

# Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

---

Miloš Rotter

Sto let kapalného helia

*Pokroky matematiky, fyziky a astronomie*, Vol. 53 (2008), No. 4, 265–277

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/141866>

## Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 2008

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

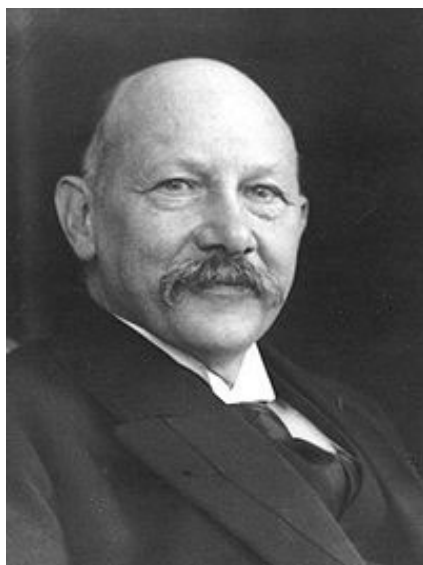


This document has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://dml.cz>

# Sto let kapalného helia

*Miloš Rotter, Praha*

V roce 2008 si fyzikové nízkých teplot a s nimi celá fyzikální komunita připomněli významný mezník ve vývoji fyziky dvacátého století, zkapalnění helia, posledního „permanentního“ plynu. Stalo se tak 10. července 1908 v holandském Leidenu zásluhou systematické přípravy a cílevědomého plánování experimentu, kterému zasvětil 26 let své vědecké kariéry profesor leidské univerzity HEIKE KAMERLINGH ONNES (1853 až 1926) (viz obr. 1). Od svého jmenování profesorem experimentální fyziky v Leidenu



Obr. 1. Profesor Heike Kamerlingh Onnes (21. 9. 1853 – 21. 2. 1926).

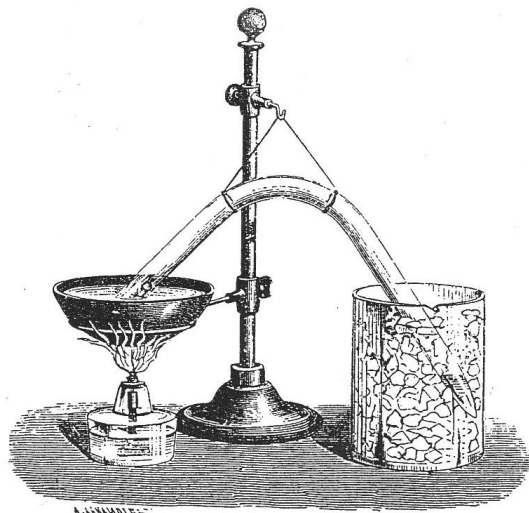
se zaměřil na zkapalňování plynů jako na cestu k stále nižším teplotám a na zkoumání vlastností plynů v okolí jejich přechodu do kapalné fáze. Založil laboratoř, která se stala vzorem pro další soudobá fyzikální pracoviště a byla také předobrazem současných velkých mezinárodních zařízení fyzikálního experimentu označovaných jako „large facilities“. Na rozdíl od přetrvávající tradice laboratoře, do níž docházel univerzitní profesor se svým asistentem, aby si jednoduchými prostředky ověřil experimenty, na něž ve svých přednáškách narazil nebo o nichž se dočetl, Kamerlingh Onnes budoval od základu inženýrským způsobem moderní laboratoř vybavenou nejlepší dostupnou

---

Doc. RNDr. MILOŠ ROTTER, CSc., Matematicko-fyzikální fakulta UK, V Holešovičkách 2, 180 00 Praha 8, e-mail: [milos.rotter@mff.cuni.cz](mailto:milos.rotter@mff.cuni.cz)

Článek je rozšířenou verzí zvaného referátu na 16. konferenci českých a slovenských fyziků v Hradci Králové 8.–11. 9. 2008.

technikou. Velkou péčí věnoval výchově pomocného technického personálu. Otevřel laboratoř všem, kteří se chtěli podílet na plánovaných experimentech. Založil odborný časopis, v němž bez prodlení podrobně publikoval průběh prováděných experimentů. Takto široce koncipovaná laboratoř zůstávala i po jeho smrti jedním z nejvýznamnějších pracovišť fyziky nízkých teplot i všeobecně fyziky kondenzovaného stavu.



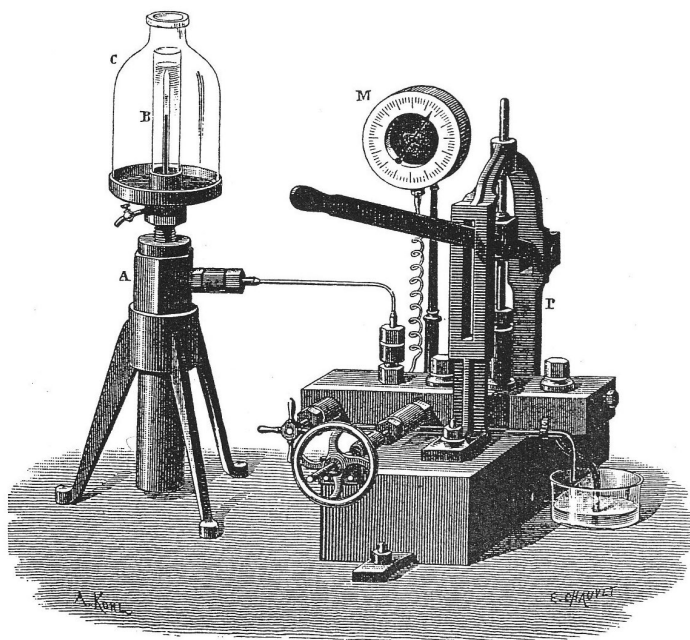
Obr. 2. Faradayova aparatura ke zkapalnění chlórů.

