

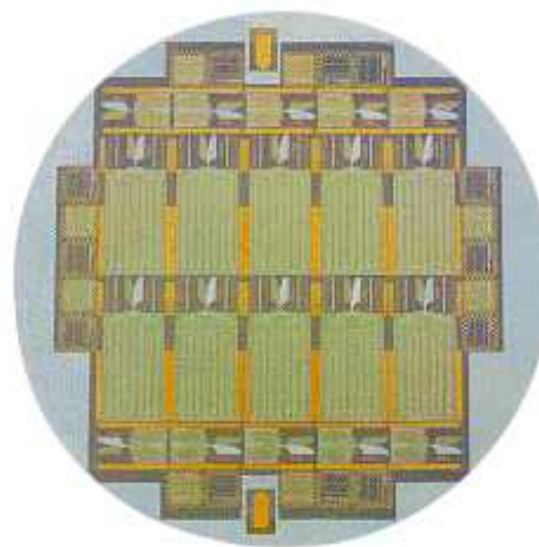
Josephsonovy čipy

10 V čipy mají kolem 20 000 J. přechodů.

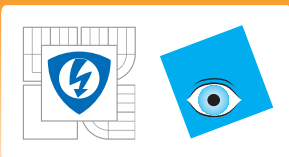
Jen několik laboratoří dokáže vyrobit čipy:

- Hypres (NIST technology), USA
- Supracon a PTB, Germany
- NMIJ, Japan.

Výtěžnost výroby je malá, tedy cena velká.



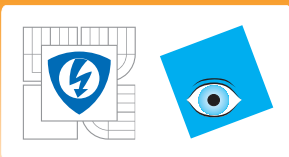
Křemíkový wafer s čipy
(Hypres, USA)



Josephson Voltage System (JVS)

JVS je složen z:

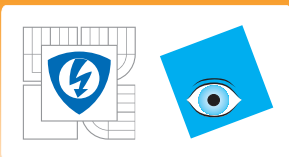
- čip s Josephsonovými přechody



Josephson Voltage System (JVS)

JVS je složen z:

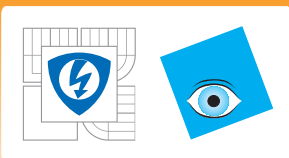
- čip s Josephsonovými přechody
- chlazení k dosažení teploty 4 K



Josephson Voltage System (JVS)

JVS je složen z:

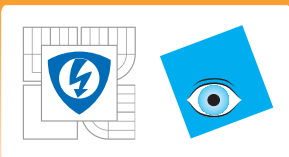
- čip s Josephsonovými přechody
- chlazení k dosažení teploty 4 K
- zdroj mikrovln



Josephson Voltage System (JVS)

JVS je složen z:

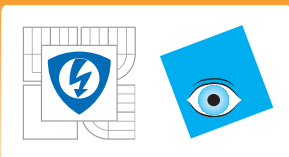
- čip s Josephsonovými přechody
- chlazení k dosažení teploty 4 K
- zdroj mikrovln
- referenční etalon času



Josephson Voltage System (JVS)

JVS je složen z:

- čip s Josephsonovými přechody
- chlazení k dosažení teploty 4 K
- zdroj mikrovln
- referenční etalon času
- řídicí zdroj

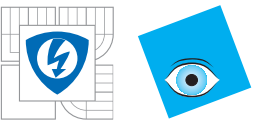


Josephson Voltage System (JVS)

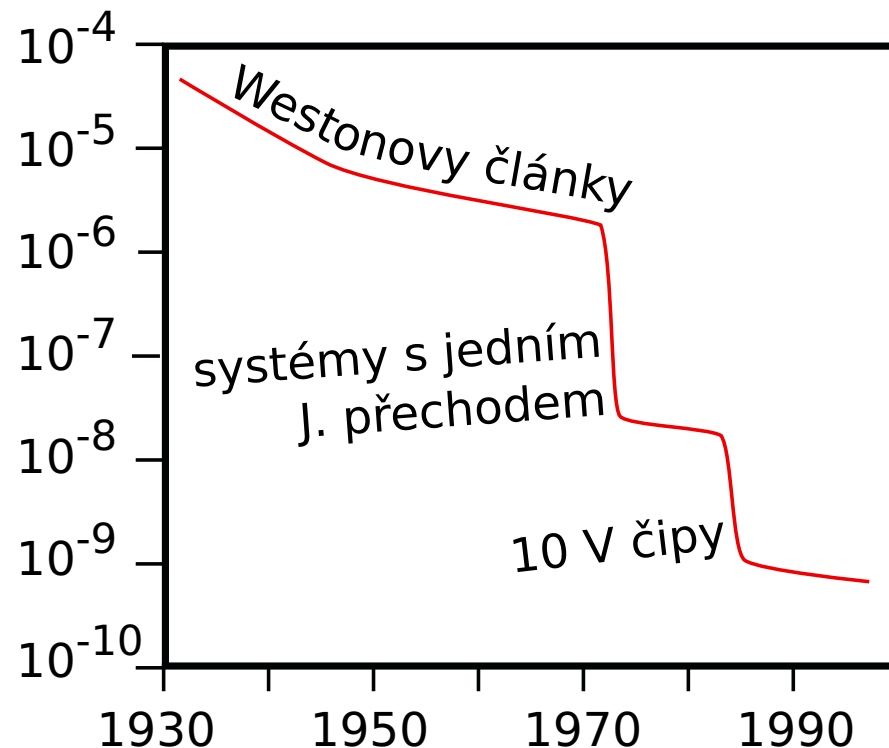
JVS je složen z:

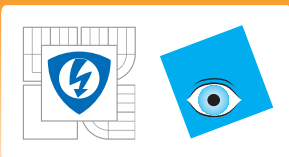
- čip s Josephsonovými přechody
- chlazení k dosažení teploty 4 K
- zdroj mikrovln
- referenční etalon času
- řídicí zdroj
- analogový osciloskop





Shoda mezi národními metrologickými instituty



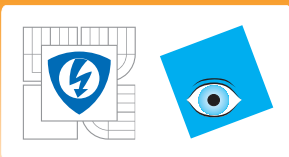


Střídavý JVS

Ve vývoji dva druhy:

- **programovatelný JVS**

J. přechody spínané jednotlivě
ve vývoji od 90-tých let
vyžaduje rychlou elektroniku
vhodné do frekvencí 50 Hz, napětí do 10 V
již používán



Střídavý JVS

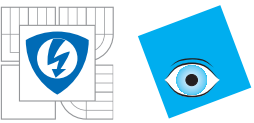
Ve vývoji dva druhy:

- **programovatelný JVS**

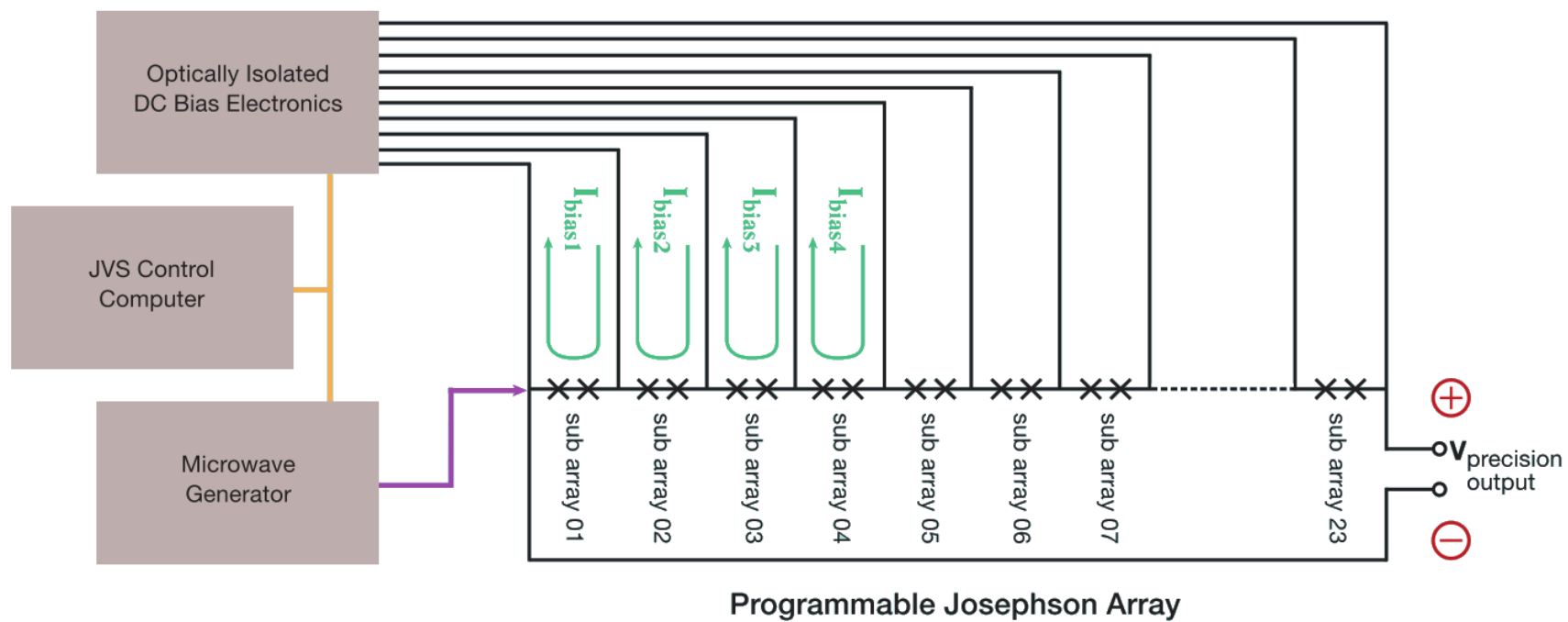
J. přechody spínané jednotlivě
ve vývoji od 90-tých let
vyžaduje rychlou elektroniku
vhodné do frekvencí 50 Hz, napětí do 10 V
již používán

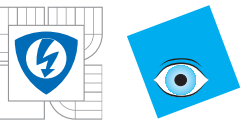
- **pulsní JVS**

J. přechody excitovány pulsy záření
frekvence od ~ 1 kHz do ~ 1 MHz
maximální dosažené napětí 0,3 V
možnost generovat více harmonických frekvencí zároveň



