Josef Fuka

Základní poznatky speciální teorie relativity ve vyučování fyzice na středních školách

Acta Universitatis Palackianae Olomucensis. Facultas Rerum Naturalium. Mathematica-Physica-Chemica, Vol. 12 (1972), No. 1, 91--111

Persistent URL: http://dml.cz/dmlcz/119972

1972 — ACTA UNIVERSITATIS PALACKIANAE OLOMUCENSIS
FACULTAS RERUM NATURALIUM — TOM 37

Katedra experimentální fyziky a metodiky fyziky přírodovědecké fakulty University Palackého v Olomouci
Vedoucí katedry: Prof. dr. Josef Fuka

ZÁKLADNÍ POZNATKY SPECIÁLNÍ TEORIE RELATIVITY VE VYUČOVÁNÍ FYZICE NA STŘEDNÍCH ŠKOLÁCH

JOSEF FUKA

(Předloženo dne 30. června 1971)

Obsah

Studie se zabývá problematikou vyučování základních poznatků speciální teorie relativity ve fyzice na středních školách. Práce je rozdělena do dvou částí. V první části jsou diskutovány důvody pro zavedení teorie relativity do vyučování fyzice na střední škole a otázka struktury a pojetí, kdežto v druhé části je proveden rozbor konkrétního obsahu, který byl podroben výzkumu na experimentální střední škole v Olomouci-Hejčíně. Tato část je rozdělena do čtyř kapitol: v první je proveden rozbor úvodních témat speciální teorie relativity, v druhé se diskutuje Lorentzova transformace, v třetí je pojednáno o relativistické kinematice a ve čtvrté o relativistické dynamice. Přitom byl ve výzkumném vyučování zvolen postup, založený na výkladu Michelsonova pokusu, Lorentzovy transformace a tzv. důsledků této transformace.

A. K PROBLEMATICE VYUČOVÁNÍ SPECIÁLNÍ TEORIE RELATIVITY NA STŘEDNÍCH ŠKOLÁCH

Ve všech kulturně a technicky vyspělých státech světa se v současné době řeší problematika modernizace vyučování vůbec a fyzice zvlášť.

Pod tímto pojmem rozumíme hlubokou strukturální změnu obsahu středoškolské fyziky, změnu pojetí kursu a s tím nezbytně související adekvátní změny vyučovacích metod a vyučovacích prostředků. Modernizační snahy byly vyvolány úsilím po zvýšení efektivity vyučování fyzice a zájmu žáků o fyziku. Je známo, že mládež má velký zájem o přírodu a techniku, ale působením školy se často tento zájem spíše zmenšuje, než aby rostl. Je to způsobeno mezi jiným především tím, že obsah středoškolské fyziky je málo atraktivní, vyučovací metody málo účinné a vyučovací prostředky často zastaralé.

Problematika modernizace vyučování fyzice je v popředí zájmu všech didaktiků fyziky a předních učitelů v praxi. Byly už konstruovány nové modely středoškolské fyziky, kde se uvádějí především některé partie moderní fyziky, zejména speciální teorie relativity a kvantová fyzika. Je nutné zdůraznit, že moderní fyzika zkoumá jevy v mikrosvětě a v megasvětě, kdežto klasická fyzika zkoumá malou oblast přírodních jevů, s nimiž se denně setkáváme, tj. zkoumá makrosvět. A právě tato fyzika se na našich středních školách, ale i všude v zahraničí, až dosud výlučně traduje přes to, že např. základní myšlenky fyziky relativistické jsou známy už takřka sedmdesát let. Přitom obraz skutečnosti, jaký nám předkládá klasická fyzika 19. stol., je velice nedokonalý. Představy o světě kolem nás podstatně zpřesňuje a zdokonaluje teorie relativity. Snad by proto bylo správné seznámit žáky středních škol se základními poznatky aspoň speciální teorie relativity. Je tedy nutné nejdříve rozhodnout otázku, zda vůbec teorii relativity zavést do vyučování fyzice na středních školách. V kladném případě pak bude nutné uvážit obsah a rozsah poznatků, které by se měly zařadit do kursu, dále jejich metodické zpracování a uspořádání.

Otázka zavedení speciální teorie relativity do kursu středoškolské fyziky není jednoduchá. Chceme-li ji aspoň částečně zodpovědět, pak je třeba se zamyslet nad důvody, které by bylo možné uvést k podpoře této otázky. Důvody pro to lze shrnout stručně do těchto bodů:

1. Speciální teorie relativity může žákům poskytnout hlubší a úplnější pohled na okolní svět. Je nutné zde zdůraznit, že neexistuje ani jediný fyzikální jev v přírodě (dosud známý), který by byl v rozporu se zákony teorie relativity. Tato skutečnost však, jak známo, neplatí ve fyzice klasické. Při správně vedeném výkladu by mohli žáci pochopit, že tato teorie je vyšším stupněm poznání, že tedy klasická fyzika je méně dokonalým modelem skutečnosti, modelem, který však není ani nesprávný, ani nevědecký, ale vyjadřuje skutečnost jen přibližně a méně dokonale. Žáci naopak pochopí, že teorie relativity je dokonalejším modelem, vyšším stupněm poznání přírody a jejích zákonitostí. Při vyučování se žáci seznamují převážně s fyzikou klasickou, bez níž by nepochopili základní poznatky fyziky moderní. Právě tyto poznatky dotvářejí jejich fyzikální poznání skutečnosti. Tak může teorie relativity s poznatky klasické fyziky a spolu s některými dalšími principy, zejména základními myšlenkami teorie kvantové, vytvořit pro středoškolské studenty základ fyzikálního obrazu světa. Zavedením teorie relativity do středoškolské fyziky se tedy zvýší vědecká úroveň tohoto kursu.

2. Zavedení teorie relativity do kursu středoškolské fyziky by mohlo podstatně přispět k rozvoji fyzikálního myšlení žáků, neboť dává bohatou příležitost k diskusím o mezích použitelnosti fyzikálních zákonů klasické fyziky, ukazuje souvislost mezi zákony klasické fyziky a zákony moderní fyziky a poskytuje možnost diskusí o podmínkách platnosti zákonů klasické fyziky. Zvláště poučné jsou pro žáky úvahy, kterými se demonstruje, že zákony klasické fyziky jsou často limitním případem obecnějších zákonů.

3. Zavedení teorie relativity bude mít také jistě vliv na větší používání myšlenkového pokusu při vyučování fyzice, což opět může kladně ovlivnit rozvíjení fyzikálního myšlení žáků.

4. Bez znalosti základních poznatků z teorie relativity nelze pochopit základní myšlenky kvantové teorie, fyziky atomového obalu a fyziky atomového jádra.

5. Teorie relativity má zásadní význam pro hlubší pochopení základních fyzikálních pojmů, jako jsou např. hmotnost, prostor, čas, současnost apod.

6. Teorie relativity má těsné vztahy k filosofii, a proto také může podstatně přispět k vytváření vědeckého světového názoru žáků, může žákům ukázat cestu k správnému chápání materialistické filosofie a k zamítnutí filosofie idealistické.

7. Velký výchovný význam má i sama osobnost tvůrce teorie relativity Alberta Einsteina.

Velmi důležitá je také otázka, v jakém uspořádání a kam zařadit poznatky z teorie relativity v kursu fyziky na střední škole. Při řešení této otázky je nutné vycházet z celkové koncepce předmětu fyzika. Jsou v zásadě dvě možnosti řešení. Buď lze zařadit poznatky z teorie relativity jako celek na určité místo kursu, nebo je možné se zmiňovat o jednotlivých poznatcích této teorie na vhodných místech kursu. Např. už v mechanice při formulaci druhého pohybového zákona Newtonova lze poukázat na omezenou jeho platnost v případě velkých rychlostí, srovnatelných s rychlostí šíření světla ve vakuu. Při této příležitosti lze poukázat na závislost hmotnosti na rychlosti, zavést klidovou hmotnost apod. V každém případě je nutné zavést v mechanice pojem vztažné soustavy, vyšetřovat různé děje v inerciálních vztažných soustavách a diskutovat podrobněji mechanický princip relativity. V nauce o vlnění je třeba vyšetřovat Dopplerův jev v různých inerciálních soustavách, v elektrodynamice lze vyšetřovat závislost hmotnosti elektronu při jeho pohybu na rychlosti a diskutovat už podrobněji Einsteinův vztah pro hmotnost. V optice je možné při probírání měření rychlosti šíření světla poukázat na Michelsonův pokus a zdůraznit, že jeho výsledek, jakož i výsledky astronomických pozorování (spektra dvojhvězd) vedou k principu konstantní rychlosti světla ve vakuu. Podobně ve fyzice atomového obalu a atomového jádra se uplatní dilatace času, závislost hmotnosti na rychlosti částice a souvislost hmotnosti a celkové energie částice. V astronomii lze probrat tři známé efekty plynoucí z obecné teorie relativity, tj. stáčení perihelu Merkura, odchylování světelných svazků v gravitačním poli hvězd a popřípadě i rudý posuv spekter atomů v silném gravitačním poli. Je však třeba zdůraznit, že i kdyby se základní poznatky speciální teorie relativity podávaly výše uvedeným způsobem, bylo by nutné v závěru vyučování fyzice shrnout tyto poznatky v ucelenou teorii.