## Prehistorie zkapalňování plynů

Pokusy o snižování teploty byly vyvolány především snahou o účinnou konzervaci potravin, chlazení příbytků v horkém klimatu a také snahou o poznání chemických a fyzikálních vlastností plynů zejména v souvislosti s jejich fázovými přechody. O výrazný pokrok ve zkapalňování plynů se zasloužil Michael Faraday (1791–1867). Geniální anglický chemik a fyzik, původním povoláním knihař, se systematicky pokoušel získat kapalnou fázi všech známých plynů. Navázal tak na pokusy irského fyzika Thomase Andrewse, Francouze Charlese Cagniarda de La Tour a Holanďana Martinuse van Maruma. Do zahnuté skleněné trubice zatavil pod tlakem vzorek plynu. Trubicí na jednom konci zahříval a v druhém konci ochlazovaném v lázni ledu a vody kondenzovala kapalina (viz obr. 2). Plyn, který tímto způsobem nedokázal zkapalnit, označil jako *permanentní*. Byly to dusík, kyslík a vodík. Inertní plyn nebyly v té době ještě známy. Existence „slunečního plynu“ – helia byla objevena teprve v roce 1869 při spektroskopickém studiu světla sluneční korony během úplného zatmění Slunce. Přítomnost helia na Zemi prokázal až v roce 1895 anglický fyzik William Ramsay, když analyzoval spektra plynů uvolňovaných při žhání minerálu smolince. Helium bylo nalezeno také v dalších minerálech, v plynech uvolňovaných z pramenů minerálních vod a v koncentraci dokonce i několika procent v některých ložiscích zemního plynu. Dnes se helium získává právě z takovýchto zdrojů zemního plynu.

## Zkapalnění kyslíku 1877 (90,188 K) <sup>1)</sup>

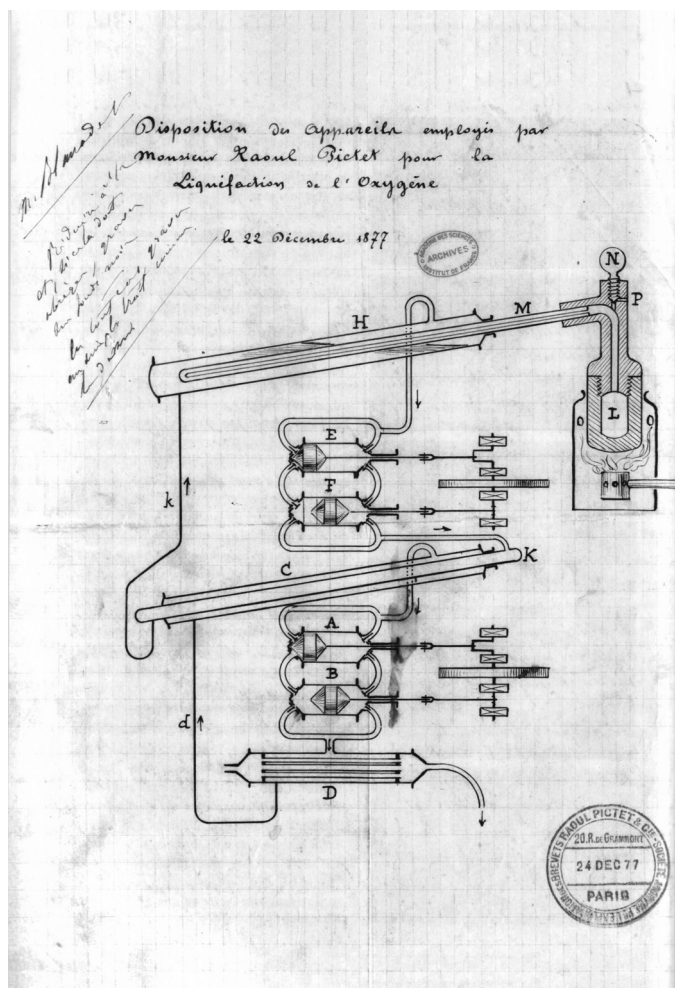
Další dějství „cesty k absolutní nule“ se odehrálo v Paříži. Ve vánočním čase dne 24. prosince 1877 pod kupolí Institut de France zasedala Akademie přírodních věd, jež se toho dne zabývala závažným tématem, životními pochody révokazu (*Phylloxera*), zákeřného hmyzu, který dokázal likvidovat francouzské vinice. Na závěr zasedání otevřel profesor Jean-Baptiste Dumas, stálý sekretář Akademie, zapečetěný dopis, který mu svěřil Louis-Paul Cailletet (1832–1913) a v němž sděloval, že se mu podařilo zkapalnit kyslík. Popsaný proces spočíval v tom, že do trubice uzavřel směs kyslíku a oxidu uhelnatého, ochladil je na  $-29\text{ }^{\circ}\text{C}$  pomocí kapalného oxidu siřičitého a stlačil na 300 atm. Po otevření ventilu plyn expandoval a ochladil se tak, že vytvořil mlhu zkapalněného plynu.<sup>2)</sup> Oznámení vyvolalo velký ohlas, profesor Sainte-Claire Deville dosvědčil, že na jeho vysoké škole Ecole Normale Supérieure pan Cailletet několikrát veřejně předvedl, tedy „publikoval“, úspěšné zkapalnění kyslíku. Přitom Cailletet volil formu zapečetěného dopisu, který zaslal stálému sekretáři již 2. prosince, aby případný neúspěch nebo chybná interpretace pokusu neohrozily jeho jmenování členem korespondentem Akademie, k čemuž mezitím došlo (viz obr. 3).



