



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA
IM. STANISŁAWA STASZICA
W KRAKOWIE



Nadprzewodnictwo w nanostrukturach metalicznych

Paweł Wójcik

Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej, AGH



Współpraca:

Akademickie Centrum Materiałów i Nanotechnologii

dr Michał Zegrodnik, prof. Józef Spałek

Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej

prof. Janusz Adamowski, dr hab. Bartłomiej Spisak, dr Maciej Wołoszyn

Plan prezentacji:

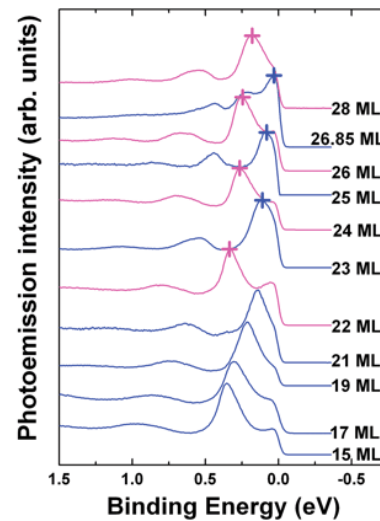
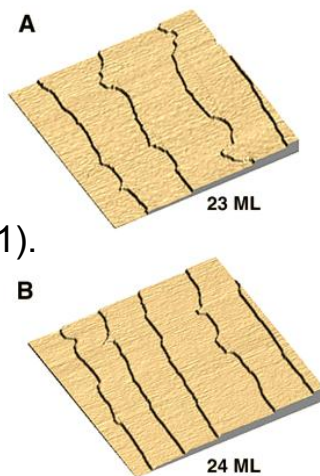
1. Przegląd eksperymentów
2. Model teoretyczny
3. Temperatura krytyczna w cienkich warstwach metalicznych
4. Przejście metal-nadprzewodnik w zewnętrznym polu magnetycznym w cienkich warstwach metalicznych
5. Faza FFLO w nanostrukturach metalicznych
6. Podsumowanie

Pb nanofilms on Si(111) - $\xi_{Pb} = 83 \text{ nm}$, $\lambda_F = 1.06 \text{ nm}$

Y. Guo et al. Science 306, 1915 (2004)

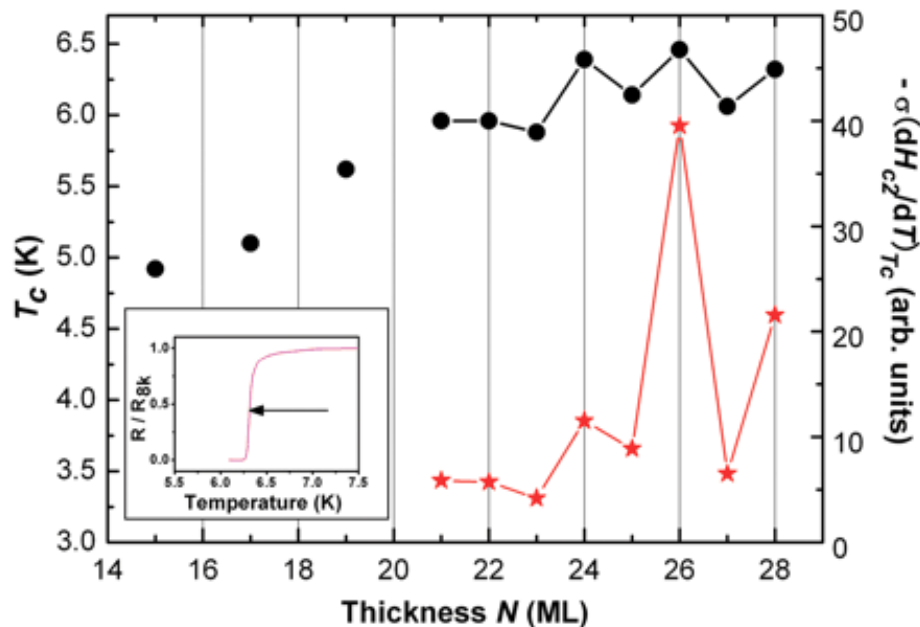
Eksperymenty

Obrazy z STM dla cienkich warstw Pb. Tarasy na obrazach związane są z podłożem Si(111).



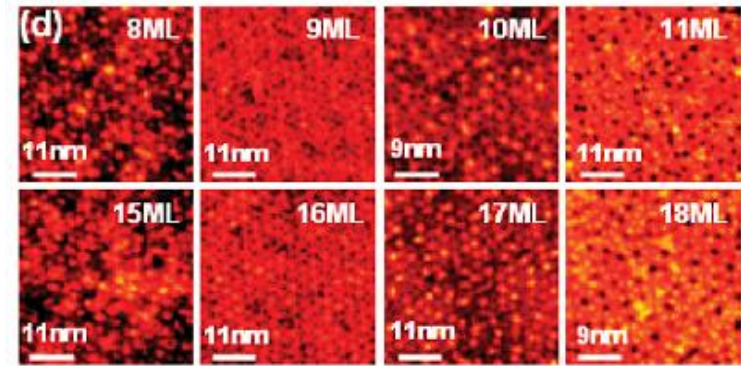
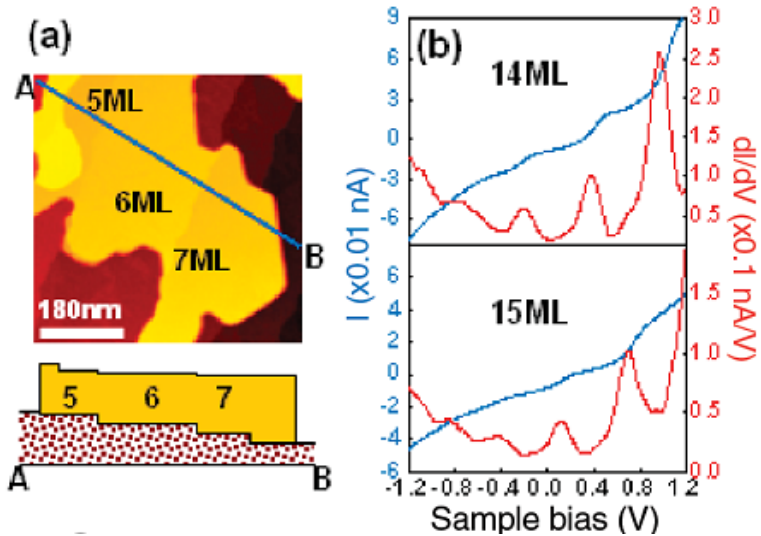
Spektroskopia fotoemisji - najwyżej obsadzony stan elektronowy

Pomiar rezystancji w funkcji temperatury przy zastosowaniu kontaktu z Au.



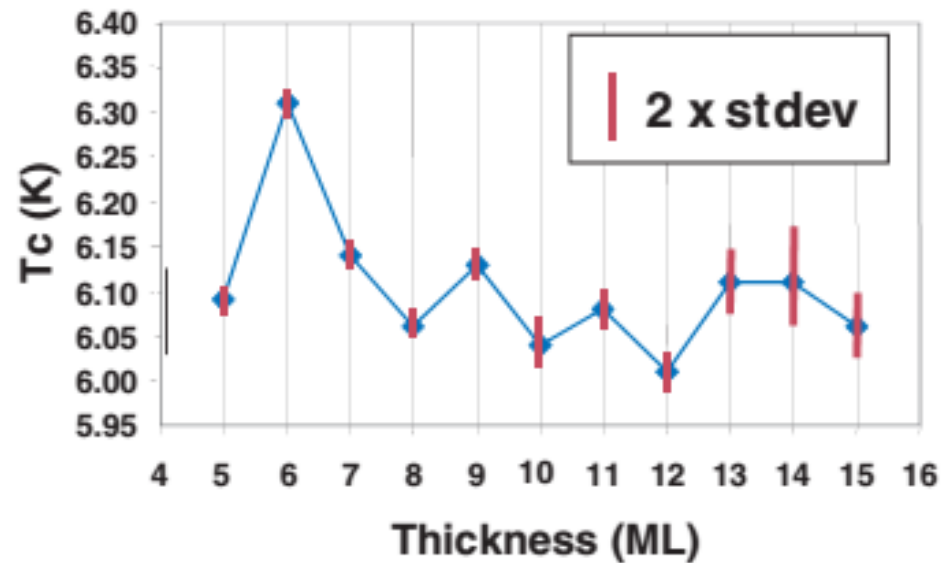
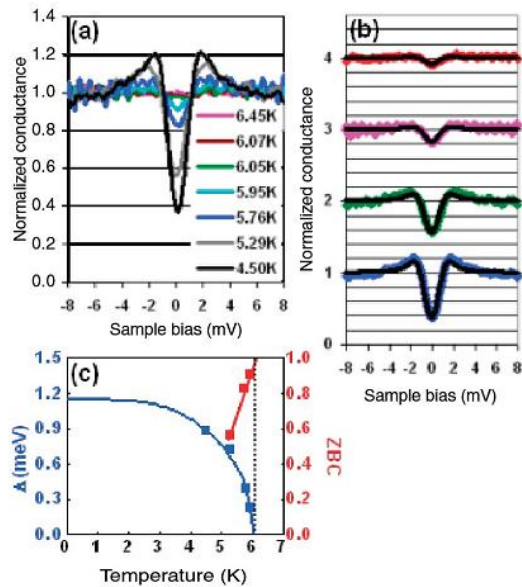
Pb nanofilms on Si(111) - $\xi_{Pb} = 83 \text{ nm}, \lambda_F = 1.06 \text{ nm}$

D. Eom et al. Phys. Rev. Lett. 96, 027005 (2006)



bilayer (even-odd) oscillations

Metoda pomiaru: Scanning tunneling spectroscopy



Temperatura krytyczna w funkcji grubości warstwy Pb.

Hamiltonian BCS

$$\hat{\mathcal{H}} = \sum_{\sigma} \int d^3r \hat{\Psi}^{\dagger}(\mathbf{r}, \sigma) \hat{H}_e^{\sigma} \hat{\Psi}(\mathbf{r}, \sigma) + \int d^3r \left[\Delta(\mathbf{r}) \hat{\Psi}^{\dagger}(\mathbf{r}, \uparrow) \hat{\Psi}^{\dagger}(\mathbf{r}, \downarrow) + H.c. \right] + \int d^3r \frac{|\Delta(\mathbf{r})|^2}{g},$$

gdzie $\Delta(\mathbf{r}) = -g \langle \hat{\Psi}(\mathbf{r}, \downarrow) \hat{\Psi}(\mathbf{r}, \uparrow) \rangle$

$$\hat{\Psi}(\mathbf{r}, \sigma) = \sum_{\mathbf{kn}} \phi_{\mathbf{kn}}(\mathbf{r}) \hat{c}_{\mathbf{kn}\sigma}, \quad \hat{\Psi}^{\dagger}(\mathbf{r}, \sigma) = \sum_{\mathbf{kn}} \phi_{\mathbf{kn}}^*(\mathbf{r}) \hat{c}_{\mathbf{kn}\sigma}^{\dagger},$$

samouzgodnione równanie na Δ_n

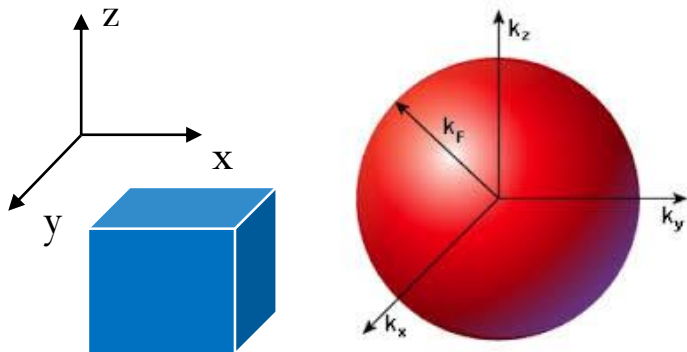
$$\Delta_n = \frac{g}{4\pi^2} \sum_{n'} C_{knn'} \frac{\Delta_{n'}}{2\sqrt{\xi_{n'}^2 + \Delta_{n'}^2}} \left(1 - f(\epsilon_{n'}^+) - f(\epsilon_{n'}^-) \right)$$

$$C_{kn'n} = \int d^3r \phi_{\mathbf{kn}}(\mathbf{r}) \phi_{\mathbf{kn}}^*(\mathbf{r}) \phi_{\mathbf{kn}'}(\mathbf{r}) \phi_{\mathbf{kn}'}^*(\mathbf{r})$$

