

# Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

---

Dirk Delft; Peter Kes  
Objev supravodivosti

*Pokroky matematiky, fyziky a astronomie*, Vol. 56 (2011), No. 3, 187--193

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/142006>

## Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 2011

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>

# Objev supravodivosti

*Dirk van Delft, Peter Kes, Leiden*

Před sto lety, 8. dubna 1911, Heike Kamerlingh Onnes a jeho spolupracovníci poprvé pozorovali jev supravodivosti [1]. V drátě ze zamrzlé rtuti naplněné do sedmi skleněných kapilár ve tvaru písmene U zapojených do série (obr. 1) elektrický odpor jakoby vymizel při ochlazení na teplotu 4,16 K (viz [2]). Krátké spojení, jako zřejmá příčina, bylo vyloučeno, avšak jev, k němuž došlo, nalezl své vysvětlení na fundamentální úrovni až v roce 1957, kdy byla publikována teorie supravodivosti Bardeena, Coopera a Schrieffera (BCS). Viz [3].

Objev supravodivosti se může jevit jako náhodný, experiment byl však v Leidenu součástí promyšleného výzkumného programu. Studium chování elektrického odporu kovů (takových jako jsou zlato a platina) ve velmi nízkých teplotách bylo zajímavé jak z praktického, tak i z teoretického hlediska. Praktickým důvodem byla možnost využít teplotní závislosti odporu kovů jako sekundárních teploměrů. Staly by se vítaným doplňkem k (primárním) plynovým teploměrům, jež byly sice přesné, pro praktické účely však pomalé a těžkopádné. Teoretickým důvodem byla možnost rozhodnout o platnosti předpovědi Paula Drudeho, který v roce 1900 aplikoval kinetickou teorii plynů na chování elektronového plynu v kovech a předpověděl tak lineární pokles odporu s klesající absolutní teplotou a předpovědí, kterou rok poté vyslovil William Thomson (Lord Kelvin), totiž že při extrémně nízkých teplotách elektromy prakticky „přimrznou“ k iontům tak, že při absolutní nule se odpor stane nekonečným [4].

## Rtuť

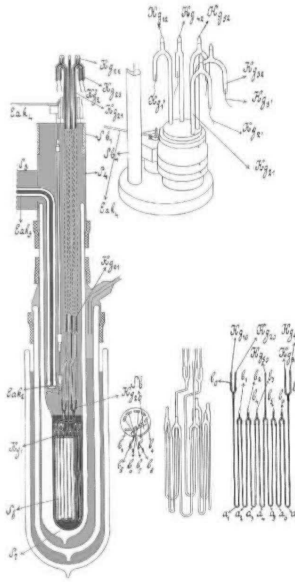
Od roku 1906 Jacob Clay a další studenti Kamerlingha Onnese prováděli v Leidenské fyzikální laboratoři úspěšná měření elektrického odporu až do 14 K, což je teplota tuhnutí vodíku. Při těchto měřeních zjistili, že ačkoli odpor platiny i zlata klesal s klesající teplotou, při zhruba stejné teplotě přestal být na teplotě závislý [5]. Úspěšné zkapalnění helia, k němuž došlo v Leidenu 10. července 1908, poskytlo tomuto výzkumu nový impuls, neboť bylo náhle možné dosahovat teploty až 1 K (viz [6]). Výsledkem těchto nových měření bylo zjištění, že při takto nízkých teplotách má odpor jakousi zbytkovou hodnotu tím nižší, čím čistší je možné připravit platinu nebo zlato [7] (viz obr. 2). Očekávalo se proto, že ve velmi čistých materiálech při přiblížení k absolutní nule by odpor měl klesnout na nulu.