Obr. 3. Cailletetovo zařízení ke zkapalnění kyslíku.

<sup>1)</sup> Teplota varu zkapalněného plynu za normálního tlaku (101,325 kPa).

<sup>2)</sup> K ochlazení byl tedy využit Jouleův-Thomsonův jev, objevený roku 1852, který provází izoentalpickou expanzi reálného plynu, je-li jeho teplota plynu nižší než teplota inverzní, která pro kyslík činí asi 770 K. Pro efektivní chlazení je třeba, aby teplota plynu čínila méně než třetinu kritické teploty, pro kyslík tedy méně než 250 K.



Obr. 4. Schéma aparatury Raoula Picteta ke zkapalnění kyslíku.

K překvapení všech seznámil profesor Dumas shromážděné akademiky ještě s dalším dokumentem. Byl jím dopis se záhlavím firmy Raoul Pictet et C<sup>ie</sup> ze Ženevy, v němž pan Raoul Pictet (1846–1929) stručně sděloval, že zkapalnil kyslík ochlazením stlačeného plynu kapalným oxidem siřičitým a pevným oxidem uhličitým. Plyný kyslík byl stlačen v měděné trubce na 500 atm, kapalný SO<sub>2</sub> byl čerpáním par ochlazen na –65 °C a pevný CO<sub>2</sub> měl být rovněž čerpáním par ochlazen až na –130 °C, což mělo podle autora stačit na přeměnu stlačeného plyného kyslíku na kapalný. Po otevření ventilu z trubky vytryskly kapky kapalného kyslíku<sup>3)</sup> (viz obr. 4). V dopise bylo dále

<sup>3)</sup> S ohledem na malou tepelnou vodivost pevného oxidu uhličitého je zřejmé, že stlačený plyn v trubce nemohl být ochlazen tak, aby zkondenzoval. Kapalina vznikla až po expanzi za výstupním ventilem díky Jouleovu-Thomsonovu jevu.

uvedeno, že Pictet, ačkoli je švýcarským průmyslníkem zabývajícím se výrobou  $\text{SO}_2$ , má úzké vazby k Francii a klade si za čest, že mohl navštěvovat přednášky na Ecole polytechnique a na Collège de France. Podle popisu použité procedury dospěl každý k výsledku jiným postupem, a proto bylo prvenství připsáno oběma.

Je zřejmé, že tato událost přispěla k tradiční rivalitě prestižních vysokých škol na opačných svazích návrší Montagne – Sainte – Geneviève v pařížské Latinské čtvrti. Zatímco Cailletet, podle dobré univerzitní tradice, dal své zařízení i proceduru volně k dispozici, Pictet starostlivě patentově chránil každou součást své aparatury. Také proto se v dalším vývoji kryotechniky užívalo převážně Cailletetovo zařízení.

### **Zkapalnění dusíku 1883 (77,35 K)**

Dalším krokem na cestě k nízkým teplotám bylo zkapalnění kyslíku, k němuž došlo na Jagellonské univerzitě v polském Krakově. Zasloužili se o ně dva mladí polští učenici fyzik Zygmunt Florenty Wróblewski (1845–1888) a chemik Karol Stanislaw Olszewski (1846–1919). V krátké době dvou měsíců zprovoznili a zdokonalili z Francie dovezenou Cailletetovu aparaturu a získávali již nejen proud kapiček, ale použitelného množství kapalného kyslíku a posléze i kapalného dusíku.

Wróblewski, který se narodil v Grodně, studoval na univerzitě v Kyjevě. V roce 1863 byl odsouzen za účast na Polském povstání a strávil šest let ve vyhnanství na Sibiři. Pokračoval i tam ve studiu fyzikální literatury, po amnestii se navrátil s naloženým zdravím, zejména s téměř úplnou ztrátou zraku. V Berlíně se podrobil dvěma očním operacím, po nichž podstoupil šestiměsíční rekonvalescenci v nemocniční temné komoře. Poté pokračoval ve studiu fyziky v Berlíně u H. Helmholtze. Na ozdravném pobytu ve švýcarských Alpách se setkal s fyzikem R. Clausiem, který jej přivedl ke studiu termodynamiky. Wróblewski studoval také v Heidelbergu a doktorát získal na univerzitě v Mnichově. Po návratu do Polska mu bylo nabídnuto místo profesora na Jagellonské univerzitě v Krakově. Krakovskou akademií byl vyslán na stipendijní pobyt do evropských laboratoří, zejména do Anglie a Francie. Ve Francii se setkal s Cailletetem a spolupracoval s ním v jeho laboratoři v Châtillon sur Seine. Zakoupil Cailletetovu aparaturu, kterou vyráběla pařížská firma E. Ducretet. Po návratu do Krakova se ihned pustil spolu s Olszewským do úprav aparatury, zlepšení tepelné izolace, zvýšení tlaku a zejména využití kapalného etylénu čerpáním par ochlazeného na  $-139^\circ\text{C}$  pro tepelnou izolaci nádoby, v níž jímali zkapalněný kyslík a posléze i dusík.

Karol Olszewski studoval na Jagellonské univerzitě v Krakově, kde se posléze stal asistentem chemie. Zabýval se opravou a zdokonalováním Nattererova vysokotlakého kompresoru. Doktorskou disertaci obhájil při půlroční stáži u Bunsena v Heidelbergu a po návratu do Krakova byl jmenován mimořádným profesorem. Jeho zkušenosti s vysokotlakými experimenty byly pro úspěch společné práce jistě významné.

