



**Ústav experimentálnej fyziky SAV
Centrum fyziky nízkých teplôt**

**Magnetickým poľom indukovaný prechod supravodič-izolant vo
vysoko neusporiadaných tenkých filmoch MoC**

Doktorandský seminár UEF 2020



Činnosť počas doktorandského štúdia

1. Štúdium vln nábojovej hustoty (CDW) v dopovanom dichalkogenide Cu_xTiSe_2
2. Štúdium supravodivej medzery v $\text{Mo}_8\text{Ga}_{41}$
Single-gap superconductivity in $\text{Mo}_8\text{Ga}_{41}$
M. Marcin, J. Kačmarčík, Z. Pribulová, M. Kopčík, P. Szabó, O. Šofranko, T. Samuely, V. Vaňo, C. Marcenat, V. Verchenko, A. Shevelkov and P. Samuely
Scientific Reports 9, 13552 (2019)
3. Vplyv substrátu a rozhrania na supravodivosť vo vysoko neusporiadaných tenkých filmoch MoC
On the origin of in-gap states in homogeneously disordered ultrathin films. MoC case.
V. Hašková, M. Kopčík, P. Szabó, T. Samuely, J. Kačmarčík, O. Onufriienko, M. Žemlička, P. Neilinger, M. Grajcar and P. Samuely
Applied Surface Science 461, 143-148 (2018)
4. Štúdium teplotnej závislosti hustoty nosičov náboja v tenkých filmoch MoC
Observation of quantum corrections to conductivity up to optical frequencies
P. Neilinger, J. Greguš, D. Manca, B. Grančíč, M. Kopčík, P. Szabó, P. Samuely, R. Hlubina and M. Grajcar
Physical Review B Rap. Comm. 100, 241106(R) (2019)
5. Magnetickým poľom indukovaný prechod supravodič-izolant v tenkých filmoch MoC
Zeeman-driven superconductor-insulator transition in strongly disordered MoC films
M. Žemlička, M. Kopčík, P. Szabó, T. Samuely, J. Kačmarčík, P. Neilinger, M. Grajcar and P. Samuely
Physical Review Letters, v recenznom konaní
6. Magnetickým poľom indukovaný prechod supravodič-izolant v tenkých filmoch MoN a Mo_2N



Činnosť počas doktorandského štúdia

3. Vplyv substrátu a rozhrania na supravodivosť vo vysoko neusporiadaných tenkých filmoch MoC

On the origin of in-gap states in homogeneously disordered ultrathin films. MoC case.

V. Hašková, M. Kopčík, P. Szabó, T. Samuely, J. Kačmarčík, O. Onufriienko, M. Žemlička, P. Neilinger, M. Grajcar and P. Samuely

Applied Surface Science 461, 143-148 (2018)

4. Štúdium teplotnej závislosti hustoty nosičov náboja v tenkých filmoch MoC

Observation of quantum corrections to conductivity up to optical frequencies

P. Neilinger, J. Greguš, D. Manca, B. Grančič, M. Kopčík, P. Szabó, P. Samuely, R. Hlubina and M. Grajcar

Physical Review B Rap. Comm. 100, 241106(R) (2019)

5. Magnetickým poľom indukovaný prechod supravodič-izolant v tenkých filmoch MoC

Zeeman-driven superconductor-insulator transition in strongly disordered MoC films

M. Žemlička, M. Kopčík, P. Szabó, T. Samuely, J. Kačmarčík, P. Neilinger, M. Grajcar and P. Samuely

Physical Review Letters, v recenznom konaní

Fázový prechod supravodič-izolant (SIT)

Kvantový fázový prechod

zmena základného stavu systému ($T=0$) v dôsledku kvantových fluktuácií

Supravodič

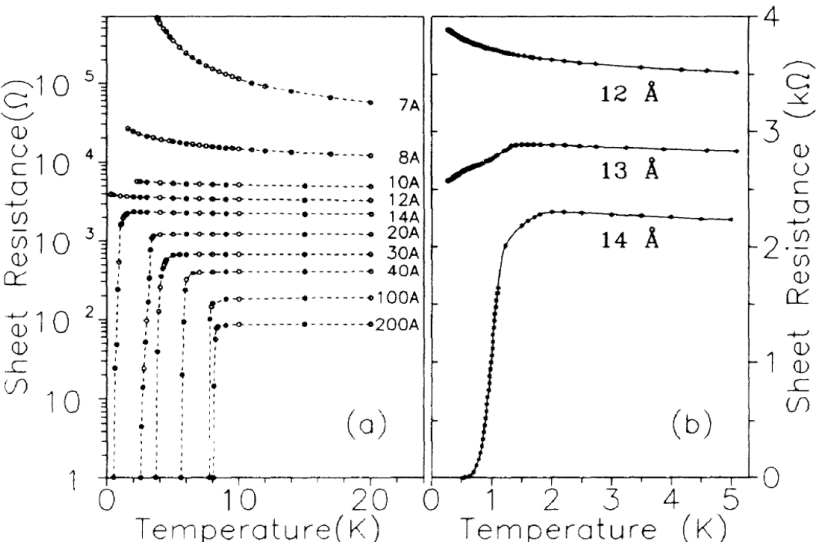


Riadiace parametre

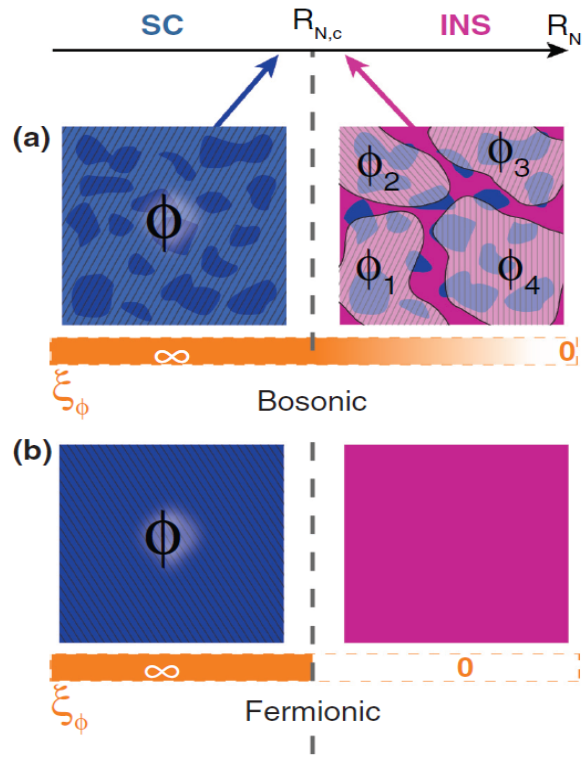
- neusporiadanosť (prímese, poruchy mriežky)
- nízkorozmernosť
- koncentrácia nosičov náboja
- vonkajšie magnetické pole
- ...



Izolant



S-I prechod vyvolaný prechodom z 3D do kvázi-2D systému v tenkých filmoch MoC



Bozónový scenár

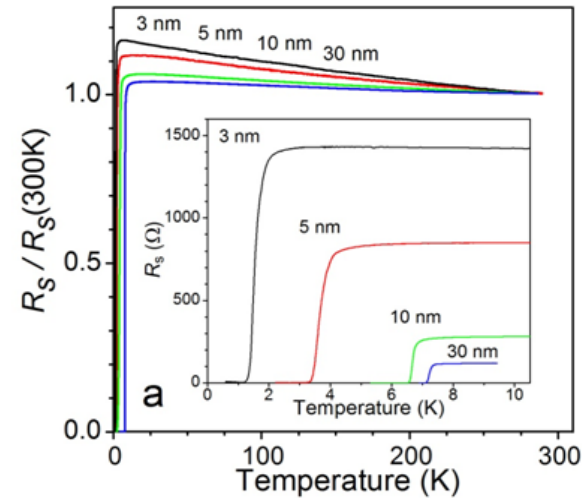
- fluktuácie fázy Δ
- postupná strata makroskopickej fázovej koherencie
- priamy prechod do izolačného stavu

Fermiónový scenár

- fluktuácie amplitúdy Δ
- postupný pokles amplitúdy parametra usporiadania Δ na nulu
- prechod cez stav zlého kovu

SIT v MoC filmoch

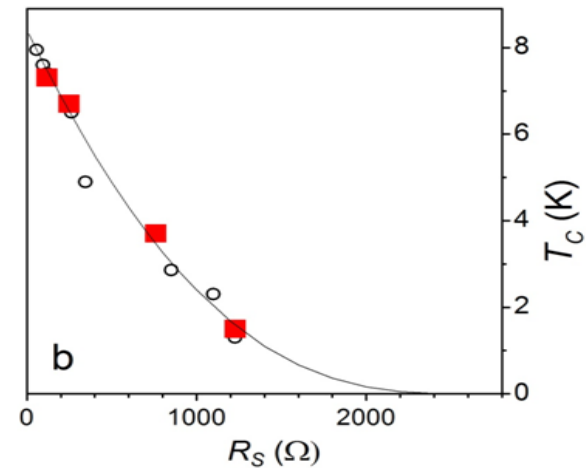
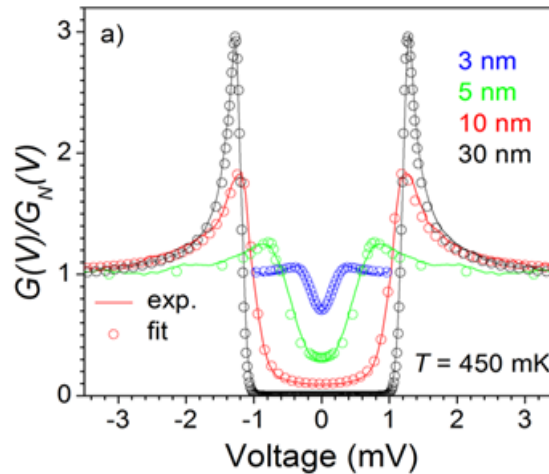
- sila supravodivej väzby $\frac{2\Delta(0)}{k_B T_C}$ zostáva konštantná
- prítomnosť vnútromedzerových kvázičasticových stavov
- homogenita energetickej medzery
- neprítomnosť pseudomedzery
- dobrá zhoda potlačenia T_C s modelom *Finkelshtein et al.* pre homogénne neusporiadané systémy



Intrinzická neusporiadanosť k_{Fl}

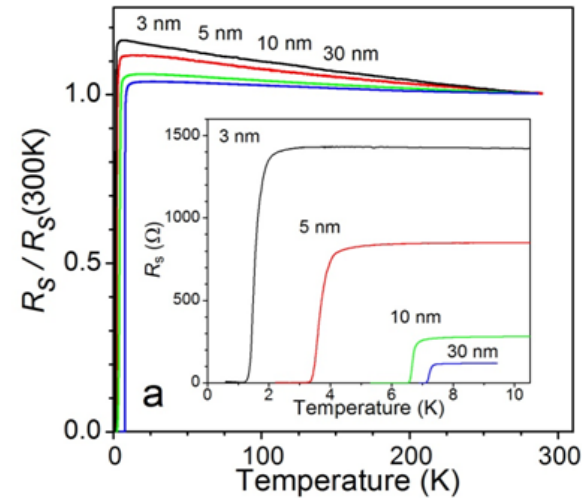
Hrúbka \downarrow \rightarrow $k_{Fl} \downarrow$

