

Časopis pro pěstování matematiky a fysiky

Josef Štěpánek

O zkapalnění uhlíku. [I.]

Časopis pro pěstování matematiky a fysiky, Vol. 47 (1918), No. 2-3, 221--238

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/122326>

Terms of use:

© Union of Czech Mathematicians and Physicists, 1918

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>

O zkapalnění uhlíku.

Žákům středních škol píše prof. Dr. Josef Štěpánek.

Učili jste se ve fyzice již v nižších třídách, že uhlí a tuha (grafit) jsou látky netavitelné.*) Profesorovi fyziky na universitě ve Vratislavi *Dru. Ottovi Lummerovi*, slavnému badateli v oboru záření tepelného, podařilo se však v posledních letech po obtížných a dlouho marných pokusech docílit zkapalnění i čistého uhlíku. Pokusy tyto vzbudily neobyčejný zájem i v těch kruzích, které obvykle badáním vědeckým nevěnují mnoho zájmu, totiž v kruzích finančních.

Jak jest vám známo, jest uhlík prvek alotropický, vyskytuje se volný uhlík v přírodě ve dvou videch (modifikacích) krystalických jako tuha (grafit) a diamant, dále jako uhlík amorfni a mimo to v četných sloučeninách anorganických i organických. Poznatek, že nejvzácnější drahokam diamant jest čistým uhlíkem bezbarvým, jež tušili již někteří učenci ve století XVIII. a nezvratně dokázali až francouzští badatelé *Dumas* a *Stas* r. 1841, byl příčinou, že pokusy o tání uhlíku vyvolaly touhu docílit snadné výroby diamantů umělých. Tato snaha byla také skutečně hlavní pohnutkou všech dřívějších pokusů o zkapalňování uhlíku, jichž povšimneme si nejdříve.

I.

R. 1849 snažil se docílit roztavení uhlíku *C. Despretz*, profesor fyziky na Sorbonně v Paříži. Podroboval největšímu tehdy docílitelnému žáru elektrického oblouku, vzbuzeného proudem ze silné baterie článků, různé druhy uhlíku, totiž uhlí retortové, anglický grafit, antracit, uhlí zjednané pálením bílého cukru i kanditového cukru a saze, a stupňoval žár ještě tím, že současně ze druhé baterie vysílal zkoumaným materiálem proud, jenž zahříval jej svým teplem, tak zvaným Jouleovým, které proud elektrický budí v proudovodiči, jímž probíhá. Docílil toho, že různé ty druhy uhlíkové proměnily se mu v grafit, po případě se dva různé druhy spolu spájely, ale přesvědčiti se,

*) Viz na příklad: Brož-Petřra, Fyzika pro nižší reálky, str. 20.

že uhlík při tom prošel skupenstvím kapalným, se mu nepodařilo, ač sám byl toho pevného mínění, že spájení to nastalo za stavu kapalného.

Nejznámější a nejdůležitější pokusy o tavení uhlíku provedl v letech 1893 a následujících vynálezce elektrické peci obloukové *Jindřich Moissan*, vynikající chemik francouzský a profesor vyšší farmaceutské školy v Paříži. Cílem hojných pokusů Moissanových bylo přesvědčiti se, zda-li uhlík tak jako většina látek tuhých mění, zahříván jsa, své skupenství tuhé v kapalně a pak dalším zahříváním kapalně v plynné, či zda-li tvoří výjimku, přecházeje ze skupenství tuhého žářem přímo v plynné sublimací, jak nasvědčovaly tomu první výsledky Moissanova badání i vznik uhlí retortového. Hlavní pokusy Moissanovy byly tyto:

1. Kelímek uhlový s víčkem vložil do elektrické peci a zahříval žářem oblouku tvořeného proudem o napětí 80 voltů a intenzitě 1200 ampérů po delší čas. Když vše vychladlo, shledal Moissan, že víčko proměnilo se v grafit, ale že kelímek s víčkem se neztavil.

2. Vložil kousek uhlí do uhlové roury a rozžhavil rouru buď uvnitř, nebo vně mocným obloukem elektrickým; i když užito bylo proudu 1000 amp. při 90 voltech napětí, nepodařilo se docílití více než to, že roura byla žářem provrtána v místech, kde nejvíce na ni oblouk působil, ale ani okraje otvoru ani vložený kus uhlí nejevily známek, že by byly bývaly roz-taveny.

3. Kus zuhelnatělého cukru byl v uzavřeném kelímku podroben žáru oblouku proudu 1000 amp. a 70 voltů; po vychladnutí shledán v kelímku grafit, ale byly na něm znáti ještě stopy po dutinkách, které zanechaly unikající uhlovodíky, změně ve skupenství kapalně však nenasvědčovalo nic.

4. Podobné pokusy byly provedeny s grafitem, dřevěným uhlím a uhlím retortovým s výsledkem obdobným; vznikl vždy grafit, ale po každém pokusu zůstal zachován tvar vloženého kusu, což též přechodu ve stav kapalný neodpovídalo.

5. Při pokusech předešlých bylo užito elektrod z nečistšího uhlí a také ty nevykazovaly ani po proudu 2200 amp. změn, jež by svědčily alespoň dočasněmu jejich zkapalnění. I když

upravil Moissan konec elektrody z dutého válečku uhlového a nasadil lehce na uhlovou elektrodu, nepřítavil se k ní, pokud užito bylo čistého materiálu uhelného.