Spolupráce Wróblewského a Olszewského kvůli jejich rozdílným charakterům trvala však jen šest měsíců, poté pracoval každý zvlášť ve své laboratoři. Zygmunt Wróblewski tragicky zemřel v březnu 1888. Pracoval dlouho do noci na výkresech nové

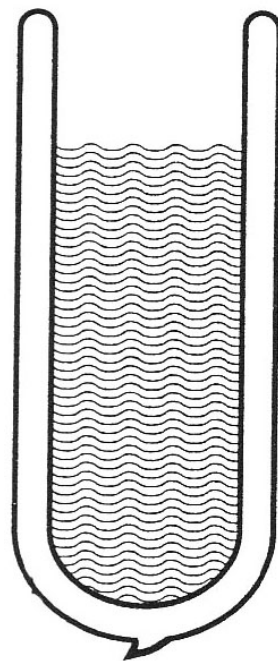
aparatury. Kvůli špatnému zraku si zblízka svítil petrolejovou lampou, kterou nešťastnou náhodou převrhl. Rozlitý petrolej chytil a Wróblewski utrpěl těžké popáleniny, na jejichž následky po třech nedělích strávených v nemocnici zemřel ve věku 43 let.

Olszewski se pokoušel zkapalnit vodík, studoval jeho izotermy k určení kritické teploty a tlaku. V roce 1895 mu William Ramsay zaslal skleněné nádoby s několika litry argonu a helia, plynů, jejichž přítomnost v zemských minerálech objevil, s žádostí o jejich zkapalnění. To se však Olszewskému s jeho aparaturou nepodařilo uskutečnit.

## Zkapalnění vodíku 1895 (20,38 K)

Další dějství dramatu dobývání nízkých teplot se odehrálo v Londýně a hlavní roli v něm sehrál Sir James Dewar, profesor fyziky na Royal Institution. James Dewar se narodil v roce 1842 jako nejmladší ze sedmi synů skotského hostinského a obchodníka s vínem. Za svůj nejvýznamnější „nízkoteplotní“ zážitek z dětství označoval nehodu, kdy se jako desetiletý probořil tenkým ledem do mrazivé vody a strávil pak měsíce na lůžku s revmatickou horečkou. Zotavoval se po řadu let, zpočátku chodil jen o berlích. Aby nabyl sílu a zručnost v pažích, učil se u venkovského truhláře zhotovovat housle. Na jedny housle, které sám vyrobil, zahráli po letech Dewarovi na oslavě jeho zlaté svatby. Dewar vystudoval univerzitu v Edinburghu, kde posléze vyučoval chemii. Ve věku třiatřiceti let byl jmenován profesorem experimentální filozofie na univerzitě v Cambridgi. Zde však zřejmě nebyl spokojen, ani jeho pedagogické schopnosti nebyly dobře hodnoceny, a tak již po dvou letech přešel na místo profesora chemie na Royal Institution, kde působil až do své smrti v roce 1923; dožil se věku 81 let. Jeho veřejné přednášky a demonstrace na Pátečních večerních rozpravách byly velmi oblíbeny a navštěvovány nejen vědci, ale i veřejností, zejména z vyšších vrstev společnosti. Dewar využíval své vynikající experimentální zručnosti i brilantního přednesu k popularizaci soudobých výsledků vědy. Předvedl také Cailletetovo zařízení ke zkapalnění kyslíku, v roce 1898 seznámil publikum i s vlastnostmi vodíku, jež se mu jako prvnímu podařilo zkapalnit.

V lednu 1893 demonstroval Dewar zařízení, které umožňovalo uchovávat zkapalněné plyny po delší dobu a provádět tak s nimi další experimenty. Tímto zařízením byla skleněná dvouplášťová nádoba, ve které byl z prostoru mezi pláští vyčerpán vzduch (viz obr. 5). Takovouto nádobu s vakuovou tepelnou izolací nazýváme Dewarovou nádobou a užívá se i v dnešních kryogenních zařízeních, v nichž je sklo zpravidla nahrazeno nerezovou ocelí. O rychlé rozšíření těchto nádob, známých jako termosky,



Obr. 5. Dewarova nádoba k uchovávání zkapalněných plynů.

pro uchovávání teplých nebo studených nápojů, se zasloužil jeden německý sklář, u něhož si Dewar objednal výrobu několika nádob. Sklář pochopil praktickou výhodu těchto nádob, nechal si jejich princip patentovat a vyráběl je pak pod názvem Thermos Flasche.

Dewar na svých slavných pátečních přednáškách předváděl výborně fungující experimenty, často obtížná cesta k nim však zůstávala publiku skryta. V roce 1886 došlo dokonce v jeho laboratoři k výbuchu zařízení, při kterém Dewar málem přišel o život. Jeho asistenti James Heath a Robert Lennox však byli vážně zraněni, každý přišel o jedno oko. Vztahy Jamese Dewara s jeho kolegy byly chladné, ba dokonce nepřátelské. Rozpory s Williamem Ramsayem, jeho sousedem v Royal Institution, započaly Dewarovým energickým zpochybněním Ramsayova objevu existence argonu z anomálie v hustotě dusíku. Když Dewar v roce 1895 v Royal Society referoval o svých pracích, které dávaly naději na brzké zkapalnění vodíku, prohlásil Ramsay, že má zprávy od Olszewského o úspěšném zkapalnění vodíku. Dewar vyžadoval písemný důkaz a na příštím zasedání musel Ramsay přiznat, že mu Olszewski sdělil, že dosud nezískal kapalný vodík „ve statickém stavu“.