---

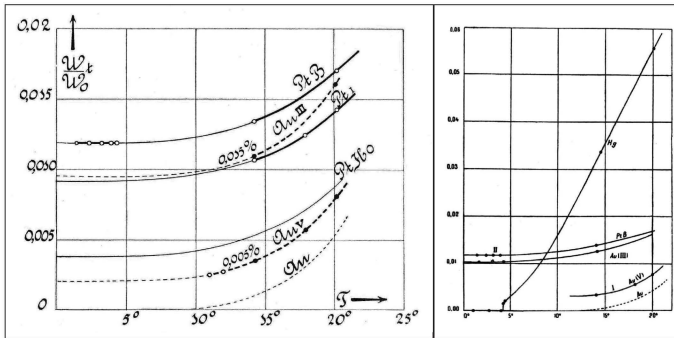
DIRK VAN DELFT, Museum Boerhaave, P.O. Box 11280, 2301 EG Leiden, Nizozemí,  
e-mail: [dirkvandelft@museumboerhaave.nl](mailto:dirkvandelft@museumboerhaave.nl)

PETER KES, Leiden Institute of Physics, P.O. Box 9504, 2300 RA Leiden, Nizozemí,  
e-mail: [kes@physics.leidenuniv.nl](mailto:kes@physics.leidenuniv.nl)

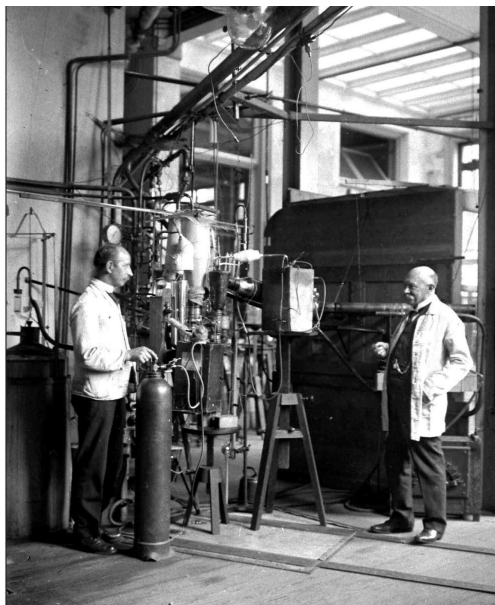
© 2011 Europhysicsnews. Z anglického originálu *The Discovery of Superconductors*, Europhysicsnew 42 (2011), 21–25, přeložil MILOŠ ROTTER.



Obr. 1. Kryostat se rtuťovým rezistorem a rtuťovými přívody pro experiment ze dne 26. října 1911. Sedm kapilár ve tvaru písmene U (s vnitřním průměrem 0,07 mm) je zapojeno do série. Každá kapilára má na vrchu vytvořen zásobník rtuti, přívody kontaktů jsou rovněž tvořeny kapilárami naplněnými rtuťí. Stejné zapojení (ale s měděnými kontakty) bylo použito v měření z 8. dubna. Na vnější kontakty byl použit platinový drát (označený Hg<sub>xxx</sub>), na detailu nahoře vpravo.



Obr. 2. Poměr odporů několika kovů byl změřen v závislosti na teplotě. Na levém obrázku je znázorněno chování několika platinových a zlatých rezistorů při různých teplotách lázně kapalného vodíku. Rezistor Pt-B byl vůbec první ochlazen na heliovou teplotu v experimentu z 2. prosince 1910. Konstantní odpor pod teplotou 4,3 K byl v rozporu s Kelvinovým modelem vodivosti, elektrony nepřimrzaly k mřížce iontů při absolutní nule. Zbytkový odpor je způsoben rozptylem elektronů na příměsích. Připraví-li se kovové dráty čistší jak chemicky, tak i fyzikálně (žiháním se odstraní nepravidelnosti v uspořádání mřížky), odpor klesne o konstantní hodnotu a potvrzuje tak platnost Matthiesenova pravidla až do nejnižších teplot. Na pravém grafu jsou relativní odpory Pt a Au srovnány s relativním odporem rtuti (Hg, strmá křivka). Měření prováděná v kapalném vodíku jsou označena I, měření v kapalném heliu jsou označena II.