Na základě všech těchto výsledků pronesl Moissan r. 1896 tvrzení, že uhlík přechází ze skupenství tuhého přímo v plynné a při obyčejném tlaku barometrickém vůbec nekapalní, že však dalo by se snad docílit jeho zkapalnění při velmi značných tlacích. Tak skončily tyto památné pokusy výsledkem negativním a odňaly na delší dobu jiným badatelům chuť pokoušeti se o to, co nepodařilo se Moissanovi, badateli to, jenž přece nedávno před tím překvapil veřejnost zprávou o vzniku umělých černých diamantů z čistého zuhelnatělého cukru, který rozpustil v roztaveném železe a pak směs prudce ochladil. Názor o netavitelnosti uhlíku ovládl pak ve vědeckých kruzích úplně.

Až po devíti letech r. 1905 objevuje se nová zpráva o možnosti kapalnění uhlíku v „Annalen der Physik“ ve svazku 17. *Ferdinand Braun* popisuje tam své pokusy o rozprašování tenkých drátů položených mezi dvěma skleněnými deskami, vedle se jimi výboj velké baterie (o 48 členech) láhví leydských. Místo drátků vložil mezi skla uhlové vlákénko z žárovky, tlusté 0·052 mm, a pustil jím výboj. Když pak drobnohledem zkoumal výsledky pokusu, shledal mezi skly droboučké kuličky uhlíkové, které měly podobný vzhled jako kuličky vzniklé z roztaveného kovu. Zda-li při tom pokuse čistý uhlík skutečně se roztavil a v kuličky slil, lze však těžko rozhodnouti, ježto Braun nepodává analýsy ani materiálu vlákna žárovkového, upotřebeného k tomu pokusu, ani objevivších se kuliček.

Rovněž k opačnému názoru, než byl náhled Moissanův, dospěl na základě svých pokusů z roku 1909 a 1910 *La Rosa*. Soudil, že příčinou nezdaru byla u Moissana ještě ne dosti vysoká teplota v jeho elektrické peci, a proto hleděl užití zdroje vydatnějšího. Jest vám známo, že koncem XIX. století objevena byla profesorem *Hermannem Theodorem Simonem* v Gotinkách znějící oblouková lampa, to jest lampa, v níž periodický výboj elektrický dává vznik periodickému kmitání vzduchovému, jež naše ucho vnímá jakožto zvuk. Ze spektrálních pozorování činěných na samoznějícím oblouku elektrickém, soudil *La Rosa*, že má vyšší teplotu než obyčejný oblouk, a v tomto znějícím

elektrickém oblouku zkoušel tavití uhlík. Vložil uhlové elektrody oblouku do uzavřeného kelímku proti sobě a na dolní, kladnou elektrodu dal prášek z čistého zuhelnatělého cukru. Když vyzkoušel vhodné množství prášku, aby tím oblouk nebyl rušen, objevilo se záhy zkorovatění na uhlových elektrodách, které zůstaly jinak neporušeny. Střední část této kůry, — La Rosa nazývá ji „inkrustace“, — která byla ve styku s obloukem, byla čistým lesklým grafitem, na němž nebylo již znáti struktury dřívějších uhelných částiček. La Rosa přesvědčil se též, zda-li snad vytvořená kůra nebyla způsobena nečistotou uhlového prášku. Zjistil, že po dokonalém spálení na vzduchu činil zbytek popela z uhelného prášku 0·08% celkové váhy, z grafitové kůry pak 0·05%, kdežto z elektrodových uhlíků samých byl popelový zbytek 0·33%, čímž čistota použitého materiálu byla dostatečně prokázána. Z toho soudil La Rosa, že kůra na elektrodách vznikla z čistého uhlíku roztaveného v droboučké kapičky, jež pak vychladnuvše přitavily se na elektrody, některé dokonce v podobě drobounkých krystalů soustavy krychlové na způsob krystalů diamantových.

Později r. 1911 zkoušel La Rosa tavití uhlík též teplem Jouleovým, vyvinutým silným proudem, a shledal, že slabší uhlové tyčinky vlastní vahou se při tom prohýbají; z toho též odvozoval, že přechází tu uhlík ve skupenství kapalné, ačkoliv soud tento není zcela oprávněn, jak *Watts* a *Mendenhall* hned mu namítali poukazující, že prohnutí tyčinek svědčí jen o zvětšení plasticity uhlíku žárem, nikoli však ještě o jeho roztavení.

A tak i tyto pokusy La Rosovy jen z výsledků svých dovoľovaly tušiti, že uhlík skutečně tu skupenství kapalného nabyt, ale dokázati existenci kapalného uhlíku se jim nepodařilo.

II.

Přesvědčivý důkaz zkapalnění uhlíku provedl až r. 1913 a 1914 prof. *Dr. Otto Lummer*. První zprávu o svých pokusech podal v přednášce „O kapalném stavu uhlí“, kterou konal v zasedání přírodovědecké sekce „Slezské společnosti pro domácí kulturu“ dne 26. listopadu r. 1913 ve Vratislavi, při níž také kapalné skupenství uhlíku předvedl. Byl pak jednak rozhovorem

konaným po přednášce jejími účastníky, jednak tiskem upozorněn na některá nutná doplnění svých pozorování, pracoval neúměrně dále, jak sám praví dnem i nocí, aby existenci kapalného stavu uhlíku nezvratně dokázal. O svých pracích vydal soubornou zprávu v brožuře: „Verflüssigung der Kohle und Herstellung der Sonnentemperatur“, která vyšla koncem roku 1914 v Brunšvíku a na základě níž chci vám o hlavních jeho pokusech sdělení učiniti.

Lummerovy pokusy lze roztřídit ve čtyři skupiny. První dvě skupiny tvořily měření a pokusy přípravné a týkaly se studia obloukového výboje elektrického, skupinu třetí tvoří vlastní pokusy zkapalňovací a skupinu čtvrtou pokusy o docílení velmi vysokých teplot.