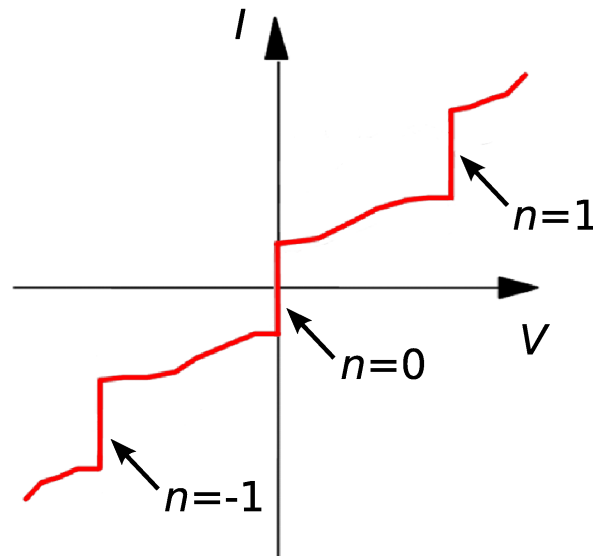
Programovatelný JVS

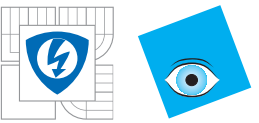




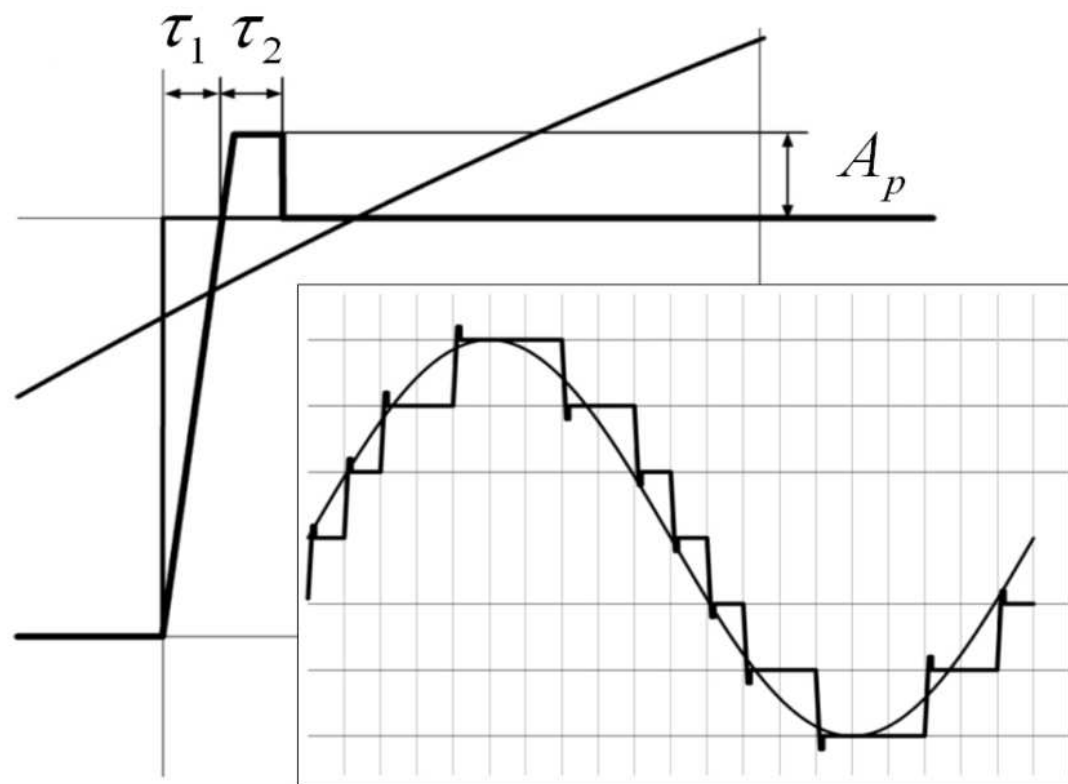
VA charakteristika – přechod s nízkou kapacitou

Stabilní stavy o nenulovém proudu – rychlá změna kvantového stavu: vhodné pro programovatelné JVS.

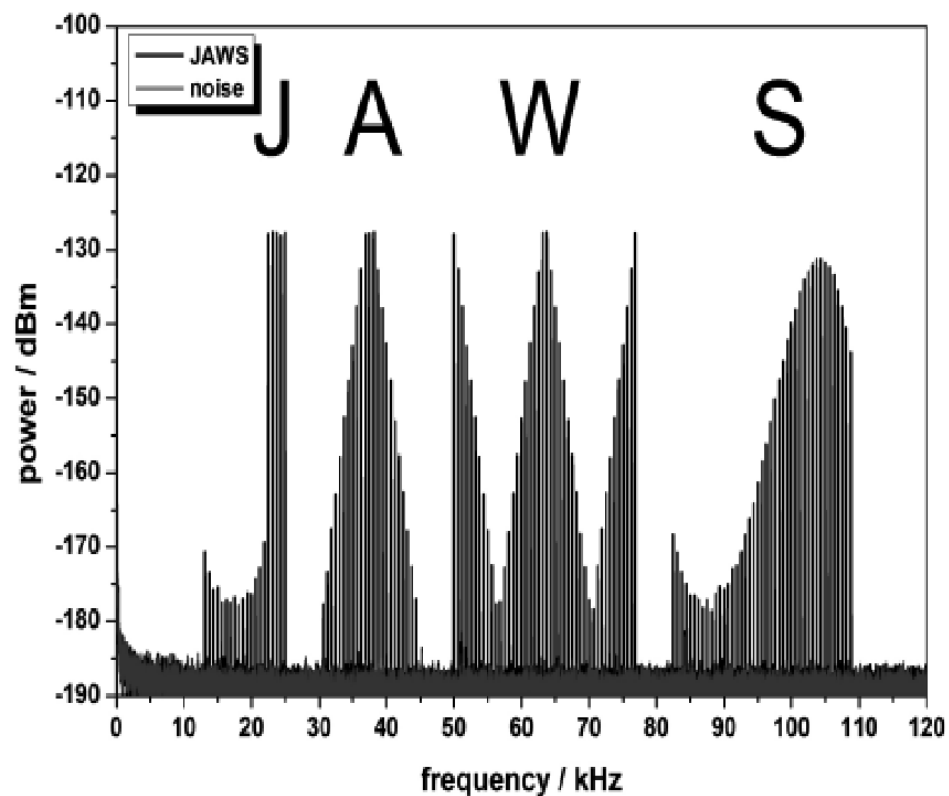




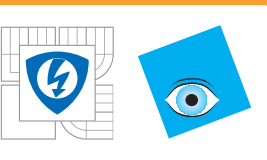
Detail změny kvantového stavu



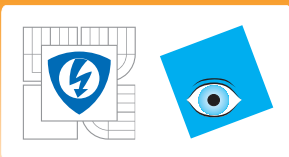
Pulzní JVS



Frekvenční spektrum pulzního JVS (JAWS)
128 Joseph. přechodů.

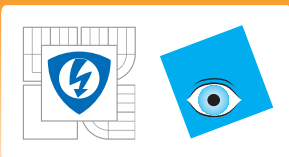


veličina: odpor
jednotka: ohm (Ω)



Historie jednotky Ohm

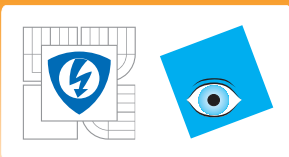
Elektrický odpor byl objeven Georgem Ohmem v roce 1827.



Historie jednotky Ohm

Elektrický odpor byl objeven Georgem Ohmem v roce 1827.

Roku 1980, Klaus von Klitzing objevil kvantový Hallův jev.

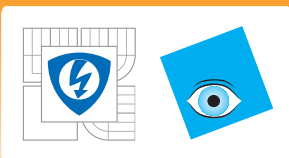


Historie jednotky Ohm

Elektrický odpor byl objeven Georgem Ohmem v roce 1827.

Roku 1980, Klaus von Klitzing objevil kvantový Hallův jev.

Roku 1988 doporučila Mezinárodní komise měr a vah hodnotu von Klitzingovy konstanty.



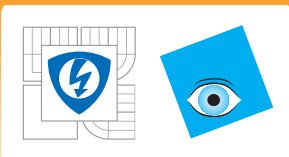
Historie jednotky Ohm

Elektrický odpor byl objeven Georgem Ohmem v roce 1827.

Roku 1980, Klaus von Klitzing objevil kvantový Hallův jev.

Roku 1988 doporučila Mezinárodní komise měr a vah hodnotu von Klitzingovy konstanty.

Po mezinárodní dohodě roku 1990 je hodnota ohmu vztažena ke kvantovému Hallově jevu.



Historie jednotky Ohm

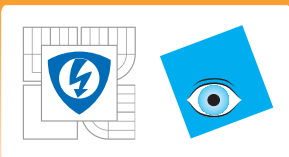
Elektrický odpor byl objeven Georgem Ohmem v roce 1827.

Roku 1980, Klaus von Klitzing objevil kvantový Hallův jev.

Roku 1988 doporučila Mezinárodní komise měr a vah hodnotu von Klitzingovy konstanty.

Po mezinárodní dohodě roku 1990 je hodnota ohmu vztažena ke kvantovému Hallově jevu.

Klaus von Klitzing obdržel Nobelovu cenu v r. 1985.



Hallův jev

Asymetrické rozdělení proudové hustoty za přítomnosti magnetického pole B způsobené Lorentzovou silou.

Hallovo napětí:

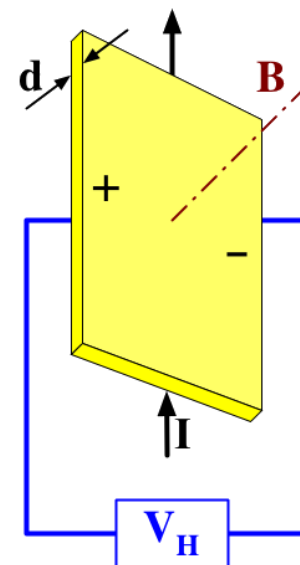
$$V_H = \frac{-IB}{dne}$$

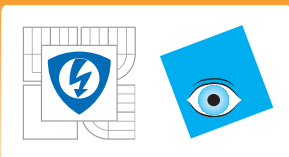
n je hustota nosičů náboje.

Hallův koeficient (odpor):

$$R_H = \frac{E_y}{j_x B} = \frac{dV_H}{IB} = -\frac{1}{ne}$$

j_x je proudová hustota.





Kvantový Hallův jev

Kvantování Hallova napětí a odporu. Hallův odpor nabývá hodnot:

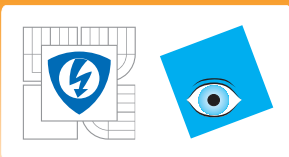
$$R_H = \frac{R_K}{i}$$

i je:

- celé číslo: 1, 2, 3 ...
- nebo zlomek: $1/3$, $2/5$, $3/7$, $2/3$, $3/5$...
nevhodné pro metrologii

R_K je dáno pouze základními konstantami:

$$R_K = \frac{h}{e^2}$$

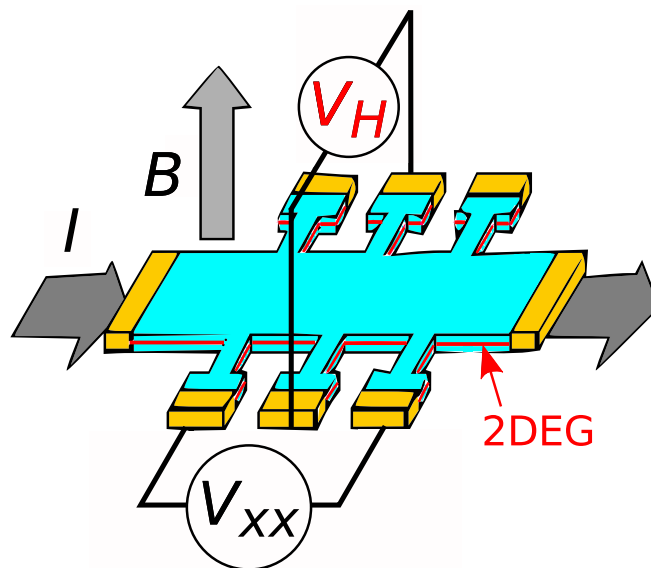


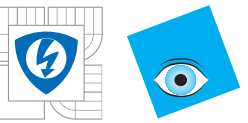
Hall bar

KHJ je pozorován pouze v 2 rozměrných heterostrukturách, tzv. Hall bar. V mřížce se vytvoří 2D elektronový plyn (2DEG).