$k_{Fl} \rightarrow 1$



SIT v MoC filmoch

- sila supravodivej väzby $\frac{2\Delta(0)}{k_B T_C}$ zostáva konštantná
- prítomnosť vnútromedzerových kvázičasticových stavov
- homogenita energetickej medzery
- neprítomnosť pseudomedzery
- dobrá zhoda potlačenia T_C s modelom *Finkelshtein et al.* pre homogénne neusporiadané systémy



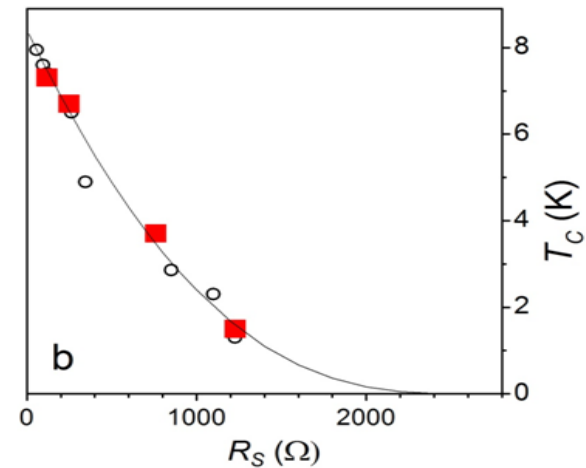
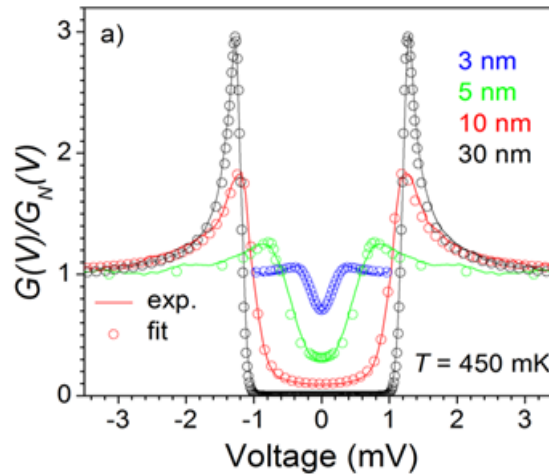
Intrinzická neusporiadanosť $k_F l$

Hrúbka \downarrow \rightarrow $k_F l \downarrow$

$k_F l \rightarrow 1$



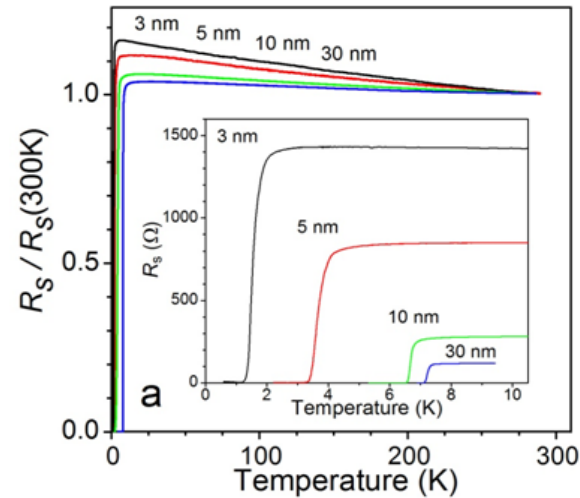
Blížkosť Andersonovskej lokalizácie ?



Szabó et al., Phys. Rev. B 2015

SIT v MoC filmoch

- sila supravodivej väzby $\frac{2\Delta(0)}{k_B T_C}$ zostáva konštantná
- prítomnosť vnútromedzerových kvázičasticových stavov
- homogenita energetickej medzery
- neprítomnosť pseudomedzery
- dobrá zhoda potlačenia T_C s modelom *Finkelshtein et al.* pre homogénne neusporiadané systémy



Intrinzická neusporiadanosť $k_F l$

Hrúbka \downarrow \rightarrow $k_F l \downarrow$

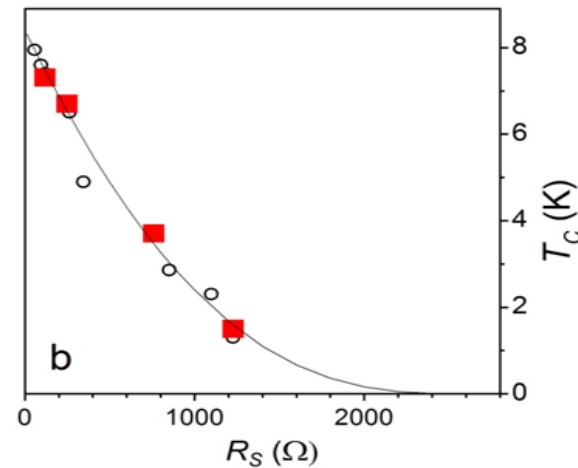
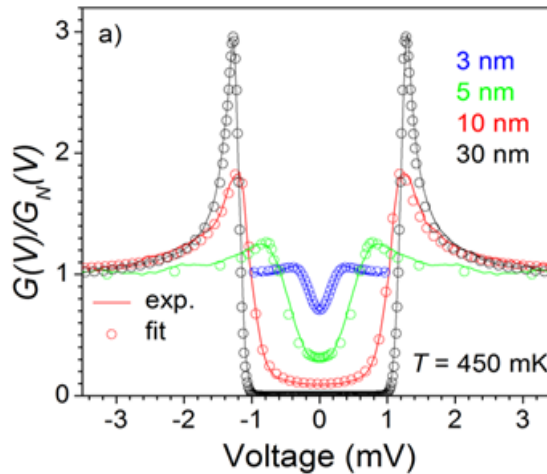
$k_F l \rightarrow 1$



Blížkosť Andersonovskej lokalizácie ?



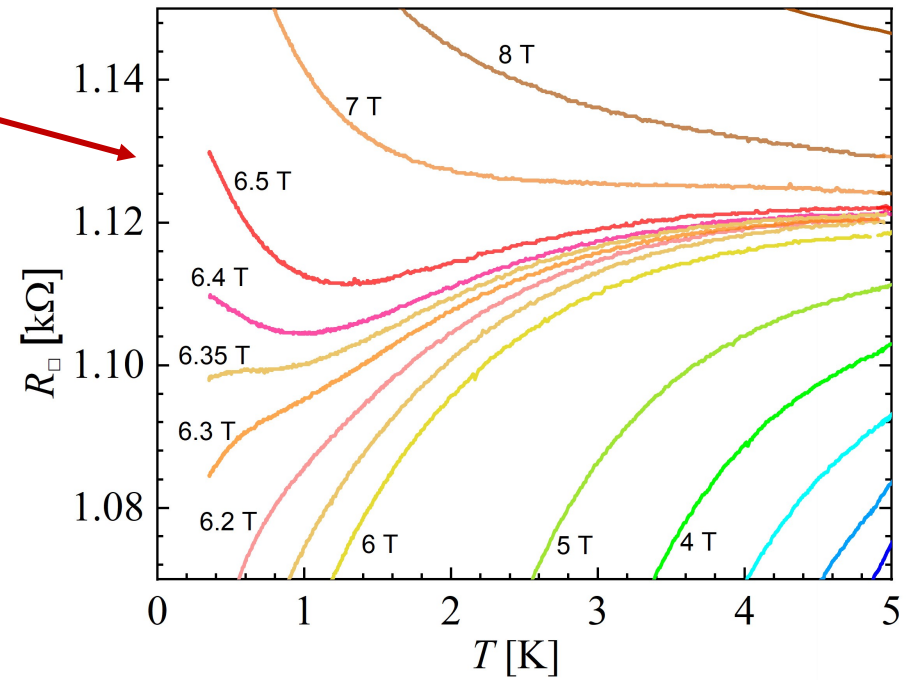
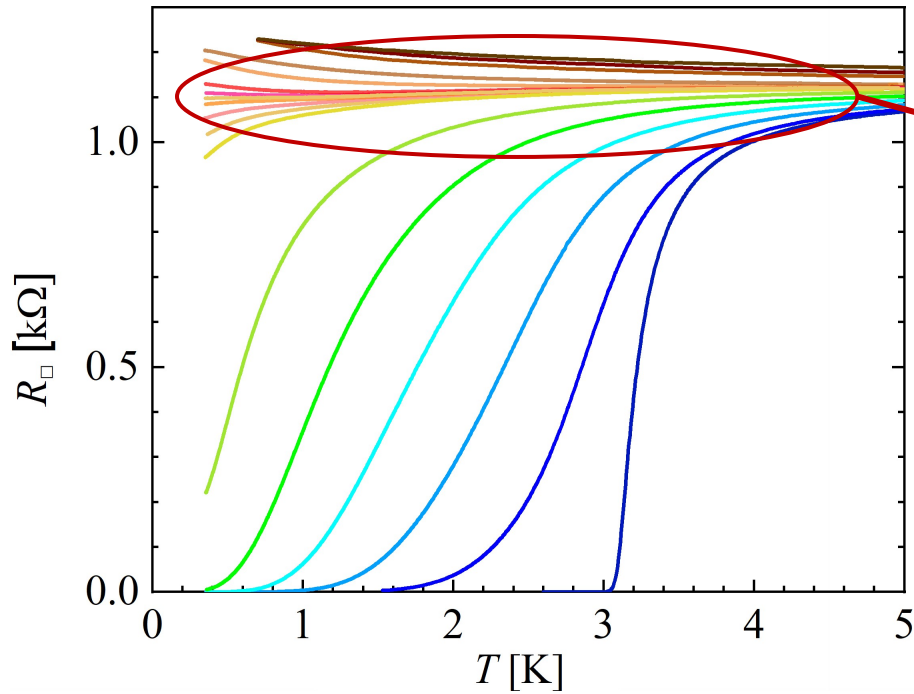
Magnetickým poľom indukovaný SIT ?