Již od prvního objevu elektrického oblouku slavným anglickým chemikem *Davym* r. 1813 bylo známo, že teplota pozitivního kráteru elektrického oblouku jest nejvyšší teplota, které lze docílití pozemšťanům umělými prostředky. Protože na eventuální tavení uhlíku bylo třeba zahřátí jej na teplotu velmi vysokou, bylo prof. Lummerovi vyzkoumati, zda-li a jak teplota v elektrickém oblouku závisí na intenzitě proudu, délce oblouku, tlaku a jakosti prostředí, ve kterém se oblouk tvoří.

Byl dříve všeobecně za správný uznáván názor, že sebe větším zvyšováním elektrické energie dodávané oblouku nezvýší se při normálním tlaku 1 atmosféry teplota kladného kráteru nad určitou teplotu, při které se uhlík vypařuje a přechází tak ze skupenství tuhého přímo v plynné. Teplotu tu nazval „teplotou vypařování uhlíku“ slavný francouzský fysik *J. Violle* roku 1882 a také ji první měřil. Kdyby názor uvedený byl správný, nebyla by teplota uhlíků v oblouku elektrickém závislá ani na intenzitě proudu, ani na délce oblouku. Měření teploty kladného uhlíku v oblouku bylo později vykonáno více, ale výsledky jejich se dosti značně rozcházel, což při obtížnosti stanovití tak vysoké teploty nemůže ani překvapovati.

Z novějších měření jsou hlavní ta, jež provedli *C. W. Waidner* a *G. R. Burgess* r. 1904 a našli, že teplota kladného uhlíku stoupá ze 3690° při 15 ampérech na 3770° při 30 amp.; teploty udány jsou ve stupnici absolutní, jejíž nulový

bod jest, jak vám známo, 273° pod bodem mrazu čili pod 0° stupnice Celsiovy.

O dvě léta později zjistil *M. Reich* v Gotinkách na lampě, jíž procházel oscilační proud, že teplota obou uhlíků na síle proudu ani na délce oblouku nezávisí a podobně že jest tomu i při proudu stálém, pro nějž určil teplotu uhlíku kladného 3700° absol. stupnice a záporného 3140° téže stupnice. K svým měřením užíval Reich dvojí metody, měřil jednak optickým pyrometrem, jednak metodou fotografickou.

Prvá metoda, jak již jméno ukazuje, dovoluje určovati teplotu vysokých zářů na základě pozorování optických. Když totiž byla pracemi Wienovými, Lummerovými, Pringsheimovými a Kurlbaumovými koncem XIX. století stanovena zákonitost mezi délkou vlny vyslaného záření a absolutní teplotou zářícího zdroje, a dále mezi úhrnnou energií vyzařovanou zdrojem a jeho teplotou, bylo možno z měření optických stanoviti absolutní teplotu zdroje. *) Místo měření energie zdrojem vyslané provádí se pak určování plošné světlosti na svítícím zdroji a užije se vztahů, které Lummer a Pringsheim našli mezi světlostí subjektivně zrakem vnímanou a teplotou zdroje. Ježto pak některé ze zmíněných vztahů platí přesně jen pro záření tělesa absolutně černého, jak definoval je slavný německý fysik *G. Kirchhoff* roku 1859, to jest tělesa, jež veškeré záření na ně dopadající z jiných zdrojů úplně absorbuje, žádného neodrážejíc a nepropouštějíc, ale samo nejdokonaleji září, jsou zahříváno, bylo předpokládáno při měřeních Reichových, že uhlíky obloukové jsou takovými absolutně černými tělesy a určené teploty platí tedy jen za tohoto předpokladu; prof. Lummer nazývá je „černými“ teplotami uhlíků, proti kterýmž jsou skutečné teploty ještě vyšší.

Metoda fotografická soudí z černání fotografického papíru nebo desky o teplotě zdroje vysílajícího záření, jímž černání to bylo způsobeno.

Přihlížeje k metodě výsledků měření dřívějších, předložil si prof. Lummer při svých předběžných měřeních dvojí úlohu:

*) Podrobnější poučení o optických pyrometrech najdete v „Thermice“ pana dvor. rady Dra Č. Strouhala na str. 43. a násled.

1. rozhodnouti, je-li skutečně teplota kladného uhlíku v oblouku při úplném rozežhavení jeho konce *stálou* a vždy vyšší než teplota uhlíku záporného a

2. určití zákony záření uhlíku a na základě jich stanoviti *skutečnou* teplotu kráteru v obloukové lampě.

III.

Aby mohla býti podána spolehlivá odpověď k otázce první, bylo třeba pracovati takovou metodou, která dovoluje zjistiti i malá kolísání teploty při vysokém žáru a na malé ploše. K tomu hodil se výborně *interferenční fotometr a pyrometr*, který si již r. 1901 prof. Lummer sestavil. Hlavní jeho částí jest skleněná kostka, rozříznutá úhlopříčným řezem ve dva trojboké hranoly, jež jsou k sobě podél úhlopříčného řezu přiloženy tak, že mezi nimi povstává nízká mezera vzduchová, všude stejně tlustá. V této vzduchové mezeře nastává několikerý odraz jednobarvého rovnoběžného světla, jež dopadlo kolmo na bočnou stěnu krychle skleněné; tím vzniklé dráhové diference mezi jednotlivými paprsky dávají podnět k interferenci světla a pozorovatel, který se proti světlu kostkou prošeďšímu dívá, uzří světelné pole prostoupeno interferenčními proužky, *) jež jsou ostře znatelný, když pozorují se okem uvyklým hleděti na nekonečnou vzdálenost nebo pozorovacím dalekohledem zařízeným na nekonečno. Podobný zjev nastává, když světlo dopadá na kostku směrem kolmým k dřívějšímu, takže se musí na úhlopříčném řezu odraziti, aby vycházelo z kostky směrem dřívějších paprsků. Také to světlo následkem dráhových diferencí, způsobených odrazy ve vzduchové vrstvě na rovinných stěnách ji ohraničujících, interferuje a interferenční zjev ten jest doplňkový ke zjevu ve světle prostupujícím, to jest tmavé proužky zjevu ve světle prostupujícím jsou jasné při pozorování ve světle odraženém.