Druhá možnost probírání teorie relativity na střední škole spočívá v tom, že by se poznatky této teorie podaly souhrnně na určitém místě kursu. Přitom jsou různé možnosti umístění; často jsou základní poznatky teorie relativity uvedeny až v samém závěru kursu. Při provádění výzkumu na experimentální střední škole se ukázalo jako nejvhodnější umístit teorii relativity po probrání vlnové optiky. Kvantová optika by se měla probírat až v souvislosti s probíráním poznatků o dualismu vlna – částice. Otázka umístění teorie relativity v kursu fyziky na střední škole se musí řešit v souvislosti s vypracováním celkové koncepce a pojetí tohoto kursu.

Velmi významnou je také otázka rozsahu poznatků z teorie relativity, které by měly být zařazeny do kursu středoškolské fyziky, avšak mnohem významnější jsou otázky koncepce, pojetí a metodického zpracování poznatků ze speciální teorie relativity pro potřeby vyučování na střední škole. Zatím se ještě nikde nepodařilo rozpracovat metodiku výkladu tak, aby vynikla co nejvíce stránka fyzikální a aby stránka matematická ustoupila do pozadí.

Ve výzkumu, který byl prováděn na experimentální střední škole v Olomouci-Hejčíně byl zvolen postup, založený na výkladu Michelsonova pokusu, Lorentzově transformaci a tzv. důsledků této transformace. Tento postup totiž umožňuje ekonomický a přehledný výklad základních poznatků speciální teorie relativity. Přitom byla v pokusu věnována náležitá pozornost relativitě v klasické fyzice.

V prvním pokusu, který byl prováděn ve škol. roce 1968/69, se zkoumal zkušební text s označením „Teorie relativity“. Celková koncepce je patrna z obsahu. Text byl rozdělen na dvě části: A. Mechanický princip relativity, B. Einsteinova relativita. V první části byly tři články: 1. Relativnost pohybu, 2. Inerciální vztažné soustavy, 3. Mechanický princip relativity. V druhé části bylo sedm článků: 4. Pojem éteru, 5. Michelsonův pokus, 6. Einsteinův princip relativity,

7. Jev dilatace času, 8. Kontrakce délek, 9. Einsteinův vztah pro hmotnost, 10. Souvislost hmotnosti a energie.

Z uvedeného pokusu vyplynulo, že žáci mají o problematiku speciální teorie relativity velký zájem a že lze volit ještě náročnější text. Proto byl uvedený text přepracován na základě získaných zkušeností a je nyní připraven k výzkumu. Je označen „Základní poznatky speciální teorie relativity" a byl rovněž rozdělen do dvou částí: A. Mechanický princip relativity, B. Einsteinova teorie relativity. V první části je po úvodu uvedena jedna kapitola rozdělená do tří článků: 1. Relativnost polohy a pohybu, 2. Mechanický princip relativity, 3. Galileiova transformace. V druhé části je po úvodu zařazeno sedm kapitol: 2. Michelsonův pokus, 3. Einsteinovy postuláty, 4. Lorentzova transformace, 5. Relativnost současnosti, 6. Relativistická kinematika (relativnost délky, relativnost časových intervalů, relativistické skládání rychlostí, Dopplerův jev v teorii relativity), 7. Relativistická dynamika (Einsteinův vztah pro hmotnost, souvislost hmotnosti a energie, vztah mezi energií a impulsem), 8. Síly působící mezi vzájemně se pohybujícími elektrickými náboji. V závěru je ještě uveden článek o Albertu Einsteinovi. Uvedená koncepce byla zkoumána na SPŠ v Olomouci, avšak jen částečně. Na gymnasiu proběhne výzkum až v roce 1971/72. Je nutné zdůraznit, že i tato koncepce není definitivní, ale jen zkušební, a že bude po získaných zkušenostech z vyučování dále upravována. Na základě dosud získaných zkušeností byl dále připraven text, který je zařazen do tzv. Doplňků k učivu fyziky ve 4. roč. gymnasia. Avšak ani tento text nelze považovat za nejvhodnější variantu.

Je nutné zdůraznit, že všechny dosud připravené texty jsou zkušební. Ve výzkumu se bude dále pokračovat. V současné době se připravuje pro výzkum nové pojetí, které by se zakládalo více na některých myšlenkových pokusech než na matematických formulacích. Rozborem takových pokusů, např. pokusu ukazujícího relativnost současnosti dvou událostí nebo pokusu se světelnými hodinami apod. bude patrně možné najít vhodnější cestu k pochopení fyzikální podstaty relativistických jevů. Z takových úvah bude nakonec i možné odvodit všechny potřebné vztahy relativistické kinematiky. Text uvedeného rázu bude pak po provedeném výzkumu upraven a zařazen do nové učebnice fyziky pro 4. roč. gymnasia.

V závěru těchto úvah je třeba připomenout, že ani v zahraničí nebylo zatím nalezeno vyhovující metodické zpracování speciální teorie relativity pro potřeby středoškolského kursu fyziky. Přesto však je teorie relativity zařazována do osnov a učebnic pro střední školy v zahraničí i u nás. Tak je tomu i v jiných partiích moderní fyziky. Chybí např. metodické zpracování vlnově mechanického modelu atomu.

B. ZÁKLADNÍ POZNATKY SPECIÁLNÍ TEORIE RELATIVITY

V této části naznačíme strukturu učiva o speciální teorii relativity, které bylo podrobeno výzkumu na experimentální střední škole v Olomouci-Hejčíně.

1. K úvodním tématům speciální teorie relativity ve vyučování fyzice na střední škole

Úvod

Teorie relativity je velmi důležitým oborem moderní fyziky. Až do konce 19. století zkoumala fyzika převážně děje v makrokosmu, které probíhají malými rychlostmi ve srování s rychlostí světla ve vakuu, a děje o malých frekvencích. Tato fyzika se označuje jako klasická. Spočívala především na pracích Galileiových, který je zakladatelem experimentální fyziky, na zákonech Newtonových, který je tvůrcem matematické fyziky, na teorii elektromagnetického pole, vybudované J. C. Maxwellem, a konečně i na statistické fyzice Maxwell-Boltzmannově a elektronové teorii Lorentzově.

Klasická fyzika se koncem 19. století a na počátku 20. století považovala za uzavřenou vědu. Přesto zde byly dvě otázky nedořešené: problém éteru a tzv. ultrafialová katastrofa. První vedla k teorii relativity (A. Einstein 1905), druhá k teorii kvantové (M. Planck 1900). Klasická fyzika byla dovršena a uzavřena Einsteinovou speciální teorií relativity. Dnes se pod pojmem klasická fyzika rozumí veškerá fyzika nekvantová.

Teorie relativity způsobila přímo revoluční změny v pojetí základních fyzikálních pojmů: prostoru, hmotnosti a času. Tato teorie zasáhla hluboce do všech oblastí fyziky, zejména do atomistiky.

K teorii relativity vedl na počátku 20. století nezdar delšího úsilí fyziků zjistit absolutní pohyb naší Země.

Newton zavedl ve své mechanice pojem absolutního prostoru a absolutního času a k nim vztahoval všechny pohyby, jež pak lze označit jako absolutní. Je ovšem otázka, jak tento absolutní pohyb zjistíme. Pohyby, jak je kolem sebe pozorujeme a jak je popisujeme, jsou vesměs pohyby relativní, vztažené k jiným tělesům, jež přitom považujeme za klidná. Je otázka, o která tělesa ve vesmíru se lze opřít jako o absolutně klidná.

V minulém století se fyzikové domnívali, že by oním naprosto klidným a nepohyblivým tělesem (systémem) mohl být tzv. éter, hypotetické prostředí, které bylo považováno za nositele elektromagnetického vlnění a jež by vyplňovalo celý vesmír. O éteru se fyzikové domnívali, že je jako celek ve vesmíru v klidu, neboť kdyby se pohyboval určitým směrem, pak by se musel na jedné straně vesmíru trvale zhušťovat a na druhé neustále zřeďovat. Kdybychom tedy zjistili pohyb tělesa vzhledem k nehybnému éteru, stanovili bychom tím zároveň absolutní pohyb tělesa. A tak vznikla snaha fyziků a astronomů, zjistit především absolutní pohyb naší Země. Fyzikům však bylo již od dob Galileiových známo, že absolutní pohyb Země nelze zjistit žádnými ději mechanickými. Vznikla proto otázka, zda by jej nebylo možné zjistit z jiných dějů než mechanických, např. z dějů optických.

Šlo tedy o to zjistit, má-li či nemá-li pohyb Země kolem Slunce nějaký vliv na světelné děje, na ní probíhající.

