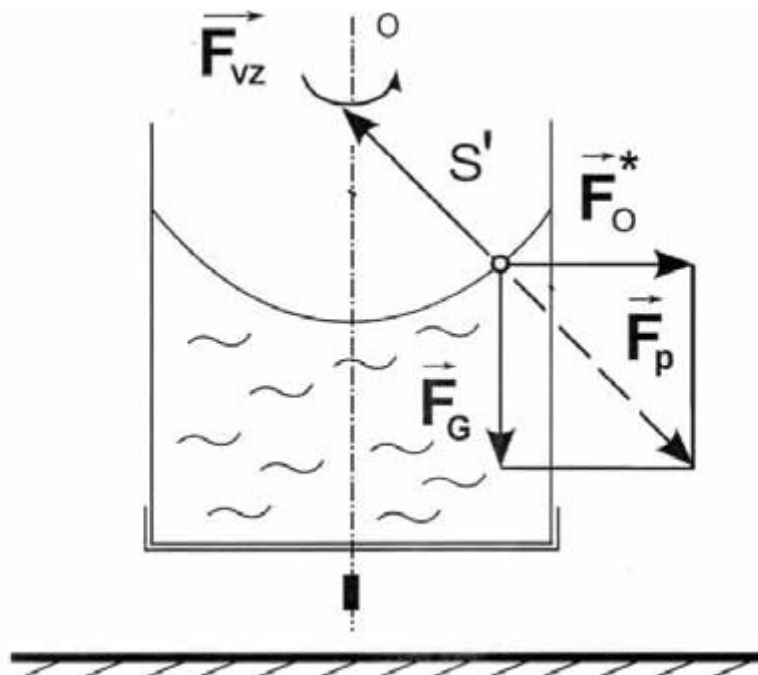
---

3 Empiriokriticismus usiluje o vytvoření konceptu světa na základě čisté zkušenosti. Odmítá metafyziku jako nadbytečnou a neodůvodněnou. Cílem přírodovědy nemá být výzkum fenoménů, tedy toho, co se nám jeví, dává ve smyslech, ve zkušenosti, ale, slovy Macha, „hledání vzájemných vztahů mezi fenomény.“

označit za předchůdce teorie relativity je právě onou snahou o odmítnutí pojmů absolutního prostoru, se kterým operoval Newton. [6]

Pohledy Newtona a Macha, nemohly v žádném případě setkat, byl názor na existenci absolutního prostoru (je zajímavé, že Mach nijak neřeší otázku absolutního času, v tomto ohledu jeho přístup dokončí až Einstein). Newtonovo jeviště, vystavěné Bohem, který je dárce řádů, nemohlo být vnímáno jinak, než jako metafyzický předpoklad, jenž nemůže najít žádnou oporu v experimentu. Můžeme ve fyzice počítat s něčím, co nelze dokázat, jako absolutní čas a prostor? Mach jednoznačně odpovídá, že nikoli. [7]

Machův princip tak není nic jiného, než racionálně podloženým pokusem o vysvětlení setrvačnosti, která by se měla vysvětlit jinak, než absolutním prostorem. Jistě není bez zajímavosti, že sám Mach kritikou zahrnuje Newtona nejen pro jeho metafyzické předpoklady, ale také pro různou nedůslednost, se kterou zakladatel moderní mechaniky běžně pracoval. Příkladem za všechny může být definice pojmu hmotnosti kruhem, kterou můžeme nalézt v principiích.



Obrázek 2: Popis rotujícího vědra jako kamene sporu Macha a Newtona.

Máme-li nějak stručně charakterizovat celé vědecké počínání Macha, tak bychom mohli říci, že na základě počitků a experimentálních dat je možné budovat vědeckou teorii skutečně fundovaně a fyzikálně. V opačném případě opouštíme pole fyziky a dostáváme se do oblasti metafyziky, filosofie či teologie, kde je fyziky zjevně metodologicky nepoužitelná a přirozeně

selhává. Její doménou tak jsou právě hmotná jsoucna, fenomény, které mohou být podrobeny experimentu.