Osvětlí-li se tedy kostka současně dvěma zdroji stejnobarvými na dvou bočných stěnách k sobě kolmých a pozorují-li se oba zjevy současně, vzniká pole úplně světlé, když oba zdroje působí stejně osvětlení, čili jsou-li při stejné vzdálenosti od

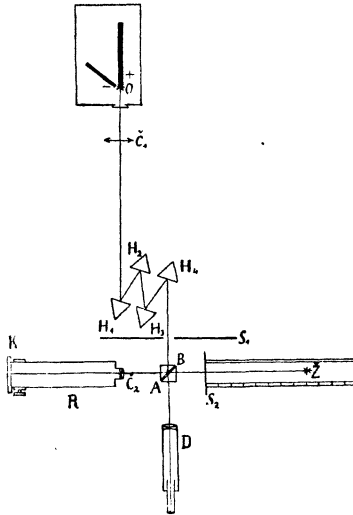
*) Výklad jednoduchých zjevů interference světla podává Mašek-Jeništa-Nachtikalova »Fysika pro vyšší reálky« v díle II. na str. 235. a násl.

kostky stejně intensivní; sebe menší změna intenzity prozradí se pak ihned vznikem interferenčních proužků v zorném poli, jež jsou buď světlé na tmavém pozadí, nebo tmavé na světlém pozadí dle toho, který z obou osvětlujících zdrojů převládá. Nejsou-li oba zdroje stejně zbarveny, nedocílí se úplného vymizení proužků nikdy. Ale i když oba zdroje vysílají světlo přibližně bílé, tedy složené, lze tímto fotometrem pracovati, ježto vytvoří se mezi proužky barevnými jeden proužek skoro úplně achromatický, nezbarvený, jehož vymizení jest pak znamením, že oba zdroje působí stejné osvětlení.

Je-li tedy zkoušení stálost teploty a tedy též svítivosti nějakého zdroje, musí se přirovnávati s jiným stálým zdrojem, za nějž hodí se žárovka, jež osvětluje desku průsvitného skla; posouváním žárovky podél měřítka, jehož dělení, zkusmo zhotovené, může odpovídati již stupnici tepelné pro zkoušený zdroj, docílí se různého osvětlení průsvitné desky, i mění se poloha žárovky tak dlouho, až proužky interferenční vymizejí a na měřítku čte se již hned teplota zkoušeného zdroje.

Prof. Lummer přirovnával svítivost kladného kráteru obloukové lampy, kterou si dal seříditi tak, aby byl kladný uhlík nařízen vodorovně a aby snesla proud až do 150 ampérů, s žárovkou Nernstovou. Celé uspořádání jeho pokusů měřicích znázorňuje schematicky obr. 1. *O* jest oblouk postavený v ohniskové rovině spojné čočky \check{C}_1 , aby z ní vystupovaly paprsky rovnoběžné, jež zeslabí se čtvrtým odrazem na hranolech H_1 , H_2 , H_3 , H_4 , projdou stínítkem S_1 , skleněnou kostkou, hlavní to částí pyrometru, a pozorují se pozorovacím dalekohledem D . Normální zdroj \check{Z} jest posuvný v rouře neprůhledné, na jejímž konci přivráceném ke kostce jest stěna z mléčného skla, která jest zdrojem světla odrážejícího se na řezu AB . Ježto se světlo žárovky od světla oblouku značně liší zbarvením, vložil Lummer ještě před průsvitnou stěnu S_2 desku vhodného modrého skla, čímž připodobnil sobě obě světla. Aby bylo možno též fotografické zachycení pozorovaných zjevů, jest připojena kolimátorová roura R , na jejímž konci jest kaseta K s fotografickou deskou, postavenou v ohniskové rovině čočky \check{C}_2 . Kladný uhlík měl průměr 17.5 až 22 mm, proud byl měřen od 10 do 80 ampérů a uhlíky oddalovány až na vzdálenost 18 mm; bylo-li pozorováno

vždy nejsvětlejší místo uhlíku a docíleno vymizení interferenčních proužků na obraze kráteru vhodným posunutím žárovky Z , zůstal kráter prost proužků při jakékoliv změně síly proudu i délky oblouku, čímž stálost teploty jeho nejžhavějšího místa byla prokázána. Oblouk totiž nezahřívá kráteru na všech místech stejnoměrně, nýbrž vždy to místo nejvíce, kde se právě tvoří, a ježto, jak víte ze školních pokusů, oblouk se po povrchu kráteru často velmi živě pohybuje, mění se i nejsvětlejší místo uhlíku. I když užil Lummer uhlíku kladného majícího jen



Obr. 1.

8 mm v průměru a k němu záporného o 16 mm a proudu 40 amp., zůstala táž světlost a tím i teplota nejjasnějšího místa, které bylo pak ovšem rozsáhlejší.

