

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

S.M. Rytov

Co uvidí a s čím se setká relativistický astronaut

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 5 (1960), No. 6, 728--733

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/138253>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1960

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



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

Obdobně uspořádaného zařízení bylo použito pro nabíjení ionizačních komůrek k provádění dosimetrické kontroly. Bylo použito elektretu z plastické hmoty o průměru 6 cm a tloušťce 3 mm, který měl účinný náboj $6 \cdot 10^{-3} \text{C}$. Kapacita komůrek byla asi 6 pF. Popsaným zařízením bylo snadno dosaženo plné nabití komůrek, to jest asi na 300 V.

Na stejném principu jsou konstruovány generátory pulsního napětí a napětí střídavého. Jejich schematické uspořádání je uvedeno na obrázcích 8, 9.

Generátor napětíových pulsů je v podstatě výše popsané zařízení se zmechanizovaným pohybem horní elektrody. Při použití stejného elektretu a při kapacitě vzdálených elektrod 3 pF dává generátor pulsy o napětí 2000 V. Generátor střídavého proudu je opět obdobou popisaného zařízení, pouze kmitavý pohyb horní elektrody je nahrazen pohybem rotačním.

Elektretový mikrofon je jedno z prvních zařízení, kde bylo prakticky využito elektretového jevu. Konstrukční provedení obvykle používané je uvedeno na obrázku 10.

Elektretový mikrofon pracuje stejně jako mikrofon kapacitní. Jeho výstupní napětí je závislé na kapacitě, která jej zatěžuje.

Obdobným způsobem je možno konstruovat i elektretové sluchátko.

Vlivu radioaktivního záření na účinný náboj elektretu se využívá při konstrukci různých zařízení určených k měření dávek záření.

Použitá literatura

Gutman, *Elektret*, Rev. Mod. Phys. č. 3, sv. 20 str. 457, 1945.

Wiswman-Linden, *Elektrety*, Electr. Engin. č. 10, str. 869, 1953.

Gemant, *Použití elektretů v elektrických přístrojích*. Rev. Sci. Instr. č. 2, sv. 11, str. 65, 1940.

Gubkin, *K otázce fenomenologické teorie elektretu*. ŽTF č. 9, str. 1969, 1957.

Wieder, Kaufman, *Plastické elektrety*. Journ. Appl. Phys. č. 3, sv. 24 str. 156, 1953.

Neruda, *Laboratorní příprava permanentně polarisovaných dielektrik pro potřeby dosimetrie*. Diplomová práce VTA-AZ.

Barnet, *Zařízení pro měření pole permanentně polarisovaných dielektrik*. Diplomová práce VTA-AZ.

CO UVIDÍ A S ČÍM SE SETKÁ RELATIVISTICKÝ ASTRONAUT¹⁾

Prof. S. M. RYTOV

Let člověka k jiným hvězdám Galaxie přestal být dnes čistou utopií. Zůstává sice zatím jen předmětem matematických výpočtů a technických hypotéz (fotonové rakety), na druhé straně však člověk již začal do vesmíru pronikat natolik, že otázka jeho cesty do vzdálených oblastí vesmíru má reálný podklad.

Vzdálenosti hvězd, i hvězd nám nejbližších, jsou z hlediska mezihvězdných letů tak obrovské, že i když na otázku, může-li je člověk překonat, nelze odpovědět kategorickým „ne“, je jasné, že bude třeba rychlostí blízkých rychlostí světla, a že i pak časovým měřítkem takových cest budou roky a generace.

Věda a technika jdou vpřed rytmem, zarážejícím někdy dech. Perspektivy budoucnosti jsou nedozírné. Přesto můžeme dnes, za dnešního stavu techniky, vidět některé obtíže a překážky, s nimiž se „relativistický astronaut“ může na mezihvězdné výpravě setkat.

To je předmětem následujícího článku.

