

**POLARYTONY
EKSCYTONOWE
W MIKROWNĘKACH
PÓŁPRZEWODNIKOWYCH**

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

OUTLINE

co to jest

? POLARYTON ?

co można z nim zrobić



KONDENSAT BOSEGO - EINSTEINA



NADCIEKŁOŚĆ I WIRY KWANTOWE



OBRAZOWANIE MECHANIKI KWANTOWEJ -
FUNKCJE FALOWE STANÓW ZWIĄZANYCH

co to jest

? POLARYTON ?

co można z nim zrobić



KONDENSAT BOSEGO - EINSTEINA



NADCIEKŁOŚĆ I WIRY KWANTOWE



OBRAZOWANIE MECHANIKI KWANTOWEJ -
FUNKCJE FALOWE STANÓW ZWIĄZANYCH

Kwazi-cząstki bozonowe : **polarytony**

POLARYTON = EKSCYTON + FOTON
1/2 materia + 1/2 światło

w reżimie silnego sprzężenia

Kwazi-cząstki bozonowe : **polarytony**

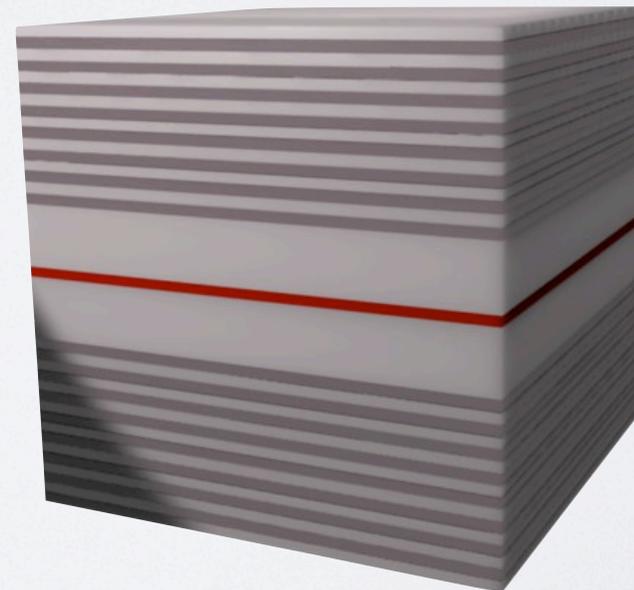
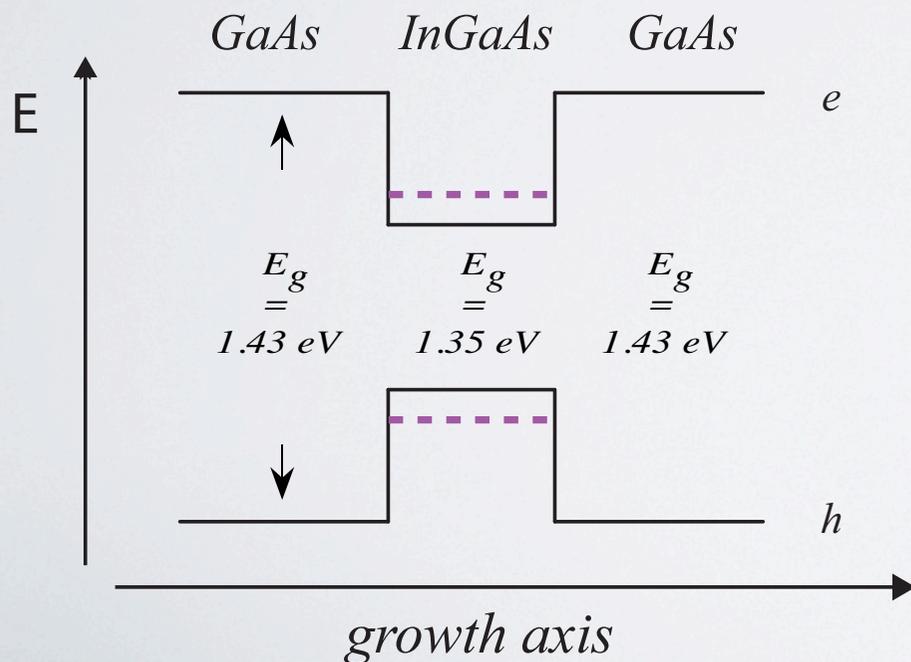
POLARYTON = EKSCYTON + FOTON

1/2 materia + 1/2 światło

w reżimie silnego sprzężenia

studnia kwantowa

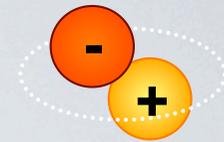
mikrownęka
półprzewodnikowa



- Top DBR
21 pairs
- λ
cavity
- Bottom DBR
22 pairs
- GaAs
- AlAs
- $\text{In}_{0.04}\text{Ga}_{0.96}\text{As}$

