

POLARYTONY EKSCYTONOWE W MIKROWNĘKACH PÓŁPRZEWODNIKOWYCH

dr B. Piętka, Zakład Fizyki Ciała Stałego, Wydział Fizyki
w ramach wykładu
Wybrane Aspekty Nanotechnologii dla IN 2015



KONDENSAT BOSEGO - EINSTEINA

co to jest **? POLARYTON ?**



NADCIEKŁOŚĆ I WIRY KWANTOWE



dodatek: OBRAZOWANIE MECHANIKI
KWANTOWEJ - FUNKCJE FALOWE STANÓW
ZWIĄZANYCH



KONDENSAT BOSEGO - EINSTEINA

co to jest ? POLARYTON ?



NADCIEKŁOŚĆ I WIRY KWANTOWE

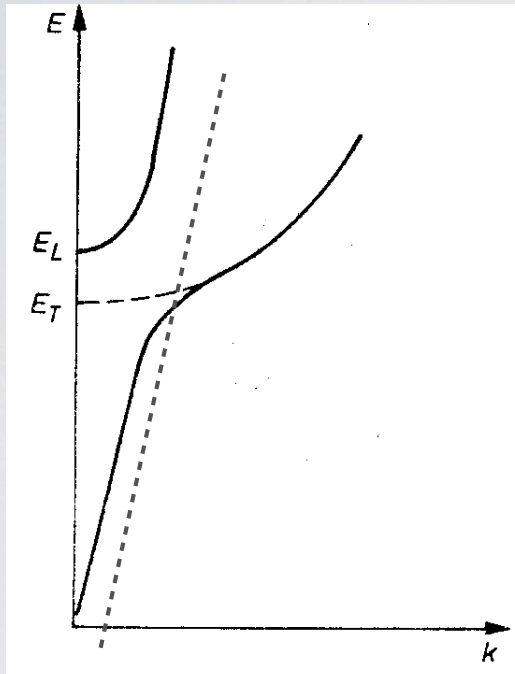


dodatek: OBRAZOWANIE MECHANIKI KWANTOWEJ - FUNKCJE FALOWE STANÓW ZWIĄZANYCH

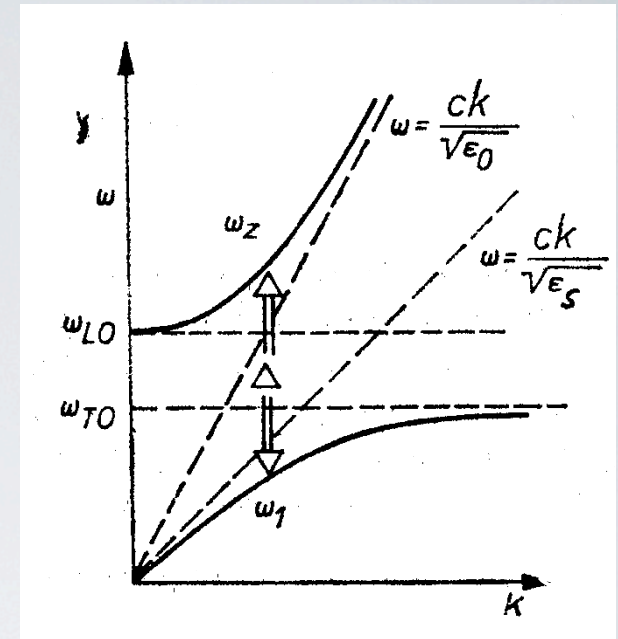
POLARYTONY EKSCYTONOWE
W MIKROWNEKACH
PÓŁPRZEWODNIKOWYCH

SHORT HISTORY OF STRONG COUPLING IN SEMICONDUCTORS

1951 **Huang** : oddziaływanie fali e-m z drganiami optycznymi sieci
(równia Maxwella + klasyczne drgania sieci)



1950 **Fano** - podejście kwantowe



1958 **Piekar & Hopfield**

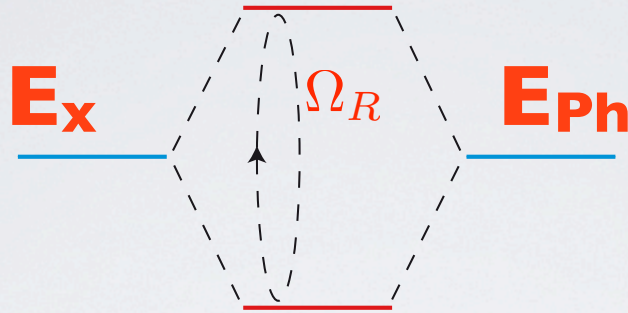
oddziaływanie ekscytonów z promieniowaniem e-m
(podejście kwantowe)

Polarytony - sprzężone mody fotonu i wzbudzeń elementarnych rozprzestrzeniające się w ośrodku z zależnym od częstości zespolonym tensorem funkcji dielektrycznej

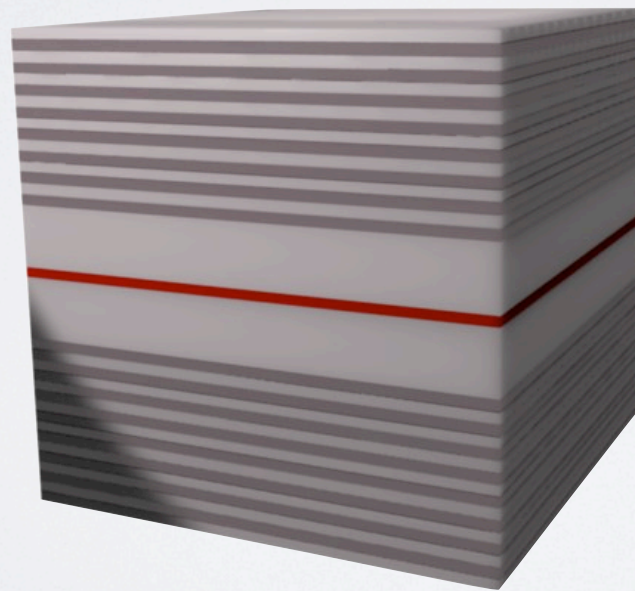
polarytony fononowe
polarytony ekscytonowe
polarytony magnonowe
polarytony plazmowe

SPRZĘŻENIE POMIĘDZY FOTONAMI I EKSCYTONAMI

EKSCYTON W
STUDNI
KWANTOWEJ



FOTON W MIKROWNEŃCE



Top DBR
21 pairs

λ
cavity

Bottom DBR
22 pairs

GaAs

AlAs

$\text{In}_{0.04}\text{Ga}_{0.96}\text{As}$

DYSPERSJA POLARYTONÓW

dyspersja ekscytonu w studni kwantowej

$$E_X(k) = E_g - E_b + \frac{\hbar^2 k^2}{2m_X}$$

dyspersja fotonu w mikrownęce

$$E(\vec{k}) \approx \frac{\hbar c}{n} \left[\frac{2\pi}{L_C} + \frac{k_{II}^2 L_C}{4\pi} \right] = E_0 + \frac{\hbar^2 k_{II}^2}{2m_{ph}^*}$$

wnioski:

foton o masie efektywnej !!!

$$m_C^* = \frac{\hbar k_z n}{c} = \frac{hn^2}{c\lambda_0}$$

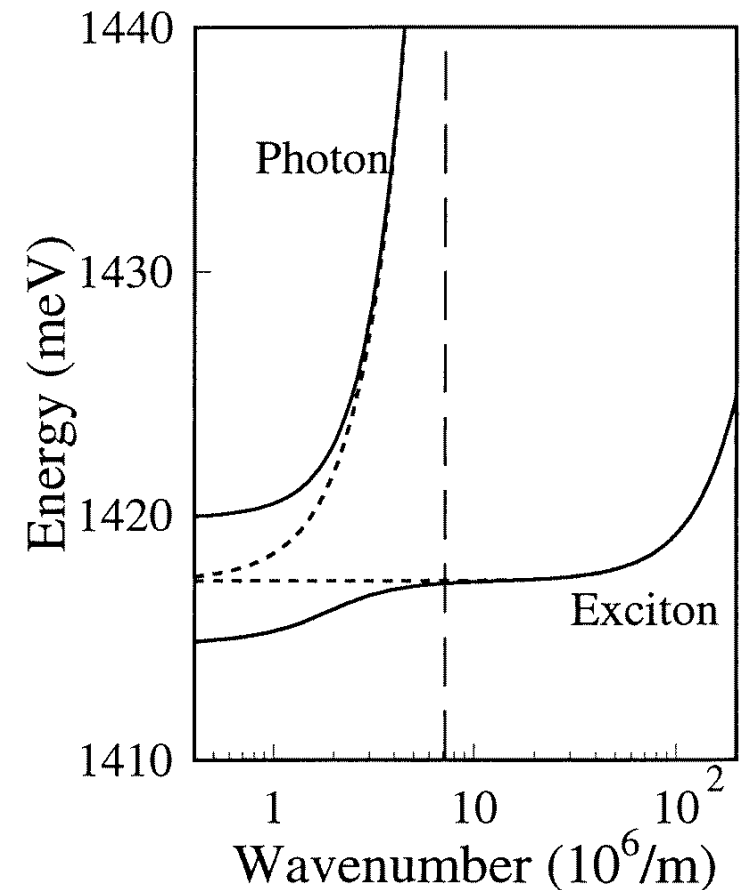


image after: M. S. Skolnick et al.
Semicond. Sci. Technol. 13, 645 (1998)

POLARYTONY W MIKROWNĘCE

experimental access

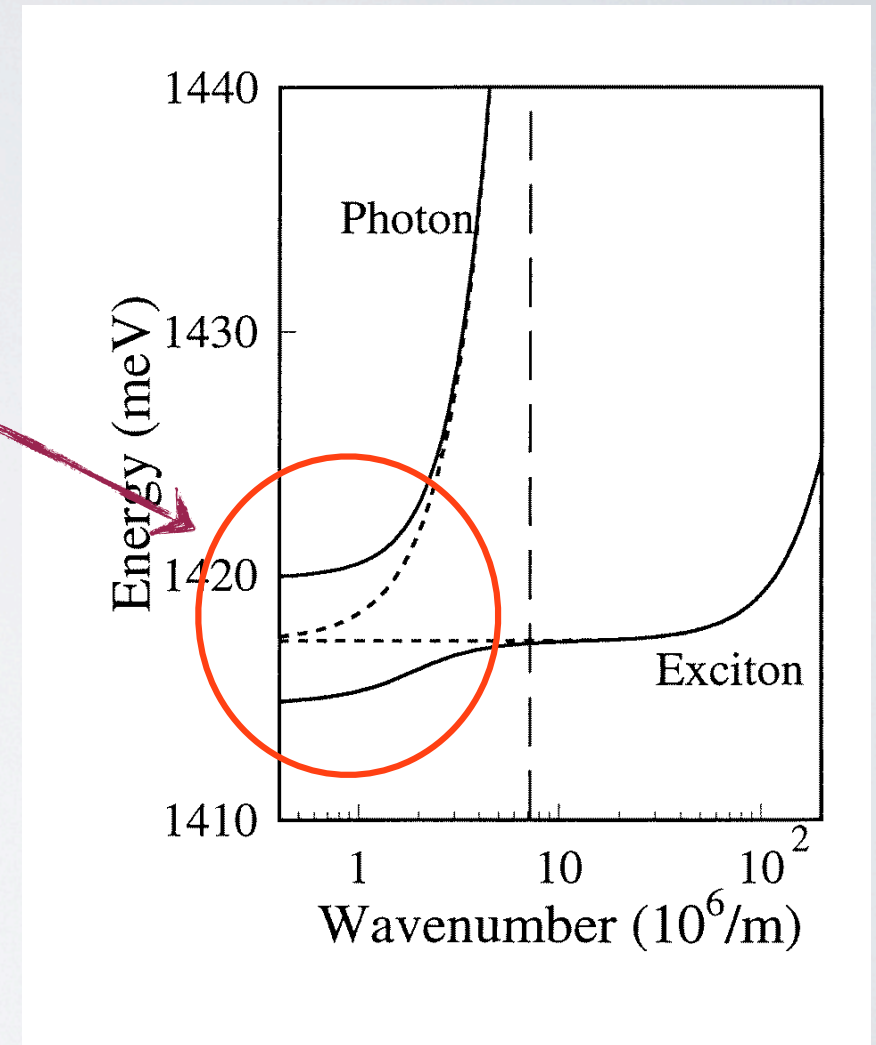
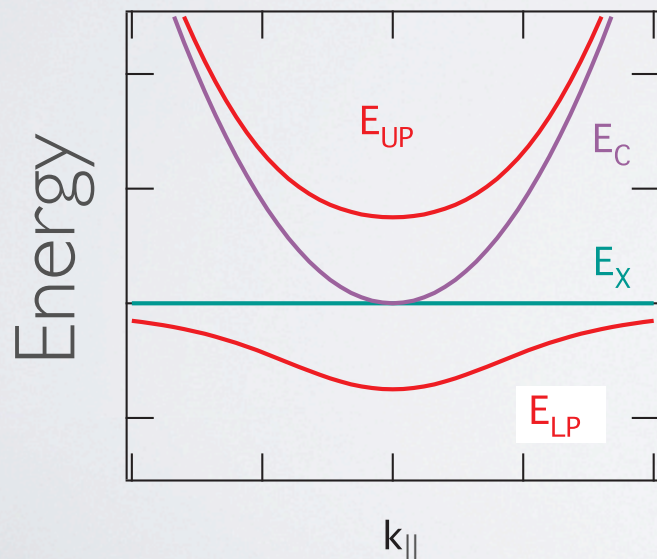


image after: M. S. Skolnick et al.
Semicond. Sci. Technol. 13, 645 (1998)

POLARYTONY W MIKROWNĘCE

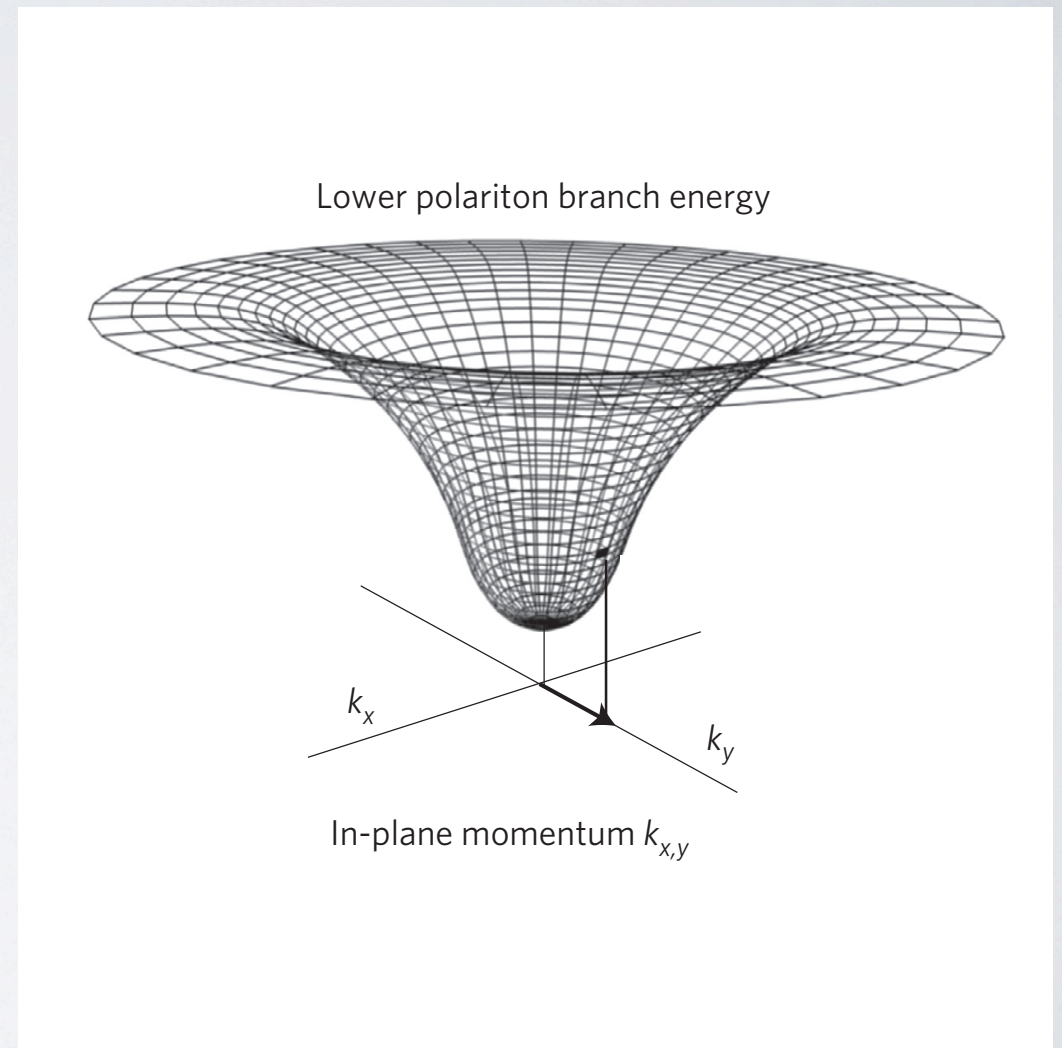
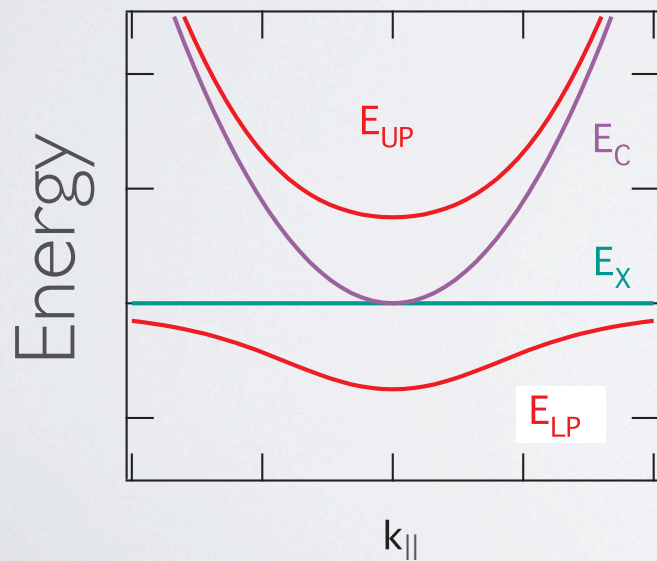
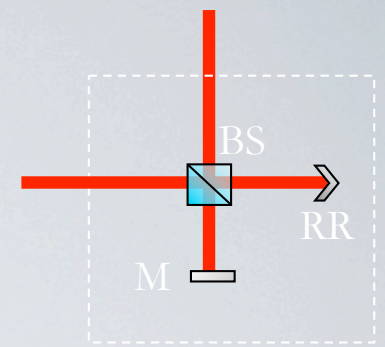


image after: D. Sanvitto et. al.

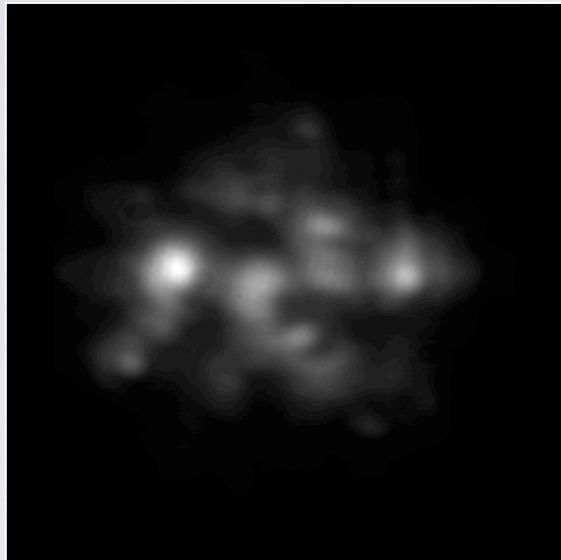
CONDENSED STATE OF POLARITONS

KONDENSAT VS OBRAZ INTERFERENCYJNY



- Experimental realization:

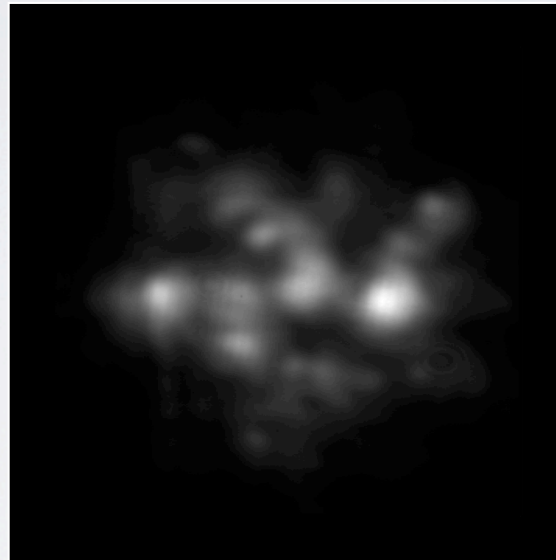
Mirror arm real space



20 μ m

+

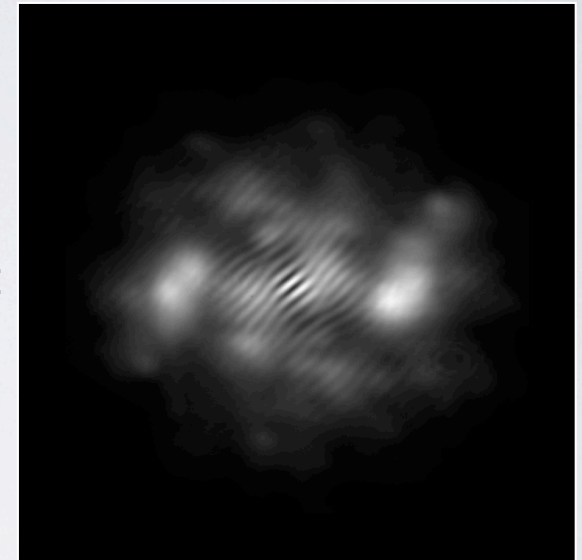
*Retroreflector arm
real space*



20 μ m

=

Interferogram

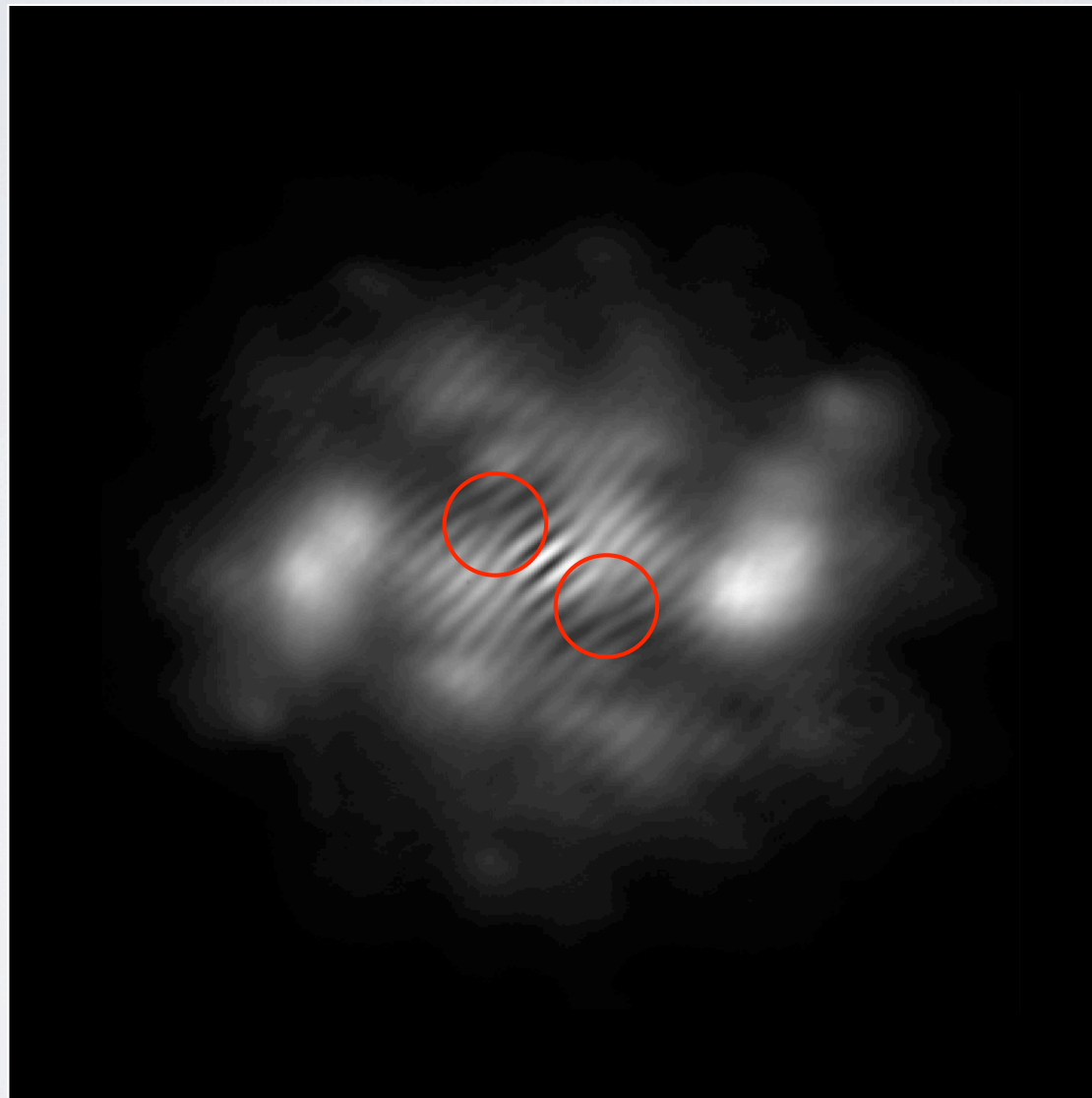


- Disorder in sample
- Different positions will give different interferograms

INTERFENCJA !!!

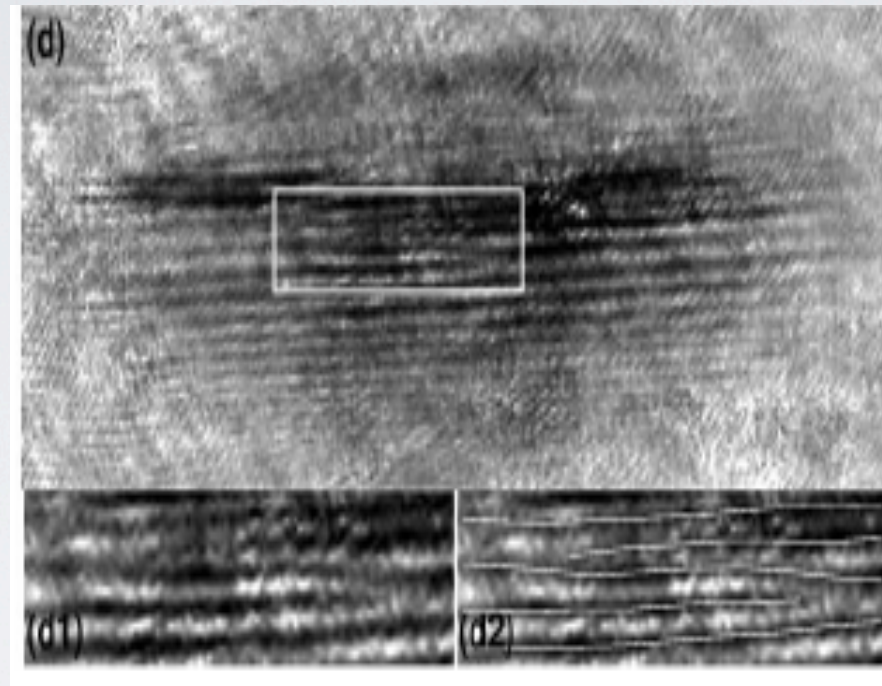
& WIRY KWANTOWE !!!

Interferogram



+ nadciekłość

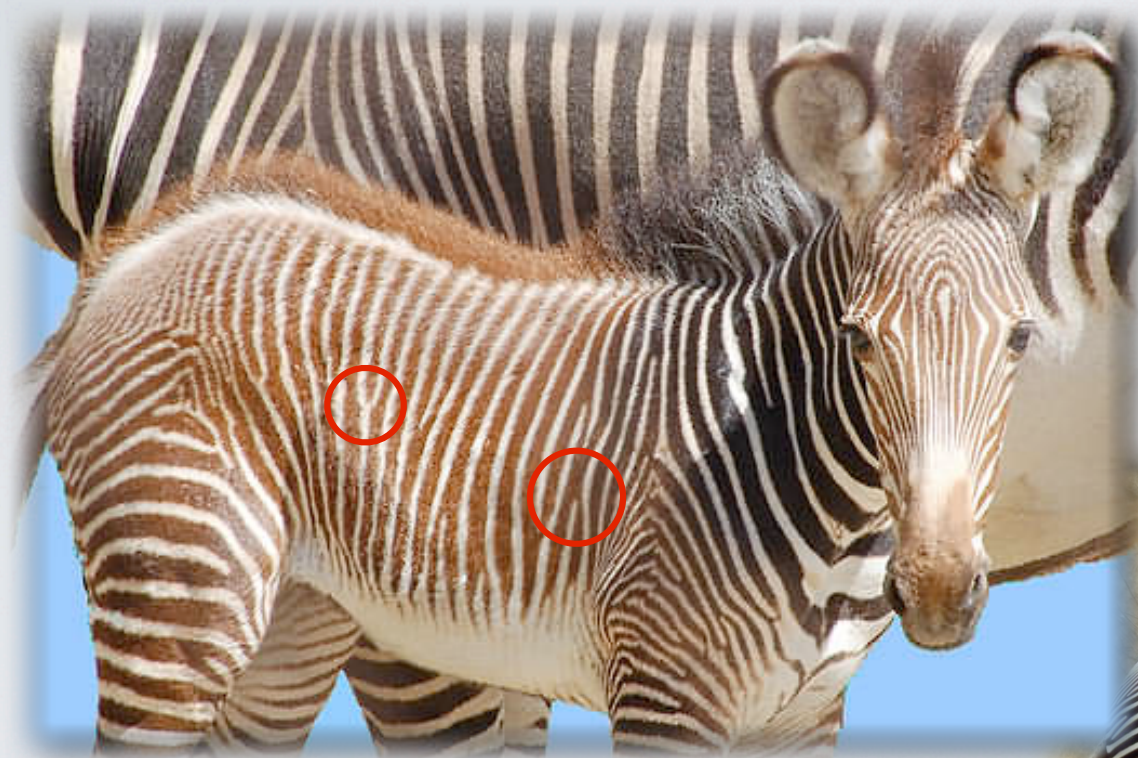
ROZDZIELCZOŚĆ FAZOWA DLA ATOMOWYCH KONDENSATÓW



Observation of vortices in BEC
Inouye *et al*, PRL **87**, 080402 (2001)

🌀 Czy są inne rodzaje makroskopowych wirów kwantowych ?