Olszewski na radu Ramsayovu uveřejnil anglický článek ve Philosophical Magazine, v němž si stěžoval, že Dewar opakuje jeho pokusy, aniž by je citoval, a Olszewského práce, často publikované jen v polštině, jsou záměrně ignorovány. Ve své odpovědi Dewar ocenil Olszewského snahu seznámit anglické fyziky se svými pracemi a vyzval je, aby zveřejnili rovněž práce vynikajícího zesnulého fyzika Wróblewského. Dewar nikomu kromě svých asistentů nedovolil přístup do své laboratoře a hrubý náčrt své aparatury zveřejnil jen jednou jako přílohu článku věnovaného meteoritům.

V roce 1895 Carl Linde a William Hampson nezávisle na sobě publikovali princip tepelného výměníku a umožnili tak konstrukce zkapalňovačů vzduchu v průmyslovém množství. Dewar ve svém zařízení tepelného výměníku využil, tyto práce však necitoval. Prohlásil dokonce, že by vodík zkapalnil, i kdyby žádný Hampson neexistoval.

Ihned po objevení přítomnosti helia v zemských horninách začal Dewar helium shromažďovat a připravoval zařízení k jeho zkapalnění. Experimenty k získání přesného tvaru izoterem helia a tím i odhadu teploty zkapalnění musel Dewar ukončit v roce 1907, když mu mladý technik omylem vypustil do vzduchu veškerou zásobu helia. Získat helium od Ramsaye, největšího odborníka na vzácné plyny, s ohledem na jejich vzájemné vztahy nebylo myslitelné. Ostatně, když Ramsay potřeboval kapalný vodík pro své práce se separací vzácných plynů, musel požádat mladého nadějného fyzika Morrisa Traverse, aby mu postavil zkapalňovač vodíku, což se mu podařilo v krátké době dvou let s náklady podstatně menšími, než o jakých vždy hovořil Dewar.

## **Zkapalnění helia 1908 (4,215 K)**

Když byl v roce 1882 ve svých devětadvaceti letech Heike Kamerlingh Onnes jmenován profesorem fyziky na univerzitě v Leidenu, vybral si jako téma inaugurační přednášky „Důležitost kvantitativních měření pro rozvoj fyziky“. Prohlásil, že by nade dveřmi



každé fyzikální laboratoře měl viset nápis „Door meten tot weten“ (Měřením k poznání). Zásadou nutnosti přesného měření pro pokrok fyzikálního poznání se důsledně řídil po celou svou vědeckou kariéru. Během svých studií na univerzitě v Groningenu vykonal stáž v Heidelbergu, kde studoval po dobu jednoho a půl roku chemii u Roberta Bunsena a fyziku u Gustava Kirchhoffa, u něhož se upevnil jeho vztah k přesnému fyzikálnímu měření. Tématem jeho disertační práce na univerzitě v Delftu bylo přesné měření rotace Země prostřednictvím Foucaultova kyvadla, při němž osvědčil zručnost a vynalézavost experimentátora.

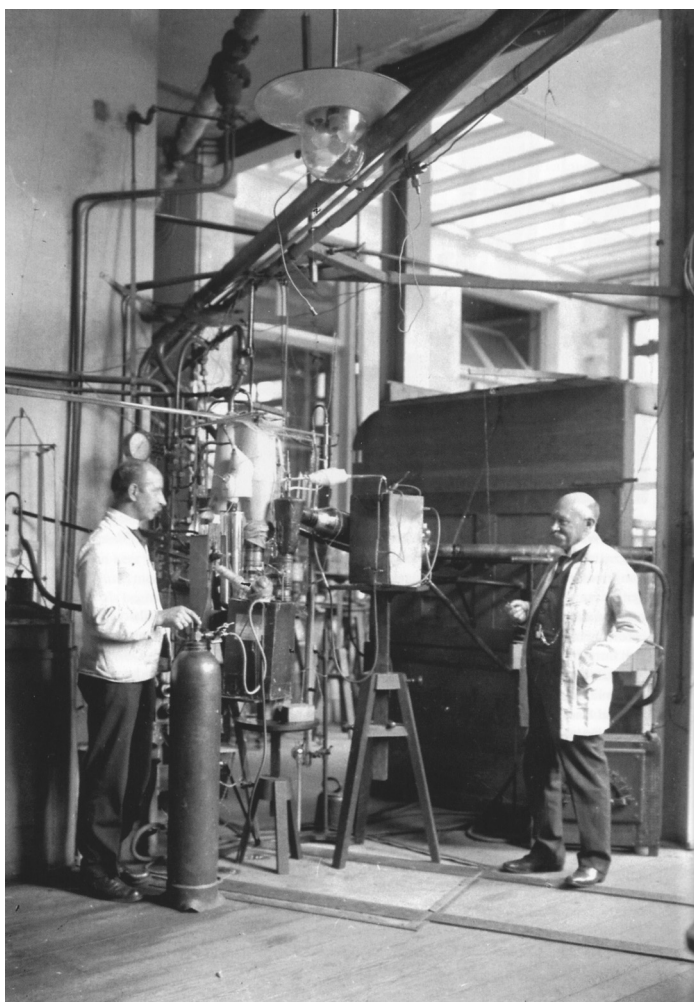
Kamerlingh Onnes se od počátku svého působení na univerzitě projevoval jako skvělý organizátor systematického budování laboratoře k nízkoteplotním výzkumům, ale také jako obratný diplomat, když bylo třeba zajistit podmínky k činnosti této laboratoře. Snažil se získat nejlepší dostupná zařízení, zejména vysokotlaké kompresory a výkonné vývěvy, aby mohl postavit sérii zkapařovačů k výrobě kryogenních kapalin v dostatečném množství pro experimenty celé laboratoře. Aby zajistil pro svou laboratoř kvalitní technický personál, založil Kamerlingh Onnes v roce 1901 přímo v budově univerzity školu jemných mechaniků. Velká část tehdejších přístrojů se vyráběla ze skla, a proto se snažil Kamerlingh Onnes získat kvalitního skláře. Přivedl z Německa vynikajícího foukače skla Oskara Kesselringa, jemuž svěřil také školení mladých nadaných sklářů. Tito lidé se posléze uplatnili v řadě laboratoří po celé Evropě i v počátcích výroby elektronek holandské firmy Philips.

