

## Brána relativity otevřená

Jan Novotný\*, Přírodovědecká fakulta MU, Brno

Rok 2005 je na einsteinovská výročí bohatý, ale není pochyby, že za Světový rok fyziky byl vybrán především pro třicetistránkovou práci s nenápadným názvem *K elektrodynamice pohybujících se těles* [1]. Jako datum jejího zrodu se udává 30. červen 1905, kdy ji přijal do tisku jeden z nejvýznamnějších fyzikálních časopisů té doby, *Annalen der Physik* (vyšla však až koncem září). Práce i dnes (a možná více než v době svého vzniku) působí jako zjevení: zatím málo známý autor tu naráz vcelku jednoduchými prostředky vyřešil klíčový problém tehdejší fyziky a zbudoval její nové základy. Tak úspěšný první krok do nového světa nemá ve fyzice obdobu. Pro kvantovou teorii bychom obdobnou jedinou reprezentativní práci jediného autora určitě nenašli a shrnutí obecné teorie relativity z roku 1916 předcházelo dlouhé Einsteinovo hledání se slepými uličkami a oklikami.

### 3. Zur Elektrodynamik bewegter Körper; von A. Einstein.

Daß die Elektrodynamik Maxwells — wie dieselbe gegenwärtig aufgefaßt zu werden pflegt — in ihrer Anwendung auf bewegte Körper zu Asymmetrien führt, welche den Phänomenen  
*Obr. 1 Úvod Einsteiny práce v Annalen der Physik*

Pokusíme se v dalším slavnou práci se stoletým odstupem projít a (abychom užili výrazu módního ve filozofických kruzích) poněkud ji dekonstruovat. Zamysleme se pak také nad tím, zda opravdu spadla s čistého nebe.

## ÚVOD

Einsteinova práce začíná pozoruhodnou větou: „Je dobře známo, že Maxwellova elektrodynamika – jak je jí dnes obvykle rozuměno – vede při aplikaci na pohybující se tělesa k asymetriím, jež samotné jevy patrně nevykazují.“ V jediné větě je naznačen celý program článku: založení teorie na symetrii, kterou diktují samotné jevy, ale kterou nám zakrývají vžitě předsudky.

Einstein pak uvádí příklad: zasouváme-li magnet do vodivého okruhu nebo nasouváme-li vodivý okruh na magnet se stejnou relativní rychlostí obou předmětů, je výsledek – vznik proudu vyvolaného elektromotorickým napětím – vždy stejný. V prvním případě jej však přispíváme elektrickému poli vzbuzenému změnou magnetického toku plochou ohraničenou vodičem, v druhém případě Lorentzově síle působící na náboje pohybující se s vodičem. Přitom jde vlastně o jedinou situaci popisovanou z hlediska dvou různých vztažných soustav.

Zatímco při dřívějším vztahování Maxwellových rovnic k absolutnímu prostoru by se musel výpočet provádět zvláště pro případy měnícího se pole a pohybujícího se okruhu (a stejný výsledek by nebyl zaručen), při novém pohledu se odpovědnost za vznik proudu v různých vztažných soustavách různě rozděluje mezi elektrické a magnetické pole – v Einsteinově příkladu může být plně připsána jedné příčině v soustavě, v níž je v klidu okruh, a druhé příčině v soustavě, v níž je v klidu magnet. Podstatné je, že stejnost výsledku je předem zaručena nově pochopenou symetrií přírody.

Einstein pak konstatuje, že podobné příklady spolu s neúspěšnými pokusy určit pohyb Země vůči „světlonosnému prostředí“ vedou k předpokladu, který bude v dalším změněn v postulát. Tímto postulátem je princip relativity – naprosté fyzikální rovnoprávnosti vztažných soustav, které jsou rovnoprávné z hlediska mechaniky. Tento princip bude doplněn dalším,

\* novotny@physics.muni.cz

jen zdánlivě s prvním neslučitelným, totiž postulátem o konstantní rychlosti světla ve vakuu. Tím jsou „kostky vrženy“ a opravdu zbytek Einsteinovy práce se v podstatě nezabývá ničím jiným než vyvozením důsledků z obou principů.

## KINEMATICKÁ ČÁST

Einstein rozdělil svou práci na dvě části. První se zabývá obecnými závěry plynoucími z jeho principů, druhá specifickým případem zákonů elektromagnetického pole a jeho působení na náboje.