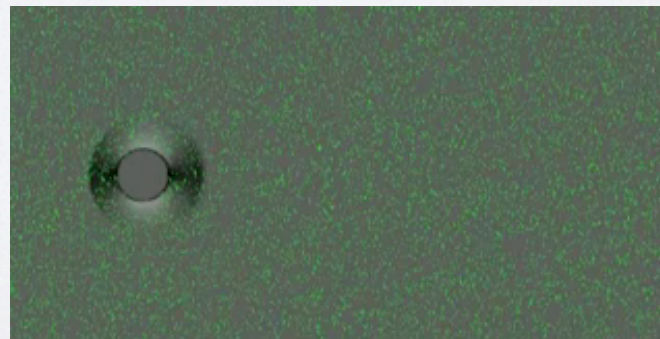
INSPIRED BY NATURE



naturalne wiry kwantowe

WIRY KWANTOWE

WIRY W PŁYNACH KLASYCZNYCH - KILKA PRZYKŁADÓW



ŚCIEŻKA WIRÓW VON
KARMANA

image source:<http://www.youtube.com/watch?v=qpDKRrS9aqE>

WIRY KLASYCZNE



w obszarze wiru:

$$\vec{\omega} = \frac{1}{2} \vec{\nabla} \times \vec{v} \neq 0$$

prędkość kątowa, a zatem i rotacja prędkości, zmniejszają się stopniowo wraz z odległością od centrum wiru

WIRY KWANTOWE

pole bezwirowe

$$\vec{\omega} = \vec{\nabla} \times \vec{v} = \frac{\hbar}{m} \vec{\nabla} \times \vec{\nabla} \phi = 0$$

w obszarze wiru:

$$\vec{\omega} = \vec{\nabla} \times \vec{v} = \frac{\hbar}{m} \vec{\nabla} \times \vec{\nabla} \phi = \hat{z} \frac{\hbar}{m} l \cdot \delta^2(\rho)$$

$$\rho = (x, y)$$

WIRY W STANIE NADCIEKŁYM - DEFEKTY

→ reakcja układu na zaburzenie

WIRY SĄ STANEM WZBUDZONYM UKŁADU (TU: BĘDĄCEGO W STANIE NADCIEKŁYM !)

- 🌀 mają wewnątrz z zerową gęstością cząstek
- 🌀 kwantowe wiry mają skwantowaną fazę wokół centrum wiru

$$\psi = \sqrt{N} e^{i\phi}$$

$$\Delta\phi = 2\pi \cdot l$$

$$\vec{v} = \frac{\hbar}{m} \vec{\nabla}\phi$$

prędkość cieczy nadciekłej jest proporcjonalna do gradientu fazy

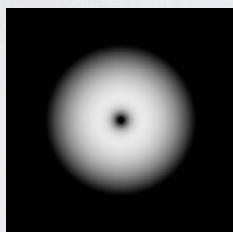
Krażenie $\Gamma = \oint_C \vec{v} \cdot d\vec{l}$

$$\Gamma = \frac{\hbar}{m} \oint_C \vec{\nabla}\phi \cdot d\vec{l} = \frac{\hbar}{m} \Delta\phi = \frac{\hbar}{m} 2\pi \cdot l = \frac{h}{m} l$$

WIRY W STANIE NADCIĘKŁYM - METODY OBSERWACJI

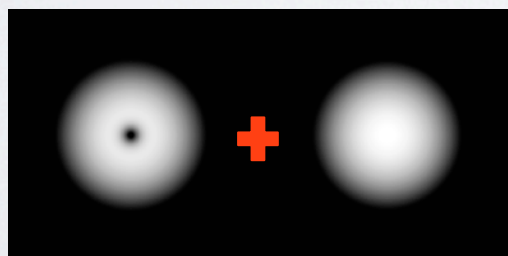
WŁASNOŚCI MIERZALNE EKSPERYMENTALNIE

- ⑥ We wnętrzu wiru nie ma cząstek (gęstość w centrum wiru jest zero)

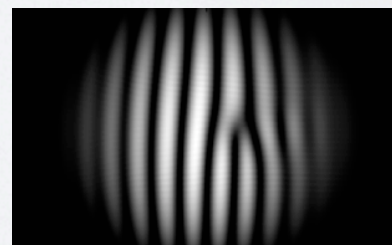


- ⑥ FAZA: całkowite wielokrotności 2π dookoła centrum wiru

ZASADA DOŚWIADCZALNA DETEKcji FAZY



=

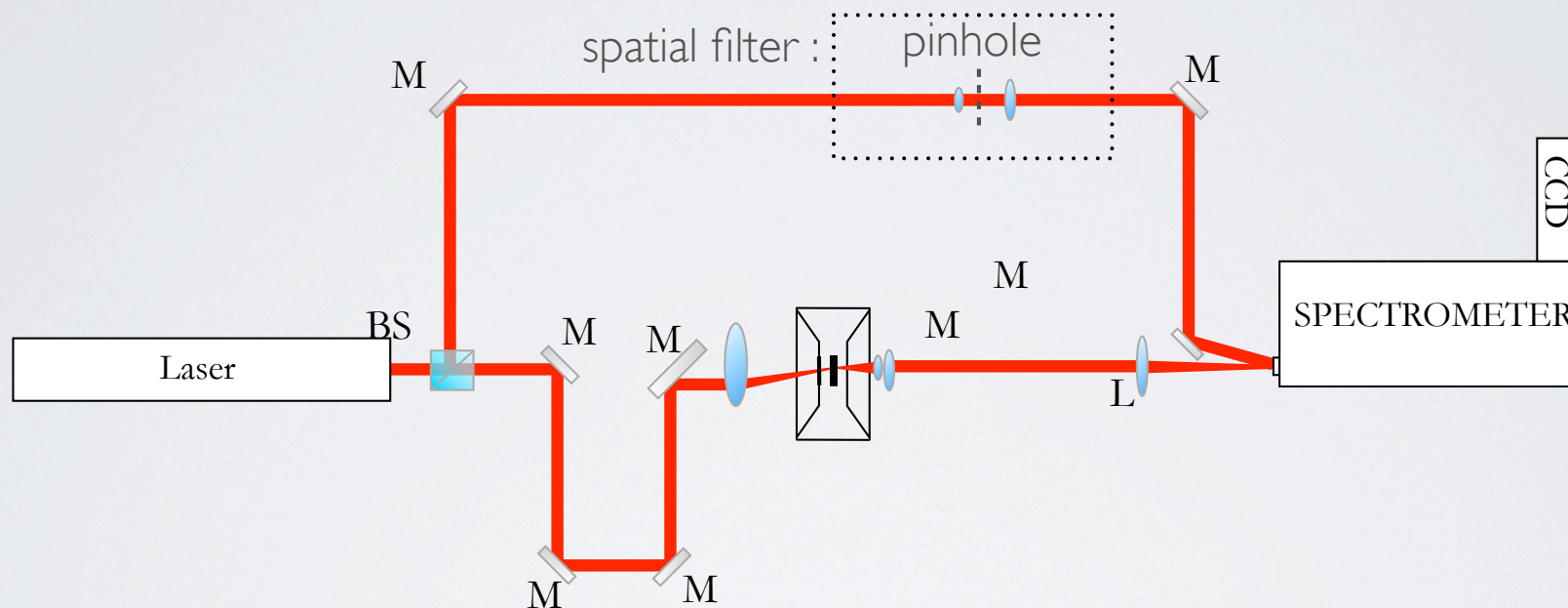


*fork-like
dislocation*

*dyslokacja
typu Y*

UKŁAD EKSPERYMENTALNY

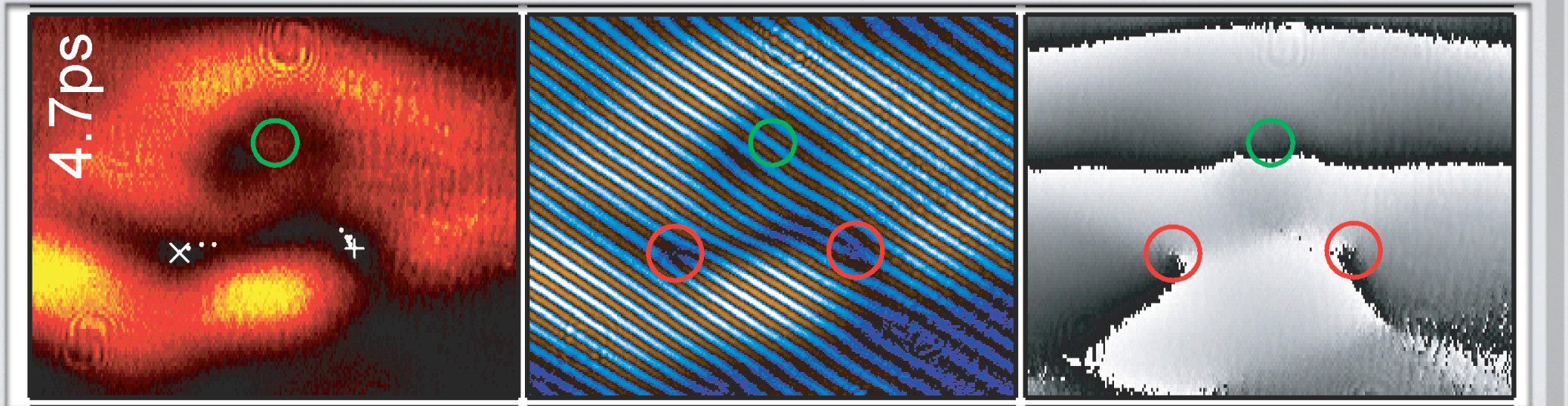
!!! AMPLITUDE & PHASE !!!



INTERFEROGRAM OD KUCHNI

1. mierzymy interferogram
2. numerycznie liczymy FFT (fast fourier transform)
3. otrzymujemy amplitudę i fazę

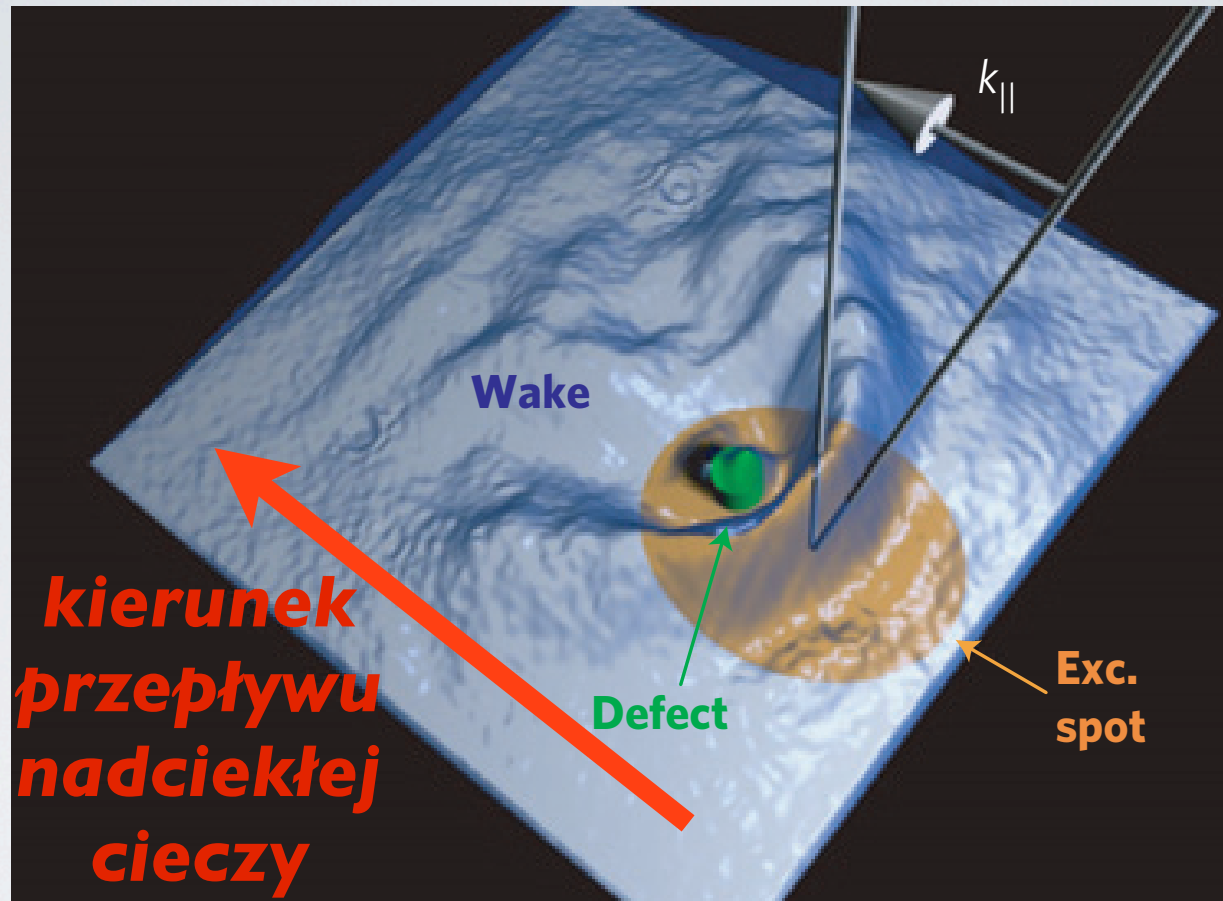
amplituda ← *interferogram* → *faza*



kwantowanie fazy dookoła centrum wiru !



HYDRODYNAMIKA NADCIEKŁYCH POLARYTONÓW



CELE:

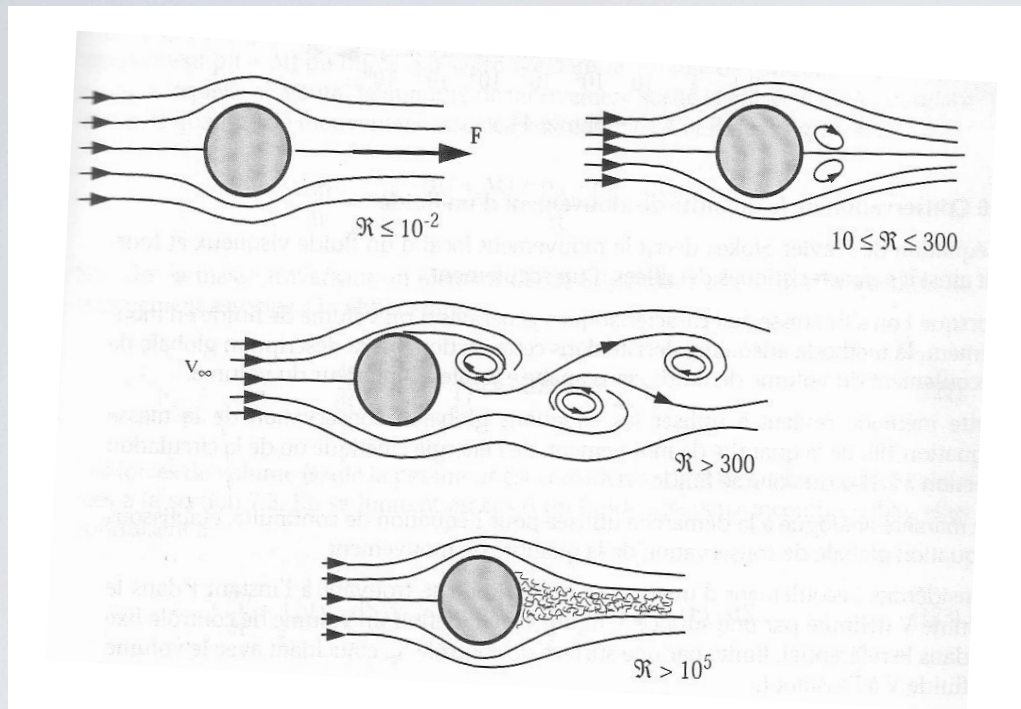
- ! DYNAMIKA NUKLEACJI WIRÓW!
- ROZDZIELCZOŚĆ PRZESTRZENNA
- ! ROZDZIELCZOŚĆ FAZOWA !

Eksperyment w wydaniu klasycznym.



Ten sam eksperyment w wydaniu kwantowym :

WIRY W PŁYNACH KLASYCZNYCH



PRZEPŁYW LAMINARNY

WIRY STACJONARNE

ŚCIEŻKA WIRÓW BENARD-VON
KARMANA

WIRY RUCHOME

PRZEPŁYW CAŁKOWICIE
TURBULENTNY

$$R_e = \frac{\text{Fluid_Velocity} \cdot \text{Obstacle_diameter}}{\text{Kinematic_viscosity}} = \frac{\text{predkosc} \cdot \text{promien}}{\text{lepkosc}}$$

Określa granicę niestabilności między przepływem laminarnym i różnymi typami przepływu turbulentnego

NADCIEKŁOŚĆ

THE MOST SPECTACULAR
EXAMPLES

SUPERFLUID

🌀 stan nadciekły

! BRAK LEPKOŚCI !

- 🌀 ^4He below λ point
- 🌀 atomic BECs
- 🌀 superfluid polaritons

$$\cancel{Re} = \frac{\text{Fluid_Velocity} \cdot \text{Obstacle_diameter}}{\cancel{\text{Kinematic_viscosity}} \text{ (LEPKOŚĆ)}}$$

- 🌀 konsekwencja stanu kondensatu Bosego - Einsteina w systemie oddziaływającym
- 🌀 dobrze określona faza zadana funkcją falową

$$\psi = \sqrt{N} e^{i\theta}$$

„Gigantyczna fala materii”

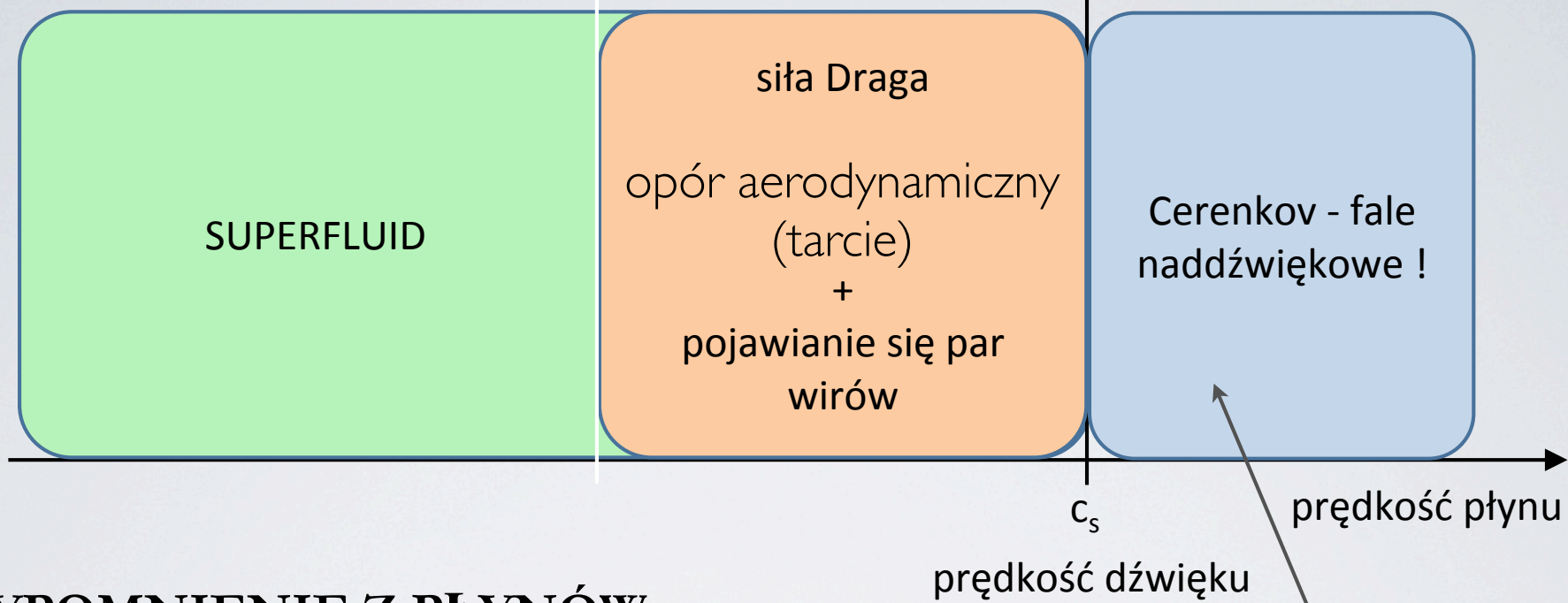
🌀 ZDEFINIOWANE DLA PRĘDKOŚCI MNIEJSZYCH OD PRĘDKOŚCI
DŹWIĘKU

$$v < c_s$$

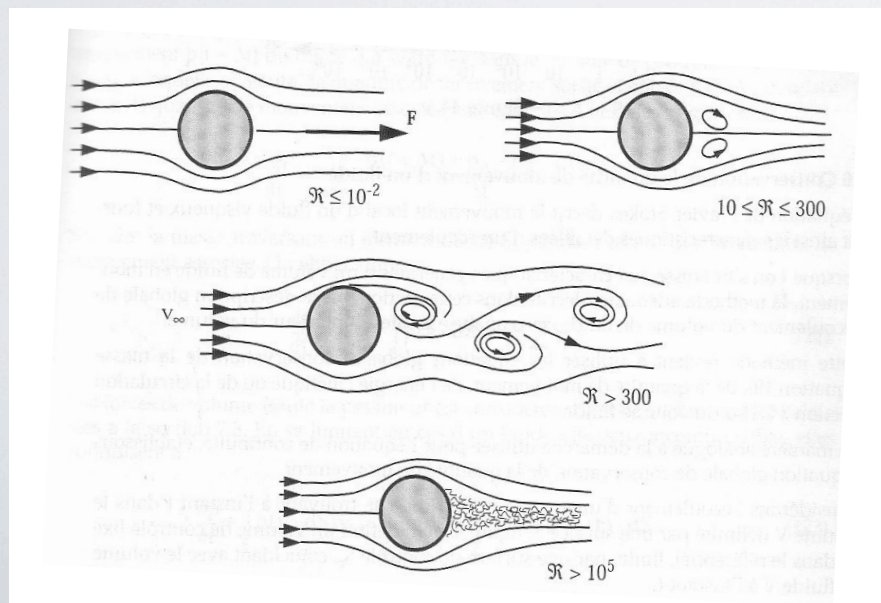
→ kryterium nadciekłości Landaua

🌀 dla $v > c_s$ fale czerenkowa - uderzeniowa fala dźwiękowa

RÓŻNE ZACHOWANIA SIĘ PŁYNU W ZALEŻNOŚCI OD PRĘDKOŚCI



PRZYPOMNIENIE Z PŁYNÓW KLASYCZNYCH

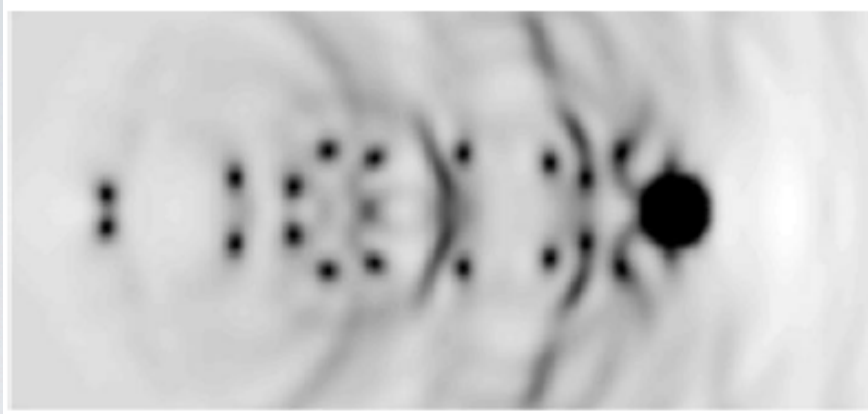


załamanie się nadciekłości

TURBULENCJE W STANACH NADCIEKŁYCH - duże zainteresowanie środowiska naukowego !

w kondensatach atomowych

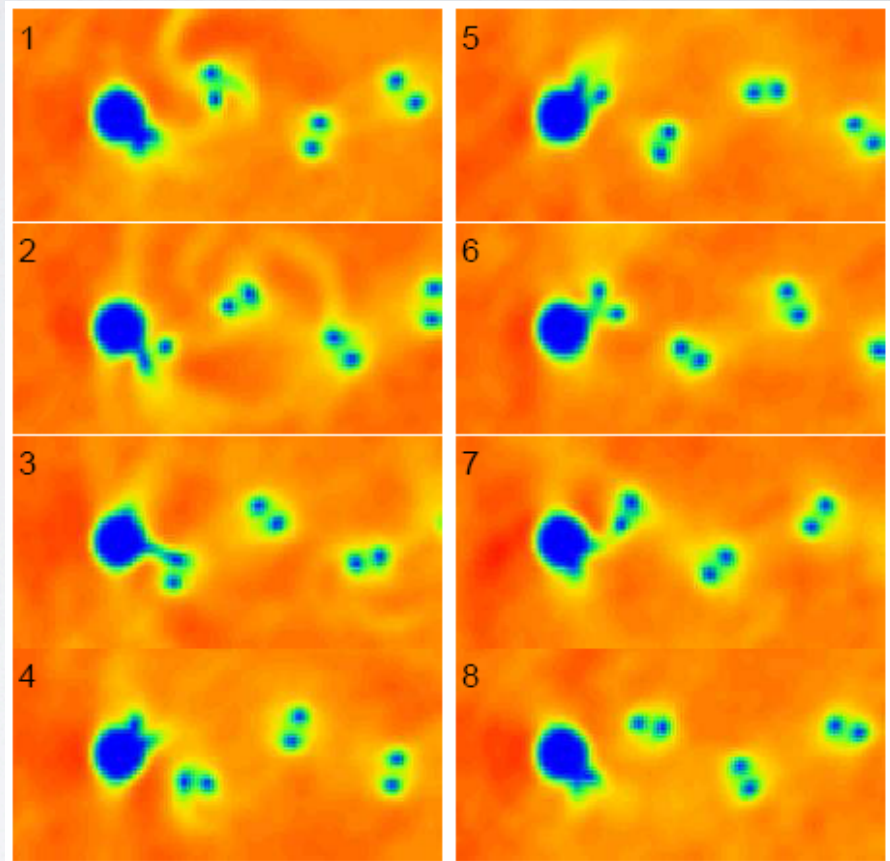
THEORETICAL WORK



Vortex shedding and drag in a BEC

Pojawianie się wirów i siły nośnej w kondensacie Bosego - Einsteina

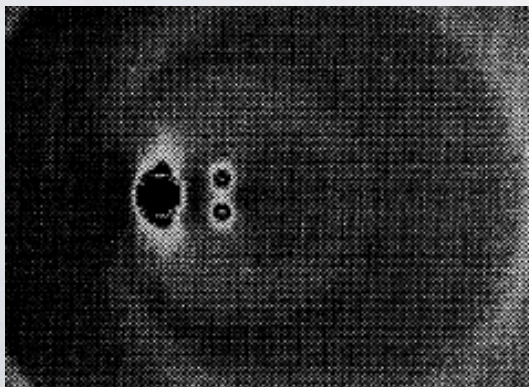
Winiacki *et al*, J. Phys. B **33**, 4069 (2000)



Bénard- Von Kármán street in a BEC

Ścieżka wirów von Karmana w kondensacie Bosego - Einsteina

Sasaki *et al*, PRL **104**, 150404 (2010)

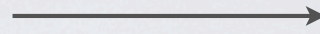


Frisch *et al*, PRL **69**, 1644 (1992)

pojawianie się wirów z powodu tarcia

SIECI WIRÓW

rotujące asymetryczne
pułapki lub/i wirujący
potencjał

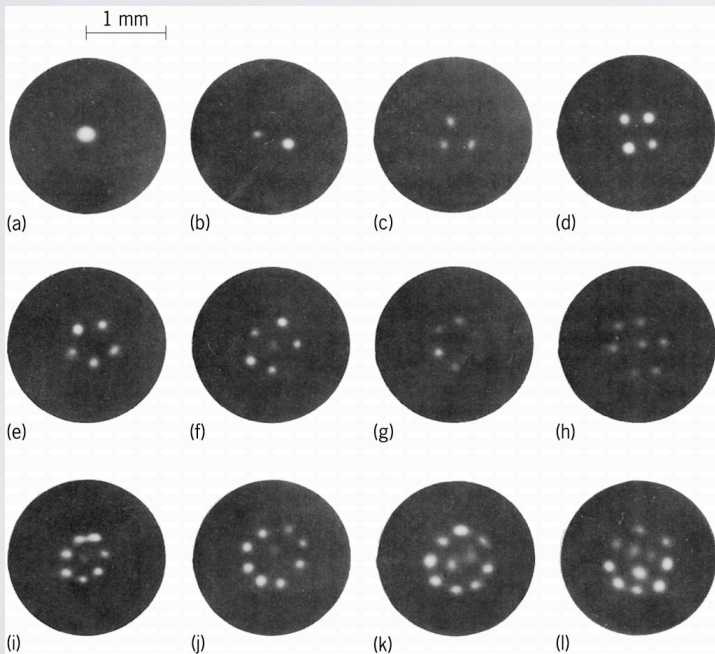


sieci wirów

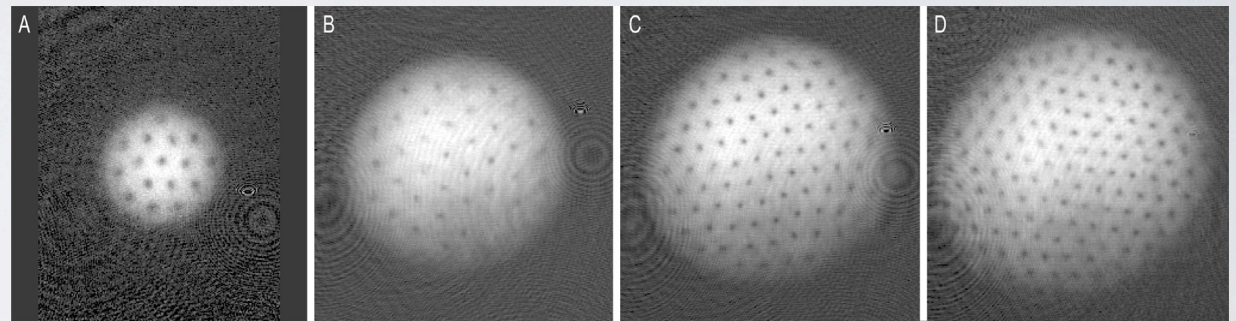
 ^4He poniżej punktu λ

1950s Hall and Vinen

 atomowe BECs

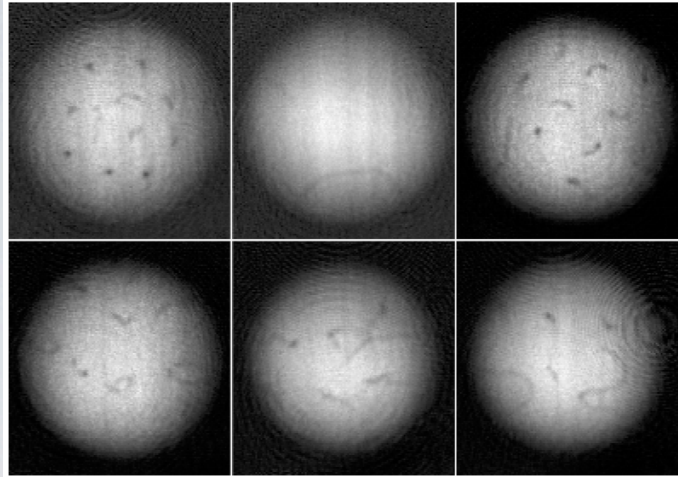


E. J. Yarmchuk, PRL 43, 1979

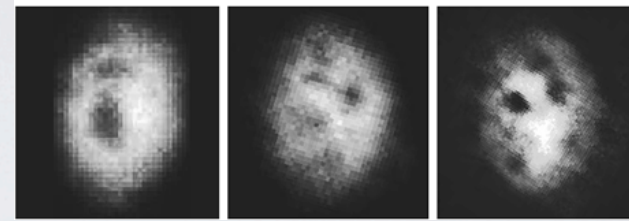


Vortex Lattices in Bose-Einstein Condensates
Abo-Shaeer et al., Science 292, 476 (2001)