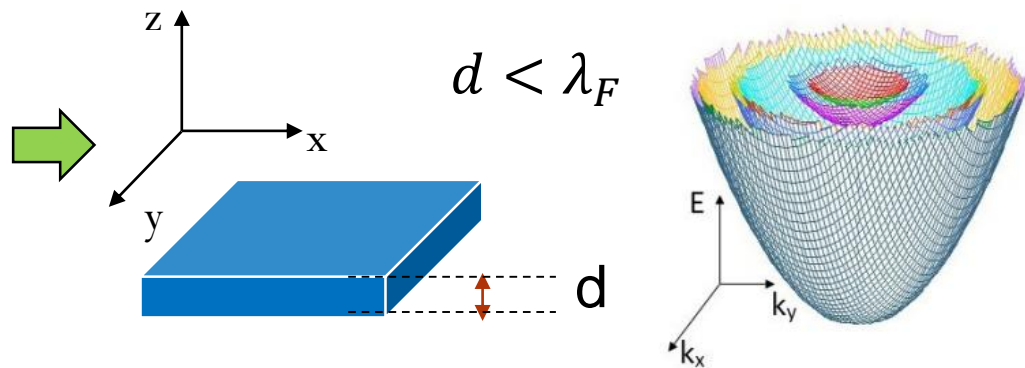
Koncentracja elektronowa

$$n_e = \frac{1}{\Omega} \sum_{\mathbf{kn}} \int d\Omega \{ |u_{\mathbf{kn}}(\mathbf{r})|^2 f(E_{\mathbf{kn}}) + |v_{\mathbf{kn}}(\mathbf{r})|^2 (1 - f(E_{\mathbf{kn}})) \}$$

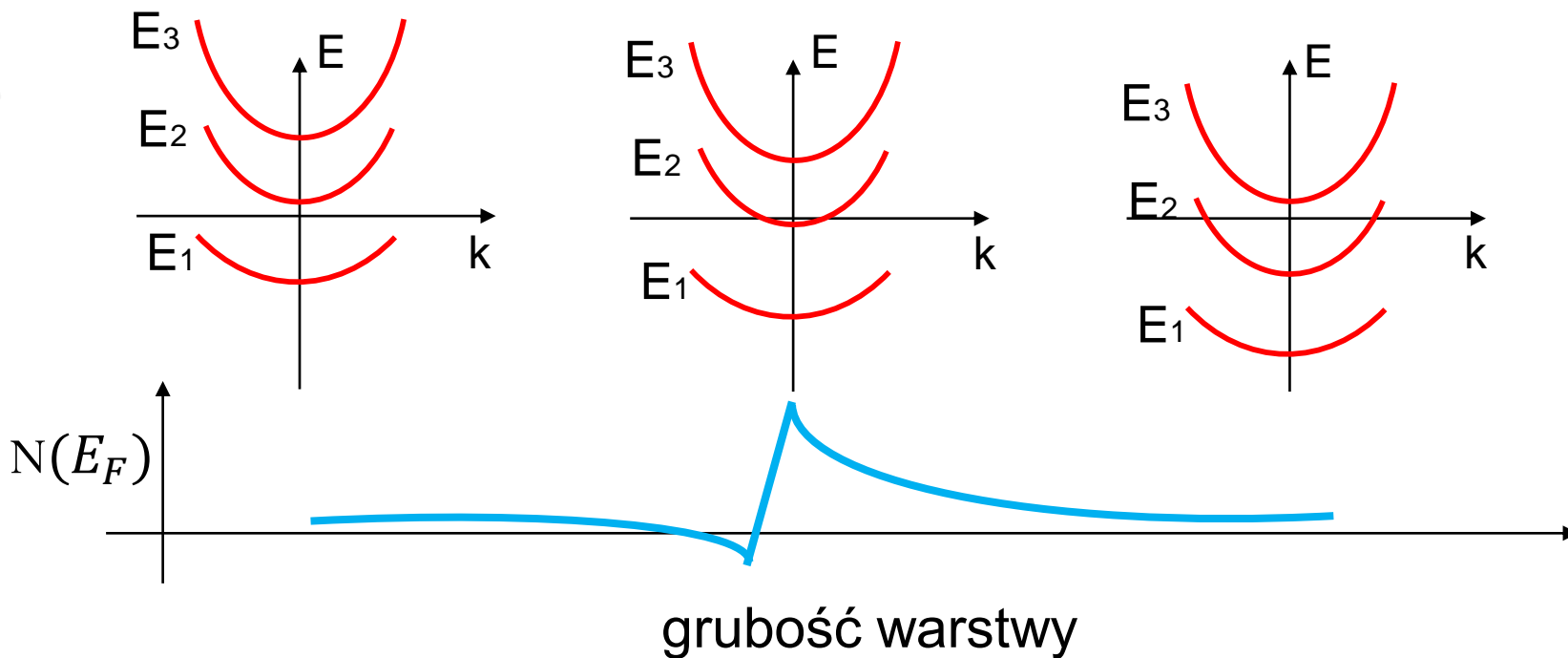
Gaz elektronów swobodnych
 $L_x, L_y, L_z \rightarrow \infty$