Aby mohl zjistiti též teplotu záporného uhlíku, vyměnil je oba a učinil slabší vodorovný uhlík záporným a silnější šikmý kladným. Zpravidla jevil se záporný uhlík méně jasným, tedy i méně teplým až o 600° , což posouditi bylo možno z toho, že vymizely-li proužky interferenční na části kladného kráteru současně pozorované, byly zřejmě patrný tmavé proužky na obraze uhlíku záporného a jejich vymizení se docílilo, až když se žá-

rovka Z vzdálila od stěny S_2 . Když se však volí záporný uhlík hodně tenký a oblouk hodně krátký, blíží se teplota záporného uhlíku teplotě kráteru kladného, takže teplota záporného uhlíku veličinou stálou není.

IV.

Aby našel zákony záření žhoucího uhlíku, jichž stanovení tvoří druhou skupinu předběžných pokusů, obrátil svou pozornost profesor Lummer nejdříve ke žhoucímu vláknu uhlovému v Edisonově žárovce. Šlo o to rozhodnouti, zda-li rozežhavené uhlové vlákénko září jako těleso absolutně černé, a lze-li tedy aplikovati na ně zákony o záření tělesa absolutně černého. Z těch hlavní zákon jest *Stefan-Boltzmannův*, nazvaný tak po objevitelích svých profesorech vídeňské university *Josefu Stefanovi*, jenž odvodil jej r. 1879 na základě pokusných dat *Tyndalových*, a *Ludvíku Boltzmannovi*, který dokázal jej theoreticky roku 1884. Zákon ten udává vztah mezi úhrnou energií vysílanou zářícím absolutně černým tělesem, čili tak zvanou integrální emisí abs. černého tělesa a jeho absolutní teplotou a praví, že úhrnná energie jest úměrna přímo čtvrté mocnině absol. teploty. Značí-li S množství energie vyzářené za 1 vteřinu z jednotky povrchové při absolutní teplotě T , lze psátí zákon ten rovnicí

$$S = \sigma T^4, \quad (1)$$

kdež konstanta úměrnosti σ nazývá se absolutní mohutností vyzářování černého tělesa a dle nejnovějších měření vyjádřena v jednotkách tepelných jest

$$\sigma = 1.38 \cdot 10^{-12} \frac{\text{kal.}}{\text{cm}^2 \cdot \text{sec} \cdot (^\circ)^4}.$$

O žárovkovém vlákně žhoucím ve vzduchoprázdne dutině lze předpokládati, že veškerá proudem mu dodávaná energie proměněná v Jouleovo teplo se vydá zářením. Je-li intenzita proudu J amp. a napětí elektrické na koncích vlákna V voltů, jest $0.2388 JV$ kal. teplo proudem ve vlákně vyvinuté za 1 vte-

*) Značka $(^\circ)$ jest volena pro jednotku „stupeň teploty“ dle Strouhalovy „Thermiky“ str. 581.

řinu, ježto 0·2388 kal. jest ekvivalentní práci 1 joulu, a o tom teple tedy dle zákona Stefan-Boltzmannova platí:

$$0\cdot2388 JV = 1\cdot38 \cdot 10^{-12} \cdot P \cdot T^4, \quad (2)$$

značí-li P povrch vlákna ve čtverečních cm a lze-li vlákno považovati za těleso absolutně černé. Aby správnost tohoto předpokladu odůvodnil, měřil prof. Lummer teplotu vlákna při určitém zatížení proudovým, přirovnáváje jeho žár s žářem povrchu uhlové roury, zahříváné též proudem elektrickým ve zředěném prostoru, jejíž teplotu určoval vloženým thermoelektrickým článkem *Le Chatelierovým*, sestaveným z platiny a slitiny platiny s rhodiem, k měření vysokých teplot.*)

Přirovnávání prováděl takto: Hledě pozorovacím dalekohledem na rozžhavené vlákno žárovky, za níž byla uvedena roura, měnil sílu proudu procházejícího rourou tak dlouho, až vlákno žárovky se ztrácelo na ploše rozžhavené roury. To bylo znamením, že teplota roury vyrovnala se teplotě vlákna. Když provedl Lummer řadu měření pro různé intensity a napětí proudu žárovkou jdoucího a ke každé hodnotě teploty měřené vypočítal teplotu z rovnice (2), přesvědčil se, že hodnoty vypočtené jsou vždy menší než měřené, a to průměrně o 15%. Z toho vyvodil pak důsledek, že uhlové vlákno v žárovce září jako *těleso šedé*, rozuměje šedým tělesem to, jež pro každou délku vlny vyzařuje méně energie než těleso absolutně černé téže teploty, a to ve *stejném* poměru méně pro *všecky* délky vlny. Platí tedy pro záření šedého tělesa zákon podobný Stefan-Boltzmannovu, jen jest dosaditi místo σ jinou konstantu úměrnosti, která pro každou šedou hmotu má jinou hodnotu. Z měření svých vypočítal prof. Lummer pro uhlové vlákno hodnotu té konstanty

$$0\cdot725 \cdot 10^{-12} \frac{\text{kal.}}{\text{cm}^2 \cdot \text{sec} \cdot (^\circ)^4}$$

a pak měřené hodnoty teploty vlákna a počítané z rovnice:

$$0\cdot2388 JV = 0\cdot725 \cdot 10^{-12} \cdot P \cdot T^4 \quad (3)$$

byly v úplné shodě.

*) O měření vysokých teplot články thermoelektrickými poučíte se ve školní fysice Mašek-Jeništa-Nachtikalové v díle II. pro vyšší reálky na str. 68., podrobněji pak v „Thermice“ p. dvor. rady Strouhala na str. 36. a násled.