V první části se Einstein nejprve věnuje pojmu současnosti. Říká, že všechny naše úsudky, v nichž hraje roli čas, jsou úsudky o současných událostech. Místo abychom říkali: „Vlak přijel v sedm hodin“, mohli bychom říci: „Malá ručička mých hodinek ukázala sedm hodin současně s příjezdem vlaku“. Takové určení času ovšem nestačí, jedná-li se o událost, která je od mých hodinek vzdálena a kterou tedy nevidím „okamžitě“. Je proto třeba, abych i na vzdálených místech měl hodiny, které jsou s mými synchronizovány. Na základě svých postulátů Einstein přijímá následující pravidlo synchronizace:

Mějme stejné hodiny v místě A a v místě B. Vyšleme z A v čase  $t_A$  světelný signál, který je odražen v B zpět v čase  $t_B$  a přijat v A v čase  $t'_A$ . Pak hodiny v A a B jdou synchronně, platí-li

$$(1) \quad t_B - t_A = t'_A - t_B.$$

V současných učebnicích teorie relativity je obvykle vztah (1) přeměněn v návod k synchronizaci: v místě B je třeba nastavit hodiny tak, aby okamžiku odrazu signálu odpovídal čas  $t_B$ , který je průměrem časů odeslání a návratu signálu v místě A.

Na první pohled nijak neprovokující pasáž o synchronizaci je pro Einsteinovu práci klíčová – svým pravidlem synchronizace Einstein překonává dříve zmíněný zdánlivý rozpor mezi svými principy. Fyzik věřící v „světlonosný éter“ by uznal Einsteinovo pravidlo pouze ve vztažné soustavě spojené s éterem, protože v jiných soustavách podle něho není rychlost světla ve všech směrech stejná a pravidlo o synchronizaci nedává „skutečný“ čas. Podle Einsteina takovýto čas nadřazený všem vztažným soustavám vůbec neexistuje, každá soustava, v níž platí zákon setrvačnosti, má svou vlastní současnost.

Poznamenejme, že procedura synchronizace vzdálených hodin byla na počátku století diskutována zvláště v souvislosti se zaváděním jednotného času v železniční dopravě [2]. Bylo jasné, že při využití signálů je třeba počítat s jejich konečnou rychlostí. Einsteinovo pravidlo synchronizace má však tu mimořádnou vlastnost, že nevyžaduje měření vzdálenosti mezi hodinami ani znalost hodnoty rychlosti světla. Napadlo někdy Einsteina, jak je to činí perspektivním pro věk kosmických letů?

Po definování synchronizace se Einstein vrací ke svým principům a podává jejich přesnou formulaci. Zopakujme ji:

1. Zákony, podle nichž se mění stavy fyzikálních systémů, nezávisí na tom, ke které ze dvou souřadnicových soustav, jež se vzájemně rovnoměrně a přímočaře pohybují, se tyto změny vztahují.
2. Každý světelný paprsek se v nehybné souřadnicové soustavě pohybuje určitou rychlostí  $c$  nezávisle na tom, zda byl vyslán nehybným či pohybujícím se tělesem.

(Za „nehybnou“ je podle předchozího možno považovat každou soustavu, v níž platí zákon setrvačnosti – podle běžné terminologie, které však Einstein v dané práci neuzivá, inerciální soustavu.)

Zbytek kinematické části práce je věnován „standardní látce“ – z Einsteinových principů se vyvozuje transformace souřadnic a času mezi inerciálními soustavami, které dnes říkáme Lorentzova, kontrakce délek pohybujících se těles, dilatace času na pohybujících se hodinách a

relativistický zákon skládání rychlostí. Čtenář této části práce bude vědět o relativistické kinematice vše, co by měl (buďme optimisty) vědět dnešní středoškolský učitel.

Dodejme jen několik poznámek. Odvození Lorentzovy transformace je v práci poměrně složitá a používá kromě Einsteinových principů předpokladu o linearitě transformace, která by mohla vyplynout z principů. Sám Einstein později podal jednodušší odvození bez tohoto předpokladu [3]. Vztah pro kontrakci délky ve směru pohybu (Einsteinovu symboliku někdy upravujeme podle dnešních zvyklostí)

$$(2) \quad l = \frac{L}{\gamma}, \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

nevyvozuje Einstein pro tyč, ale pro poloosu  $l$  elipsoidu, který je ve své klidové soustavě koulí o poloměru  $L$  a pohybuje se vůči „naší“ soustavě rychlostí  $v$ . V souvislosti s tímto vztahem Einstein poprvé připomíná, že v jeho teorii úlohu nekonečně velké rychlosti přebírá absolutní rychlost světla. I dnes obvyklým způsobem je odvozen dilatační vztah mezi časem na pohybujících se hodinách  $t$  a jejich vlastním časem  $T$