Cienka warstwa metaliczna

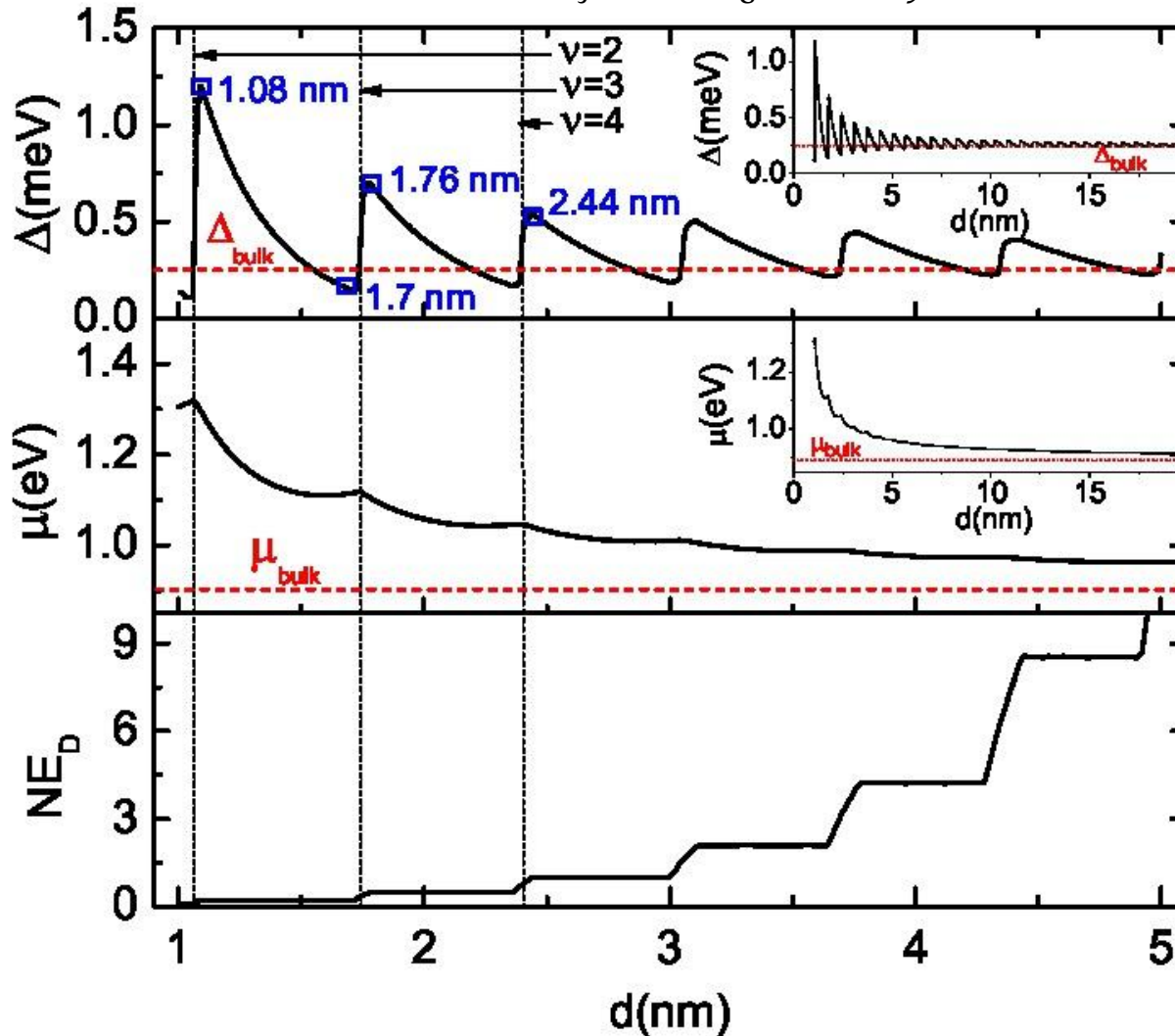


Przybliżenie pasm parabolicznych



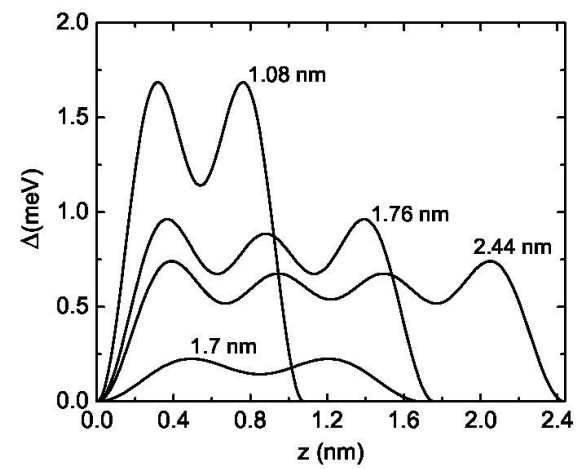
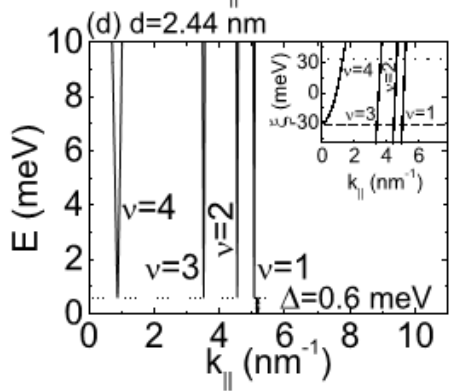
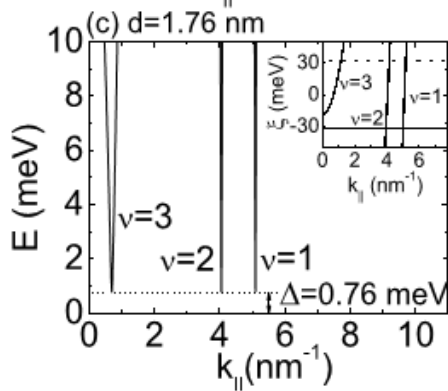
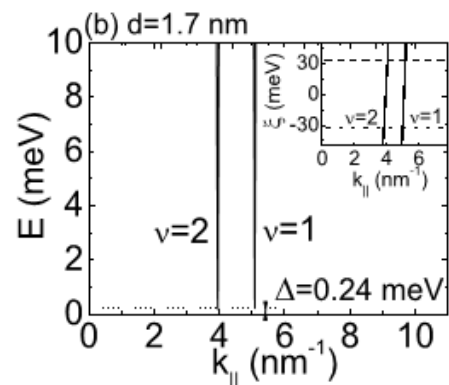
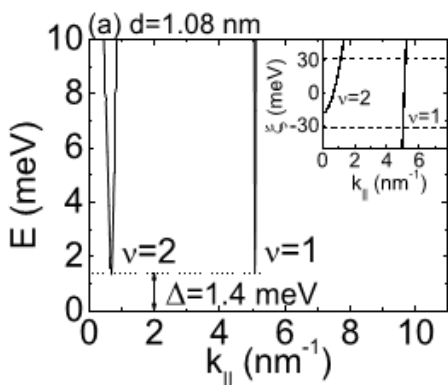
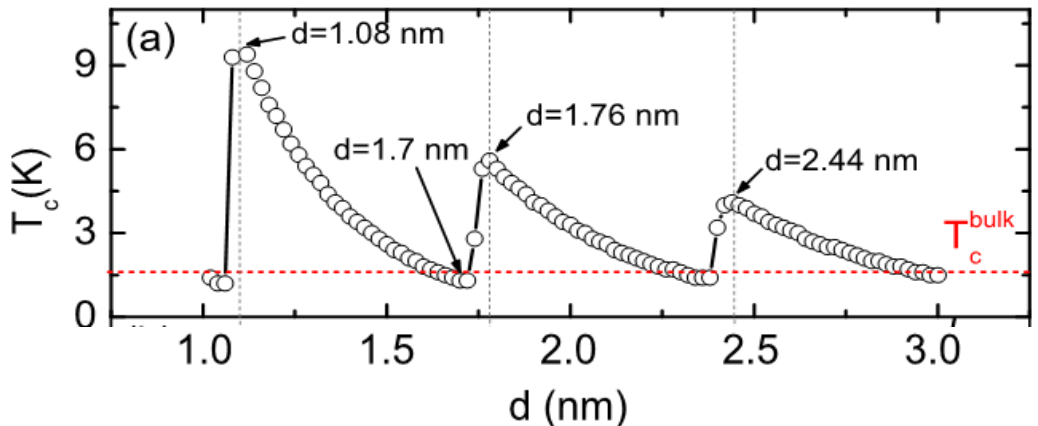
Cienka warstwa Al

P. Wójcik, M. Zegrodnik, *Phys. Stat. Solidi. b* (2014), 251, 106



Przerwa nadprzewodząca, potencjał chemiczny oraz gęstość stanów poniżej energii Fermiego w funkcji grubości nanowarstwy

Temperatura krytyczna w funkcji grubości warstwy

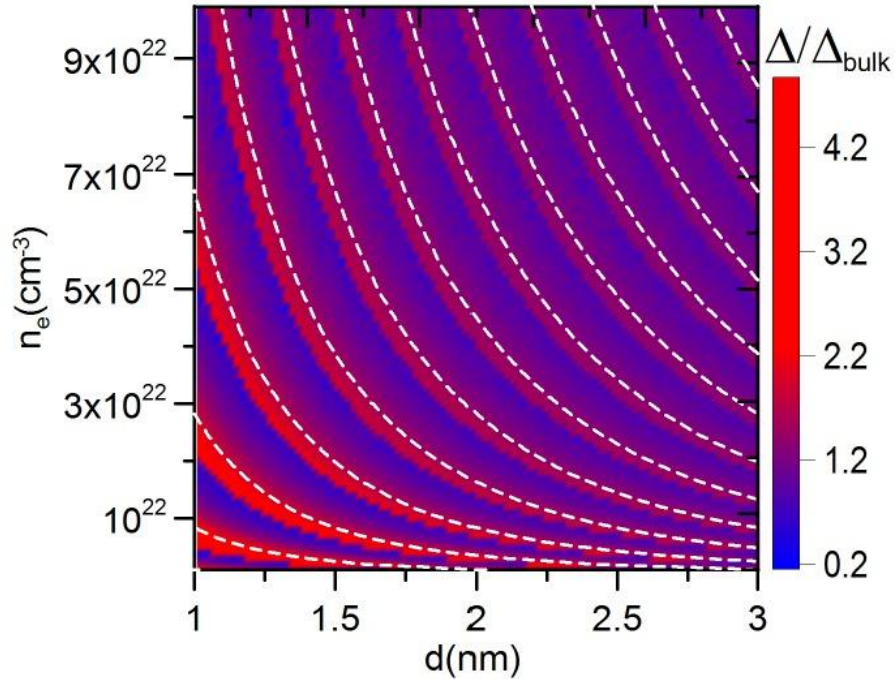


Zależna od położenia przerwa nadprzewodząca dla wybranych grubości nanowarstw

Relacje dyspersji dla poszczególnych podpasem

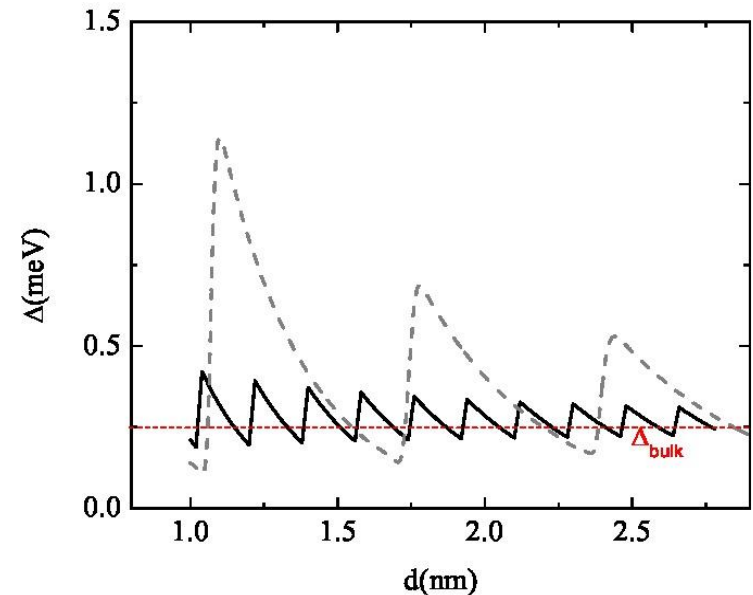
Wyniki - Δ , T_c

Przerwa nadprzewodząca funkcji grubości nanowarstwy i koncentracji elektronowej



$$d_v = \frac{\hbar^2 \pi^2 v^2}{\sqrt[3]{3\pi^2 n_e}}$$

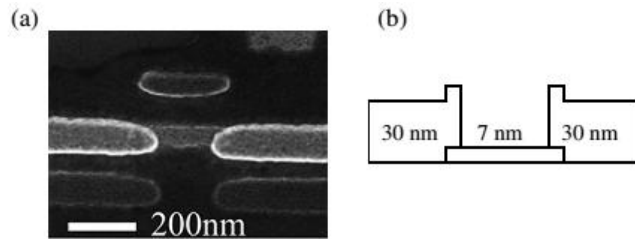
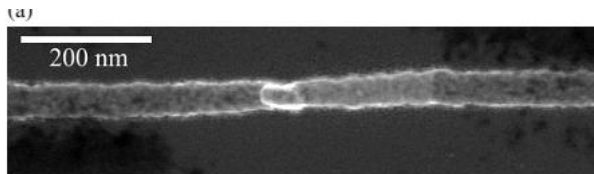
$$\Delta d = \frac{\hbar^2 \pi^2}{\sqrt[3]{3\pi^2 n_e}}$$



Amplituda i okres oscylacji silnie zależy od koncentracji elektronowej (energii Fermiego)

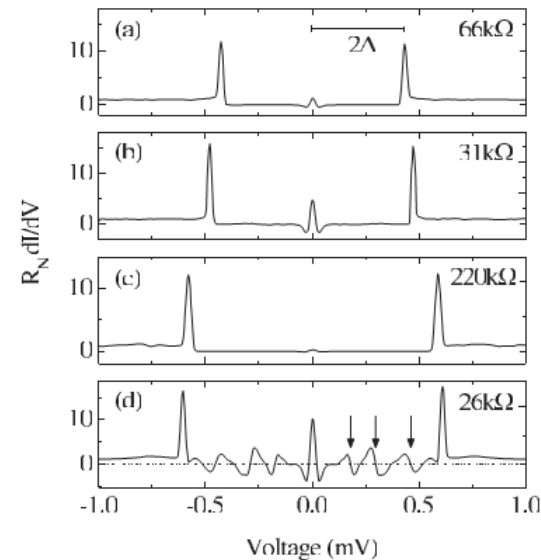
Energy gap measurement of nanostructured aluminium thin films for single Cooper-pair devices

N A Court, A J Ferguson¹ and R G Clark

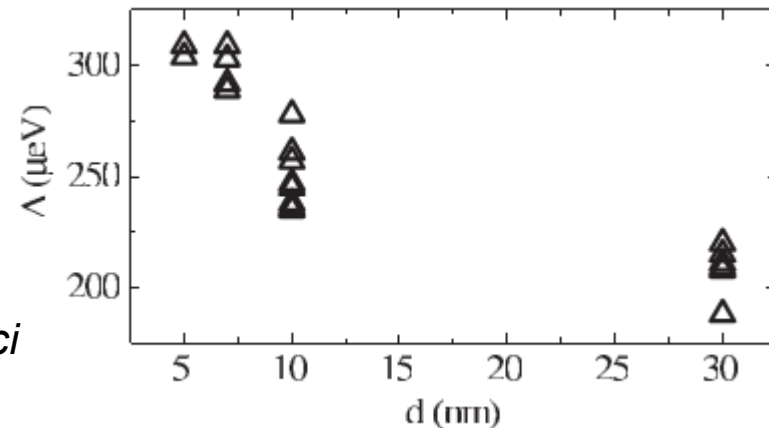


Obrazy z SEM złącza Al-Al₂O₃-Al

Przerwa nadprzewodząca dla grubości nanowarstw Al. $D=5, 7, 10, 30$ nm



Znormalizowana
konduktancja
różniczkowa



Porównanie z eksperymentem

P. Wójcik, M. Zegrodnik, *Phys. Stat. Solidi. b* (2014), 251, 106

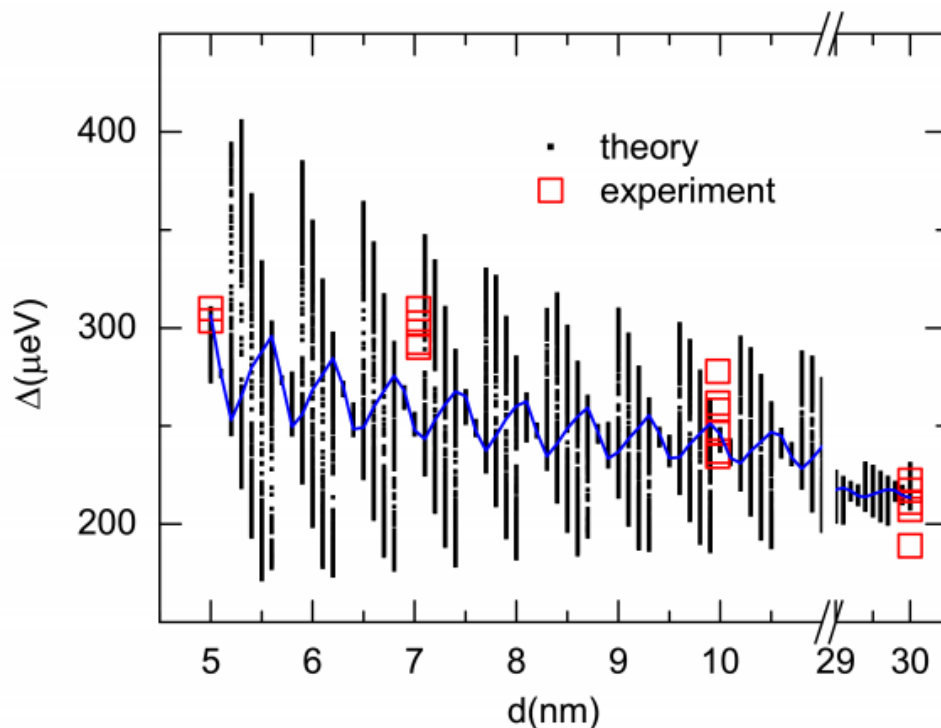
Niejednorodności powierzchni



$$\xi_{k_x k_y \nu}^{surf} = \xi_{k_x k_y \nu} + \epsilon_{k_x k_y \nu} \left| \frac{\partial \xi_{k_x k_y \nu}}{\partial d} \right| \delta d$$

