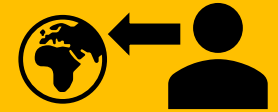




# Supravodivosť v silne neusporiadaných systémoch

Doktorandský seminár ÚEF SAV v KE

# Pôsobisko



- CFNT » skupina zameraná na SUPRAVODIVOSŤ



# Získavanie vedomostí



- Fyzika tuhých látok
- Vákuová technika
- Fyzika nízkych teplôt
- Makroskopické kvantové javy
- Anglický jazyk
- odborná literatúra
- skúsenosti starších kolegov
- Programovanie (MATLAB, LabVIEW, LaTeX, CAD)
- Používanie a servisovanie kryogénnej techniky
- Servisovanie vákuovej techniky
- Získavanie extrémne nízkych teplôt (až 300 mK)
- Získavanie vysokých magnetických polí (až 8 T)
- Príprava vzoriek na meranie
- Realizácia experimentálnych meraní
- Príprava na výrobu novej meracej aparatúry
- ...



# Odovzdávanie vedomostí

- vedenie numerických cvičení z predmetu Fyzika I. (FEI TUKE)
  - 3 skupiny po 2x45min = 6 vyučovacích hodín týždenne
  - Celkový počet študentov: 64
  - Veľkosť spoločnej korešpondencie: 890 MB



Noc výskumníkov 2019



Kryokurz 2019

# Odovzdávanie vedomostí



Research of superconductivity in strongly disordered systems by scanning tunneling microscopy

<sup>1</sup>Marek KUZMIAK (1<sup>st</sup> year),  
Supervisor: <sup>2</sup>Pavol SZABÓ

<sup>1</sup>Dept. of Physics, FEI TU of Košice, Slovak Republic

<sup>1,2</sup>Centre of Low Temperature Physics, Institute of Experimental Physics Slovak Academy of Sciences, Slovak Republic

<sup>1</sup>marek.kuzmiak@tuke.sk, <sup>2</sup>pszabo@saske.sk

**Abstract**—My research group is dealing with the experimental study of superconducting materials with competing orders. My colleagues are studying the coexistence of superconductivity with magnetism and the influence of charge density waves and multiband Fermi level to the superconducting characteristics. The subject of my PhD work is the study of the influence of low dimensionality and nano-size effects for the superconducting properties in ultra-thin films. During the first year of my thesis I am studying the physical properties of superconductors and strongly disordered systems, the influence of applied magnetic field for the basic superconducting parameters and acquainting with Low Temperature Scanning Tunneling Microscopy (STM) measurements. In this paper I am presenting the actual state of my studies.

**Keywords**—Superconductivity, Disordered system, SIT, Scanning tunneling microscopy.

## I. INTRODUCTION

This paper is dealing with the basic physical properties of strongly disordered superconducting materials. After short introduction, the characteristic properties of superconductors, as the zero resistance and the ideal diamagnetism are presented. I discuss the influence of disorder for the superconducting state and show possible mechanisms of the superconductor-insulator transition (SIT). I show the basic differences between the bosonic and the fermionic way of the SIT. At the end, the Low Temperature Scanning Tunneling Microscopy is presented as an ideal experimental method for the study of local superconducting properties in strongly disordered superconductors.

## II. SUPERCONDUCTIVITY

On 10 July 1908, the great Dutch physicist Heike Kamerlingh Onnes opened a new chapter in low temperature physics. He was able to reach first liquefied helium <sup>4</sup>He in the world. By the way, the boiling point of helium <sup>4</sup>He is 4.22 K at normal atmospheric pressure. In addition, when we pump vapours of helium <sup>4</sup>He, we can reach a temperature around 1 K too.

After some time, Heike Kamerlingh Onnes observed the behavior of various metals such as mercury, lead and tin, while he was cooling them in liquid helium <sup>4</sup>He. For example, he measured the electrical resistance of these various metals. One day, he discovered that at about 4.2 K the electrical resistance of his mercury sample fell abruptly to zero. We can show it in Figure 1. He said that the electrical resistance of his mercury

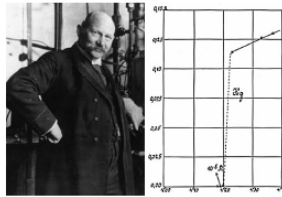


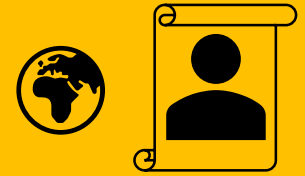
Fig. 1. Heike Kamerlingh Onnes and his historic measured plot for mercury. The historic plot shows resistance (measure in  $\Omega$ ) versus temperature (measure in K). The experiment shows the superconducting transition at 4.20 K. Within 0.01 K, the electrical resistance jumped from unmeasurably small (less than  $10^{-8}$ ) to 0.1  $\Omega$ .

sample was immeasurable. This interesting behaviour was naturally called superconductivity. A critical temperature  $T_C$  is characteristic of all superconducting materials. It's the temperature which the sample had when it transitioned from normal to superconducting state. On 28 April 1911, Heike Kamerlingh Onnes presented his discovery to the Royal Netherlands Academy of Art and Sciences. This day is officially called like the Day of Birth of Superconductivity [1], [2].