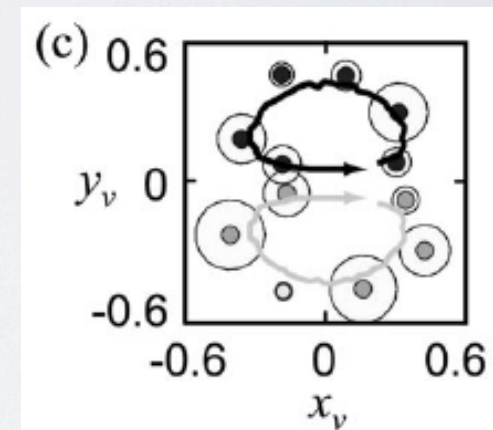
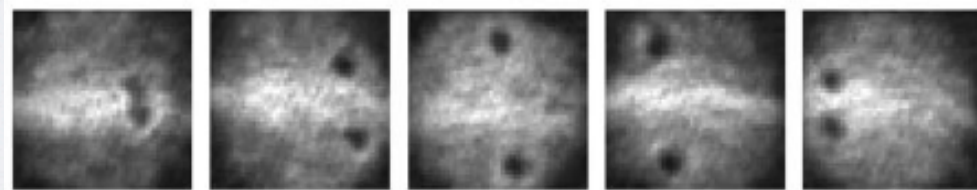
KREACJA WIRÓW W ATOMOWYM BEC



Vortex nucleation in a stirred BEC
Raman *et al*, PRL **87**, 210402 (2001)

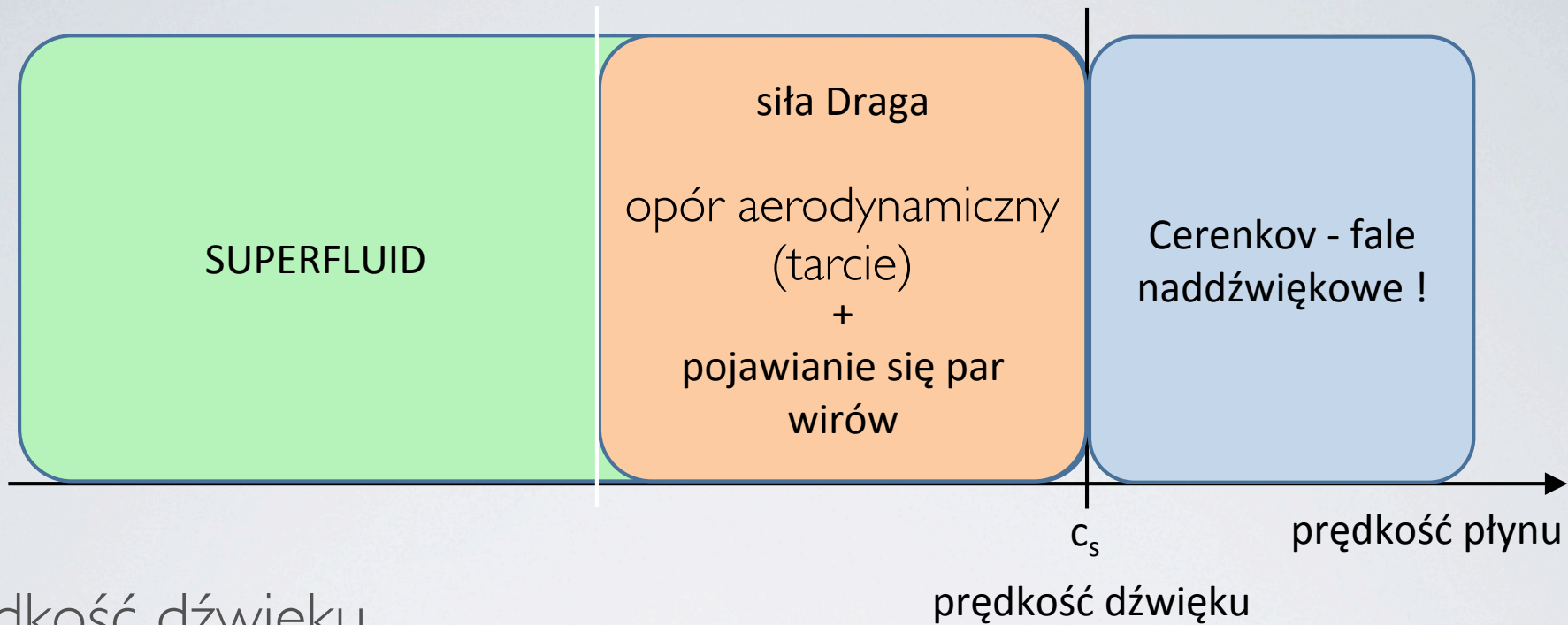


E.A.L. Henn *et al*., J Low Temp Phys 158, 435 (2010)



Observation of vortex dipoles in BEC, Neely *et al*, PRL **104**, 160401 (2010)

WAŻNE - REALIZACJA EKSPERYMENTALNA !



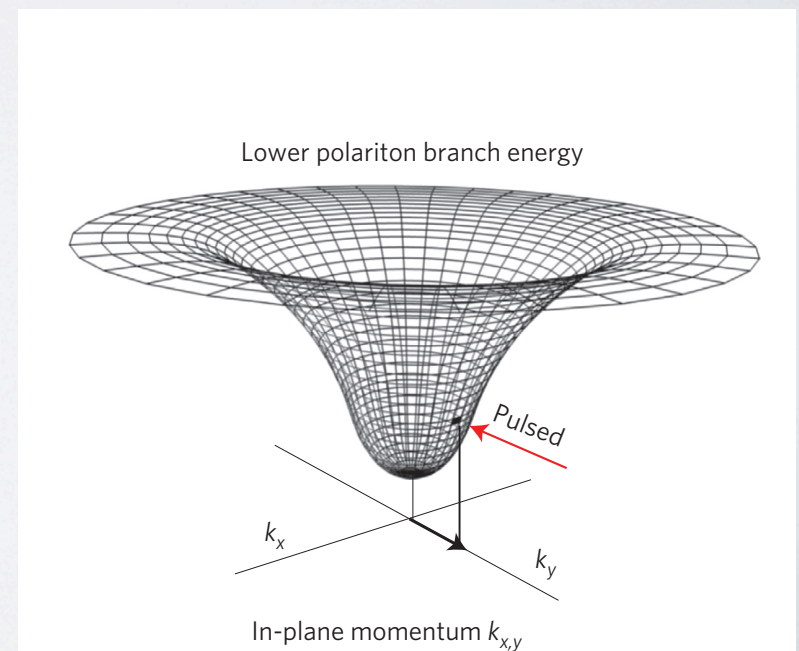
prędkość dźwięku

$$c_s = \sqrt{\frac{gn}{m_{LP}}}$$

liczba cząstek

stała oddziaływań

zmienia energię polarytonów :
im więcej polarytonów tym ich
energia jest większa



Superfluidity of polaritons in semiconductor microcavities

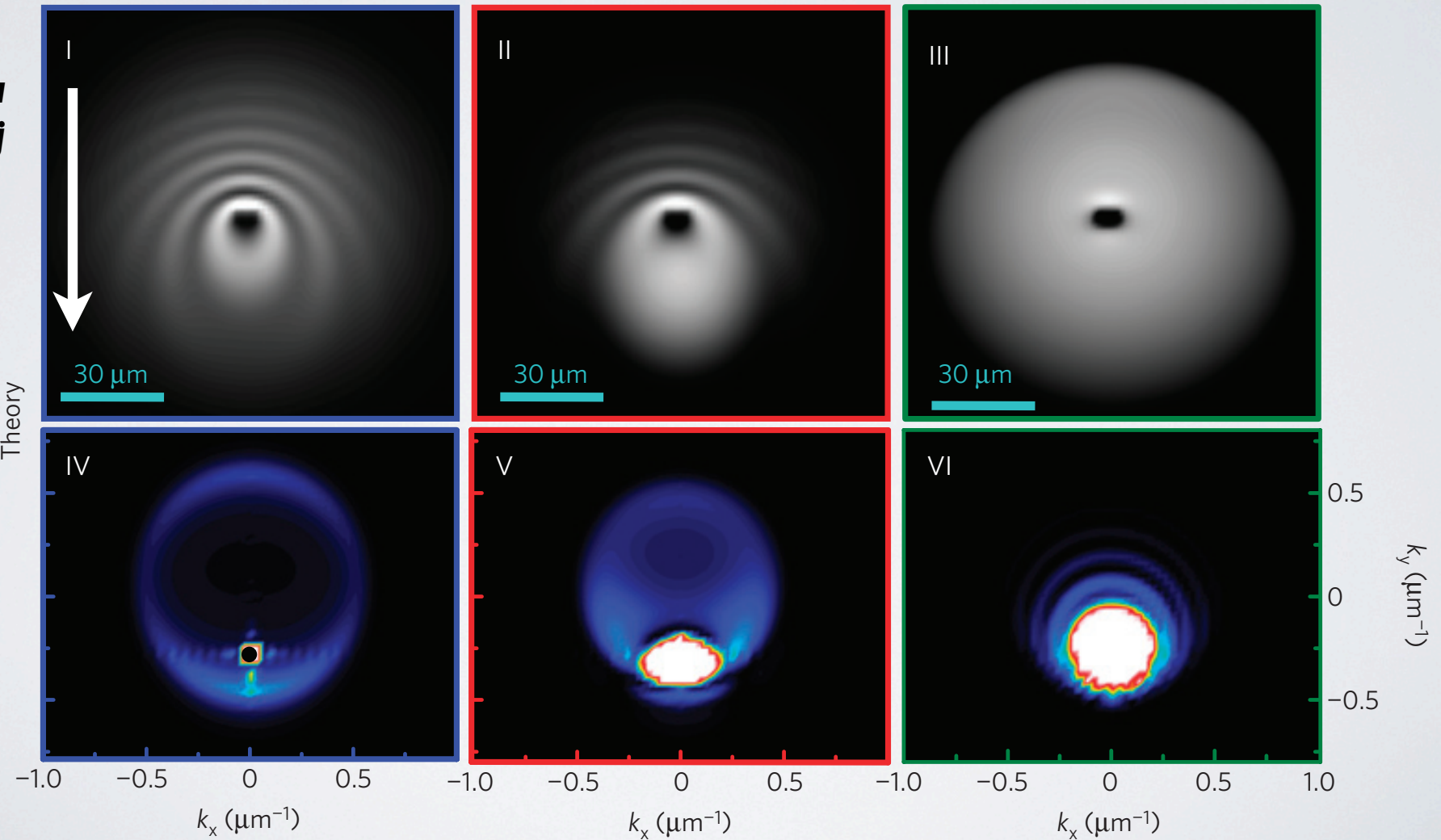
Alberto Amo^{1*}, Jérôme Lefrère¹, Simon Pigeon², Claire Adrados¹, Cristiano Ciuti², Iacopo Carusotto³, Romuald Houdré⁴, Elisabeth Giacobino¹ and Alberto Bramati^{1*}

prędkość dźwięku

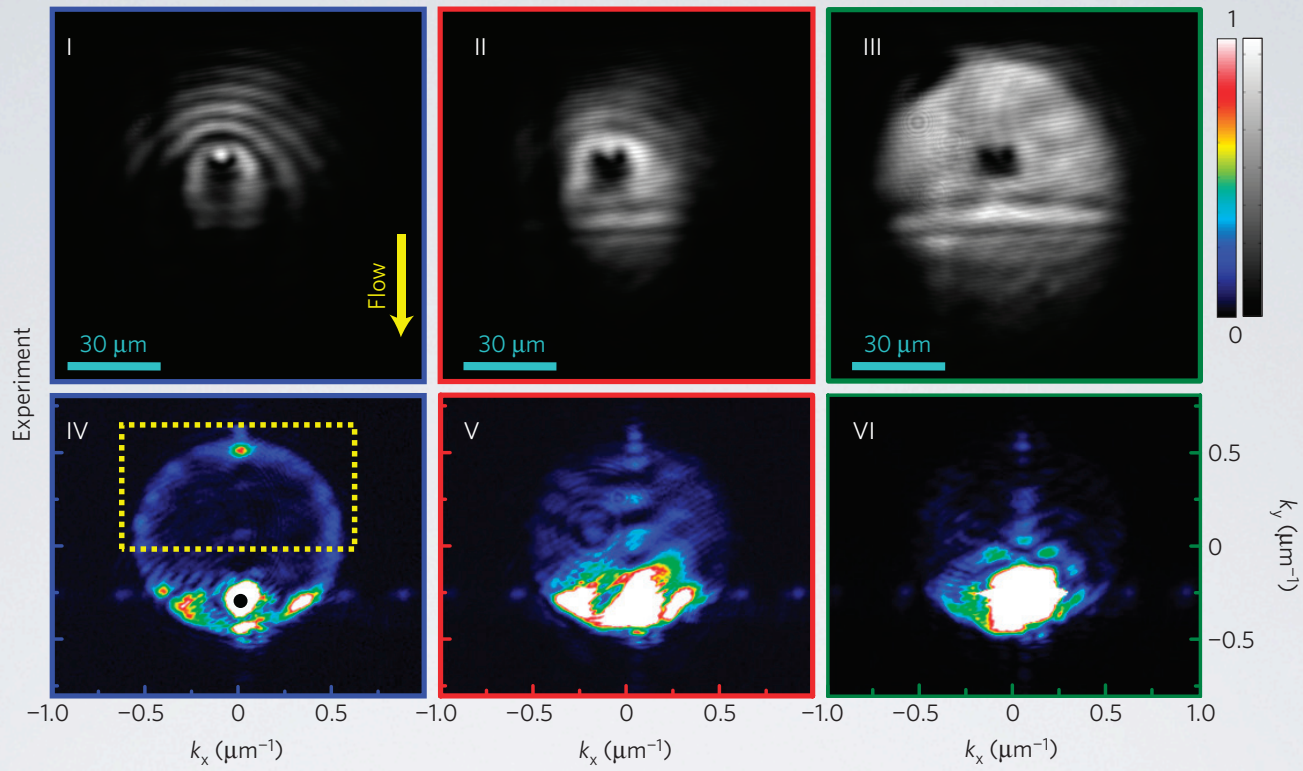
kierunek
przepływu
nadciekłej
cieczy

teoria

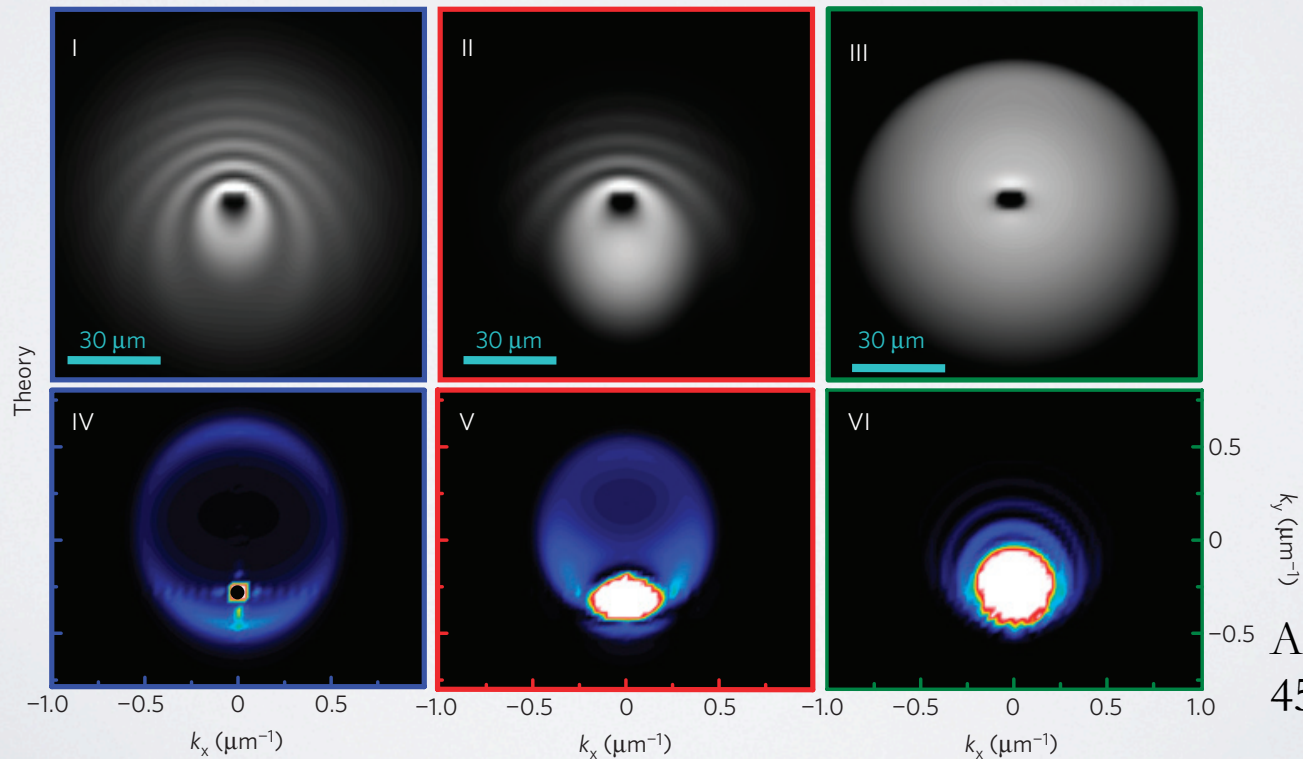
Theory



doświadczenie

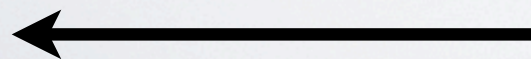
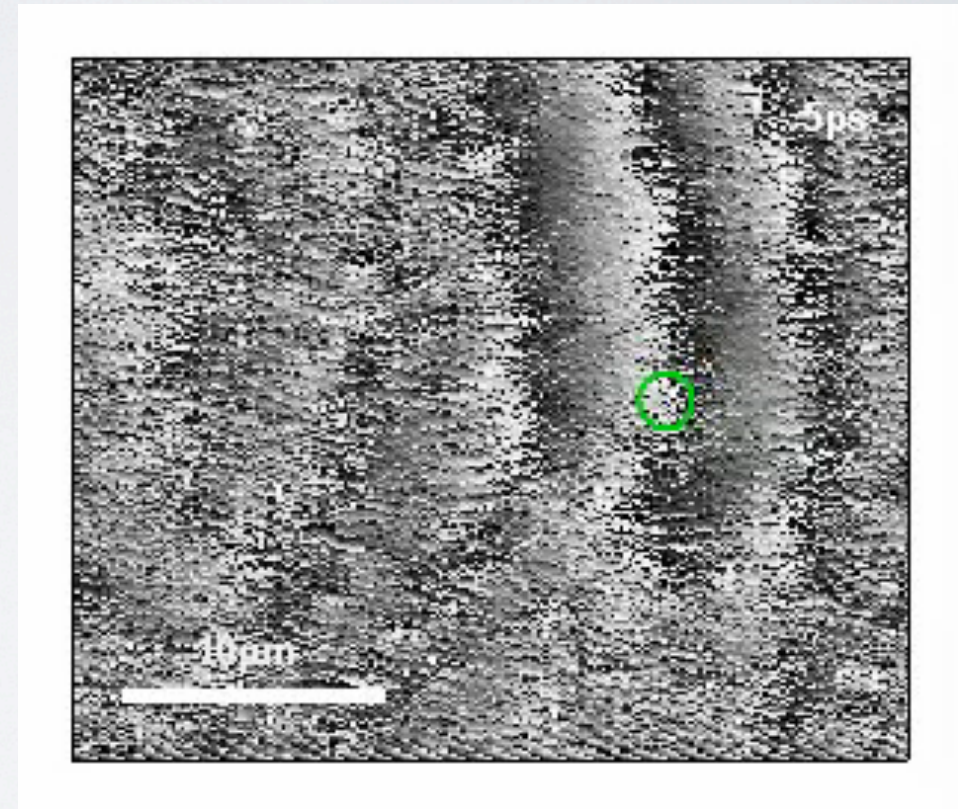
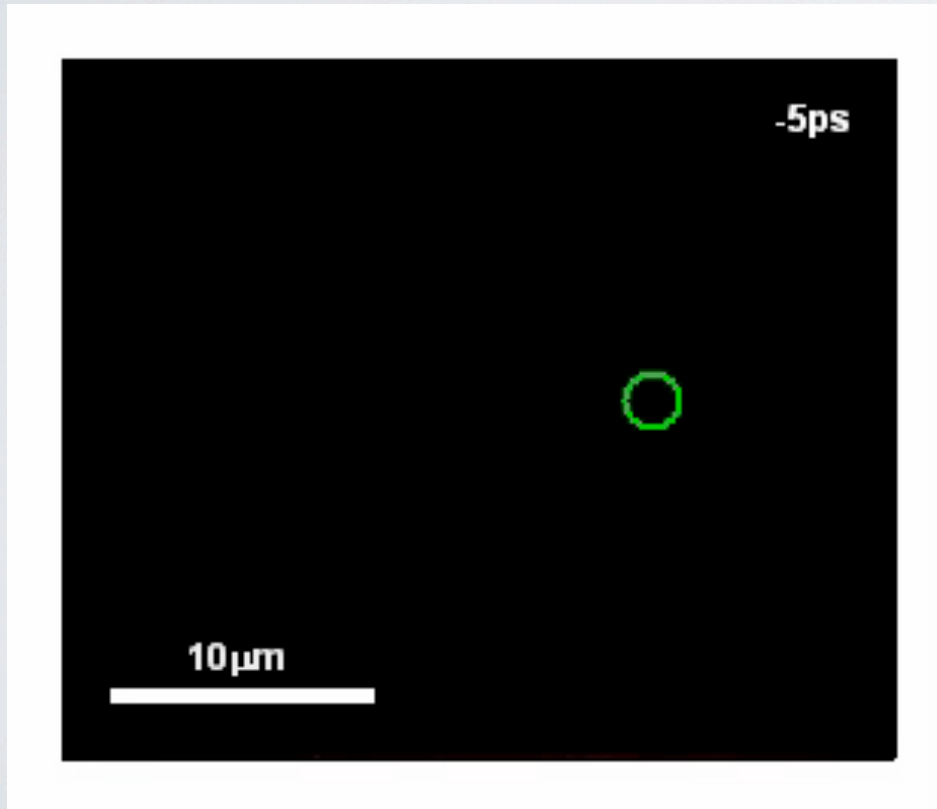
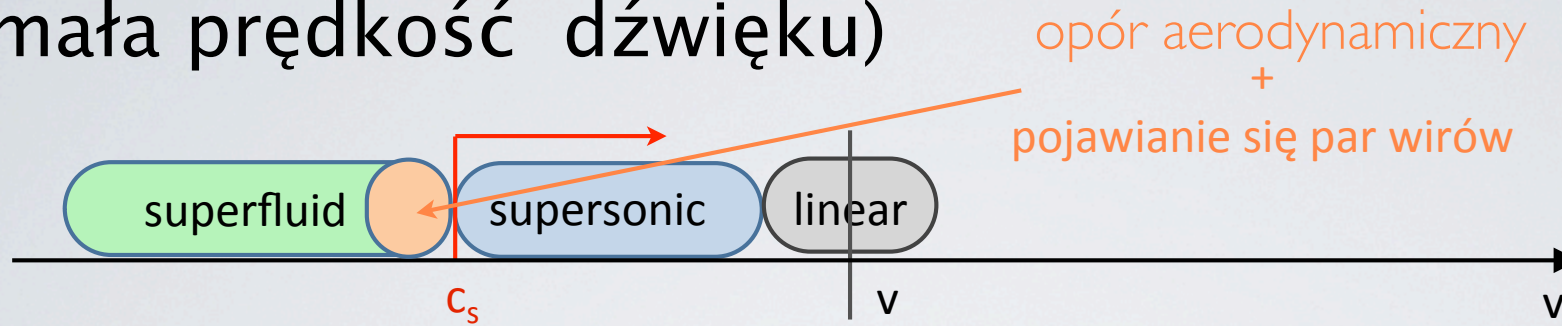


teoria



MAŁE GĘSTOŚCI POLARYTONÓW (rozpraszanie elastyczne, prędkości naddźwiękowe)

(mała prędkość dźwięku)



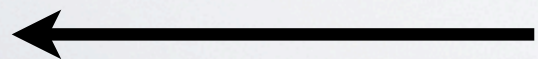
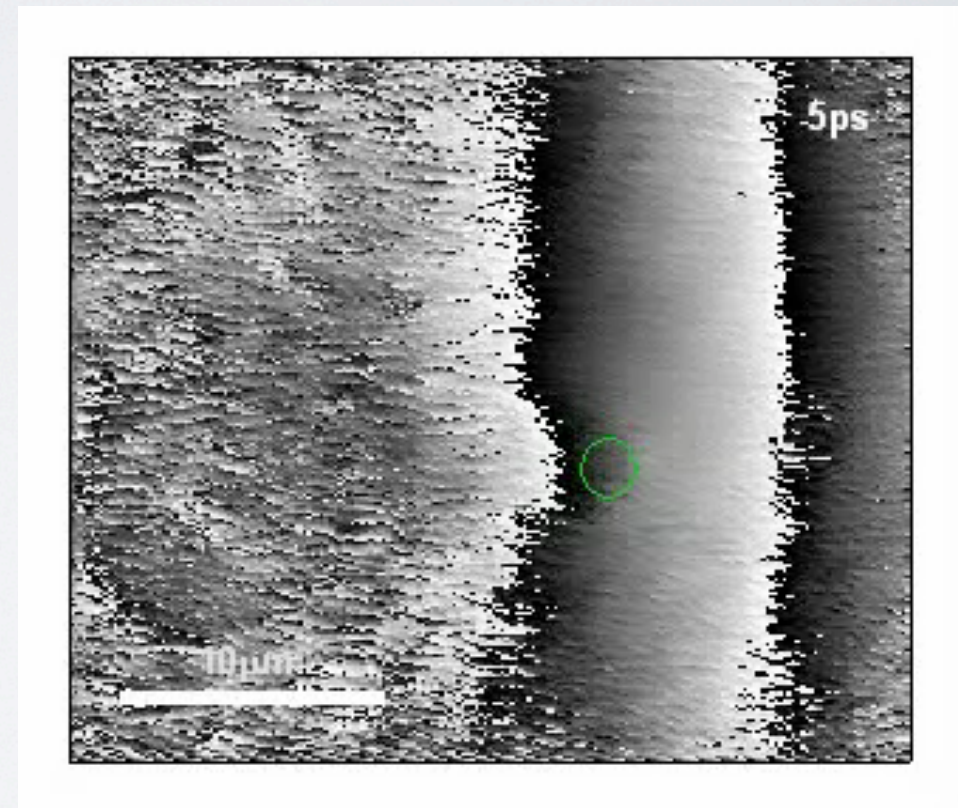
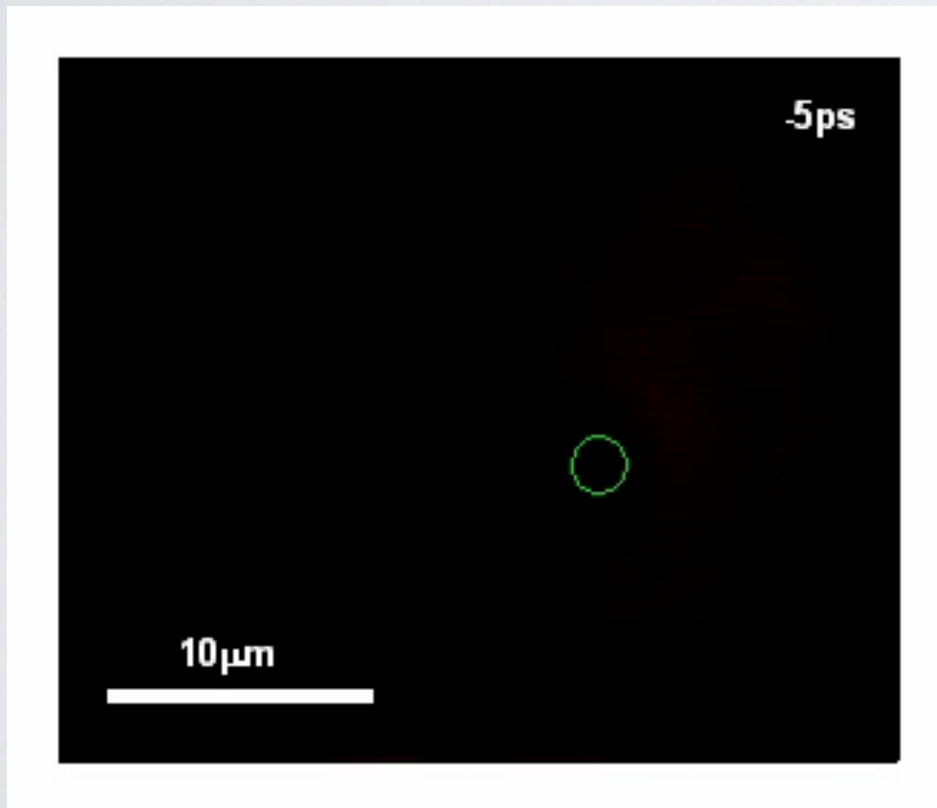
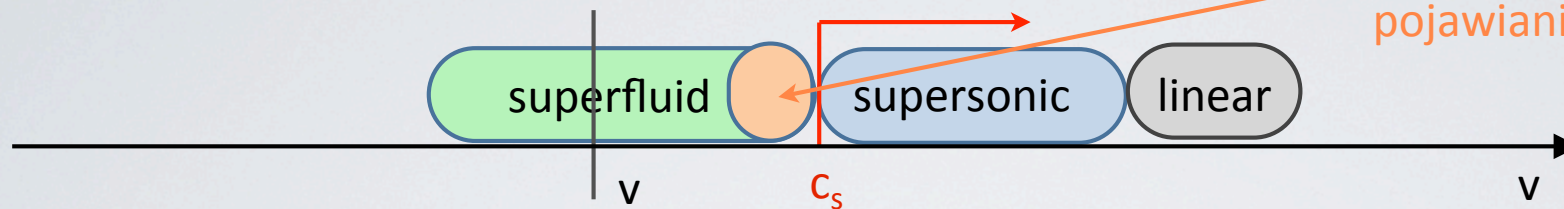
polariton flow

