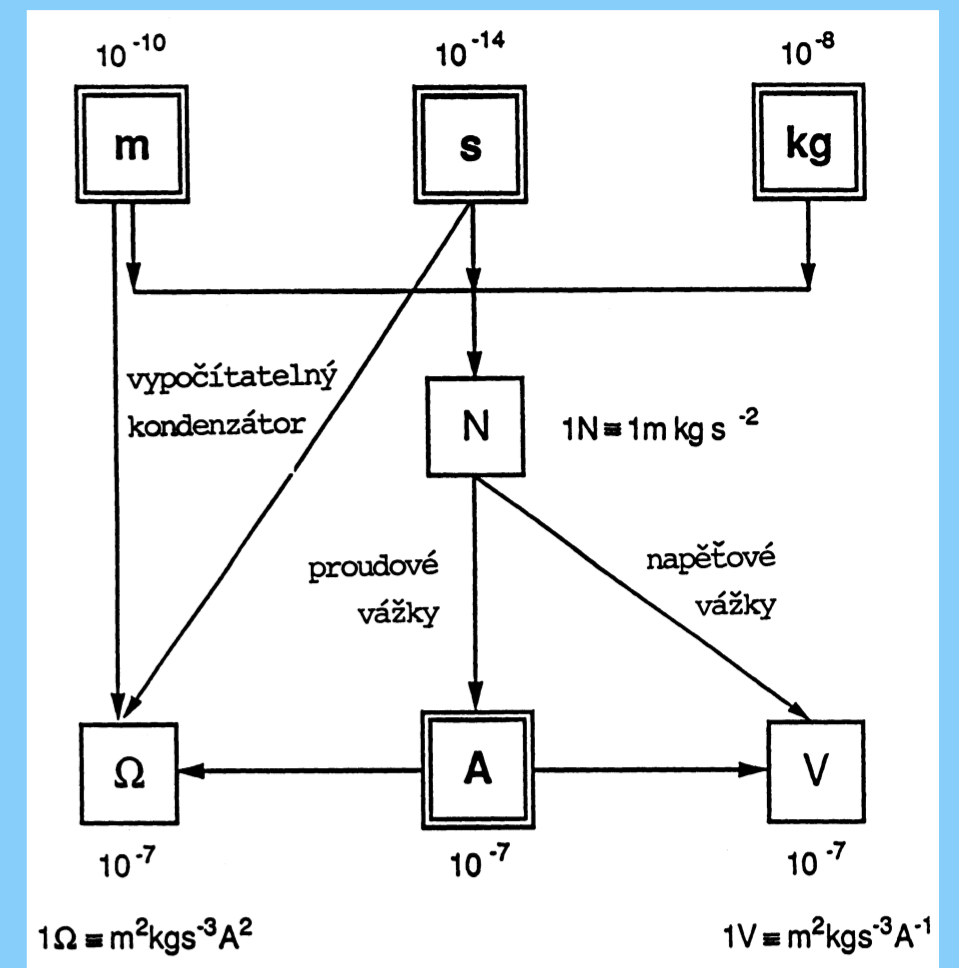


# KVANTOVÝ ETALÓN ELEKTRICKÉHO ODPORU



**Metrologie** — vědní obor, který stanovuje metodiku přesného a mezinárodně jednotného měření a vážení. Jejím úkolem je mj. definovat všeobecně platné jednotky měření a stanovit co nejpřesnější způsob jejich praktické realizace v etalónech jednotek.

Jednotkou elektrického odporu v soustavě jednotek SI je **OHM** ( značka  $\Omega$  ). Je to jednotka odvozená a podle definice je kombinací základních jednotek mechanických ( m, kg ) a elektrických ( A ). Praktická realizace ohmu podle definice je mimořádně náročná a provádí se s odstupem několika let pouze ve špičkových světových metrologických laboratořích. V laboratořích NIST v USA byl takto realizován ohm s *přesností*  $2 \times 10^{-8}$ .



**Kvantový Hallův jev** — spolu s vysokoteplotní supravodivostí představuje dva největší objevy fyziky pevných látek v posledních 20 letech. Měření Hallova odporu  $R_H$  na vhodných polovodičových strukturách poskytuje hodnoty  $R_H(i)$ , které:

1. Závisejí pouze na základních fyzikálních konstantách podle vztahu

$$R_H(i) = h/ie^2 ; i = 1, 2, 3, \dots$$

a nemění se tedy s časem. Veličina  $h/e^2$  je dnes nazývána *Klitzingovou konstantou*.