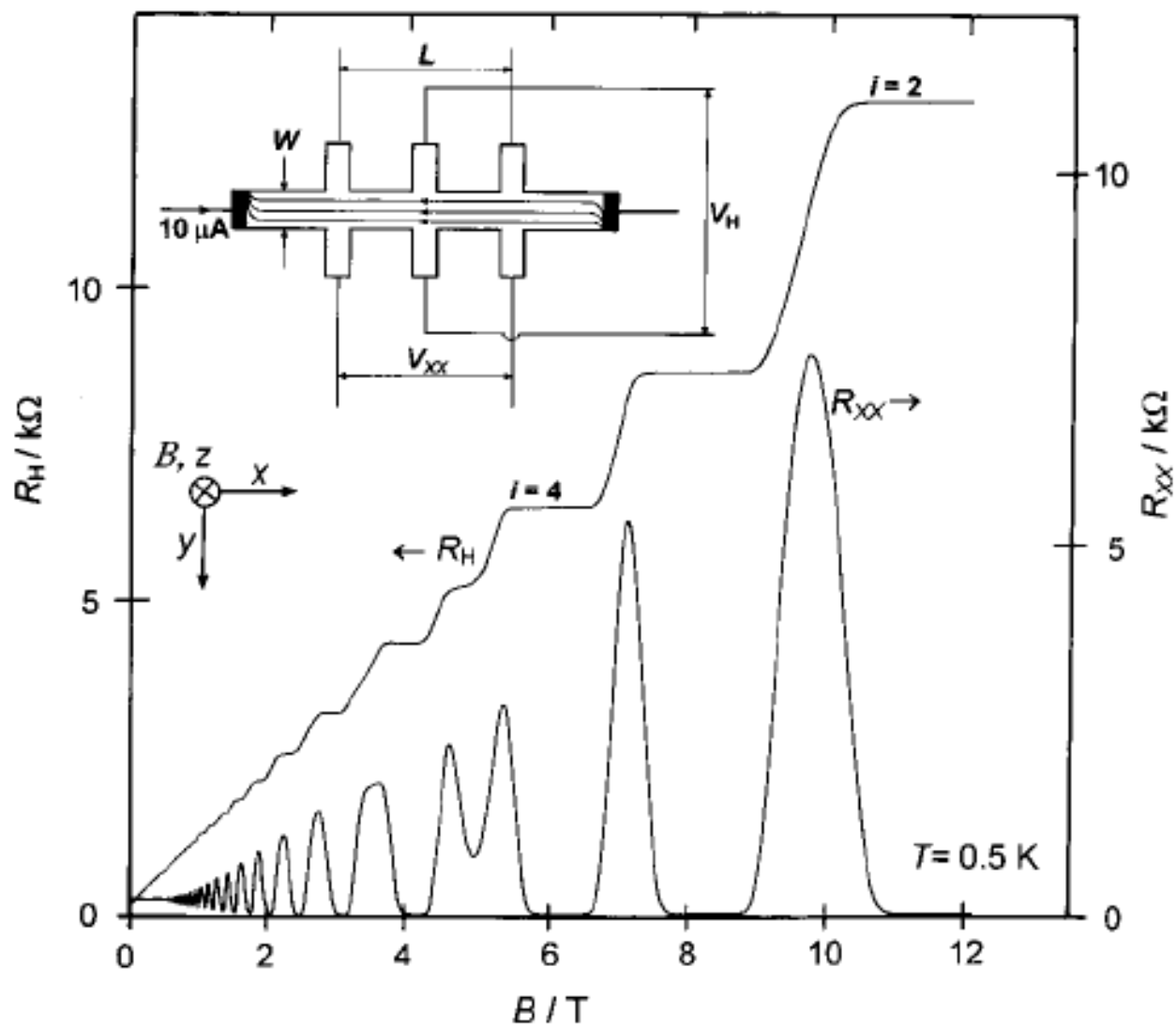
Požadavky:

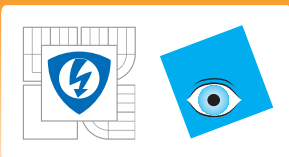
nízká teplota cca. 1,5 K, magnetické pole několik Tesla





Kvantový Hallův jev



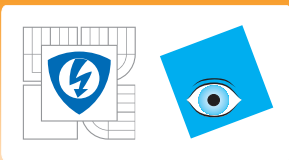


Materiály heterostruktury

Nejčastější materiál:

$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$.

Maximální proud je cca. 100 μA .



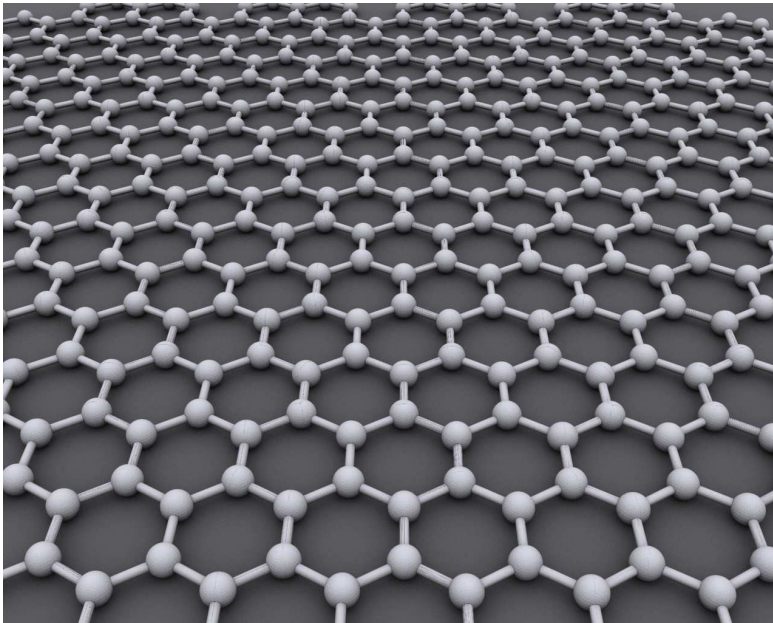
Materiály heterostruktury

Nejčastější materiál:

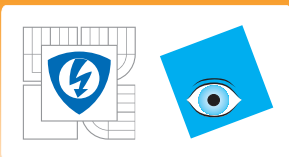
$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$.

Maximální proud je cca. $100 \mu\text{A}$.

Objev posledních let: KHE pozorován i v **grafenu**, a to i za pokojových teplot (ale extrémní hodnoty B)



K. S. Novoselov et al.:
Room-Temperature
Quantum Hall Effect in
Graphene, Science, 315,
2007

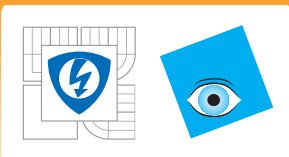


Von Klitzingova konstanta

Vztah $R_K = h/e^2$ stále není všeobecně přijat (narozdíl od Josephsonovy rovnice). Teorie KHIJ **není úplná**.

Hodnota von Klitzingovy konstanty je (dle dohody z roku 1990):

$$R_{K-90} = 25812.807 \, \Omega$$



Von Klitzingova konstanta

Vztah $R_K = h/e^2$ stále není všeobecně přijat (narozdíl od Josephsonovy rovnice). Teorie KHJ **není úplná**.

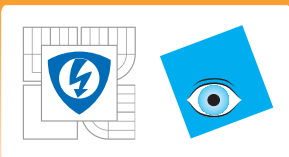
Hodnota von Klitzingovy konstanty je (dle dohody z roku 1990):

$$R_{K-90} = 25812.807 \, \Omega$$

Doplnění teorie KHJ:

A. A. Penin, PhysRevB 79, 2009

Odchylka R_K bude $\sim 10^{-20}$.



KHJ v metrologii

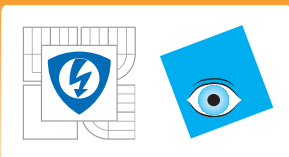
R_{xx} musí být nula, a z praktických důvodů jsou vhodné stavy:

$i = 2$ or $i = 4$,

tj. heterostruktura má příčný odpor:

12 906,4035 Ω or 6 453,20175 Ω

(reprodukovatelnost cca. 10^{-10}).



KHJ v metrologii

R_{xx} musí být nula, a z praktických důvodů jsou vhodné stavy:

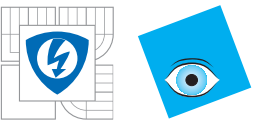
$$i = 2 \text{ or } i = 4,$$

tj. heterostruktura má příčný odpor:

$$12\,906,4035\,\Omega \text{ or } 6\,453,20175\,\Omega$$

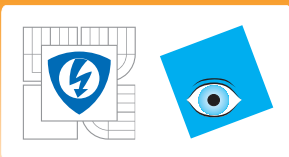
(reprodukovatelnost cca. 10^{-10}).

Využití KHJ pro střídavé proudy je limitováno dielektrickými ztrátami v substrátu heterostruktury. V PTB (Německo) se podařilo překonat speciálním stíněním.



KHJ – foto



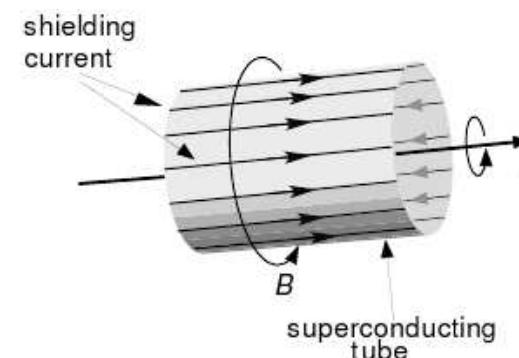


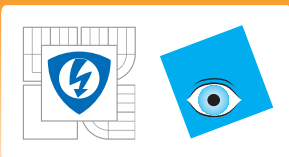
Proudový komparátor

Cryogenic Current Comparator (CCC)

Slouží k porovnání dvou etalonů odporu (nebo přenosu odporu KHJ na artefakt)

Je to most tvořený cívkami, stíněné pomocí **Meissnerova jevu**.



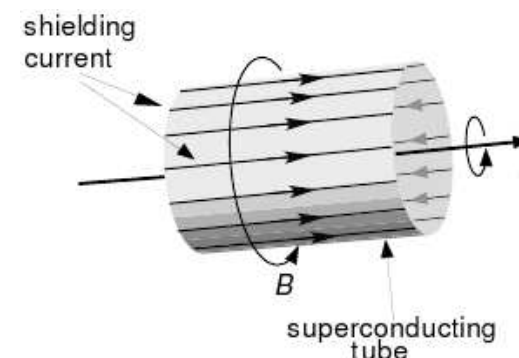


Proudový komparátor

Cryogenic Current Comparator (CCC)

Slouží k porovnání dvou etalonů odporu (nebo přenosu odporu KHJ na artefakt)

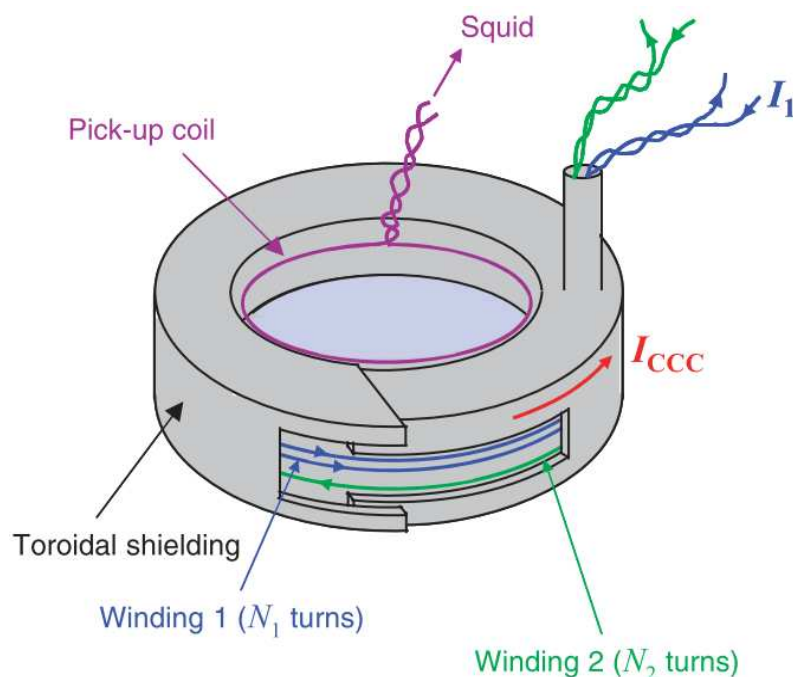
Je to most tvořený cívkami, stíněné pomocí **Meissnerova jevu**.