První, kdo se pokusil dokázat vliv pohybu Země na optické děje (na lom světla v hranolu), byl Arago. Ale očekávaná změna se neukázala, a to ani v pozdější úpravě Maxwellově, který nahradil světlo hvězdy světlem z pozemského zdroje. Později provedený rozbor však ukázal, proč nebyly pozorovány žádné změny; vliv pohybu Země je velmi nepatrný, neboť lze očekávat změny v optických měřeních jen v poměru $\frac{v}{c} = \frac{30}{300\,000} = 0{,}0001$, kde $v = 30$ km/s je rychlost Země při jejím oběhu kolem Slunce. Mimoto H. A. Lorentz dokázal (1895) ze své elektronové teorie, že tyto změny prvního řádu se vždy navzájem ruší a že se mohou projevovat jen daleko menší změny druhého řádu, tj. změny dané podílem $\left(\frac{v}{c}\right)^2$. Přesnost Aragova pokusu i všech pozdějších podobných pokusů však zdaleka nedovolovala zjišťovat změny tak nepatrné.

První pokus, při kterém šlo o měření veličin druhého řádu, byl proslulý interferenční pokus (obr. 2), provedený r. 1881 A. A. MICHELSONEM a opakovaný ve zdokonalené úpravě r. 1887 Michelsonem ve spolupráci s EDWARDEM WILLIAMEM MORLEYEM v Clevelandu.

Avšak k velkému překvapení skončil pokus (a i další pokusy podobného druhu) zcela záporně; nezjistila se sebemenší změna interferenčního jevu, která měla nastat při otočení přístroje o 90° (str. 98).

Neřešitelný rozpor, do něhož se Michelsonovým pokusem dostala klasická mechanika a elektrodynamika, se snažili někteří fyzikové odstranit různými pomocnými doplňkovými domněnkami. Např. dublinský fyzik George Fitzgerald zavedl předpoklad, který později přejal i H. A. Lorentz, že ve směru pohybu se délky vzhledem ke klidnému pozorovateli zkracují. Kromě této kontrakční domněnky byl Lorentz nucen zavést ještě předpoklad, že pro pozorovatele, který se vzhledem k éteru pohybuje, plyne čas pomaleji (nastává tzv. dilatace času) než pro toho, kdo je vzhledem k éteru v klidu.

K týmž výsledkům dospěl později německý fyzik A. EINSTEIN ve své proslulé teorii, známé pod názvem speciální teorie relativity. Je však zásadní rozdíl v pojetí týchž výsledků v teorii Lorentzově a v teorii Einsteinově. U Lorentze jsou kontrakce délek a dilatace času pouhou nezbytností, zavedenou jen proto, aby byla zachráněna teorie, která se jinak v řadě případů osvědčila; u Einsteina jsou však bezvadným logickým důsledkem základních principů, z nichž teorie relativity vychází a jež tvoří její obsah.

EINSTEIN opřel své úvahy o dva základní na sobě nezávislé principy; je to princip relativnosti a princip stálé rychlosti světelné.

Nezdar pokusů určit absolutní pohyb vztažné soustavy z průběhu optických dějů vedl Einsteina k tomu, že rozšířil platnost klasického principu relativity i na děje optické (elektromagnetické) a vyslovil pak *rozšířený princip relativity*, podle něhož žádným pokusem (nejen mechanickým, ale ani optickým, elektromagnetickým nebo kterýmkoliv jiným) nelze stanovit absolutní pohyb kterékoliv inerciální vztažné soustavy. Všechny inerciální soustavy jsou tedy stejně oprávněny, a to pro všechny přírodní děje.

Druhý princip, o nějž se opírá speciální teorie relativity, je *princip stálé rychlosti světelné*, z něhož plyne, že ve všech inerciálních soustavách má rychlost světla touž hodnotu (v témž prostředí). Stálostí světelné rychlosti lze pak snadno vysvětlit záporný výsledek Michelsonova pokusu, neboť podle uvedeného principu se šíří světlo i na pohybující se Zemi ve všech směrech stejně rychle; nemůže tedy nastat žádné zpoždění jednoho paprskového svazku proti druhému, a tedy ani posunutí interferenčních proužků.

Poněvadž žádná ze vztažných inerciálních soustav nemá přednost před jinou, nemůže ani existovat hmotný světelný éter, neboť soustava s ním spojená by měla výsadní postavení proti soustavám ostatním. Tak teorie relativity odstranila provždy z fyziky éter, jehož existenci se stejně nepodařilo nikdy ověřit.

Vše, co bylo dosud uvedeno, se týkalo jen soustav inerciálních, tedy se speciálním vzájemným pohybem. Proto uvedená teorie se nazývá *speciální teorie relativity*. Lze ji dnes považovat za uzavřenou disciplínu.

V části *A* článku byly uvedeny důvody pro zavedení speciální teorie relativity do vyučování fyzice na střední škole a byly dále naznačeny různé možnosti postupu při probírání tohoto, na střední škole zatím netradičního učiva. V osnovách fyziky pro gymnasia z r. 1969 je zavedeno téma „Základní poznatky speciální teorie relativity“. V tomto tematu jsou na počátku uvedena tato hesla:

„Relativnost pohybu. Galileiova transformace. Lorentzova transformace. Princip stálé rychlosti světla. Michelsonův pokus". Další hesla se týkají relativistické kinematiky a dynamiky. V osnovách není výslovně uveden Einsteinův princip relativity. Mám však za to, že je nutné, aby se žáci seznámili nejen s klasickým principem relativity, platným jen v mechanice, ale také s jeho zobecněním na fyzikální děje v ostatních oborech fyziky.

Poněvadž je výhodné odvozovat Lorentzovu transformaci na základě předpokladu platnosti Einsteinova principu relativity, doporučuji poněkud upravit postup při probírání úvodních témat. Mělo by se začít opakováním mechanického principu relativity, odvozením Galileiovy transformace a ukázáním, že mechanické zákony se nemění Galileiovou transformací, tj. že jsou vzhledem k této transformaci invariantní.

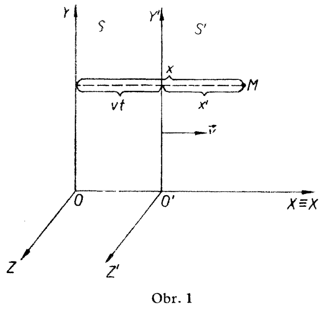
Odtud je pak možné přejít k pokusu Michelsonovu a závěrem uvést Einsteinův princip relativity a princip stálé rychlosti světla. Celá tato první kapitola by se pak uzavřela odvozením Lorentzovy transformace a použitím Lorentzovy transformace k důkazu relativnosti současnosti dvou událostí. Další sled hesel této kapitoly v osnovách by pak už zůstal nezměněn. V tomto uspořádání byl připraven zkušební text, který byl v první verzi už vyzkoušen, a byly získány s tímto postupem vcelku kladné zkušenosti.

V další části uvedu pro informaci jednu z možných variant zpracování hesel:

a) Galileiova transformace
b) Michelsonův pokus
c) Princip stálé rychlosti světla.

a) Galileiova transformace

Uvažujme částici $M(x, y, z)$ v soustavě S. Vyšetříme, jak se změní souřadnice částice v soustavě S', která se vzhledem k soustavě S rovnoměrně posouvá rychlostí v ve směru osy X vpravo (obr. 1),



Obr. 1

Je patrné, že souřadnice y' a z' se nemění a pro souřadnici x' platí

$$x' = x - vt .$$

Čas t' v soustavě S' je v Newtonově mechanice totožný s časem t v soustavě S. Lze tedy napsat, pro přechod od souřadnic částice v soustavě S (nečárkovaných) k souřadnicím v soustavě S' (čárkovaným), vztahy

$$x' = x - vt$$
$$y' = y$$
$$z' = z$$
$$t' = t\,.$$

Pro přechod od souřadnic v soustavě S' (čárkované) k souřadnicím v soustavě S (nečárkované) platí obdobně

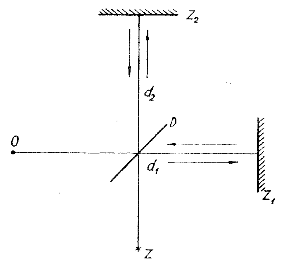
$$x = x' + vt'$$
$$y = y'$$
$$z = z'$$
$$t = t'\,.$$

Uvedené transformační rovnice se označují jako Galileiova transformace. V dalším výkladu je třeba na několika příkladech ukázat, že zákony Newtonovy mechaniky jsou nezávislé na volbě inerciální soustavy, tj. že jsou vzhledem ke Galileiově transformaci invariantní. Lze to např. demonstrovat na diskusi teorému o skládání rychlostí, zákonu síly a zákonu zachování hybnosti.

b) Michelsonův pokus

V roce 1881 provedl americký fyzik A. A. MICHELSON pokus, který dodnes nese jeho jméno. Michelson chtěl svým pokusem zjistit, zda existuje nehybný éter, jehož existence byla předpokládána a který měl být nositelem světelných vln a vůbec elektromagnetického vlnění. Avšak pokus měl výsledek záporný, existence éteru nebyla prokázána a také všechny pozdější pokusy měly výsledek negativní.

Schéma Michelsonova pokusu je na obr. 2. Michelson pro tento pokus zkonstruoval určitý typ interferometru. Je známo, že dva koherentní svazky paprsků poskytují viditelnou interferenci; setkají-li se vlny v téže fázi, nastává interferencí zesílení, při opačné fázi nastává zeslabení intenzity světla.