$$(3) \quad t = \gamma \cdot T.$$

Einstein se pak na několika řádcích zabývá problémem, kterému byly později věnovány celé knihy. Podniknou-li hodiny cestu po uzavřené křivce s konstantní rychlostí  $v$ , budou po návratu ukazovat menší čas ve shodě s dilatačním vztahem. Obdobně hodiny umístěné na rovníku půjdou o něco pomaleji než hodiny na pólu otáčející se Země. Mohlo by se zdát, že Einstein se tak „vyhnul“ potížím se zrychlenou fází letu, nezapomínejme však, že i let s konstantní velikostí rychlosti musel být zrychlený, měly-li se hodiny vrátit. Bylo mu tedy zřejmé, že časový údaj hodin je ovlivňován pouze rychlostí, a nikoliv zrychlením.

Vztahy pro skládání rychlostí neodvozuje Einstein, jak je dnes obvyklé, pro složku rychlosti ve směru pohybu soustavy a pro složky k ní kolmé, ale pro složku ve směru pohybu a pro velikost rychlosti. To mu umožňuje okamžitě zjistit, že rychlost světla ve vakuu se Lorentzovou transformací nemění. V závěru kinematické části Einstein upozorňuje na to, že Lorentzovy transformace se společným směrem pohybu soustav (dnes bychom řekli speciální Lorentzovy transformace) tvoří grupu. Pro ocenění tohoto postřehu je třeba si uvědomit, že důležitost pojmu grupy nebyla tehdy ještě ani špičkovým fyzikům zřejmá.

Je užitečné dodat, že „kinematika“ je u Einsteina chápána poněkud odlišně, než jak jsme zvyklí z výkladů Newtonovy mechaniky. Tam kinematika podává prostředky k popisu pohybu částic, těles či kontinuí zcela bez ohledu na to, jakými fyzikálními zákony se pohyb řídí. V teorii relativity se kinematika zabývá takovými závěry o pohybu, které lze vyvodit čistě z relativistické invariance – neměnnosti tvaru fyzikálních zákonů Lorentzovou transformací – bez ohledu na jejich konkrétní tvar. Není proto správné říkat (jak se někdy děje), že relativistická kontrakce či dilatace nemá nic společného se silovým působením. Představme si „zvláštní bytosti“, které natolik trvají na jedině použitelné vztažné soustavě, že si otázku přepisování svých rovnic do jiné soustavy vůbec nekladou, které však dovedou mnohem lépe než my formulovat fyzikální zákony a propočítávat jejich důsledky. Tyto bytosti by i bez znalosti teorie relativity a Lorentzovy transformace dospěly k závěru, že pohybující se tělesa se zkracují a hodiny zpomalují, a to na základě znalosti zákonů interakce mezi jejich elementy (atomy či částicemi). O něco podobného se snažili Einsteinovi současníci, když např. vyvozovali kontrakci délky, potřebnou pro vysvětlení výsledků experimentů, z vlastností elektromagnetických sil. Einsteinova teorie umožňuje učinit tento závěr bez znalosti detailů, čistě na základě dvou principů.

## ELEKTRODYNAMICKÁ ČÁST

Einstein nejprve ukazuje invarianci Maxwellových rovnic ve vakuu vůči Lorentzovým transformacím a vyvozuje transformační zákony pro komponenty elektrické intenzity a magnetické indukce. Poměrně jednoduchý důkaz je zajímavé si pročíst a promyslet už proto, že dnes se v učebnicích obvykle uvádí jen ve čtyřrozměrné formulaci, která samozřejmě úkol podstatně usnadňuje. Einstein ji ovšem ještě k dispozici neměl.

Dále Einstein odvozuje relativistické vzorce pro chování rovinné elektromagnetické vlny (kterou se stává každá vlna vysílaná zdrojem v dostatečné vzdálenosti od něho) v soustavě pozorovatele, který se pohybuje vůči zdroji rychlostí  $v$  pod úhlem  $\varphi$  ke své spojnici se zdrojem. Pak se pro něho změní frekvence  $\nu$  vysílaná zdrojem v jeho vlastní soustavě na

$$(4) \quad \nu' = \nu \cdot \cos \varphi \cdot \frac{\left(1 - \frac{v}{c}\right)}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$$

což pro  $\varphi = 0$  (podélný jev) dává

$$(5) \quad \nu' = \nu \cdot \sqrt{\frac{1 - \frac{v}{c}}{1 + \frac{v}{c}}}.$$

Pro pozorovatele dopadá světlo pod úhlem určeným vztahem

$$(6) \quad \cos \varphi' = \frac{\cos \varphi - \frac{v}{c}}{1 - \frac{v}{c} \cdot \cos \varphi}.$$

Dostáváme tak relativistické vzorce (4), (5) pro Dopplerův jev a (6) pro aberaci světla, které se později ukázaly být velmi důležité z hlediska experimentálního ověření teorie relativity, protože pro velké rychlosti  $v$  se podstatně liší od vzorců nerelativistických (necháváme na čtenáři, aby si je připomněl). Zatímco vzorce pro kontrakci délek a dilataci času byly pro účely vysvětlení experimentů uvažovány již před Einsteinem, relativistické vztahy pro Dopplerův jev a aberaci světla zapsal Einstein nepochybně jako první.