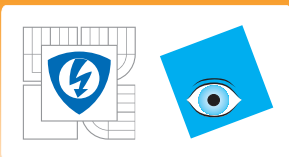
Počet závitů je fixní, zvolený dle KHJ a desítkové řady etalonů odporu. Cívkami tečou proudy opačných polarit.

Porovnání odporů nad **10 k Ω** je limitováno teplotním šumem. Spodní rozsah CCC je cca. **1 Ω** .

Schéma CCC

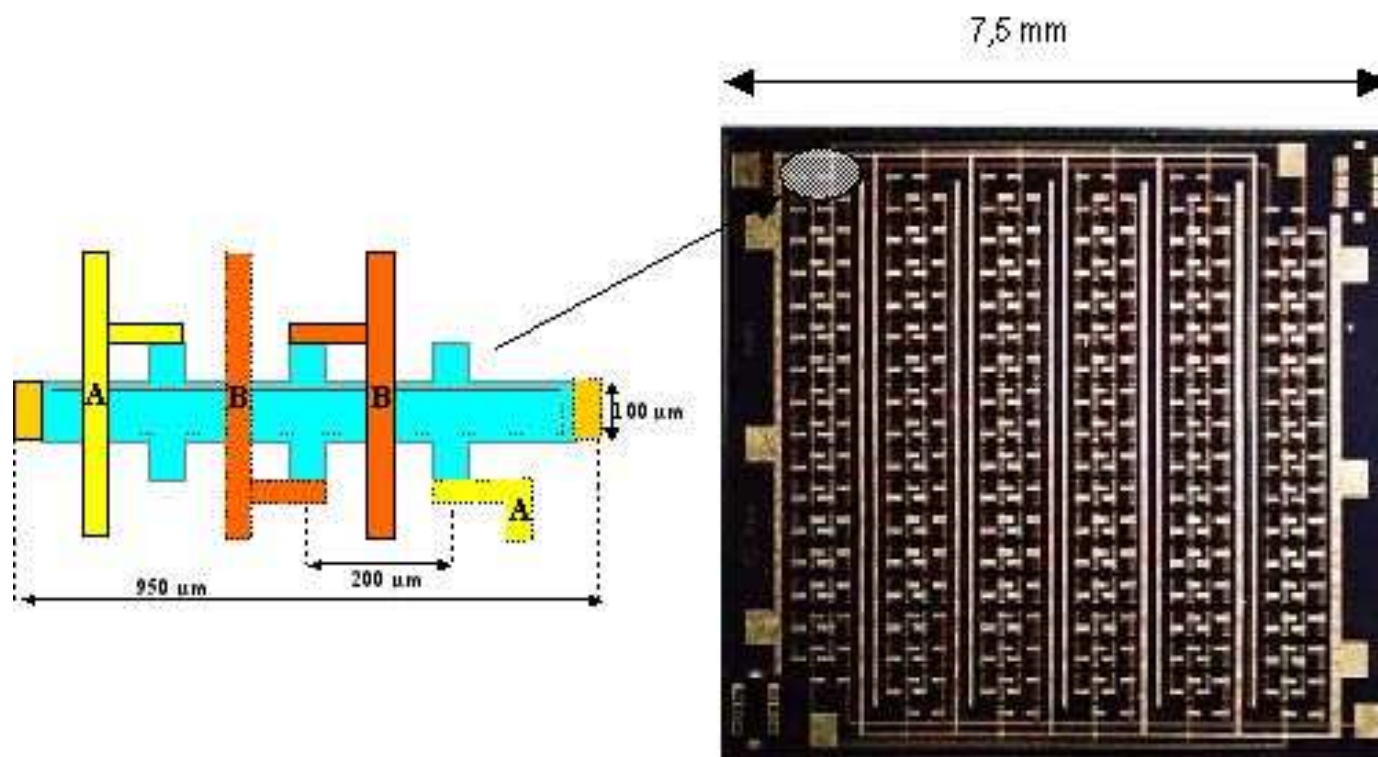


Superconducting Quantum Interference Device (SQUID) je použit jako detektor nulového proudu (součtu proudů oběma cívkami), je tvořen smyčkou s dvěma Josephsonovými přechody.

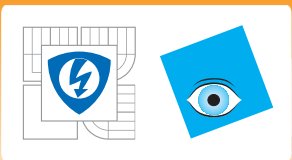


Quantum Hall Arrays – QHARS

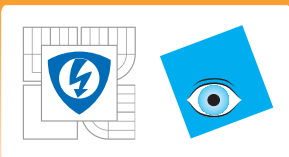
Sériově nebo paralelně zapojené Hall bar.



100 Hall bar na jednom čipu, nominální hodnota $32,266 \Omega$ (LNE, Francie).



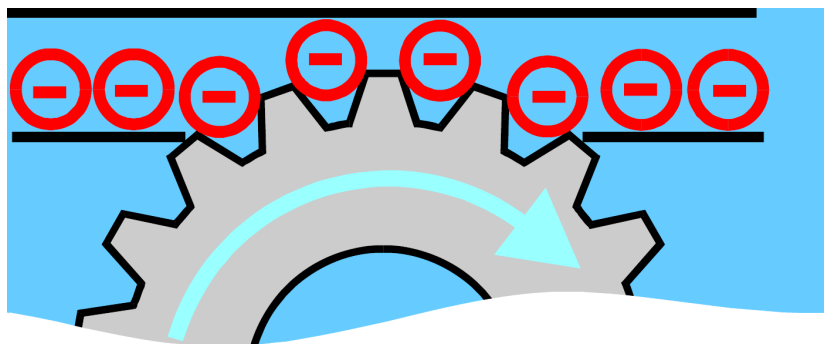
veličina: proud
jednotka: ampér (A)



Kvantový etalon proudu

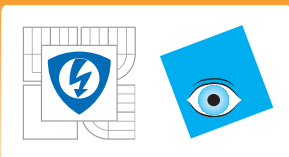
Transport jednotlivých elektronů, a tedy jejich počet za sekundu.

Doslova počítání elektronů jeden po druhém.



$$I = nef$$

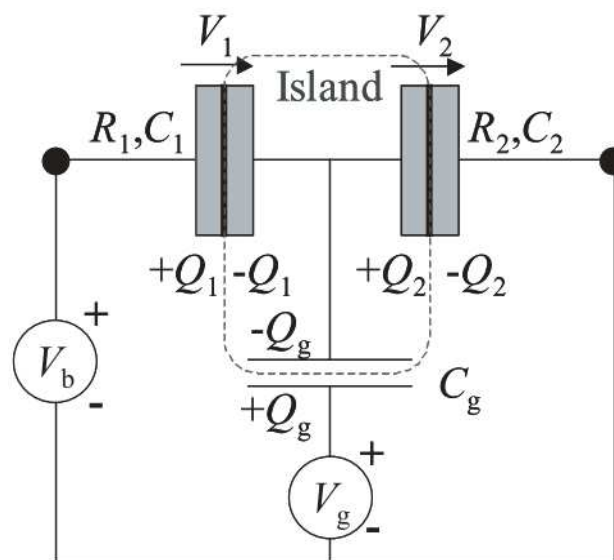
$$f = 5 \text{ MHz} \rightarrow I = 0,8 \text{ pA}$$



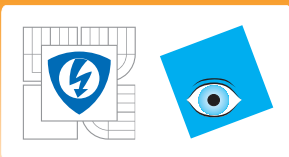
SET tranzistory

Tranzistory SET (Single Electron Tunneling): bariéry široké nanometry, vyráběny od devadesátých let.

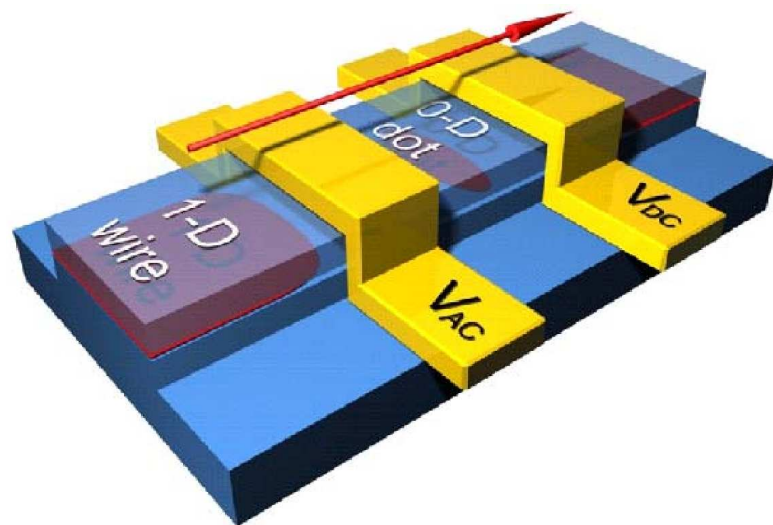
První SET: Fulton & Dolan, 1987, Bell laboratories.