Obr. 2

U Michelsonova interferometru vychází monochromatický světelný svazek ze zdroje Z a dělí se na polopropustném zrcadle D na dva svazky: na svazek odražený a na svazek propuštěný. Oba svazky dopadají na rovinná zrcadla, odražený na zrcadlo Z_1, propuštěný na zrcadlo Z_2; označme vzdálenosti $DZ_1 = d_1$, $DZ_2 = d_2$. Světelný svazek odražený od zrdcala Z_1 prochází znovu deskou D a vstupuje do pozorovacího zařízení v místě O a podobně je tomu i se svazkem odraženým od zrcadla Z_2. V prostoru mezi D a O se setkávají koherentní světelné svazky, takže tam dochází k pozorovatelné interferenci; výsledkem této interference je soustava světlých a tmavých proužků.

Za předpokladu existence nehybného éteru by bylo možno zjistit změnu interferenčního jevu (posuv proužků), kdyby se celý přístroj o 90° otočil, takže DZ_1 a DZ_2 by se vyměnily. Avšak experimentální výsledky byly v rozparu s naší úvahou, založenou na Galileiově transformaci.

Pokusy byly od této doby několikrát opakovány se světlem o různé vlnové délce, se světlem hvězd, a s monochromatickým světlem z laserů, ve vysokých výškách, také pod povrchem zemským a v různých ročních obdobích, ale vždy bezvýsledně. Nikdy nebyl zjištěn účinek éteru, nikdy se neobjevil posuv interferenčních proužků.

c) *Princip stálé rychlosti světla*

Holandský fyzik H. A. LORENTZ a dublinský fyzik G. FITZERALD došli na základě matematického výpočtu k tomuto závěru: k vysvětlení Michelsonova pokusu je nutné předpokládat, že pohybující se tělesa se ve směru pohybu zkracují (mluvíme o kontrakci délek). Následkem toho nevzniká při Michelsonově pokusu dráhový rozdíl obou paprsků, a proto nenastane posunutí interferenčních proužků. Kromě této domněnky byl nucen Lorentz k vysvětlení záporného výsledku Michelsonova pokusu zavést ještě předpoklad, že pro pozorovatele, který se vzhledem k éteru pohybuje, plyne čas pomaleji (mluvíme o tzv. dilataci času) než pro toho, kdo je vzhledem k éteru v klidu.

K témuž výsledku dospěl v roce 1905 ALBERT EINSTEIN na základě hluboké analýzy tehdejších představ o prostoru a času.

Nemožnost určit absolutní pohyb vztažné soustavy (zvláště naší Země) v průběhu optických dějů vedl Einsteina k tomu, že *rozšířil platnost klasického principu relativnosti na všechny děje, a tedy i na děje optické (elektromagnetické).*

Žádným pokusem, nejen mechanickým, ale i optickým, elektromagnetickým nebo kterýmkoliv jiným, nelze stanovit absolutní pohyb kterékoliv inerciální vztažné soustavy. *Všechny inerciální soustavy jsou pro popis fyzikálních dějů rovnocenné, žádnými pokusy provedenými uvnitř soustavy nelze zjistit, zda je daná soustava v klidu nebo v rovnoměrném přímočarém pohybu.*

Odtud pak Einstein vyslovil *princip stálé rychlosti světelné: Ve všech inerciálních soustavách má rychlost světla touž hodnotu* (v témže prostředí), *a to ve všech směrech a nezávisle na vzájemném pohybu světelného zdroje a pozorovatele.*

Pozorovatel tedy naměří ve vakuu vždy stejnou hodnotu $c \doteq 3 \cdot 10^8$ m/s, ať je světelný zdroj vzhledem k němu v klidu nebo v pohybu, nebo obráceně, ať se pozorovatel pohybuje jakkoliv vzhledem ke zdroji. Einstein ukázal, že rychlost v tělesa nemůže nikdy překročit rychlost světla c ve vakuu, ani jí dosáhnout. Je tedy rychlost světla ve vakuu horní *mezní rychlostí* pro rychlost těles i pro rychlost šíření fyzikálních dějů prostorem a také pro relativní rychlosti všech inerciálních soustav navzájem. Tím zabývá rychlost c světla ve vakuu významu universální fyzikální konstanty.

Stálostí světelné rychlosti lze pak snadno vysvětlit záporný výsledek Michelsonova pokusu, neboť podle uvedeného principu se šíří světlo i na pohybující se Zemi ve všech směrech stejně rychle; nemůže tedy nastat nějaké zpoždění jednoho paprsku proti druhému, a tedy ani posunutí interferenčních proužků.

2. Lorentzova transformace ve vyučování fyzice na střední škole

a) *Úvod*

Fresnelova vlnová teorie zavedla do fyziky představu světelného éteru, jako nehybného a nehmotného prostředí, které je nositelem elektromagnetického vlnění, vyplňuje celý světový prostor a má dále tu vlastnost, že světlo se v něm šíří rychlostí $c \doteq 3 \cdot 10^8$ m/s. Na této představě byla také založena Maxwellova-Lorentzova teorie elektromagnetického pole, která předpokládala, že vztažné soustavy v klidu nebo v rovnoměrném přímočarém pohybu vzhledem k éteru, jsou inerciální. Ukázalo se však, že Maxwellovy rovnice elektromagnetického pole nejsou invariantní vzhledem ke Galileiově transformaci. Proto se předpokládalo, že bude možné zjistit absolutní pohyb a absolutní prostor. Experimentální fyzika usilovala v tom směru o určení pohybu Země a rychlosti jejího translačního pohybu vzhledem k éteru. Bylo vykonáno mnoho pokusů, avšak žádný nevedl k cíli. Nejznámější v tom směru je pokus Michelsonův.

H. A. Lorentz se v letech 1892—1904 snažil vysvětlit některé experimentální výsledky, které na konci 19. stol. nebylo možné vyložit z Maxwellovy elektromagnetické teorie. Podařilo se mu najít na základě matematické spekulace rovnice, vzhledem k nimž jsou Maxwellovy rovnice elektromagnetického pole invariantní a podat také uspokojivý výklad záporného výsledku Michelsonova pokusu. Jeho vývody převzal pak A. Einstein, avšak mezi úvahami a výsledky Einsteinovými a Lorentzovými je podstatný rozdíl. Lorentz setrvává na stanovisku klasické mechaniky, opírá se ve svých úvahách o absolutní prostor, čas a pohyb a ve své teorii také zachovává pojem éteru, kterým definuje absolutní vztažnou soustavu. Své transformaci nepřipisuje žádný fyzikální význam; považuje ji jen za matematickou pomůcku.

Lorentzova transformace však vyjadřuje základní objektivní vlastnosti prostoru a času, vyplývající z pokusů. Teorie relativity předpokládá, že každý fyzikální zákon, matematicky vyjádřený v souřadnicích jedné soustavy, musí zachovat svůj tvar při přechodu k jiné inerciální soustavě podle vztahů Lorentzovy transformace. Lorentzova transformace má pro speciální teorii relativity základní význam. Pro $\left(\frac{v}{c}\right) \to 0$ přecházejí transformační vzorce Lorentzovy v transformaci Galileiovu. Pro $\left(\frac{v}{c}\right) \to 0$ vychází dále $t' = t$, což zdůrazňuje skutečnost, že pro definici absolutního času je nutné předpokládat signály šířící se nekonečně velkou rychlostí. Rovnice Lorentzovy transformace zdůrazňují skutečnost, že transformační rychlost v musí být vždy menší než rychlost c. Pro $v = c$ ztrácejí Lorentzovy rovnice svůj smysl a pro $v > c$ dostáváme imaginární veličiny x', t' pro reálné x, t.

Mnohem odvážnější než Lorentz byl Einstein, který odmítl existenci éteru, a tím existenci absolutního prostoru a času a na podkladě hluboké fyzikální analýzy přistoupil k formulaci svých dvou postulátů. Na základě prací Lorentzových a Einsteinových se pak stala elektrodynamika relativistickou disciplinou a teprve pak se přistoupilo k revizi zákonů klasické mechaniky. Lorentzovy myšlenky a zejména i jeho matematická transformace, měly ve fyzice na počátku 20. století značný význam a přispěly podstatně k vyslovení speciální teorie relativity A. Einsteinem. Je nutné zdůraznit, že řada prací a zejména práce Lorentzova připravily cestu tak dokonale speciální teorii relativity, že by jistě byla vyslovena i bez genia Einsteinova. Vzhledem k velkému významu Lorentzovy transformace v relativistické fyzice, považuji za nutné provést její odvození ve vyučování fyzice a pak ji využít při výkladu relativistické kinematiky a dynamiky.