Dále zjistil si vztahy mezi svítivostí vlákna a absolutní jeho teplotou a mezi specifickou spotřebou energie elektrické, připadající na jednu svíčku za 1 vteřinu, a absolutní teplotou a obojí ty závislosti si graficky znázornil.

Když tedy lze uhelné vlákno považovati pro emisi záření za těleso šedé, byla na snadě myšlenka, že také kráter obloukové lampy září jako šedé těleso. Proto přirovnával Lummer jeho záření se zářením tělesa absolutně černého jakož i tělesa šedého (uhlového vlákna) užívaje při tom tak zvaných *isochromat* čili křivek isochromatických. Jsou to, jak již jejich jméno naznačuje, linie, které vystihují pro určitou barvu, čili stálou délku vlny vysílaného záření, jak přibývá energie vyzářené s absolutní teplotou zářícího tělesa.

Platí totiž pro záření černého tělesa zákon, který odvodil profesor university ve Würzburgu *W. Wien* r. 1896 a upravil r. 1900 profesor university v Berlíně *M. Planck* a jenž vyjadřuje závislost energie ε vysílané zářením určité délky vlny na této délce vlny λ a absolutní teplotě T a zní pro záření světelné:

$$\varepsilon = \frac{C}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{c}{\lambda T}}},$$

v němž C a c jsou konstanty, jež se stanoví zkusmo a e jest základ přirozených logaritmů, totiž číslo 2.71828... Logarithmuje-li se tato rovnice logaritmy přirozenými, jež se značí, jak vám známo z matematiky, pouhým l , obdrží se:

$$l\varepsilon = l \frac{C}{\lambda^5} - \frac{c}{\lambda} \cdot \frac{1}{T}.$$

Považujíce λ za stálé, pišme v této rovnici

$$\begin{aligned} l\varepsilon &= y, \\ l \frac{C}{\lambda^5} &= q, \\ -\frac{c}{\lambda} &= k, \\ \frac{1}{T} &= x; \end{aligned}$$

vyjde nám pak

$$y = kx + q,$$

což jest známá směrnicová rovnice přímky, jak víte z analytické geometrie. To znamená, že linie, jež udává vztah mezi přirozenými logaritmami vyzářené energie zářením stálé délky vlny λ a převrácenou hodnotou absolutní teploty zářícího zdroje, jest přímka a nazývá se *logarithmická isochromata*.

Takovéto logaritmické isochromaty pro různé délky vln světelných sestrojil si prof. Lummer pro těleso absolutně černé a šedé, přirovnává je jejich záření se zářením kladného kráteru obloukové lampy.

Těleso absolutně černé, jímž ve skutečnosti není přesně ani platinová čern, ani vrstva sazí, bylo sestrojeno dle návodu G. Kirchhoffa, jenž upozornil, že zářením absolutně černým určité teploty jest záření dutin, jichž stěny, nepropouštějící záření ani světelného ani tepelného, udržují se na této teplotě. Když se pak taková dutina, obyčejně válcová nebo kulová, opatří malým otvorem, vystupuje z něho černé záření, příslušné právě té teplotě, na níž jest dutina udržována;*) tuto teplotu udržoval Lummer při svých pokusech elektrickým proudem a měřil vloženým thermoelektrickým článkem Le Chatelierovým.

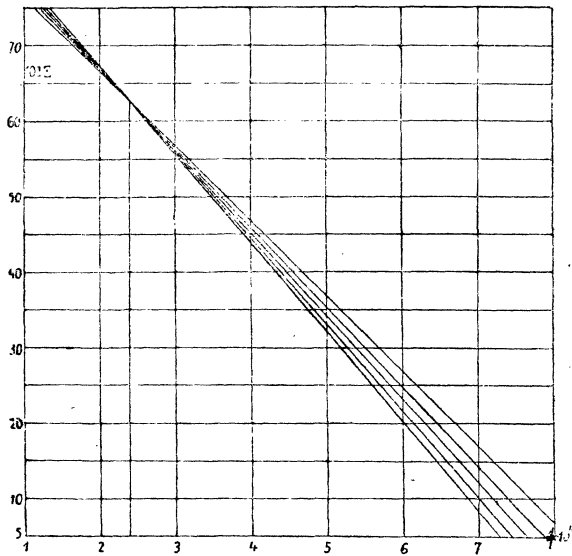
Přirovnávání obou zdrojů dalo se pak přesným *fotometrem Lummer-Brodhunovým* na kontrast z r. 1889, v němž stejnost vysílané energie ze dvou zdrojů posuzuje se z vymizení hraničné čáry dvou světelných polí a ze stejnosti kontrastu osvětlení vždy dvou a dvou částí těchto polí, z nichž jedno osvětleno jest jedním, druhé druhým z přirovnávaných zdrojů.**)

Při sestrojování logaritmických isochromat absolutně černého tělesa dospěl prof. Lummer k zajímavému výsledku, že přímky ty, sestrojené pro několik různých délek vln viditelného záření, protínají se v *jednom bodě*, když se prodlouží ve směru k vyšším teplotám a když za druhý přirovnávaný zdroj bylo užito též tělesa absol. černého nebo šedého ve smyslu dříve uvedeném. Úsečka průsečíku toho udává pak převrácenou hodnotu skutečné absol. teploty, kterou má zdroj přirovnávaný.

*) O zkoumání záření tělesa absolutně černého použité se podrobněji v „Thermice“ p. dvor. rady Strouhala na str. 570. a násl.