Kamerlingh Onnes se seznámil s pracemi Johanneese Diderika Van der Waalse, zejména s jeho rovnicí korespondenčních stavů reálných plynů, publikovanou v roce 1880, a snažil se přesným proměřováním izoterem plynů prokázat její platnost nejprve pro vodík a poté i pro helium. Z průběhu izoterem při nízkých teplotách určoval kritické parametry přechodu plynu do kapalné fáze a odhadoval tak teplotu a tlak, při nichž plyn zkapařní. S Van der Waalsem se pravidelně scházel a rozebírali spolu výsledky měření.

Na konci roku 1890 neočekávaný problém zdržel práce na přípravě zkapařnění vodíku o celé dva roky. Někdo totiž udal ministerstvu vnitra, že Kamerlingh Onnes koná nebezpečné pokusy s velkým množstvím stlačených plynů, které mohou výbuchem zničit nejen laboratoř, ale i široké okolí a ohrozit zdraví a životy řady lidí. Tato obava jistě souvisela se vzpomínkou na událost, která se na tomto místě odehrála za napoleonských válek v roce 1807, kdy na blízkém kanále vybuchla loď naložená střelným prachem. Budova fyzikální laboratoře byla vystavěna právě na místě výbuchem zničených domů.

Byla jmenována ministerská komise, která měla posoudit úroveň bezpečnostních opatření v laboratoři. Kamerlingh Onnes získal výrazná kladná dobrodání jak od Olzowského, tak i od Dewara. Komise, v níž zasedal i Van der Waals, posléze prohlásila, že bezpečnostní opatření pro práci se stlačenými plyny v laboratoři jsou dostatečná, a Kamerlingh Onnes mohl pokračovat v experimentech. Hlavním argumentem, o němž se opíralo rozhodnutí komise, bylo konstatování, že „energie uvolněná při výbuchu tlakové lahve s plynem je menší než energie uvolněná při výbuchu bedničky se 3 kilogramy dělostřeleckého střelného prachu, jehož uchovávání ani doprava nejsou omezeny zvláštním předpisem“.

V roce 1906 již v Leidenu pracoval výkonný zkapalňovač vodíku, který dával 4 litry kapaliny za hodinu, a začaly přípravy ke zkapalnění helia. Kamerlingh Onnes chtěl zakoupit písek z anglických lázní Bath, z něhož Dewar získával helium. Bylo mu sděleno, že veškerý písek z pramenů má rezervován Dewar. Ten prohlásil, že zdroj helia je tak slabý, že sotva stačí jemu samotnému, a výzvu ke spolupráci odročil na pozdější dobu. Kamerlingh Onnes využil významného postavení svého bratra ve státním úřadě pro obchodní informace k tomu, aby roku 1905 získal dostatečné množství monazitového písku z nalezišť v Severní Karolíně ve Spojených státech. Po dobu téměř tří let se v Leidenu čtyři chemici zabývali žíháním těchto písků a uvolňované plyny podrobovali postupné destilaci, až nakonec získali asi 360 litrů čistého helia. Podle Dewarových odhadů se zkapalnění helia očekávalo okolo 6–8 K, Olszewski předvídal pesimisticky zkapalnění až pod 2 K, poslední leidenská měření ukazovala na teplotu okolo 5 K.



Obr. 6. Zkapalňovač helia v Leidenu (vlevo G. J. Flim, vpravo Heike Kamerlingh Onnes).

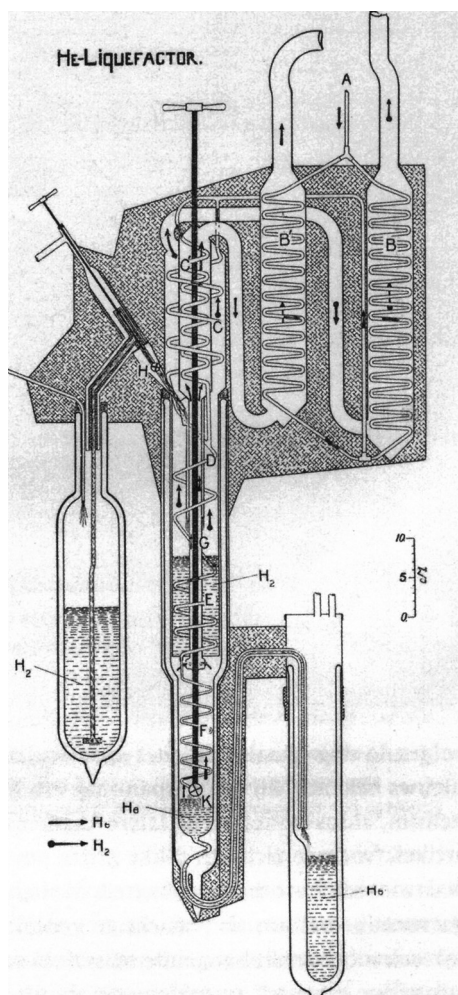
V časopise *Communication from Physical Laboratory at the University of Leiden*, který Kamerlingh Onnes založil, byly podrobně popsány experimenty prováděné v laboratoři. Články vycházely nejprve v holandštině a vzápětí byly publikovány anglicky. Ve sdělení č. 108 je zachycen průběh památného dne 10 července 1908. V předvečer připravovaného experimentu bylo vyrobeno 75 litrů kapalného vzduchu. Práce dne 10. 7. 1908 započaly v 5:45 hod. zkapaňováním vodíku. Ve 13:30 hod. bylo pro experiment k dispozici 20 litrů kapalného vodíku. Nejprve bylo třeba opakovaným čerpáním odstranit z aparatury zbytky vzduchu, které by mohly zamrznout a znemožnit cirkulaci helia a také ztížit pozorování dějů ve skleněné aparatuře. Tuto delikátní operaci prováděl výhradně Gerrit Jan Flim, osobní asistent Kamerlingha Onnese (viz obr. 6). Ve 14:20 hod. byl kapalným vodíkem naplněn vodíkový refrigerátor a byla současně spuštěna cirkulace helia. Teplota uvnitř kryostatu byla měřena plynovým termometrem naplněným heliem a termočládky, v 15:00 hod. klesla podle jednoho z termočládků na  $-180\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Byl postupně snižován tlak par vroucího vodíku až na 60 torr, tlak zůstával od 17:20 hod. beze změny. Byla udržována stálá hladina kapalného vzduchu i kapalného vodíku. Tlak plynného helia byl v době od 17:35 hod. do 18:35 hod. zvyšován z 80 atm. na 100 atm. Zpočátku byl pokles teploty měřený plynovým teploměrem za expanzním ventilem nevýrazný, kolísal a až po delší době se začal výrazněji zrychlovat. Počínaje 16:35 hod. poklesl tlak ve výměníku z 95 atm. na 40 atm. a teploměr udával teplotu nižší, než byla teplota kapalného vodíku. Při nižším tlaku byly pozorovány oscilace teploty až k 6 K. Byl připojen poslední zásobník kapalného vodíku a stále nebyla zaznamenána přítomnost kapalné fáze. Teploměr začal indikovat neobyčejně stálou teplotu nižší než 5 K.