#### IV. Bohrov model atomu

Tak jako Kepler vstupoval do doby, která se zdála být pro fyziku více než problematická, Bohr vstupuje do fyzikálního světa sice ve zcela jiné době a kontextu, ale stejně v tak obtížné situaci. Teorie, která byla složitě a precizně vybudována na kamenech klasické elektrodynamiky Maxwella a jeho rovnic se sice v řadě oblastí skvěle osvědčovala, ale to nijak neumenšovalo skutečnost, že vznikala stále širší třída fyzikálních problémů, ve kterých se experiment rozcházel s teorií.

Jak známo z metodologie vědy, je to vždy experiment, který je tím nejvyšším arbitrem nad fyzikálním poznáním světa. Rutherfordovy pokusy přinesly nezvratné zjištění, že veškerý kladný náboj je koncentrován ve velice malé oblasti s rozměrem  $10^{-14}$  m a představuje téměř všechnu hmotnost atomu. Oproti tomu záporný náboj tvoří pouhých 0,05 % hmoty a je rozložen v oblasti o průměru řádově  $10^{-10}$  m. [9]

Tyto experimenty s sebou přinesly také další významné zjištění, totiž že částice jsou v jádře přitahovány Coloumbovskou interakcí. Díky tomu se mohlo zdát nad slunce jasné, že řešení popisu atomu bude možné provést Maxwellovými rovnicemi. [10] To s sebou ale přinášelo také významnou otázku, jak je možné zajistit stabilitu takového systému.

Elektron a jádro jsou totiž přitahovány značnou silou a z elektrodynamiky vyplývá závěr, že elektron pohybující se po zakřivené dráze (tedy se zrychlením) musí nutně vyzařovat záření. To má ale za následek úbytek energie a pokles rychlosti, což by vedlo ke zřícení elektronu. Planetární model, který se nabízel jako přirozené řešení se tak ukázal být značně problematický. Mezi přitahujícími se planetami a atomem je totiž rozdíl přinejmenším právě v onom vyzařování energie. Stabilita takového systému by byla zřejmě asi  $10^{-10}$  s, což neodpovídá realitě, neboť stabilní částice pozorujeme. [10]

Model s elektronem, který se řítí do jádra je také v rozporu s dalšími dvěma zjištěními z experimentální fyziky – spektra jsou čarová a ne spojitá (jak by napovídal spirálně padající náboj) a jsou podstatně menší. Současně se ukázalo, že všechny atomy, bez ohledu na svůj původ a způsob přípravy, mají stejné spektrum, což opět neodpovídá pozorováním.

Současně s tím se objevila také další zjištění – atomy regenerují do téže podoby, jakou měly v nevybuzeném stavu a chladné plyny nezáří. Obě zjištění jsou přitom v přímém rozporu s teoretickými předpověďmi.

A právě do této situace vstupuje Bohr, který se snaží svým fyzikálním modelem situaci zachránit. Postupuje přitom tak, že zavádí dva postuláty, které měli dalekosáhlé dopady. Jako východisko mu slouží především Rutherfordův model atomu a také jím odhadnutá velikost. Tu pak může porovnat se svým teoretickým výpočtem a jejich shodnost jej utvrzuje v tom, že cesta, po které se vydal je správná. [11]

První postulát se týká existence základních stavů atomů. Jde o takový stav, ve kterém atom nevyzařuje žádnou energii. Opačně lze říci, že se atom nachází v tomto stavu (bez ohledu na pohyb elektronů), právě tehdy když nevyzařuje. [11] Tato myšlenka je ale evidentně neslučitelná se základy elektrodynamiky. Přesto dobře dokáže odstranit velkou část problémů, o kterých jsme již psali výše.