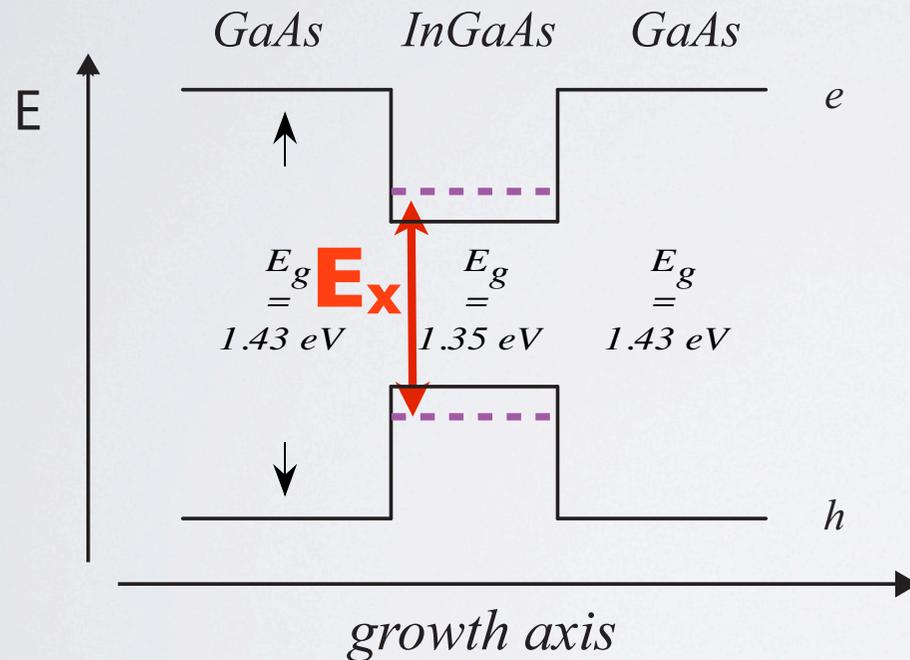
EKSCYTON W STUDNI KWANTOWEJ == MATERIA

ekscyton = elektron + dziura + oddziaływanie

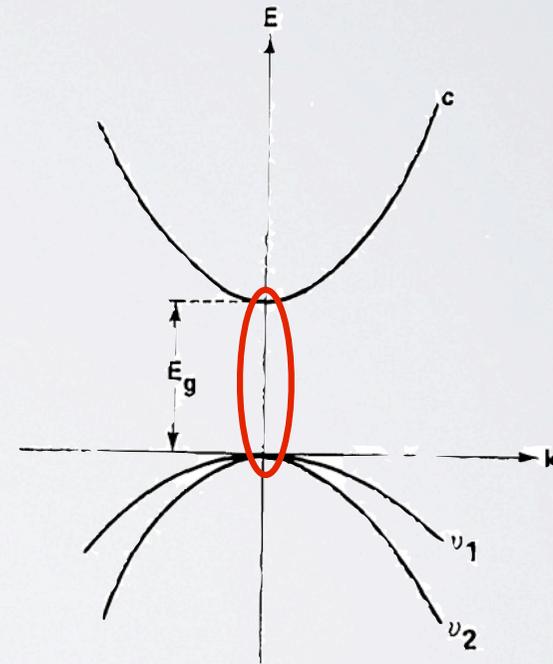


Ekscyton

kierunek wzrostu warstw



w płaszczyźnie studni

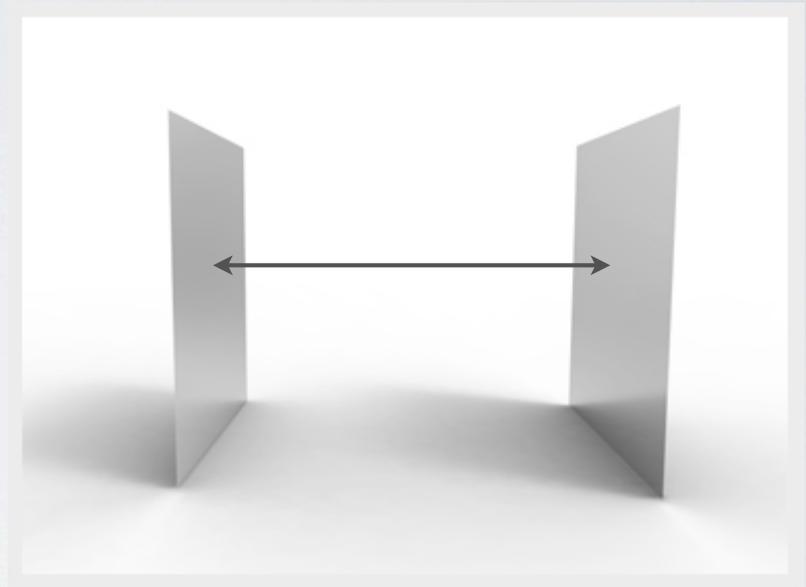


$$E_X(k) = E_g - E_b + \frac{\hbar^2 k^2}{2m_X}$$

JAK UWIĘZIĆ FOTON ?