An important discovery in this area were made by the great German physicists Meissner and Ochsensfeld. In their article [3], they describe the so-called Meissner effect. This effect shows the difference of behaviour between a perfect conductor and a classical superconductor in the presence of magnetic field. As we can see in Figure 2, when cooling down the classical superconductor in the presence of applied magnetic field, the magnetic field is excluded from entering the superconductor after crossing the critical temperature  $T_C$ . The perfect conductor would tend to trap in the flux of magnetic field instead. The superconductor levitation in the presence of an external magnetic field is a possible consequence of this phenomenon. This is because the superconductor has the opposite magnetization  $M$  as an applied magnetic field  $H$ . It follows that  $M = -H$ . The magnetic induction  $B$  inside

- publikovanie článku v univerzitnom periodiku
- vďaka projektu EMP vznikla spolupráca s **B. C. Camargo, PhD.** z PAN v Poľsku – pracujeme na spoločnom článku

# Odovzdávanie zručností



Meracia zostava na  
STM/STS merania



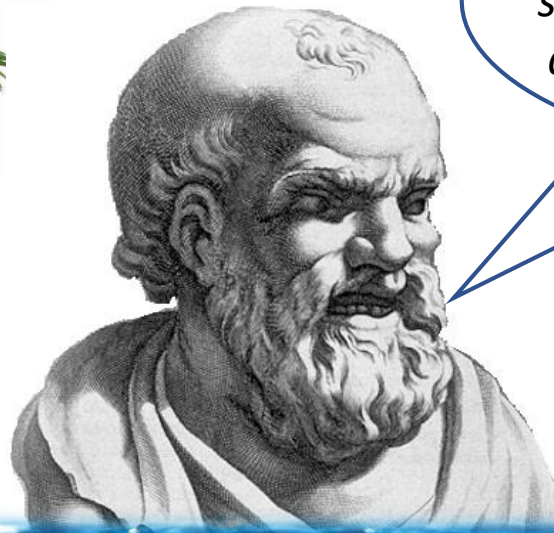
Meracia mikrokontaktová  
aparátúra vhodná na  
4bodové odporové merania



# Výskum

## Demokritos z Abdéry

(460 – 370 pred Kristom)



*„Koľkokrát treba deliť jablko, kým sa dostanem na jeho najmenšiu, ďalej nedeliteľnú časť – atóm?“*

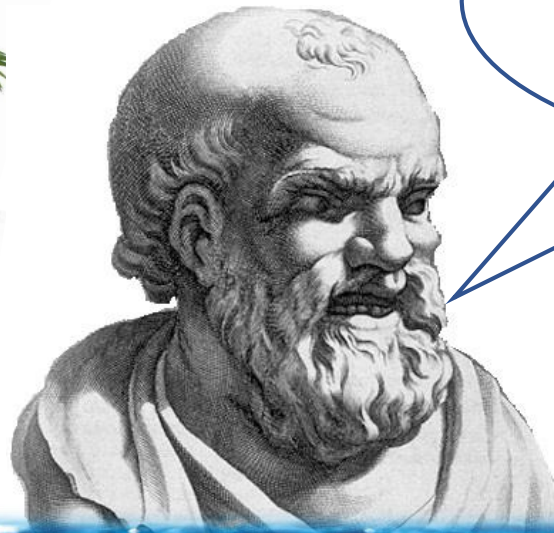




# Výskum

## Demokritos z Abdéry

(460 – 370 pred Kristom)



*„Akú chuť, vôňu, a teda vlastnosti bude mať táto najmenšia, ďalej nedeliteľnú časť – atóm? Bude to ešte jablko?“*