Druhý postulát se týká absorpce a emise elektromagnetického záření, které je důsledkem přechodu mezi jednotlivými hladinami v elektronovém obalu. [11] Důsledkem tohoto postulátu je jednak kvantování energie v atomech, což bylo zcela v souladu s Planckovou hypotézou, ale především vysvětlení emisních a absorpčních čarových spekter. Matematicky můžeme druhý postulát zapsat jako:

$$\Delta E = \left| E_{\text{pocatecni}} - E_{\text{koncov a}} \right| \quad (3)$$

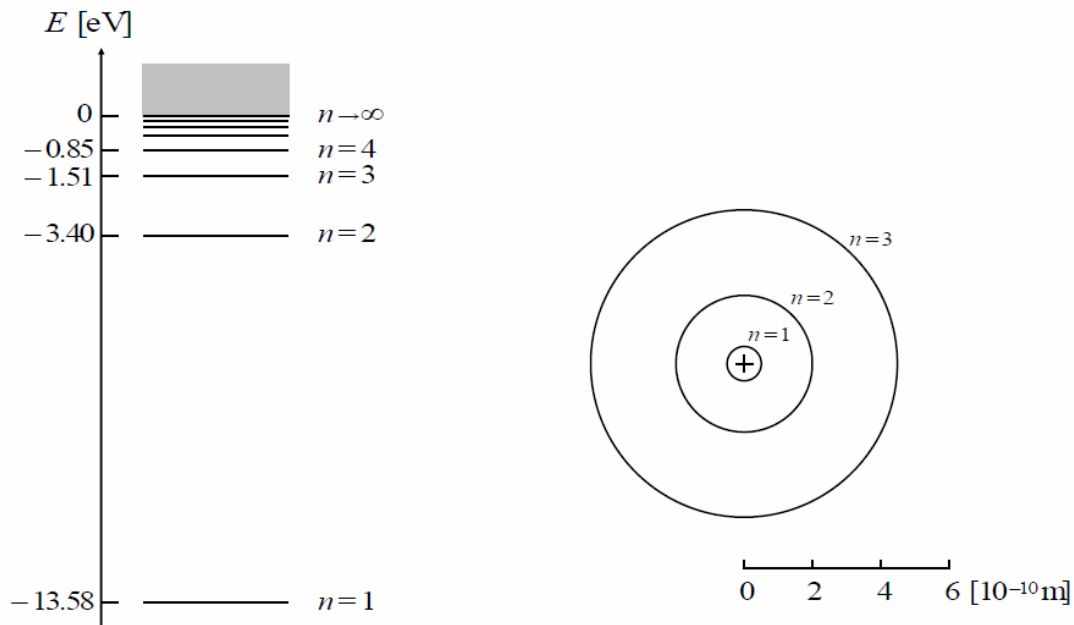
$$\Delta E = hf \quad (4)$$

Úspěchy takto postavených postulátů na sebe nenechaly dlouho čekat. Předně byla Bohrova představa první, která dokázala vysvětlit spektrální čáry vodíku, a to jak energii, tak jejich diskrétní strukturu. [12, 13] To mělo zcela zásadní dopad na fyzikální zkoumání ve spektrometrii, která poprvé dostala skutečně vědecký teoretický základ. Díky jeho poznatkům bylo možné spočítat Rydbergovu konstantu a ukončit spíše numerologické období této disciplíny. [12, 10] Zprostředkovaný dopad především na astrofyziku není třeba dále zdůrazňovat.

Pomocí postulátů bylo možné snadno vypočítat poloměr (vodíku podobnému) atomu v základním i vybuzeném stavu, hodnotu energií na těchto drahách a zprostředkovaně také



jejich frekvenci vyzařování během přechodu mezi dvěma stavy. [13] Experimentální potvrzení postulátů přišlo na základě měření spektrálních čar a excitačních energií rtuti, které provedli Herz a Franck v letech 1914-1919. [10]



Obrázek 3: Spojení Bohrova modelu a spektroskopických pozorování.

Tyto fenomenální úspěchy ale nebyly bez problémů a Bohrově teorii bylo možné mnohé vytknout. Především šlo o její vnitřní nekonzistenci, což bylo jasné již jeho autorovi, který s ní počítal jako s jistým provizoriem, stavebním kamenem, na kterém lze dále v úvahách pokračovat k úplnému popisu atomárních struktur.