**) Úplný popis a výklad fotometru Lummer-Brodhunova najdete na str. 328. a násl. ve spise „Nástin geometrické optiky a základů fotometrie“, který sepsal prof. Dr. Boh. Kučera r. 1915.

Tímto způsobem zjištěna byla teplota žárovkového vlákna uhlového při obyčejném normálním zatížení úplně ve shodě s výsledkem plynoucím výpočtem z rovnice (3), čímž potvrzen již dříve vyslovený názor, že vlákno uhlové v žárovce září jako těleso šedé. Přirovnávalo-li se záření černého tělesa se zářením žárovky s vláknem platinovým, jehož záření se od záření absolutně černého tělesa značně liší, a sestrojily-li se logar. isochromaty, neprotínaly se v jednom průsečíku, nýbrž ve více bodech.



Obr. 2.

Jestliže tedy isochromaty tělesa absol. černého a tělesa šedého, přirovnává-li se jejich záření různých délek vln se zářením nejrozžhavenějšího místa kráteru pozitivního uhlíku obloukového, se protnou též v jednom bodě, lze z toho souditi, že i kráter oblouku září jako těleso šedé. A to z měření Lummerových skutečně vyplynulo, jak ukazuje obrazec 2., znázorňující logar. isochromaty tělesa absolutně černého, přirovnávaného s kladným obloukovým kráterem. Jako úsečky naneseny jsou v něm 10.000-cí násobky $\frac{1}{2} T$ a jako pořadnice 10-tinásobky $l\epsilon$.

Délky vln, pro něž uvedené isochromaty jsou sestrojeny, byly v pořadí, jak přímký ty pod sebou následují, tyto :

$$\lambda_1 = 645 \mu\mu,$$

$$\lambda_2 = 592 \mu\mu,$$

$$\lambda_3 = 556 \mu\mu,$$

$$\lambda_4 = 533 \mu\mu,$$

$$\lambda_5 = 500 \mu\mu.$$

Log. isochromaty tělesa šedého přirovnávaného s kladným kráterem oblouku mají průběh zcela podobný a úsečka jejich průsečíku udává skutečnou absol. teplotu kladného kráteru 4207° , kdežto z isochromat tělesa absol. černého plyne 4200° . Jsou tedy oba výsledky ve shodě velmi dobré. Z toho dále počítá prof. Lummer, jaká by byla „černá“ absol. teplota obloukového kráteru kladného, to jest teplota, kterou by musil mít, kdyby zářil jako těleso absolutně černé. Při tom předpokládá, že platí i pro tyto vysoké teploty vztah svrchu uvedený, který našel pro teploty uhelného vlákna v žárovce, že totiž teplota z pozorování určená jest vždy o 15% vyšší než počítaná za předpokladu, že vlákno září jako těleso absolutně černé. I vychází tu jako černá absol. teplota kladného kráteru

$$T_c = 4200^\circ - 42^\circ \cdot 15 = 4200^\circ - 630^\circ = 3570^\circ.$$

Tato hodnota shoduje se dobře s výsledkem měření Reichových, o nichž již byla řeč, což zase potvrzuje správnost Lummerových předpokladů.

A ještě jedno potvrzení správnosti jeho názorů lze uvést. Pro záření tělesa absolutně černého platí kromě zmíněných již zákonů tak zvaný „pošínovací zákon Wienův“, nalezený r. 1893 profesorem W. Wienem a později mnohokrát potvrzený theoreticky i experimentálně. Když září abs. černé těleso při určité stálé teplotě, stoupá vyzářená jím energie, zvětšuje li se délka vlny vysílaného záření, a nabude hodnoty maximální pro určitou délku vlny $\lambda_{max.}$, aby pak zase klesala s rostoucí dále délkou vlny. A toto maximum vysílané energie se zvětšuje, vzrůstá-li absolutní teplota zářícího tělesa, a zároveň pošínuje se k záření menších délek vln. Pošínovací zákon Wienův pak praví, že součin délky vlny, příslušející tomuto maximu energie, a při-

slušné absol. teploty jest veličinou stálou, pro niž vyšla z přesných měření, která provedli r. 1901 známí nám již badatelé Lummer a Kurlbaum číselná hodnota 2940, udá-li se délka vlny v mikronech (μ) a teplota ve stupnici absolutní. Pak tedy pošínovací zákon lze psáti:

$$\lambda \text{ max. } T = 2940 \mu (^{\circ}).$$

Pro záření platiny našli titíž badatelé obdobný vztah:

$$\lambda \text{ max. } T = 2630 \mu (^{\circ}).$$

Z rovnic těchto počítati lze absolutní teplotu zářícího tělesa, září-li jako těleso absol. černé nebo jako platina a určíme-li si pokusně $\lambda \text{ max.}$ Jsou-li vlastnosti záření nějakého tělesa jiné než vlastnosti tělesa abs. černého nebo platiny, ale jsou-li mezi vlastnostmi obou těch zdrojů, udají vypočtené hodnoty teploty alespoň horní a dolní mez pro teplotu zářícího tělesa.

Ježto maximum energie vyzařuje kráter kladného uhlíku obloukového, zářícího na vzduchu při délce vlny $\lambda \text{ max.} = 700 \mu\mu = 0.7 \mu$, odpovídající červené barvě vysílaného světla, jakž určili Lummer a Pringsheim r. 1901, vychází pro teplotu kráteru hodnota maximální:

$$T \text{ max.} = \frac{2940^{\circ}}{0.7} = 4200^{\circ},$$

a hodnota minimální:

$$T \text{ min.} = \frac{2630^{\circ}}{0.7} = 3757^{\circ}.$$

Hodnota první shoduje se přesně s výsledkem odvozeným z logarithmických isochromat, což potvrzuje správnost názoru, že kráter kladný září jako těleso šedé při stálé absol. teplotě 4200° na místech nejrozžhavenějších.