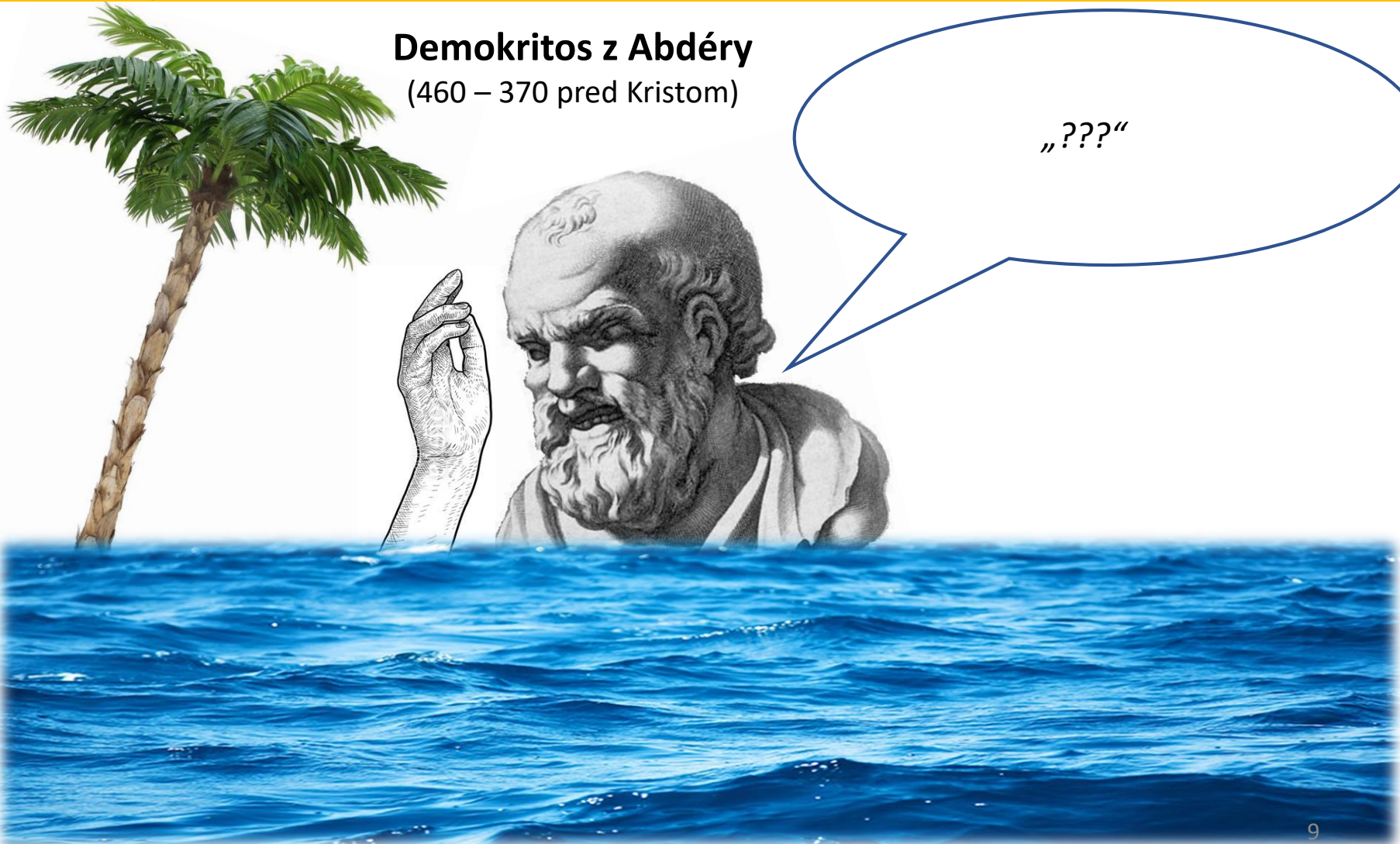






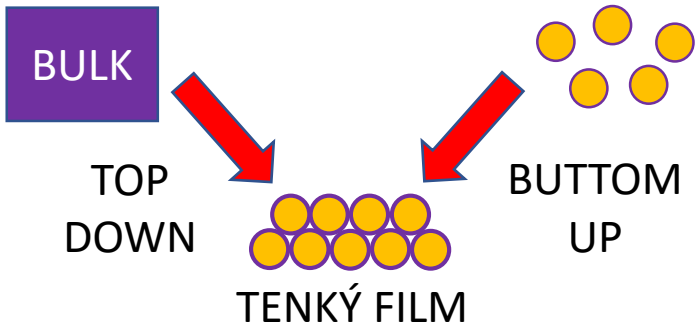
# Výskum

**Demokritos z Abdéry**  
(460 – 370 pred Kristom)

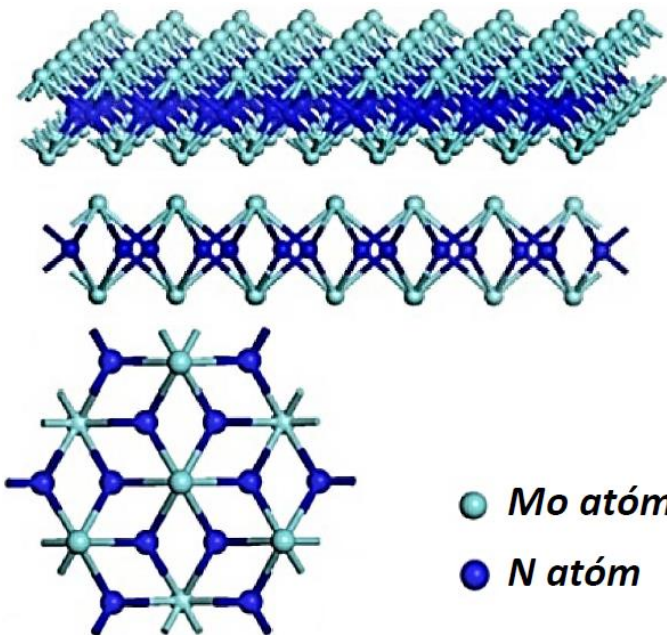




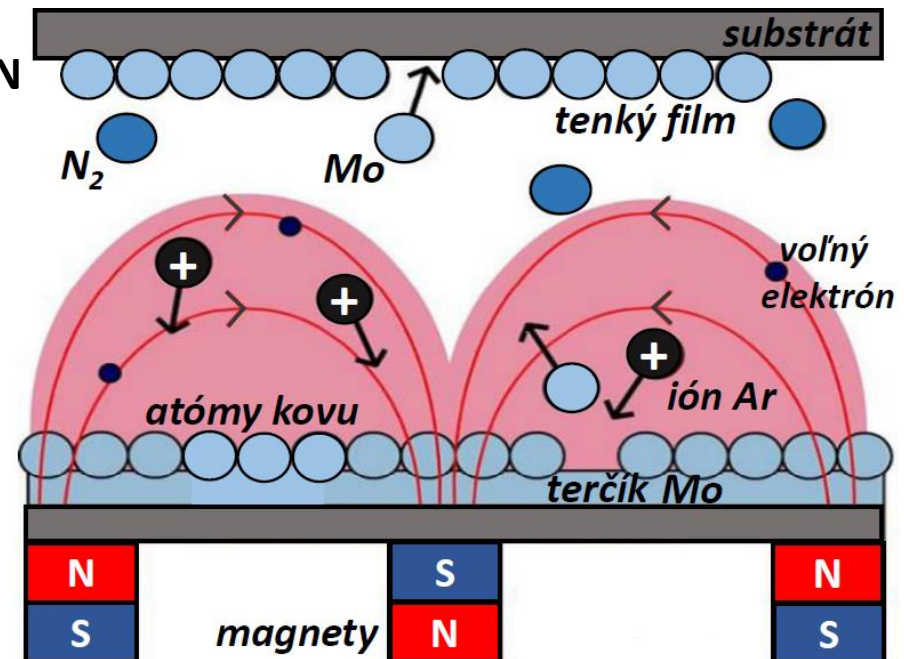
# Výskum MoN



Mgr. Vladimír Komanický, Ph.D.  
PF UPJŠ, Ústav fyzikálnych vied



REAKTÍVNE MAGNETRÓNOVÉ NAPRAŠOVANIE

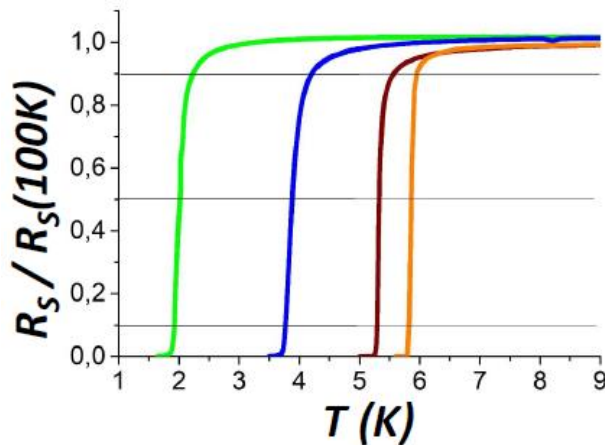


tenké filmy 1 – 30 nm

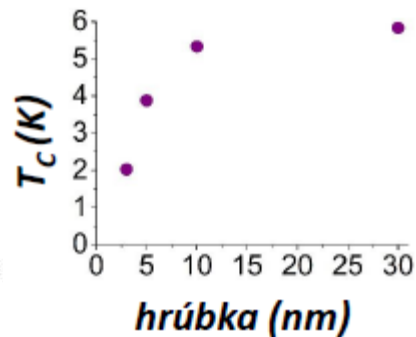


# Výskum MoN

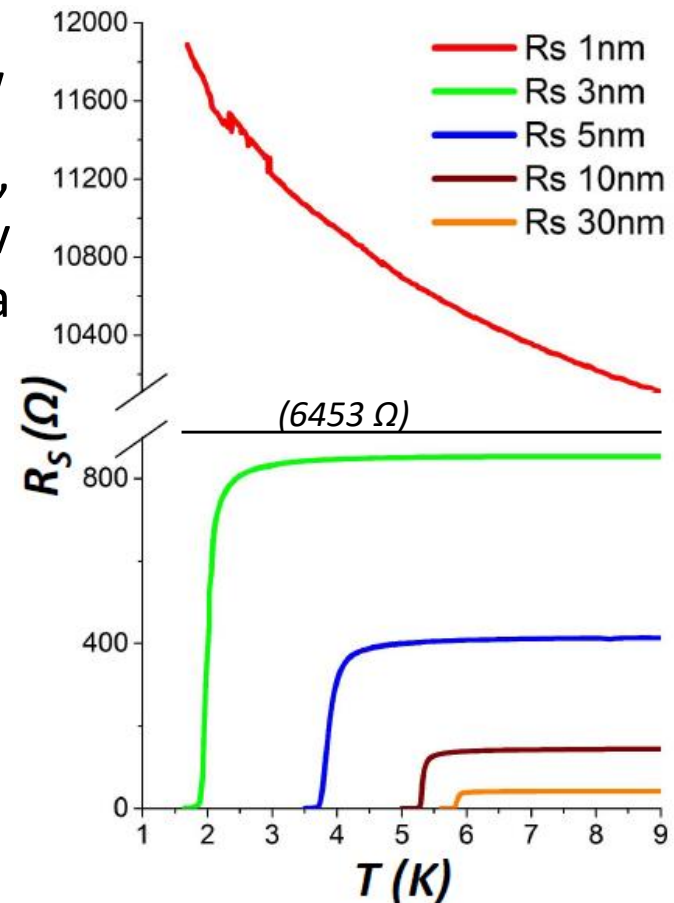
- Meranie v 4bodovej konfigur. **Van der Pauw**