Znalost transformačních vztahů pro komponenty elektromagnetického pole umožňuje Einsteinovi vyvodit také vztah mezi energiemi elektromagnetického záření soustředěného v určitém objemu – „světelného komplexu“ – z hlediska různých vztažných soustav. Považuje za pozoruhodné, že tento vztah je shodný se vztahem pro frekvence (5). (Tato okolnost se ukázala důležitá pro budování kvantové fyziky.) Dále propočítává odraz světelné vlny od ideální zrcadlové roviny v závislosti na jejím pohybu vzhledem k pevně zvolené vztažné soustavě. Určuje tlak, kterým vlna na zrcadlo působí.

Poté se Einstein věnuje tomu, čemu dnes říkáme relativistická dynamika. Vyvozuje pohybové rovnice elektronu v elektromagnetickém poli o intenzitě  $\vec{E}$  a indukci  $\vec{B}$ . Vychází z předpokladu, že v soustavě  $S'$ , v níž je elektron o hmotnosti  $m$  a náboji  $e$  v daném okamžiku



Obr. 2 Albert Einstein počátkem roku 1906

ku v klidu, jsou tyto rovnice  $m \cdot \vec{a}' = e \cdot \vec{E}'$  (Einstein ovšem neužívá vektorové symboliky a rozepisuje rovnice do složek). Přepisem do soustavy  $S$ , v níž se elektron pohybuje, Einstein dostává

$$(7a, b, c) \quad \begin{aligned} m \cdot \gamma^3 \cdot \frac{d^2x}{dt^2} &= e \cdot E_x = e \cdot E'_x, \\ m \cdot \gamma^2 \cdot \frac{d^2y}{dt^2} &= e \cdot \gamma \cdot (E_y - v \cdot B_z) = e \cdot E'_y, \\ m \cdot \gamma^2 \cdot \frac{d^2z}{dt^2} &= e \cdot \gamma \cdot (E_z + v \cdot B_y) = e \cdot E'_z. \end{aligned}$$

Einstein považuje za komponenty síly výrazy na pravé straně rovnic, i když připouští, že by sílu bylo možno definovat i jinak a že proto při srovnávání různých teorií pohybu elektronu je třeba opatrnosti. Chce-li zachovat newtonovskou podobu rovnic „hmotnost krát zrychlení je síla“, dospívá k závěru, že elektron má podélnou hmotnost  $m \cdot \gamma^3$  a příčnou hmotnost  $m \cdot \gamma^2$ . K tomuto postupu byl patrně sveden newtonovskou mechanikou, kde se síla přechodem k jiné inerciální soustavě nemění, protože se nemění ani hmotnost a zrychlení. To však v teorii relativity neplatí. Dnešnímu čtenáři připadne patrně rozumnější považovat za sílu  $e \cdot (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$  a příčná hmotnost pak vyjde  $m \cdot \gamma$ . Tento výraz pro příčnou hmotnost našel již před Einsteinem Lorentz. Jak ukázal později Max Planck, je v teorii relativity vhodné nespojovat sílu působící na pohybující se částici s výrazem  $m \cdot \vec{a}$ , ale s původní newtonovskou definicí síly jako časové změny hybnosti. Jedině potom budou zachovány základní vztahy spojující sílu, hybnost a energii. Definice energie a hybnosti musí být ovšem pozměněna tak, aby se zaručila platnost a relativistická invariance zákonů zachování. Fyzikálně správné relativistické pohybové rovnice částice (včetně elektronu) v silovém poli jsou proto

$$(8) \quad \frac{d\vec{p}}{dt} = \frac{d(m \cdot \gamma \cdot \vec{v})}{dt} = \vec{F}$$

a po provedení derivace a úpravě je lze zapsat jako

$$(9) \quad \gamma \cdot m \cdot \vec{a} = \vec{F} - (\vec{F} \cdot \vec{v}) \cdot \frac{\vec{v}}{c^2}.$$

Pro komponentu rovnice ve směru síly ( $\vec{F} \cdot \vec{v} = F \cdot v$ ) tak dostáváme první z Einsteinových rovnic (7a) po vynásobení  $\gamma^2$ , zatímco pro komponenty ve směru kolmém ( $\vec{F} \cdot \vec{v} = 0$ ) dostaneme Einsteinovy rovnice (7b, c) po vynásobení  $\gamma$ . Einstein tedy sice sestavil formálně platné pohybové rovnice, ale ve fyzikálně málo průhledném tvaru (a navíc použitelné jen v soustavě, kde je okamžitá rychlost částice rovnoběžná s osou  $x$ , což nedovoluje studovat obecné pohyby).