Liczba losowa [-1,1]

zakładamy 1 ML



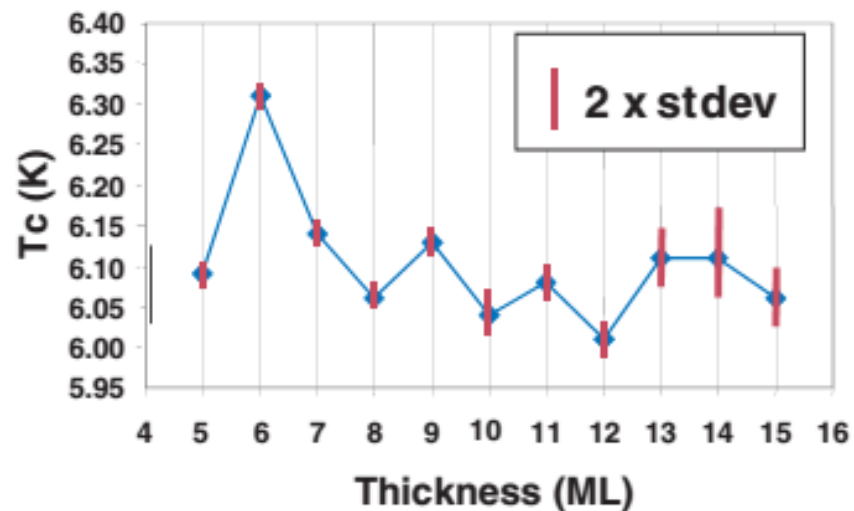
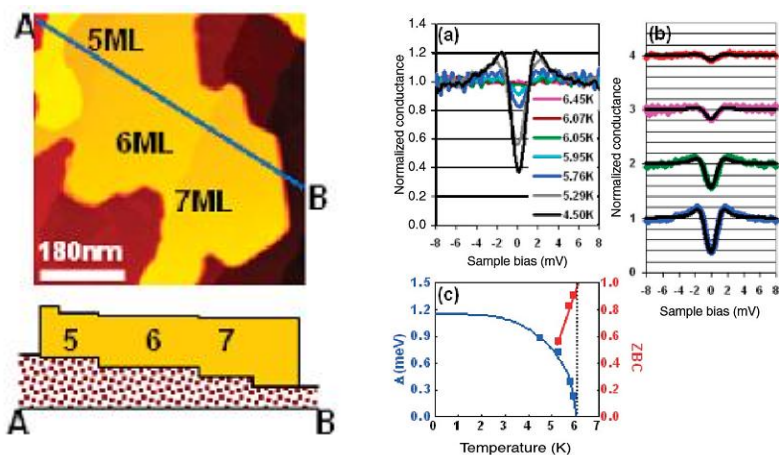
Przerwa nadprzewodząca w funkcji grubości nanowarstw Al. Porównanie z eksperymentem.

Persistent Superconductivity in Ultrathin Pb Films: A Scanning Tunneling Spectroscopy Study

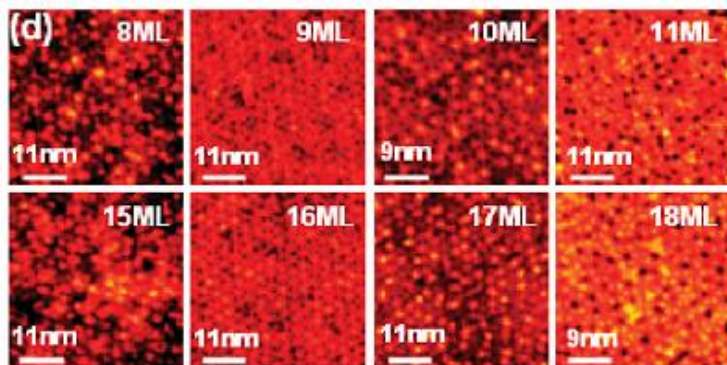
Daejin Eom,¹ S. Qin,¹ M.-Y. Chou,² and C. K. Shih¹

¹Department of Physics and Center for Nano and Molecular Science and Technology, The University of Texas at Austin, Austin, Texas 78712, USA

²School of Physics, Georgia Institute of Technology, Atlanta, Georgia 30332, USA
(Received 21 May 2005; published 18 January 2006)



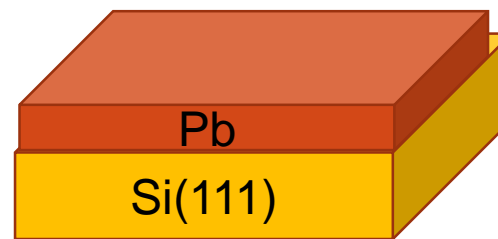
Temperatura krytyczna w funkcji grubości warstwy Pb.



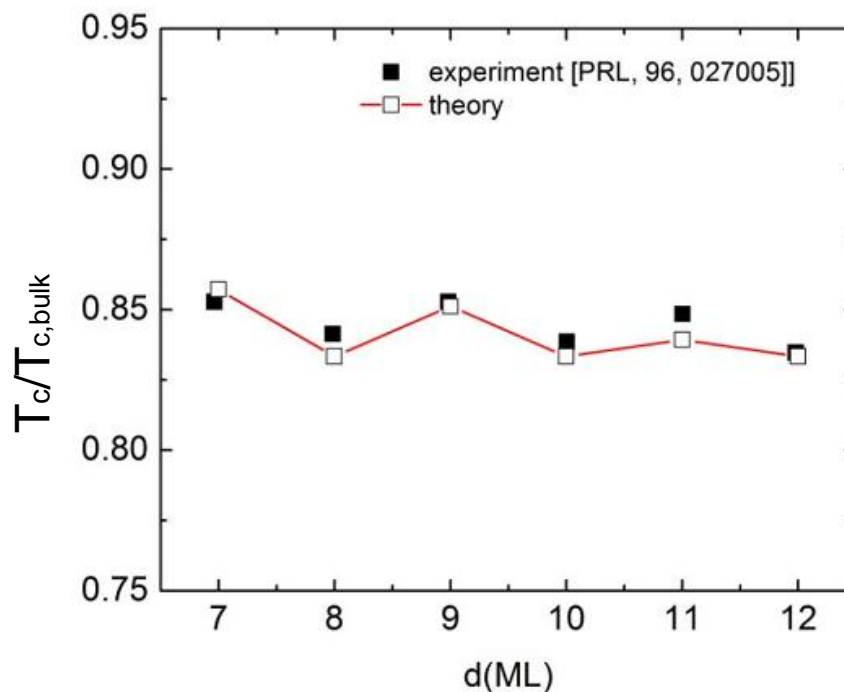
Porównanie z eksperymentem

Uwzględnienie wpływu złącza Si/Pb

Y. Chen et al. Phys. Rev. B 85, 224517 (2012)

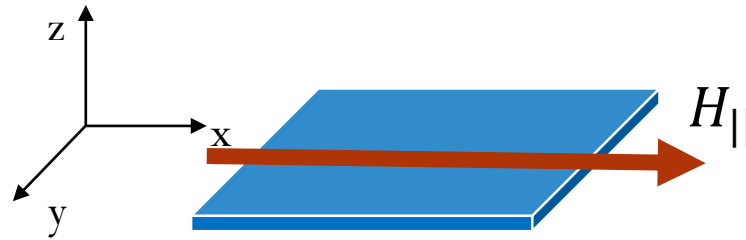


$$g(z) = \begin{cases} g_{if} & 0 < z < d_{if} \\ g_0 & d_{if} < z < d \end{cases}, \quad \rightarrow \quad \bar{g} = g_0 - \frac{g_1 \left(\frac{4\pi a N}{\lambda_F} \right)}{N},$$



Przerwa nadprzewodząca w funkcji grubości nanowarstw Pb. Porównanie z eksperymentem.

Przejście metal nadprzewodnik indukowane polem magnetycznym

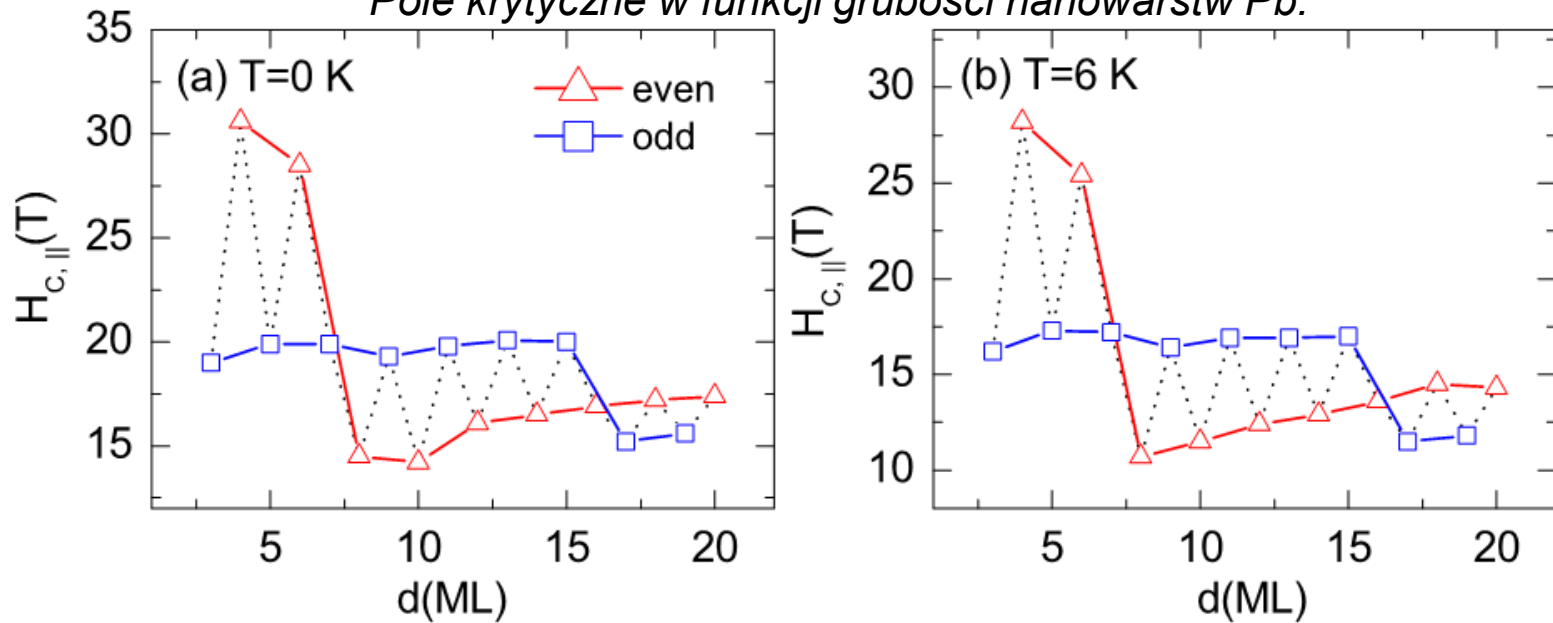


Pole krytyczne dla cienkich warstw Pb – przybliżenie paramagnetyczne

P. Wójcik, M. Zegrodnik, Journal of Physics: Condensed Matter 2014, 26, 455302

P. Wójcik, M. Zegrodnik, Physica Status Solidi b, 2015, DOI: 10.1002/pssb.201552067

Pole krytyczne w funkcji grubości nanowarstw Pb.