Neznáme makroskopické těleso, které by se pohybovalo rychlostí souměřitelnou s rychlostí světla. Přesto může být zajímavé a poučné podívat se na svět očima člověka,

¹⁾ Проф. С. М. РЫТОВ, *Что увидит и с чем столкнется astronaut, летящий с около-световой скоростью*, Priroda, č. 4, 1960.

letícího v kosmické lodi rychlostí blízkou rychlosti světla — v relativistické kosmické lodi. Mysleme si proto, že se nějakým způsobem podařilo takovou loď postavit.

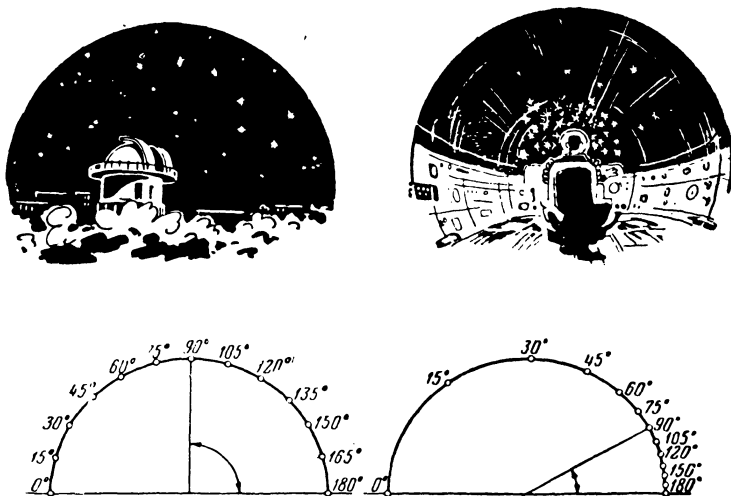
Pohled, který se cestovatel z takové lodi naskytne, bude jistě nezvyklý. Přímoú zkušenosť tu samotřejně nemáme, neboť s relativistickými rychlostmi se zatím setkáváme jen v mikrokosmu. Jak bude vyhlížet hvězdné nebe za takového letu? Jak bude působit mezihvězdné prostředí, mikrometeority, mezihvězdný prach, mezihvězdný plyn?

Hvězdné nebe

Mysleme si vztažnou soustavu spjatou se Zemí. Tuto soustavu můžeme prakticky pokládat za nehybnou vzhledem ke stálícím (pohyby Země, řádově desítky kilometrů za vteřinu, jsou vzhledem k vzdálenostem stálíc zanedbatelné). Mysleme si dále, že s kosmickou lodí, letící rychlostí souměřitelnou s rychlostí světla, je rovněž spjata vztažná soustava, která se tedy vzhledem k Zemi, to jest vzhledem k první, nehybné vztažné soustavě pohybuje touto rychlostí. Ze speciální teorie relativity plyne, že světlo ze stálíc dojde k pozorovateli v kosmické lodi pod jiným úhlem než k pozorovateli na Zemi (aberrace). Kromě toho se pro pozorovatele v kosmické lodi změní frekvence tohoto světla (Dopplerův efekt). Hvězdné nebe bude tedy pozorovatel v kosmické lodi vidět jinak než pozorovatel na Zemi.

Mysleme si nyní, že pozorovatel v nehybné soustavě (na Zemi) vidí hvězdy rovnoměrně rozloženy na obloze, řekněme v úhlech $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, \dots, 165^\circ, 180^\circ$ (obr. 1 vlevo). Pro pozorovatele v kosmické lodi se hvězdy v důsledku aberrace zhustí před lodí²⁾ a rozptýlí za ní. Poletí-li kosmická loď rychlostí 260000 km/sec ($\approx 86,6\%$ rychlosti světla), budou hvězdy na hvězdném nebi pro pozorovatele zhuštěny do kužele o vrcholovém úhlu asi 30° (obr. 1 vpravo). Kdyby kosmická loď dosáhla rychlosti 95% rychlosti světla, zmenší se tento úhel na 18° .