$$v = 1.13 \frac{\mu\text{m}}{\text{ps}}$$

MAŁE PRĘDKOŚCI

DLA DUŻYCH GĘSTOŚCI I MAŁYCH PRĘDKOŚCI

opór aerodynamiczny
+
pojawianie się par wirów



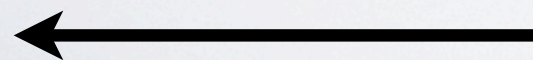
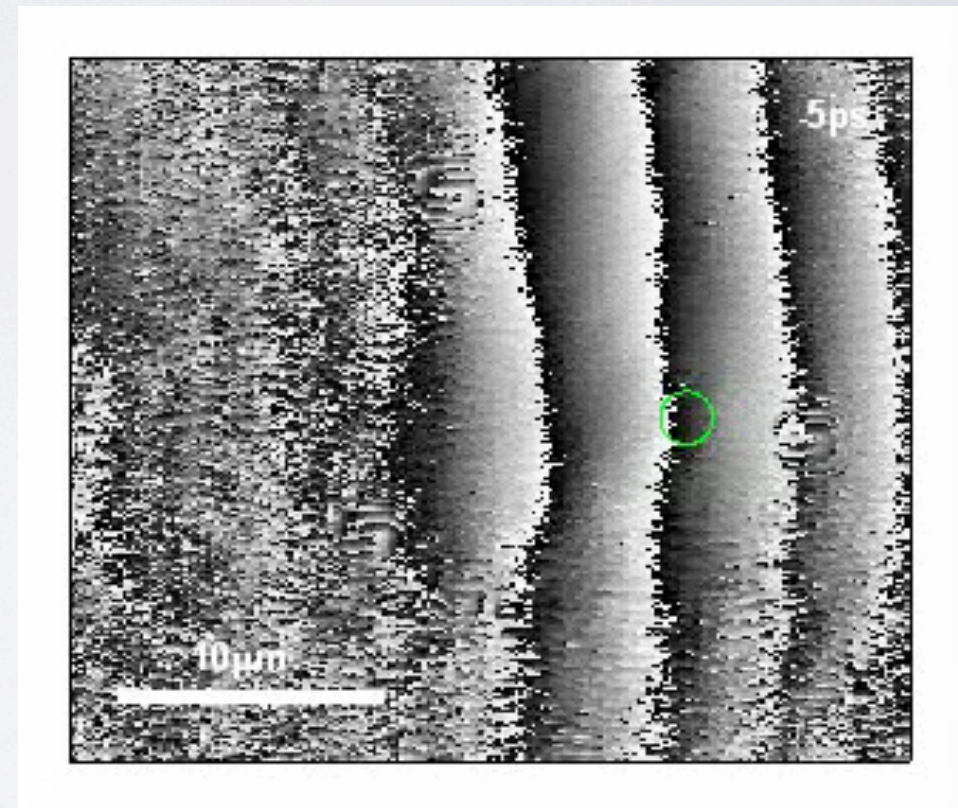
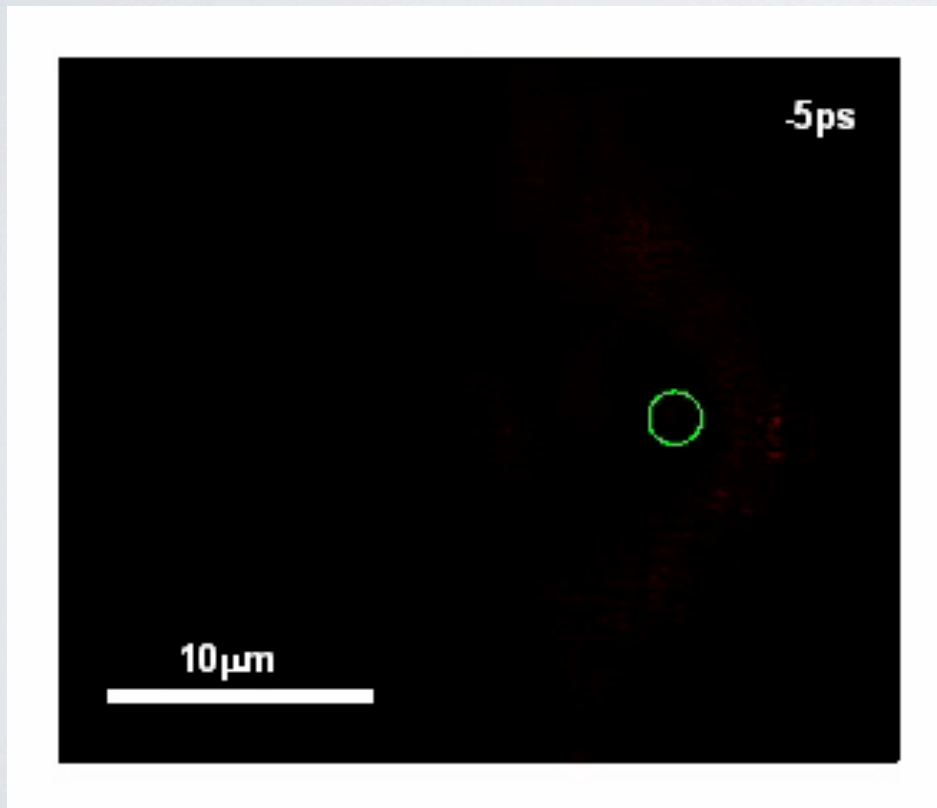
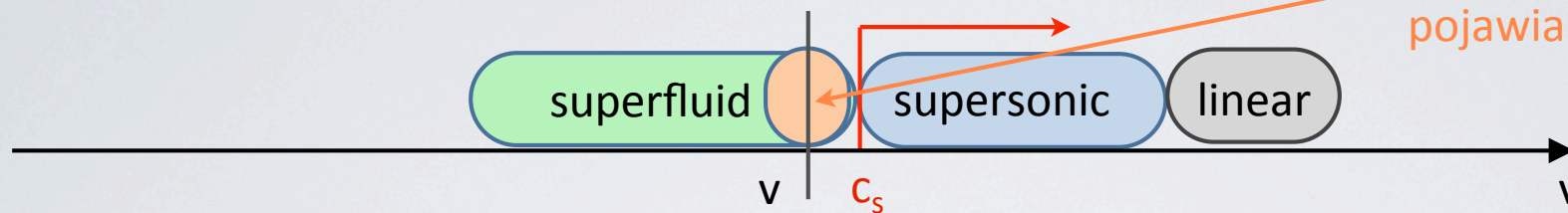
polariton flow

$$v = 0.6 \frac{\mu\text{m}}{\text{ps}}$$

REŻIM PRĘDKOŚCI DLA OBSERWACJI PAR WIRÓW DLA DUŻYCH GĘSTOŚCI

(duża prędkość dźwięku)

opór aerodynamiczny
+
pojawianie się par wirów

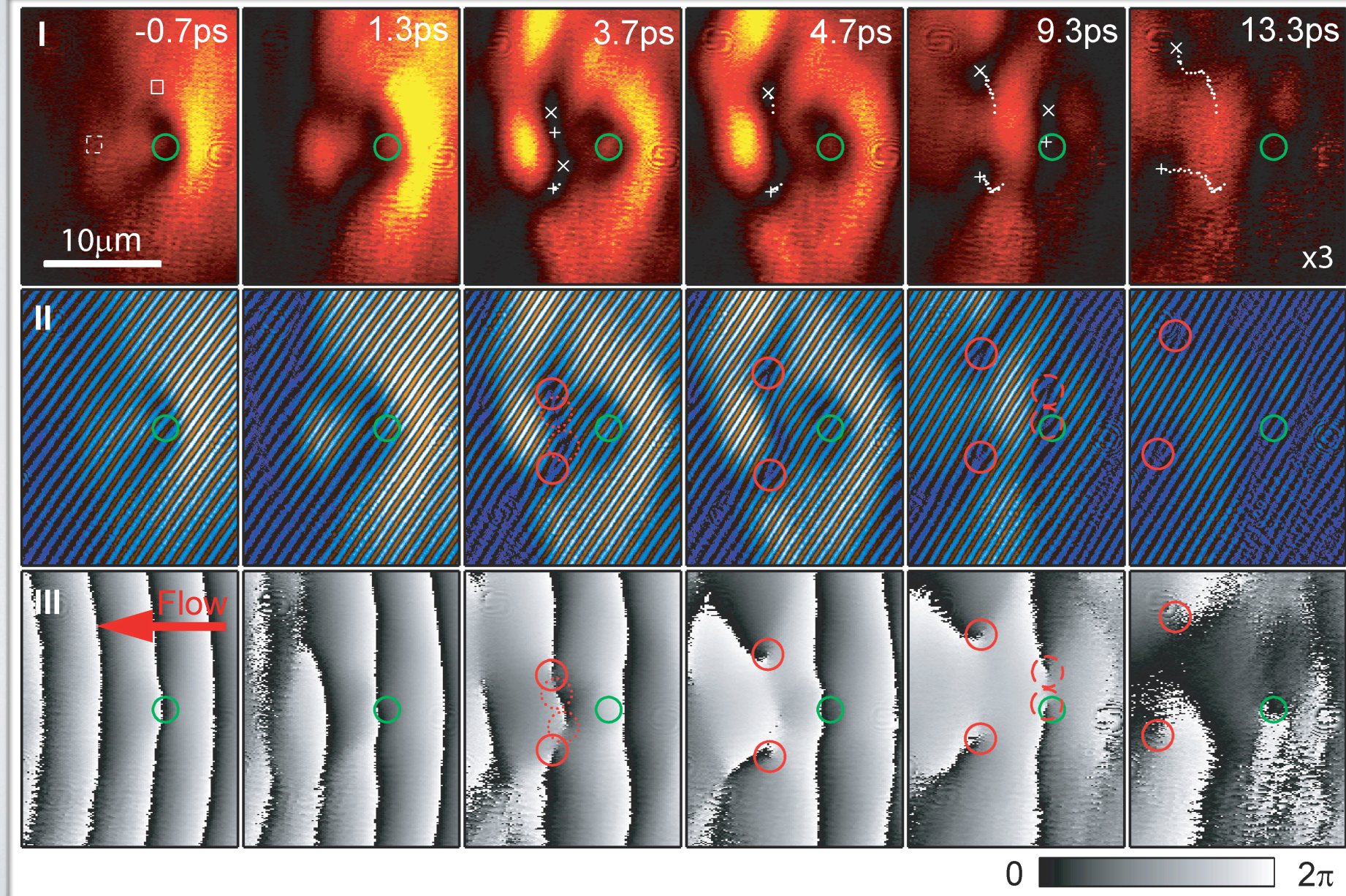


polariton flow

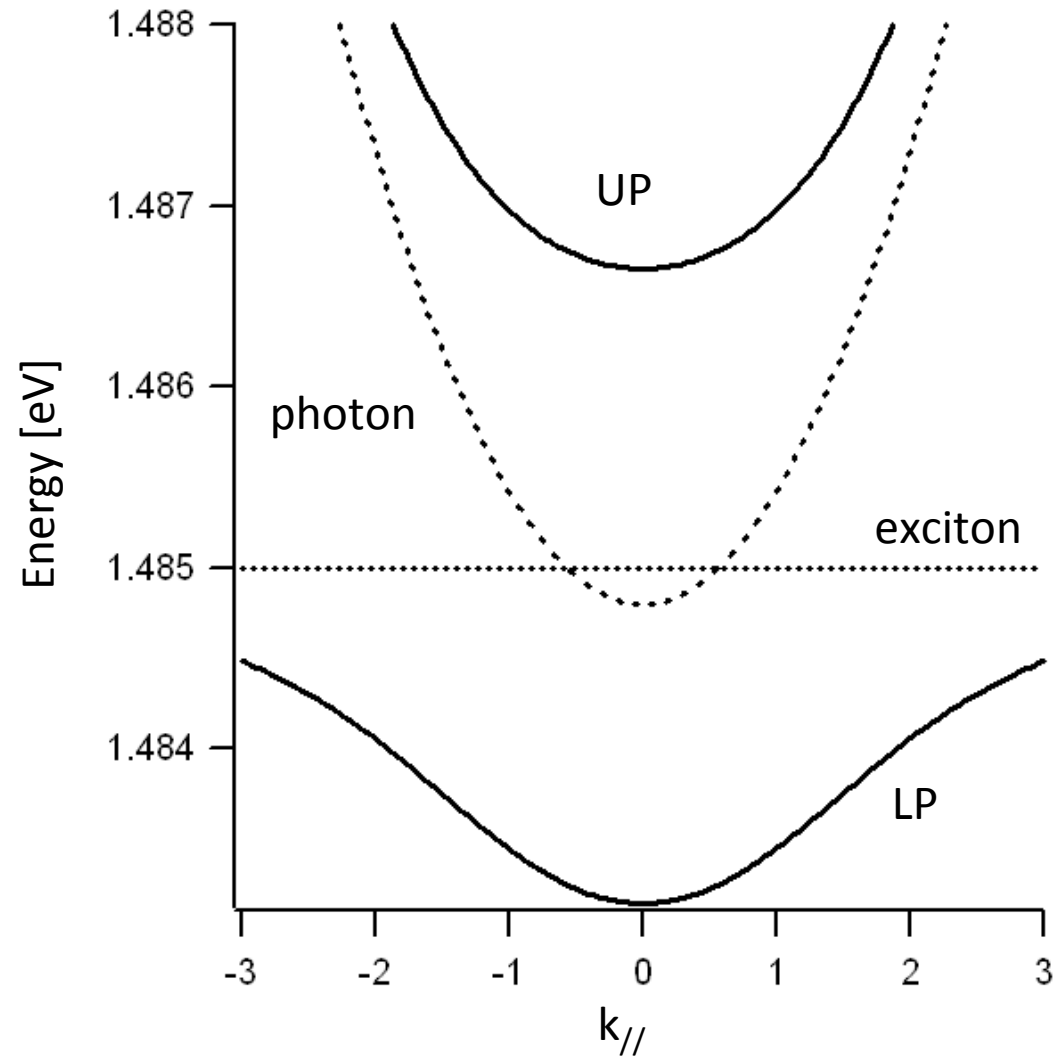
$$v = 1.13 \frac{\mu\text{m}}{\text{ps}}$$

REŻIM PRĘDKOŚCI DLA OBSERWACJI PAR WIRÓW DLA DUŻYCH GĘSTOŚCI

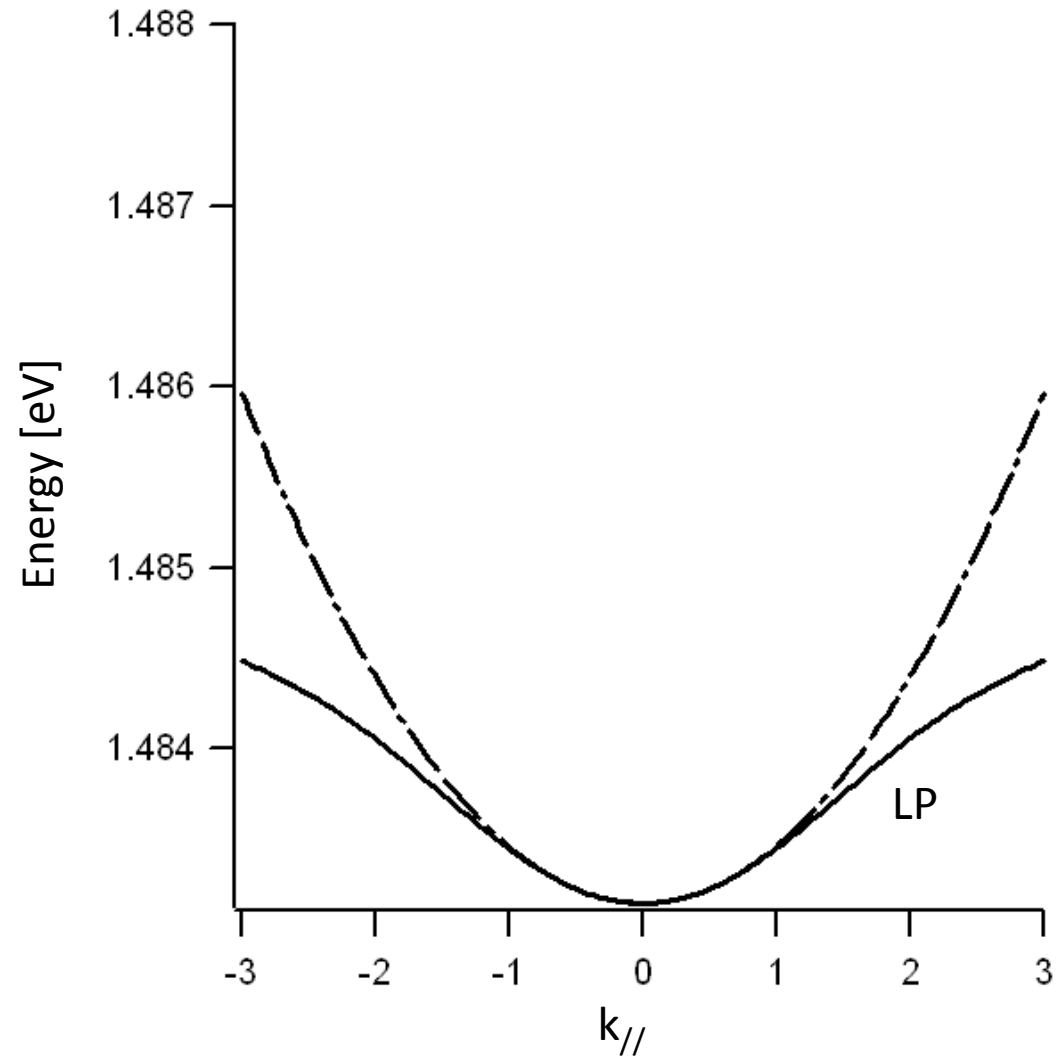
(duża prędkość dźwięku)



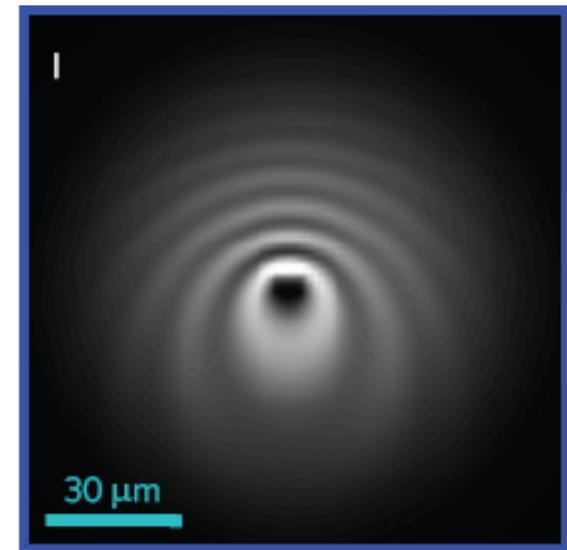
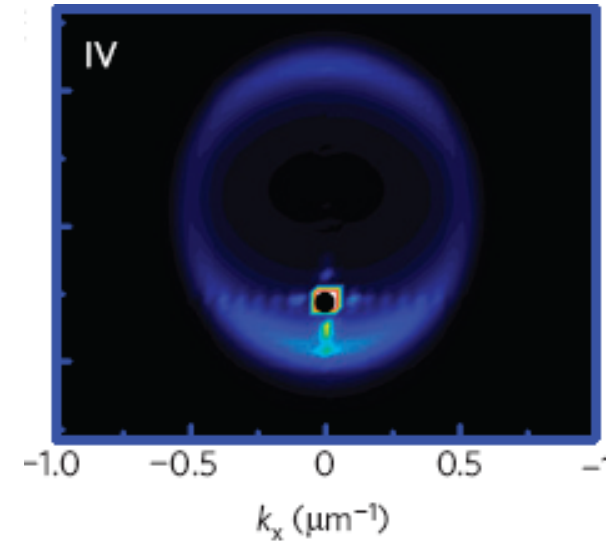
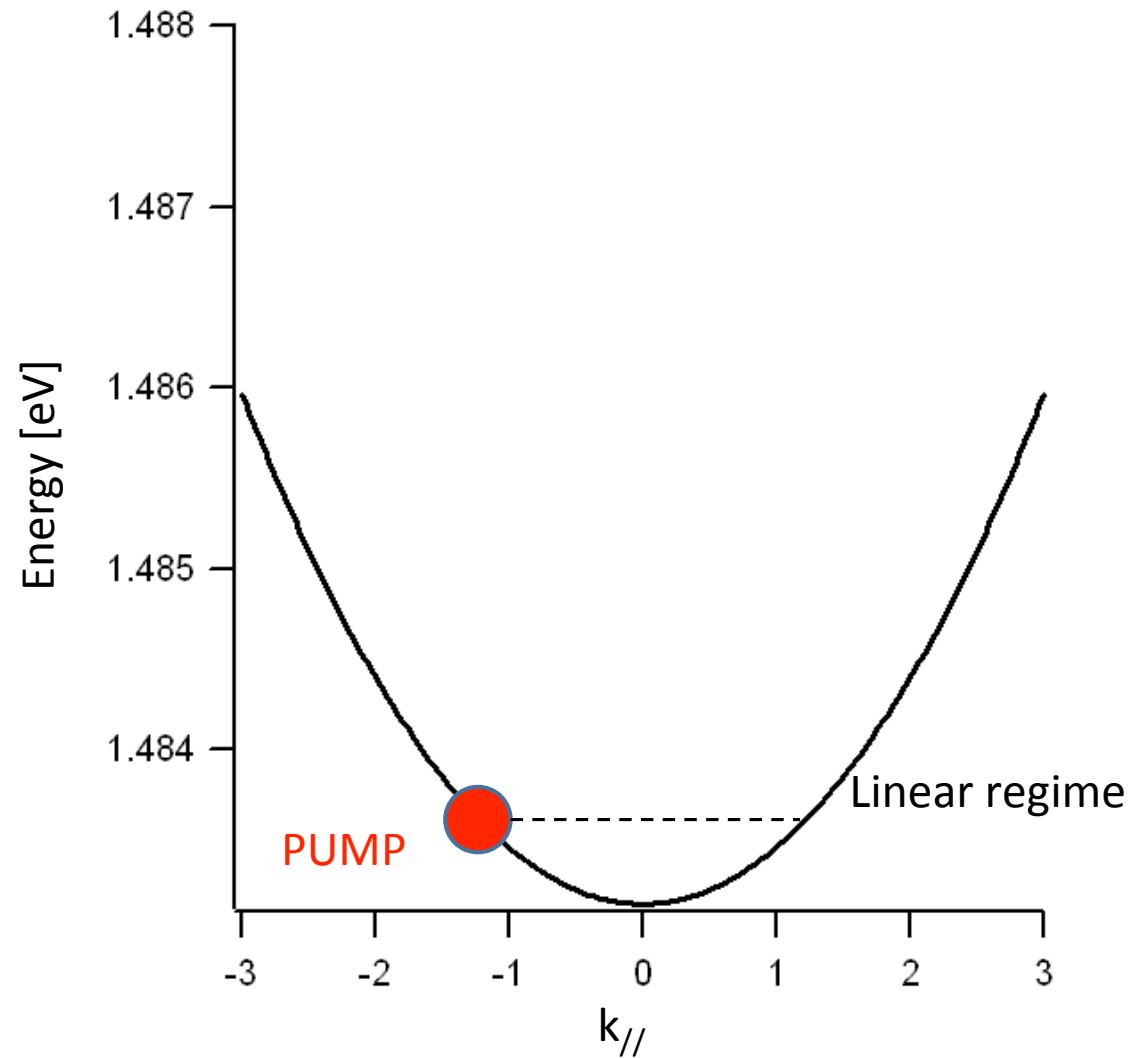
FIZYCZNE PODSTAWY NADCIEKŁOŚCI POLARYTONÓW



FIZYCZNE PODSTAWY NADCIEKŁOŚCI POLARYTONÓW



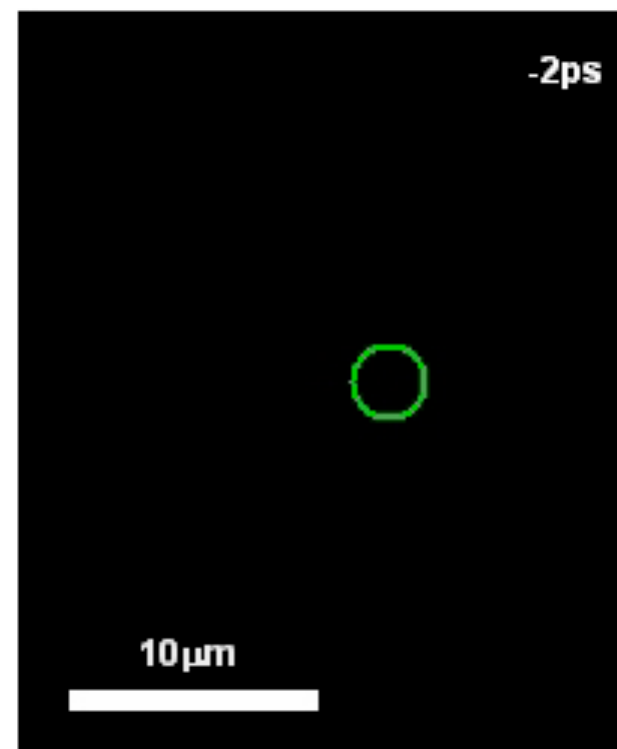
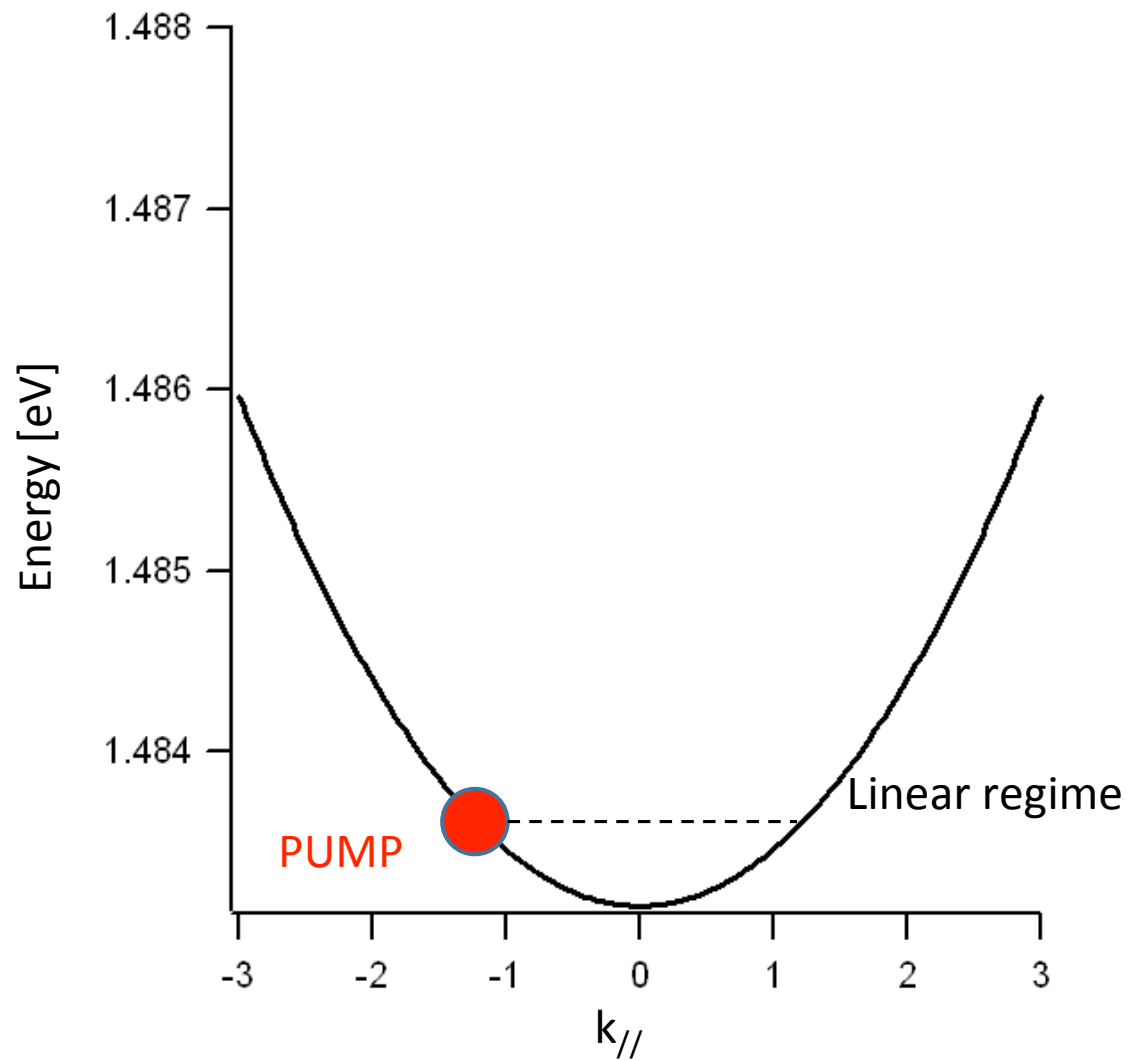
FIZYCZNE PODSTAWY NADCIEKŁOŚCI POLARYTONÓW



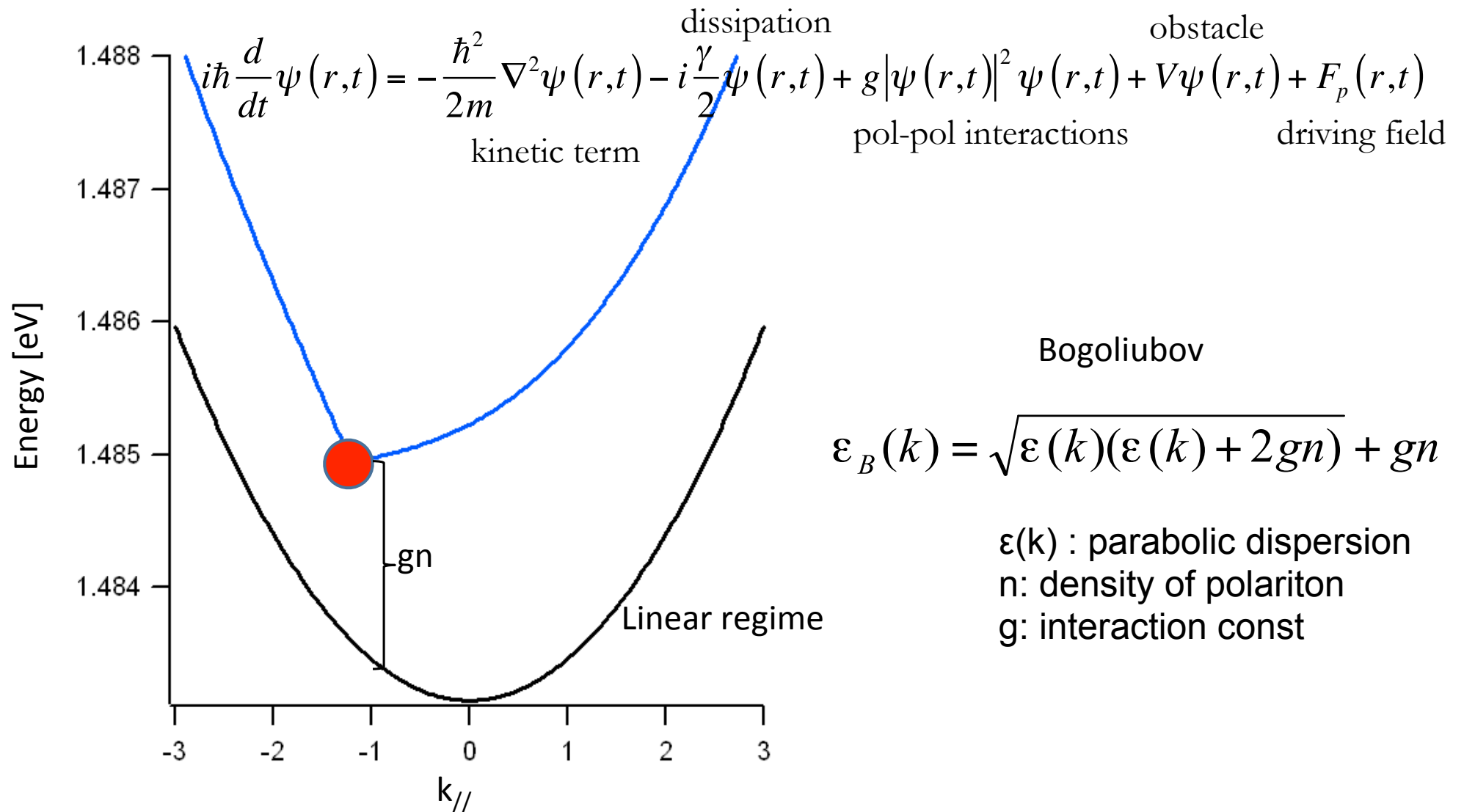
Theory: Carusotto & Ciuti, PRL **93**, 166401 (2004)