Szabó et al., Phys. Rev. B 2015

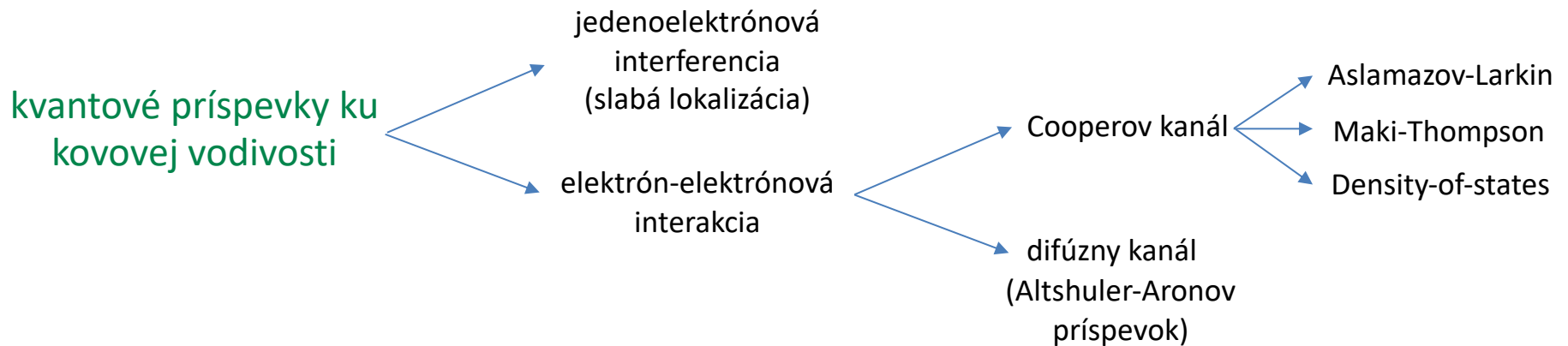
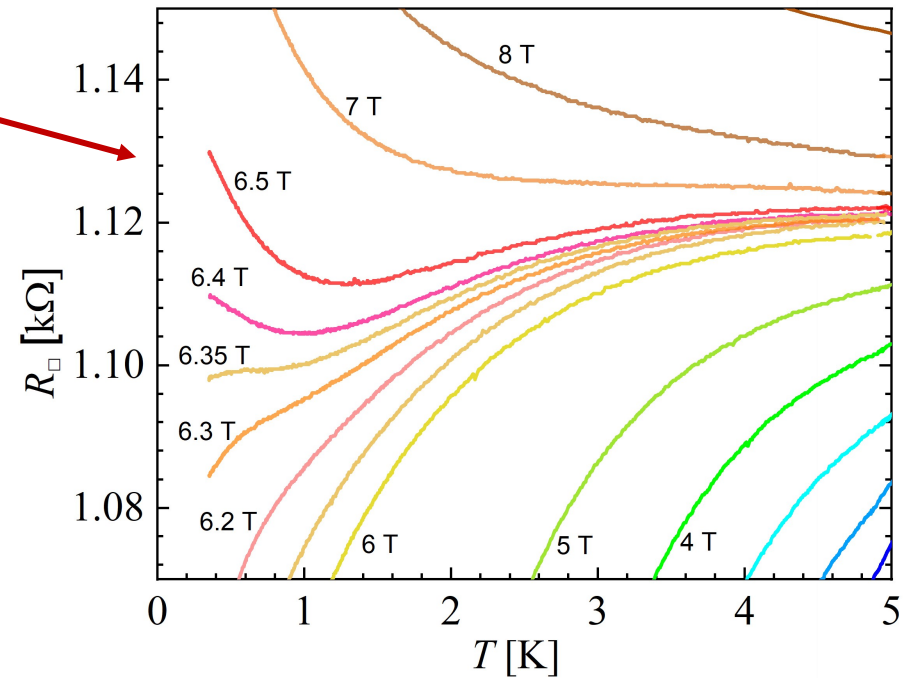
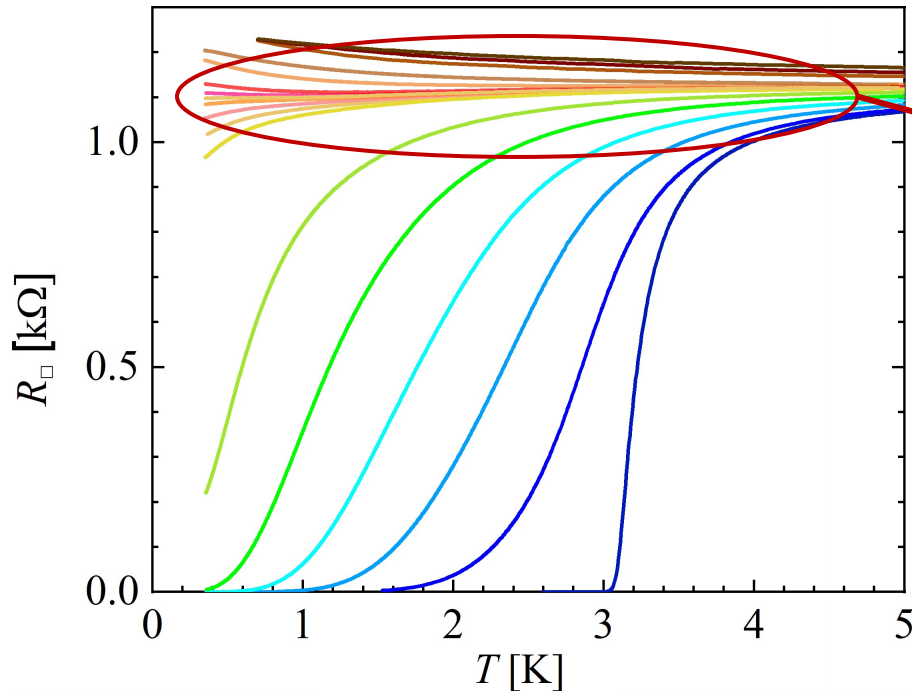
Transportné merania

Teplotná závislosť odporu v poli 0-16 T



Transportné merania

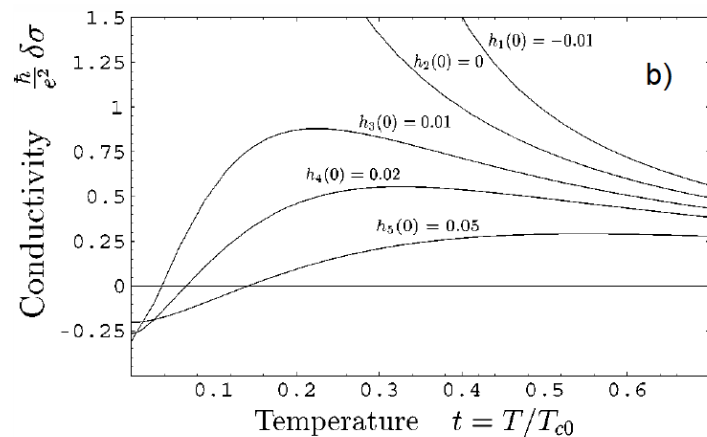
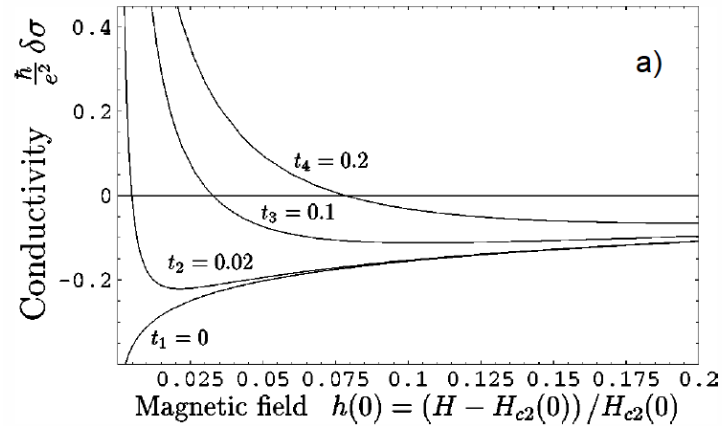
Teplotná závislosť odporu v poli 0-16 T



Príspevok v Cooperovom kanáli

Model Galitski-Larkin

$$T \rightarrow 0 \quad B \rightarrow H_{c2}(0)$$



$$r = \frac{h}{2\gamma t} \quad t = \frac{T}{T_{c0}} \quad h = \frac{H - H_{c2}(T)}{H_{c2}(0)}$$

$$\sigma = \sigma_0 + \frac{2e^2}{3\pi^2\hbar} \left\{ \underbrace{-\ln \frac{r}{h} - \frac{3}{2r} + \psi(r) + 4[r\psi'(r) - 1]}_{\text{fluktučná vodivosť}} \right\}$$

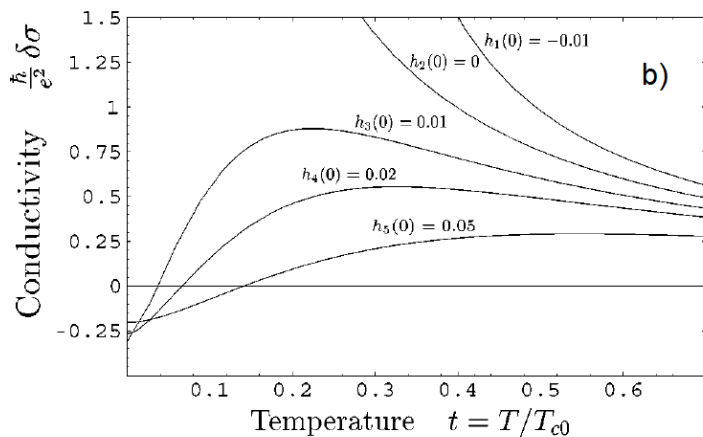
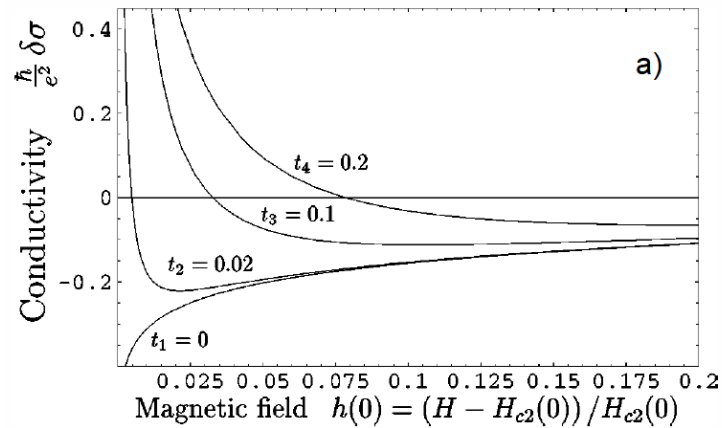
kovová vodivosť'

fluktučná vodivosť'

Popis celkovej vodivosti

Model Galitski-Larkin

$$T \rightarrow 0 \quad B \rightarrow H_{c2}(0)$$



$$r = \frac{h}{2\gamma t} \quad t = \frac{T}{T_{c0}} \quad h = \frac{H - H_{c2}(T)}{H_{c2}(0)}$$

$$\sigma = \sigma_0 + \frac{2e^2}{3\pi^2\hbar} \left\{ -\ln \frac{r}{h} - \frac{3}{2r} + \psi(r) + 4[r\psi'(r) - 1] \right\}$$