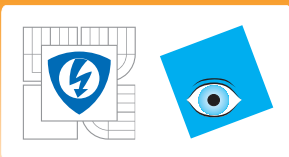
$$k_B T \ll E_C, E_C \simeq e^2/C \rightarrow T \simeq 20 \text{ mK}$$



Princip SET



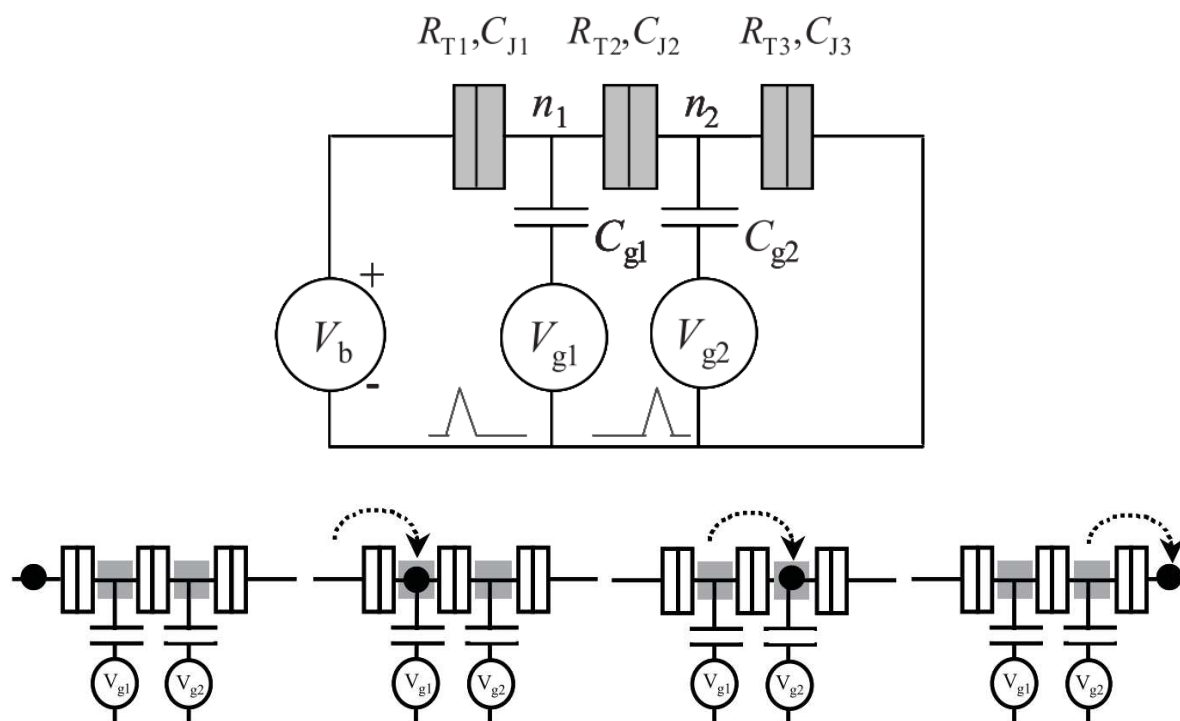
Animace SET



Elektronové pumpy

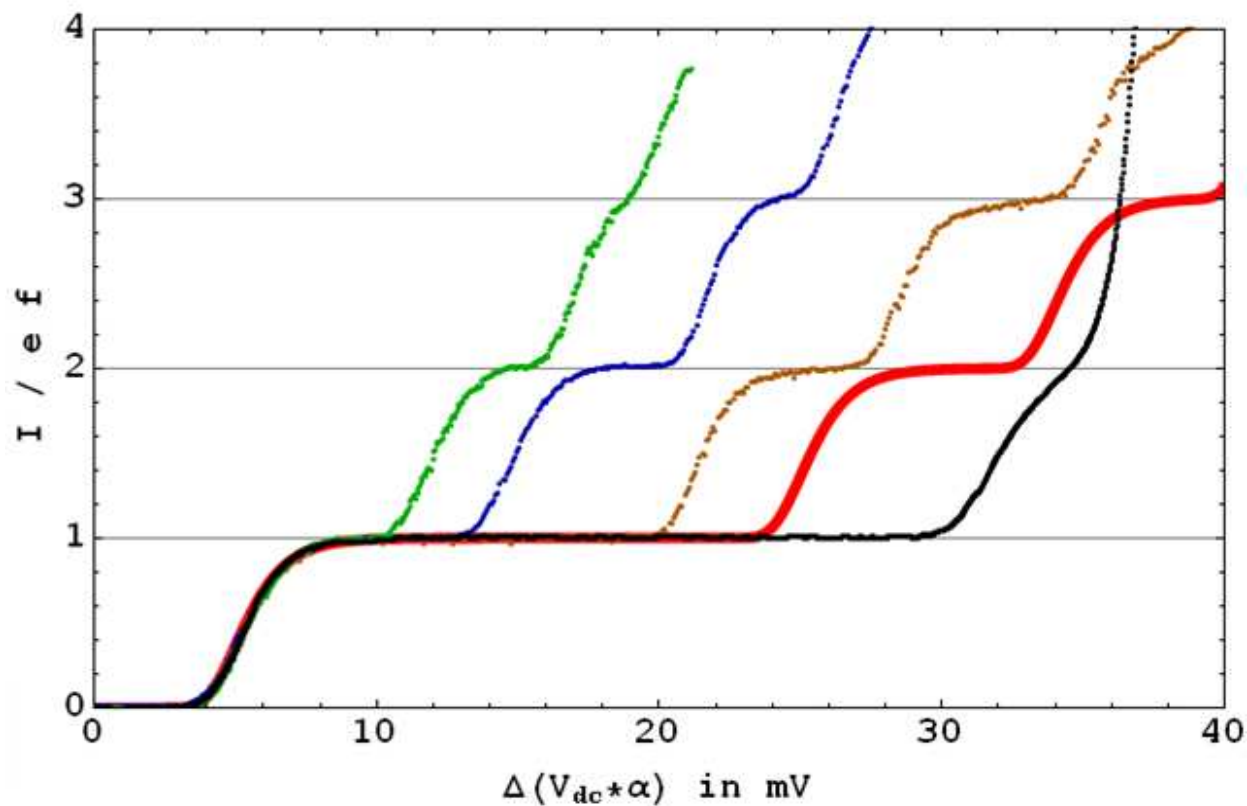
Elektron je postupně pumpován skrz několik SET tranzistorů, snížení nejistoty proudu.

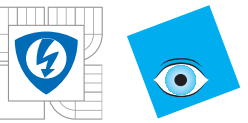
Poprvé sestavena: H. Pothier, et al., Europhys. Lett. 17, 249 (1992)



Parametry elektronových pump

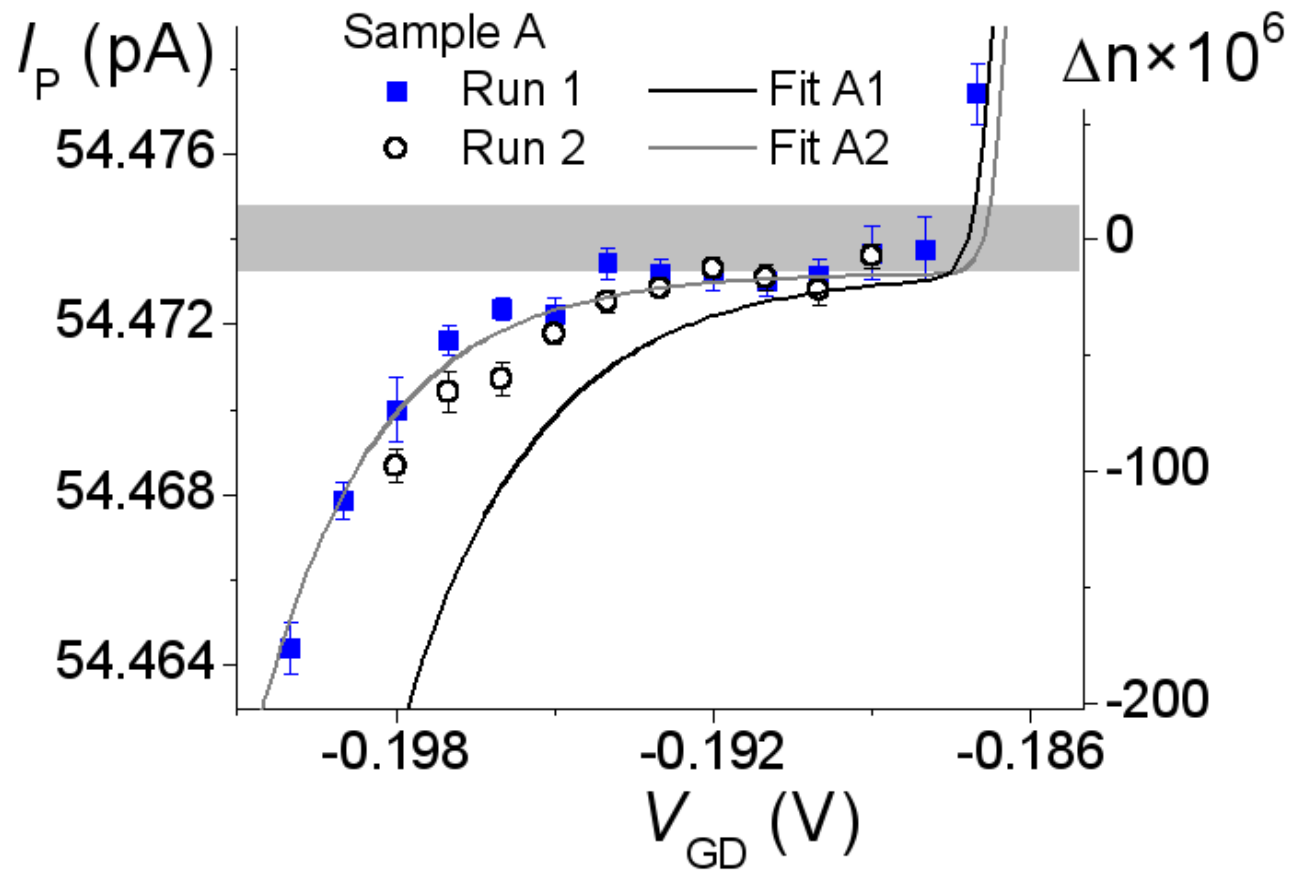
Pumpy mohou pracovat ve více režimech:

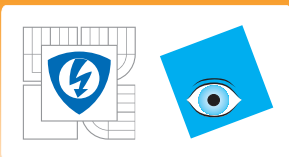




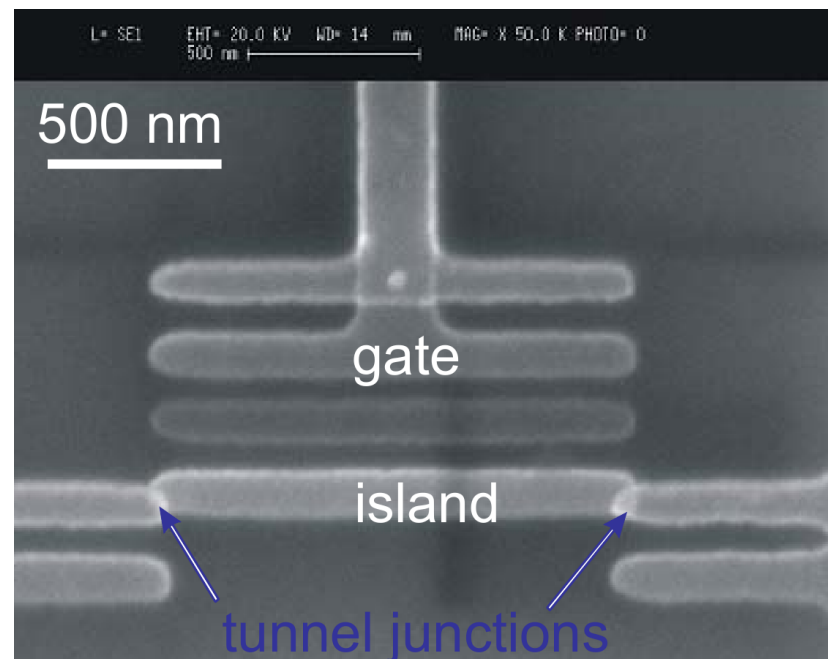
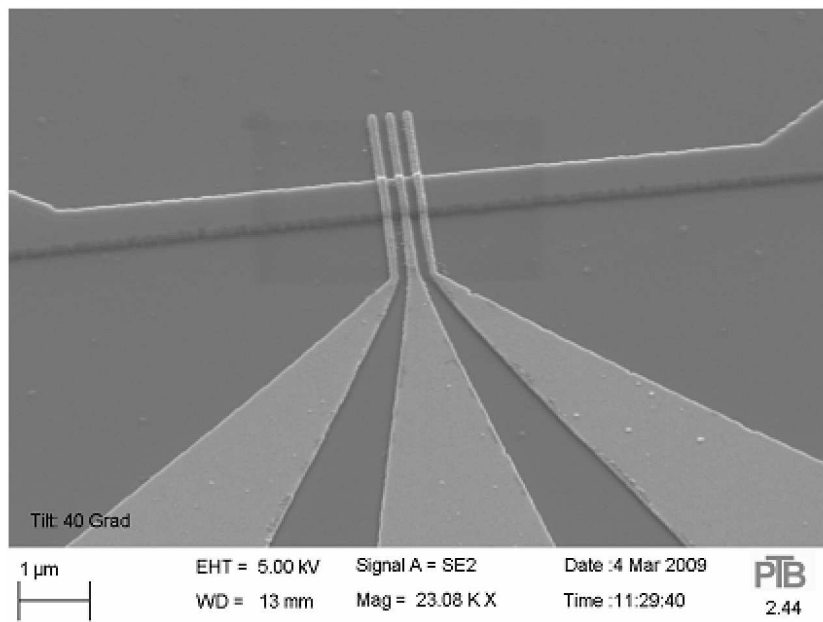
Problém elektronových pump

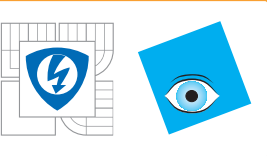
Je těžké určit správný pracovní bod v inflexi křivky.