To mu nezabránilo vyvodit správné dynamické závěry o pohybu. Především správně určil kinetickou energii elektronu jako dráhový integrál síly, protože při pohybu ve směru síly se Einsteinův výraz pro sílu neliší od Planckova (srv. 7a). Protože výsledek nezávisí na elektrickém náboji elektronu, jde o kinetickou energii libovolné částice

$$(10) \quad W = \int e \cdot E \cdot dx = \int m \cdot a \cdot \gamma^3 \cdot dx = \int_0^v m \cdot \gamma^3 \cdot v \cdot dv = m \cdot c^2 \cdot (\gamma - 1).$$

Poučený čtenář zde již může vidět náznak slavného vztahu mezi hmotností a energií – vždyť odečítaný člen je klidová energie částice! V této chvíli to však ještě mnoho neznamená, protože není patrné, že by se klidová hmotnost mohla měnit. Důležitý doplněk k teorii relativity přináší až další Einsteinova práce *Závisí setrvačnost tělesa na energii v něm obsažené?* [4], která byla

přijata do tisku v *Annalen* 27. září 1905. Na pouhých dvou stránkách a s jednoduchou matematikou tu Einstein uvažuje o tělese, které vypouští v opačných směrech dvě stejné porce elektromagnetické energie, takže zůstává ve své původní klidové soustavě i po emisi. Ze vztahů pro transformaci energie záření a zákona zachování energie plyne, že v jiné vztažné soustavě těleso mění svou kinetickou energii, a protože jeho rychlost zůstává nezměněna, musí se měnit jeho hmotnost. Byla-li tedy celková emitovaná energie v klidové soustavě tělesa  $L$ , činí rozdíl kinetických energií v pohybující se soustavě před emisí a po emisi

$$(11) \quad \Delta W = L \cdot (\gamma - 1)$$

a z porovnání s (10) plyne závěr, který Einstein vyjadřuje takto: „vydává-li těleso energii  $L$  v podobě záření, mění se jeho hmotnost o  $\frac{L}{c^2}$  [...] hmotnost tělesa je mírou jeho energetického obsahu“.

Čtenář si již jistě povšiml, že Einstein označuje jako  $m$  klidovou hmotnost částice či tělesa, kterou nemá zapotřebí odlišovat indexem či přívlástkem „klidová“, protože pro „podélnou“ a „příčnou“ hmotnost nezavádí zvláštní symboly ani jich šířeji nevyužívá. (Tyto pojmy byly brzy zcela opuštěny, protože označují pouze koeficienty mezi silou a zrychlením ve směru pohybu a ve směru na pohyb kolmém, které používání rovnic (8) a (9) zbavuje významu.) Později se hlavně pod vlivem knihy Wolfganga Pauliho [5] z roku 1921 stalo běžným označovat klidovou hmotnost jako  $m_0$  a zavádět kromě ní ještě „relativistickou“ hmotnost  $\gamma \cdot m_0$  (rovinnou někdejší hmotnosti příčné), která se pak nazývá prostě hmotností a označuje se jako  $m$  bez indexu. V posledních desetiletích však zejména částicovní fyzici mají tendenci vracet se k původní Einsteinově terminologii a označení, takže „nejslavnější vzorec fyziky“  $\mathcal{E} = m \cdot c^2$  se u nich zapíše jako  $\mathcal{E} = \gamma \cdot m \cdot c^2$  a navíc ztrácí svou slávu, protože ekvivalenci (klidové) energie a hmotnosti vyjadřuje vzorec  $\mathcal{E}_0 = m \cdot c^2$ . Jakou hmotnost měl na mysli Einstein, který svůj poznatek vyjádřil jen slovy?