Pro pozorovatele v kosmické lodi se změní také spektrální složení světla, které bude pro něj viditelné (Dopplerův efekt). Existuje jeden jediný směr pozorování, v němž toto spektrální složení bude stejné jako pro pozorovatele na Zemi (v nehybné soustavě). Je-li



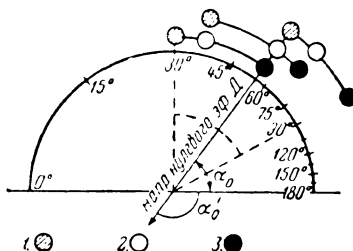
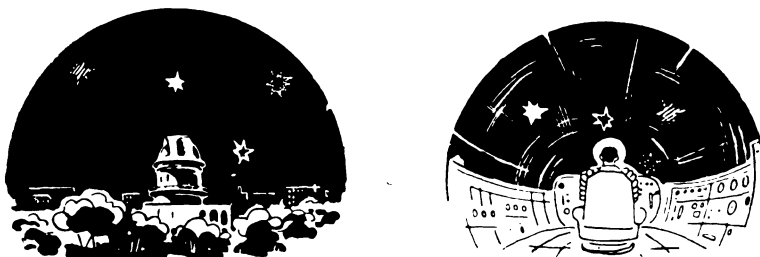
Obr. 1.

rychlost lodi 260000 km/sec, svírá tento směr v nehybné soustavě se směrem letu lodi úhel $54^\circ 50'$, tedy v soustavě spjaté s kosmickou lodí úhel $125^\circ 10'$. U všech hvězd, které budou vidět v úhlu menším než $54^\circ 50'$, dojde k zmenšení frekvencí, tedy k spektrálnímu

²⁾ Slovem „před“ lodí resp. „za“ lodí budeme zde i dále rozumět před a za ve směru letu, to jest „před přídí“ a „za zádí“. Pozn. překl.

posuvu k červené části spektra (rudý posuv). U hvězd, pozorovaných v úhlu větším než $54^{\circ}50'$, dojde k spektrálnímu posuvu směrem k fialové části spektra (fialový posuv). Hvězdy, které bude možno pozorovat právě pod úhlem $54^{\circ}50'$, zachovají svoje spektrum.³⁾

V obraze 2 je znázorněna situace pro kosmickou loď, letící rychlostí 260000 km/sec. Vlevo nahoře pozorujeme se Země (nehybná soustava) tři hvězdy: rudou (1, šrafováno), zelenou (2, nešrafováno) a fialovou (3, plně). Kromě toho je nahoře napravo naznačena



Obr. 2.

hvězda neviditelná (infračervená). Vpravo v obraze je situace, jak ji vidí astronaut: hvězdy se především stáhly k přídi kosmické lodi, a dále změnilly barvu — fialová se stala neviditelnou, zelená fialovou, rudá zelenou a neviditelná se stala rudou. Dole je schéma situace. Kosmická loď letí vpravo. Úhel $\alpha_0 = 54^{\circ}50'$, $\alpha_0' = \pi - \alpha_0$. Ve směru nulového Dopplerova efektu zachovává hvězda svou barvu jako na Zemi. Ze schématu je vidět, jak se mění barva hvězdy, zvětšuje-li se nebo zmenšuje-li se úhel α_0 , v němž světlo z hvězdy přichází k pozorovateli v kosmické lodi. Zvětšuje-li se α_0 , přechází rudá v zelenou až fialovou, zelená ve fialovou. Zmenšuje-li se úhel α_0 , přechází zelená v rudou, fialová v zelenou až rudou.

Dojde i k jevu, že světlo, pro pozorovatele v nehybné soustavě neviditelné, bude pro astronauta viditelné a obráceně. Při naší rychlosti 260000 km/sec uvidí astronaut za sebou světelné zdroje, vysílající ultrafialové záření o vlnové délce od 1070 Å do 2140 Å, před sebou světelné zdroje, vysílající infračervené světlo o vlnové délce od 14950 Å do 29900 Å.