kovová vodivosť

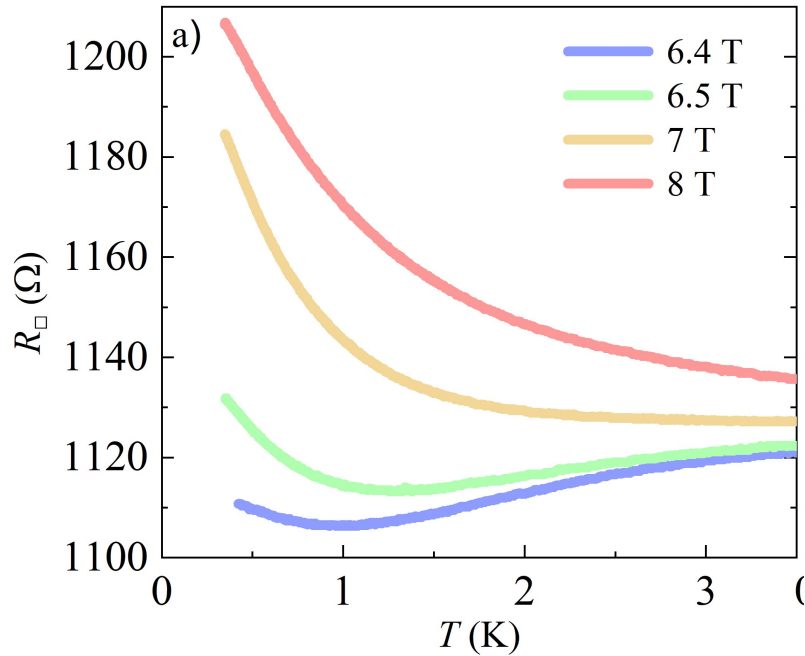
Cooperov kanál

+

difúzny kanál

$$\sigma_{AA} = -\alpha \cdot \ln \frac{T}{T_S}$$

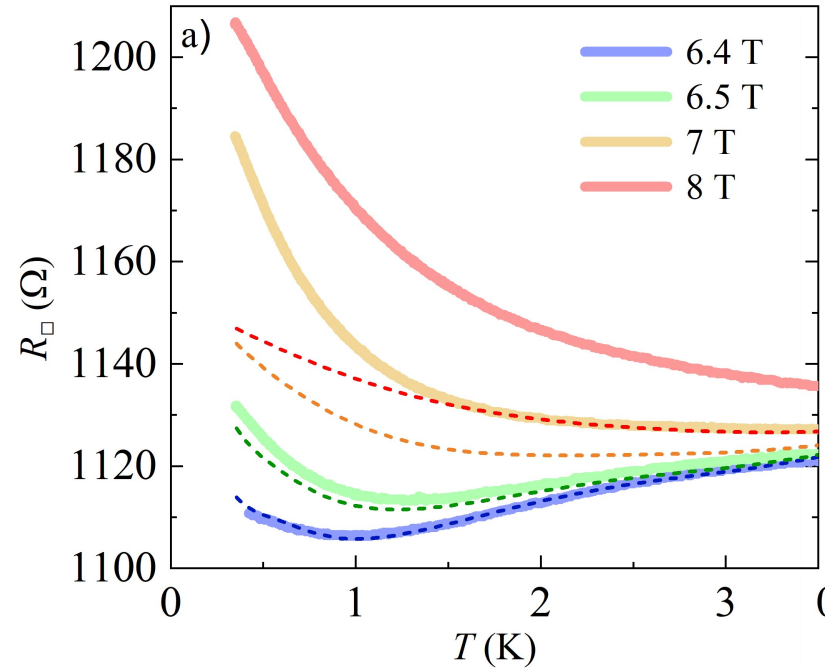
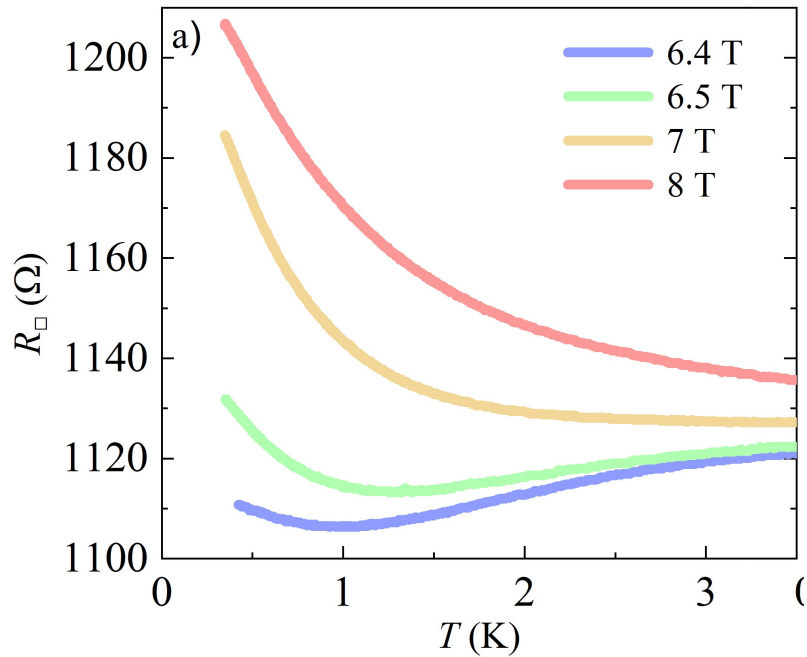
Popis celkovej vodivosti



$$\sigma = \sigma_0 + \delta\sigma_{GL} + \delta\sigma_{AA}$$

$$\sigma = \sigma_0 + \frac{2e^2}{3\pi^2\hbar} \left\{ -\ln \frac{r}{h} - \frac{3}{2r} + \psi(r) + 4[r\psi'(r) - 1] \right\} - \alpha \cdot \ln \frac{T}{T_S}$$

Popis celkovej vodivosti

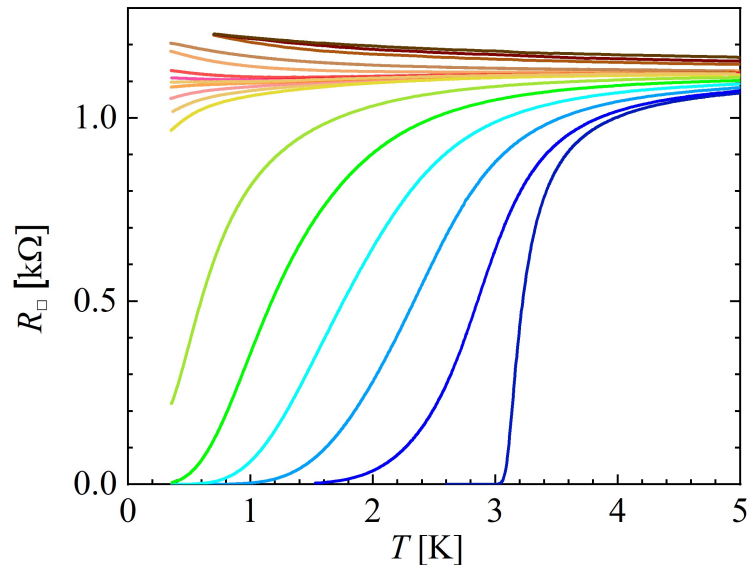


$$\sigma = \sigma_0 + \delta\sigma_{GL} + \delta\sigma_{AA}$$

$$\sigma = \sigma_0 + \frac{2e^2}{3\pi^2\hbar} \left\{ -\ln \frac{r}{h} - \frac{3}{2r} + \psi(r) + 4[r\psi'(r) - 1] \right\} - \alpha \cdot \ln \frac{T}{T_S}$$

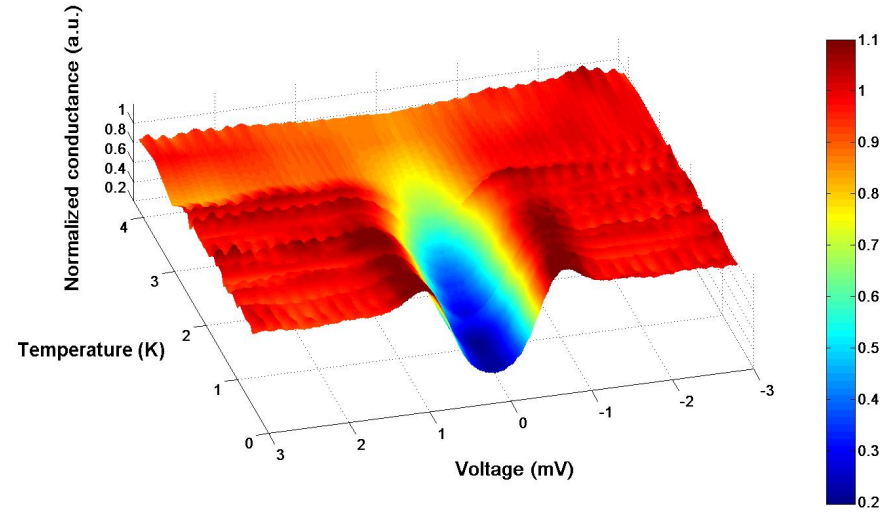
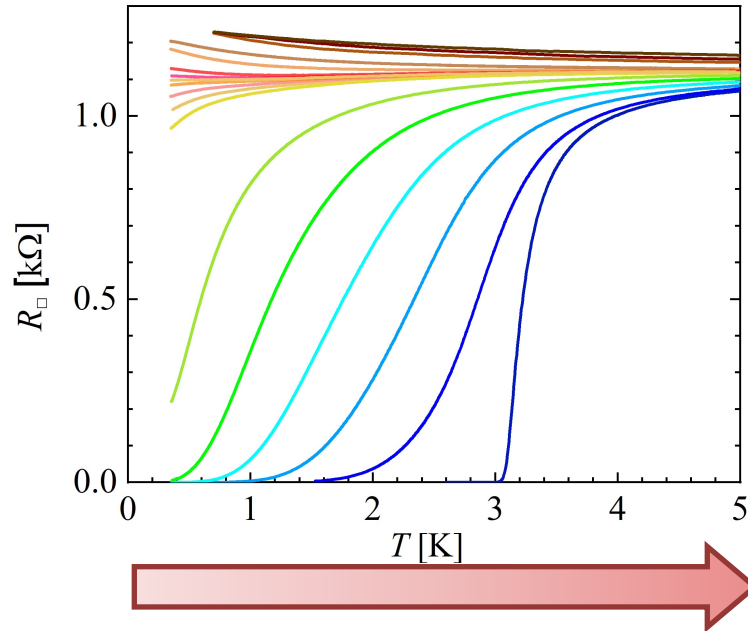
Tunelová spektroskopia

Teplotná závislosť tunelových spektier

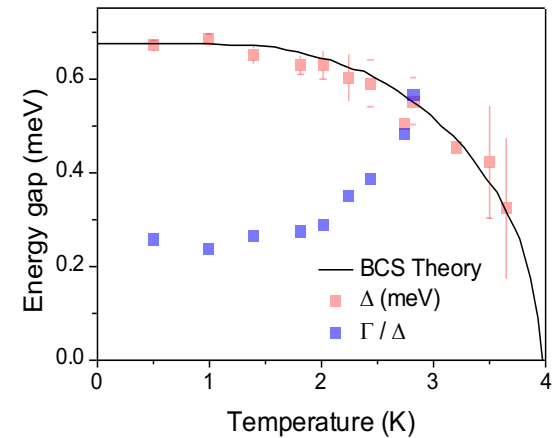
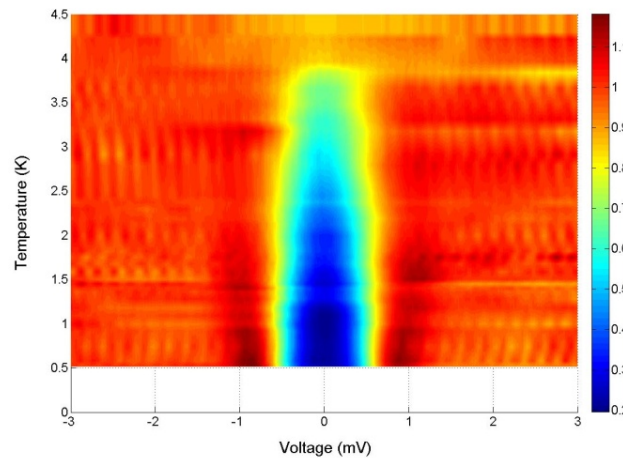