- even-odd (bilayer) oscillations
- beating effect

Pole krytyczne dla cienkich warstw Pb – przybliżenie paramagnetyczne

P. Wójcik, M. Zegrodnik, *Journal of Physics: Condensed Matter* 2014, 26, 455302

Formuła Clogstona - Chandrasekhar

$$H_{c,||} = \frac{\Delta_{bulk}}{2\mu_B}$$

$$\Delta_{bulk} = 1.4 \text{ meV}$$
$$H_{c,||} = 13.4 \text{ T}$$

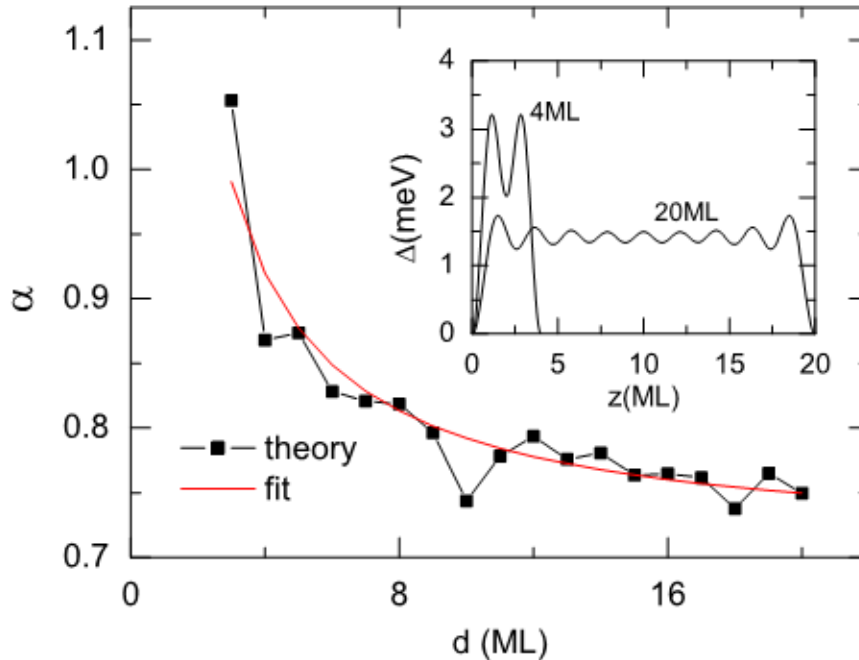


$$H_{c,||} = \frac{\Delta(d)}{\mu_B}$$



$$H_{c,||} = \alpha(d) \frac{\Delta(d)}{\mu_B}$$

$$d = 6 \text{ ML}$$
$$H_{c,||} = 24.5 \text{ T} \quad (28.5 \text{ T})$$

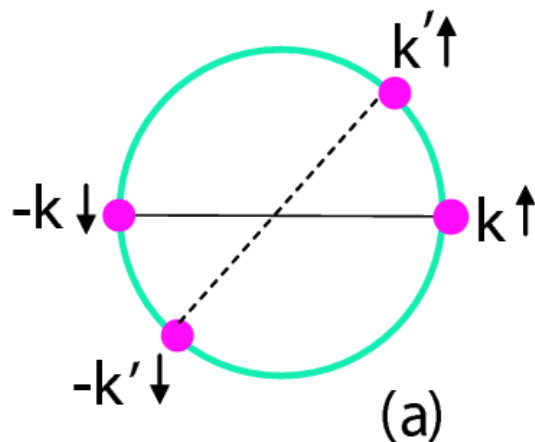


Współczynnik α w funkcji grubości nanowarstw Pb.

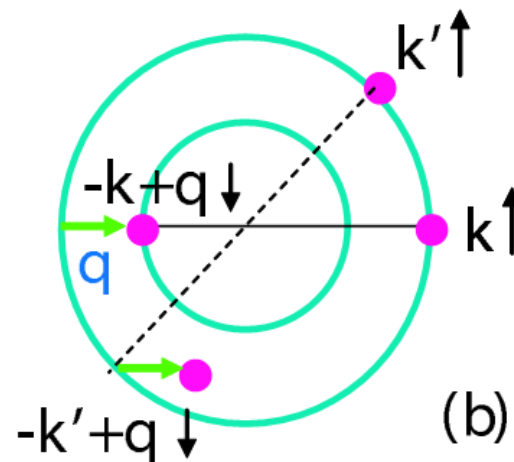
Przejście NM/SC

Fulde-Ferrel-Larkin-Ovchinnikov state

BCS - parowanie ($k\uparrow, -k\downarrow$)



FFLO - parowanie ($k\uparrow, -k+q\downarrow$)



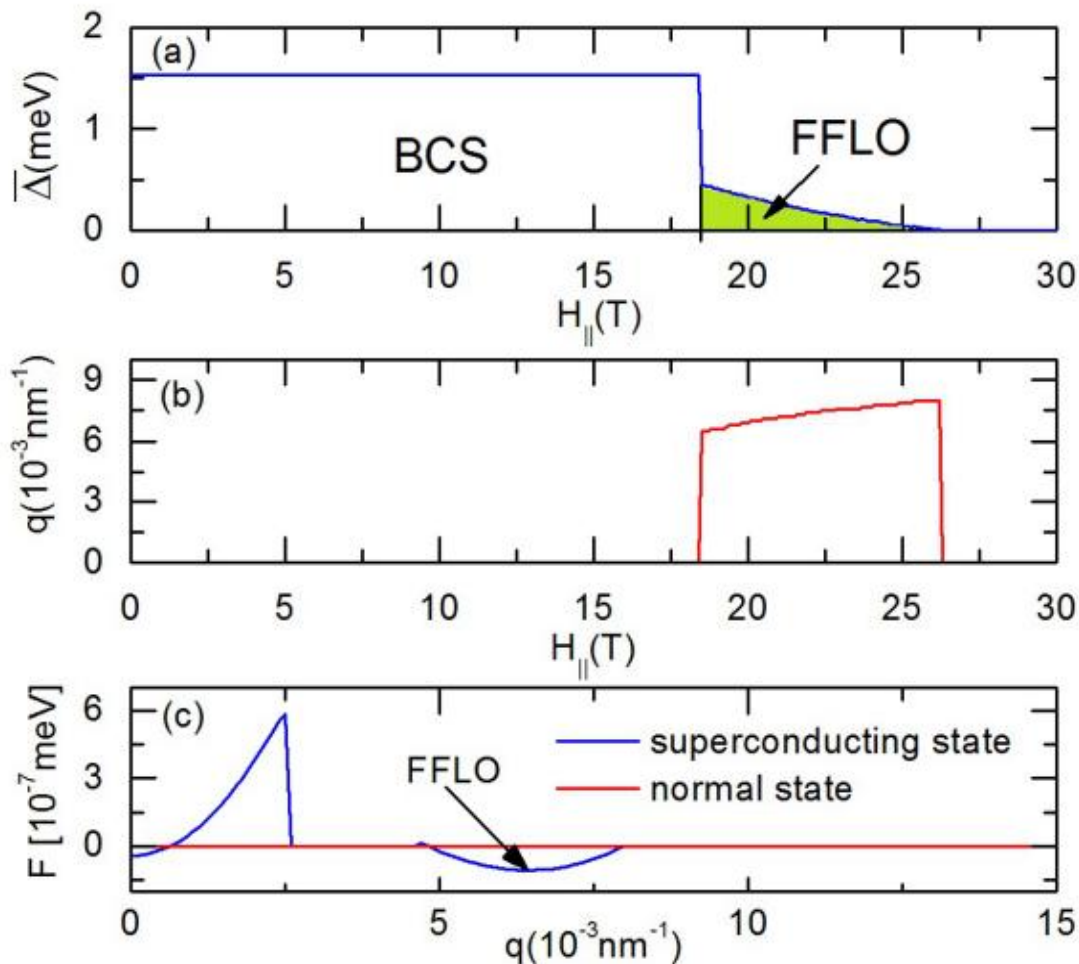
Warunki stabilności fazy FFLO

1. układy ultra-czyste
2. pomijalny efekt orbitalny

- nadprzewodniki ciężkofermionowe
- nadprzewodniki organiczne 2D
- **cienkie ultra-czyste warstwy metaliczne ?**

Faza FFLO w cienkich warstwach Pb

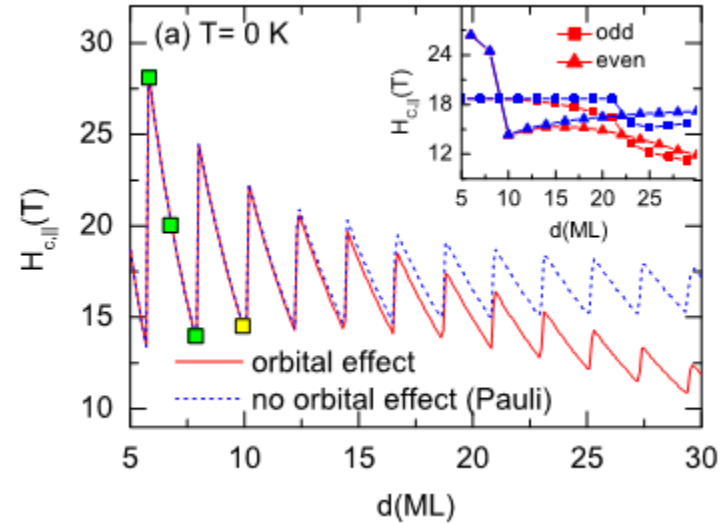
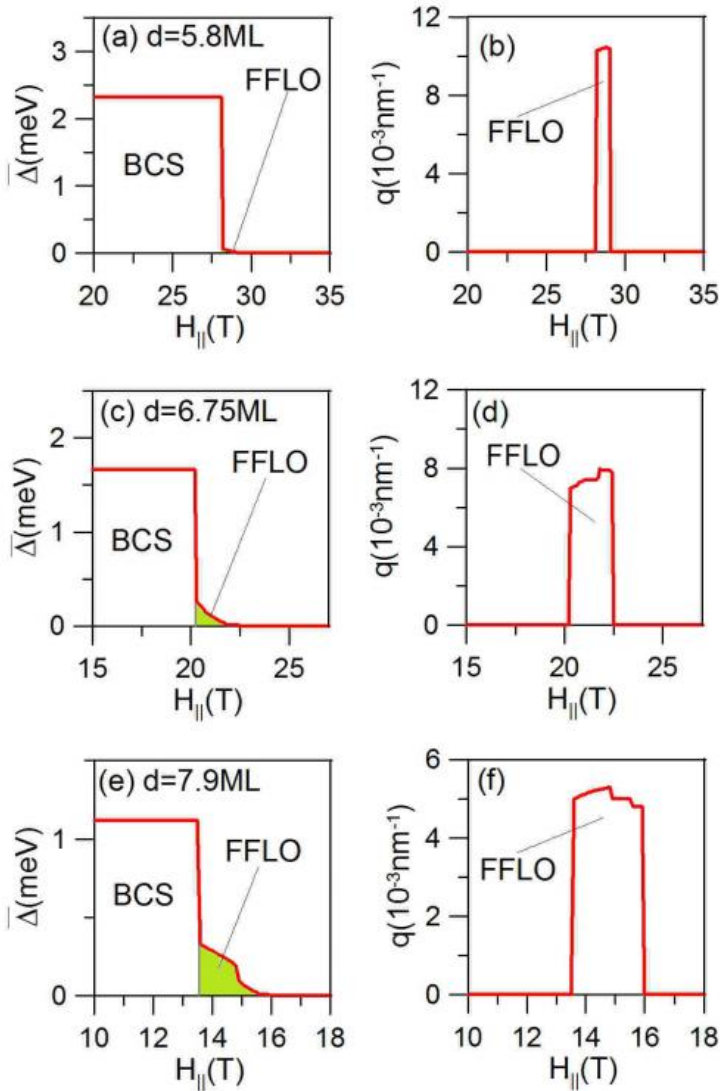
P. Wójcik, M.Zegrodnik, [arxiv:1410.4327](https://arxiv.org/abs/1410.4327)