- Úmerne ako narastá neusporiadanosť, rastie aj elektrický odpor supravodičov v normálnom stave a klesá kritická teplota ( $T_c$ ). Dochádza tak k SIT prechodu.



*Nanormované supravodivé prechody (úzke, jednofázové)*

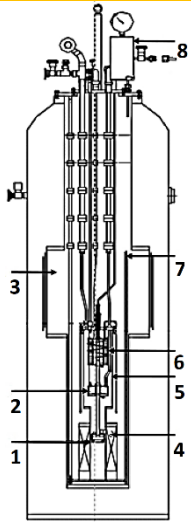


*Vyobrazenie závislosti  $T_c$  od hrúbky tenkých filmov MoN*



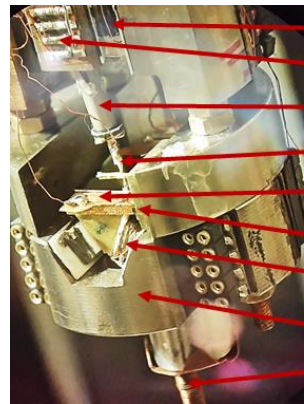
*Transpotné merania na tenkých filmoch MoN o hrúbke 1 – 30 nm*

# Výskum MoN

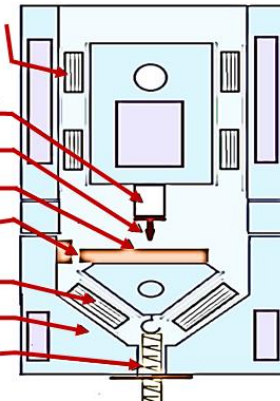


- 1) držiak vzorky;
- 2) 1K vaňa;
- 3) 4He zásobník;
- 4) supravodivý magnet (8T);
- 5) vákuový plášť;
- 6) sorbčná pumpa;
- 7) hladinomer;
- 8) 3He zásobník.