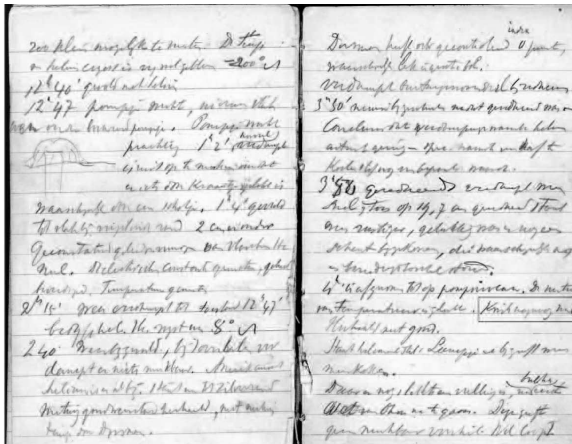


Obr. 3. Gerrit Jan Flim (nalevo), vedoucí leidské kryogenní laboratoře, a Heike Kamerlingh Onnes u heliového zkapařňovače, asi v roce 1920.

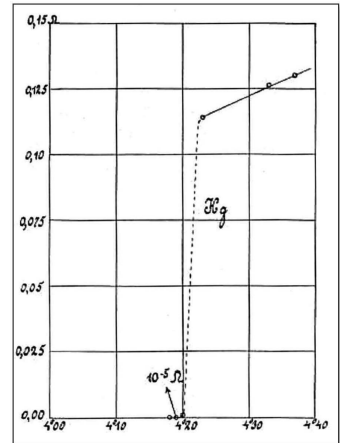
Dalším logickým krokem byla volba rtuti jako kovu, který lze destilací připravit extrémně čistý. Kapilára naplněná rtutí, mistrovské dílo německého skláře Kesselringa usazeného v Leidenu, byla umístěna do kryostatu v blízkosti zkapařňovače. Cílem experimentu byl test systému přelévání kapalného helia. V průběhu rozhodujícího experimentu, 8. dubna 1911, za kryogenní část zařízení zodpovídali Heike Kamerlingh Onnes a Gerrit Jan Flym, hlavní tvůrce zařízení a technický vedoucí kryogenní laboratoře (viz obr. 3). Měření teploty pomocí plynového teploměru byl pověřen Cornelis Dorsman. Odpor rtuti a také zlata byl určován pomocí odporového můstku se zrcátkovým galvanometrem. Galvanometr se nacházel v místnosti bezpečně vzdálené od vibrujících vývěv na sloupu dobře izolovaném od kmitů. Výchylku galvanometru sledoval Gilles Holst, který svá pozorování sděloval pomocí hlásného potrubí. Výsledkem tohoto experimentu bylo zjištění, že odpor rtuti skutečně klesl na nulu (viz obr. 4 a 5). Tento poznatek však byl komplikován přítomností teploty přechodu, pro který neexistovalo teoretické vysvětlení [8].

### Další supravodiče

V prosinci roku 1912 se ke rtuti přidaly dva další supravodiče – cín s teplotou přechodu 3,8 K a olovo s teplotou 7,2 K. Od tohoto okamžiku již nebylo třeba experimentovat s křehkými skleněnými kapilárami naplněnými rtutí. Bylo možné pracovat mnohem pohodlněji s cívkami drátů. Dráty byly vyřezávány pomocí dlátka z pláště válečků z cínu nebo olova. Tímto způsobem byly získány kvalitnější vodiče než běžným mechanickým tažením drátů. Kousky drátu byly spájeny dohromady na délku 1,75 m.



Obr. 4. Důležitá stránka zápisníku Kamerlingha Onnese z 8. dubna 1911. Podtržená věta „Kwik nagenoek nul“ znamená „Rtuť ukazuje prakticky nulu (odporu při 3,0 K)“ svědčí o prvním pozorování supravodivosti. Náčrtek na levé stránce znázorňuje činnost míchačky. (Z archivu muzea Boerhaave v Leidenu.)