(a) Przerwa nadprzewodząca w funkcji pola magnetycznego. Kolorem zielonym zaznaczono obszar stabilności fazy FFLO, (b) całkowity moment pędu par Coopera w funkcji pola magnetycznego, (c) Energia swobodna stanu normalnego oraz nadprzewodzącego w funkcji wektora q . Warstwa Pb o grubości $d=3ML$

Faza FFLO w cienkich warstwach Pb

P. Wójcik, M.Zegrodnik, [arxiv:1410.4327](https://arxiv.org/abs/1410.4327)



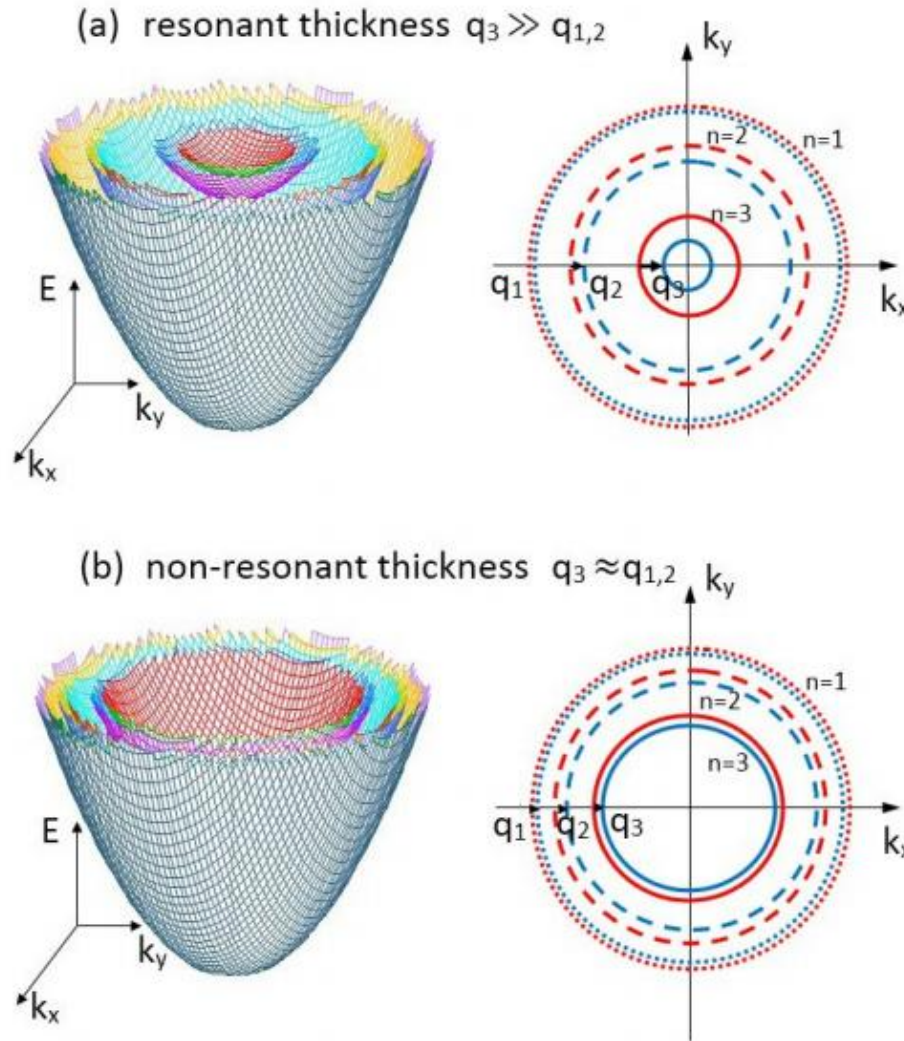
1. Warunki „rezonansu” są niszczące dla fazy FFLO
2. Obszar stabilności fazy FFLO oscyluje w antyfazie do oscylacji pola krytycznego

Przerwa nadprzewodząca w funkcji pola magnetycznego dla kilku różnych grubości warstw Pb. Kolorem zielonym zaznaczono obszar stabilności fazy FFLO

Faza FFLO w cienkich warstwach Pb

P. Wójcik, M.Zegrodnik, [arxiv:1410.4327](https://arxiv.org/abs/1410.4327)

FFLO



W układzie może pojawić się jeden wektor \mathbf{q} który jest pewną przypadkową niedopasowania z wszystkich podpasem

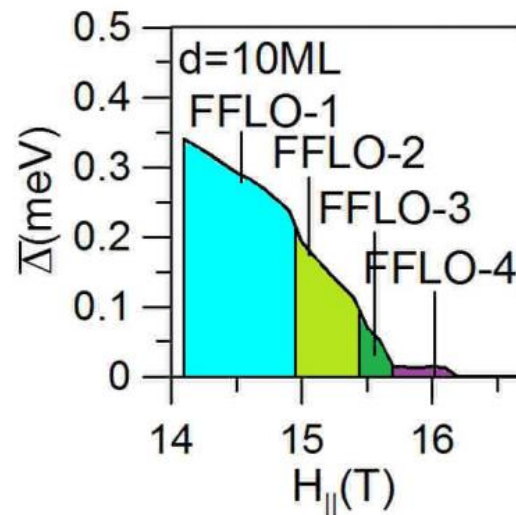
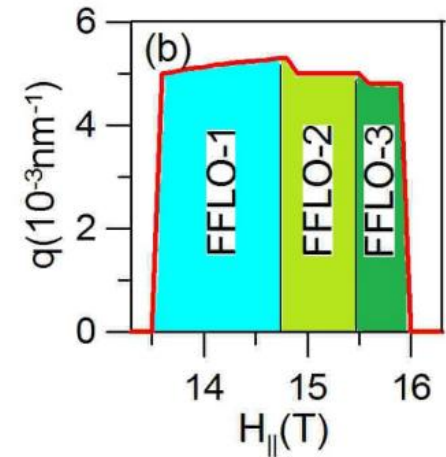
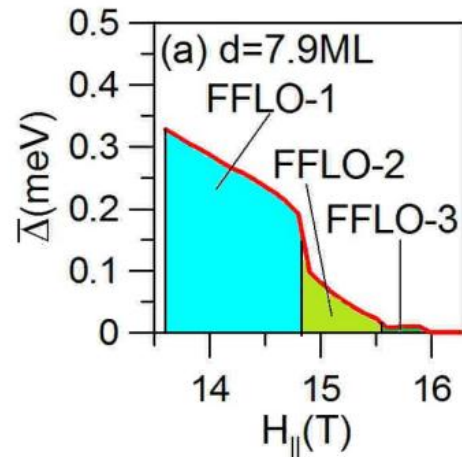
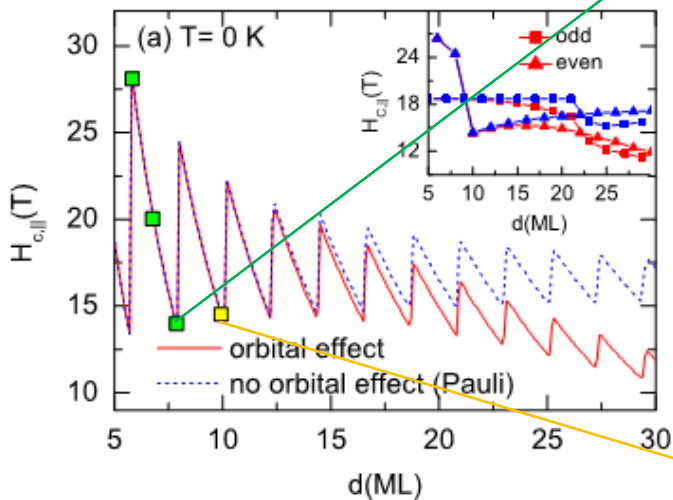
Schematyczny rysunek przedstawiający wyjaśniający niszczący wpływ warunków rezonansu na fazę FFLO

Faza FFLO w cienkich warstwach Pb

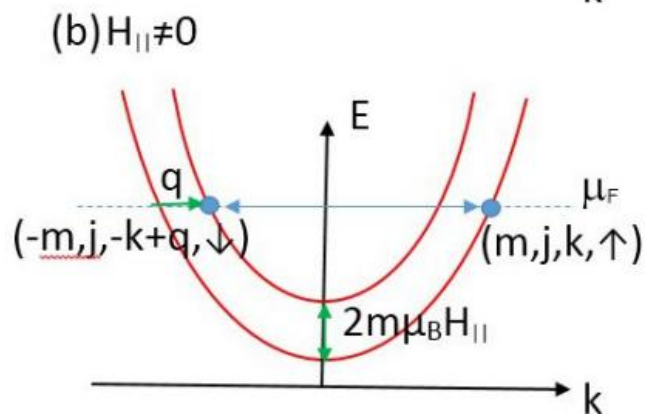
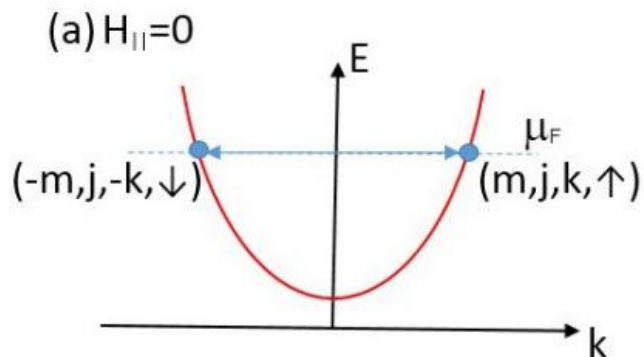
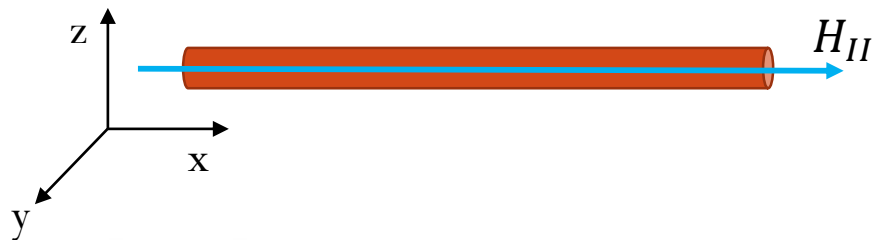
P. Wójcik, M. Zegrodnik, [arxiv:1410.4327](https://arxiv.org/abs/1410.4327)

- 1) Powstają podobszary o różnym wektorze q
- 2) Liczba podobszarów stabilności fazy FFLO odpowiada liczbie pasm uczestniczących w parowaniu