Theory + experiments: Amo *et al*, Nature Phys. **5**, 805 (2009)

FIZYCZNE PODSTAWY NADCIEKŁOŚCI POLARYTONÓW



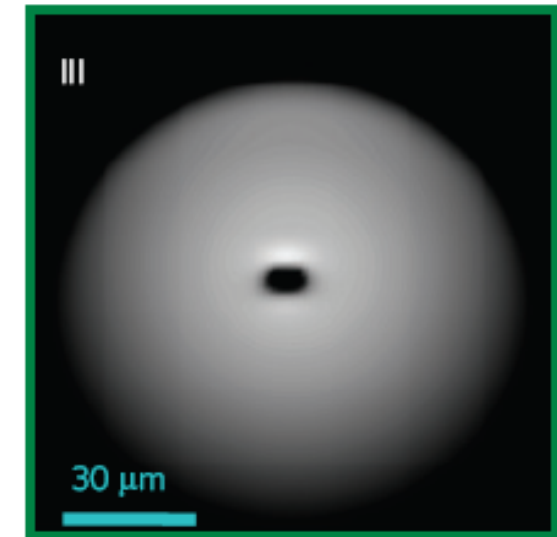
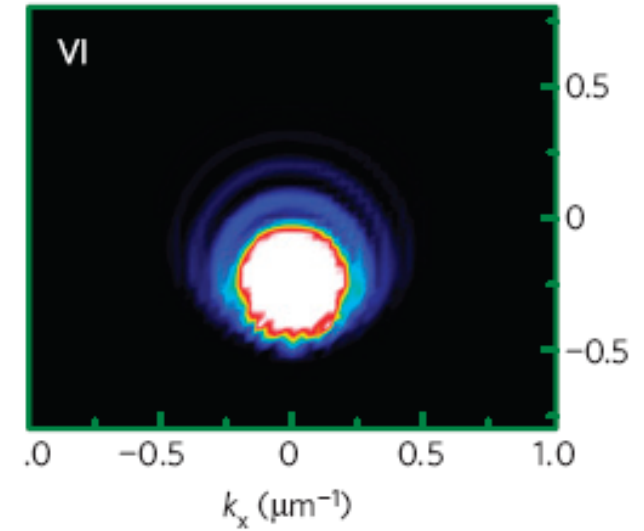
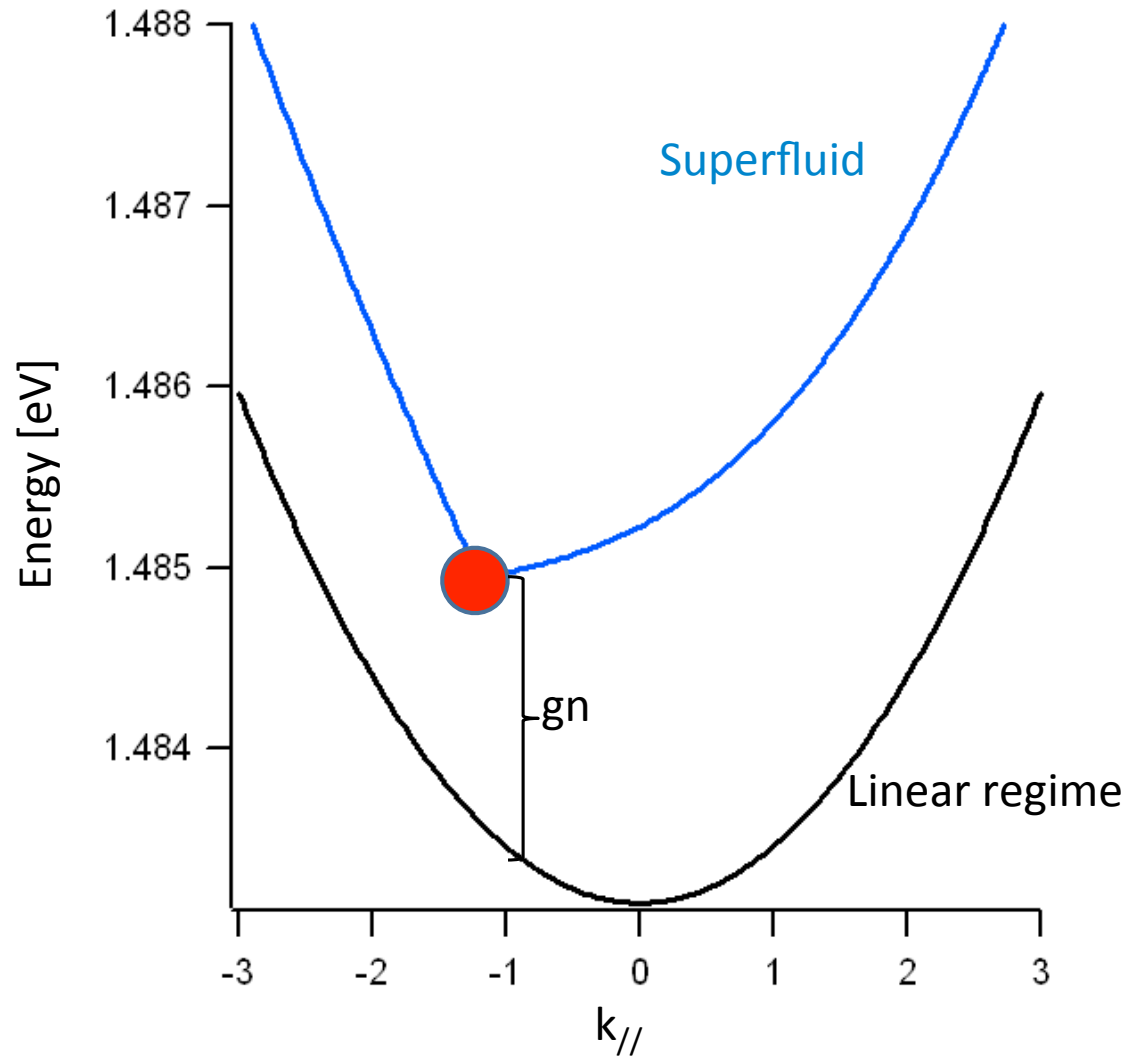
FIZYCZNE PODSTAWY NADCIEKŁOŚCI POLARYTONÓW



Theory: Carusotto & Ciuti, PRL **93**, 166401 (2004)

Theory + experiments: Amo *et al*, Nature Phys. **5**, 805 (2009)

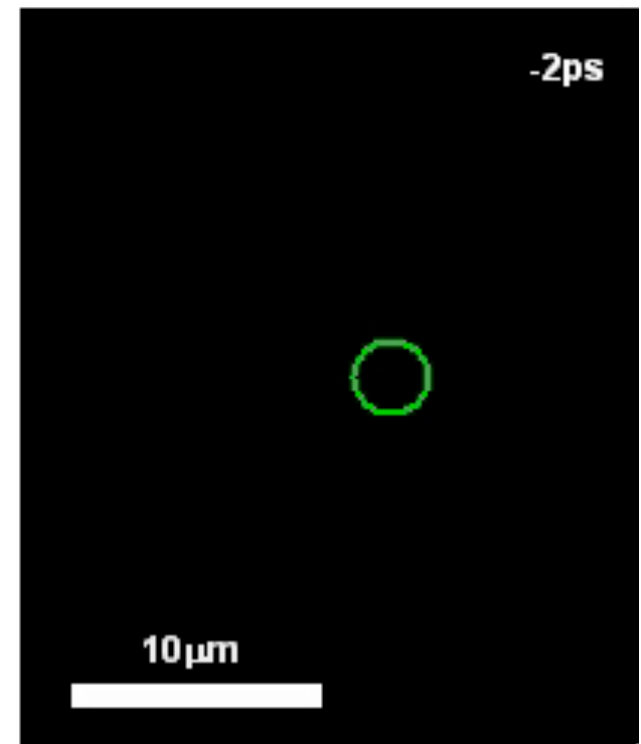
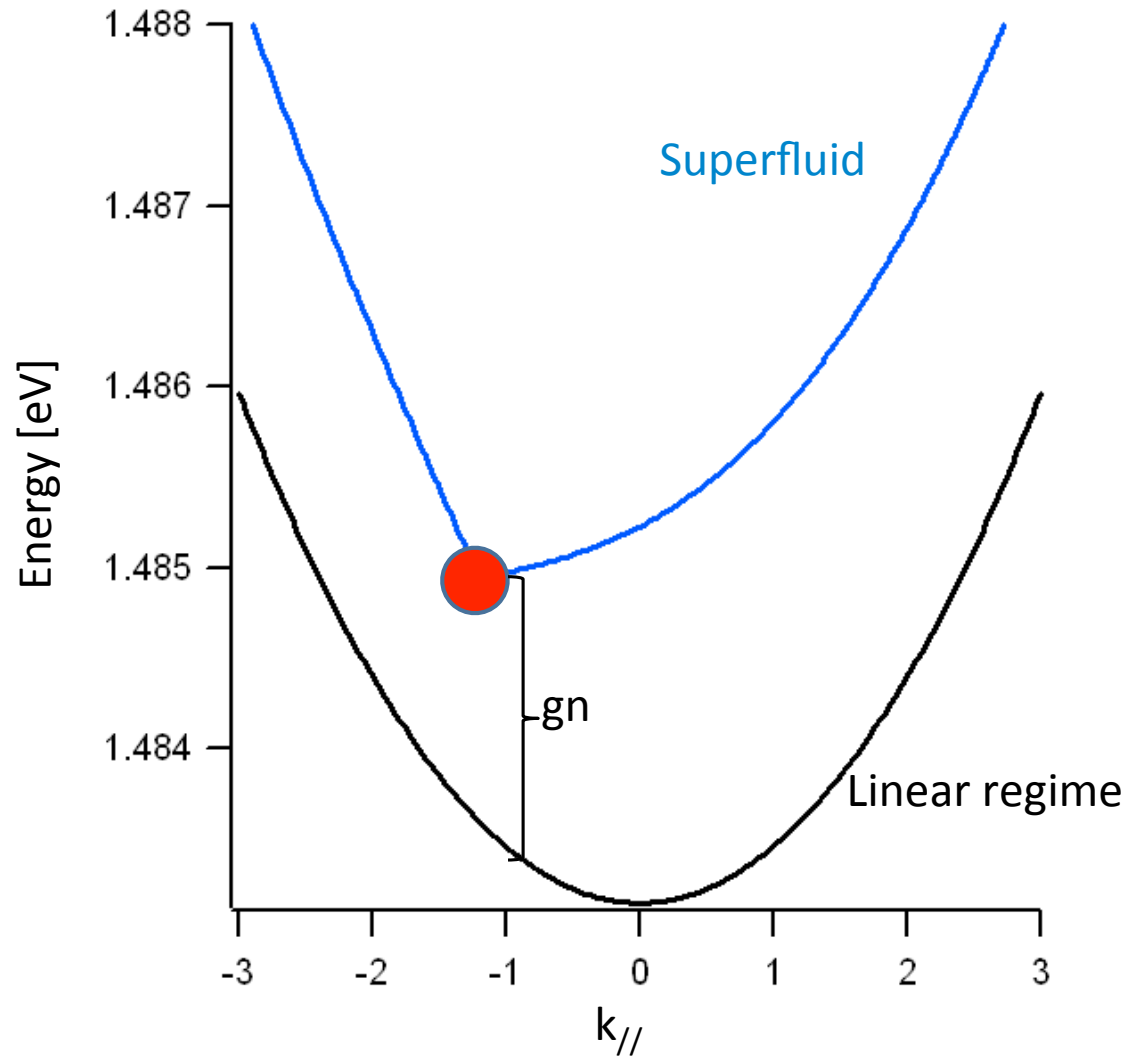
FIZYCZNE PODSTAWY NADCIEKŁOŚCI POLARYTONÓW



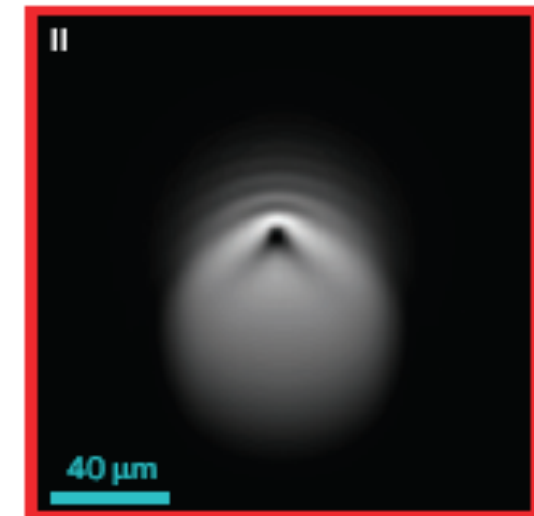
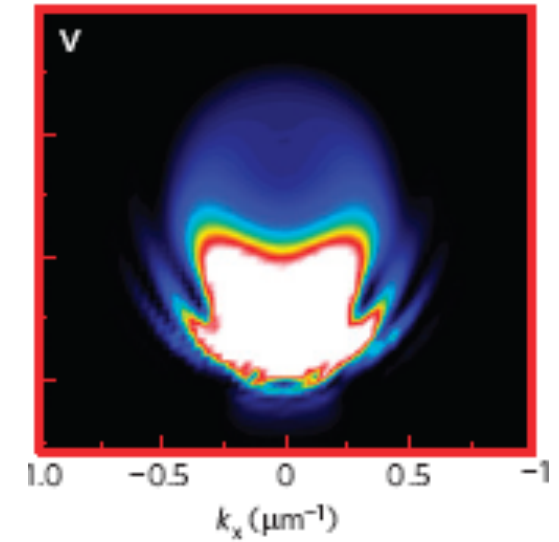
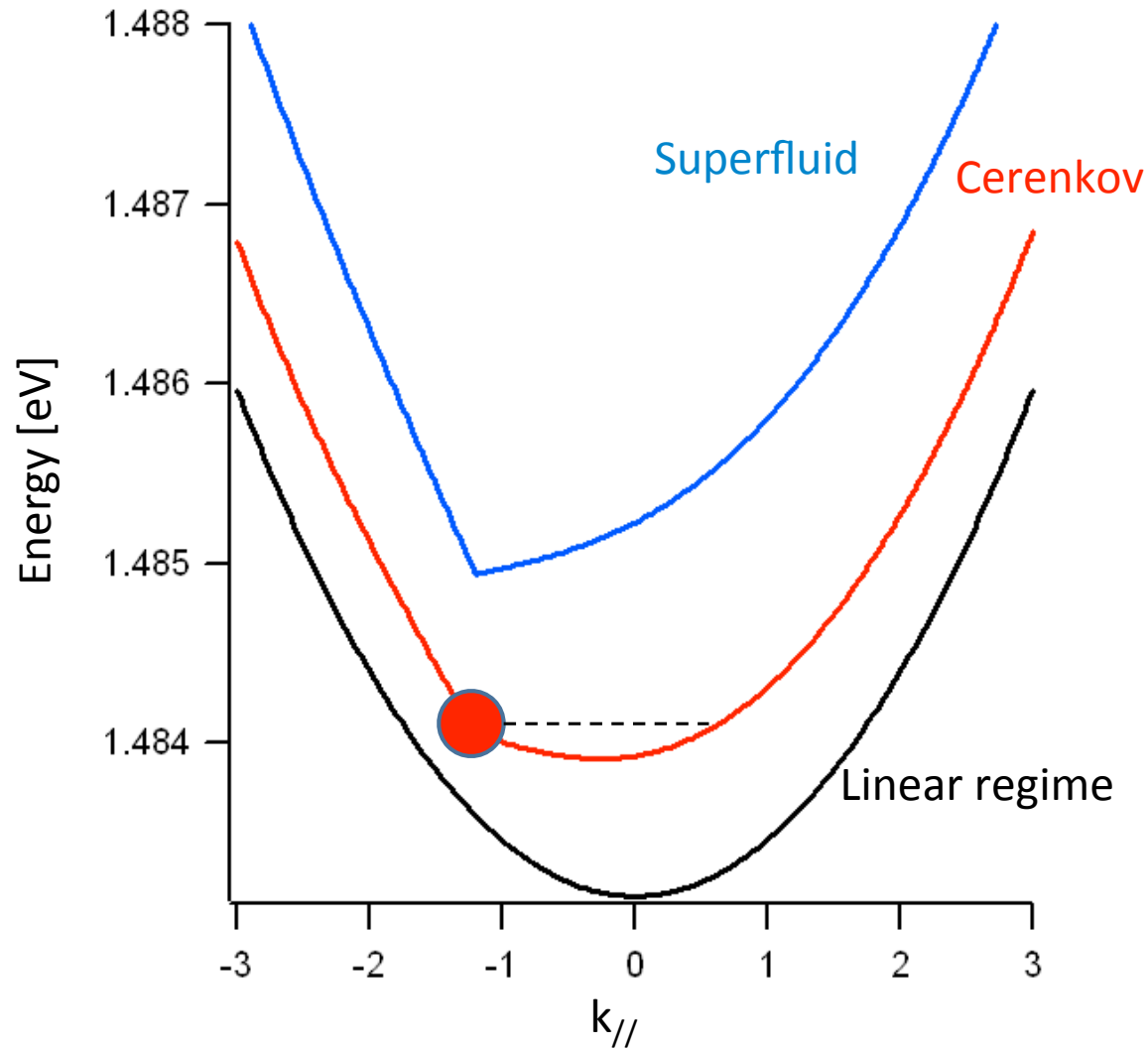
Theory: Carusotto & Ciuti, PRL **93**, 166401 (2004)

Theory + experiments: Amo *et al*, Nature Phys. **5**, 805 (2009)

FIZYCZNE PODSTAWY NADCIEKŁOŚCI POLARYTONÓW



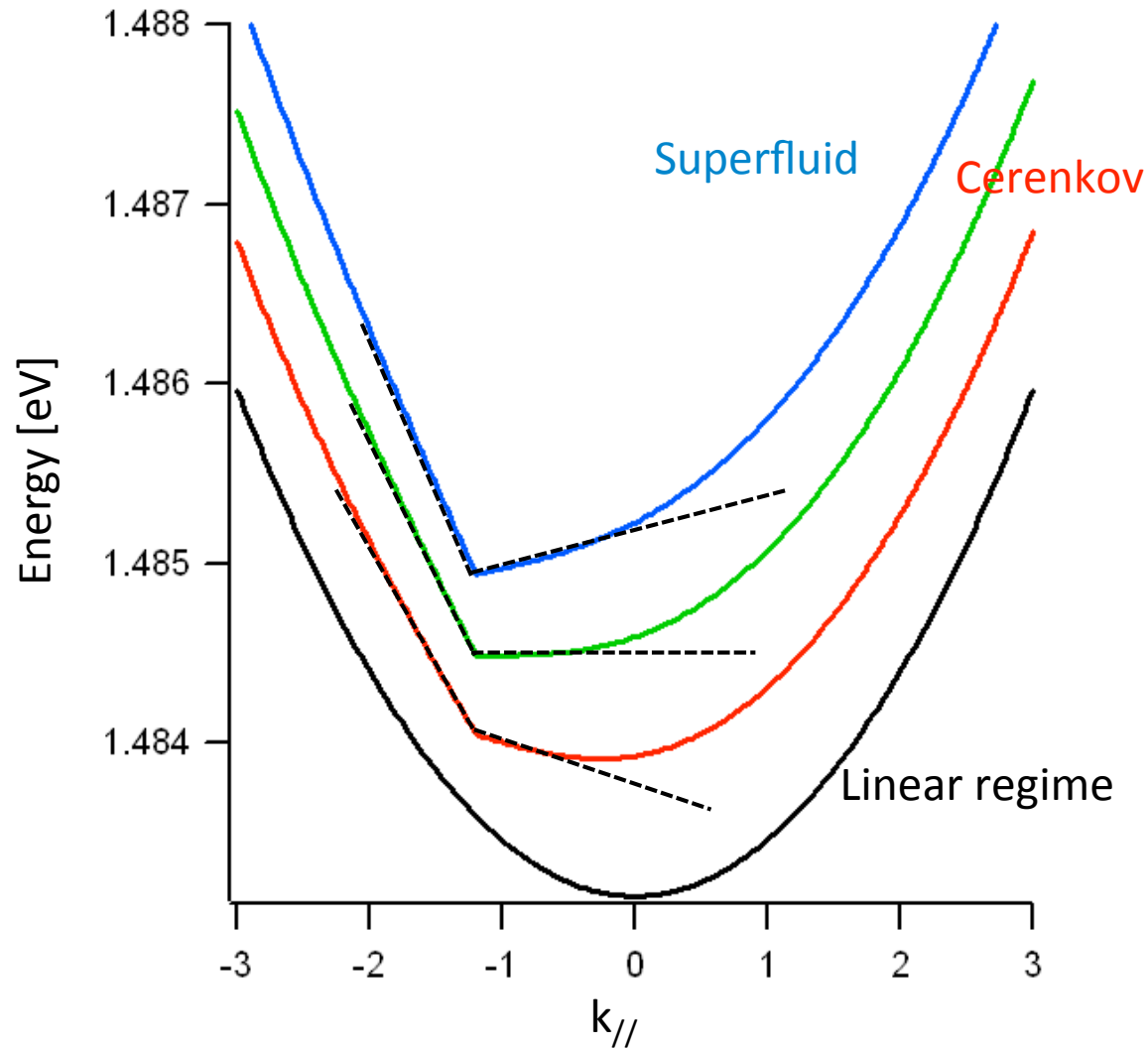
FIZYCZNE PODSTAWY NADCIEKŁOŚCI POLARYTONÓW



Theory: Carusotto & Ciuti, PRL **93**, 166401 (2004)

Theory + experiments: Amo *et al*, Nature Phys. **5**, 805 (2009)

FIZYCZNE PODSTAWY NADCIEKŁOŚCI POLARYTONÓW



$$v < c_s$$

$$v > c_s$$

$$v = c_s$$

$$v = \frac{\partial \omega}{\partial k} = \frac{\hbar k}{m_{LP}}$$

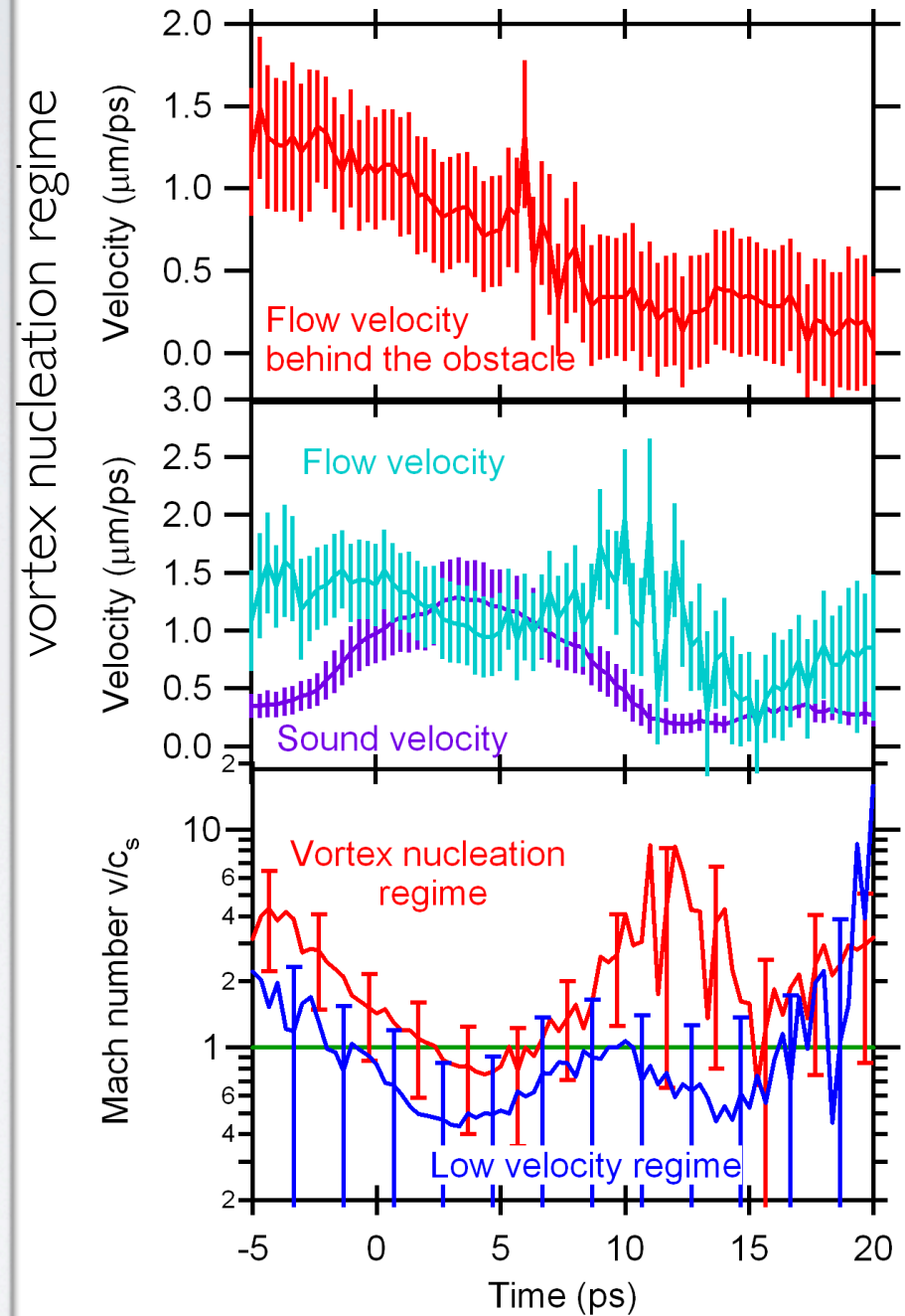
$$c_s = \sqrt{\frac{gn}{m_{LP}}}$$

Theory: Carusotto & Ciuti, PRL **93**, 166401 (2004)

Theory + experiments: Amo *et al*, Nature Phys. **5**, 805 (2009)

ANALIZA JAKOŚCIOWA

$$\vec{v} = \frac{\hbar}{m} \vec{\nabla} \phi \quad c_s = \sqrt{\frac{ng}{m}}$$



TAKE HOME MESSAGES

Przełomowe odkrycia w fizyce polarytonów:

KONDENSACJA BOSEGO - EINSTEINA

NADCIEKŁOŚĆ

WIRY KWANTOWE

PÓŁ-WIRY KWANTOWE

SOLITONY

STANY ZLOKALIZOWANE

Duże możliwości fizyki polarytonów z punktu widzenia badań tych stanów kwantowych:

temperatury kriogeniczne lub nawet pokojowa

wzbudzenie optyczne

bezpośredni dostęp do fazy i gęstości polarytonów !!!

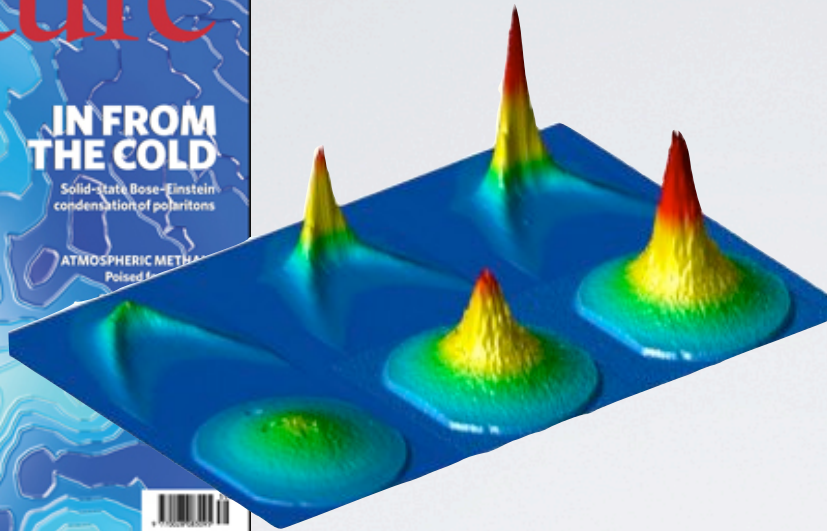
obrazowanie przestrzenne i pędowe

**Zastosowania : POLARYTONIKA - optoelektronika
oparta na urządzeniach w których wykorzystuje się
własności polarytonów**

KONDENSAT w ciele stałym? tak!!!



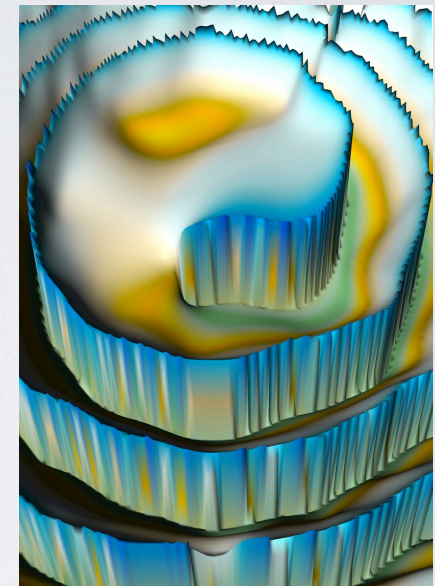
J. Kasprzak, et. al *Nature* **443**, 409 (2006)



WIR, PÓŁ-WIR !