Pokud bychom chtěli shrnout základní linii práce modelu, mohli bychom postupovat takto: [10]

1. Klasickým postupem jsou vypočteny charakteristiky elektronových drah (poloměr, rychlost, frekvence), což je ale v rozporu s klasickou elektrodynamikou.
2. Na základě výběrové podmínky prvního postulátu jsou ze spojitého spektra hodnot vybrány ty dovolené.
3. Energie stacionárního stavu je již počítána klasickým způsobem.
4. Výpočet frekvence emitovaného či absorbovaného elektromagnetického záření je řešen druhým postulátem.

Právě nekonzistence ve spojení klasického a kvantově mechanického přístupu představovala vážný problém celé teorie. Slovy Rutherforda přestala být fyzika přehlednou, čitelnou a pochopitelnou. [10]

Objevil se také ale další problém, který se snad jevil jako ještě závažnější – nebylo možné představy, které Bohr vytvořil o vodíku (a vodíky podobných iontech) rozšířit na složitější atomy a tyto představy sjednotit s experimentem.

Přes vše výše uvedené šlo o zcela zásadní model, který do fyziky mikrosvěta přinesl mnoho nového a inspirativního. Především dokázal oddělit frekvenci spekter a oběhovou energii elektronů, což dodnes představuje základní stavební kámen moderní fyziky. [14] Dále učinil podstatný krok v tom, že je třeba se na fyziku mikrosvěta dívat poněkud jinými očima, než jsme zvyklí z klasické fyziky – a vnést do ní Planckovu konstantu.

## V. Prolegomena?

Na počátku našich úvah jsme si položili nesnadnou otázku – může existovat nějaký jednotný metodologický pokyn, který by určoval, jakým způsobem má být fyzikální teorie stavěná? Jsem přesvědčen, že odpověď musí být dvojitá. Jistě nebude existovat nějaký univerzální návod, který by provedl vědce „krok za krokem“ k fyzikálnímu modelu, jako takovému. To by věda představovala zřejmě příliš jednoduchý a uzavřený systém poznání, dost možná by ztratila mnohé na své kráse a překvapivosti.

Když se podíváme na to, jak je možné, že věda v moderním slova smyslu se rozvinula právě v křesťanském kulturním okruhu, můžeme nalézt (pro mnohého dnes snad nečekanou) odpověď. Víra v to, že Bůh stvořil vesmír moudře a dobře, že obdařil člověka rozumem, aby jej mohl poznávat a sám do něj jako neustálý hybatel nevstupuje, umožnila samostatné budování vědy, jako poznání stvořeného světa. [15]

Hledáme-li prolegomena ke každému dalšímu budování fyzikálního modelu, můžeme se jistě opřít o následující. Fyzikální jevy v našem vesmíru budou probíhat všude stejně. Není možné, aby nějaké nahodilé jsoucní bylo vyňato z fyzikálních zákonů. Je třeba vycházet z měřitelných faktů a budovat teorie na základě experimentu, neboť teorie, která není falsifikovatelná, nemůže být považována za vědeckou teorii. A v neposlední řadě je zde Keplerův pohled na vesmír. Bůh skutečně (či chceme-li příroda) dělá věci jednoduše, symetricky a krásně. Pěkně to parafrázoval Richard Feynman, který tvrdil, že složité vzorce a vztahy jsou jen ukázkou toho, že problémům nerozumíme dost dobře. [16] Myslím, že dobrá

fyzikální teorie musí být také krásná ve svém matematickém popisu. Snad proto, že vesmír je ve všech svých ohledech elegantní.

Dalším užitečným pohledem na to, jak vlastně budovat fyzikální teorie může být příspěvek Poppera. Karl Popper se narodil 28. Července roku 1902 ve Vídni v židovské rodině. Zde také studoval fyziku a matematiku a věnoval se také filosofii. Jeho prvním stěžejním dílem v této oblasti je práce *Logik der Forshung* (1934), kterým silně kritizoval Vídeňský kroužek. [17]

Popper zavrhuje indukci, protože věří, že není možné odvodit obecnou teorii ze singulárních výroků. Odmítnutí indukce nadto zdůvodňuje obecnější povahou pojmů, kterými myslíme či řešíme problémy, než počitků. Přichází také s koncepcí tří světů, které spolu neodmyslitelně souvisí. Jde o svět fyzický, který představuje hmotná jsoucná; svět subjektivních zkušeností a svět problémů, teorií a kritické argumentace, který je také někdy označován jako kulturní.[18] Toto dělení do dnešních dní přebírá řada autorů, za všechny lze uvést například Barrowa.