³⁾ U hvězd jejichž světlo přichází v nehybné vztažné soustavě pod úhlem 90° , dojde v důsledku Dopplerova efektu v pohybující se vztažné soustavě ke krácení vlnové délky $\sqrt{1 - \beta^2}$ krát ($\beta = \frac{v}{c}$, c je rychlost světla, v rychlost pohybu pohybující se vztažné soustavy — kosmické lodi).

U hvězd, jejichž světlo přichází v nehybné soustavě pod úhlem $\alpha = \arccos \beta$, ($\beta = \frac{v}{c}$), dojde v pohybující se vztažné soustavě k tak zvanému příčnému Dopplerovu efektu, to jest pozorovatel vidí hvězdu ve směru kolmém ke směru letu. Vlnová délka světla se přitom zvětší $\sqrt{1 - \beta^2}$ krát (jde o čistě relativistický efekt). Vlnová délka světla, přicházejícího ze zdroje přesně před resp. přesně za kosmickou lodí se zkrátí resp. prodlouží $\sqrt{\frac{1 + \beta}{1 - \beta}}$ krát, ($\beta = \frac{v}{c}$).

Setkání s hvězdou

Podle speciální teorie relativity se rozměr pohybujícího se tělesa ve směru pohybu zkracuje. Koule přejde takto v elipsoid⁴⁾. Tak budou skutečně rozloženy body koule v každém okamžiku vzhledem k nehybnému pozorovateli. Jinak se bude jevit astronautovi, neboť světlo, jež zachytí jeho oko v určitý okamžik, potřebuje různé doby k proběhnutí cesty od různých bodů pohybujícího se tělesa k oku. Jde tu znovu o aberaci, avšak nikoli vzhledem k „nekonečné“ vzdálenému zdroji (stálici), nýbrž vzhledem ke zdroji relativně velmi blízkému.

Předpokládejme, že pozorovatel je v klidu v bodě O vztažné soustavy K (což fyzikálně situaci nemění, úvahu však zjednodušuje), a že kolem něho letí bodový zdroj světla rychlostí v , rovnoběžně s osou x a v jisté „záměrné“ vzdálenosti od osy y . V okamžiku t podle hodin v soustavě K , kdy zdroj je v bodě Q , vidí jej pozorovatel v předcházející poloze Q_τ , kterou zdroj měl v okamžiku τ ($\tau < t$), přičemž $t - \tau$ je doba, po kterou se šíří světlo z bodu Q do bodu O ($t - \tau = \frac{R}{c}$).

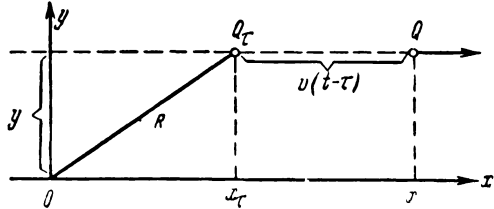
Skutečná souřadnice x a zdánlivá souřadnice x_τ se liší tedy o $v(t - \tau)$. Z toho lze vypočítat zdánlivou polohu každého bodu tělesa ze známé skutečné polohy v okamžiku t .

V každém okamžiku t podle hodin pozorovatele v soustavě K je skutečný tvar kolem něho letící koule elipsoid (jak plyne z Lorentzových transformací), to jest řez tělesa rovinou (x, y) je elipsa o středu v bodě $x = vt$, $y = a$, a o poloosách ρ a $\rho\sqrt{1 - \beta^2}$, $\rho = vc$ (obr. 4).