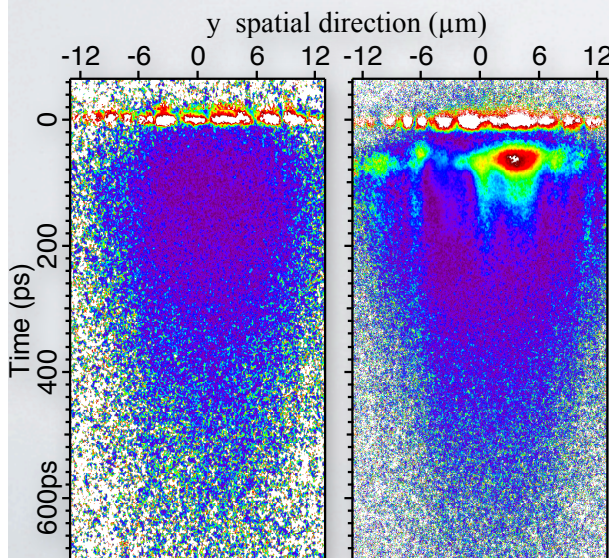
K.G.Lagoudakis, et al. *Nature Phys.* **4**, 706 (2008)

K.G.Lagoudakis, et al. *Science* **326**, 974 (2009)



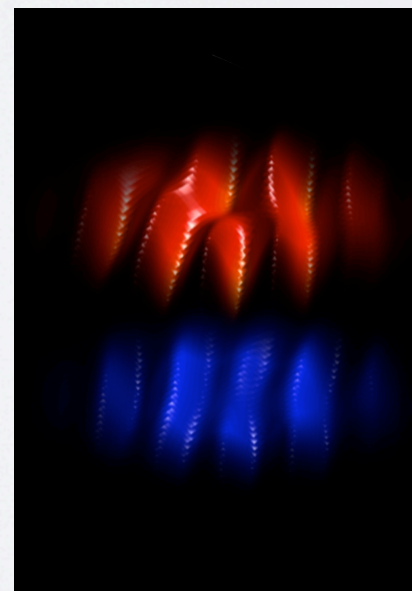
rotacja fazy o 2π
dookoła środka wiru

SPÓJNOŚĆ DALEKIEGO ZASIĘGU



dynamika
budowania
koherencji fazy w
przestrzeni

G. Nardin, B. Pietka et al. *PRL* **103**, 256402 (2009)



interferencja kondensatu
polarytonów w detekcji
rozdzielonych polaryzacji:
 σ^+ : dyslokacja typu fork-like
 σ^- : nie ma dyslokacji

NADCIEKŁOŚĆ POLARYTONÓW tak!!!

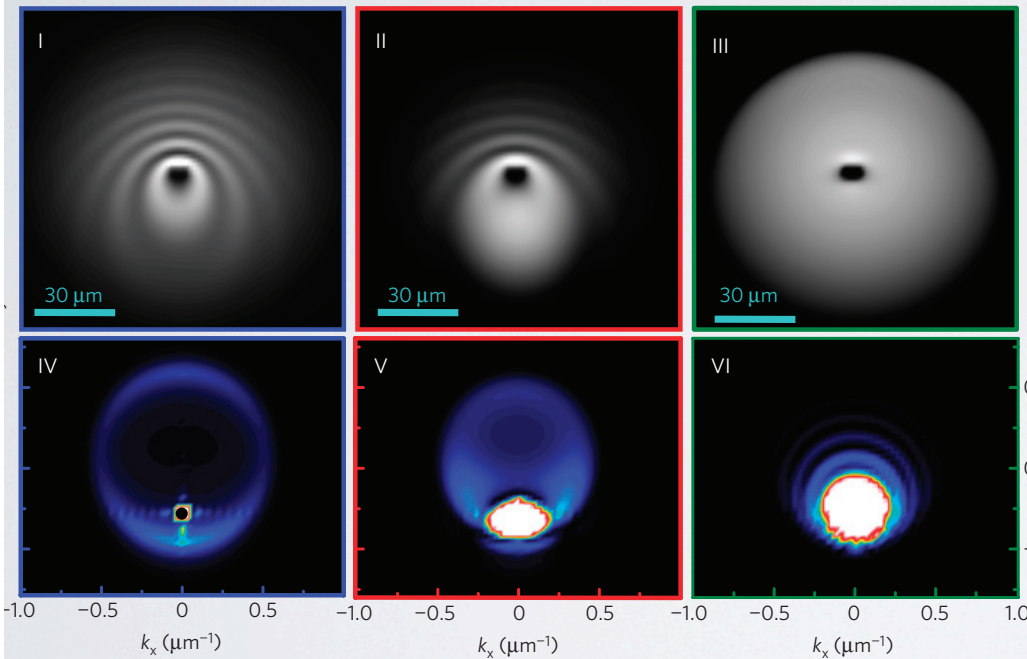
nature
physics

LETTERS

PUBLISHED ONLINE: 20 SEPTEMBER 2009 | DOI: 10.1038/NPHYS1364

Superfluidity of polaritons in semiconductor microcavities

Alberto Amo^{1*}, Jérôme Lefrère¹, Simon Pigeon², Claire Adrados¹, Cristiano Ciuti², Iacopo Carusotto³, Romuald Houdré⁴, Elisabeth Giacobino¹ and Alberto Bramati^{1*}



TURBULENCJE KWANTOWE

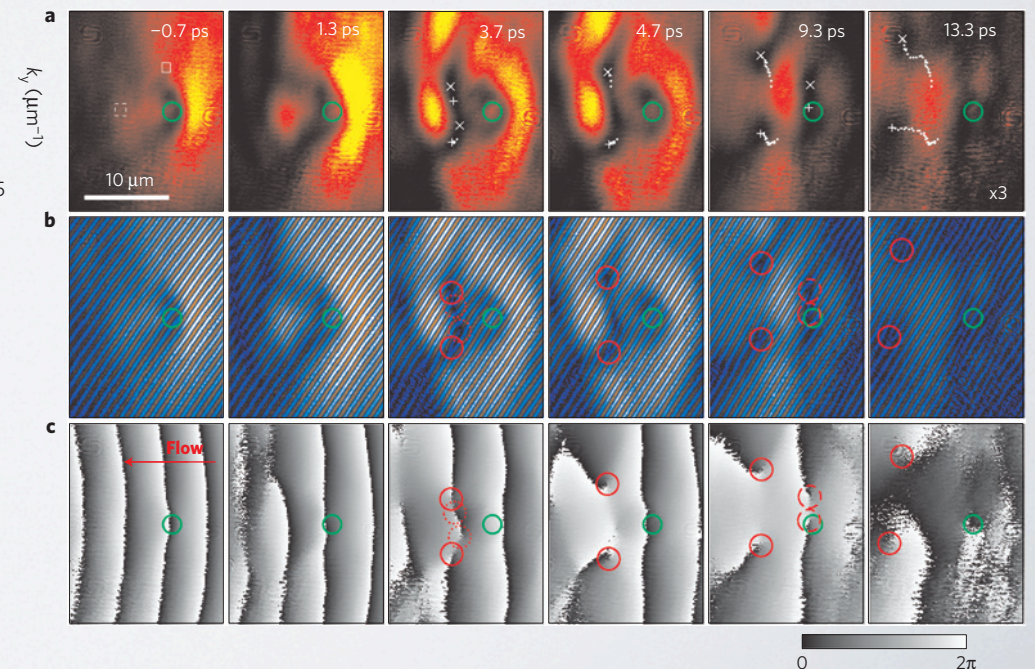
nature
physics

ARTICLES

PUBLISHED ONLINE: 3 APRIL 2011 | DOI: 10.1038/NPHYS1959

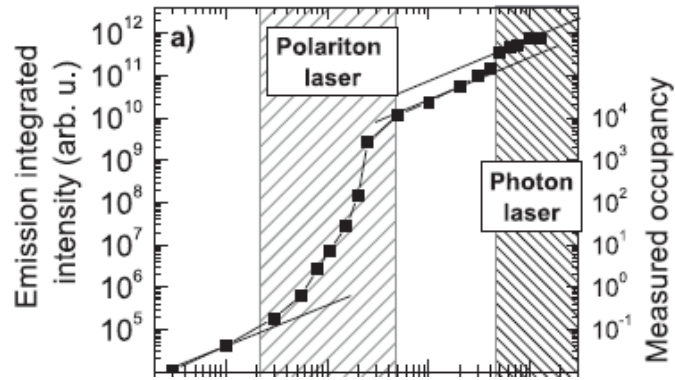
Hydrodynamic nucleation of quantized vortex pairs in a polariton quantum fluid

Gaël Nardin^{*}, Gabriele Grosso, Yoan Léger, Barbara Piętka[†], François Morier-Genoud and Benoît Deveaud-Plédran



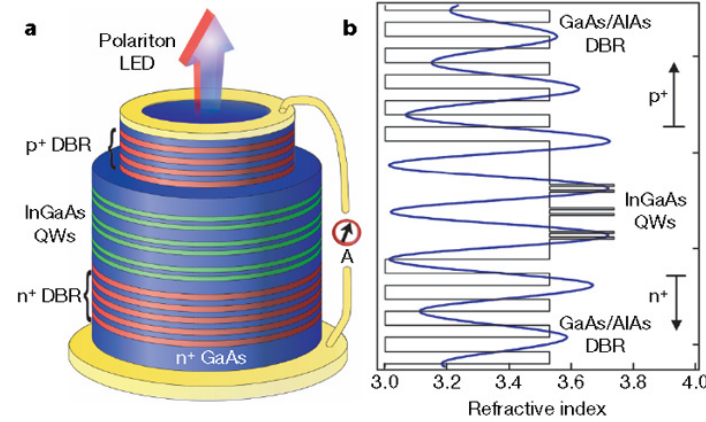
« POLARITRONIC » DEVICES

Polariton Lasers



D. Bajoni *et al*, PRL **100**, 047401 (2008)

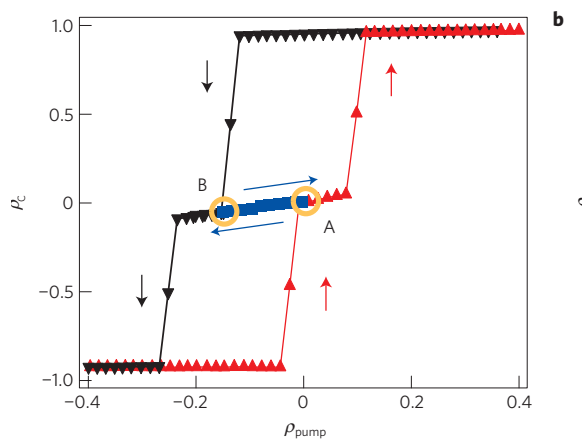
Polariton LED near room temperature



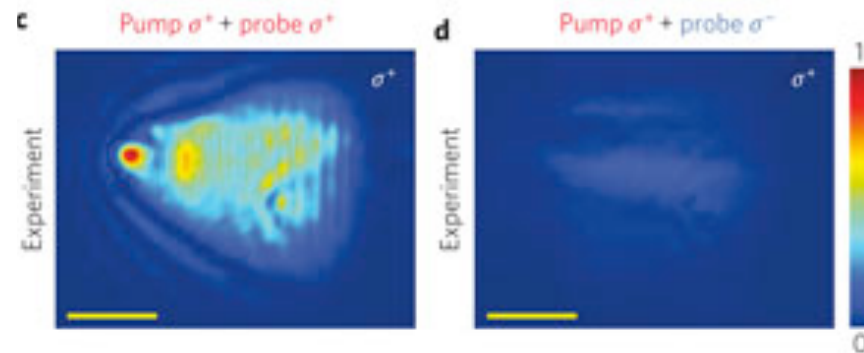
Tsintzos, S. I., *et al. Nature* **453**, 372–375 (2008).

W STRONĘ BRAMEK LOGICZNYCH I PAMIĘCI OPTYCZNYCH

Spin switches



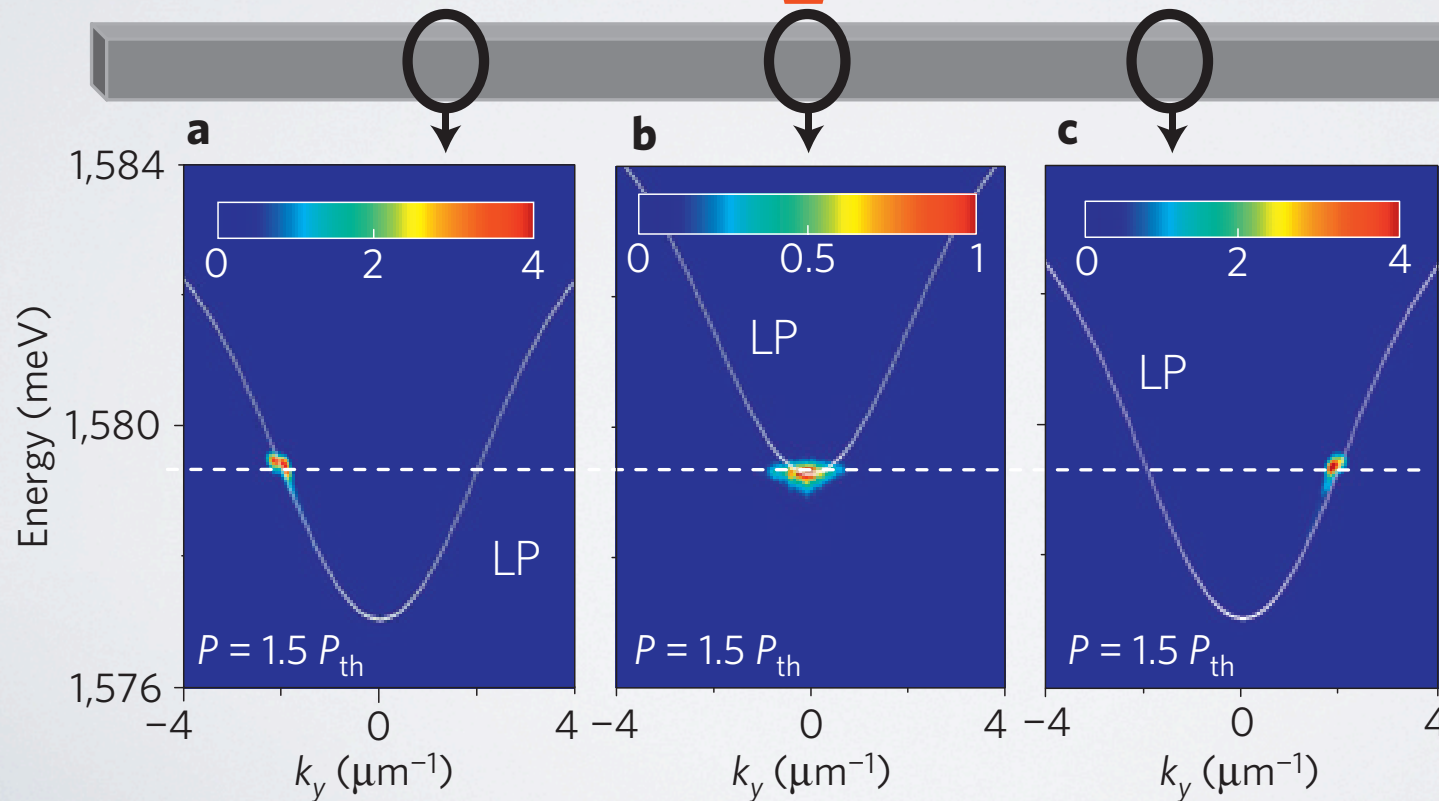
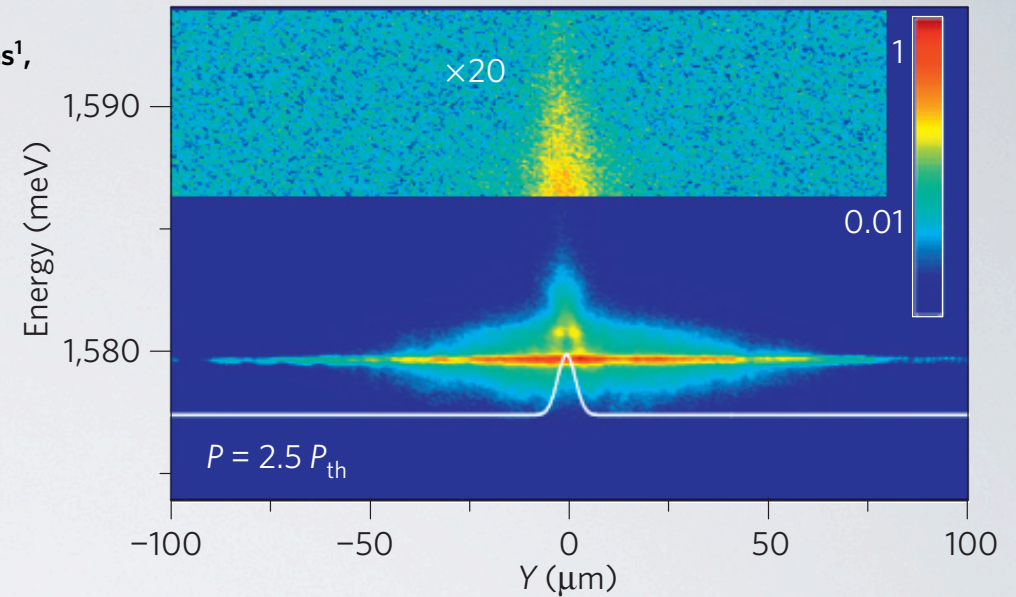
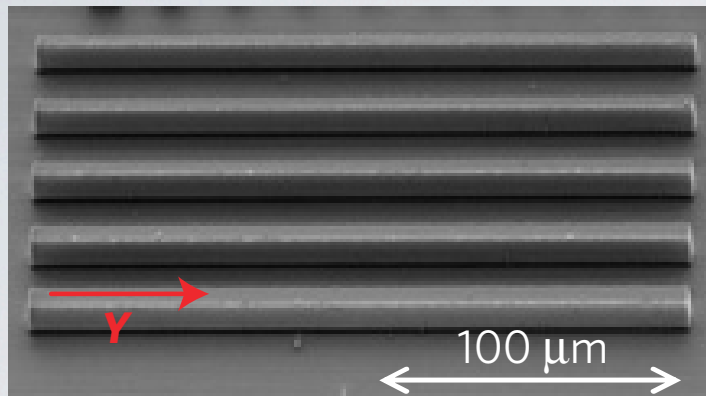
TK Paraiso, *et al. Nature Materials* **9**, 655 (2010).



A Amo, *et al. Nature Physics* **4**, 361 (2010).

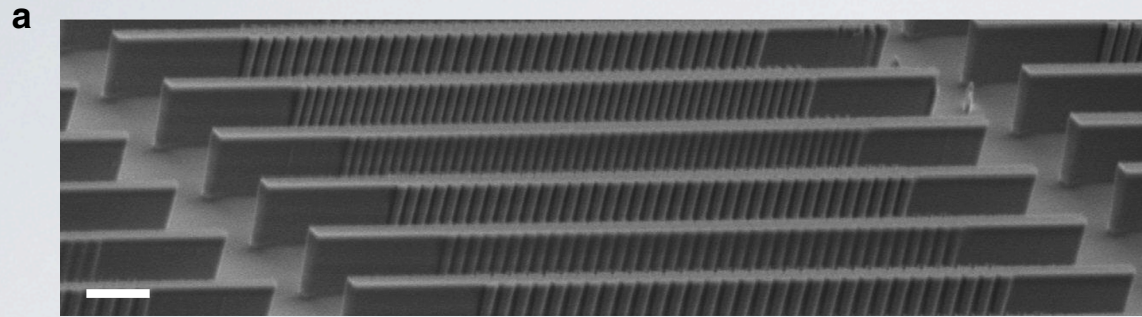
Spontaneous formation and optical manipulation of extended polariton condensates

E. Wertz¹, L. Ferrier¹, D. D. Solnyshkov², R. Johne², D. Sanvitto³, A. Lemaître¹, I. Sagnes¹, R. Grousson⁴, A. V. Kavokin⁵, P. Senellart¹, G. Malpuech² and J. Bloch^{1*}

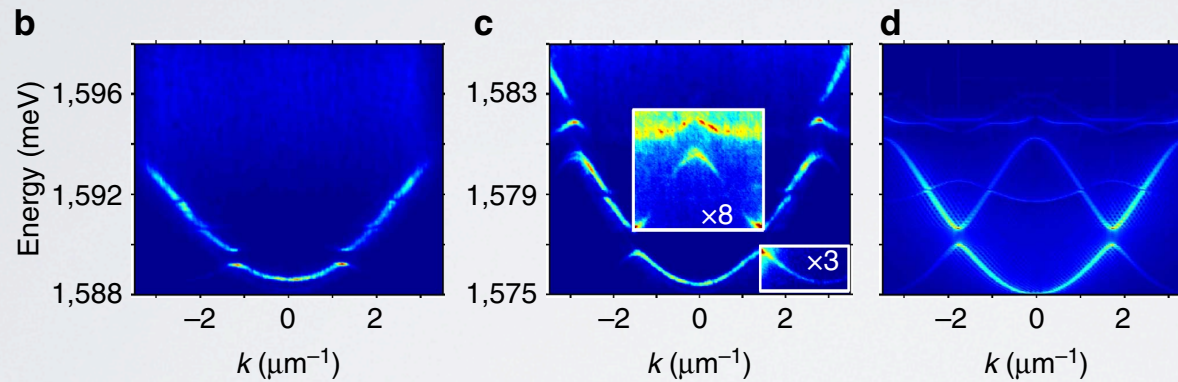


zaobserwowano propagację polarytonów na odległościach do 200 mikrometrów

KONDENSAT POLARYTONÓW W POSTACI SOLITONÓW W PERIODYCZNYCH STRUKTURACH 1D



D. Tanese, et al. Nature Communications (2013)



JASNE I CIEMNE SOLITONY

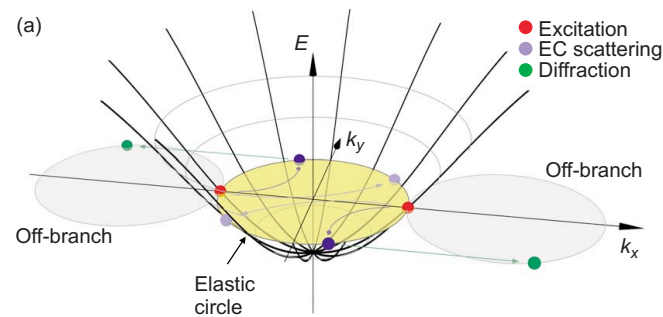
M. Sich et al., *Nature Photonics* **6**, 50 (2012)

G. Grosso, et al., *Phys. Rev. B* **86**, 020509(R) (2011)

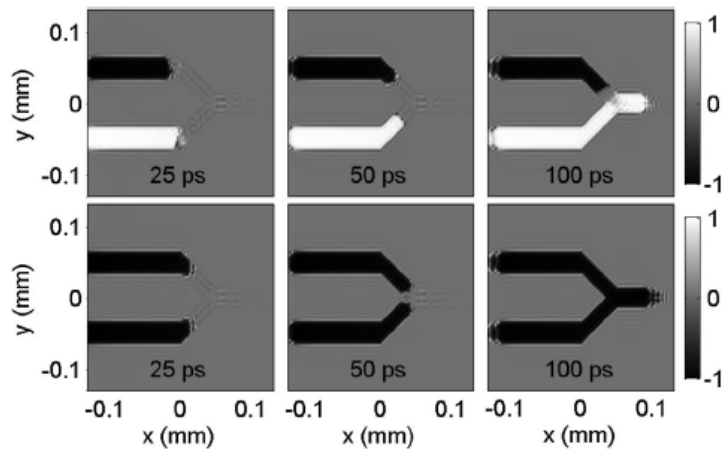
THEORETICAL PROPOSALS – NEAR FUTURE REALITY

Polariton logic gates polarization controlled

T. Ostatnicky et al., PRB 81, 125319 2010

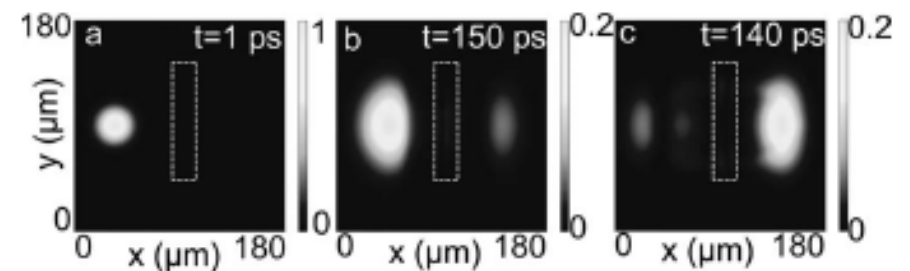


POLARITON « NEURONS » – OPTICAL CIRCUITS



T.C.H Liew *et al*, PRL **101**, 016402 (2008)

Spin Transistors



R. Johne *et al*, Phys. Rev. B **81**, 125327 (2010)

Konstantinos Logoudakis

Gaël Nardin

Gabriele Grosso

Taofiq Paraiso

Yoan Léger

Francois Morier - Genoud

prof. Benoît Deveaud-Plédran

IPEQ, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) Switzerland

Jacek Kasprzak

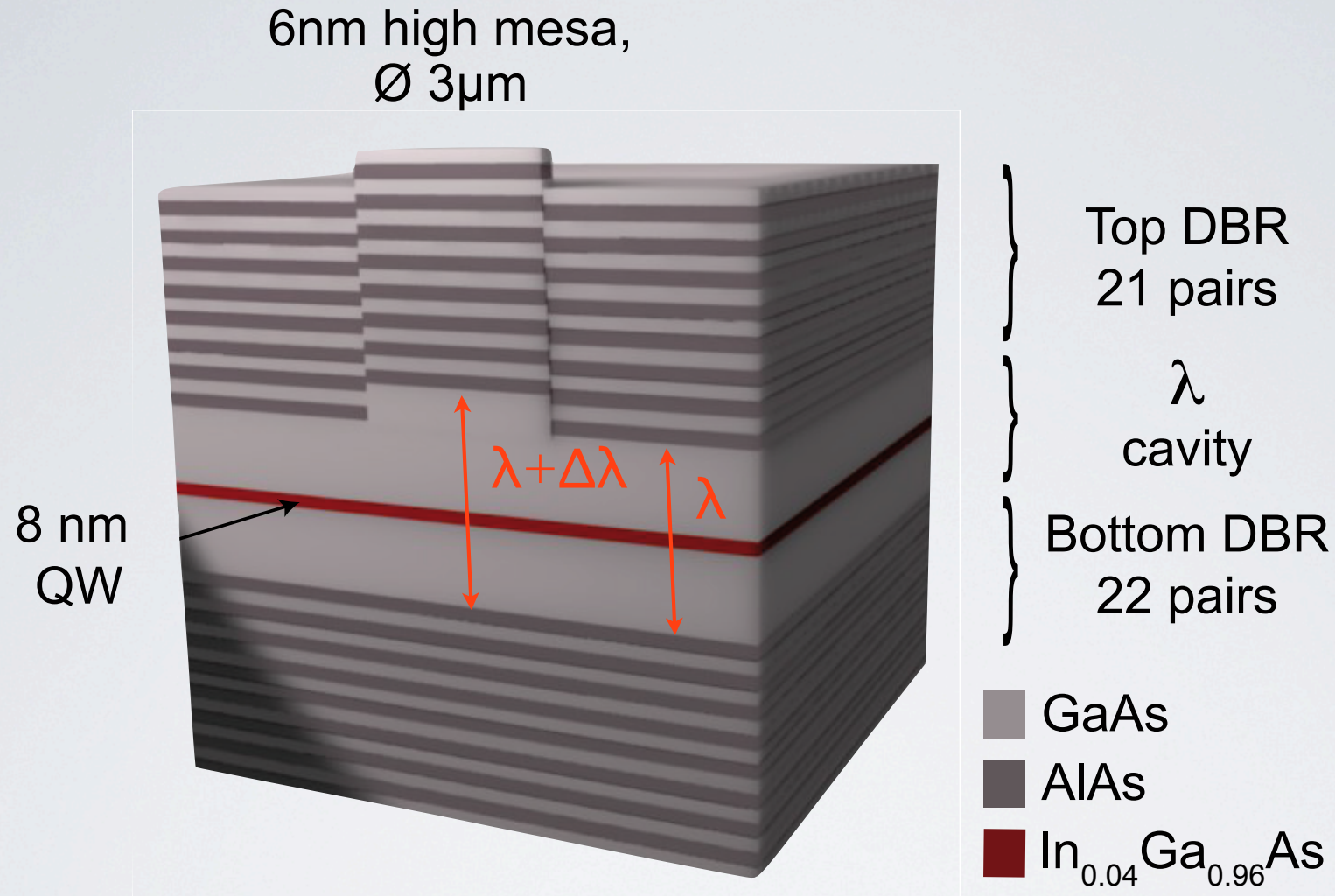
Maxime Richard

CNRS, Institut Luis Neel, Grenoble, France

POLARYTONOWE „KROPKI KWANTOWE”

CZYLI
JAK ZOBRAZOWAĆ FUNKCJĘ FALOWĄ STANÓW
ZLOKALIZOWANYCH

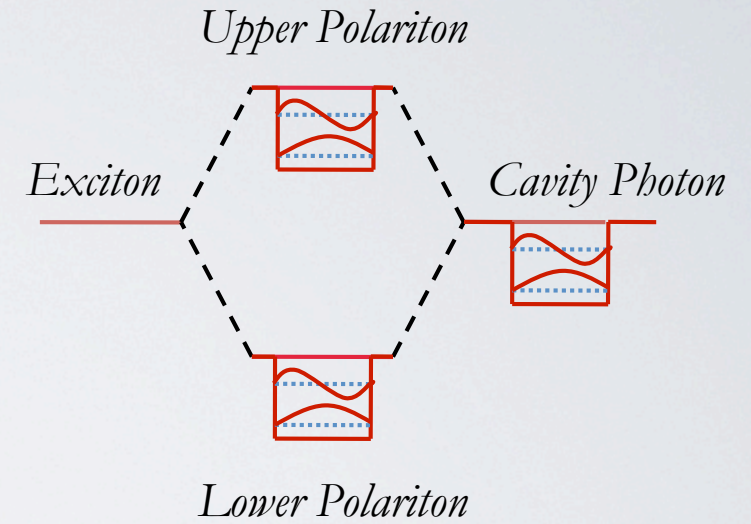
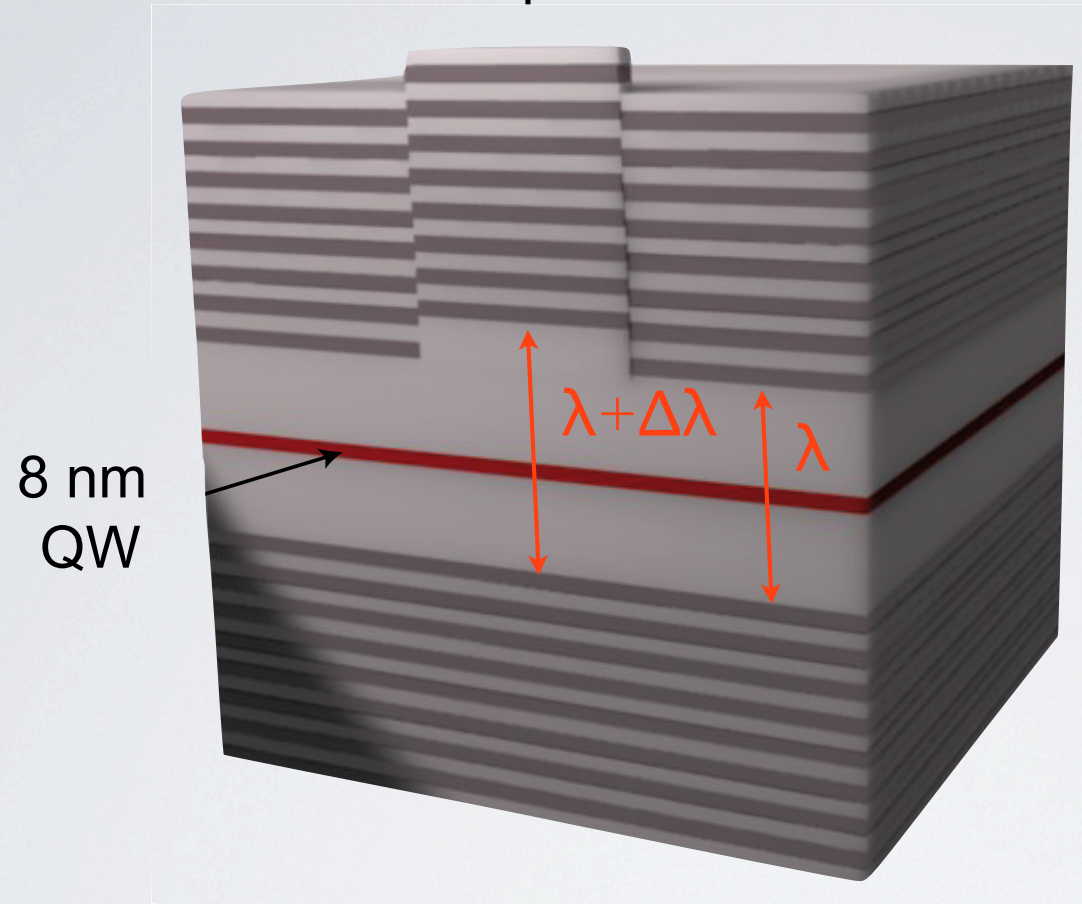
LATERAL CONFINEMENT