V nových učebních osnovách pro fyziku ve čtvrtém ročníku gymnasia je v kapitole 9. Speciální teorie relativity uvedena Lorentzova transformace. Při výkladu Lorentzovy transformace lze postupovat různě. Je možné např. pokračovat v rozboru Michelsonova pokusu (v osnovách je ovšem uveden až za heslem „Lorentzova transformace") a odtud vyvodit vztahy pro Lorentzovu transformaci, lze ovšem také vztahy pro Lorentzovu transformaci sdělit studentům bez odvozování, jako pokračování výkladu o transformaci Galileiově. Je celá řada způsobů jak lze získat vztahy pro Lorentzovu transformaci; lze ji také odvodit jen na základě matematické úvahy.

b) Lorentzova transformace

Lorentz dospěl ke svým transformačním rovnicím již rok před vyslovením principu relativity Einsteinem, tedy už v roce 1904. Úvahy Lorentzovy byly formálně matematické.

Budeme uvažovat dvě souřadné soustavy S a S' (obr. 3); soustava S je v klidu a souřadnice a čas zde budeme označovat nečárkovaně, tj. x, y, z, t, kdežto soustava S' se vzhledem k S pohybuje rovnoměrně přímočaře ve směru osy X vpravo s rychlostí v a souřadnice a čas budeme v této vztažné soustavě označovat čárkovaně, tj. x', y', z', t'. Nechť je zdroj světla umístěn v klidné soustavě S v počátku.

Uvažujme světelnou kulovou vlnu, která byla emitována ze zdroje A v čase $t = 0$. Za čas t lze psát rovnici této kulové vlny ve tvaru

$$x^2 + y^2 + z^2 = c^2 t^2 . \qquad (1)$$

Tato rovnice představuje kulovou vlnoplochu, na kterou se světlo rozšíří z bodového zdroje za čas t rychlostí c.

Předpokládejme pro jednoduchost, že počátek času t' a t spolu splývají a že také počátek soustavy S' je v čase $t' = t = 0$ v počátku soustavy S, tj. v místě světelného zdroje A. Pro pozorovatele v soustavě S' bude vlnoplocha také plocha kulová, ale se středem v $0'$, neboť rychlost světla c je táž ve všech směrech. Rovnice kulové vlnoplochy v čas t' je tedy dána rovnicí

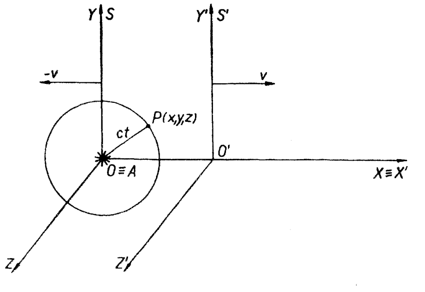
$$x'^2 + y'^2 + z'^2 = c^2 t'^2 . \tag{2}$$

Na základě Galileiovy transformace platí

$$x' = x - vt, \quad y' = y, \quad z' = z, \quad t' = t$$

a po dosazení do rovnice (2) dostaneme

$$x^2 - 2\,xvt + v^2 t^2 + y^2 + z^2 = c^2 t^2 .$$



Obr. 3

Výsledek však není v souhlasu s původní rovnicí (1). Odtud plyne, že zde Galileiova transformace neplatí. Lorentz řešil tuto otázku matematicky. Jde v podstatě o to, najít takovou transformaci, která by pro $v/c \to 0$ přešla v transformaci Galileiovu a kterou by se rovnice (2) (čárkovaná) převedla na rovnici (1) (nečárkovanou).

Pro přechod od soustavy nečárkované k soustavě čárkované byla nalezena transformace ve tvaru:

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad y' = y, \quad z' = z, \quad t' = \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \tag{3}$$

Tato transformace má tu vlastnost, že se pro $v/c \to 0$ redukuje na transformaci Galileiovu a že je v x a v t lineární. Použijeme-li této transformace pro přechod od rovnice (2) vlnoplochy v čárkované soustavě na rovnici (1) v nečárkované soustavě, zjistíme, že vyhovuje. Tato transformace se nazývá *transformace Lorentzova*.

Teorie relativity předpokládá, že každý fyzikální zákon matematicky vyjádřený v souřadnicích jedné inerciální soustavy, musí zachovat svůj tvar při přechodu k druhé inerciální soustavě podle vzorců Lorentzovy transformace, tj. musí být invariantní k Lorentzově transformaci.

Transformační vzorce pro přechod od čárkované soustavy k soustavě nečárkované lze psát

$$x = \frac{x' + vt'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad y = y', \quad z = z', \quad t = \frac{t' + \frac{v}{c^2}x'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \tag{4}$$

Tyto rovnice lze získat řešením původních rovnic Lorentzovy transformace vzhledem k x, y, z, t nebo záměnou čárkovaných souřadnic za nečárkované a záměnou v za $-v$. Rovnice Lorentzovy transformace zdůrazňují skutečnost, že translační rychlost v musí být vždy menší než rychlost šíření elektromagnetických vln ve vakuu c. Pro $v = c$ ztrácí první a poslední rovnice v (3) a (4) smysl a pro $v > c$ dostáváme imaginární veličiny x', t' pro reálné x, t, a obráceně.

c) Relativnost současnosti

Z transformace Lorentzovy plyne ihned, že dvě události současné v jedné vztažné soustavě nemusí být současné v jiné vztažné soutavě. K prostorovému a časovému vyjádření určité události je nutné znát tři souřadnice x, y, z a čas t.

Uvažujme dvě události a jejich souřadnice v soustavě S označíme x_1, y_1, z_1, t_1 a x_2, y_2, z_2, t_2. Na základě Lorentzovy transformace (3) určíme snadno rozdíl časů $t'_2 - t'_1$; dostaneme

$$t'_2 - t'_1 = \frac{(t_2 - t_1) - \frac{v}{c^2}(x_2 - x_1)}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \tag{5}$$

Z výsledků je patrné, že časový interval mezi dvěma událostmi závisí v soustavě S' nejen na časovém intervalu $(t_2 - t_1)$ mezi těmito událostmi v soustavě S, ale také na vzdálenosti $(x_2 - x_1)$ mezi místy, kde vyšetřované události v soustavě S proběhly. Jestliže v soustavě S byly tyto události současné, tj. jestliže platilo $t_2 = t_1$, pak dostaneme z rovnice (5)

$$t'_2 - t'_1 = \frac{-\frac{v}{c^2}(x_2 - x_1)}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

to znamená, že události, které byly současné v soustavě S, nejsou současné v soustavě S' a časový interval mezi nimi je přímo úměrný rozdílu $x_2 - x_1$. Z toho tedy plyne, že současnost událostí je relativní. Tento výsledek je překvapující; v běžném životě jej nezjišťujeme, protože podíl v/c je zanedbatelně malý vzhledem k 1. Je nutné zdůraznit, že týmž časovým okamžikům t_1 a t_2 $(t_1 = t_2)$ v soustavě S odpovídají v soustavě S' podle Lorentzovy transformace různé časové okamžiky t'_1 a t'_2.

3. Relativistická kinematika ve vyučování fyzice na střední škole

Už před rokem 1905, tj. před vystoupením A. Einsteina, byla známa Lorentzova transformace a tzv. princip Poincaréův, tj. že fyzikální zákony mají stejný tvar ve všech inerciálních soustavách. Obě tyto skutečnosti se staly základem speciální teorie relativity. Avšak teprve génius Einsteinův provedl hlubokou analýzu fyzikálních pojmů a ukázal, že pojmy prostor a čas jsou relativní; výsledky jejich měření závisí na vztažné soustavě, v níž byla měření konána. Proto bylo nutné změnit dosavadní klasickou kinematiku v kinematiku relativistickou. Ukážeme v dalším nejdůležitější odchylky relativistické kinematiky od klasické kinematiky. Je to relativnost délky (kontrakce[1]) délek), relativnost velikosti časových intervalů (dilatace času) a relativistický vztah pro skládání rychlostí. Tyto tři relativistické efekty by měly být ve vyučování fyzice na střední škole diskutovány v učivu speciální teorie relativity.

a) Relativistické zkrácení délky (kontrakce délek)

Z Lorentzovy transformace vyplývá, že pojem současnosti událostí je relativní, tj. dvě události současné v inerciální soustavě S nemusí být současné v inerciální soustavě S', která se vzhledem k soustavě S pohybuje rovnoměrně přímočaře rychlostí v. Z této skutečnosti plynou některé důsledky, např. relativnost délek a časových intervalů.

Budeme vyšetřovat délku tyče, která je umístěna ve směru osy $O'X'$ v soustavě S' a je v této soustavě v klidu. Zjistíme v obou soustavách souřadnice koncových bodů tyče; z obr. 4 je zřejmé, že jde jen o souřadnice x. Pro pozorovatele v soustavě S' označíme délku tyče

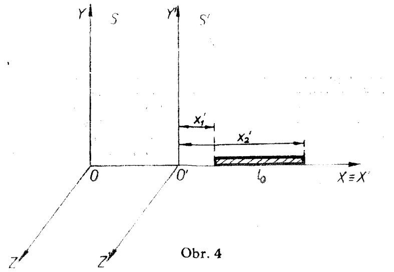
$$l_o = x'_2 - x'_1$$

[1]) Označení relativistického efektu „kontrakce (zkrácení) délky“ vede často k nesprávným představám. Bylo by proto vhodnější mluvit prostě jen o relativnosti délky a podobně je tomu i s termínem „dilatace času“.