Přicházeli kolegové z jiných laboratoří, aby se informovali o průběhu experimentu. Jeden z nich, profesor chemie Schreinemakers, upozornil, že takto se chová teploměr ponořený do kapaliny a že hladina kapaliny může být špatně pozorovatelná kvůli malému rozdílu indexu lomu světla mezi plynem a kapalinou. Navrhl osvětit sběrnou nádobu zespodu a tehdy z odrazu světla zjistili, že nádoba je téměř naplněná kapalným heliem. V 19:30 hod. tedy získali asi  $60\text{ cm}^3$  kapalného helia (viz obr. 7). Povšimli si ostrého okraje hladiny helia bez menisku, výrazně odlišné od hladiny vodíku v sousední nádobě. Zjistili rovněž, že kapalné helium má anomálně malou hustotu ( $125\text{ kg/m}^3$ ). Ve 20:30 hod. začali zmenšovat tlak par zbylých asi  $10\text{ cm}^3$  kapalného helia pro další snížení teploty. Dosáhli tlaku 23 torr a snažili se získat pevné helium. V 21:40 hod. experiment ukončili.

V závěru článku Kamerlingh Onnes napsal: „Nejen aparatury pracovaly během přípravy a v průběhu experimentu na hranici svých možností, ale i moji spolupracovníci pracovali na mezi svých sil.“ Zvláště pak poděkoval svému asistentovi Flimovi za vedení týmu techniků laboratoře během experimentu i za vynikající spolupráci při konstrukci aparatur. Po tomto výkonu Kamerlingh Onnes onemocněl a zotavoval se řadu dní, než mohl přistoupit k dalším experimentům a k zdokonalování aparatur.<sup>4)</sup>

---

<sup>4)</sup> Zkapalnění helia Kamerlingh Onnes neprodleně oznámil telegramem Dewarovi, který tuto informaci ihned předal tisku. Do Leidenu zaslal telegram tohoto znění: „Gratuluji. Jsem rád, že můj předpoklad o možnosti dosažení úspěchu známými metodami byl potvrzen.“



Obr. 7. Schéma prvního zkapalňovače helia.

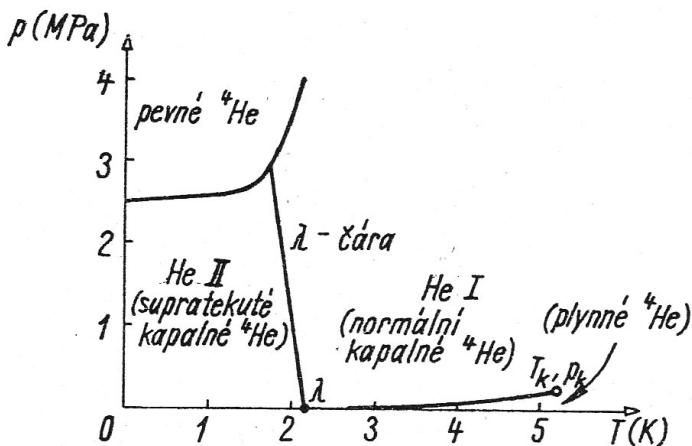
## Další vývoj kryogenní fyziky

Již v prvním dni zkapalnění se podařilo ochladit kapalně helium pod 2 K, v dalších experimentech i pod 1 K. V těchto teplotách je již  ${}^4\text{He}$  supratekuté. Na podivné chování kapalného helia pod teplotou 2,17 K upozornil až Willem Hendrik Keesom na základě studia měrné tepelné kapacity, tři týdny po smrti svého učitele Heike Kamerlingha Onnese. Nikdo nebyl tehdy připraven na možnost existence kapaliny, která se řídí zákony kvantové fyziky v makroskopickém měřítku, a tak musela supratekutost čekat na svůj objev ještě dalších dvacet let. Ostatně její mikroskopická teorie není dodnes

---

Moje práce s heliem jsou zastaveny kvůli zdravotním potížím, ale doufám v nich později pokračovat.“

uspokojivě vybudována. Kamerlingh Onnes se snažil snižováním teploty kapalného helia dosáhnout trojného bodu a získat tak pevné helium. To se podařilo až po letech v jeho laboratoři, avšak pomocí zvýšeného tlaku. Neexistenci trojného bodu helia vysvětlila až kvantová teorie (viz obr. 8).