Obr. 5. Historický záznam závislosti odporu rtuť ( $\Omega$ ) na teplotě (K) z měření z 26. října 1911 ukazuje supravodivý přechod při teplotě 4,2 K. V rozmezí 0,01 K odpor vzroste z neměřitelně malé hodnoty (menší než  $10^{-5} \Omega$ ) na 0,1  $\Omega$ .



Obr. 6. Cívka z olověného drátu (pohled ve směru osy cívky), kterou v roce 1912 používal Kamerlingh Onnes a jeho spolupracovníci, je nyní uchovávána v muzeu Boerhaave.

Cívka byla navinuta na skleněném jádře asi s 300 závity drátu o průřezu  $1/70 \text{ mm}^2$  izolovaného hedvábím (viz obr. 6). Kamenem úrazu však bylo zjištění, že kritický proud (mezní proud) cínového či olověného drátu, nad nímž supravodivost vymizí, byl u cívky zjištěn mnohem menší než u přímého drátu. Zatímco v přímém cínovém drátu byl kritický proud 8 A, na cívce byl zaznamenán přechod již při 1 A. Kamerlingh Onnes

přičítal zpočátku tento jev špatně provedeným pájeným spojům nebo jiným vnějším vlivům [9]. Přání bylo otcem myšlenky. V sázce bylo velké dílo, jímž nebylo nic menšího než kompaktní výkonný supravodivý magnet. Již na počátku století vyslovil Jean Perrin představu magnetu z měděného drátu chlazeného kapalným dusíkem, který by vytvářel magnetické pole 100 000 G (10 T). Další kvantitativní analýza ale ukázala, že gigantický magnet tohoto typu by vyžadoval napájecí příkon 100 kW. K odvedení vznikajícího tepla by bylo třeba odpařovat nejméně 1500 l kapalného vzduchu za hodinu, čímž by se tento „vysněný magnet“ stal stejně nákladným jako bitevní křižník. Situace při využití supravodivosti by však byla zcela jiná. Na třetím Mezinárodním kongresu o chlazení (ICR) v Chicagu Kamerlingh Onnes znovu prosazoval myšlenku supravodivého magnetu. „Řešení problému získání magnetického pole 100 000 G lze dosáhnout cívkou o průměru, řekněme, 30 cm chlazenou heliem, které bude zkapalňováno zařízením, jež můžeme v Leidenu vyrobit s relativně skromnou finanční podporou“, napsal ve svém příspěvku shrnujícím kryogenní práce v Leidenu. „Jelikož můžeme s jistotou očekávat, že dojde k urychlenému rozvoji experimentální vědy, tato budoucnost nemůže být vzdálená“ [10]. V Chicagu se George Claude, zakladatel firmy Air Liquide, okamžitě chopil iniciativy pro získání finanční pomoci ve výši 100 000 franků na projekt Kamerlingha Onnese na výrobu supravodivého magnetu (vypuknutí 1. světové války však toto dílo překazilo).

Ukázalo se, bohužel záhy, že magnetické pole supravodivost ruší. V cívce z olověného drátu při 4,25 K supravodivost zaniká při působení pole pouhých 600 G [11]. V důsledku přechodu do rezistivního stavu pod vlivem magnetického pole se supravodivá varianta Perrinova snu zcela zhroutila. Teprve v šedesátých letech minulého století se podařilo vyrábět silné supravodivé magnety díky supravodivému drátu ze slitiny niobu s titanem. Tato slitina představuje konvenční supravodič s vysokým mezním polem, s velkou kritickou hustotou proudu a kritickou teplotou  $T_c$  přechodu ze supravodivého do normálního stavu. Magnetické rezonanční tomografie i vychylovací magnety velkých urychlovačů částic stále využívají supravodiče tohoto typu. Vše, co očekáváme od nových vysokoteplotních supravodičů, je možnost technicky realizovat přípravu drátů tak, abychom se zbavili nutnosti chladit kapalným heliem.