Za nejlepší odpověď (kterou nechci čtenářům vnucovat) bych považoval toto: Einstein ukázal, že změna klidové energie tělesa je doprovázena změnou jeho klidové hmotnosti. V klidové energii tělesa jsou ovšem zahrnuty i kinetické energie kmitavých a otáčivých pohybů jeho součástí, což znamená, že přispívají i ke klidové hmotnosti tělesa. Mezi klidovou a kinetickou energií tedy není žádná absolutní hranice a nelze proto mít zásadní námitky proti rozšíření ekvivalence klidové energie a (klidové) hmotnosti na ekvivalenci energie a hmotnosti vůbec. Pak je ovšem třeba chápat hmotnost jako relativistickou hmotnost  $\frac{\mathcal{E}}{c^2}$ .

Fyzikové mikrosvěta mají právo relativistické hmotnosti neužívat, což znamená, že mírou setrvačnosti a zdrojem gravitace pro ně není hmotnost, ale energie. „Hmotnost“ je pro ně zkrácený a tradicí posvěcený termín pro klidovou energii mikročástic.

Einstein končí svou základní práci třemi závěry o relativistickém pohybu elektronů, které mohou být podle jeho názoru experimentálně prověřeny. Poslední z nich je, že v homogenním magnetickém poli o indukci  $B$  se elektrony o rychlosti  $v$  pohybují po kružnicích o poloměrech

$$R = \frac{\gamma \cdot m \cdot v}{e \cdot B}. \text{ I když se Einstein při odvození svých závěrů odvolává na rovnice (7), nežívá}$$

své definice síly a její nevhodnost proto neohrožuje správnost výsledku.

Na konci Einsteinovy práce nás ještě zaujme poděkování příteli a kolegovi M. Besso, který byl „věrným pomocníkem při rozpracování zde vyložených problémů“, a naprostá nepřítomnost odkazů na literaturu. Nedostatek citací nemůžeme posuzovat z dnešní až extrémní „korektnosti“ v tomto směru, kdy lze často právem pochybovat, zda autor stačil všechny citované práce vůbec přečíst, natož prostudovat. Ovšem i ve srovnání se současníky Einstein citacemi

neplýtvat. Ve svých čistě odborných pracích si kladl za cíl rozřešit problém a nezabýval se obvykle podrobněji jeho historií a dřívějšími neuspokojivými pokusy o řešení. Svědomitě však citoval jiné autory tam, kde od nich skutečně převzal výsledek, který nebyl obecně známý. V případě zde rozebírané práce patrně necítil potřebu odvolávat se na jiné – důvěra v princip relativity u něho nevyplývala z neúspěchu pokusů o zjištění absolutního pohybu, ale z elementárního citu pro symetrii, a jeho cílem bylo ukázat, že dva principy postačí k odstranění všech potíží, na něž jeho současníci naráželi.

V letošním roce jsme mohli vícekrát číst úvahy o tom, zda na vzniku speciální relativity či dokonce všech článků z roku 1905 měla významný, ne-li dokonce hlavní podíl Einsteinova manželka Mileva [6]. Nemyslím však, že pro takový názor existují závažné důvody. Je pravda, že v dopisech Milevě (ovšem z období o několik let předcházejícího vzniku teorie relativity) Einstein někdy psal o jejich společné práci. Na zrání jeho myšlenek se Mileva nepochybně podílela diskusemi, kritickým čtením a kontrolou výpočtů. Z její korespondence však není patrné, že by přicházela se samostatnými tvůrčími myšlenkami. Einstein publikoval řadu prací se spoluautory – poslední byla mladá žena Bruria Kaufmannová – a vícekrát vyjádřil svou vděčnost lidem, z jejichž práce či znalostí těžil. Těžko pochopit, proč by v tomto směru zanedbal svou ženu. Nemám proto důvod nevěřit, že jediným, kdo opravdu významně pomohl zrodu teorie relativity v Einsteinově hlavě, byl Michele Besso.

### RELATIVITA A RELATIVISTÉ

Mediální obraz Alberta Einsteina jako hvězdy spadlé s nebe ovšem realitě zcela neodpovídá. Jeho problémem se s nezanedbatelnými výsledky zabývali i další fyzikové. Problém privilegovanosti či rovnoprávnosti vztažných soustav se táhne celými dějinami fyziky. V druhé půli 19. století dochází k zvláštnímu obratu – Maxwelllova teorie elektromagnetického pole zdánlivě rozhodně svědčí o existenci privilegované soustavy spojené se „světovým éterem“, vzhledem k níž by mělo být možné určit pohyb. Tyto pokusy, o něž se zvláště zasloužil Michelson a Morley, však nedávají očekávané výsledky. První kroky k relativitě prošlapávají lidé, kteří se spíše snaží vysvětlit, proč se éter nedaří najít, než aby přijali za své východisko jeho neexistenci. Z Einsteinových „souputníků“ a „navazovatelů“ je třeba jmenovat alespoň pět osobností [7].