Podstawowe pojęcia potrzebne do opisu problemu:

- równanie falowe
- prawa Maxwella
- warunki ciągłości na granicy materiałów
- prawo odbicia i załamania (pr. Snelliusa)
- wzory Fresnela
(związki między amplitudami fal padającej,
przechodzącej i odbitej)



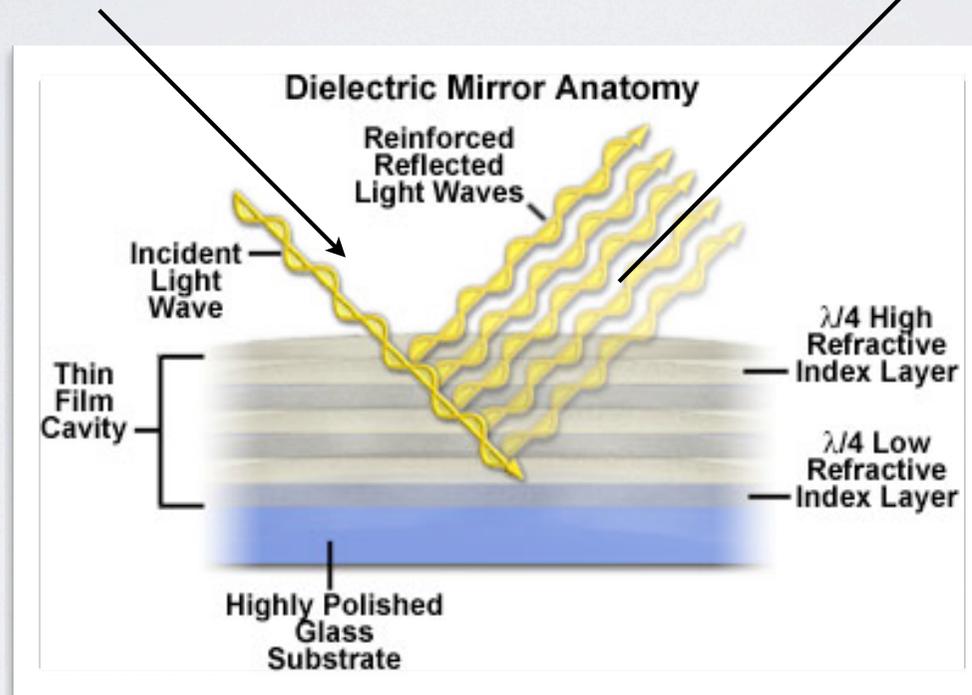
- znajdziemy idealne lustro -

JAK UWIEŹIĆ FOTON ?