**Kryosystém JANIS HE-3-SSV**



- Piezo-články vertikálneho pohybu
- Tepelné kotvenie vodičov
- Piezo-trubica
- Rastrovací hrot
- Pohybujúci sa stolík so vzorkou
- Kapacitný polohový senzor
- Piezo-články pozdĺžneho pohybu
- Titánový korpus
- Bronzová pružina

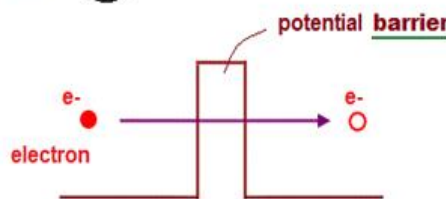
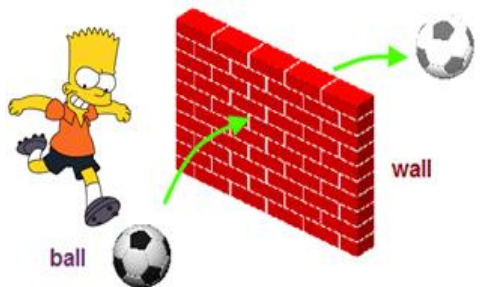


**Schematické znázornenie hlavy STM.**

## Tunelový jav

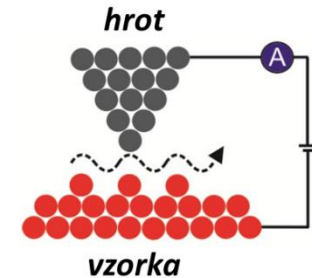
„Častice môžu s istou pravdepodobnosťou prekonať energetickú bariéru, ktorá má vyššiu energiu, ako majú oni samé.“

$$I \approx \frac{U}{d} e^{-Ad\sqrt{V}}$$



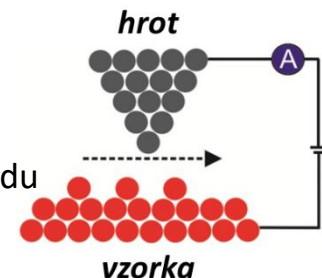
## Mód konštantného prúdu

- zapnutá spätná väzba;
- zmena vertikálnej polohy hrotu zaznamenáva topografiu.
- je bezpečný, ale pomalý



## Mód konštantnej výšky

- vypnutá spätná väzba
- pohyb po horizontálnej rovine zaznamenáva hodnoty tunelového prúdu
- presnejší režim, atómové rozlíšenie

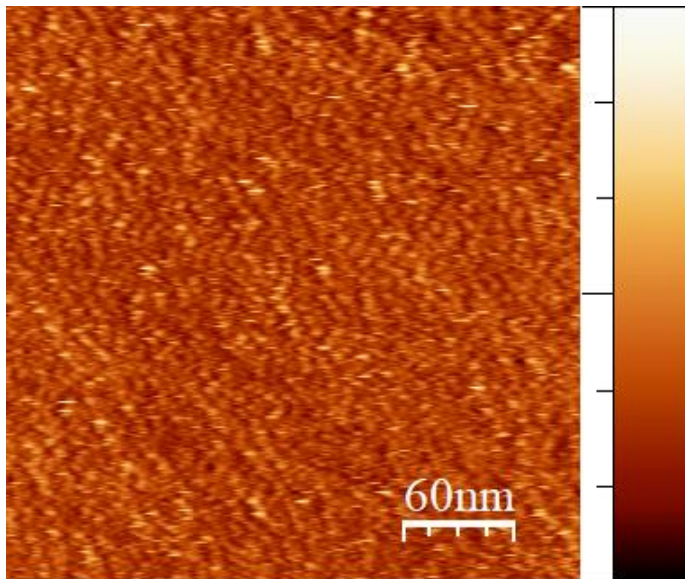




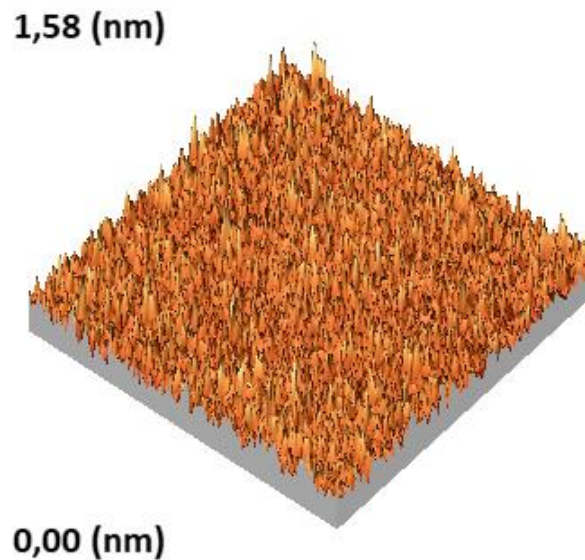
# Výskum MoN

- meranie topografie **STM** (MoN 3 nm)