2. Jsou s vysokou přesností ( lepší než  $10^{-9}$  ) stejné v různých polovodičových systémech, kde se KHJ uplatňuje ( *Si-MOSFET, heterostruktury typu GaAs/AlGaAs* ).
3. V poměrně širokých mezích nezávisejí na experimentálních podmínkách ( *teplota měření, měřící proud, stabilita magnetického pole* ) ani na parametrech použité polovodičové struktury.

Tyto vlastnosti předurčují využití KHJ v metrologii, protože umožňují realizovat přesný, dokonale stabilní a vysoce reprodukovatelný **kvantový etalón elektrického odporu**. Počínaje 1.1. 1990 je tak všem členským zemím *Mezinárodní konference měř a vah* (CPGM) — tj. i České republice — doporučeno navázat své národní etalóny odporu na tyto kvantové etalóny. Jednotnost měření v různých zemích a zároveň nejpřesnější možný souhlas takto získané jednotky odporu s ohmem, definovaným v soustavě SI, je přitom dosaženo *postulováním přesné hodnoty Klitzingovy konstanty*  $R_K$ . Pro účely metrologie tedy platí :

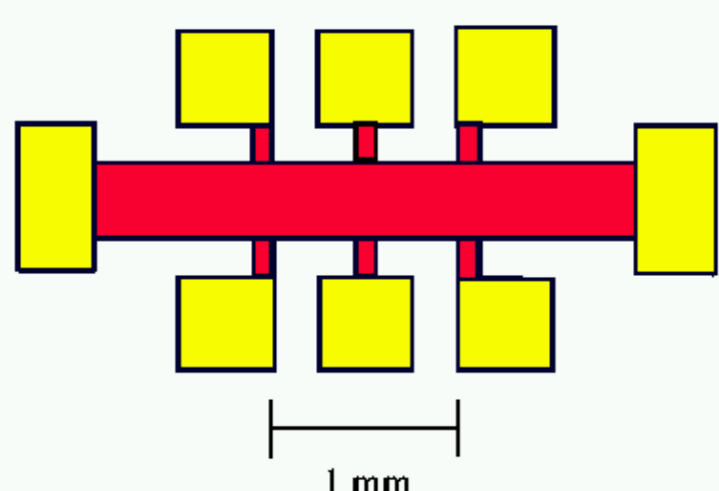
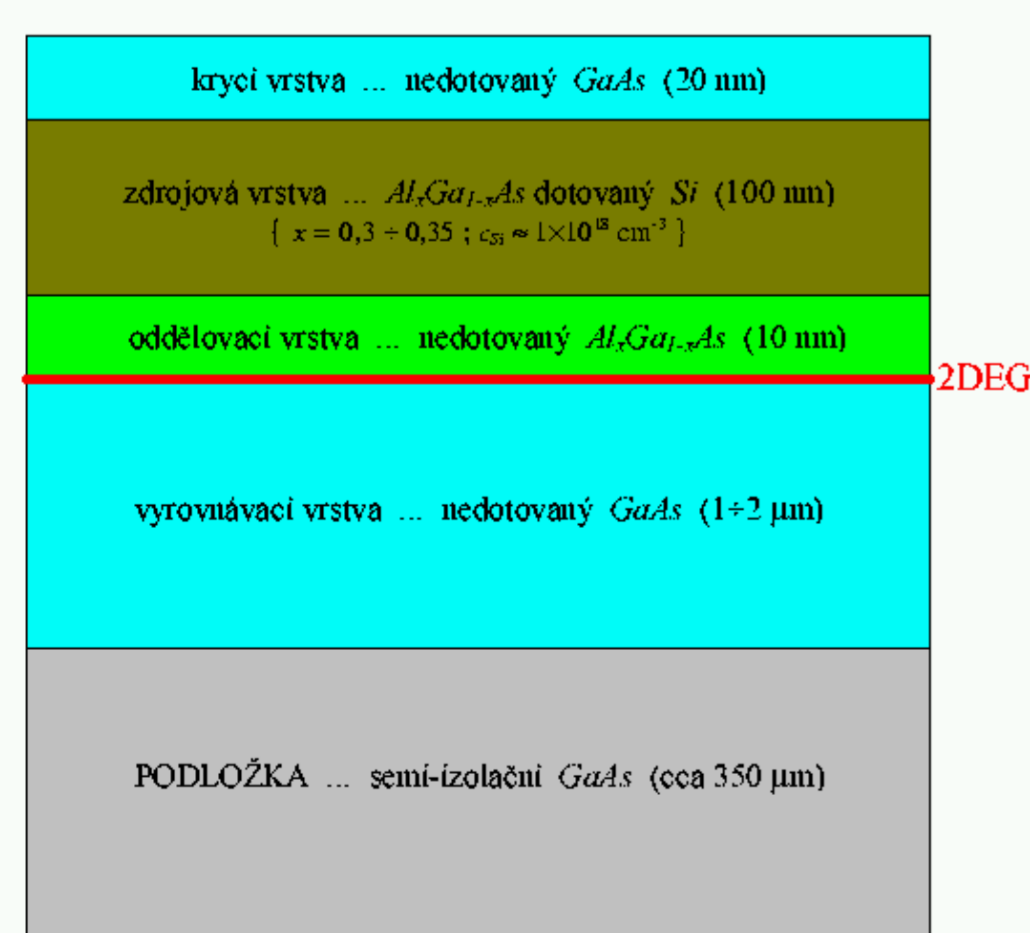
$$R_H(i) \equiv R_{K-90}/i ; R_{K-90} = 25812,807 \Omega$$