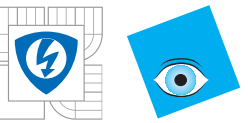


Snímky SET tranzistorů





Metrologický trojúhelník

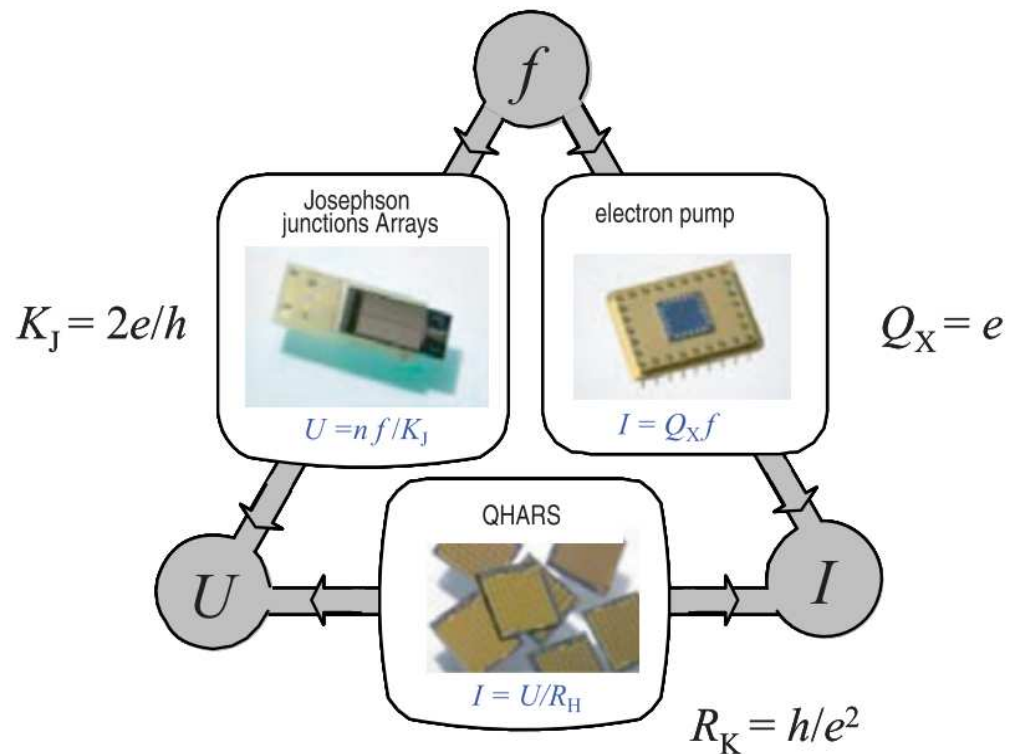


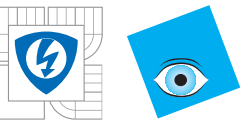
Kvantový metrologický trojúhelník

Svatý grál metrologie elektrických veličin.

$$R_K K_J Q_X = 2$$

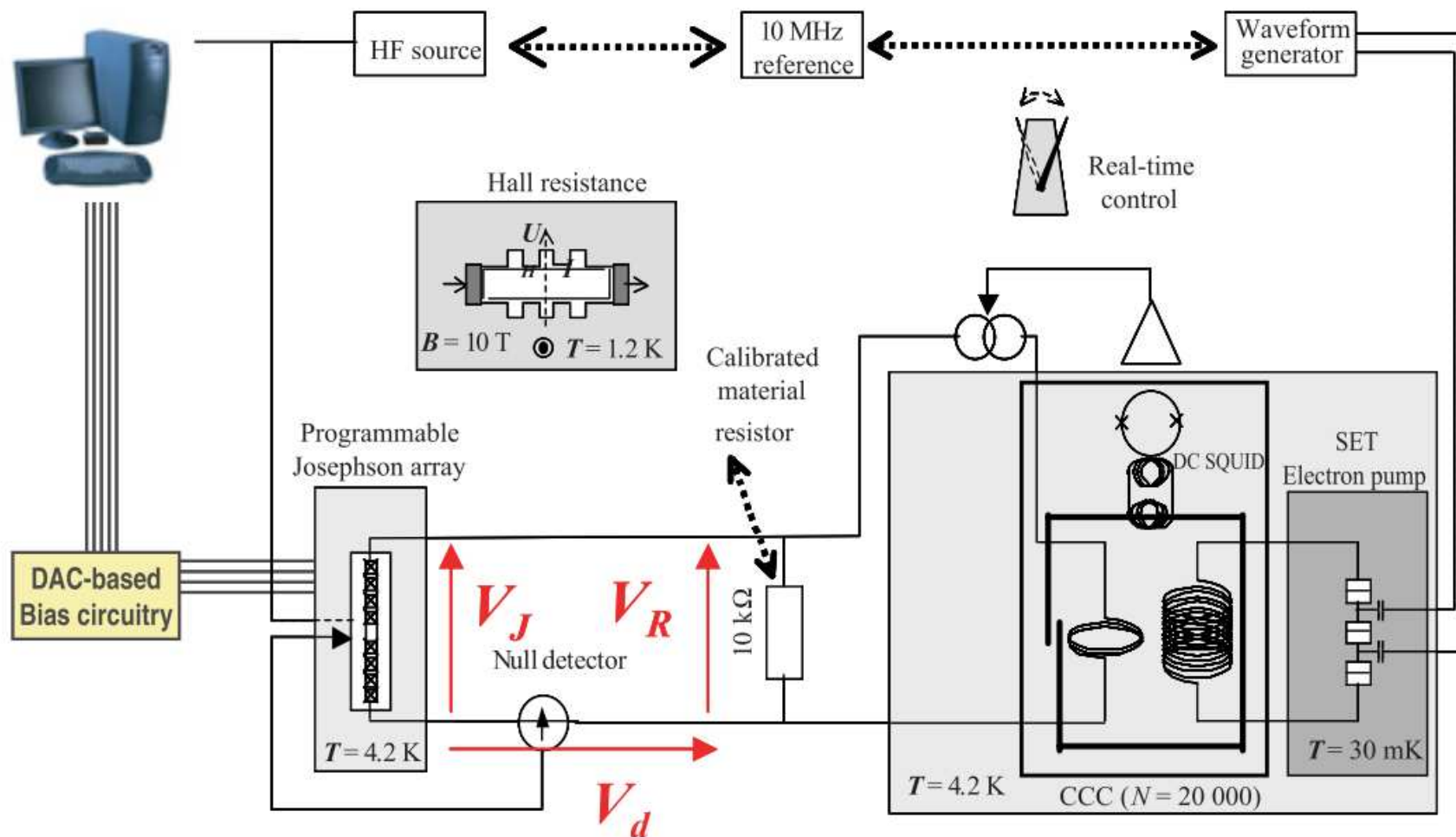
Snaha splnit relaci s nejistotou 10^{-8} .

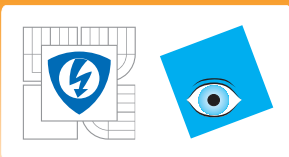




Přímé uzavření trojúhelníku

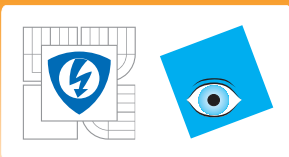
Příklad probíhajícího experimentu v LNE (Francie)





Nepřímé uzavření trojúhelníku

Pomocí SET se nabíjí kondenzátor: $Q = CV$.
Napětí na kondenzátoru se změří vůči JVS.



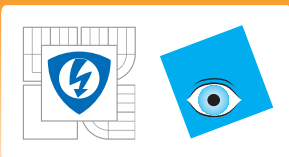
Nepřímé uzavření trojúhelníku

Pomocí SET se nabíjí kondenzátor: $Q = CV$.

Napětí na kondenzátoru se změří vůči JVS.

Hodnota kondenzátoru je určena

1. pomocí kvadraturního mostu vůči etalonu času a KHJ.
2. nebo porovnáním s vypočitatelným kondenzátorem typu Thompson-Lampard



Nepřímé uzavření trojúhelníku

Pomocí SET se nabíjí kondenzátor: $Q = CV$.

Napětí na kondenzátoru se změří vůči JVS.

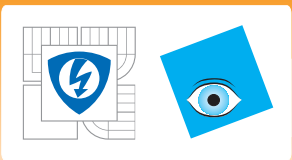
Hodnota kondenzátoru je určena

1. pomocí kvadraturního mostu vůči etalonu času a KHJ.
2. nebo porovnáním s vypočitatelným kondenzátorem typu Thompson-Lampard

Metoda je velmi obtížná.

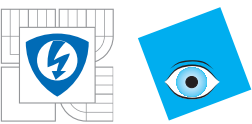
NIST realizoval metodu 1 r. 2007 s nejistotou $9,2 \times 10^{-7}$.

PTB realizovalo metodu 2 r. 2011 s nejistotou 3×10^{-6} .