- znajdzmy idealne lustro -

światło
padające

światło
odbite

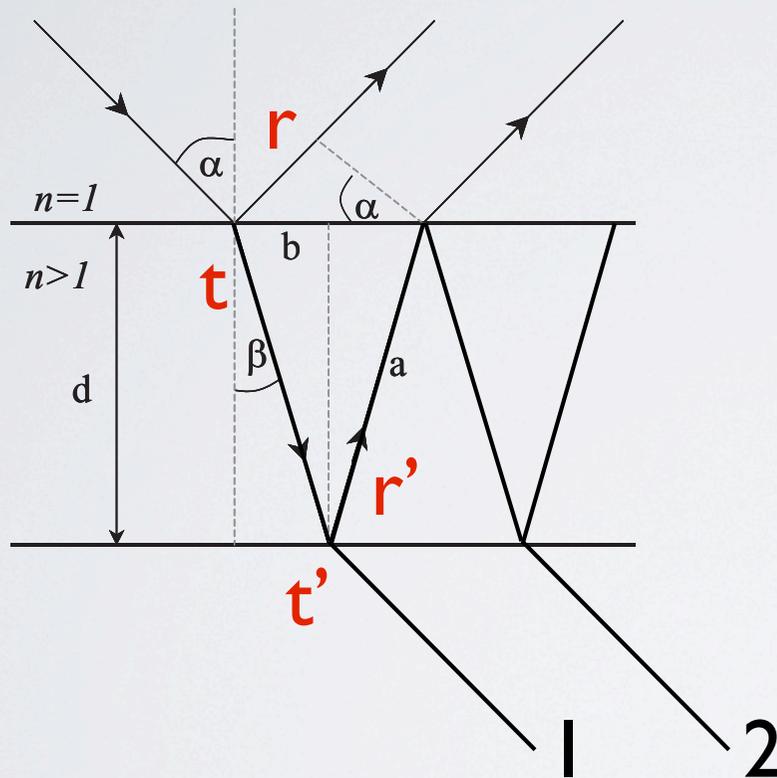


! IDEALNE LUSTRO ! $R=1$

przykład : PŁYTKA PŁASKO - RÓWNOLEGŁA

$$\vec{E} = \vec{A}_0 e^{i(\omega t - \vec{k}\vec{r})}$$

interferencja - tu: wzmocnienie i osłabienie fali wypadkowej na skutek złożenia fal po wielokrotnych odbiciach



Amplituda fali odbitej

$$\vec{A} = \sum_{m=1}^{\infty} \vec{A}_m e^{i(m-1)\delta}$$

δ - przesunięcie fazowe między promieniami 1 i 2

$$\delta = 2 \cdot k \cdot d \cdot n \cdot \cos \beta$$

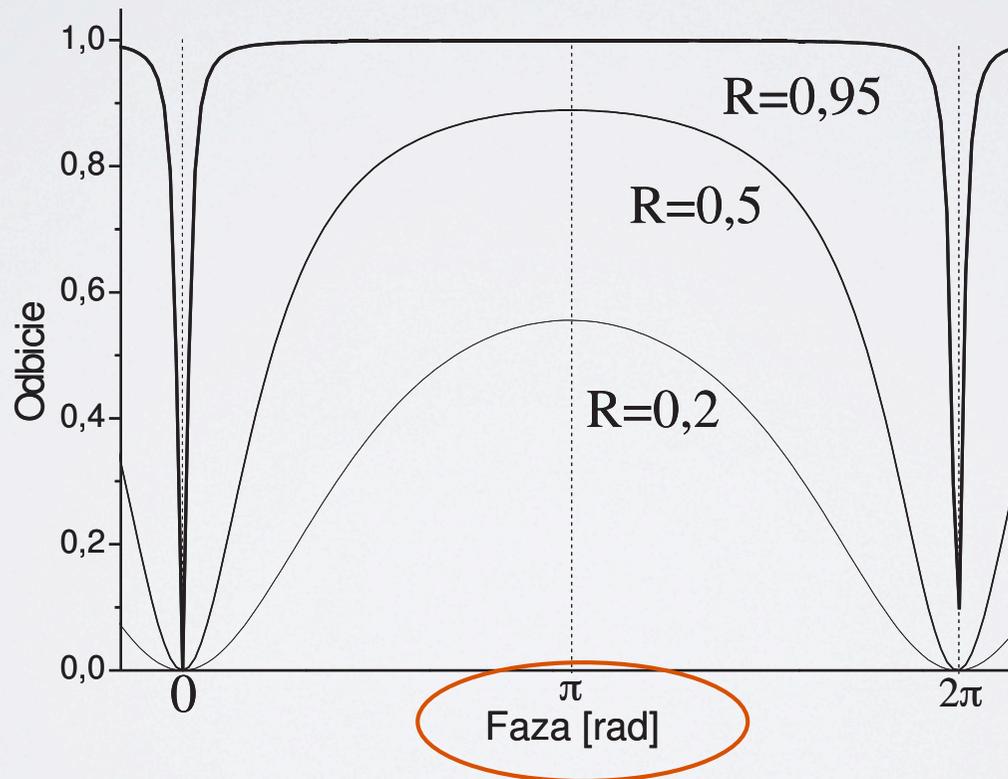
można łatwo przeliczyć analitycznie

Zasada działania : rezonator Fabry - Perot (etalon)

przykład : PŁYTKA PŁASKO - RÓWNOLEGŁA

Stosunek intensywności fali odbitej do fali padającej

$$\frac{I_R}{I_0} = \frac{\vec{A}\vec{A}^*}{\vec{A}_0\vec{A}_0^*} = R \frac{2 - 2 \cos \delta}{1 + R^2 - 2R \cos \delta} = \frac{4R \sin^2(\frac{\delta}{2})}{(1 - R)^2 + 4R \sin^2(\frac{\delta}{2})}$$