Pomocí kvantového etalónu odporu je možno v pravidelných intervalech kalibrovat *národní sekundární etalóny*, které jsou pak dále používány pro praktické kalibrace. Každý vyspělejší stát se dnes snaží vybudovat svůj vlastní kvantový etalón ; v ČR je k tomu určena *Společná laboratoř FZÚ AVČR, ČMI a FEL ČVUT*, umístěná ve Fyzikálním ústavu AVČR. Přední světové metrologické ústavy, např. v USA a SRN, pak provádějí nákladné a časově náročné experimenty, jejichž cílem je další *zprecizování doporučené hodnoty Klitzingovy konstanty*.

**K realizaci kvantového etalónu odporu je třeba zajistit :**

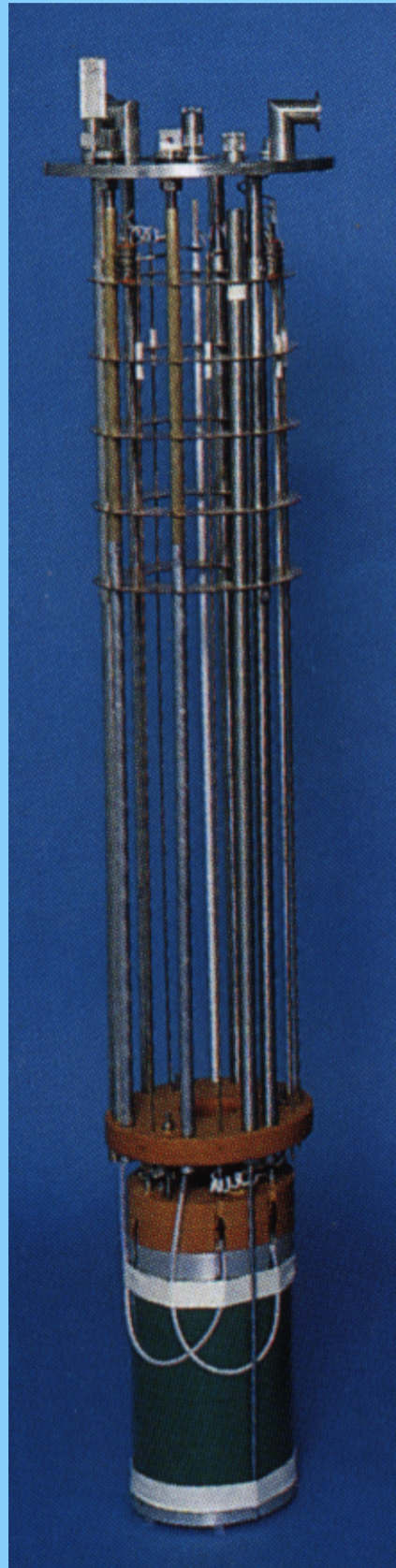
## A. Vhodnou polovodičovou strukturu

### MODULAČNĚ DOTOVANÁ HETEROSTRUKTURA GaAs/AlGaAs



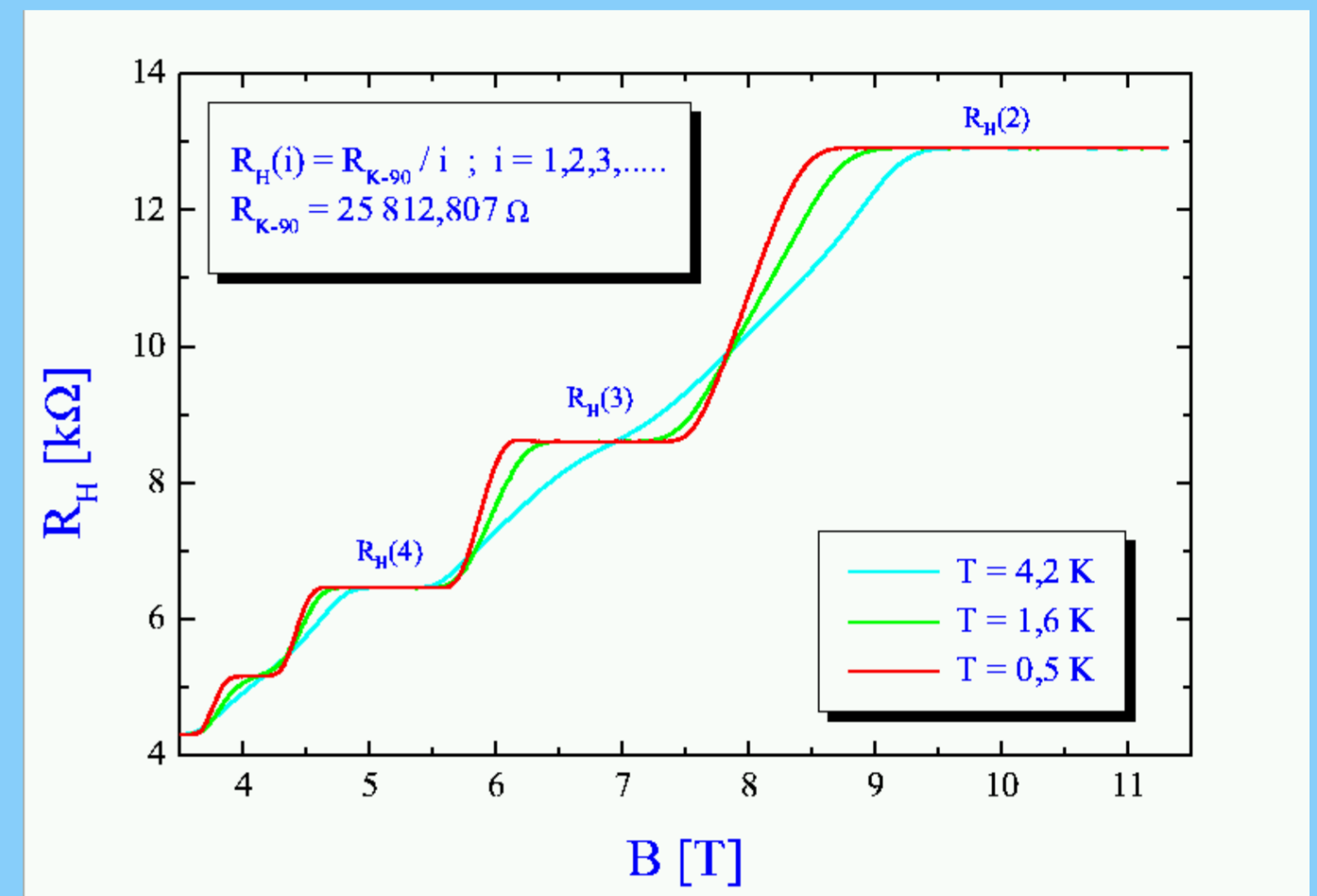
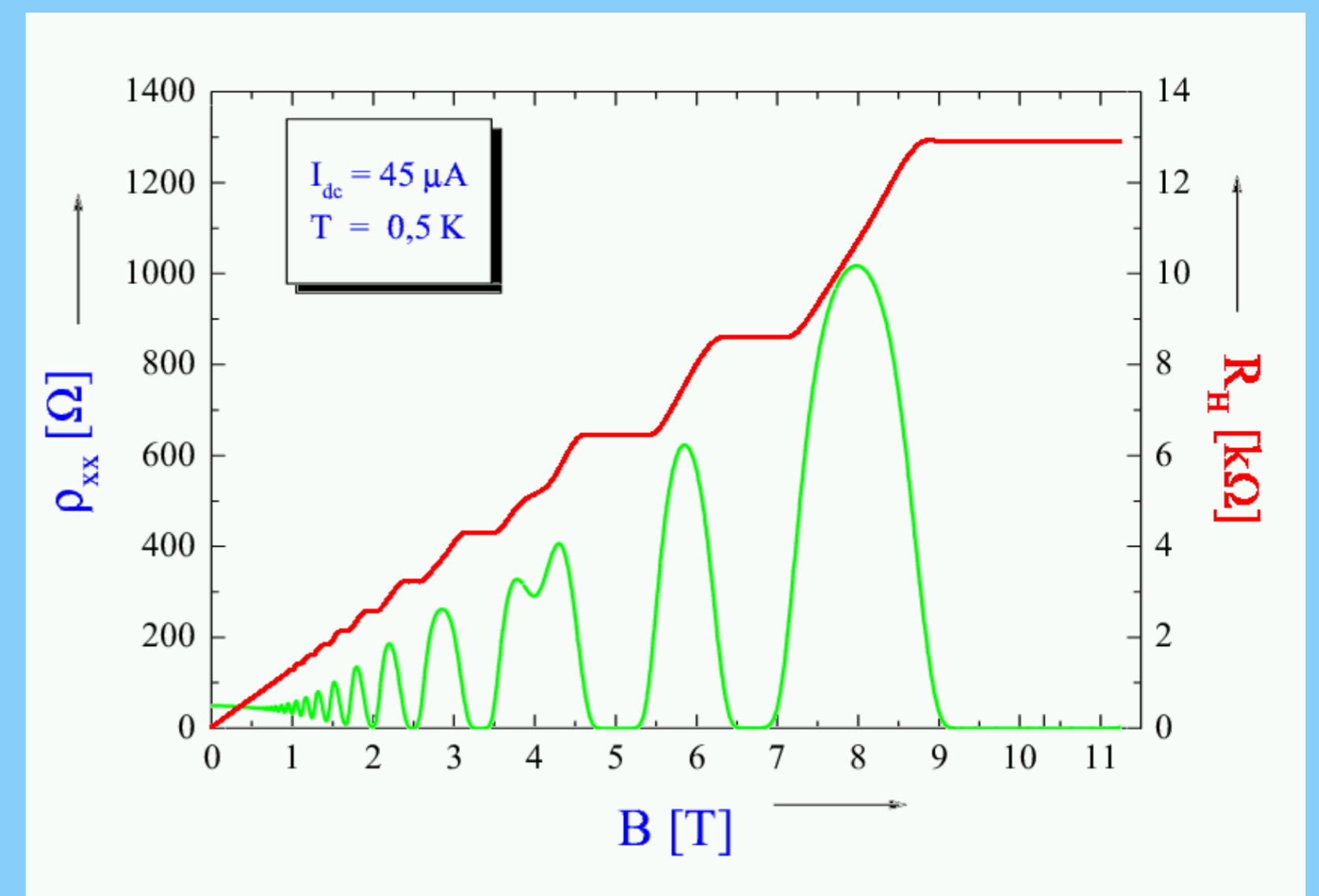
KHJ se uplatňuje ve strukturách s *dvourozměrným elektronovým plynem*, kde se elektrony mohou pohybovat volně pouze v rovině a jejich pohyb ve směru kolmém na tuto rovinu je prakticky vyloučen. Ačkoliv KHJ byl objeven v r.1980 při měřeních na *křemíkových polních transistorech* (Si-MOSFET), dnes se pro účely metrologie používají výhradně *heterostruktury GaAs / AlGaAs*, připravené metodami *MBE* nebo *MOCVD*. Z vrstevnatých struktur, produkovaných těmito metodami, je selektivním leptáním připraven *vzorek*, který je pak opatřen elektrickými kontakty. Geometrie vzorku je volena tak, aby bylo možno současně měřit jak *Hallův odpor*  $R_H$ , tak i *podélný odpor*  $\rho_{xx}$ .