Tunelová spektroskopia

Teplotná závislosť tunelových spektier

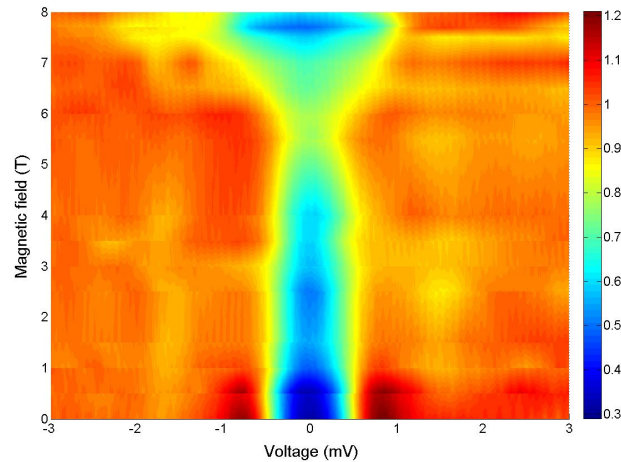
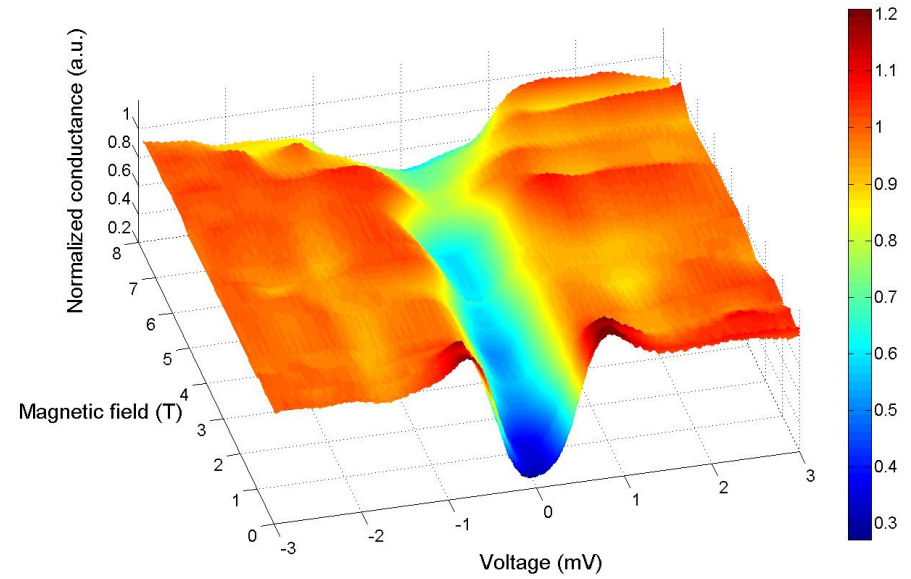
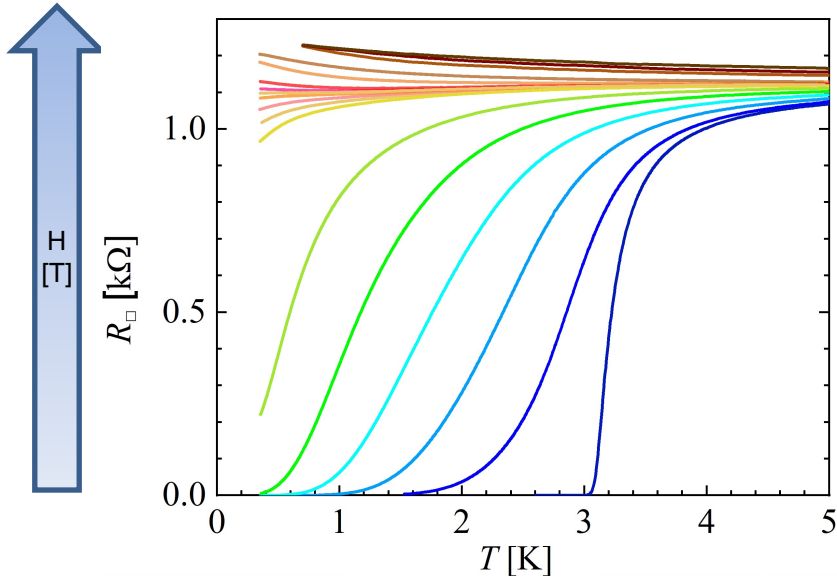


energetická medzera $\Delta = 0.66 \text{ meV}$
 kritická teplota $T_c = 3.95 \text{ K}$
 sila väzby $2\Delta/kT_c = 3.85$



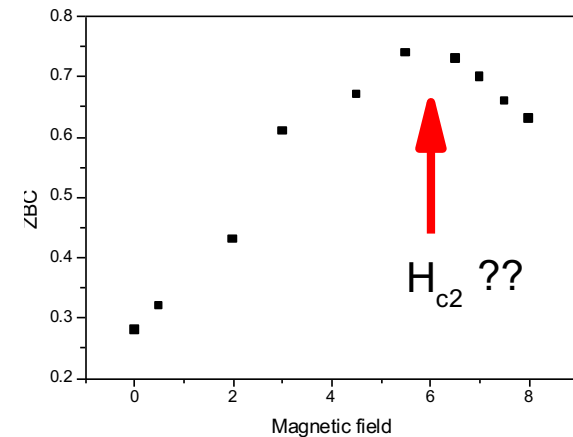
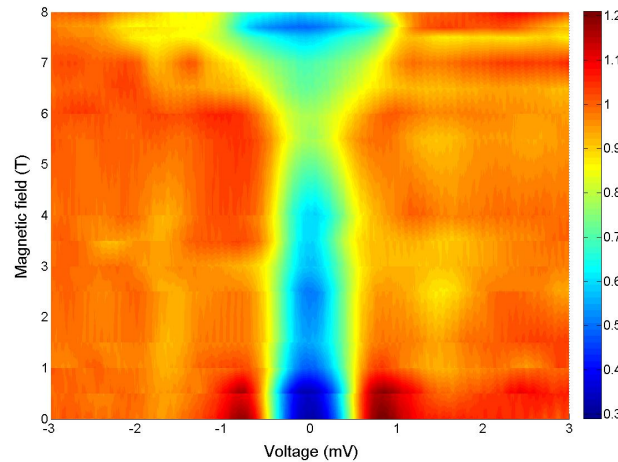
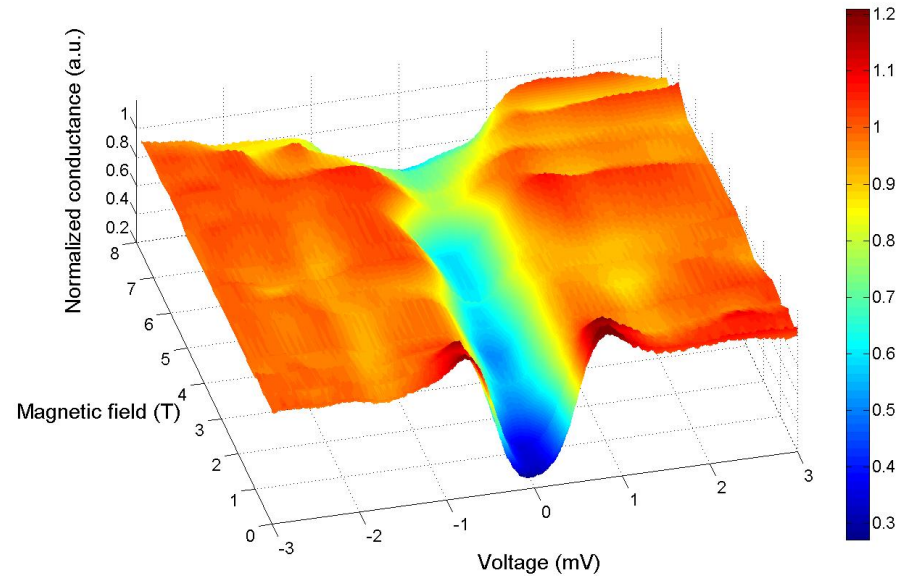
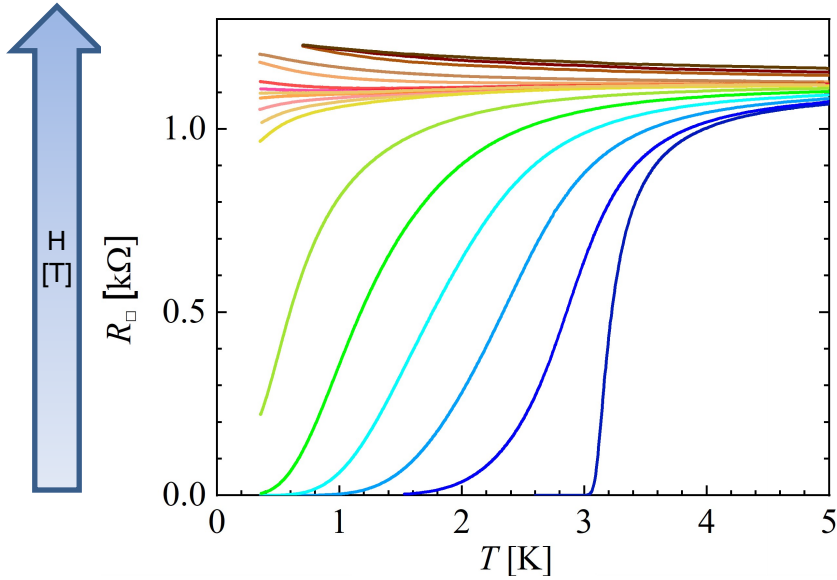
Tenké filmy MoC 3 nm