Pro samotného Poppra je klíčovou myšlenkou skutečnost, že věda nikdy nemůže dosáhnout pravdy, může se jí jen přiblížit. Bez hlubšího komentáře tak ponecháme skutečnost, že ve své době stál tento názor jako konsensuální mezi pozitivistickým nadšením nekriticky adorujícím vědu a skepticismem, který zpochybňoval veškeré vědecké poznání a jeho hodnotu.[18]

Nabízí jakousi tabulku idejí, která ukazuje, jak by se měla obecně vědecká teorie budovat – na prvním místě stojí idea jako taková. Tu lze chápat jako pojmy, výpovědi, teorie či myšlenky. Ty je nutné v druhém kroku vyjádřit pomocí slov, která vytvářejí tvrzení. Na základě nich je pak prováděna verifikace s cílem ověřit či ukázat pravdivost jednotlivých výroků. V dalším kroku je možné těmto závěrům dát hlubší význam a ukázat na jejich pozici ve vědě jako takové. V neposlední řadě je lze redukovat na definice a jejich odvození ze základních pojmů, jednoduchých vět. [7]

Jistě není bez zajímavosti, že pokud použijeme tuto tabulku například na díla Einsteina, lze říci, že podle ní téměř striktně postupoval. Jde o obecnější rámec, který ukazuje, jak by kvalitní fyzikální model či představa měla být postupně budována a pěstována. Sám Popper by k tomu připojil ještě jeden požadavek – nechtějme popsat pravdu, ale snažme se k ní přiblížit. [7] Věda je metodologicky omezená a vždy popisuje jen určitou část či aspekt skutečnosti. A to je skutečnost, které by si měl být každý vědec vědom.

Na druhou stranu je ale třeba říci, že pokud chceme navrhnout model, který bude skutečně přelomový, je nutné mít odvalu – oprostít se od předsudků a nepodložených představ, zkusit vyjít jiným směrem než je obvyklé. Jistě nalezneme tisíc cest, které ukazují, jak věci nefungují, ale jde o možnost jak najít odpověď na otázku, jak se příroda chová ve skutečnosti.

## Literatura

[1] SCHRÖDINGER, Erwin. Co je život? : Duch a hmota; K mému životu. Vyd. 1. V Brně : VUTIUM, 2004. 254 s. ISBN 802143175X.

[2] HORSKÝ, Zdeněk. Kepler v Praze. Praha: Mladá fronta, 1980.

[3] KEPLER, Johannes, E AITON, A DUNCAN a J FIELD. The harmony of the world. Philadelphia, Pa.: American Philosophical Society, 1997, xli, 549 p. ISBN 08-716-9209-0.

[4] VOELKEL, James R. Johannes Kepler and the New Astronomy. Oxford University Press, 2001, 144p. ISBN 9780195150216.

[5] NEWTON, Isaac. Opticks or, a treatise of the reflexions, refractions, inflexions and colours of light : also two treatises of the species and magnitude of curvilinear figures. Commentary by Nicholas Humez (Octavo ed.). Palo Alto, Calif.: Octavo. 1998 ISBN 1-891788-04-3. (Opticks was originally published in 1704).

[6] LANGER, Jiří. Mach a Einstein. In: DUB, Petr a Jana MUSILOVÁ. Ernst Mach – Fyzika – Filosofie – Vzdělávání. 1. vyd. Brno: Masarykova univerzita, 2010, s. 179–187. ISBN 978-80-210-4808-9. DOI: 10.5817/CZ.MUNI.M210-4808-2011-179.

[7] Materiály prof. Černožského k předmětu F3400.