## Využití

Ve skutečnosti takové dráty již existují, jsou ale stále relativně nákladné a používají se tedy pouze tam, kde jejich lepší vlastnosti převažují nad zvýšenou cenou. Například přívody proudu od zdrojů na pokojové teplotě k vychylovacím magnetům urychlovače LHC v CERN jsou vyrobeny z vysokoteplotního supravodiče typu BiSrCaCuO. Kabley z vysokoteplotních supravodičů pro silnoproudý přenos elektrické energie pracující za teploty kapalného dusíku jsou průběžně testovány v několika pilotních projektech. Budou-li projekty úspěšné, mohou tyto kabely nahradit vysokonapěťová měděná vedení v městských aglomeracích a snad v blízké budoucnosti vytvořit i světovou síť takových výkonových přenosových tras založených na vysokoteplotních supravodičích, které budou elektrickou energii přenášet od trvalých zdrojů obnovitelné energie k oblastem s velkou koncentrací spotřebitelů.

V současné době se supravodivost využívá zejména pro lékařskou diagnostiku (magnetickou rezonanční tomografii MRT) a pro vědecké účely (urychlovače elementárních částic a detektory či spektrometry jaderné magnetické rezonance vysokého rozlišení v silných magnetických polích). Tyto aplikace jsou založeny na dosažení vysokých hustot proudu ve vodičích bez ztrát v magnetických polích nad 20 T, kterých lze dosahovat v materiálech, jako je Nb-Ti a Nb<sub>3</sub>Sn. Tyto vlastnosti činí uvedené materiály velice vhodnými pro konstrukci širokého spektra supravodivých magnetů. Existuje také významné komerční využití slaboproudé supravodičové elektroniky založené na tunelování Cooperových párů (Josephsonův jev předpovězený a poprvé pozorovaný v roce 1962) a na kvantování magnetického indukčního toku ve skvidu (Superconducting Quantum Interference Device). Vysoce citlivá zařízení založená na skvidu lze dnes nalézt téměř v každé laboratoři fyziky pevné fáze nebo materiálového výzkumu. Lze tedy konstatovat, že dnešní využití supravodivosti bylo umožněno velkými objevy a technickým vývojem v padesátých a šedesátých letech minulého století. Jmenujme jen některé z nich: objev izotopového jevu, závislosti hloubky vniku na čistotě materiálu, fenomenologické Ginzburgovy a Landauovy teorie, Abrikosovy teorie supravodičů 2. typu, mikroskopické teorie BCS a jejího rozšíření díky pracím, které vytvořili Gorkov, Bogoljubov, De Gennes, Anderson a Eliashberg, elektronové – fononové spektroskopie, studia kvantování magnetického indukčního toku, objev Josephsonových jevů, pozorování mřížky linií magnetického indukčního toku a tak dále [12, 13]. Posledně jmenované studium dokazuje existenci linií magnetického toku, které obsahují jediné kvantum magnetického indukčního toku, jak to předpověděl Abrikosov. Bez linií vřít magnetického toku a jejich záchytu (pinningu) by nebylo možné dosahovat velkých kritických proudů a nemohlo by existovat využití supravodivosti pro velké proudy. Můžeme tedy s určitostí říci, že využití supravodivosti je založeno na supravodivosti jako makroskopickém kvantovém jevu. Lze také tvrdit, že vlastnosti konvenčních supravodičů je možné kompletně teoreticky vysvětlit. Krásným příkladem je nedávno objevený „vysokoteplotní“ supravodič MgB<sub>2</sub> ( $T_c \approx 40$  K). Už po roce po jeho objevu bylo možno v rámci konvenční BCS Eliashbergovy teorie odvodit, proč se tato jednoduchá sloučenina vyznačuje tak překvapivě vysokou kritickou teplotou.