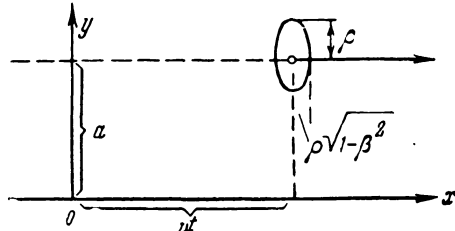
Zdánlivý tvar tělesa bude podstatně odlišný a proměnlivý s časem. V obraze 5 jsou dvě skutečné polohy tělesa (čárkované elipsy 1 a 2) a odpovídající jim polohy a viditelné tvary (plné elipsy 1 a 2) za předpokladu, že rychlost kosmické lodi bude 260000 km/sec a že vzdálenost pozorovatele od trajektorie středu tělesa je rovna pěti poloměrům koule. Elipsy 1 odpovídají poloze tělesa proti pozorovateli, elipsy 2 poloze proti bodu O .

Zdánlivý tvar tělesa je ovál, který mění svou formu i postupnou rychlost.

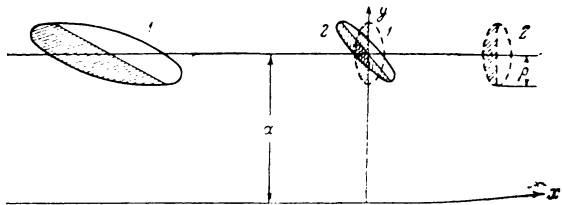
Podivuhodné změny tvaru nebeského tělesa, které letí kolem astronauta a které jsme popsali, nelze ovšem vidět přímo, bez změření vzdálenosti různých bodů jeho povrchu od pozorovatele. Projekce útvarů, o nichž jsme mluvili, na oblohu budou vždy kruhové kotouče. Relativistické zploštění koule ve směru jejího pohybu vizuálně nelze pozorovat⁵⁾.



Obr. 3.



Obr. 4.



Obr. 5.

⁴⁾ o poloosách v poměru $1 : \sqrt{1 - \beta^2}$, ($\beta = \frac{v}{c}$).

⁵⁾ Viz T. Terrell, *Invisibility of the Lorentz Contraction*, Phys. Rev. Letters, vol. 3, 1959, No 10, p. 501.

U hvězdy letící kolem astronauta se ovšem mění také její spektrum, a to, blíží-li se, je vidět v důsledku svého infračerveného záření, vzdaluje-li se, je vidět v důsledku svého ultrafialového záření. Tento proces je volnějši než změna formy. Při rychlosti 260000 km/sec proběhne asi za 20 minut, podle astronautových hodiněk asi za 10 minut.

Relativistický prach a vítr

Kosmická loď se bude za letu vesmírem nacházet ve stálém toku mikroskosmických, mikroskopických a makroskopických částic (mezihvězdný plyn, mezihvězdný prach, mikrometeority ap.). Zanedbáme-li vlastní rychlosti těchto částic (které jsou vzhledem k rychlosti kosmické lodi velmi nepatrné), můžeme říci, že nalétají na loď její rychlostí. Kinetická energie mikrometeoritu o hmotě 1 mg je při této rychlosti asi 21 miliard kalorií, což by stačilo k přeměně cca 30 tun ledu v páru. Impuls takového tělíska je 520 kgm/sec, což je asi tolik, kolik činí impuls cyklisty, jedoucího rychlostí 30 km/sec.

Odhadněme, jaká je kinetická energie jednoho nukleonu v mikrometeoritu ve srovnání s vazebními silami v atomovém jádře.

Při rychlosti 260000 km/sec je energie jednoho nukleonu až jedna miliarda eV, zatím co (u prvků s atomovou vahou větší než 20) energie vazebních sil v jádře je jen asi 8 milionů eV. Z toho plyne, že tyto vazební síly můžeme zcela zanedbat i v meteoritu, i v materiálu, z něhož je kosmická loď postavena. Atomy mikrometeoritu se zařiznou do pláště kosmické lodi jako dávka těžkých kosmických částic, a každý bude vydávat svou energii prakticky nezávisle na ostatních.