Poněvadž tyč l_o je v soustavě S' v klidu, nemusí být souřadnice x_1' a x_2' určovány současně. Souřadnice koncových bodů tyče v soustavě S za předpokladu $t_1 = t_2$ jsou x_1 a x_2, takže délka tyče v soustavě S je

$$l = x_2 - x_1 .$$

Chceme určit délku l, tj. ptáme se, jakou délku tyče naměří pozorovatel v soustavě S, jestliže se tato tyč pohybuje se soustavou S' rychlostí v; tyč je uložena ve směru pohybu. V případě, že by tyč byla ke směru pohybu kolmá, naměřil by pozorovatel v obou soustavách tutéž hodnotu délky tyče, jak plyne z Lorentzovy transformace $(y' = y, z' = z)$.



Obr. 4

Pomocí Lorentzovy transformace dostaneme pro délku tyče v soustavě S'

$$l_o = x_2' - x_1' = \frac{(x_2 - x_1) - v(t_2 - t_1)}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Rozdíl $x_2 - x_1$ v tomto vzorci představuje délku tyče v soustavě S jen tehdy, jsou-li souřadnice x_1 a x_2 v soustavě S změřeny současně ($t_1 = t_2$). Platí-li tedy $t_1 = t_2$, můžeme za $x_2 - x_1$ dosadit l, takže dostáváme

$$l = l_o \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \tag{6}$$

Z výsledku je patrné, že pozorovatel v soustavě S, vzhledem k němuž se tyč pohybuje, naměří menší délku, než pozorovatel v soustavě S', vzhledem k němuž je tyč v klidu. Délka tyče měřená pozorovatelem, který je vzhledem k tyči v klidu, se označuje jako vlastní délka tyče. Předchozí výsledek (6) můžeme interpretovat také tak, že vlastní délka tyče l_o je největší délkou, která může být naměřena pozorovatelem v libovolné inerciální soustavě, v níž se pozorovatel nalézá. Z výsledku je dále zřejmé, že rozměry tělesa, které se vzhledem k pozorovateli pohybuje stálou rychlostí v, se mu jeví zkráceny ve směru pohybu v poměru $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$, kdežto rozměry k rychlosti pohybu kolmé se jeví stejně veliké jako za klidu.

Je nutné zdůraznit, že délkové zkrácení nastává jen ve směru transformační rychlosti. Z toho vyplývá, že objem tělesa se při translačních pohybech zmenší v poměru $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$. Je-li V_o klidový objem tělesa, pak objem tohoto tělesa, pohybujícího se rychlostí v vzhledem k pozorovateli je

$$V = V_o \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} .$$

b) Zpomalení chodu hodin v relativním pohybu

Při odvozování vzorce pro kontrakci délek jsme délkou tyče rozuměli vzdálenost poloh jejích krajních bodů určených současně. Podobně se také dojde ke vztahu pro velikost časového intervalu, změříme-li čas, který uplyne mezi dvěma soumístními událostmi.

Abychom zjistili jakou dobu trvání děje naměří pozorovatel, vzhledem k němuž se místo děje pohybuje rovnoměrně přímočaře rychlostí v, budeme uvažovat děj a trvání $T_o = t_2' - t_1'$, který je umístěn v soustavě S'. Budeme vyšetřovat odpovídající dobu trvání děje pro pozorovatele v soustavě S, tj. dobu $T = t_2 - t_1$. Platí

$$T = t_2 - t_1 = \frac{t_2' - t_1'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{T_o}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

nebo

$$T = \frac{T_o}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \tag{7}$$

Z výsledku je patrné, že pro pozorovatele v klidné soustavě S je časový interval T_o v pohybující se soustavě S' větší, než týž časový interval v soustavě klidné S. Uvedený jev se označuje jako dilatace času. Hodiny v pohybující se soustavě S' jdou vzhledem k pozorovateli v S pomaleji než hodiny, které jsou vzhledem k němu v klidu. Tento nesnadno pochopitelný paradox spočívá v invarinatnosti c. Dilatace času se projeví u každého typu hodin. Tento výsledek v podstatě znamená, že čas není veličinou absolutní, jak se domníval Newton, nýbrž že doba téhož děje měřená různými pozorovateli je tím delší, čím rychleji se pozorovatel pohybuje vzhledem k místu děje.

Jestliže probíhá nějaký děj v určitém místě prostoru vzhledem k pozorovateli v určité soustavě, označujeme časový interval mezi začátkem a koncem tohoto děje v této soustavě jako vlastní čas děje. Předchozí výsledek lze tedy také interpretovat tak, že interval vlastního času T_o mezi začátkem a koncem nějakého děje je minimální trvání tohoto děje, které lze pozorovat v inerciální soustavě, v níž děj probíhá a v níž se pozorovatel nalézá.

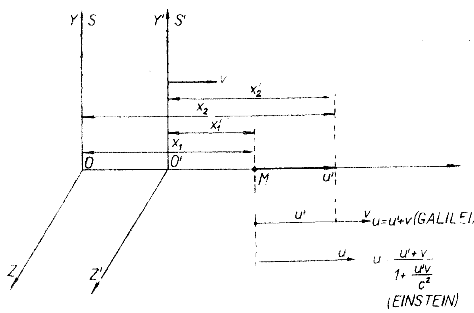
Dilatace času byla poprvé ověřena experimentálně v roce 1938 při proměřování spektra světla vydávaného molekulovými ionty vodíku, urychlenými v anodové trubici. Bylo pozorováno, že spektrální čáry měly vlnové délky větší, neboť se následkem dilatace času zmenšily frekvence světelných kmitů; spektrální čáry se tudíž posunuly k červenému konci spektra (rudý posuv.)

Časovou dilataci lze bezprostředně pozorovat při studiu složek kosmického záření, tzv. mionů.

c) Relativistické skládání rovnoběžných rychlostí

Uvažujme soustavu S a S' podle obr. 5. Soustava S' se pohybuje vzhledem k S rovnoměrně a přímočaře ve směru osy X vpravo rychlostí v. V soustavě S' je na ose X' částice, která se vzhledem k S' pohybuje ve směru osy X' vpravo rychlostí u'. V klasické mechanice jsme poznali za použití Galileiovy transformace, že rychlost částice vzhledem k S je

$$u = u' + v\,.$$



Obr. 5

Použitím Lorentzovy transformace odvodíme nyní relativistický vztah pro rychlost u (obr. 5). Uvažujme dvě události částice v soustavě S', a to (x_1', t_1') a (x_2', t_2'), kterým v soustavě S odpovídají události o souřadnicích (x_1, t_1) a (x_2, t_2)

Na základě definice rychlosti dostaneme

$$u = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} = \frac{\dfrac{x_2' - x_1' + v(t_2' - t_1')}{\sqrt{1 - \dfrac{v^2}{c^2}}}}{\dfrac{t_2' - t_1' + \dfrac{v}{c^2}(x_2' - x_1')}{\sqrt{1 - \dfrac{v^2}{c^2}}}}$$

nebo

$$u = \frac{\dfrac{x_2' - x_1'}{t_2' - t_1'} + v}{1 + \dfrac{v}{c^2}\dfrac{x_2' - x_1'}{t_2' - t_1'}}$$

a odtud

$$u = \frac{u' + v}{1 + \dfrac{u'v}{c^2}} \qquad (8)$$

Pro rychlost u' dostaneme

$$u' = \frac{u - v}{1 - \dfrac{vu}{c^2}} \qquad (9)$$

Z výsledku (8) je patrné, že velikost výsledné rychlosti u je menší než velikost vektorového součtu obou rychlostí u' a v; je to nutný důsledek Lorentzovy transformace. Kdybychom totiž skládali dvě rychlosti větší než $c/2$ podle klasického vzorce, dostali bychom rychlost výslednou větší než c, což není na základě principu relativity možné. Na základě Einsteinova vzorce však vyjde rychlost menší než c.

Kontrakce délek, dilatace času a vztah pro skládání rychlostí jsou nejdůležitější odchylky relativistické kinematiky od kinematiky klasické. Z nich byl nejdříve pokusem potvrzen vzorec pro skládání rychlostí, a to ještě dříve než byl vztah objeven. Kontrakce délek nebyla dosud přímo pokusem potvrzena.

4. Relativistická dynamika ve vyučování fyzice na střední škole

Z relativistické dynamiky je nutné na střední škole objasnit především dva významné relativistické efekty, a to závislost hmotnosti tělesa na jeho rychlosti (v klasické fyzice je hmotnost m stálá, na rychlosti nezávislá) a z této skutečnosti vyplývající souvislost hmotnosti a energie. Oba tyto relativistické efekty mají významnou úlohu v moderní fyzice. Uplatňují se především v atomové fyzice a ve fyzice elementárních částic. Dnes se však teorie relativity uplatňuje i v technické praxi, např. při konstrukci a provozu velkých urychlovačů nabitých částic. Velký význam má dále teorie relativity v astronomii a v kosmogonii.