Poľová závislosť tunelových spektier



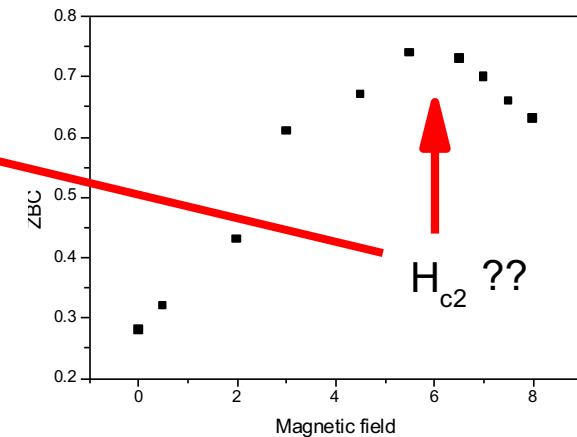
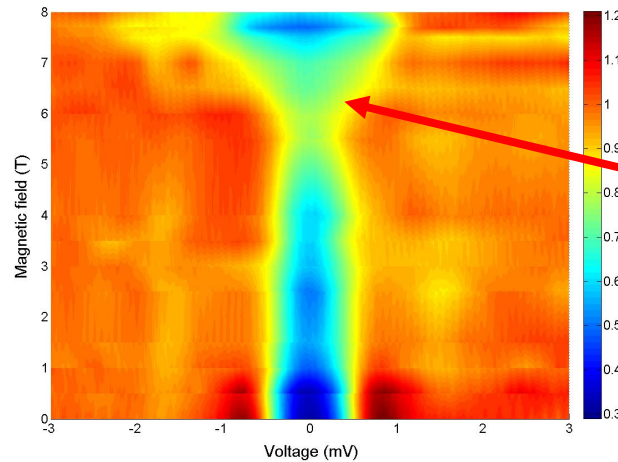
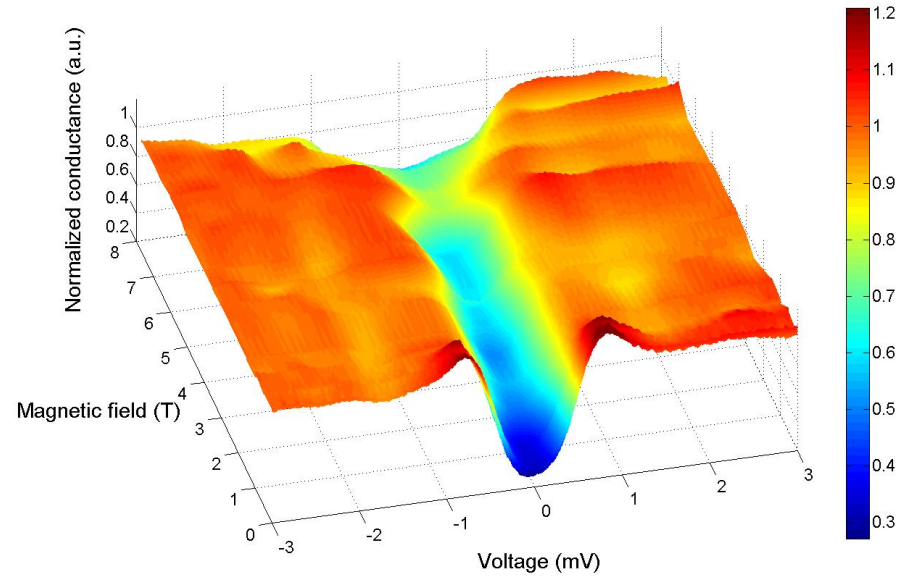
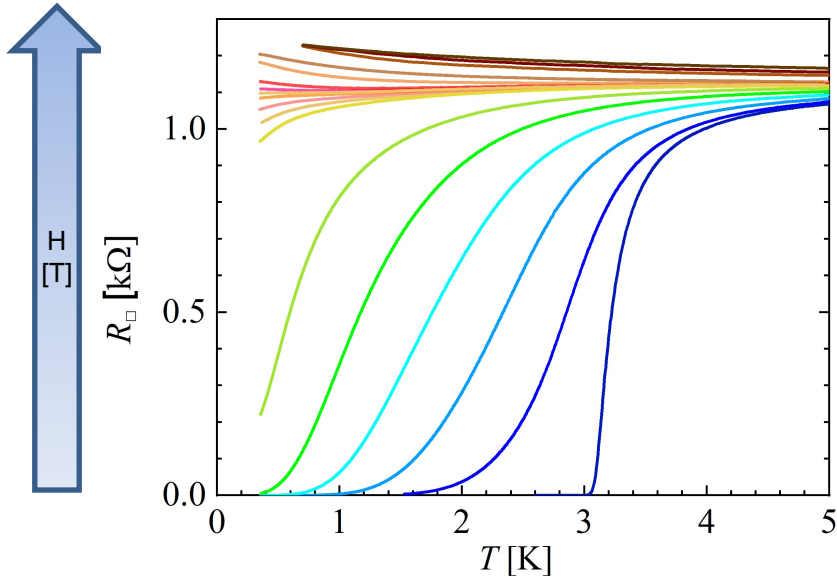
Tenké filmy MoC 3 nm

Poľová závislosť tunelových spektier



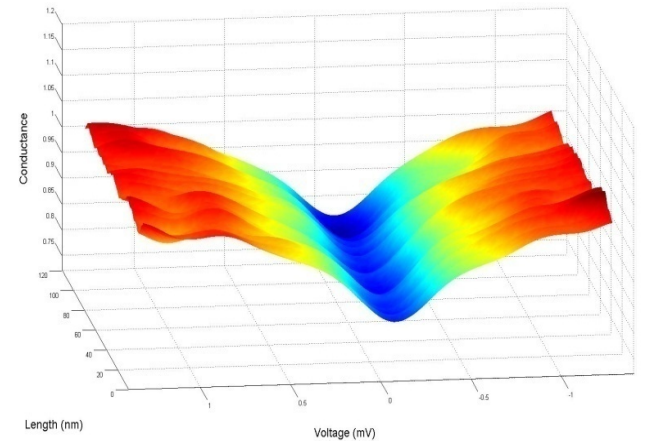
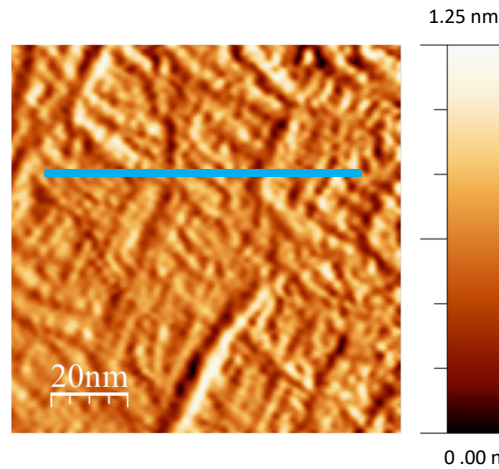
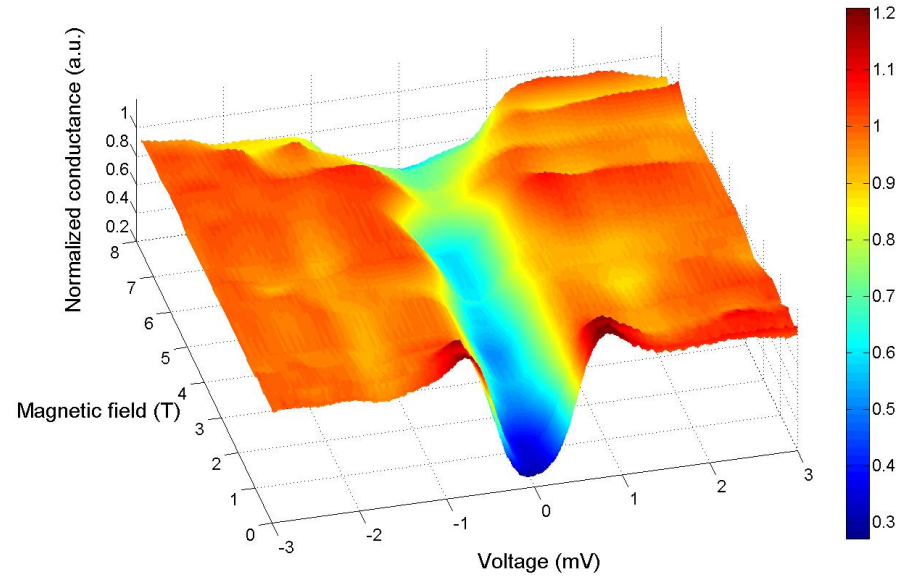
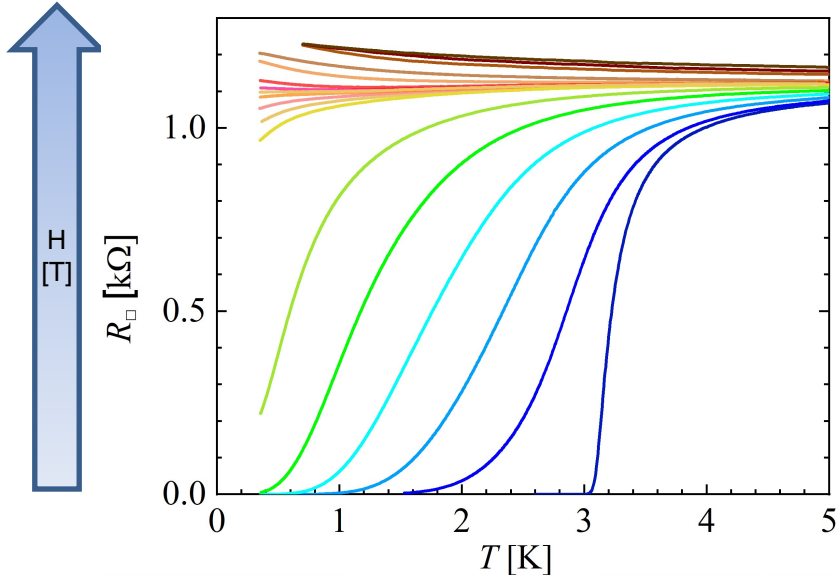
Tenké filmy MoC 3 nm

Poľová závislosť tunelových spektier



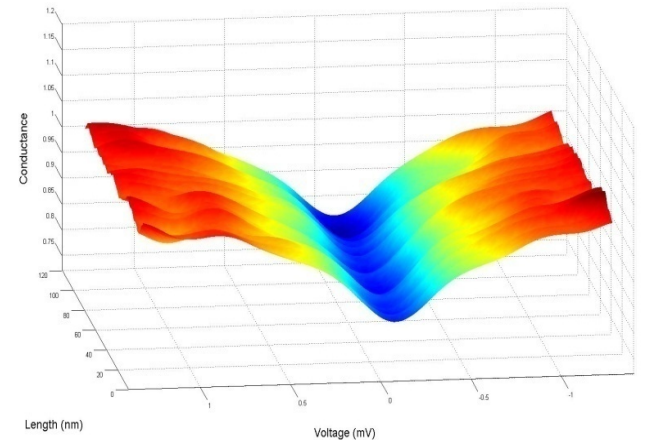
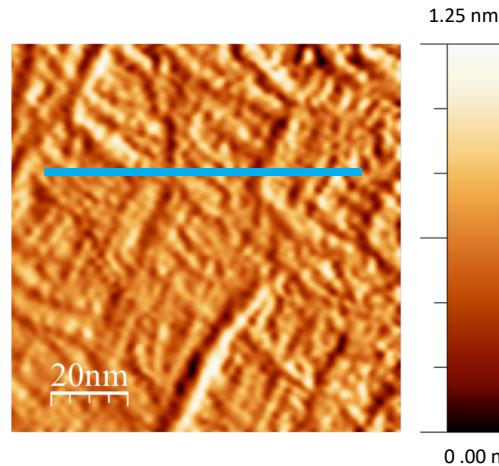
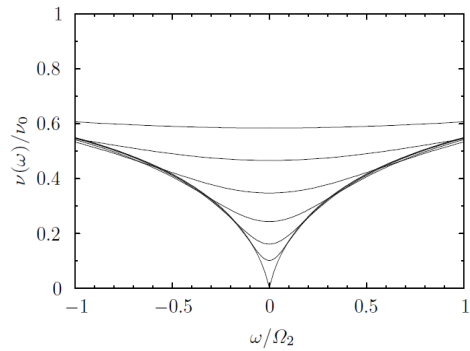
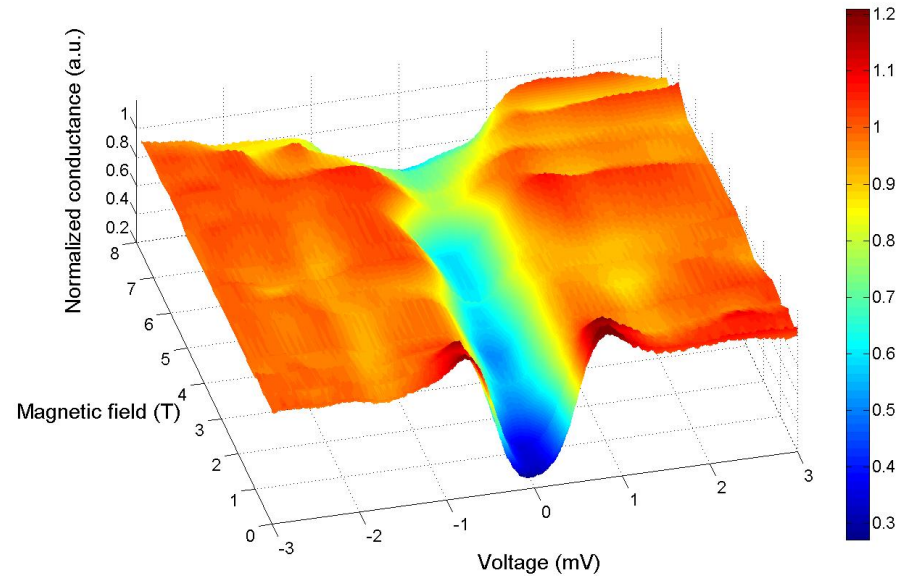
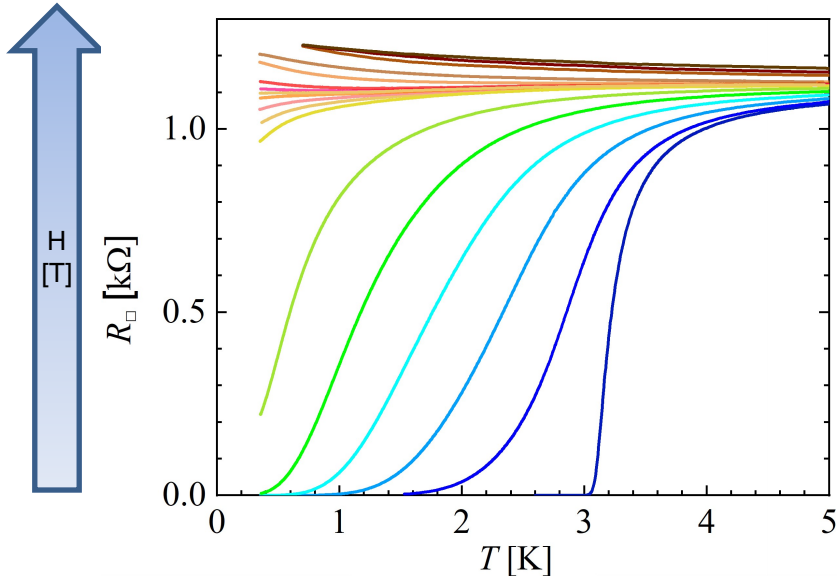
Tenké filmy MoC 3 nm