Je-li tento vzorek ochlazen na dostatečně nízkou teplotu a umístěn do vnějšího magnetického pole  $B$  kolmého k rovině elektronové vrstvy ve vzorku, naměříme závislosti uvedené na vedlejším grafu. Prodlévám na křivce  $R_H(B)$ , kde je Hallův odpor konstantní a roven  $R_H(i)$ , odpovídají na křivce podélného odporu oblasti, kde  $\rho_{xx} \cong 0$ .

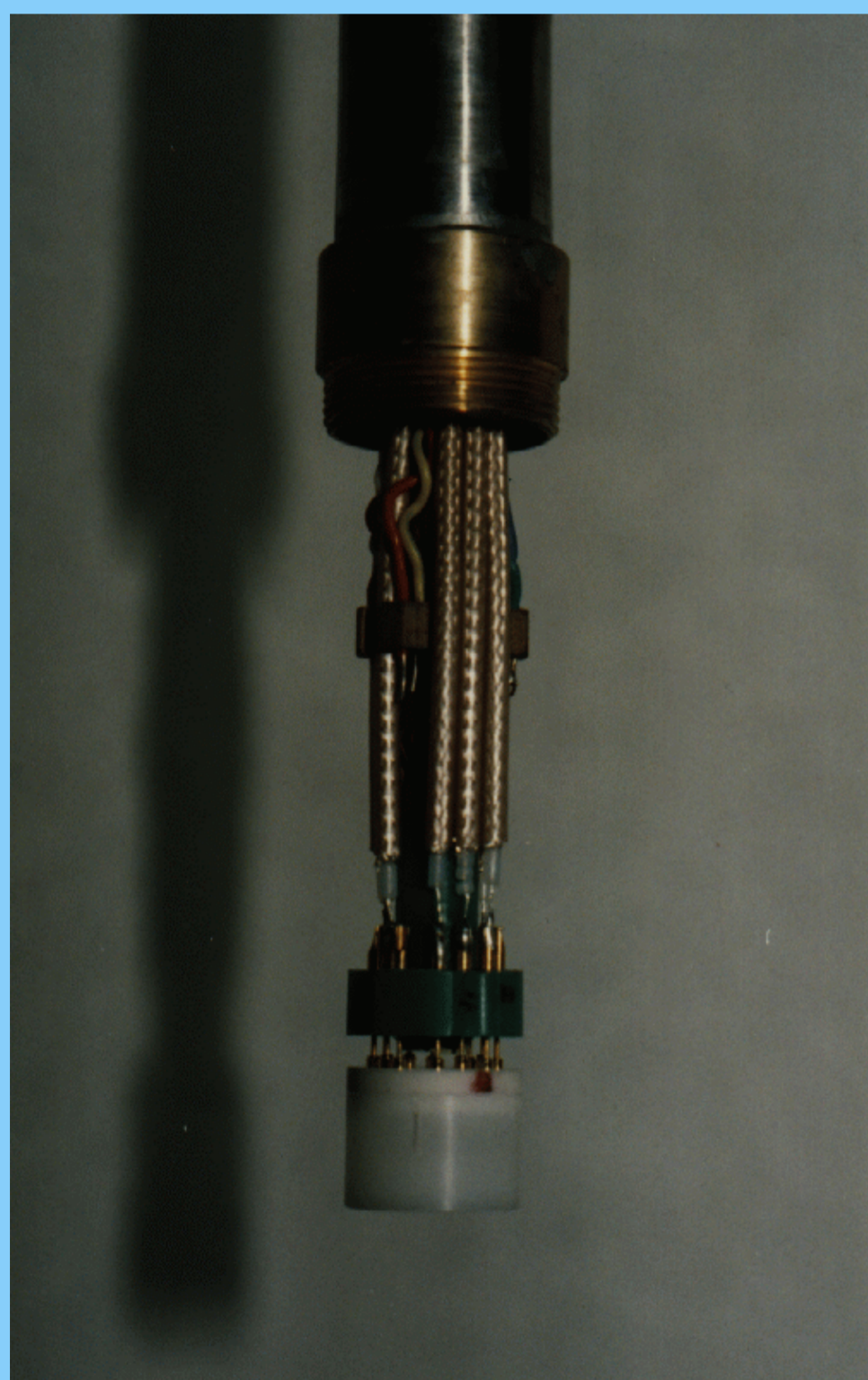


## B. Podmínky, za nichž existuje KHJ

Vzorek je třeba ochladit na dostatečně nízkou teplotu. Pro účely metrologických měření to jsou nutně teploty lázně kapalného hélia ( $T \leq 4,2K$ ), v praxi se zpravidla pracuje při snížených teplotách ( $T \leq 1,5K$ ). Ochlazený vzorek je třeba vložit do silného magnetického pole (zpravidla  $B \leq 12T$ ). Obě tyto podmínky lze splnit umístěním vzorku do pracovního prostoru *supravodivého magnetu*, který je provozován v lázni kapalného  $^4\text{He}$  v heliovém kryostatu. K ochlazení vzorku na teplotu nižší, než při které pracuje magnet ( $T \cong 4,2K$ ), slouží *vnitřní kryostat*, který zasahuje do pracovního prostoru magnetu a v němž je vzorek ponořen do oddělené heliové lázně, jejíž teplotu je možno snižovat pod teplotu hlavní lázně. K dosahování ještě nižších teplot ( $T \geq 0,3K$ ) se občas používá vnitřní lázeň, tvořená nikoliv běžným izotopem  $^4\text{He}$ , nýbrž vzácnějším (a dražším)  $^3\text{He}$ . Splnění těchto podmínek je možné v každé slušně vybavené nízkoteplotní laboratoři s dostatečným technickým zázemím. Tato laboratoř mezi ně patří.