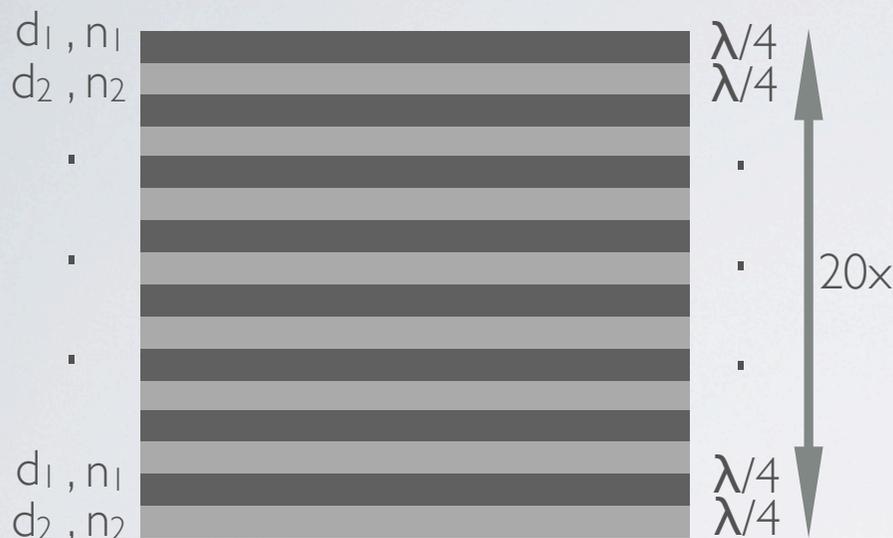


LUSTRO BRAGGA

w celu uzyskania dużego współczynnika odbicia R

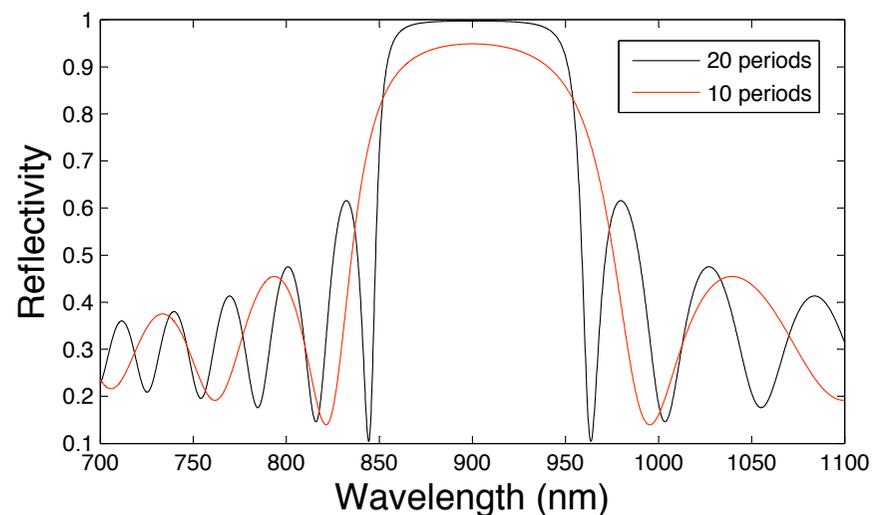
istnienie konstruktywnej interferencji fal dla

$$n_1 d_1 = n_2 d_2 = \frac{\lambda}{4}$$



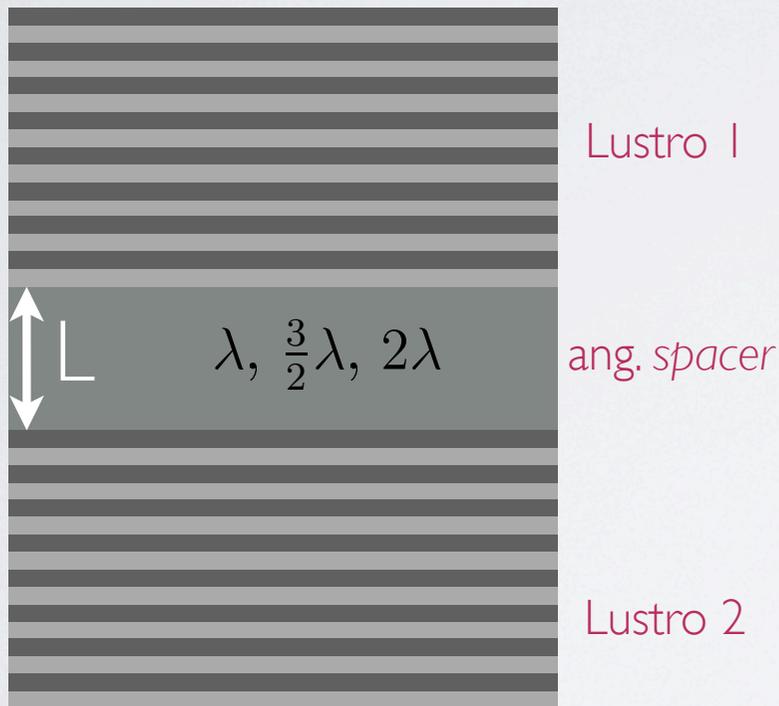
odbicie fali e-m od warstw ułożonych naprzemiennie o różnych współczynnikach załamania