FFLO



Faza FFLO w nanodrutach



Schematyczny rysunek parowania indukowanego efektem orbitalnym

Energia stanów jednoelektronowych

$$\xi_{k,m,j} = \frac{\hbar^2 \gamma_{m,j}^2}{2m_e R^2} + \frac{\hbar^2 k^2}{2m_e} + m\mu_B H_{||} - \mu_F,$$

oraz ich funkcja falowa

$$\phi_{kmj}(r, \varphi, z) = \frac{1}{2\pi} \tilde{J}_{mj}(r) e^{im\varphi} e^{ikz},$$

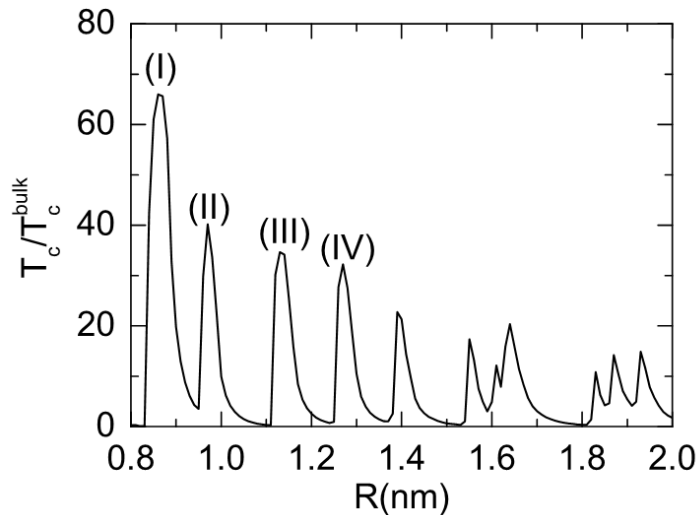
$$\tilde{J}_{mj}(r) = \frac{\sqrt{2}}{R J_{m+1}(\gamma_{m,j})} J_m\left(\frac{\gamma_{m,j}}{R} r\right),$$

Parowanie FFLO indukowane efektem orbitalnym

Faza FFLO w nanodrutach

P. Wójcik, M.Zegrodnik, J. Spątek, PRB (2015)

Poszczególne spadki na wykresie $\Delta(H_{II})$ związane są z deparowaniem w poszczególnych podpasmach



Temperatura krytyczna w funkcji promienia nanodrutu

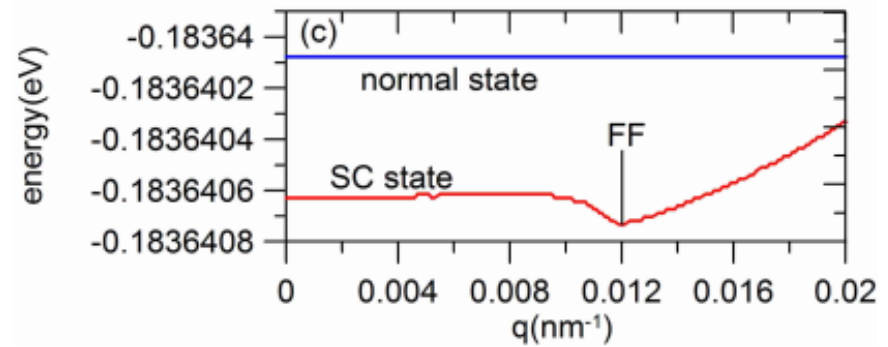
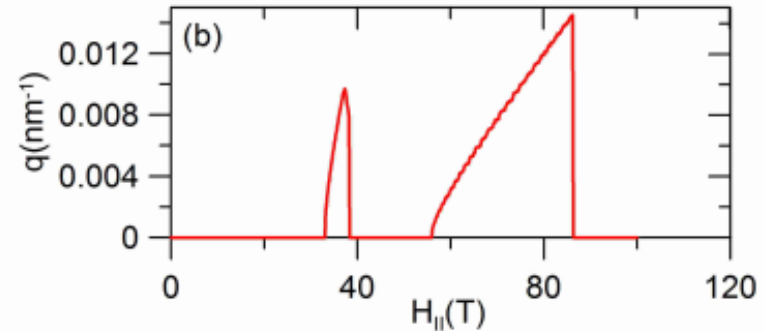
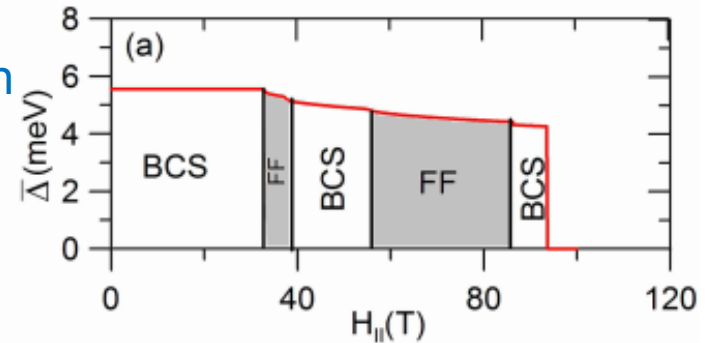
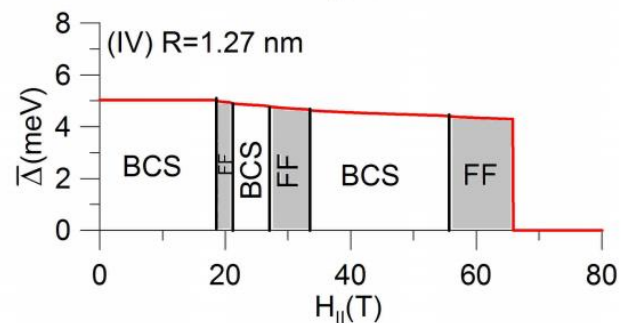
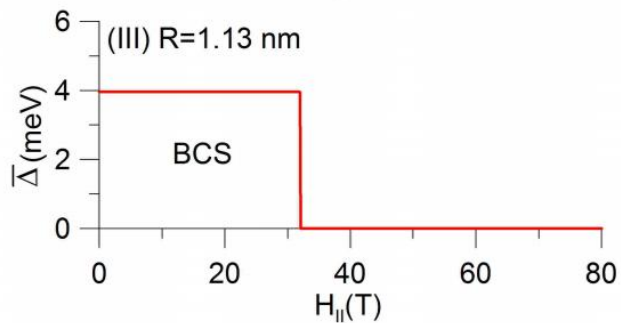
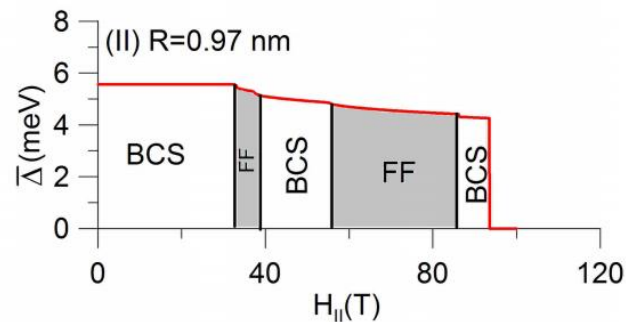
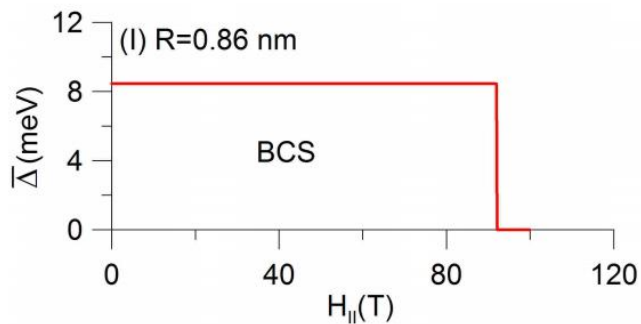
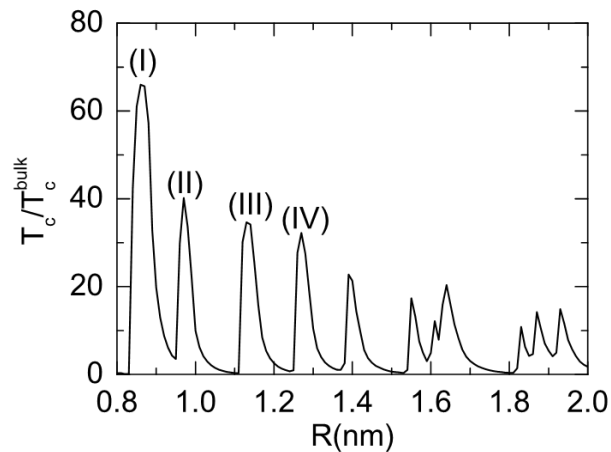


Diagram fazowy w funkcji pola magnetycznego

FFLO

Faza FFLO w nanodrutach

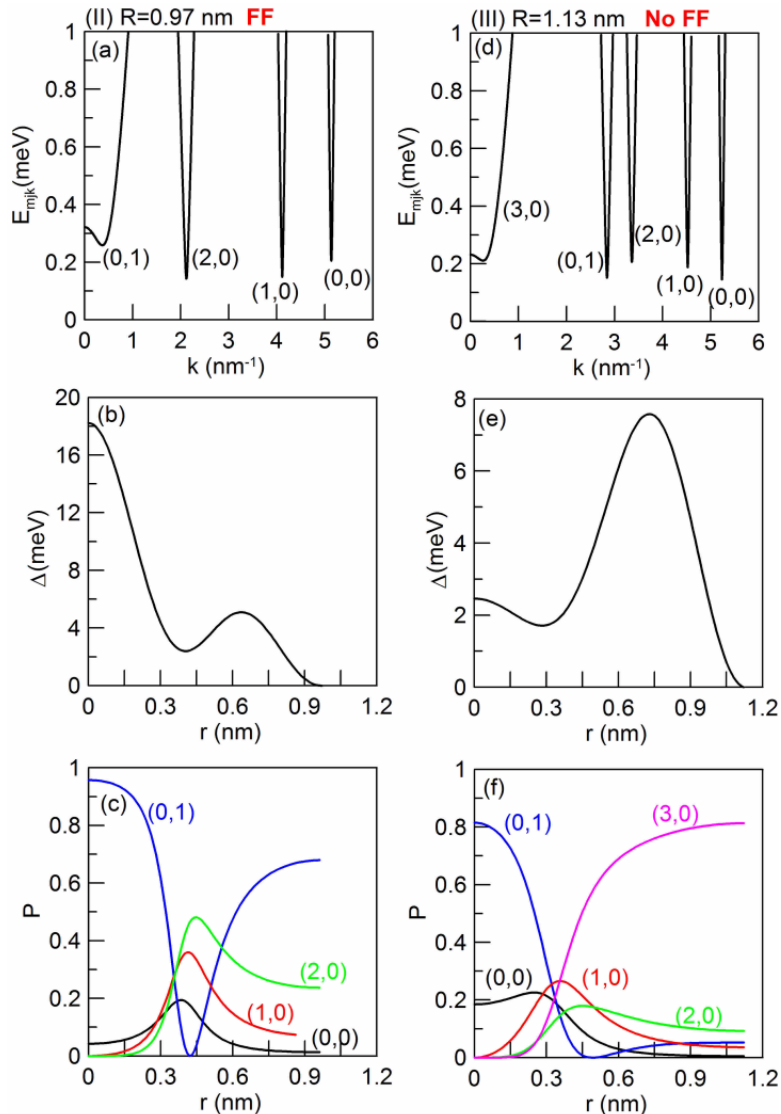
P. Wójcik, M.Zegrodnik, J. Spalek, PRB (2015)



Diagramy fazowe dla nanodrutów o kilku różnych promieniach

Faza FFLO w nanodrutach

P. Wójcik, M. Zegrodnik, J. Spątek, PRB (2015)



Warunek powstania fazy FFLO :
Stan rezonansowy nie może mieć największej orbitalnej liczby kwantowej $|m|$ spośród pasm uczestniczących w parowaniu.