V.

Když tedy stálost teploty kladného kráteru, její absolutní velikost i zákony záření byly zjištěny, zkoumal prof. Lummer na popud ředitele chemického ústavu pro anorganickou chemii na universitě ve Vratislavi profesora *Stocka*, zdali teplota kráteru zůstává stálou i při změně tlaku ovzduší, v němž se oblouk

tvoří, či zdali jakožto sublimační teplota uhlíku roste a klesá s rostoucím a klesajícím tlakem. K tomu uzavřel regulační obloukovou lampu s vodorovným kladným uhlíkem do skleněného zvonu, v němž tlak vzduchu zmenšoval vývěvou a jež chránil asbestovými vložkami proti přílišnému žáru. A při těchto pokusech objevil se mu zvláštní zjev, že totiž již při malém snížení tlaku začíná konec uhlíku měknouti, pak zcela tátí, záře při tom méně jasně, a konečně při dalším snižování tlaku zase tuhnouti.

Ježto skleněný recipient při těchto pokusech záhy praskl, pořídil si prof. Lummer, aby mohl velezajímavé a důležité tyto nové zjevy v klidu pozorovati a studovati, recipient ze široké roury železné válcového tvaru, jejíž železnou těsně přiléhající základnu jednu opatřil okénkem ze silného skla ve výši kráteru vložené lampy a skrze druhou zapustil vzduchotěsně dráty privádějící proud k oblouku i k jeho regulátoru. Kráter pozoroval s počátku subjektivně malým pozorovacím dalekohledem a tu jevily se mu na něm v méně jasné kapalině světlé perly, jež pohybující se působily podobný dojem jako kousky jantaru ve vroucí vodě. Později užil pozorování objektivního, promítaje žhoucí kráter uhlíkový na sádrovou stěnu rovně broušenou ve zvětšení asi třicetinasobném. Světlé perly jevily se jako útvary většinou šestiboké, jichž živý pohyb v okolní méně jasné kapalině uhlíkové působil dojem svrchu uvedený, na dně kapaliny bylo pak znáti útvary, jež upomínají svým tvarem na voštiny v pláštvi medové. Když pak uhlík na kráteru zase tuhl, bylo zřetelně znáti tvořící se vrstvu jako ledový škraloup na kapalině, pod níž ještě jasné perly, jež Lummer „rybami“ nazval, jakož i „voštiny“ prozařovaly.

Dále shledal, že pohyb těchto „ryb“ jest při menším tlaku volnější a dá se proto lépe pozorovati pohyb jednotlivé částice, ježto jsou tyto také větší. Pokud se dalo zjistiti, vznikají ty „ryby“ v některé „voštině“, pohybují se krátkou dobu v roztaženém uhlíku a pak se zase v některé voštině usadí a roztají. Že snad nejsou ty „ryby“ jen bublinkami plynu, jak bylo proti pokusům Lummerovým namítáno, odůvodňuje Lummer tím, že nikdy žádný z pozorovatelů toho zjevu neviděl, že by byla některá.

ta bublinka na povrchu praskla, a též jejich hranatý tvar tomu nenasvědčuje. Prof. Lummer má za to, že i „ryby“ i „voštiny“ jsou plastické grafitové útvary krystalické, kdežto ztuhlá povrchová kůra jest tvořena uhlíkem amorfním, dříve roztaveným. Krystaluje grafit v šestibokých destičkách soustavy jednoklonné, jest plastický a absorbuje záření jako kov, proto při vysoké teplotě také jako kov silněji září, čímž větší jasnost „ryb“ proti ostatním částem roztaveného kráteru by byla vysvětlena. Také chemická analýsa i určení specifické hmoty ztuhlého kráteru po vychladnutí, jež provedeny byly v ústavě chemickém a mineralogickém university v Bratislavě, potvrdily, že ztuhlý konec kráteru jest čistý grafit. Již také jeho vzezření samo tomu nasvědčuje, jeví se celý konec uhlíku po setření vrstvy sazí jakoby byl poniklován.

Co však nejvíce překvapuje při tomto zkapalnění uhlíku, jest ta okolnost, že zkapalnění dostavilo se při intenzitách proudových *menších*, než jakých se obyčejně v obloukových lampách užívá, a to i při obyčejném tlaku vzduchu, ale jen na malé části kráteru. Tím si vysvětlíme, proč pokusy dřívějších badatelů, kteří užívali co nejvyšších intenzit proudových ke zkapalnění uhlíku na vzduchu obyčejného tlaku, zůstaly bez úspěchu. Má-li se docílit roztavení kráteru celého, musí nabýt intenzita proudu určité hodnoty, Lummer nazývá ji „kritickou“, při určitém „kritickém“ tlaku, pro vzduch asi $\frac{1}{2}$ atmosféry. A právě ta okolnost, že tato „kritická“ hodnota intenzity při nízkých tlacích leží blízko té intenzity, kterou se v obloukových lampách při určité tloušťce uhlíků obyčejně svítí, způsobila, že prof. Lummer šťastně kapalným stavem uhlíku objevil.

A rovněž zvláštní jest ten úkaz, že při tlacích velmi nízkých, asi od $\frac{1}{5}$ atmosféry až do 5 mm sloupce *Hg*, se roztavení konce kladného uhlíku vůbec neobjeví; jen změknutí nastane s počátku, ale pak zůstane uhlík tuhým a sublimuje.

(Dokončení.)