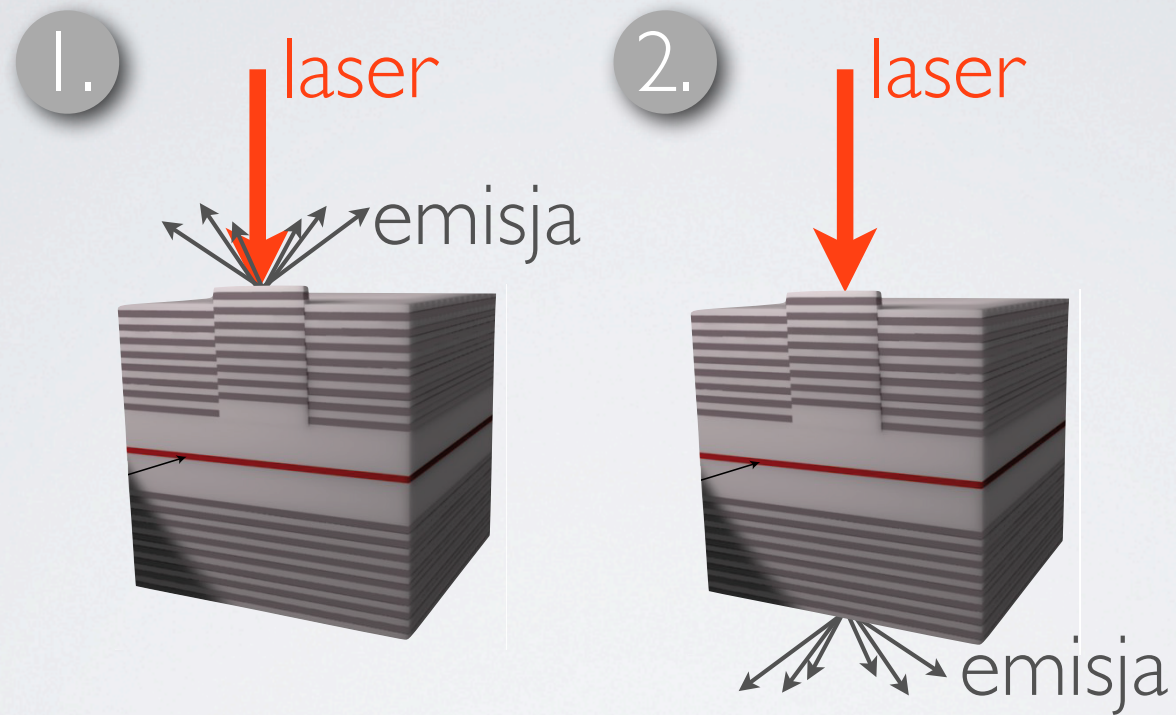
- Local circular variations of the cavity length provide traps for the photonic component of the polaritons
- Diameter of the traps : 3.5, 9 and 19 μm
- $\Omega_{0D} = 3.35\text{meV}$

LATERAL CONFINEMENT

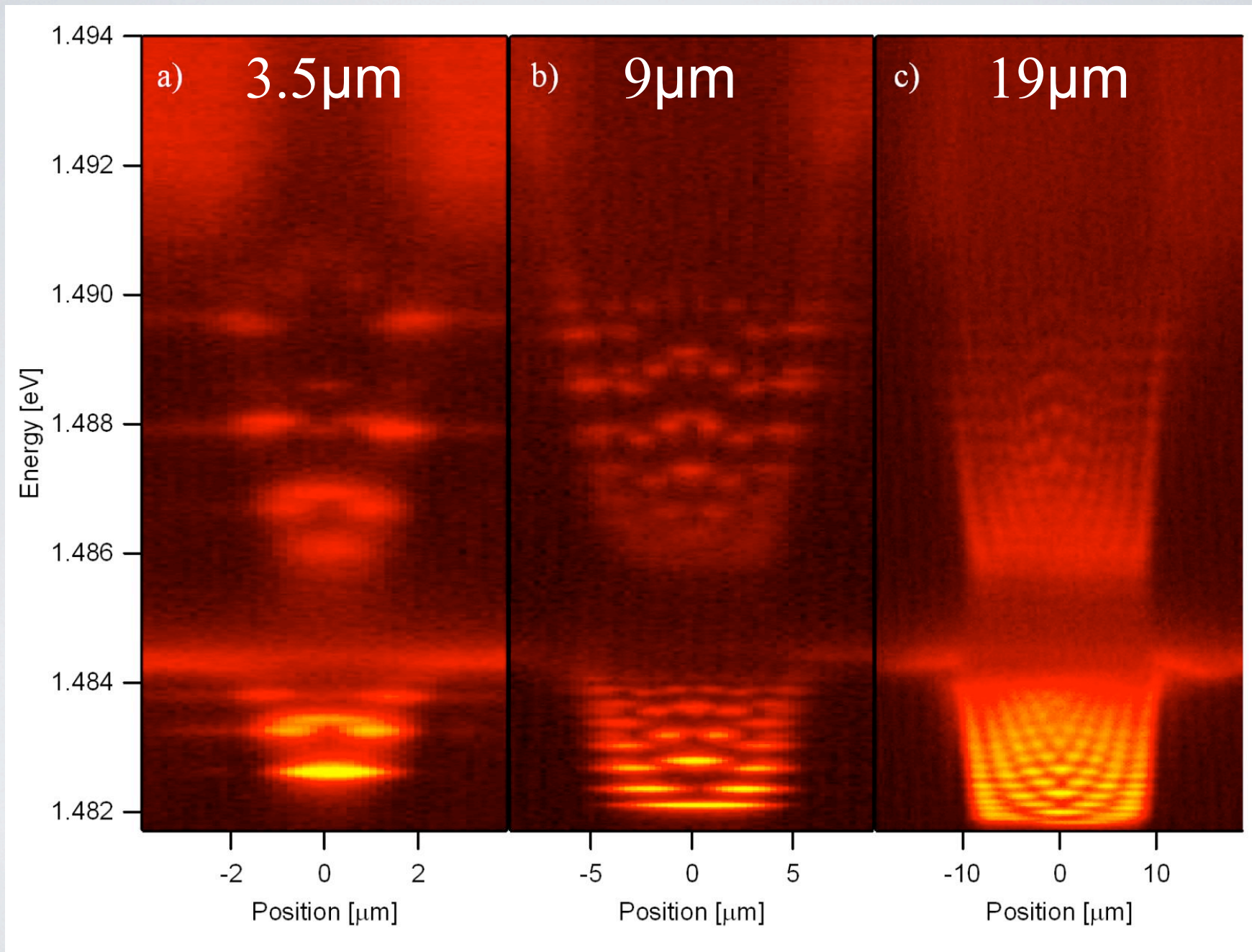
6nm high mesa,
 $\varnothing 3\mu\text{m}$



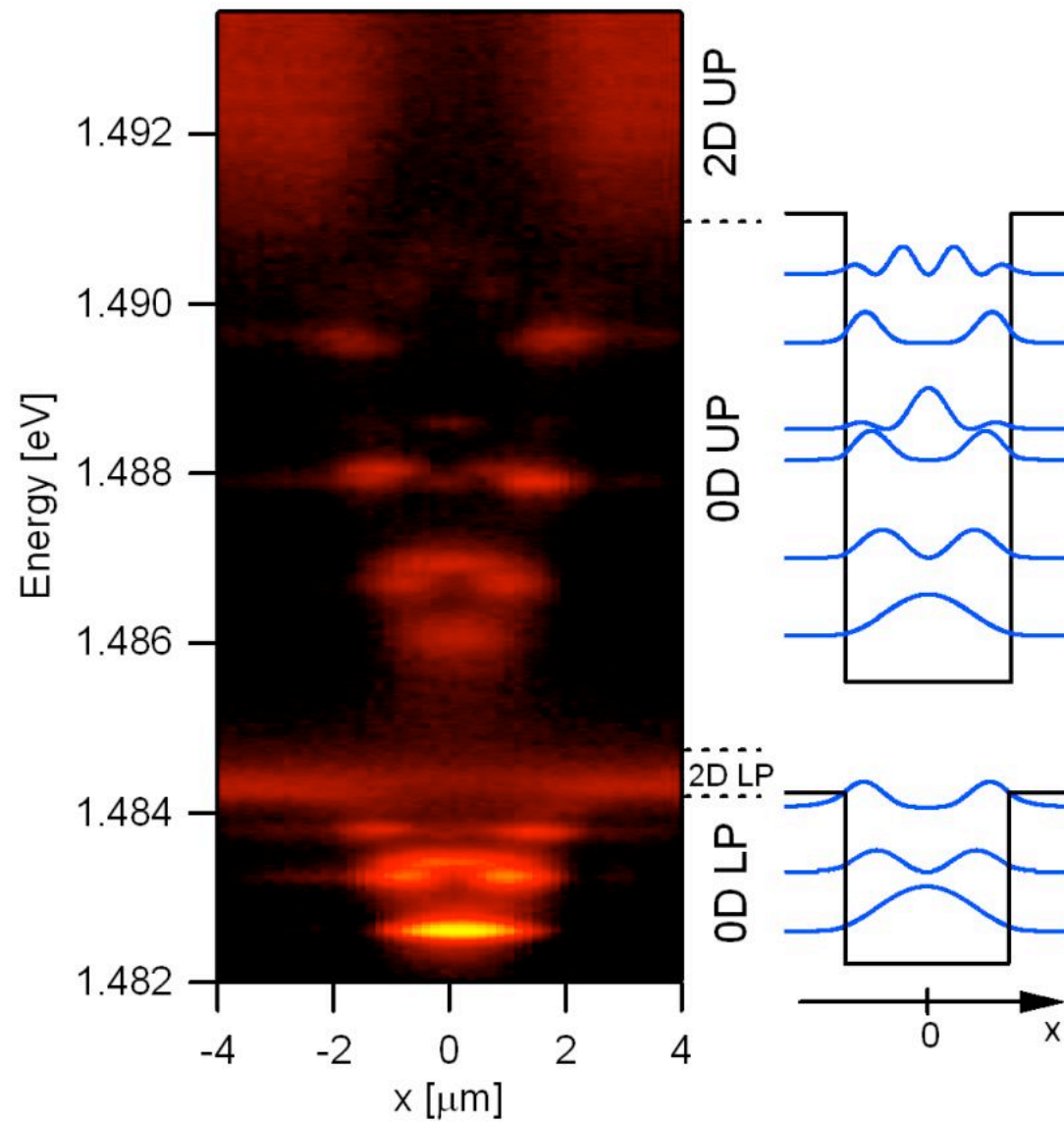
UKŁAD EKSPERYMENTALNY - taki jak do PL



WIDMA PL Z POLARYTONOWEJ KROPKI KWANTOWEJ

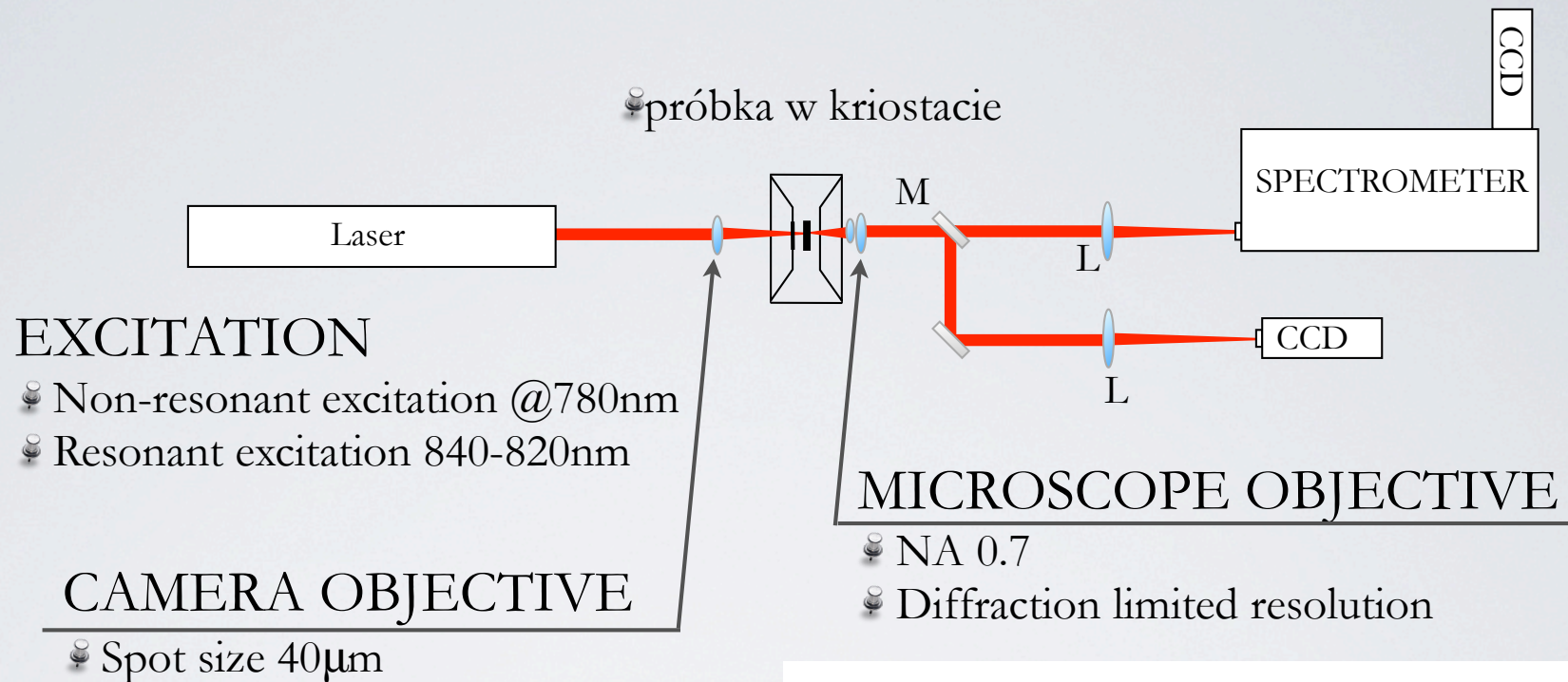


CZĄSTKA W PUDLE



$$m_{\text{eff}} \sim 0.7 \text{ meV} \cdot \text{ps}^2 \cdot \mu\text{m}^{-2}$$
$$m_{\text{eff}} \sim 10^{-4} m_0$$

UKŁAD EKSPERYMENTALNY (taki jak do PL)

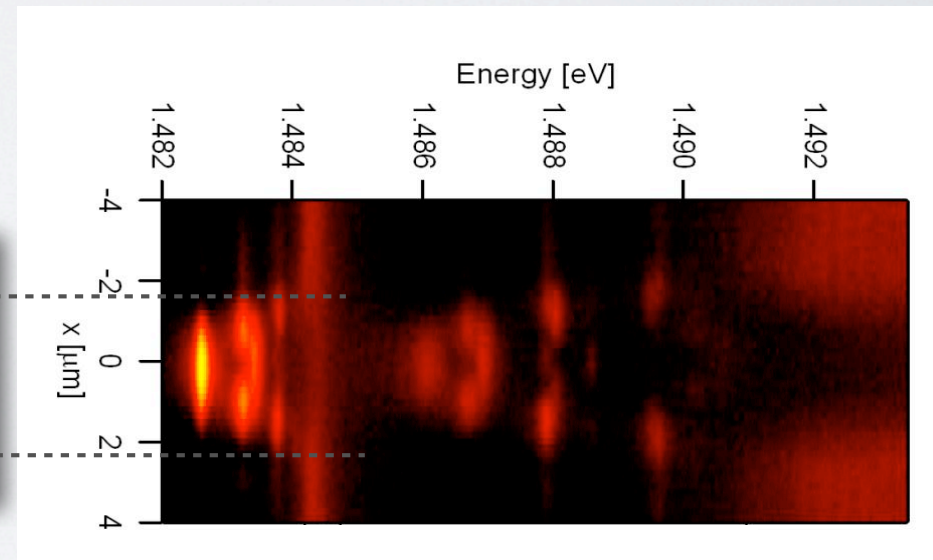
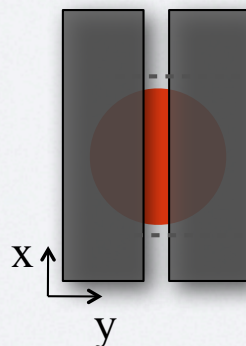


Imaging PL of the mesa on the slits of the monochromator.

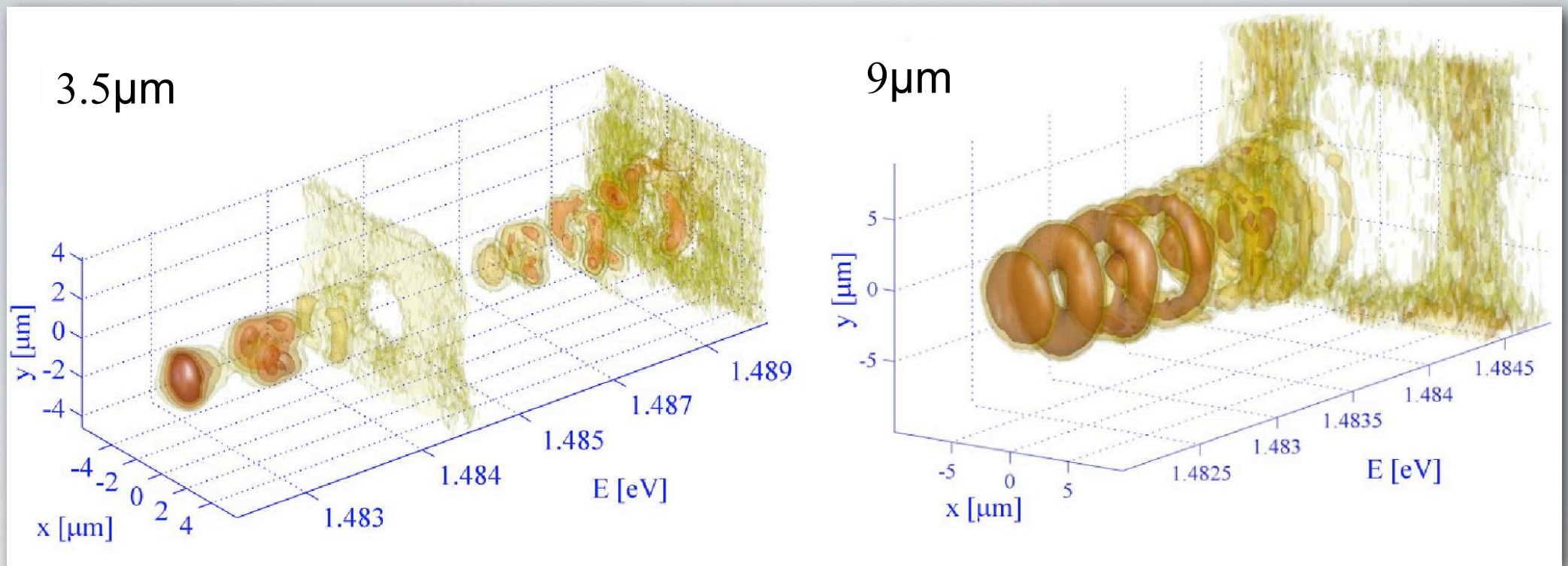
- 1D spatially resolved spectrum.

Scanning the mesa along the y direction.

- A stack of 3D data $I(x,y,E)$ from which we can extract the PL at any energy.

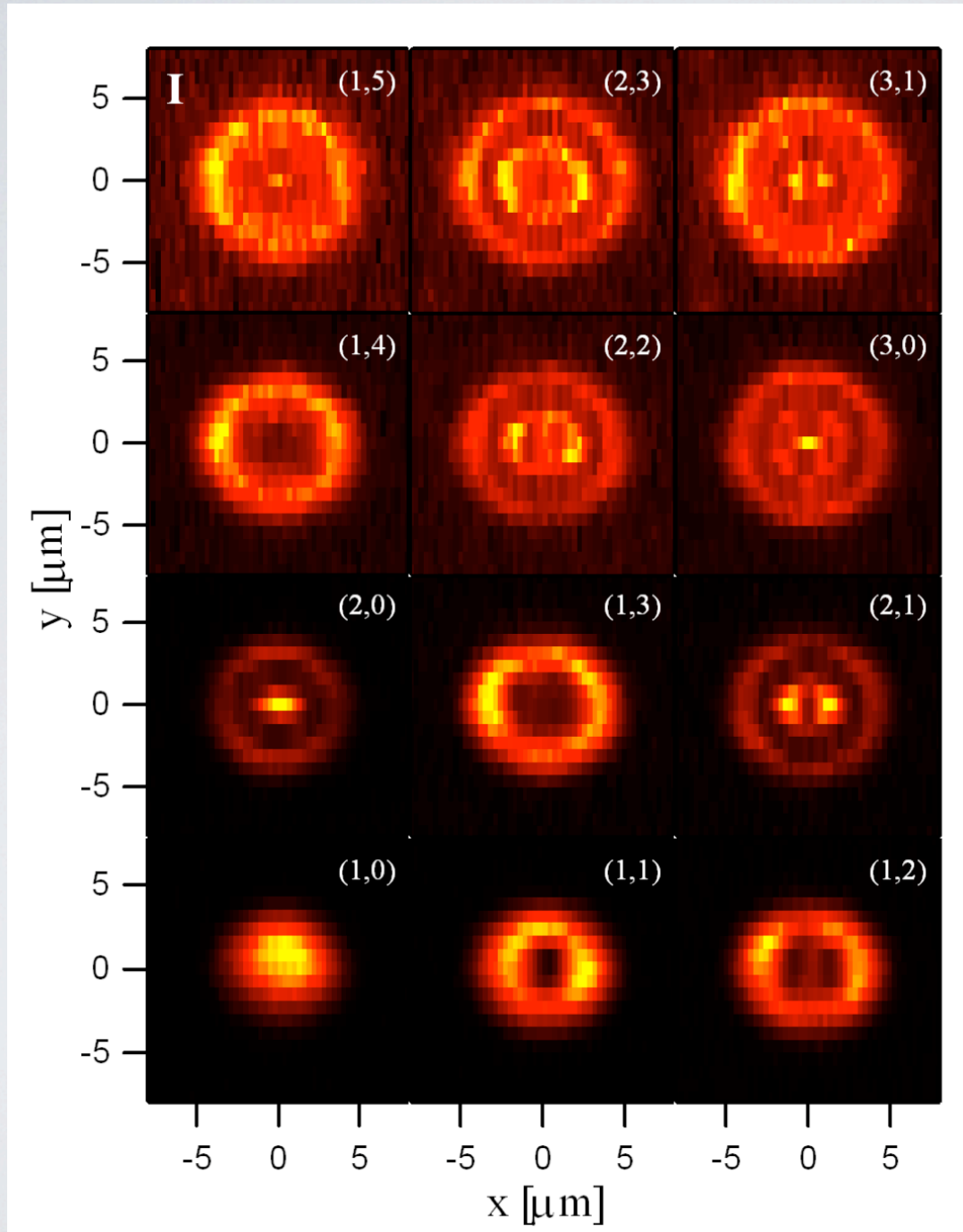


3D VIEW OF THE PL



- All confined and delocalized states visible in a single view !
- Absence of PL from the trap at the energy of the 2D lower polariton !

PRZEKRÓJ PRZEZ STANY ZWIĄZANE - $9\mu\text{m}$ PUDŁO

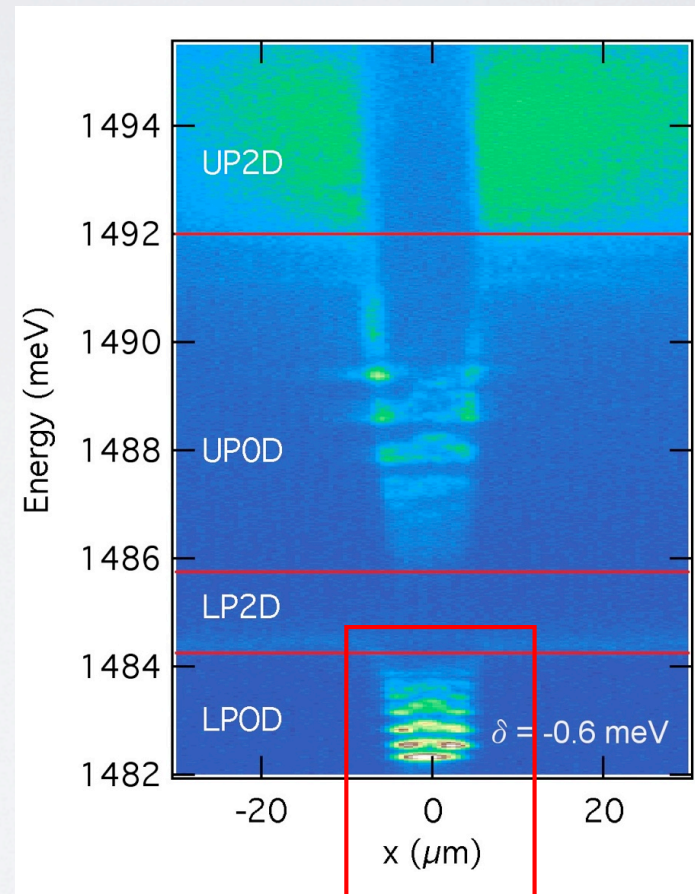


Nearly cylindrical symmetry

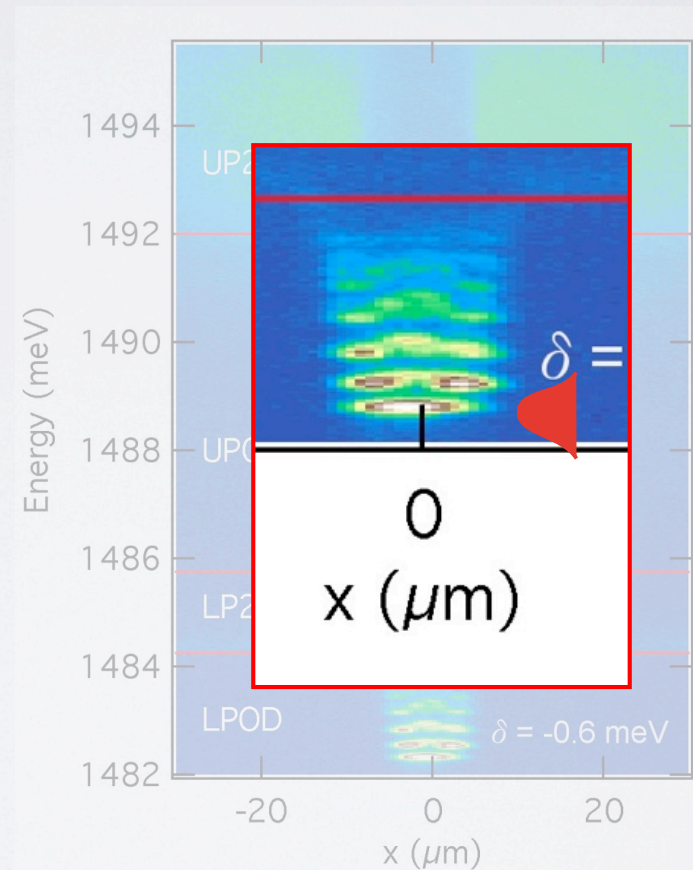


Symmetry can be broken by laser (with resonant excitation)

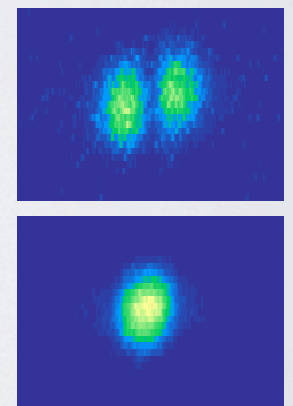
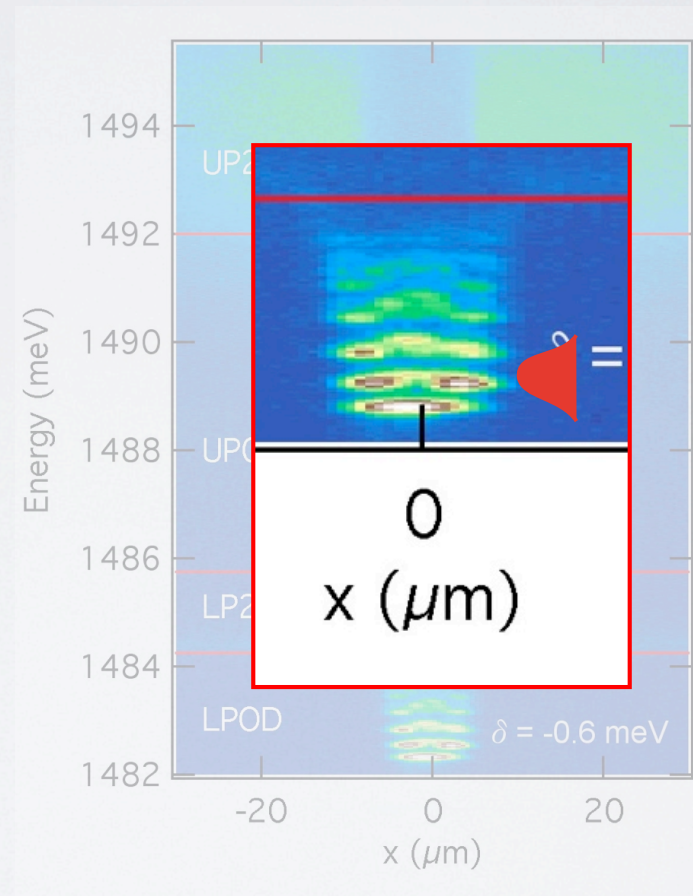
SELEKTYWNE POBUDZANIE POSZCZEGÓLNYCH STANÓW