single DBR reflectivity spectrum

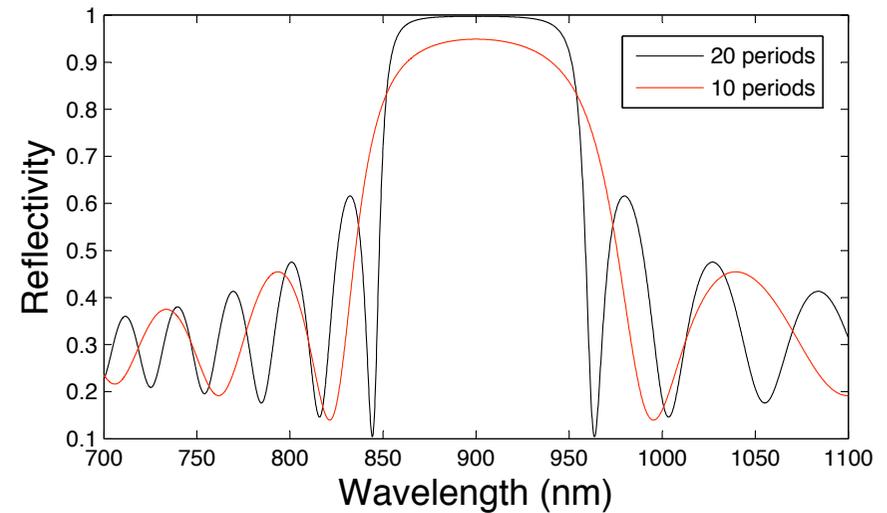


DWA LUSTRA BRAGGA = MIKROWNEKA

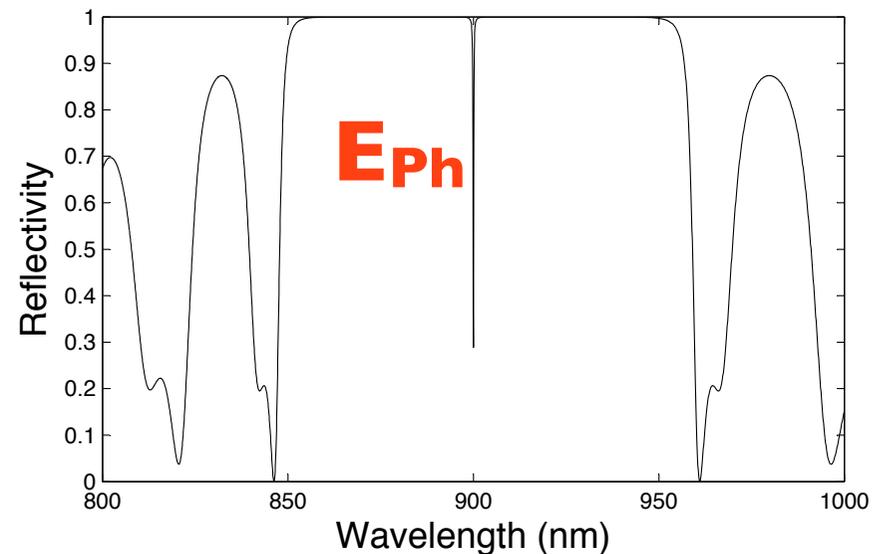
zaburzenie periodyczności
implikuje powstanie nowych
poziomów w przerwie
energetycznej