[8] FISCHER, Jan. Machův atomismus, Occamova břitva a teorie fundamentálních částic a sil. In: DUB, Petr a Jana MUSILOVÁ. Ernst Mach – Fyzika – Filosofie – Vzdělávání. 1. vyd. Brno: Masarykova univerzita, 2010, s. 173–178. ISBN 978-80-210-4808-9. DOI: 10.5817/CZ.MUNI.M210-4808-2011-173.

[9] LACINA, Aleš. Deset kroků do mikrosvěta. In *Moderní trendy v přípravě učitelů fyziky 3*. Plzeň : Západočeská univerzita v Plzni, 2007. ISBN 978-80-7043-603-5, s. 161-171. 2007, Srní.

[10] LACINA, Aleš. Bohrův model atomu. *Pokroky matematiky, fyziky a astronomie*, Praha, Jednota českých matematiků a fyziků. ISSN 0032-2423, 2008, vol. 53, no. 2, s. 125-151.

[11] Bohr N.: On the Constitution of Atoms and Molecules I – III. *Philosophical Magazine* 26 (1913) 1, 476, 857.

[12] KING, Harry F. a Keiji MOROKUMA. Theory of the Rydberg spectrum of triatomic hydrogen. *The Journal of Chemical Physics*. 1979, roč. 71, č. 8, s. 3213-. ISSN 00219606. DOI: 10.1063/1.438768. Dostupné z: <http://link.aip.org/link/JCPSA6/v71/i8/p3213/s1>

[13] BOHR N., „Poslední rozhovor“ in: Five-Session Interview with Niels Bohr, conducted by: Thomas S. Kuhn, L. Rosenfeld, E. Rüdinger, and Aa. Petersen Prof. Bohr's office, Carlsberg, Copenhagen, Denmark (October 31, November 1, 7, 14, 17,1962), AHQP: Archive for the History of Quantum Physics, Special Collections Department University of Pittsburgh Library System.

[14] CONDON, Edward Uhler a Halis ODABAŞI. Atomic structure. New York: Cambridge University Press, 1980, xviii, 658 p. ISBN 05-212-9893-8.

[15] WOODS, Thomas E. Jak katolická církev budovala západní civilizaci. Vyd. 1. Překlad Michaela Freiová, Václav Frei. Praha: Res Claritatis, 2008, 206 s., [16] s. barev. obr. příl. ISBN 978-809-0414-303.

[16] FEYNMAN, Richard Phillips, Robert B LEIGHTON a Matthew SANDS. Feynmanovy přednášky z fyziky s řešenými příklady. 1. vyd. Havlíčkův Brod: Fragment, 2002, 435 s. ISBN 8072004212

[17] POPPER, Karl. *Věčné hledání : Intelektuální autobiografie*. Praha : Prostor, 1995. 231 s.

[18] POPPER, Karl; ECCLES, John. *The Self and Its Brain : An Argument for Interactionism*. London : Routledge, 1977.

### **Obrázky:**

[1] KEPLER, Johanes. *Harmonices Mundi*. Dostupné na WWW <[http://posner.library.cmu.edu/Posner/books/book.cgi?call=520\\_K38PI](http://posner.library.cmu.edu/Posner/books/book.cgi?call=520_K38PI)>.

[2] TROJÁNEK, Aleš. Machův princip a středoškolská mechanika. In: DUB, Petr a Jana MUSILOVÁ. *Ernst Mach – Fyzika – Filosofie – Vzdělávání*. 1. vyd. Brno: Masarykova

univerzita, 2010, s. 235–238. ISBN 978-80-210-4808-9. DOI: 10.5817/CZ.MUNI.M210-4808-2011-235.

[3] LACINA, Aleš. Deset kroků do mikrosvěta. In *Moderní trendy v přípravě učitelů fyziky 3*. Plzeň : Západočeská univerzita v Plzni, 2007. ISBN 978-80-7043-603-5, s. 161-171. 2007, Srní.

Příspěvek byl napsán v rámci řešení operačního programu Vzdělávání pro konkurenceschopnost: Moduly jako prostředek inovace v integraci výuky moderní fyziky a chemie, reg. č.: CZ.1.07/2.2.00/28.0182.