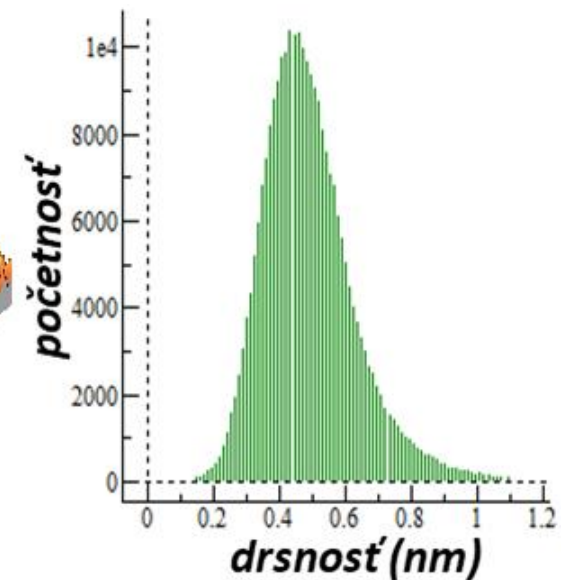
2D



3D



histogram korugácie povrchu

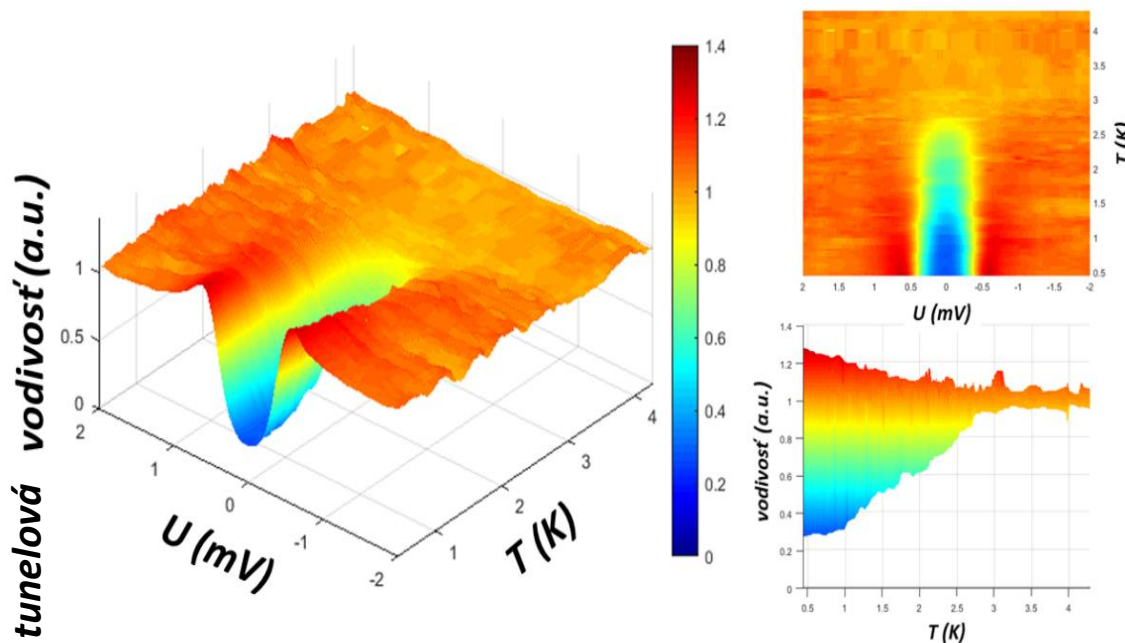


*Pomocou STM v móde konštantného prúdu meraný povrch ( $300 \times 300 \text{ nm}^2$ ) MoN 3 nm v 2D a 3D zobrazení s príslušným histogramom korugácie povrchu. Povrch je zreteľne čistý a hladký s drsnosťou na úrovni 0,4 – 0,5 nm, s dobre definovanou štruktúrou.*

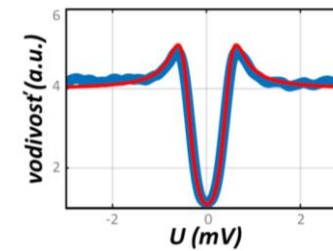
# Výskum MoN



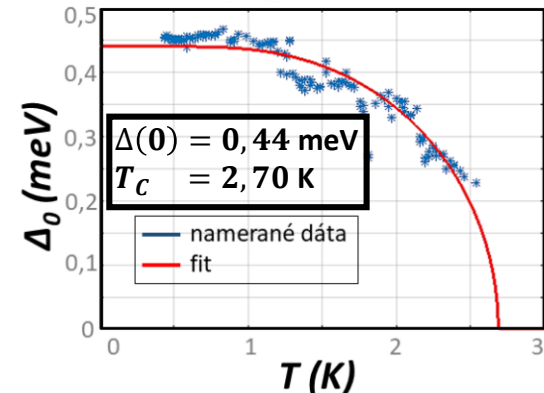
- meranie teplotných závislostí tunelových spektier **STS** (MoN 3 nm)



*Vyobrazenie 3D grafu teplotných závislostí tunelových spektier (0,439 – 4,279 K) v  $B = 0$  T. Približne pri  $T = 3$  K miznú supravodivé črty spektier a dochádza k úplnému potlačeniu supravodivosti.*