Obr. 3 Joseph Larmor

Britský fyzik Joseph Larmor (1857–1942) v knize *Éter a látka* [8] našel transformaci, která podle jeho názoru přirozeněji spojovala klidovou a pohybující se (vůči éteru) vztažnou soustavu. Byla to též transformace, které dnes říkáme Lorentzova. Larmor také dospěl k řadě poznatků, které později dobře zapadly do rámce teorie relativity.

Holandan Hendrik Antoon Lorentz (1853–1928) se zabýval problémem éteru po desítky let. Transformaci nazývanou jeho jménem odvodil 1904 [9] a užíval ji ke zdůvodnění neúspěchu pokusů o objevení pohybu vůči éteru.

Zhruba zároveň s irským fyzikem FitzGeraldem zavedl předpoklad o kontrakci délek a uvažoval i o dilataci času. Nedospěl však k názoru, že éter je třeba zcela zavrhnout a i po vzniku speciální teorie relativity trval na tom, že jeho teorie není identická s Einsteinovou.

Francouz Jules Henri Poincaré (1854–1912) připouštěl již před Einsteinem relativitu času a předvídal vznik nové fyziky s limitní rychlostí světla. V červnu 1905 publikoval krátce před odesláním



Obr. 4 Hendrik Antoon Lorentz



Obr. 5 Jules Henri Poincaré

Einsteinovy práce do Análů článek *O dynamice elektronu* [10], jehož podstatně rozšířená verze vyšla v následujícím roce. Vycházel v něm z předpokladu, že všechny fyzikální zákony jsou invariantní vůči Lorentzově transformaci (pro niž zavedl tento název), a ukázal, že správně pochopené Maxwellovy rovnice tuto vlastnost mají. Objevil, že Lorentzovy transformace spojují soustavy souřadnic v čtyřrozměrném prostoru.

Max Karl Ernst Ludwig Planck (1858–1947) prosazoval pro Einsteinovu teorii termíny „princip relativity“ a „teorie relativity“, kterých začal později užívat i Einstein. Roku 1906 Planck

zdokonalil relativistickou formulaci dynamiky [11]. (Je kuriózní, že v úvodu své publikace se za to téměř omlouvá, protože se domnívá, že Kaufmannovy experimenty s chováním elektronů v elektromagnetickém poli princip relativity zpochybnily. Kaufmann se těmito experimenty snažil rozhodnout mezi Einsteinovou teorií a alternativními teoriemi Lorentze, Abrahama a Bucherera. Samotný Bucherer podobnými experimenty roku 1908 posílil pozici teorie relativity [12], určitá nejistota však trvala ještě po řadu let. Einstein se tím nenechal vyvést z míry a byl přesvědčen, že alternativní teorie jsou příliš umělé, než aby mohly platit v přírodě.



Obr. 6 Max Karl Ernst Ludwig Planck



Obr. 7 Hermann Minkowski

Německý matematik Hermann Minkowski (1854–1912), který kdysi učil Einsteina na curyšské polytechnice, výstižně popsal geometrii čtyřrozměrného prostoročasu a ukázal, že teorie relativity je teorií fyzikálních jevů v tomto prostoročase [13]. Zapsal ve čtyřrozměrném tvaru všechny základní vztahy teorie relativity včetně Maxwellových rovnic. Einstein využil objevu Minkowského k dalšímu zobecnění, kterým byla obecná teorie relativity jako teorie zakřiveného prostoročasu.

Není příliš jasné, co Einstein znal z prací svých předchůdců. V době, kdy se o to historikové vědy začali zajímat, si to již patrně ani přesně nepamatoval. Jeho přístup k problému byl originální a svou fyzikální hloubkou a průhledností zapůsobil tak, že byl téměř jednohlasně uznán za hlavního, ne-li jediného tvůrce teorie relativity. Přispěla k tomu i jeho mimořádná snaha zpřístupnit teorii relativity svým kolegům fyzikům a širší veřejnosti. Poněkud přehlédnuty zůstaly zásluhy Poincarého, na něž po jeho smrti upozornil Lorentz [14]. Zajímavý a dosti záhadný je vztah Einsteina a Poincarého: ačkoliv se o sobě vzájemně vyslovovali s úctou, ani jeden z nich se nevyjádřil k práci druhého na poli teorie relativity (resp. Einstein jmenoval Poincarého jako průkopníka relativistických idejí až na sklonku života v dopise Maxu Bornovi).