Poľová závislosť tunelových spektier



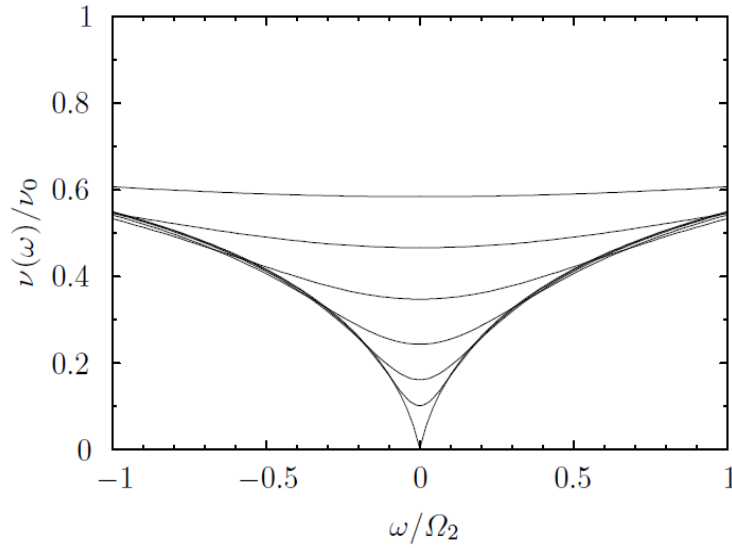
Tenké filmy MoC 3 nm

Poľová závislosť tunelových spektier



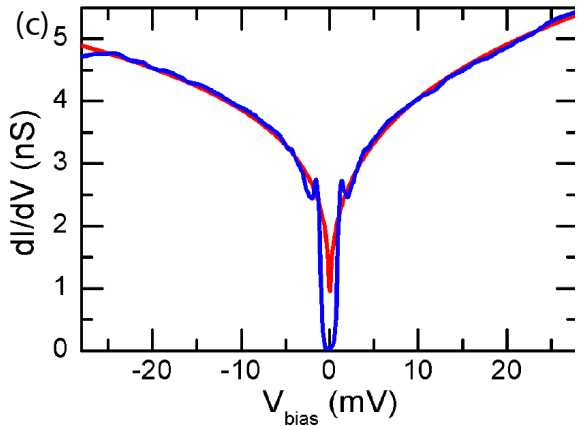
Altshuler-Aronov príspevok?

Altshuler-Aronov jav v hustote stavov

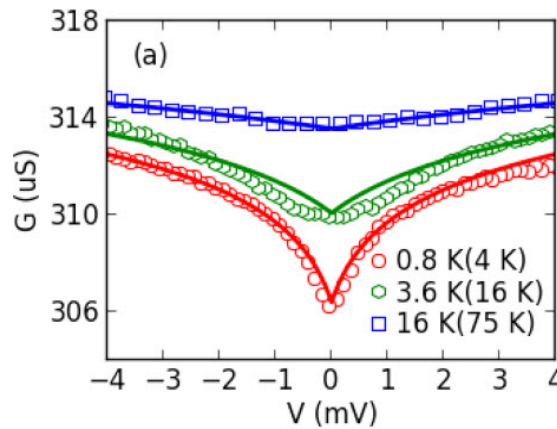


- s nárastom neusporiadanosti a poklesom teploty narastá vplyv elektrón-elektrónovej Coulombovskej interakcie
- hustota stavov v okolí E_F je potlačená pri nízkych teplotách
- logaritmickej príspevok v 2D, odmocninový v 3D

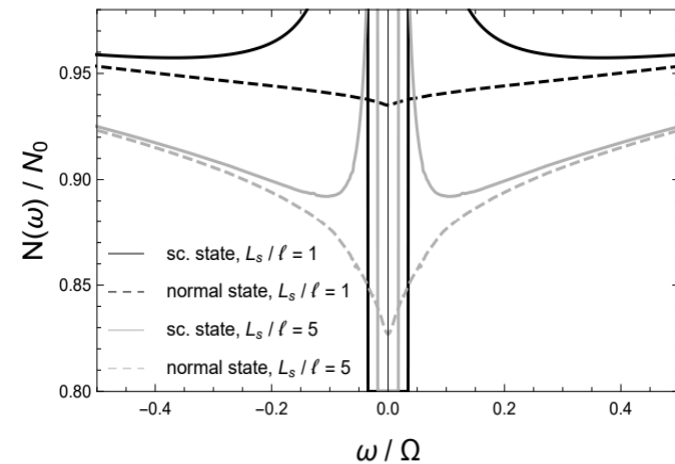
$$\delta N(E, T) \sim \begin{cases} \log(E\tau), & k_B T \ll E \ll \tau^{-1} \\ \log(k_B T \tau), & E \ll k_B T \ll \tau^{-1}, \end{cases}$$



arXiv: 1903.01802



arXiv: 1903.01802

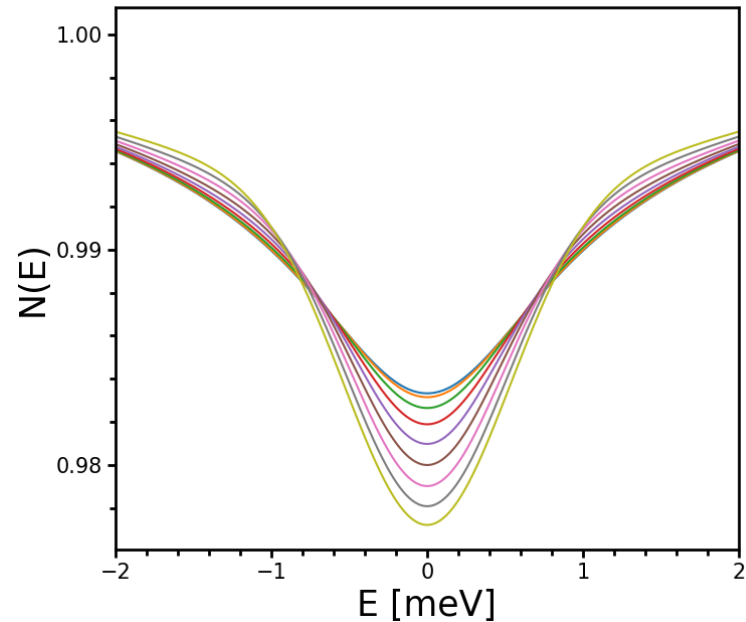
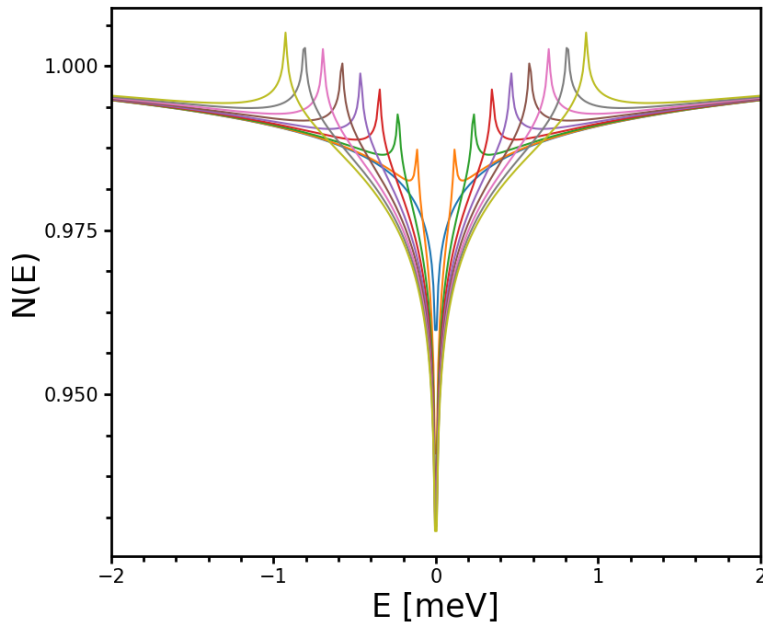


AA príspevok v magnetickom poli

$$\widetilde{\delta N}(E, T, B) = \tilde{\lambda}_0 \left\{ f(\tilde{E}, \tilde{\Gamma}_0) + \frac{\lambda_1}{2\lambda_0} \left[f(\tilde{E}, \tilde{\Gamma}_1) + \frac{1}{2} \sum_{\alpha=\pm 1} f(\tilde{E} + \alpha \tilde{E}_Z, \tilde{\Gamma}_1) \right] \right\}$$