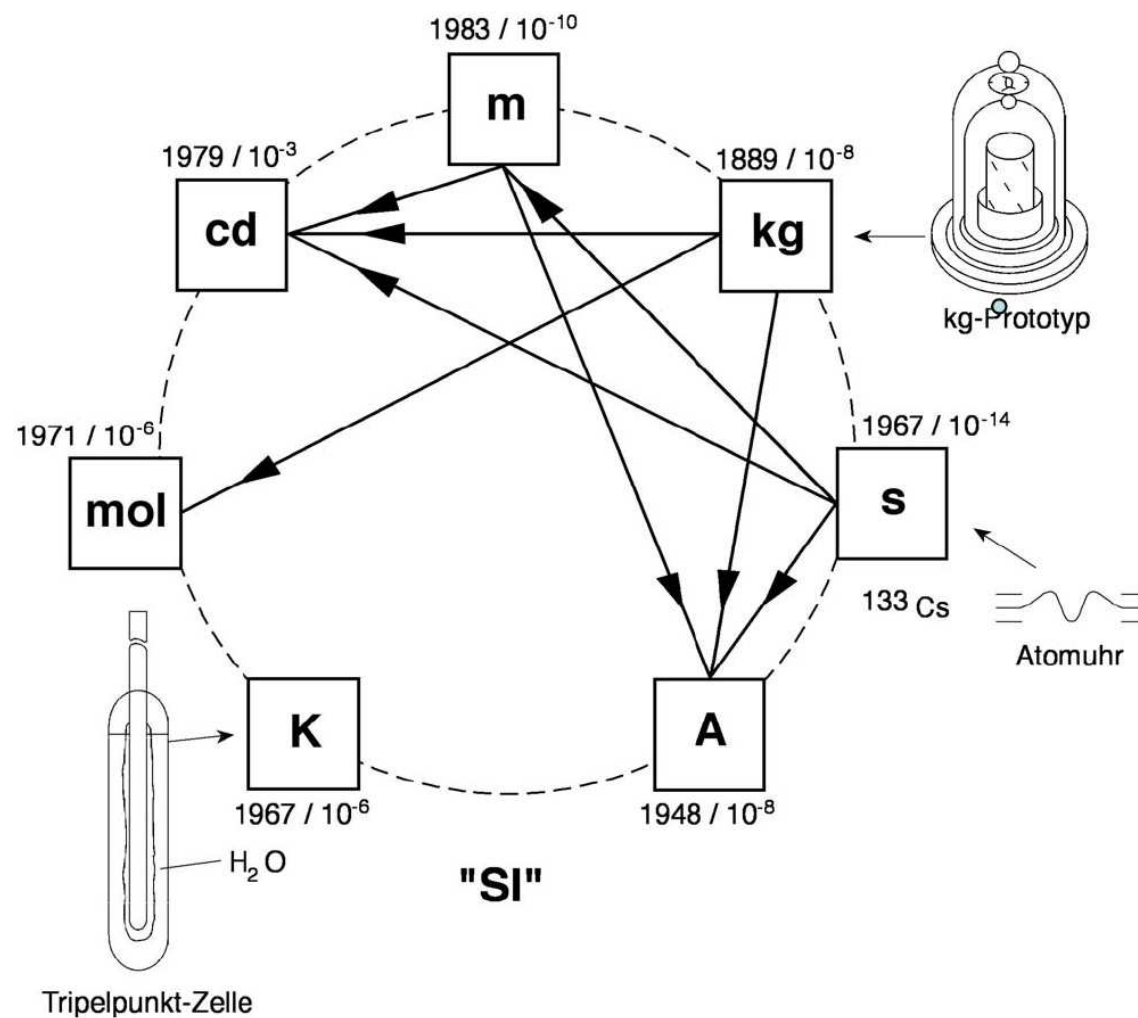


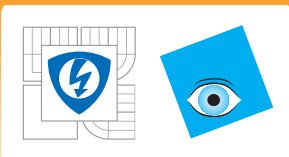
System jednotek

SI



Současný systém SI

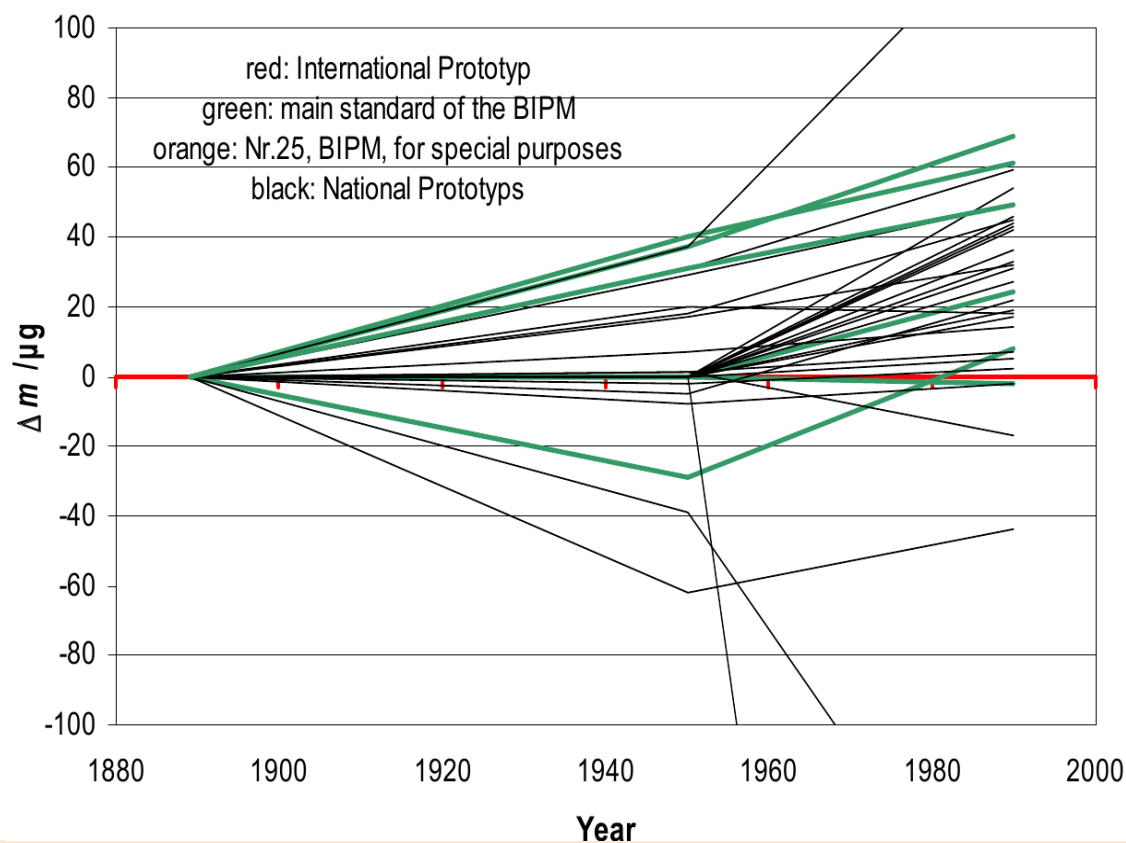


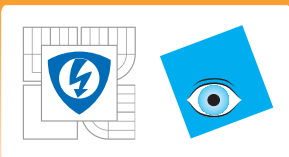


Problém kilogramu

Primární etalon kilogramu je **artefakt**. Jeho hodnota se asi mění.

Mass of Prototypes in 1889, 1950 and 1990



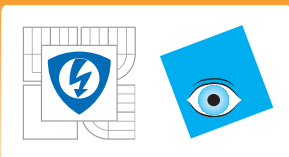


Nový etalon kg

Nové odvození kilogramu od planckovy konstanty:

$$h \equiv 6,62606896 \times 10^{-34} \text{ Js } (u_h = 0) \text{ (CODATA 2006)}$$

- projekt **Avogadro**: počítání atomů v SI kouli

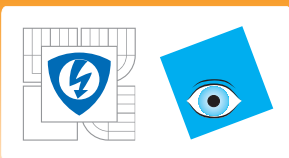


Nový etalon kg

Nové odvození kilogramu od planckovy konstanty:

$$h \equiv 6,62606896 \times 10^{-34} \text{ Js } (u_h = 0) \text{ (CODATA 2006)}$$

- projekt **Avogadro**: počítání atomů v SI kouli
- **Watové váhy**: odvození kg z elektrických měření



Nový etalon kg

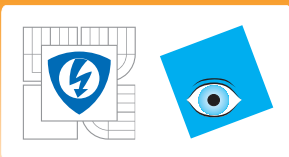
Nové odvození kilogramu od planckovy konstanty:

$$h \equiv 6,62606896 \times 10^{-34} \text{ Js } (u_h = 0) \text{ (CODATA 2006)}$$

- projekt **Avogadro**: počítání atomů v SI kouli
- **Watové váhy**: odvození kg z elektrických měření

Pravděpodobné budoucí definice kg:

- The kilogram is the mass of a body at rest whose equivalent energy corresponds to a frequency of exactly $[(299792458)^2 / 662606896] \times 10^{41} \text{ Hz}$.
- The kilogram is the mass of a body at rest whose de Broglie-Compton frequency is equal to exactly $[(299792458)^2 / (6,62606896 \times 10^{-34})] \text{ Hz}$.

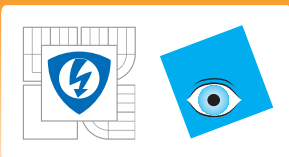


projekt Avogadro

problémy:

- povrchová oxidace



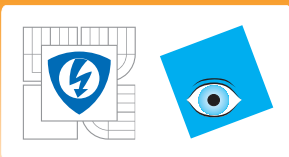


projekt Avogadro

problémy:

- povrchová oxidace
- izotopické složení koule, tj. poměr ^{28}Si , ^{29}Si , ^{30}Si



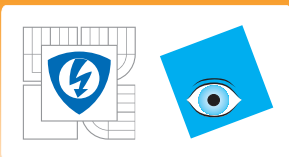


projekt Avogadro

problémy:

- povrchová oxidace
- izotopické složení koule, tj. poměr ^{28}Si , ^{29}Si , ^{30}Si
- jiné nečistoty, vakance



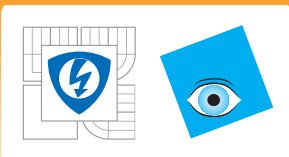


projekt Avogadro

problémy:

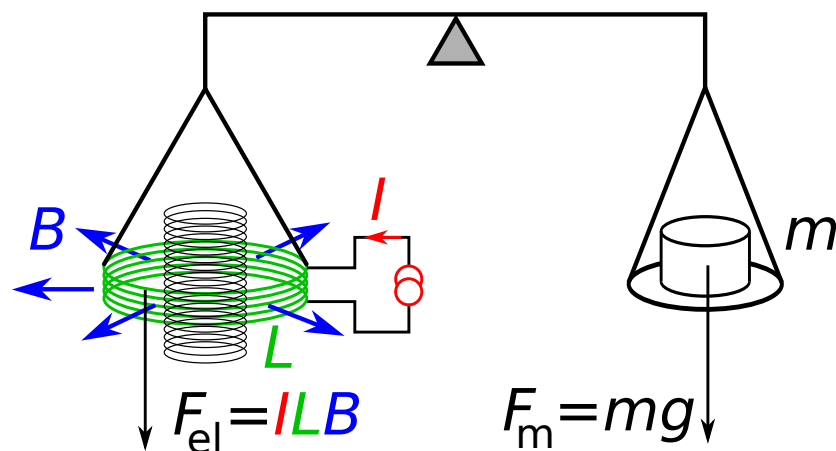
- povrchová oxidace
- izotopické složení koule, tj. poměr ^{28}Si , ^{29}Si , ^{30}Si
- jiné nečistoty, vakance
- určení objemu a hustoty (mřížková konstanta)