Energie několika miliard eV na nukleon odpovídá měkkému kosmickému záření, to znamená, že doběh jader železa, křemíku ap., vletávajících takovou rychlostí do (stejně hustých) materiálů, z nichž je postavena kosmická loď, je řádově centimetry nebo nejvýše decimetry. Pak se jejich energie spotřebuje na tvoření ještě měkčích částic a na konec budou částice v důsledku velkých ionizačních ztrát pohlceny tělesem kosmické lodi. Setkání s mikrometeoritem o hmotě 1 mg, měl-li by v cestě dostatečně velkou masu kovu, by znamenalo katastrofický tepelný výbuch celé lodi.

Účinek srážky s menším tělískem bude ovšem úměrně slabší, zato takových srážek bude více. Průměrná hmota mezihvězdného prachu je pravděpodobně 10^{-9} až 10^{-11} g, průměrná hustota této látky v Galaxii je řádově 10^{-25} g/cm³. Při rychlosti 260000 km/sec dopadne na povrch kosmické lodi mezihvězdného prachu $2,6 \cdot 10^{-15}$ g/cm²sec. To odpovídá energii asi 3,4 kal/cm²min, to jest téměř dvakrát tolik, kolik činí sluneční konstanta⁶⁾. Předpokládáme-li, že úplný povrch kosmické lodi je dvacetkrát větší než obsah jejího příčného řezu (největšího), a předpokládáme-li dále, že vyzařovací schopnost povrchu lodi je o řád menší než u dokonale černého tělesa, dojde k tepelné rovnováze při teplotě pláště kosmické lodi asi 100°C. Zvětší-li se koncentrace mezihvězdného prachu desítkrát (ve srovnání s průměrnou koncentrací), zahřeje se kosmická loď na 400°C⁷⁾.

Kosmická loď se na své cestě vesmírem setká také s mezihvězdným plynem, hlavně s vodíkem, jehož střední hustota v Galaxii je o řád vyšší než střední hustota mezihvězdného prachu — cca jeden atom vodíku na jeden krychlový centimetr (asi 10^{-24} g/cm³). Zde přirozeně vzniká myšlenka, při jakých rychlostech by bylo možno využít tohoto plynu pro turboreaktivní pohon kosmické lodi⁸⁾. Kdyby to bylo možné, kompensoval by se tím částečně odpor mezihvězdného plynu. Velká svízel je však, jak se zdá, jinde. Pro relativistickou raketu je mezihvězdný plyn tokem protonů s energiemi většími než 10^9 eV, to jest tokem kosmických částic, přičemž intenzita tohoto toku je řádově 10^{10} částic na 1 cm² za vteřinu. Porovnejme s intenzitou kosmického záření pro nerelativistického pozorovatele (na zemském povrchu), která je všude všude dvě částice na čtvereční centimetr za vteřinu. I za předpokladu, že kosmická loď by byla vyzbrojena proti rozrušování materiálů její konstrukce a proti zahřívání, zůstává skutečnost obrovského kosmického ozařování, převyšujícího 10^{10} krát obyčejnou „normu“, a schopného v okamžiku zničit všechno živé.

⁶⁾ Sluneční konstanta je počet kalorií, jež přicházejí ze Slunce na 1 cm² povrchu kolmého ke směru slunečních paprsků a nacházejícího se na hranici zemské atmosféry. Průměrně činí 1,94 kal/cm² min.

⁷⁾ Otázka zahřívání tělesa kosmické lodi je ve skutečnosti složitější. K velkým energetickým ztrátám může dojít na příklad roentgenovým zářením.

⁸⁾ Viz J. R. Pierce, *Relativity and Space Travel*, Proc. Inst. of Radio Eng., vol. 47, 1959, No 6, p. 1053.

Vidíme, že konstrukce dostatečně efektivního motoru pro relativistickou astronautiku není jediným podstatným problémem. Neméně důležité je najít způsoby, jak „čistit“ kosmickou cestu před lodí, to jest buď odstranit z cesty částice — mikrokosmické i makrokosmické — nebo najít vůči nim účinnou ochranu. Domníváme se, že úloha není o nic snadnější, než postavit fotonový motor.

Zkráceně a volně přeložil dr. Josef Veselka