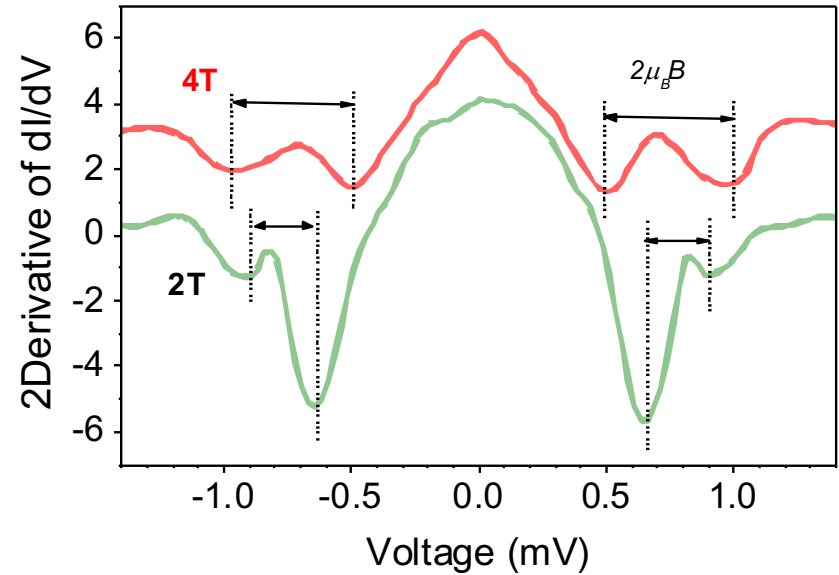
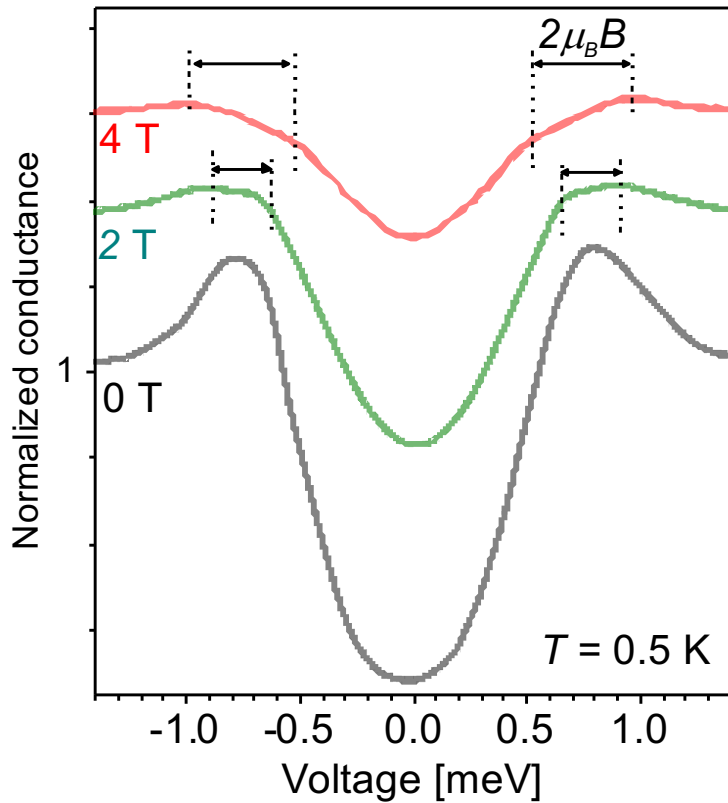
- pri započítaní spinových efektov dôjde k dodatočnému presunu stavov k vyšším energiám v dôsledku Zeemanovského štiepenia

$$f(a, b) = -\frac{1}{2} \int_0^{\Gamma/k_B T} dx \frac{1}{x^2 + b^2} \frac{\sinh(x)}{\cosh(x) + \cosh(a)}$$



Tunelová spektroskopia

Zeemanovské štiepenie koherenčných maxim v supravodivom stave



Tunelová spektroskopia

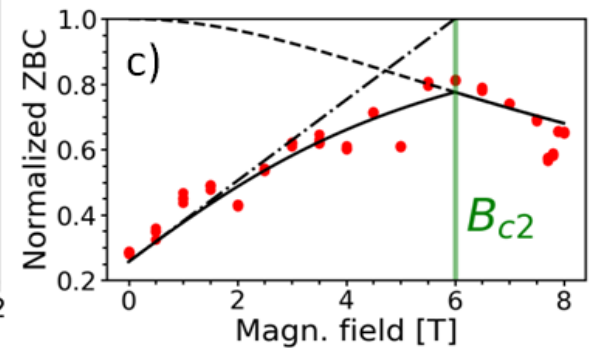
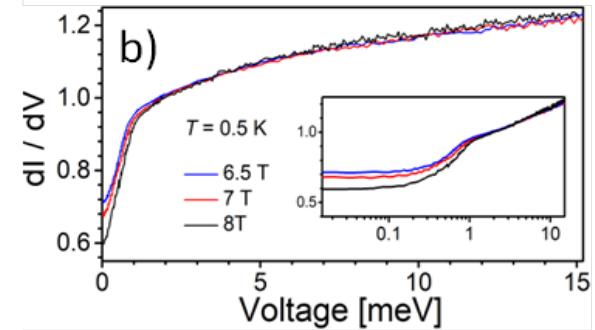
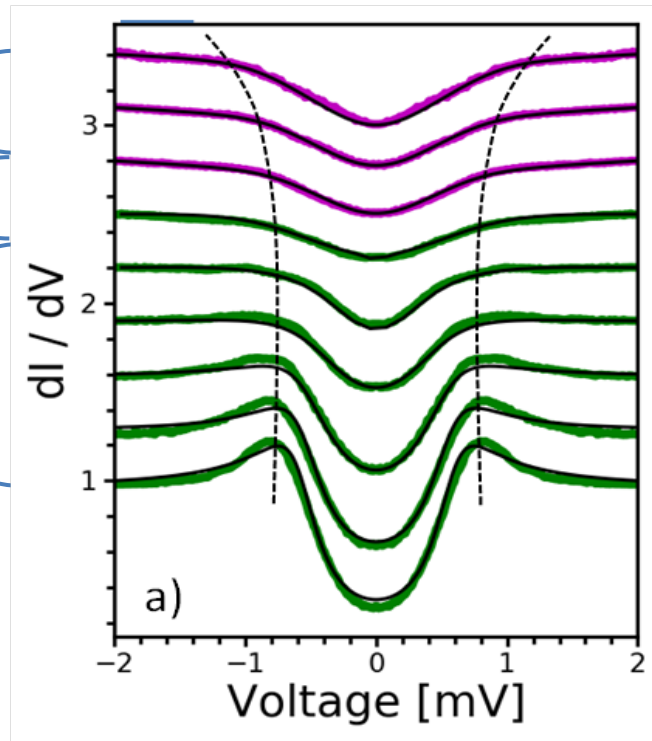
A-A príspevok k hustote stavov so započítaním spinov

$$\widetilde{N}(E, T, B) = \tilde{\lambda}_0 \left\{ f(\tilde{E}, \tilde{\Gamma}_0) + \frac{\lambda_1}{2\lambda_0} \left[f(\tilde{E}, \tilde{\Gamma}_1) + \frac{1}{2} \sum_{\alpha=\pm 1} f(\tilde{E} + \alpha \tilde{E}_Z, \tilde{\Gamma}_1) \right] \right\}$$

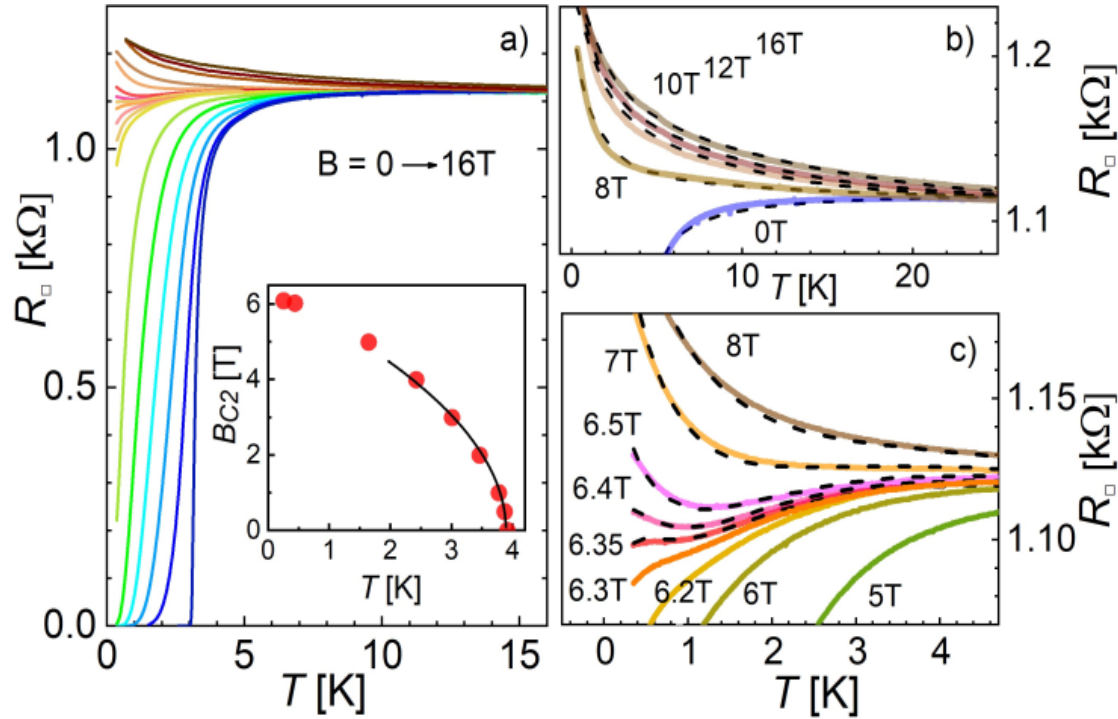
Altshuler-Aronov

BCS + A-A

BCS Dynes



Popis celkovej vodivosti



$$\sigma = \sigma_0 + \delta\sigma_{SF} + \widetilde{\delta\sigma}_{AA}$$

$$\delta\sigma_{SF}(T, H) = \frac{e^2}{2\pi^2\hbar} \left\{ \ln \frac{\ln \frac{k_B T_c}{\Gamma}}{\ln \frac{T_c}{T^*}} + \ln^{-1} \frac{T_c}{T^*} F_2 \left[\frac{\tilde{E}_H}{2\pi}, \frac{\tilde{E}_Z}{\pi}, \frac{\tilde{\Gamma}_S}{\pi} \right] \right\}$$

$$\widetilde{\delta\sigma}_{AA} = \widetilde{\delta\sigma}_{AA}(T) + \widetilde{\delta\sigma}_{AA}(B, T) =$$

$$= \frac{e^2}{4\pi^2\hbar} \left(\lambda_0^\sigma + \frac{3}{2} \lambda_1^\sigma \right) \ln \frac{1}{\tilde{\Gamma}} + \frac{e^2 \lambda_1^\sigma}{4\pi^2\hbar} \int_0^\infty \frac{\partial^2 (E \coth(\tilde{E}))}{\partial E^2} [\ln(\tilde{E} + \tilde{E}_Z) + \ln|\tilde{E} - \tilde{E}_Z| - 2 \ln \tilde{E}] dE$$

Ďakujem za pozornosť