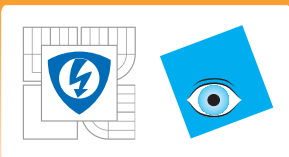


Watové váhy

vážení:
statické měření

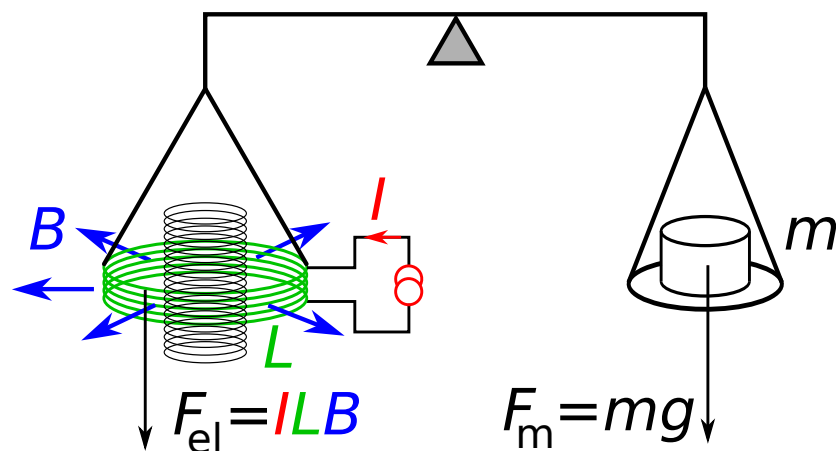


$$mg = ILB$$



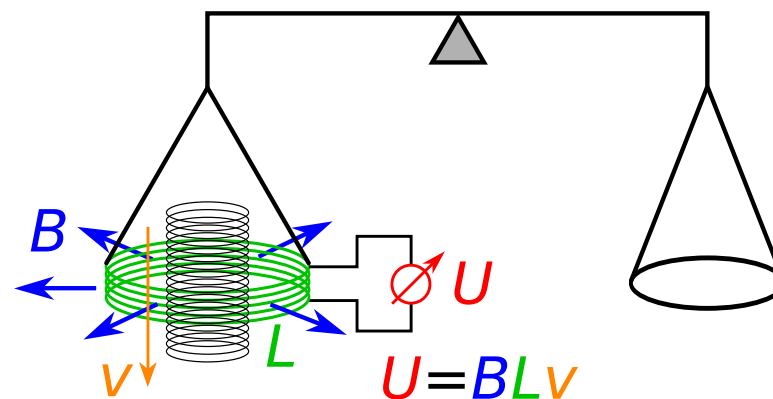
Watové váhy

vážení:
statické měření

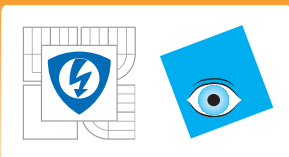


$$mg = ILB$$

měření vlastností cívky:
dynamické měření

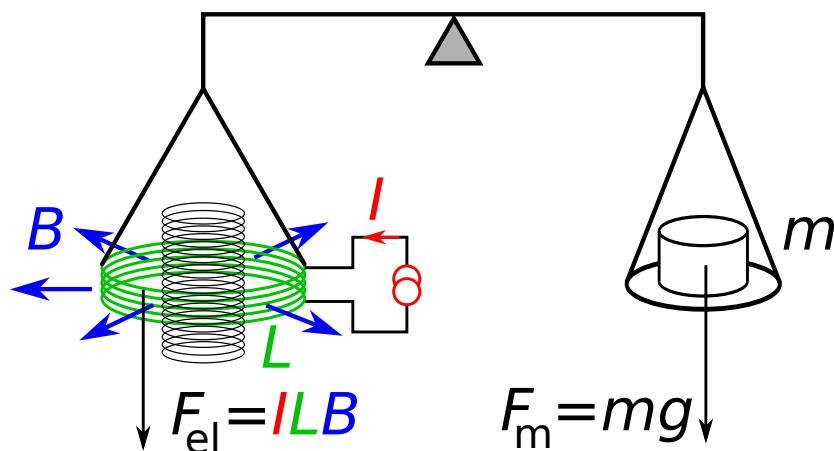


$$U = BLv$$



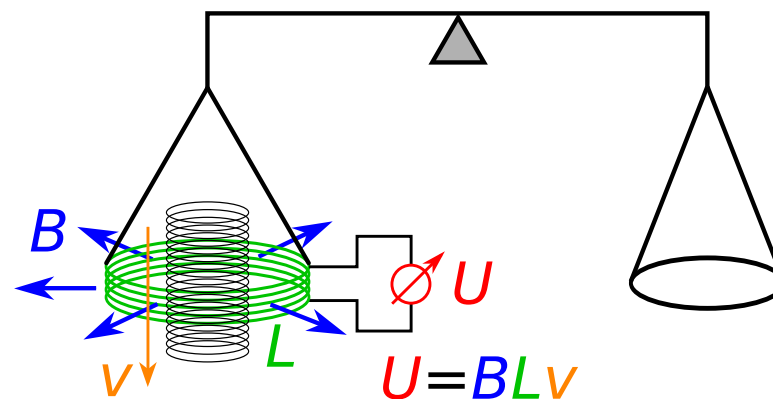
Watové váhy

vážení:
statické měření



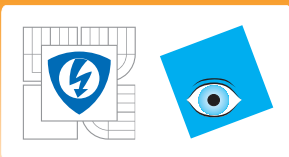
$$mg = ILB$$

měření vlastností cívky:
dynamické měření

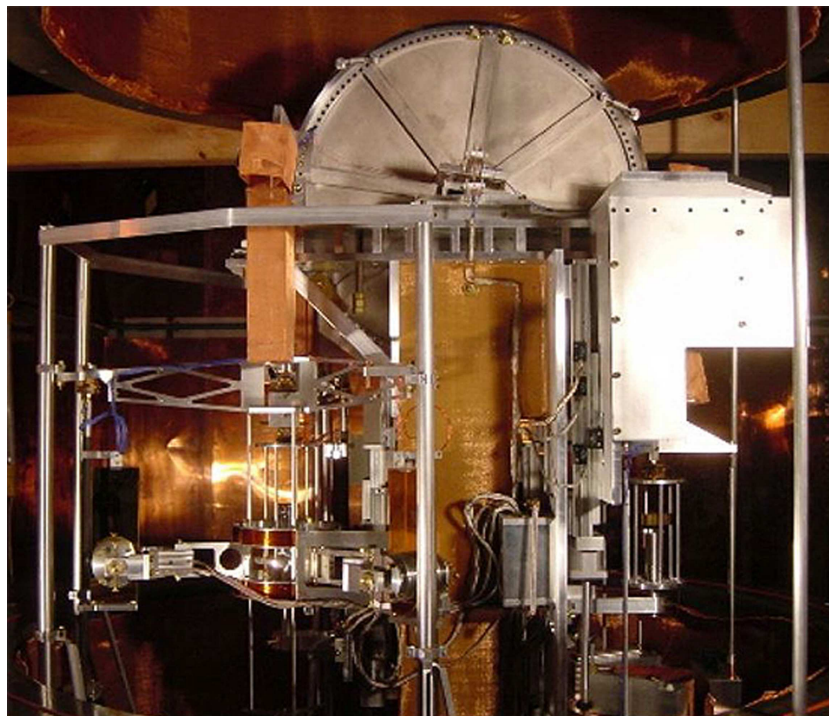


$$U = BLv$$

$$mgv = UI = \frac{h}{4} K_{J-90}^2 R_{K-90} UI$$



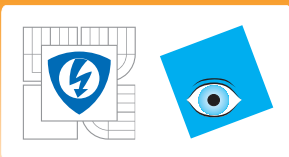
Watové váhy



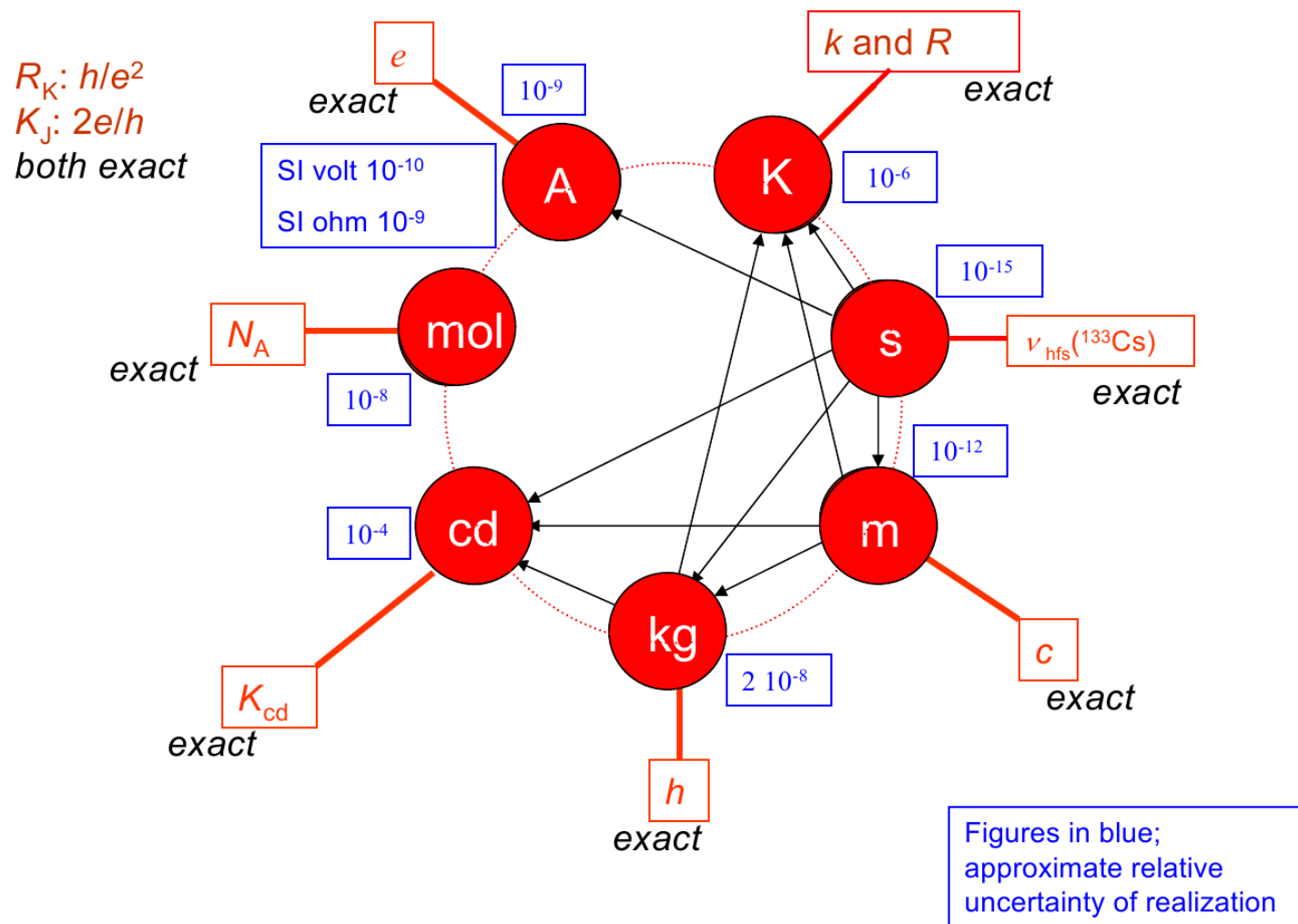
projekt NIST (USA)

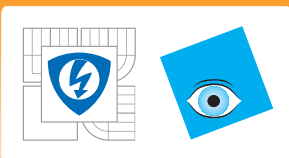


projekt NPL (VB)



Možný budoucí systém SI – kvantová SI

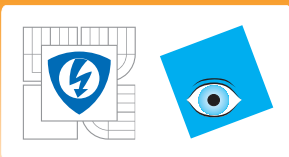




Návrh nové definice Ampéru

The ampere is the unit of electric current; its magnitude is set by fixing the numerical value of the elementary charge to be equal to exactly $1.602176487 \times 10^{-19}$ when it is expressed in the unit ampere second, which is equal to coulomb.

From Draft Chapter 2 (1st April 2010) of the SI Brochure

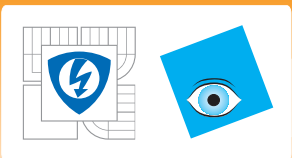


Návrh nové definice Ampéru

The ampere is the unit of electric current; its magnitude is set by fixing the numerical value of the elementary charge to be equal to exactly $1.602176487 \times 10^{-19}$ when it is expressed in the unit ampere second, which is equal to coulomb.

From Draft Chapter 2 (1st April 2010) of the SI Brochure

Důsledek: μ_0 a ϵ_0 nebudou známy přesně, ale budou muset být změřeny!



Děkuji
za pozornost