Relacje dyspersji, przerwa nadprzewodząca w funkcji położenia, oraz wkład poszczególnych pasm w (m, j) w przerwę nadprzewodzącą. Wyniki zaprezentowane dla dwóch promieni nanodrutu: w którym powstaje faza FF (lewy) i nie powstaje faza FF (prawy)

FFLO

Podsumowanie:

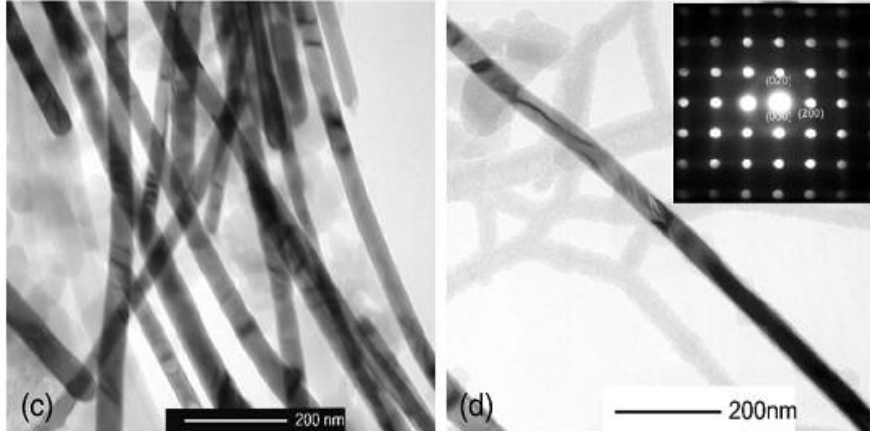
1. Własności nadprzewodzące nanostruktur metalicznych oscylują w funkcji ich rozmiarów geometrycznych – kwantowy efekt rozmiarowy potwierdzony eksperymentalnie
2. Formuła CC na krytyczne pole magnetyczne w przybliżeniu paramagnetycznym nie jest spełniona dla cienkich warstw metalicznych.
3. Obszar stabilności fazy FFLO w cienkich warstwach oscyluje w funkcji ich grubości, przy czym warunki rezonansu kształtu niszczą fazę FFLO, obszar stabilności fazy FFLO dzieli się na podobszary, których liczba zależy od liczby podpasów biorących udział w parowaniu.
4. W cylindrycznych nanodrutach metalicznych faza FFLO może być indukowana przez efekt orbitalny

Dziękuję za uwagę.

Badania finansowane z grantu „Juventus Plus” MNiSW nr. IP2012 048572

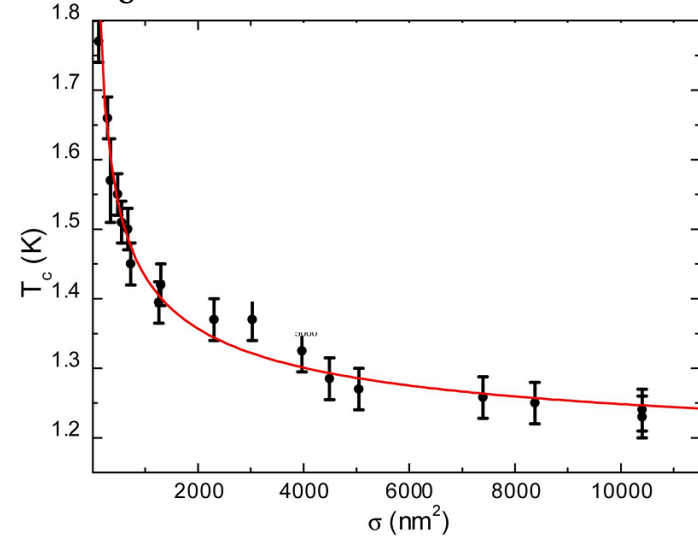
Sn nanowire

M. Tian et al. PRB 71, 104521 (2005)



Al nanowire

M. Zgirski et al. PRB 75, 172509 (2007)

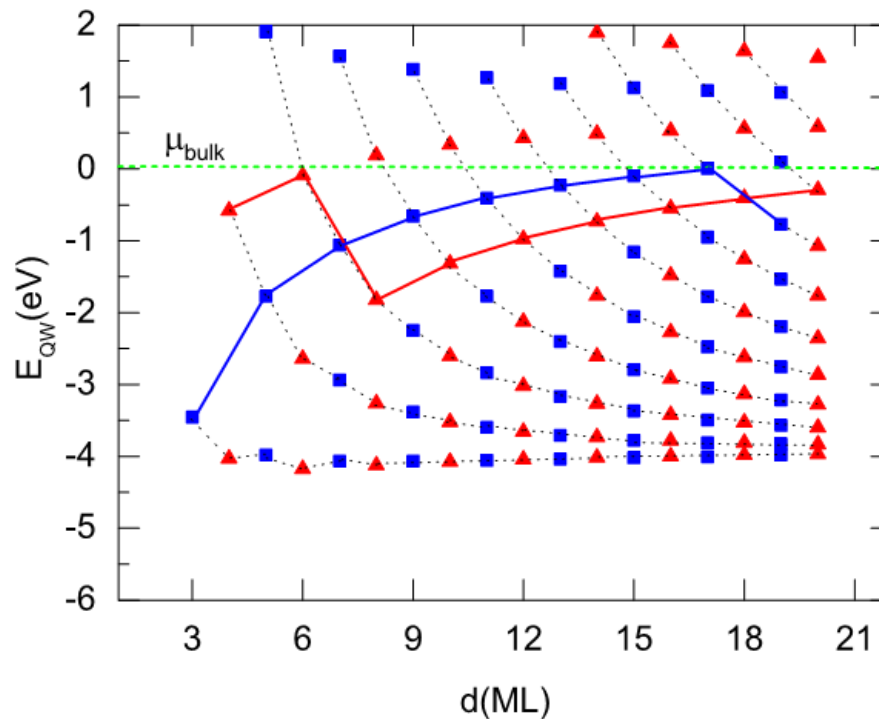


Literatura:

1. M. M Ozer et al. Nature Physics, 2, 173, (2006)
2. T. Zhang et al. Nature Physics, 6, 104, (2010)
3. S. Qin et al. Science, 324, 1314, (2009)

Pole krytyczne dla cienkich warstw Pb – przybliżenie paramagnetyczne

P. Wójcik, M. Zegrodnik, *Journal of Physics: Condensed Matter* 2014, 26, 455302

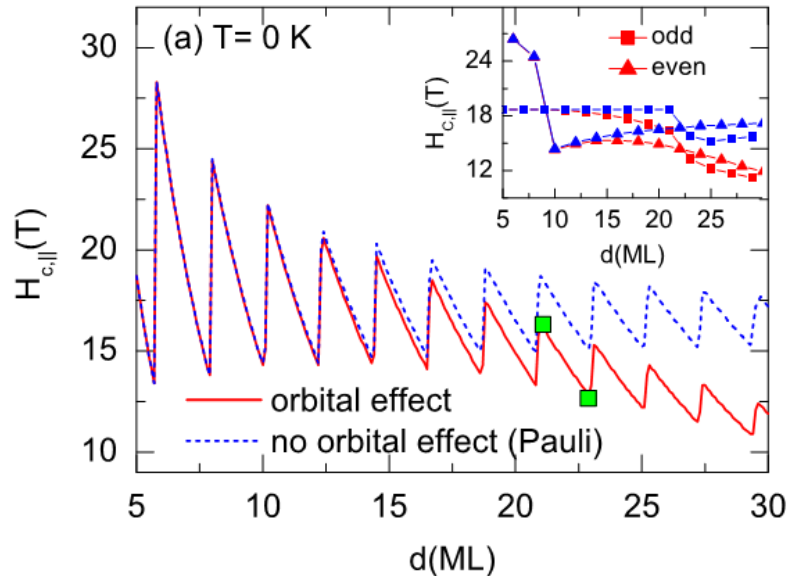


Energie QWS w funkcji grubości nanowarstw Pb.

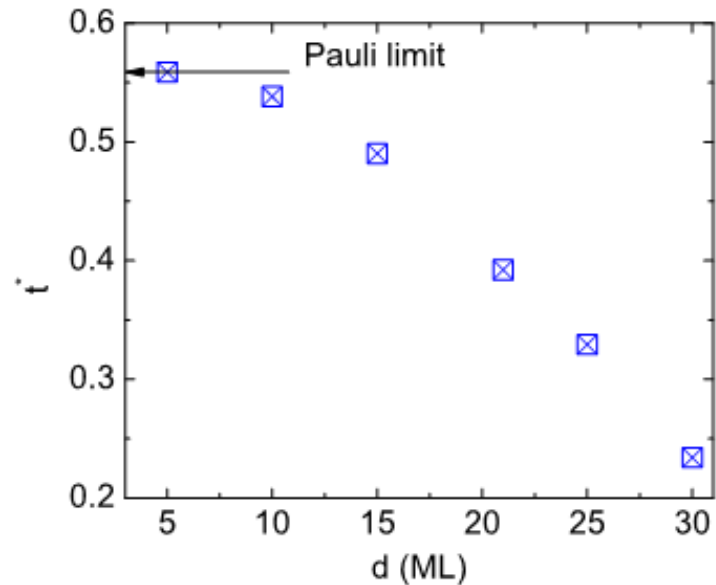
$$\Delta d = \frac{\hbar^2 \pi^2}{\sqrt[3]{3\pi^2 n_e}} = 2.2 \text{ ML}$$

Różnica pomiędzy $\Delta d = 2.2 \text{ ML}$ a 2 ML prowadzi do dudnień z określonym okresem

Wpływ efekt orbitalnego



Pole krytyczne w funkcji grubości nanowarstw Pb z oraz bez uwzględnienia efektu orbitalnego.



Znormalizowana temperatura w której przejście metal-nadprzewodnik staje się przejściem I rodzaju w funkcji grubości warstwy.

Faza FFLO w cienkich warstwach

Hamiltonian

$$\hat{H} = \sum_{n,\mathbf{k}} (\hat{c}_{\mathbf{k}n\uparrow}^\dagger \hat{c}_{-\mathbf{k}+\mathbf{q}n\downarrow}) \begin{pmatrix} \xi_{\mathbf{k}n} & \Delta_{\mathbf{q}n} \\ \Delta_{\mathbf{q}n} & -\xi_{-\mathbf{k}+\mathbf{q}n} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{c}_{\mathbf{k}n\uparrow} \\ \hat{c}_{-\mathbf{k}+\mathbf{q}n\downarrow}^\dagger \end{pmatrix} + \sum_{n,\mathbf{k}} \xi_{-\mathbf{k}+\mathbf{q}n} + \sum_n \frac{|\Delta_{\mathbf{q}n}|^2}{g},$$

gdzie
$$E_{\mathbf{k}q n}^\pm = \frac{1}{2} (\xi_{\mathbf{k}n} - \xi_{-\mathbf{k}+\mathbf{q}n} \pm \sqrt{\alpha_{\mathbf{k}q n}}) + \mu_B H,$$

$$\alpha_{\mathbf{k}q n} = (\xi_{\mathbf{k}n} + \xi_{-\mathbf{k}+\mathbf{q}n})^2 + 4\Delta_{\mathbf{q}n}^2.$$

samouzgodnione równanie na przerwę nadprzewodzącą

$$\Delta_{\mathbf{q}n'} = \frac{g}{4\pi^2} \int d\mathbf{k} \sum_{n'} C_{\mathbf{k}n'n} \frac{\Delta_{\mathbf{q}n}}{\sqrt{\alpha_{\mathbf{k}q n}}} [1 - f(E_{\mathbf{k}q n}^+) - f(E_{\mathbf{k}q n}^-)],$$