single DBR reflectivity spectrum

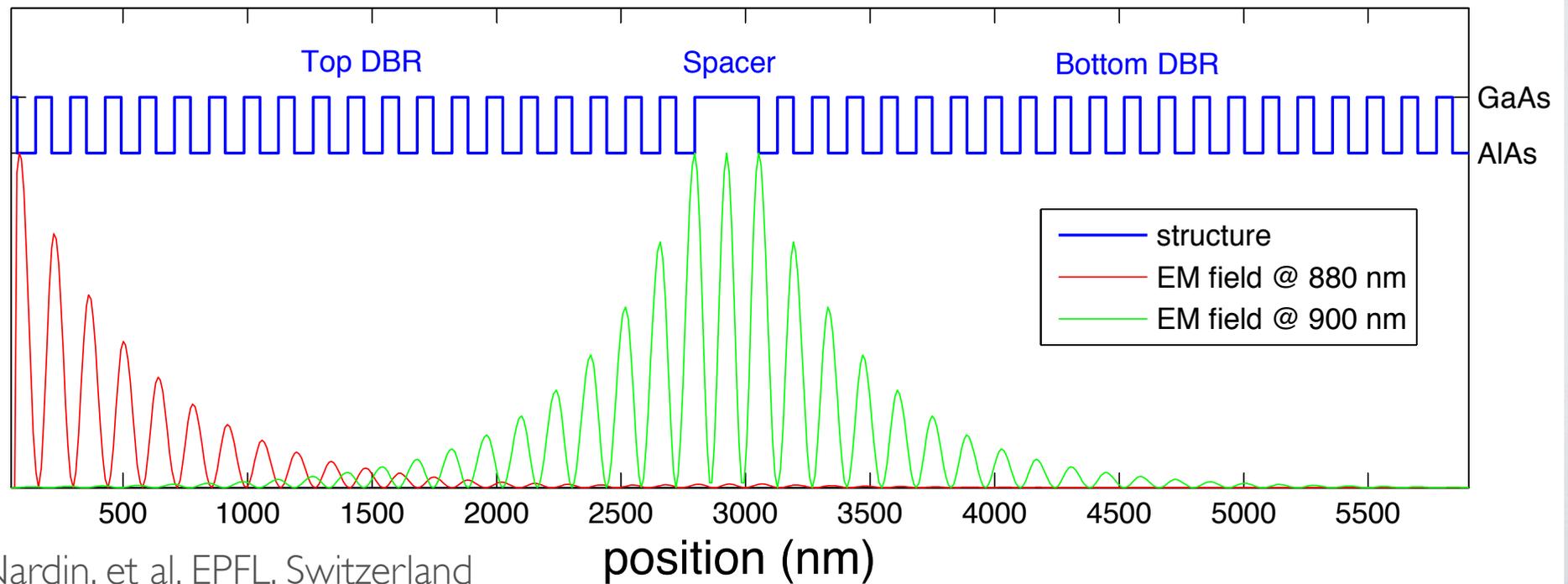
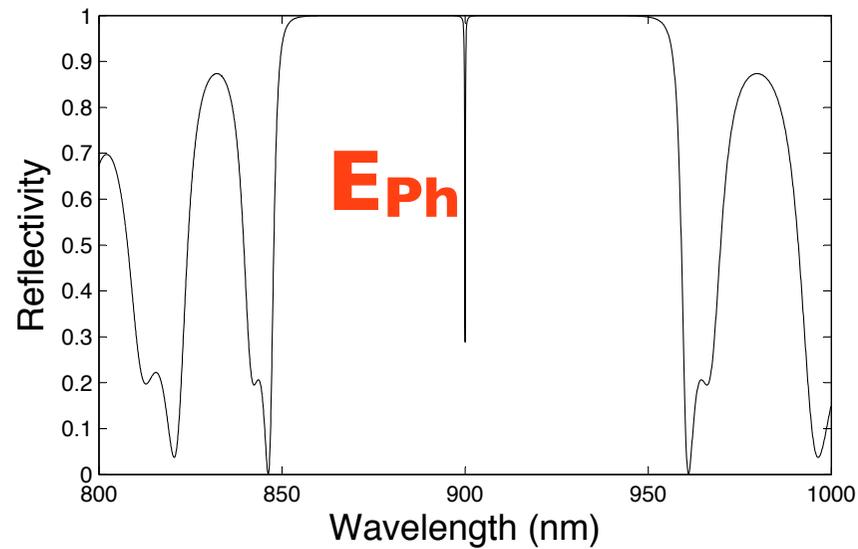