Uvedu v tomto příspěvku stručně návrh jedné možné varianty metodického zpracování tématu pro potřebu vyučování na středních školách. Poněvadž se základy speciální teorie relativity probírají až v závěru fyziky, bylo by vhodné na příkladech ukázat nejen závislost hmotnosti na rychlosti a souvislost hmotnosti a energie, ale všimnout si také aspoň na příkladech souvislosti energie a impulsu částice, důkladněji pak fotonu jako částice a v souvislosti s tím pak i tlaku záření. Dále by bylo vhodné aspoň na příkladech ukázat ráz částic, např. Comptonův jev, fotoelektrický jev, vznik fotonu při rázu elektronu a pozitronu, jadernou reakci z hlediska rázu částic apod.

Jde vesměs o novou problematiku, která dosud v programu na středních školách vůbec nebyla nebo nebyla v takovém pojetí. Mám však zato, že uvedené učivo by nebylo nad možnost chápání žáků 4. ročníku gymnasia. Bude proto třeba uvážit, zda tyto otázky moderní fyziky by neměly být zavedeny do středoškolského kursu fyziky. V kladném případě pak bude nutné vytvořit metodiku této nové učební látky z fyziky. Zatím se tyto otázky objevily jen ve skrovné míře v návrhu osnov fyziky pro střední školy. Snad by bylo vhodné připravit určitou koncepci a ověřit ji na některých experimentálních školách. Zařazení elementů relativistické dynamiky do vyučování na střední škole může podstatně přispět k modernizaci vyučování fyzice.

a) Závislost hmotnosti na rychlosti

Z druhého pohybového zákona Newtonova vyplývá, že síla působící na těleso je přímo úměrná časové změně hybnosti tělesa. Stálá síla, působí-li velmi dlouho, by měla způsobit stále rostoucí změnu hybnosti mv. Odtud by podle Newtonovy mechaniky plynulo, že rychlost těles by se musela stále zvětšovat, neboť hmotnost m je v klasické fyzice stálá. Z Einsteinovy teorie relativity však plyne, že mezní rychlost ve vesmíru je c. Má-li tedy hybnost mv stále vzrůstat, je to možné jen tak, že s rostoucí rychlostí tělesa se také zvětšuje jeho hmotnost m, jak to vyžaduje vzrůst hybnosti mv.

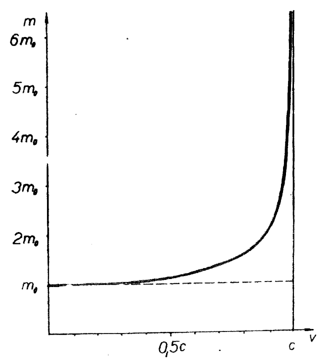
Změna hmotnosti m v závislosti na rychlosti v je velmi významným efektem speciální teorie relativity. Avšak tuto změnu nelze měřit pro tělesa makroskopická, neboť jejich rychlost je vzhledem k rychlosti světla velmi malá. V mikrosvětě však dosahují částice rychlostí blízkých rychlosti světelné, takže lze změnu hmotnosti zjistit experimentálně.

V relativistické dynamice se rozlišuje klidová hmotnost m_0 (vlastní), kterou má částice jen pro $v = 0$ a hmotnost m částice za pohybu. Hmotnost je přesně rovna m_0 jen při nulové rychlosti. Pohybuje-li se částice rychlostí malou proti rychlosti světla, není možné měřením zjistit rozdíl mezi hmotností za pohybu m a za klidu m_0.

Z teorie plyne pro hmotnost pohybující se částice vztah

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \tag{10}$$

který platí pro rychlost částice $v < c$.



Obr. 6

Ze vztahu (10) pro hmotnost m je patrné, že podle Einsteinovy teorie relativity není hmotnost m stálou veličinou, ale závisí na rychlosti vzhledem ke vztažné soustavě.

Pro různé podíly v/c je tato skutečnost vyjádřena tabulkou. Z ní je patrné, jak se s rostoucí rychlostí v mění hmotnost m.

Tabulka:

v/c	m/m₀	v/c	m/m₀
10^{-3}	1,0000	0,9	2,2941
10^{-2}	1,0001	0,95	3,2025
10^{-1}	1,0050	0,99	7,0888
0,50	1,1547		

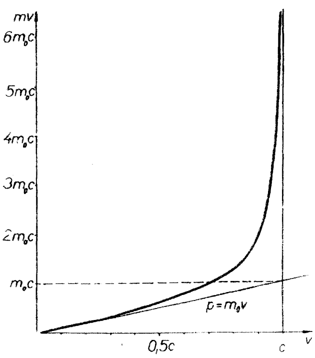
Graficky je tato závislost vyjádřena křivkou na obr. 6. Pokud je rychlost v menší než 10^8 m/s, je hmotnost m za pohybu téměř totožná s hmotností klidovou m_0, v těchto případech platí druhý zákon Newtonův. Pro větší rychlosti nastávají odchylky od druhého zákona a pro $v \to c$ hmotnost m tělesa velmi rychle vzrůstá. Relativistický vzrůst hmotnosti byl ověřen v mnoha pokusech při pohybu částic v elektrickém a v magnetickém poli; je také přímo ověřen při činnosti každého urychlovače nabitých částic.

Použije-li se druhý pohybový zákon na částice, které se pohybují velkými rychlostmi, blízkými rychlosti světla c, ukazují se odchylky od skutečnosti. Druhý pohybový zákon je pak nutné psát ve tvaru

$$\frac{d}{dt}\left[\frac{m_0 \mathbf{v}}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}\right] = \mathbf{F}\,.$$

Vztah

$$\frac{m_0 \mathbf{v}}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} = \mathbf{p} \tag{11}$$



Obr. 7

se nazývá *relativistická hybnost*. Pro $v/c \to 0$ přechází tento relativistický vztah ve vztah klasický. Bylo experimentálně prokázáno, že hybnost v relativistickém tvaru je zachována ve všech srážkových procesech. Zavedením relativistické hybnosti zachovává druhý pohybový zákon svoji původní formulaci i pro velké rychlosti: změna relativistické hybnosti je rovna impulsu síly, $dp = Fdt$. Na obr. 7 je grafické znázornění závislosti relativistické hybnosti na rychlosti. Z něho je patrné, že s rostoucí rychlostí tělesa se z počátku lineárně zvětšuje přírůstek relativistické hybnosti $\Delta mv = F\Delta t$. Při rychlostech větších než 0,5 c se začne přírůstek Δmv zvětšovat urychleně a pro $v \to c$ se přírůstek hybnosti stává nekonečně velikým. Odtud by vyplývalo, že buď F nebo Δt by mělo být nekonečně velké. Proto lze předpokládat, že rychlost v se přestane prakticky zvětšovat při libovolných konečných hodnotách síly F a doby působení Δt; rychlost v se velmi přibližuje k c, ale nikdy ji nedosáhne.

b) Vztah mezi hmotností a energií

Významným důsledkem závislosti hmotnosti m částice na její rychlosti je relativistický vztah mezi hmotností m částice a její energií W.

α) Rovnice energie

Předpokládejme, že na částici o hmotnosti m působí stálá síla $\mathbf{F}$. Tato síla vykonává při posuvu $\mathrm{d}\mathbf{s}$ částice elementární práci, která se definuje i v teorii relativity výrazem

$$\mathrm{d}A = \mathbf{F} \cdot \mathrm{d}\mathbf{s}$$

nebo

$$\mathrm{d}A = \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}(m\mathbf{v}) \cdot \mathrm{d}\mathbf{s}$$

a poněvadž $\dfrac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}t} = v$, dostaneme

$$\mathrm{d}A = \mathbf{v} \cdot \mathrm{d}(m\mathbf{v}) = v^2\,\mathrm{d}m + m\mathbf{v} \cdot \mathrm{d}\mathbf{v} \tag{12}$$

Umocněním na druhou relativistického vztahu (10) pro hmotnost m dostaneme

$$m^2\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) = m_o^2$$

nebo

$$m^2c^2 = m^2v^2 + m_o^2c^2 \tag{13}$$

Poněvadž m_o a c jsou konstanty, dostaneme derivováním (13)

$$c^2\mathrm{d}m = mv\,\mathrm{d}v + v^2\,\mathrm{d}m\,,$$

takže po dosazení do vztahu (12) pro $\mathrm{d}A$ dostaneme

$$\mathrm{d}A = c^2\,\mathrm{d}m\,.$$

Avšak práce vykonaná po určité dráze silou, působící na částici, se projeví v přírůstku kinetické energie $\mathrm{d}W_k$ částice, tj. platí

$$\mathrm{d}W_k = c^2\,\mathrm{d}m = d\,(mc^2)\,. \tag{14}$$

Celkovou práci vykonanou silou F obdržíme integrací vztahu (14), takže dostaneme po integraci

$$A = W_k = mc^2 + k\,, \tag{15}$$

kde k je integrační konstanta. Integrační konstantu určíme z počátečních podmínek. Pro $v = 0$ je $W_k = 0$ a $m = m_o$, takže z rovnice (15) plyne

$$0 = m_o\,c^2 + k\,,$$

a odtud

$$k = -m_o\,c^2\,,$$

takže

$$W_k = m\,c^2 - m_o\,c^2 = (m - m_o)\,c^2\,. \tag{16}$$

Má-li platit zákon zachování energie i v relativistické mechanice, pak musí náš výsledek definovat pohybovou energii v relativistické mechanice, tj. musí platit

$$W_k = (m - m_o)\,c^2 = m_o\,c^2\left[\frac{1}{\sqrt{1 - \dfrac{v^2}{c^2}}} - 1\right] \tag{17}$$

Rovnice (17) je relativistický výraz pro kinetickou energii posuvného pohybu. Pro rychlosti $v \ll c$ odtud plyne klasický vztah

$$W_k = m_o\,c^2\left[\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-\frac{1}{2}} - 1\right] \approx m_o\,c^2\left[1 + \frac{1}{2}\,\frac{v^2}{c^2} - 1\right]$$

nebo

$$W_k = \frac{1}{2} m_o v^2 .$$

Vzorec pro kinetickou energii v klasické mechanice platí tedy jen pro malé rychlosti ($v/c \to 0$).