Objev „pravých“ vysokoteplotních supravodičů je však zcela jiná historie. Život se zcela změnil objevem supravodivosti v něčem, co jsou v podstatě dopované izolátory. Beasley to ve svém příspěvku vyjádřil takto [13]: „Z historického hlediska [...] lze jasně rozeznat dvě období: od Kamerlingha Onnese k Bednorzovi a Müllerovi a po Bednorzovi a Müllerovi.“ Porozumění fyzikální podstaty supravodivosti v těchto silně korelovaných kvazi-dvojdímných elektronových systémech, jakými jsou dopované kupráty a nedávno objevené pniktidy dopované železem, je stále ještě ve vývoji. Je to nesmírně vzrušující oblast výzkumu se spoustou hlubokých otázek, které stále čekají na své odpovědi. Čtivý a zároveň důkladný přehled výzkumu v této oblasti v posledních dvaceti letech podává práce [14].

Od 1. dubna 2011 do 1. dubna 2012 hostí muzeum Boerhaave v Leidenu výstavu nazvanou „*Rtuť prakticky na nule. Sto let supravodivosti*“.

Viz [www.museumboerhaave.nl](http://www.museumboerhaave.nl).

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

- [1] Datum 8. dubna 1911 vychází z vlastních deníků Kamerlingha Onnese a bylo nedávno potvrzeno, viz VAN DELFT, D., KES, P.: *Physics Today* (September 2010), 38.
- [2] KAMERLINGH ONNES, H.: *KNAW Proceedings 13 II* (1911), 1274, publikováno rovněž v *Communications of the Physical Laboratory of the University of Leiden*, no. 120b.
- [3] BARDEEN, J., COOPER, L.N., SCHRIEFFER, J.R.: *Phys. Rev.* 108 (1957), 1175–1204.
- [4] Pro přehled experimentálních a teoretických poznatků o supravodivosti, viz např. DAHL, P.F.: *Superconductivity, its Historical Roots and Development from Mercury to the Ceramic Oxides* (New York 1992), 13–49.
- [5] KAMERLINGH ONNES, H., CLAY, J.: *KNAW Proceedings 10* (1907), 207. Comm. 99c.
- [6] KAMERLINGH ONNES, H.: *KNAW Proceedings 11* (1909), 168. Comm. 108.
- [7] KAMERLINGH ONNES, H.: *KNAW Proceedings 13* (1911), 1093. Comm. 119.
- [8] Z popsaného průběhu experimentu bezpochyby vyplývá, že stále se opakující tvrzení, že supravodivost objevil ve skutečnosti Holst, nejsou oprávněná. Ostatně Holst, který se v roce 1914 stal prvním ředitelem výzkumu firmy Philips, nikdy o tuto prioritu neusiloval.
- [9] KAMERLINGH ONNES, H.: *KNAW Proceedings 16 II* (1914), 987. Comm. 139f.
- [10] KAMERLINGH ONNES, H.: *Comm.Supplement 34a*.
- [11] Viz odkaz 9.
- [12] KAMERLINGH ONNES, H.: Symposium on the Origins of Applied Superconductivity – 75th Anniversary of the Discovery of Superconductivity at the 1986 Applied Superconductivity Conference, 28. září – 3. října 1986, Baltimore, Maryland, *IEEE Trans. Mag., MAG-23* (1987), 354.
- [13] K vydání se připravuje publikace „100 Years of Superconductivity“, v níž bude mnoho (osobních) příspěvků věnovaných historickému vývoji supravodivosti v uplynulých sto letech i současný pohled na perspektivy supravodivosti a jejího využití. Pro aktuální informace viz [www.eucas2011.org](http://www.eucas2011.org) ve složce „Book Project“.
- [14] ZAAANEN: *A modern, but way too short history of the theory of superconductivity at a high temperature*, bude uvedeno v [13]. Viz též <http://arxiv.org/abs/1012.5461>.