## C. Dostatečně přesnou měřicí aparaturu



Kvantový etalón odporu musí umožňovat porovnání hodnot  $R_H(i)$  s hodnotami odporu sekundárních etalónů; to jsou zpravidla velmi přesné drátové či fóliové odpory dekadických hodnot (nejčastěji  $1 \Omega$ ,  $100 \Omega$  a  $10 k\Omega$ ). Z nich se srovnání s kvantovou strukturou nejnádhavněji provádí u hodnot  $10 k\Omega$ , protože to je hodnota nejbližší nejčastěji používaným referenčním hodnotám  $R_H(2)$  a  $R_H(4)$ . Požadovaná přesnost porovnání je v metrologii nejméně řádu  $10^{-7}$  ( $0,1 \text{ ppm}$ ). Z principiálních důvodů přitom nelze použít zařízení, vyvinutá pro přesnou kalibraci odporů na pokojové teplotě (příliš velký měřicí proud), a je třeba vyvíjet speciální měřicí aparaturu.

V režimu *stejnoseměrného proudu* je k dosažení maximálně možné přesnosti měření KHJ (řádu  $10^{-9}$ ) třeba budovat tzv. *kryogenní proudový komparátor*, který je však dosud provozován pouze v několika špičkových laboratořích ve světě. Přesnosti řádu  $10^{-7}$  až  $10^{-8}$ , která je pro potřeby praktické metrologie v našich podmínkách dostačující, však lze dosáhnout i podstatně jednoduššími měřicími aparaturami. V naší laboratoři k tomuto účelu používáme modifikaci *napětového komparátoru*, kde je referenční a měřený odpor zapojen do série a napětí, vznikající na nich průchodem měřicího proudu, je měřeno špičkovým digitálním voltmetrem.



Naše laboratoř patří k několika málo laboratořím ve světě, které se zabývají i metrologickým využitím *střídavého KHJ*. Za tím účelem vznikl na FEL ČVUT unikátní *koaxiální transformátrový můstek*. Práce tohoto typu míří k realizaci kvantového etalónu *elektrické impedance* a výhledově též k *etalónu kapacity*.