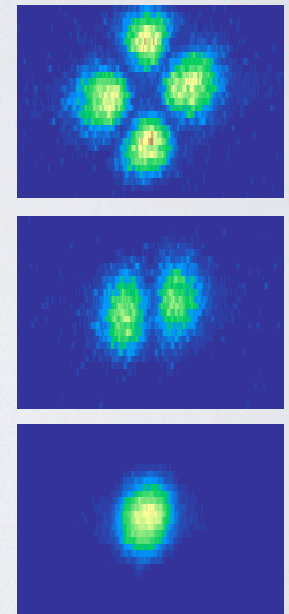
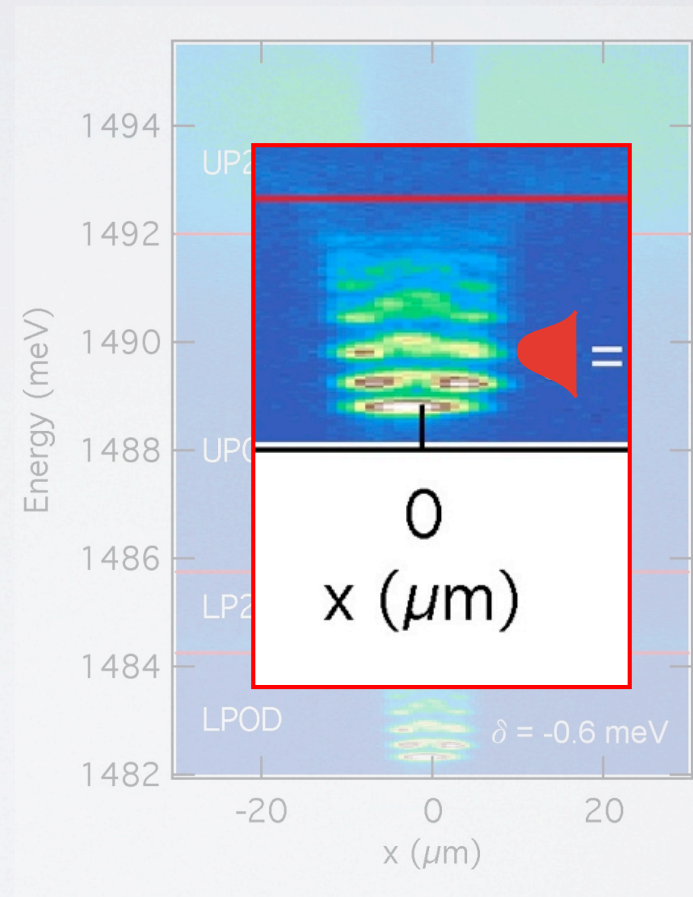
SELEKTYWNE POBUDZANIE POSZCZEGÓLNYCH STANÓW



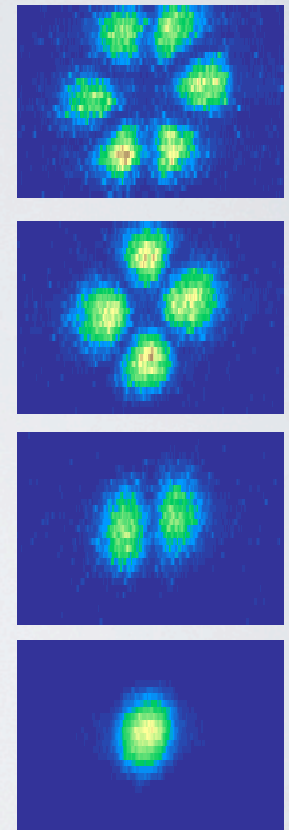
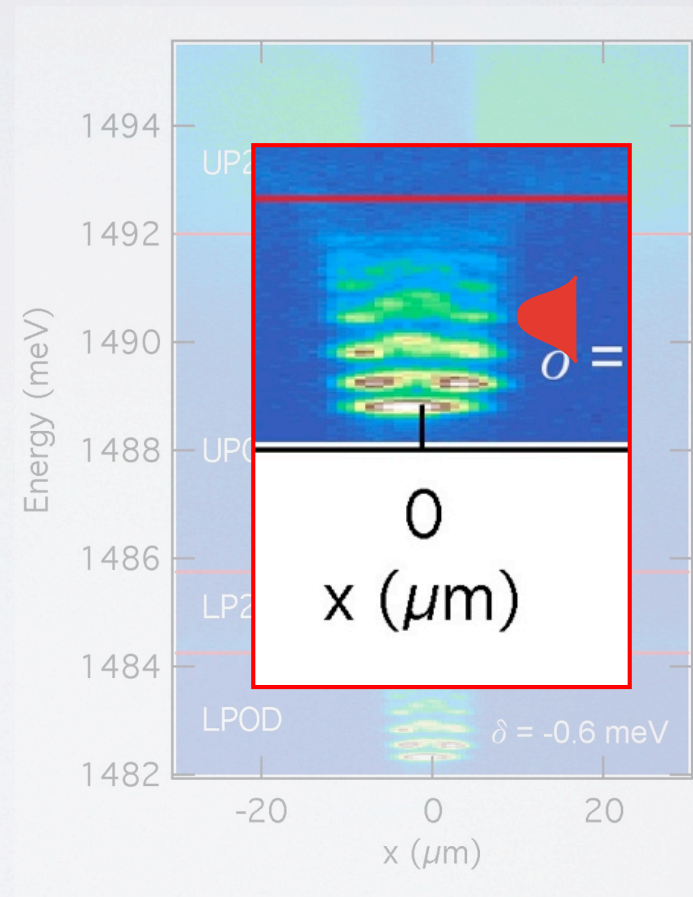
SELEKTYWNE POBUDZANIE POSZCZEGÓLNYCH STANÓW



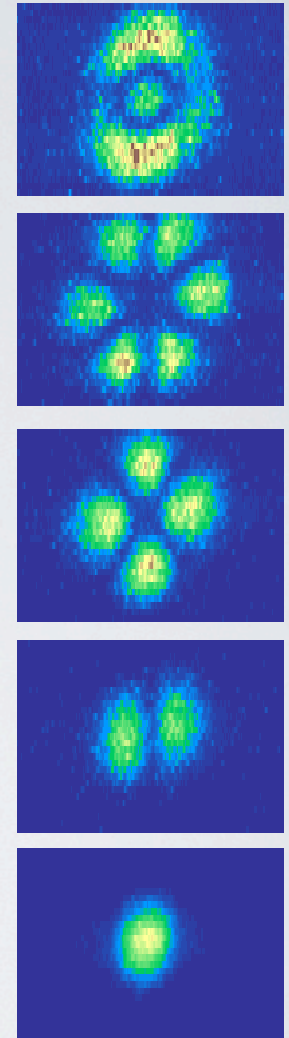
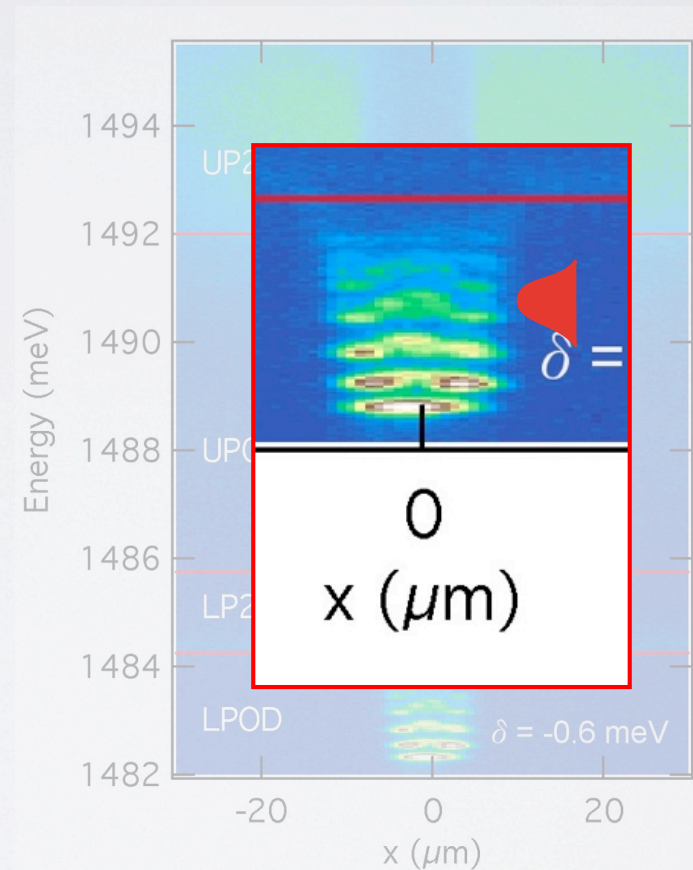
SELEKTYWNE POBUDZANIE POSZCZEGÓLNYCH STANÓW



SELEKTYWNE POBUDZANIE POSZCZEGÓLNYCH STANÓW

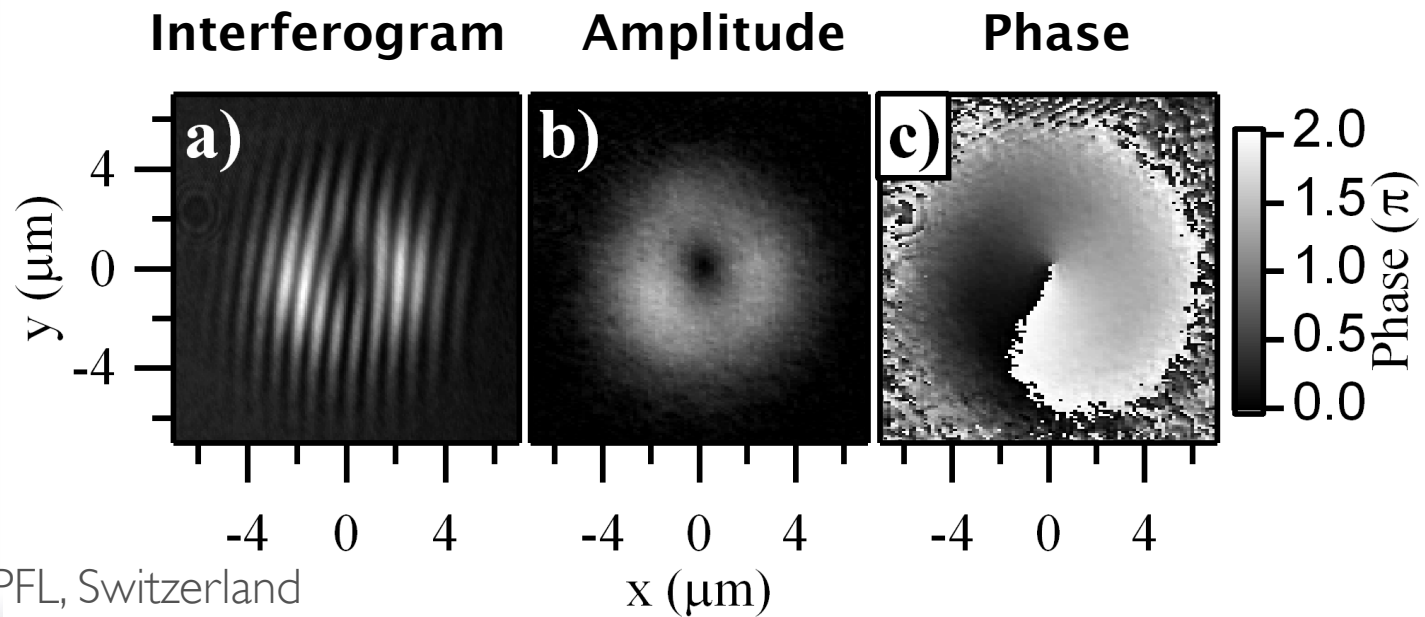
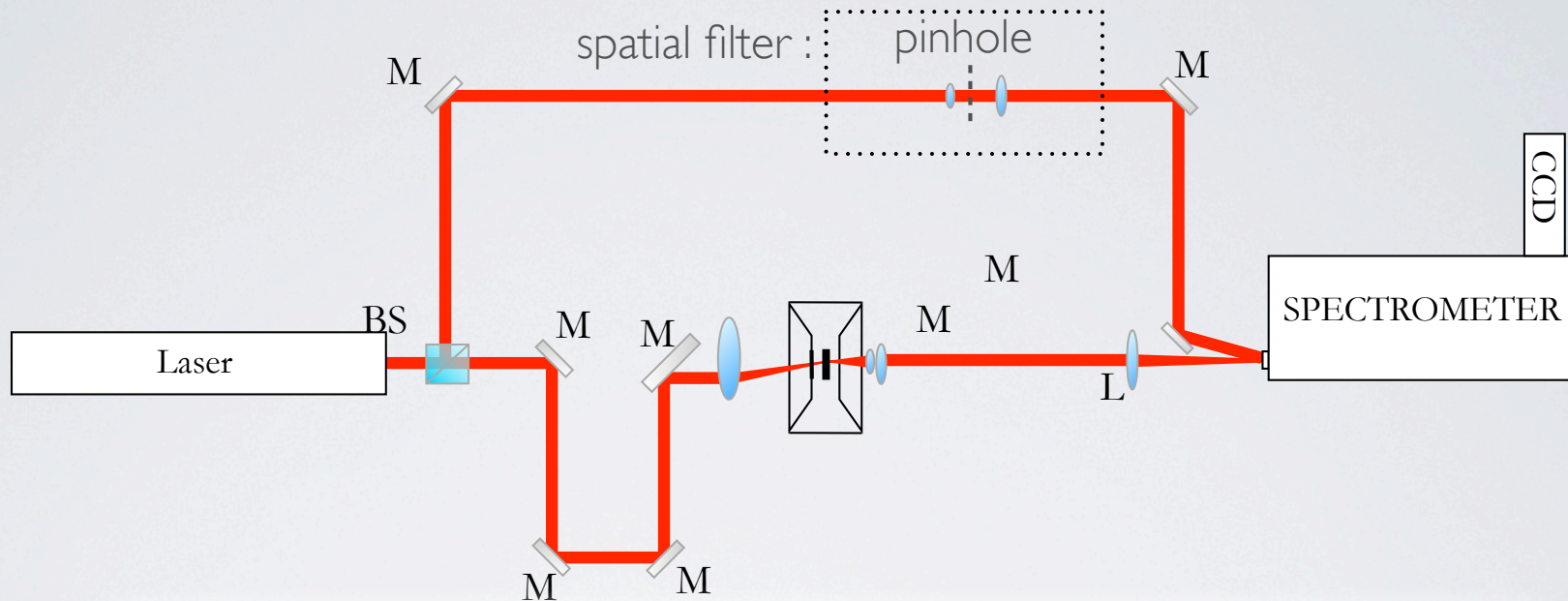


SELEKTYWNE POBUDZANIE POSZCZEGÓLNYCH STANÓW



UKŁAD EKSPERYMENTALNY

!!! AMPLITUDE & PHASE !!!

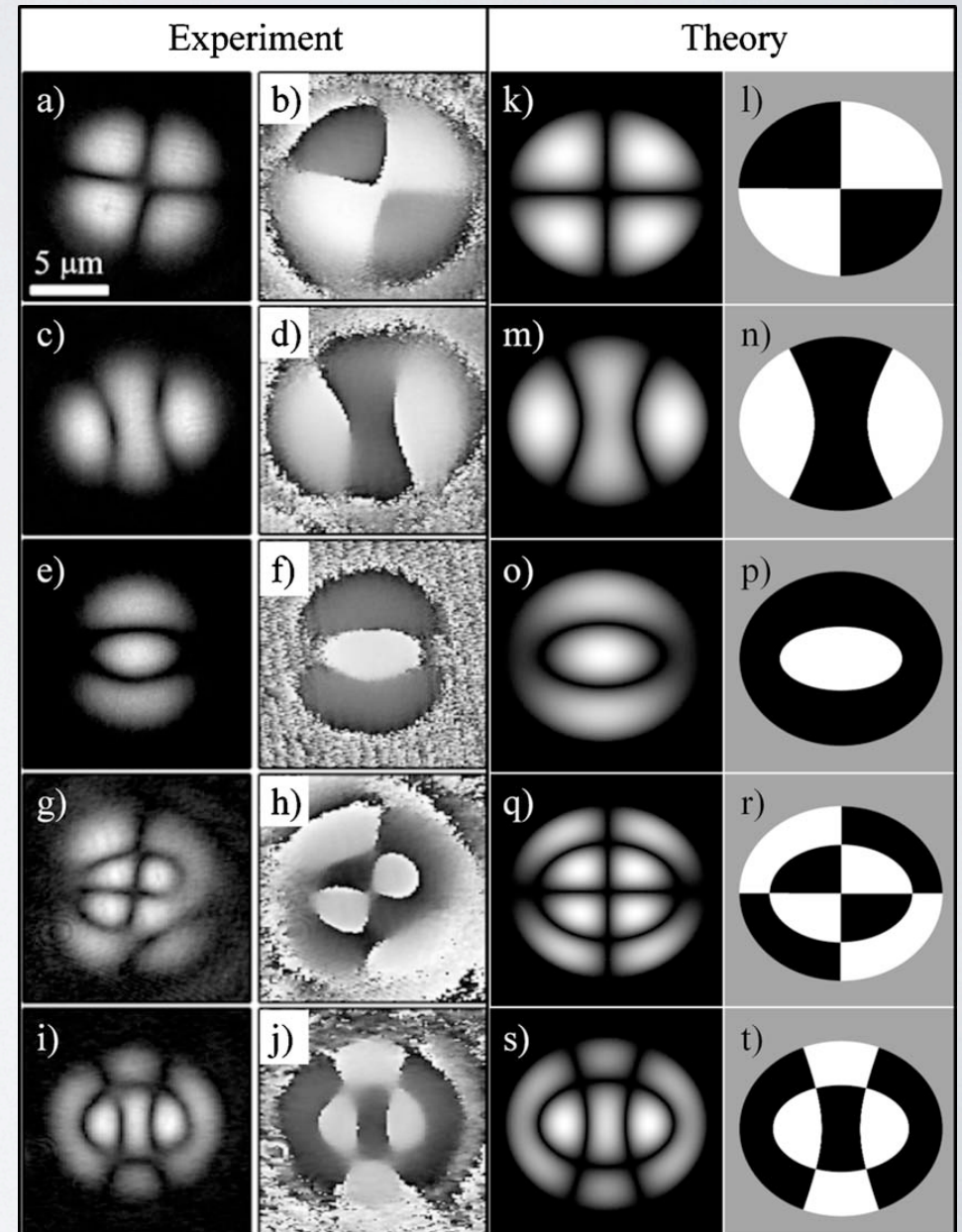
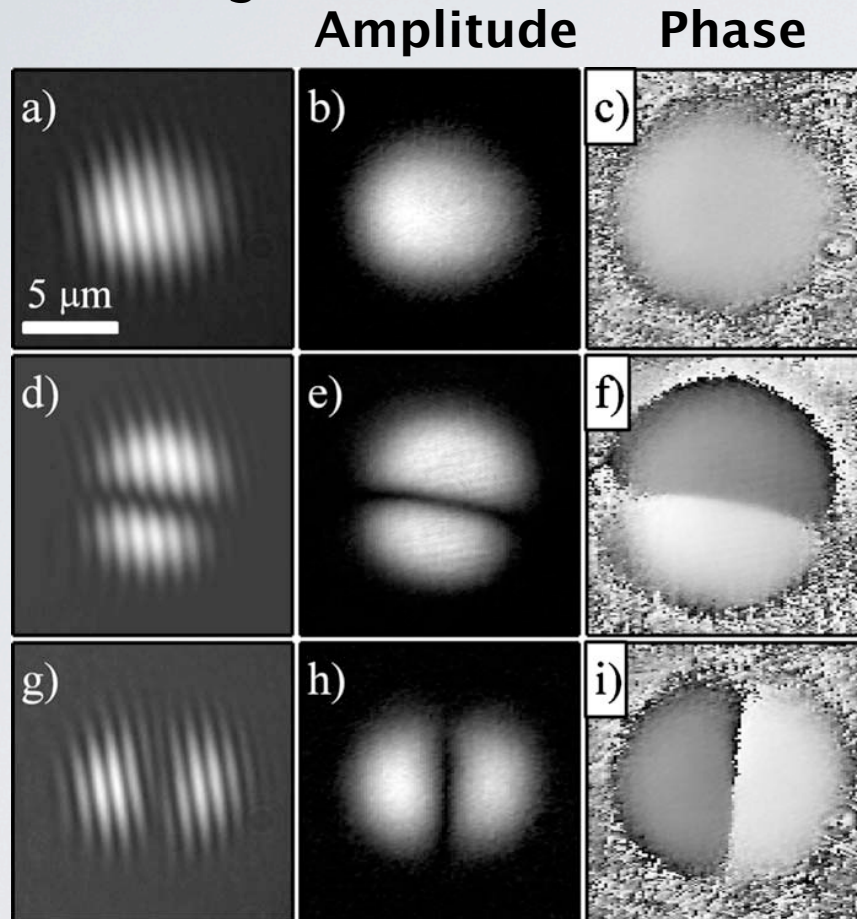


AMPLITUDE & PHASE OF CONFINED STATES

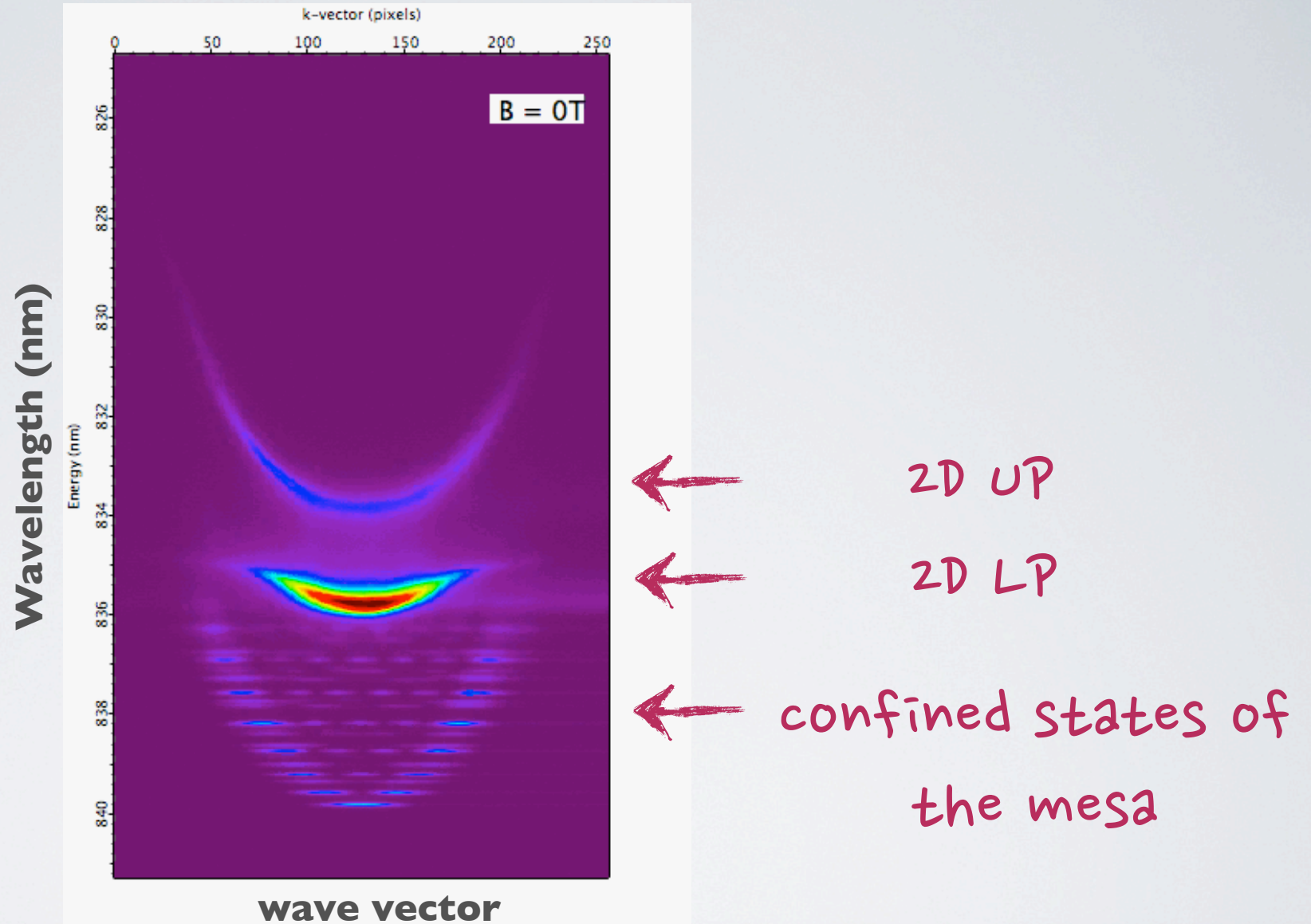
@ resonant excitation

Experiment:

Interferogram

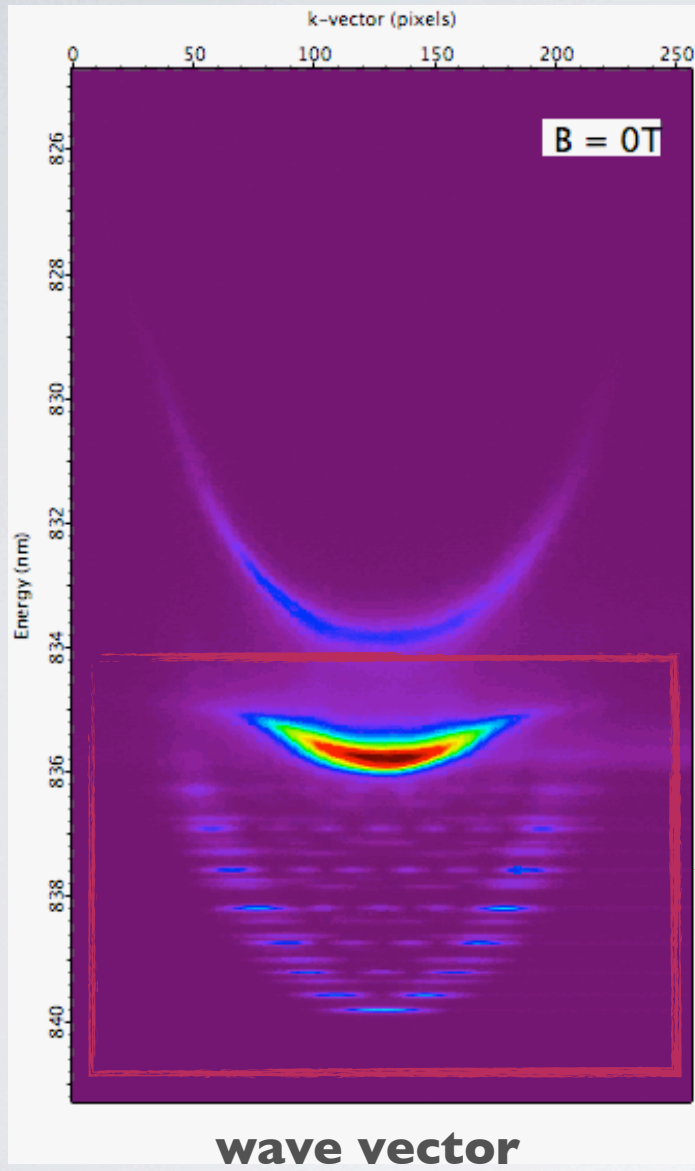


9 μm mesa in magnetic field

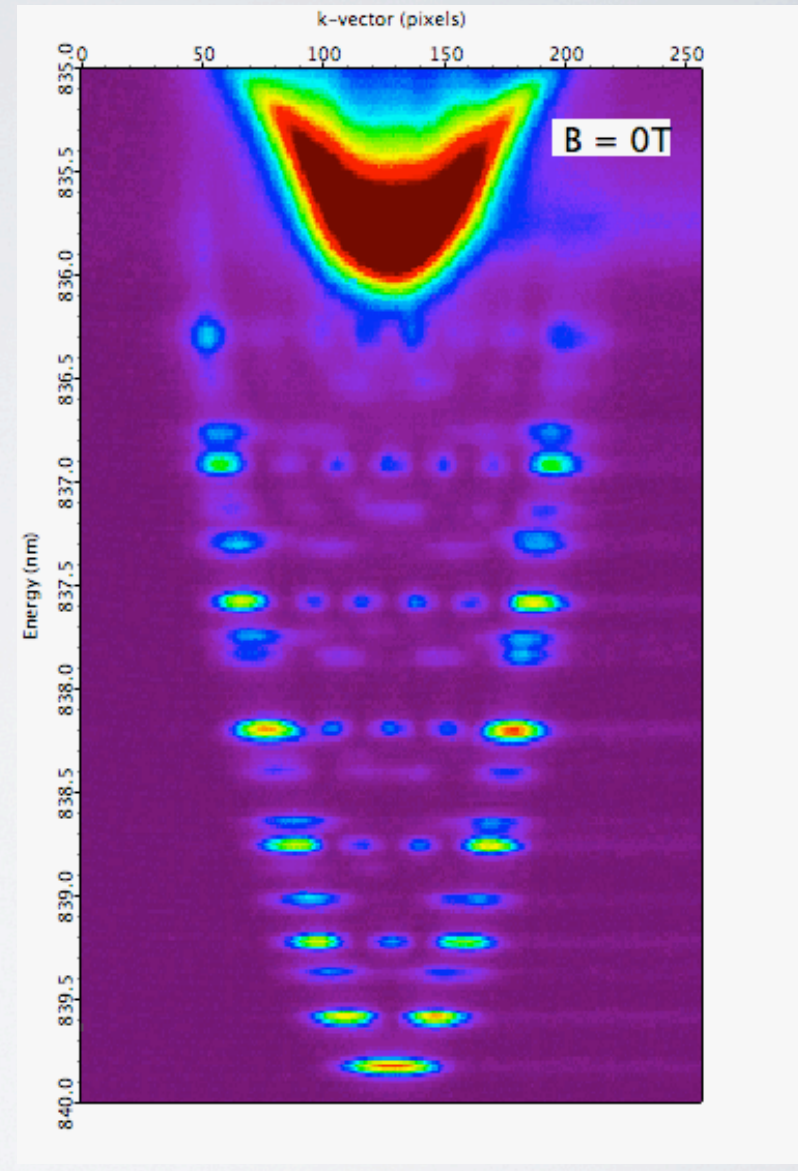


9 μm mesa in magnetic field

Wavelength (nm)



zoom



PODSUMOWANIE FIZYKI POLARYTONOWYCH KROPEK KWANTOWYCH:

PEŁNA WIZUALIZACJA FUNKCJI FALOWEJ

MOŻLIWA MODYFIKACJA I BEZPOŚREDNI WPŁYW NA STANY
ZWIĄZANE