β) Vztah mezi energií a hmotností

Ze vztahu (16) který je vyjádřen rovnicí

$$W_k = (m - m_o) c^2$$

plyne, že výraz $m_o c^2$ představuje energii; platí

$$m c^2 = W_k + m_o c^2$$

nebo

$$m c^2 = W_k + W_o ,$$

kde $W_o = m_o c^2$ platí pro $v = 0$ a nazývá se proto *klidová energie částice.* Je to energie, kterou má hmotná částice s nenulovou hmotností v té vztažné soustavě, vzhledem k níž je v klidu. Hodnota $m_o c^2$ obsahuje různé druhy energie tělesa v klidu, jako jsou energie tepelná, chemická, atomová, jaderná aj. Veličina mc^2 pak představuje celkovou energii W částice (tělesa), takže lze psát

$$W = mc^2 \tag{18}$$

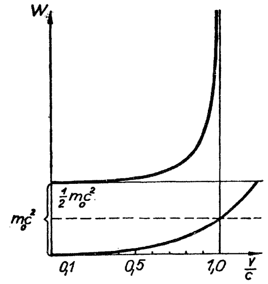
Rovnice (26) vyjadřuje Einsteinův vztah mezi hmotností a energií.

Einsteinův vztah $W = mc^2$ ukazuje, že energie částice a její hmotnost jsou v relativistické fyzice veličiny přímo úměrné; konstantou úměrnosti je druhá mocnina světelné rychlosti c^2. To však neznamená, že energie částice se rovná její hmotnosti a obráceně. Z Einsteinova vztahu jen plyne, že se vzrůstem hmotnosti částice za pohybu je spojeno zvětšení její energie a obráceně, tj. každé změně energie částice o hodnotu ΔW odpovídá ekvivalentní změna hmotnosti

$$\Delta m = \frac{\Delta W}{c^2} . \tag{19}$$

Celková energie pohybující se částice stoupá urychleně. Na obr. 9 je grafické znázornění závislosti úhrnné energie částice $W = m c^2 = \frac{m_o c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ na podílu rychlostí $\frac{v}{c}$ a závislosti W_k na $\frac{v}{c}$.

Z obr. 8 je patrné, že pro $\frac{v}{c} \ll 1$ mají příslušné křivky podobný průběh, neboť platí, že $W = W_o + W_k = m_o c^2 + \frac{1}{2} m_o v^2$. Pro $v/c \to 1$ vzrůstá úhrnná energie nade všechny meze, to znamená, že dosažení rychlostí blízkých c by vyžadovalo obrovské energie, a proto rychlost c je mezní rychlost, které nemůže dosáhnout žádná částice s nenulovou klidovou hmotností, a tím méně makroskopické těleso.



Obr. 8

Význam Einsteinova vztahu $W = mc^2$ a zejména pak význam klidové energie $W_0 = m_0c^2$ byly objasněny při dějích, při nichž se nezachovává klidová hmotnost, např. při jaderných reakcích, kde se uvolňuje určité množství energie na útraty úbytku klidové hmotnosti.

Einsteinův vztah $W = mc^2$ patří právem mezi nejdůležitější výsledek speciální teorie relativity, neboť má veliký význam nejen teoretický, ale i praktický.

LITERATURA

[1] *Bělař, A.:* Teorie relativity. ÚUV UK, Praha, 1971

[2] *Feynman, H. O. — Leighton, R. B. — Sanda, M.:* The Feynman Lectures on Physic, Volume 2, Adison — Wesley, London, 1963.

[3] *Fuka, J.:* Mechanický princip relativity ve vyučování fyzice. Matematika a fyzika ve škole, r. 1, č. 1

[4] *Fuka, J.:* Základy speciální teorie relativity na středních školách. Fyzika ve škole, 8, 1969/70, č. 7, s. 389 — 397.

[5] *Fuka, J.:* Teorie relativity. Zkušební text. VÚOŠ, Praha 1970

[6] *Fuka, J.:* Úvod do teorie relativity. UP v Olomouci, 1971.

[7] *Fuka, J. — Havelka, B.:* Základní pojmy teorie relativity. Fyzika ve škole, 3, 1964/65, str. 289 — 347.

[8] *Fuka, J. — Havelka, B.:* Dynamika v teorii relativity. Fyzika ve škole, 4, 1965/66, str. 97.

[9] *Fuka, J. — Havelka, B.:* Fotonová optika a elektronový obal atomu. SPN, Praha 1961.

[10] *Fuka, J. — Havelka, B.:* Fyzika atomového jádra, SPN Praha, 1966.

[11] *Havelka, B. — Tillich, J.:* Teorie relativity. SPN Praha, 1964

[12] *Horák, Zd. — Krupka, F.:* Fyzika. SNTL, Praha 1966

[13] *Kittel, Ch. — Knight, W. D. — Ruderman, M. A.:* Mechanics, Berkeley Physics Course, Volume 1, MCGRAW — Hill Bock Company, New York, 1965.

[14] *Kuchař, K.:* Základy obecné teorie relativity. Academia, Praha, 1968

[15] *Messel, H.:* Physics, Senior Science for high School Students, Sydney, 1966

[16] *Orear, J.:* Popularnaja fizika, Izdatelstvo Mir, Moskva, 1966

[17] *Rekveld, J.:* Rélativité, l'enseignement actuel de la Physique, Suisse, 1965

[18] *Reznikov, L. I.:* Otraženija dostiženij nauki v kurse fiziki srednej školy, Izvestija APN, RSFSR, Moskva 1966.

[19] *Rumer, J. B. — Ryvkin, M. S.:* Teorija otnositelnosti. Učpedgiz, Moskva 1960

[20] *Sokolovskij, Ju. I.:* Teorie otnositelnosti v elementarnom izloženii, Izd. Nauka, Moskva, 1964.

[21] *Ugarov, V. A. — Jarovskij, B. M.:* Izloženije specialnoj teorii otnositelnosti v srednej škole. Fizika v škole,

[22] *Votruba, V.:* Základy speciální teorie relativity. Academia, Praha 1969.

[23] *Záviška, F.:* Einsteinův princip relativnosti a teorie gravitační, JČMF, Praha 1925

[24] *Žukov, A. I.:* Vvedenie v teoriju otnositelnosti. M., Fizmetgiz, 1961.

Содержание

ОСНОВНЫЕ ПОЗНАНИЯ СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ В ПРЕПОДАВАНИИ ФИЗИКИ НА СРЕДНИХ ШКОЛАХ

ЙОСЕФ ФУКА

Статья занимается проблематикой преподавания основных познаний спечиальной теории относительности в курсе физики средней школы. Статья распределена в две части. В первой части обсуждаются доводы, как ввести теорию относительности в преподавание физики в средней школе и вопрос её структуры и понимания, в другой састи проводится разбор конкретного содержания, которое в експериментальной средней школе в городе Оломоуц (Гейчин). Эта часть распределена в четыре главы: первая содержит разбор темы специальной теории относительности, в другой обсуждены преобразования Лоренца, третья говорит о релятивистской кинематике и четвёртая часть о релятивистской динамике. В течение исследовательского преподавания был избран традиционный метод, в основу которого вошёл опыт Михелсона, преобразования Лоренца и их последствия.

SUMMARY

THE ELEMENTARY KNOWLEDGE OF THE SPECIAL THEORY OF RELATIVITY IN TEACHING PHYSICS AT SECONDARY SCHOOLS

JOSEF FUKA

This paper deals with problems of teaching the elementary knowledge of the special theory of relativity in physics at secondary schools. The work is devided into two parts. In the first part the author discusses reasons for introducing the theory of relativity in the teaching of physics at secondary schools as well as the question of the structure and approach; in the second part he analyses the contents of the subject-matter, submitted to a research at the experimental secondary school in Olomouc-Hejčín. This part is devided into four chapters: the introductory subject of the special theory of relativity is analyzed in the first chapter, the second chapter discusses the Lorentz transformation, the third one deals with the relativistic kinematics and the fourth with the relativistic dynamics. In this research a traditional method of teaching waschoosen, based on the explanation of the Michelson's experiment and the Lorentz transformation and the so called consenquences of this transformation.