*Názorný fit tunelového spektra podľa Dynesovho modelu*

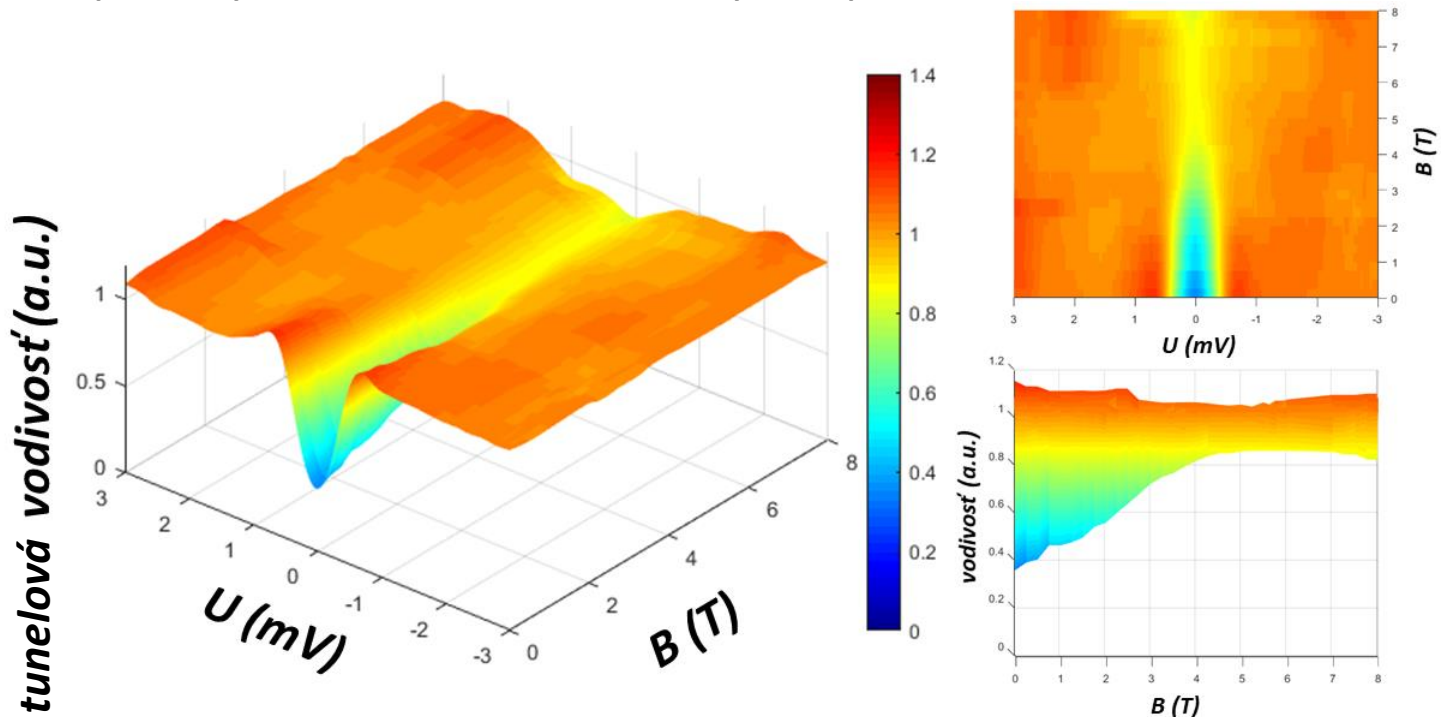


*Fitom jednoduchých teplotných závislostí tunelových spektier podľa Dynesovho modelu získané hodnoty parametra energetickej medzery  $\Delta$ , ďalej prefitované podľa teplotnej závislosti energetickej medzery v súlade s BCS teóriou.*



# Výskum MoN

- meranie polových závislostí tunelových spektier **STS** (MoN 3 nm)



*Vyobrazenie 3D grafu polových závislostí tunelových spektier (0 – 8 T) pri  $T = 0,5$  K. Približne v poli 4 – 5 T vidieť úplné potlačenie energetickej medzery ( $H_{C2}$ ). Nad  $H_{C2}$  zjavne nedochádza k úplnému potlačeniu medzerovej štruktúry tunelových spektier (žeby tzv. Altshuler-Aronov efekt?).*



# Vývoj

V supravodičoch existujú dve energetické (teplotné) škály:

- **energetická medzera  $\Delta$** , ktorá odpovedá energii potrebnej na roztrhnutie Cooperovho páru,
- **fázová tuhosť  $J$  (phase stiffness)** (označovaná aj  $\rho_S$ ), súvisí so schopnosťou supravodiča viesť elektrický prúd bez straty energie a je úmerná **koncentracii supravodivých nosičov náboja  $n_S$  (superfluid density)**.

$$J = \frac{\hbar^2 a n_S}{4m}$$

$$3D: a \approx \xi_0$$

$$2D: t < \xi_0$$

$$a \approx t$$

$$n_S = \frac{m}{\mu_0 e^2 \lambda^2}$$

$h$  – Planckova konštanta

$a$  – mriežková konštanta

$m$  – elektrónová hmotnosť

$\xi_0$  – koherenčná dĺžka

$t$  – hrúbka filmu

$\mu_0$  – permeabilita vákua

$e$  – elektrónový náboj

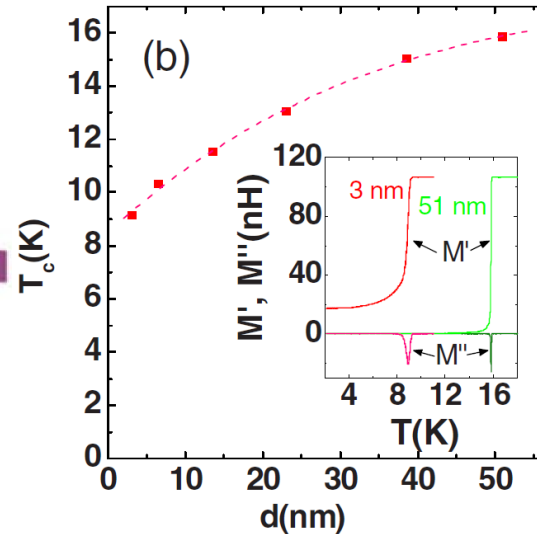
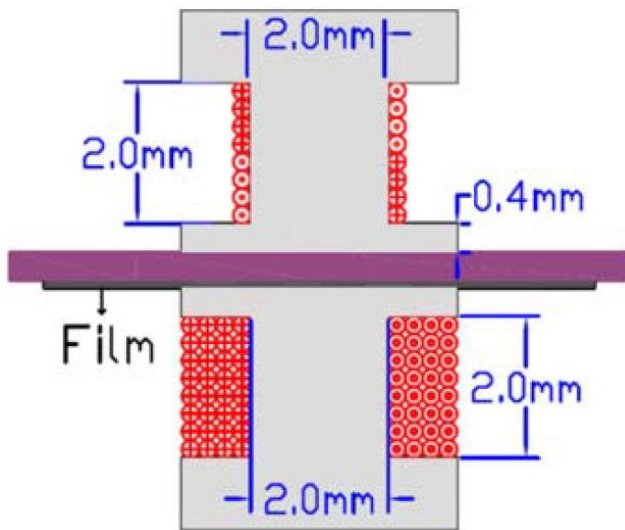
$\lambda$  – magnetická hĺbka vniku