I když tradičně mluvíme o „teorii relativity“, jde o něco víc než o jednu z teorií nějakého konkrétního okruhu fyzikálních jevů. Spíše bychom mohli mluvit o „paradigmatu“ v duchu filozofa Thomase Kuhna [15]: teorie relativity podala obecné schéma, do něhož by měly být uloženy teorie všech fyzikálních jevů, a vytýčila program naplňování tohoto úkolu. Brzy se mělo ukázat, že gravitační jevy do tohoto schématu nezapadnou a že je třeba formulovat nadřazené paradigma obecné teorie relativity. Speciální teorie relativity – fyzika v plochem prostoročase bez gravitačních jevů – tím neztratila svůj smysl limitního případu, do jehož rámce bylo třeba vložit celou negravitační fyziku – např. hydrodynamiku, elektrodynamiku látkového prostředí, termodynamiku a statistickou fyziku. Tímto problémem se již Einstein příliš ne-



zabýval a přenechal jej svým následovníkům, kteří se s ním úspěšně vyrovnali, i když některé otázky jsou dosud otevřeny. Ještě náročnějším úkolem bylo spojení speciálně relativistického a kvantového paradigmatu, jež vyústilo ve vznik kvantové elektrodynamiky, teorie elektroslabých interakcí a standardního modelu elementárních částic. Přes velké úspěchy experimentálního rázu naráží toto sjednocování fyziky na vážné obtíže principiální povahy (velké množství nevysvětlených a vzájemně nesouvisajících parametrů ve standardním modelu, nekonečné hodnoty některých fyzikálních veličin, kterých se lze zbavit jen za cenu ne zcela korektních matematických operací aj.). Přinese řešení těchto problémů zahrnutí gravitace [16]?

## LITERATURA

---

- [1] Einstein A.: *Zur Elektrodynamik bewegter Körper*. Annalen der Physik **17** (1905) 891. Německou verzi článku lze najít na <<http://www.physics.utoledo.edu/~ljc/speciaal.html>>, anglickou na <<http://www.fourmilab.ch/etexts/einstein/specrel/specrel.pdf>>. Všechny zde citované články klasiků jsou obsaženy v ruštině ve sborníku Tjapkin A. A.(ed.): *Princip otnositel'nosti*. Moskva, Atomizdat 1973.
- [2] Galison P.: *Einsteinovy hodiny a Poincarého mapy*. Mladá Fronta, Praha 2005.
- [3] Einstein A.: *Teorie relativity*. VUT v Brně/VUTIUUM, Brno 2005.
- [4] Einstein A.: *Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?*, Annalen der Physik **18** (1905) 639.
- [5] Pauli W.: *Relativitätstheorie*. Enzyklopädie der Mathematischen Wissenschaften V2, **IV** (1921).
- [6] Viz např. Kraus I.: *Mileva Maričová-Einsteinová*. Československý časopis pro fyziku **55** (2005) 271 nebo Martínez A.: *Arguing about Einstein's wife*. <<http://physicsweb.org/articles/world/17/4/2/1>>.
- [7] <<http://www-groups.dcs.st-and.ac.uk/~history/Mathematicians/Larmor.html>>. Po záměně jména se dostaneme k medailonkům dalších osobností uvedených v našem článku.
- [8] Larmor J.: *Aether and Matter*. Cambridge University Press 1900.
- [9] Lorentz H. A.: *Electromagnetic phenomena in a system moving with any velocity smaller than that of light*. Proceedings of the Academy of Sciences of Amsterdam **6** (1904) 809.
- [10] Poincaré H.: *Sur la dynamique de l'électron*. Comptes Rendues Académie des Sciences **140** (1905) 1504. Delší stejnojmenný článek je v Rendiconti del Circolo Matematico di Palermo **XXI** (1906) 129.
- [11] Planck M.: *Das Relativitätsprinzip und Grundgleichungen der Mechanik*. Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft (1906) 136.
- [12] Fölsing A.: *Albert Einstein*. Volvox Globator, Praha 2001.
- [13] Minkowski H.: *Raum und Zeit*. Physikalische Zeitschrift **10** (1909) 104.
- [14] Lorentz H. A.: *Deux mémoires de Henri Poincaré sur la physique mathématique*. Acta Mathematica **38** (1914) 293.
- [15] Kuhn T.: *Struktura vědeckých revolucí*. Oikoymenh, Praha 1997.
- [16] Viz např. Kaku M.: *Einsteinův vesmír*. Dokořán, Argo, Praha 2005.

Děkuji Mgr. Janě Jurmanové, Ph.D. z katedry obecné fyziky PřF MU v Brně za diskuse a připomínky, které vedly ke zlepšení článku.