Obr. 8. Fázový diagram  ${}^4\text{He}$  [7].

Věrnost zásadám pečlivého a dobře reprodukovatelného experimentu znemožnila Kamerlinghu Onnesovi objevit anomální průběh měrné tepelné kapacity helia ve tvaru řeckého písmene lambda, při teplotě tzv. bodu  $\lambda$ , kdy normální helium přechází v supratekuté. Při měření, které prováděl spolu s americkým chemikem Leo Hanou, dostával v těsné blízkosti teploty  $T_\lambda = 2,17$  K neobvykle vysoké hodnoty měrné tepelné kapacity, zdánlivě nereprodukovatelné. Rozhodl se tedy publikovat výsledky měření s vynecháním sporné oblasti teplot.

Od dalšího a hlubšího zkoumání vlastností kapalného helia odvedl Kamerlingha Onnese nečekaný výsledek měření elektrického odporu kovů v heliových teplotách, která prováděl spolu s Gillesem Holstem. Chtěli zjistit, zda odpor čistých kovů bude s klesající teplotou dále klesat, jak by odpovídalo zmenšujícím se kmitům mřížky, které jsou překážkou pohybu elektronů, či v nízkých teplotách vzroste, jak by odpovídalo klesající rychlosti elektronů. Zkoumali velmi čisté kovy a v roce 1911 prováděli měření s velmi čistou rtutí. Pod teplotou 4,15 K odpor rtuti mnohonásobně klesl. Zlepšováním metodiky měření malých odporů dospěli k závěru, že pod kritickou teplotou je odpor rtuti nikoli pouze neměřitelný, nýbrž nulový. Zjištěný jev nazval Kamerlingh Onnes supravodivostí. Zkoumání jevu supravodivosti vedlo k významnému pokroku ve fyzice kondenzovaných látek s některými odezvami i v astrofyzice a s významnými aplikacemi v fyzice elementárních částic, v technice, dopravě i medicíně. Mikroskopická teorie supravodivosti (BCS) byla formulována až v roce 1956 Johnem Bardeenem, Leonem Cooperem a Johnem R. Schriefferem.

V roce 1913 byl Heike Kamerlingh Onnes vyznamenán Nobelovou cenou za fyziku. Udělení ceny bylo zdůvodněno jeho zásluhou o zkoumání vlastností hmoty za nízkých teplot vedoucí mimo jiné ke zkapalnění helia.

Teplota 0,9 K získaná Kamerlinghem Onnesem byla až do třicátých let dvacátého století nejnižší dosaženou teplotou. Teprve v roce 1934 byla objevena existence druhého a vzácnějšího stabilního izotopu helia – helia 3. Teplota varu  ${}^3\text{He}$  za normálního tlaku je 3,191 K a čerpáním par je možné jej ochladit až na teplotu asi 0,35 K. Rozpouštěním  ${}^3\text{He}$  v supratekutém  ${}^4\text{He}$  dochází s ohledem na jejich rozdílný kvantový charakter k chlazení a tak lze získat teplotu až pod 2 mK.

V roce 1926 nezávisle na sobě podali Peter Debye a William F. Giauque návrh na chlazení adiabatickou demagnetizací paramagnetik. První tuto metodu realizoval Wander J. de Haas v laboratoři, kterou Kamerlingh Onnes vybudoval. Adiabatická demagnetizace využívaná do šedesátých let dvacátého století umožnila chladit až do teplot pod 1 mK. Nejhlubšího chlazení se nyní dosahuje modifikací této metody, jadernou demagnetizací, při níž se k chlazení využívá magnetického uspořádávání spinů atomových jader, nejčastěji mědi nebo prvků vzácných zemin. Nejnižší teplota, na níž se touto metodou podařilo ochladit supratekuté  ${}^3\text{He}$ , činí asi  $5\ \mu\text{K}$ .

V posledních letech je možné pro některé aplikace nahradit chlazení lázní kryogenní kapaliny ochlazováním pomocí tepelných strojů – kryogenerátorů. Nejdokonalejší z nich chladí dnes až na 3 K a dovolují tak pracovat v nízkých teplotách i bez kapalného helia. S ohledem na klesající světové zásoby zemního plynu a tím i helia se bude jistě použití kryogenerátorů stále rozšiřovat. Zkapalnění helia však sehrálo nesporně důležitou roli ve vývoji fyziky dvacátého století.

**Poděkování:** Práce byla podpořena Výzkumným záměrem MŠMT 0021620834.

## L i t e r a t u r a

- [1] MENDELSSOHN, K.: *The quest for absolute zero, the meaning of low temperature physics*, Taylor and Francis, London 1966.
- [2] VAN DELFT, D.: *Freezing physics, Heike Kamerlingh Onnes and the quest for cold*, Bakker, Amsterdam 2007.
- [3] VAN HELDEN, A. C.: *The coldest spot on earth*, Boerhaave Museum, Leiden 1989.
- [4] MATRICON, J., WAYSAND, G.: *La guerre du froid*, Seuil, Paris 1994.
- [5] VAN DELFT, D.: *Jacht op het absolute nulpunkt*, Bakker, Amsterdam 2008.
- [6] SHACHTMAN, T.: *Absolute zero and the conquest of cold*, A Mariner Book, New York 2000.
- [7] JELÍNEK, J., MÁLEK, Z.: *Kryogenní technika*, SNTL, Praha 1982.