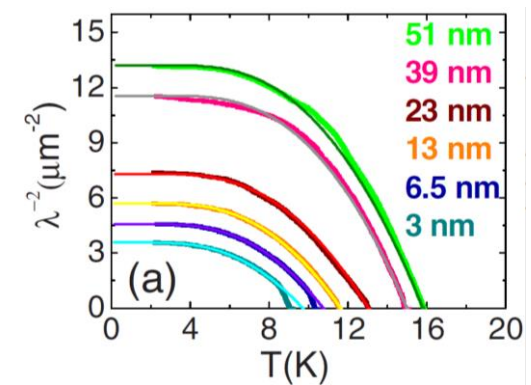


# Vývoj

- zariadenie na určenie absolútnej hodnoty magnetickej hĺbky vniku  $\lambda$ , využitím dvoj cievkovej techniky merania vzájomnej indukčnosti  $M$



$$M = M^I + iM^{II} = \frac{V_p}{\omega I_d}$$



*Schematické znázornenie primárnej kvadrupólovej cievky (hore) a sekundárnej dipólovej cievky (dole), medzi ktorými sa nachádza supravodivý tenký film.*

P. Raychaudhuri et al., APPLIED PHYSICS LETTERS 96, 072509 (2010)

**PRINCÍP: tenký supravodiví film chráni sekundárnu cievku pred magnetickým poľom vytvorením primárnou cievkou, pričom stupeň tienenia závisí od  $\lambda$**



# Ďakujem za pozornosť

This is  
my  
thank you  
dance!





# Vývoj - doplnenie

V supravodičoch existujú dve energetické (teplotné) škály:

- **energetická medzera  $\Delta$** , ktorá odpovedá energii potrebnej na roztrhnutie Cooperovho páru,
- **fázová tuhosť  $J$  (phase stiffness)** (označovaná aj  $\rho_s$ ), súvisí so schopnosťou supravodiča viesť elektrický prúd bez straty energie a je úmerná **koncentrácii supravodivých nosičov náboja  $n_s$  (superfluid density)**.

$$J = \frac{\hbar^2 a n_s}{4m}$$

$$3D: a \approx \xi_0$$

$$2D: t < \xi_0$$

$$a \approx t$$

$$n_s = \frac{m}{\mu_0 e^2 \lambda^2}$$

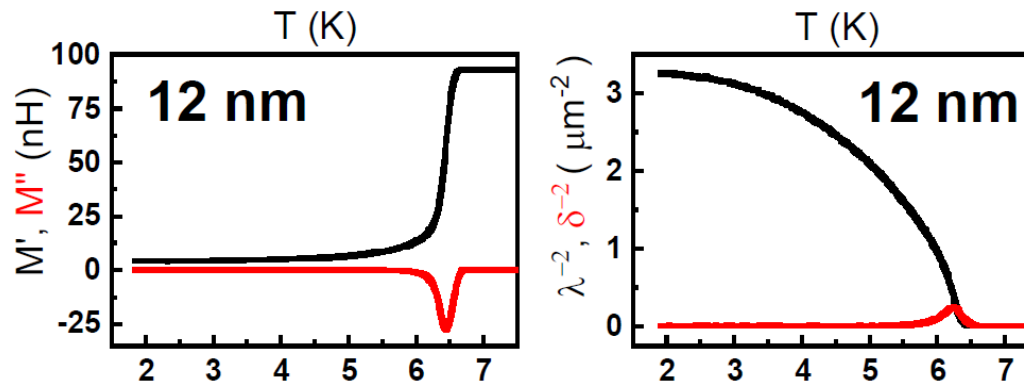
$h$  – Planckova konštanta  
 $a$  – mriežková konštanta  
 $m$  – elektrónová hmotnosť  
 $\xi_0$  – koherenčná dĺžka  
 $t$  – hrúbka filmu  
 $\mu_0$  – permeabilita vákua  
 $e$  – elektrónový náboj  
 $\lambda$  – magnetická hĺbka vniku

Pre tieto energetické škály platí, že

- $\Delta \ll J$  pri konvenčných supravodičoch. Zánik supravodivého stavu tu súvisí so zánikom Cooperových párov,
- $\Delta \approx J$  pri kuprátoch,
- $\Delta > J$  pri poddopovaných materiáloch. Zvyšovaním teploty tak najskôr dochádza k zániku schopnosti supravodiča viesť supravodivý prúd a až následnému zániku Cooperových párov. Tie môžu preto existovať aj pri teplotách vyšších ako je kritická teplota.



# Vývoj - doplnenie



$$\lambda_{\omega}^{-2} = \lambda^{-2} + i\delta^{-2}$$

$\delta$  – povrchová hĺbka (skin depth)