microcavity reflectivity spectrum



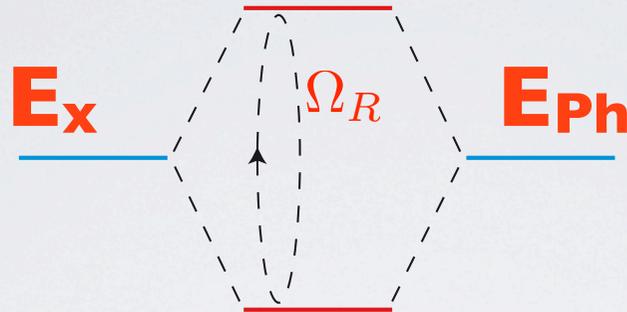
MOD FOTONOWY W MIKROWNEŃCE

microcavity reflectivity spectrum

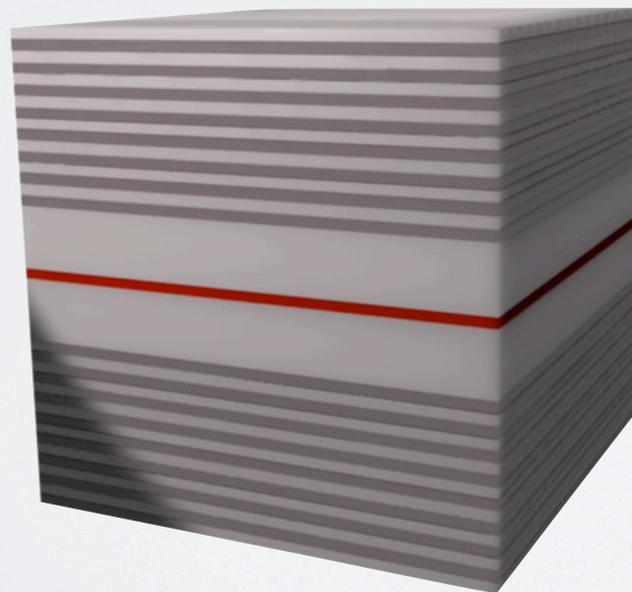


SPRZĘŻENIE POMIĘDZY FOTONAMI I EKSCYTONAMI

EKSCYTON W
STUDNI
KWANTOWEJ



FOTON W MIKROWNEŹCE



Top DBR
21 pairs

λ
cavity

Bottom DBR
22 pairs

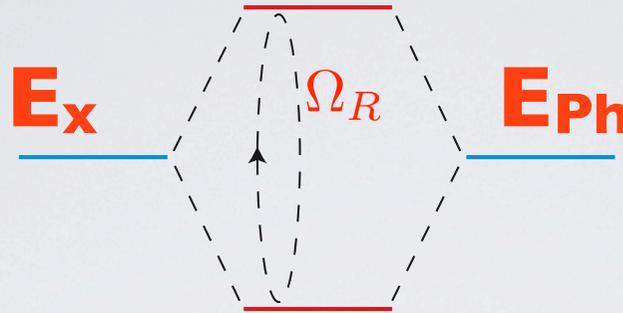
GaAs

AlAs

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

SPRZĘŻENIE POMIĘDZY FOTONAMI I EKSCYTONAMI

EKSCYTON W
STUDNI
KWANTOWEJ



FOTON W MIKROWNECE

$$\psi(x, t) = c_1(t)\phi_1(x) + c_2(t)\phi_2(x)$$

The time dependent coefficients satisfy the Schrödinger equation in matrix form

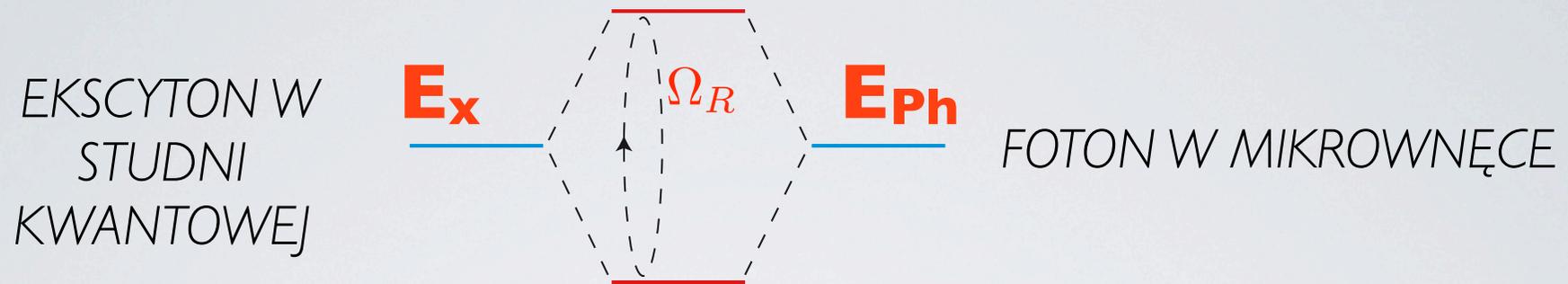
$$i\hbar \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} c_1(t) \\ c_2(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_1(t) \\ c_2(t) \end{pmatrix}.$$

$$\begin{pmatrix} c_1(t) \\ c_2(t) \end{pmatrix} = e^{-iEt/\hbar} \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \end{pmatrix} = E \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \end{pmatrix}$$

$$\begin{vmatrix} H_{11} - E & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} - E \end{vmatrix} = 0.$$

SPRZĘŻENIE POMIĘDZY FOTONAMI I EKSCYTONAMI



Energy of polariton branches

$$E_{\pm}(k_{//}) = \frac{E_X(k_{//}) + E_C(k_{//})}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{\delta^2(k_{//}) + \hbar^2 |\Omega|^2}$$

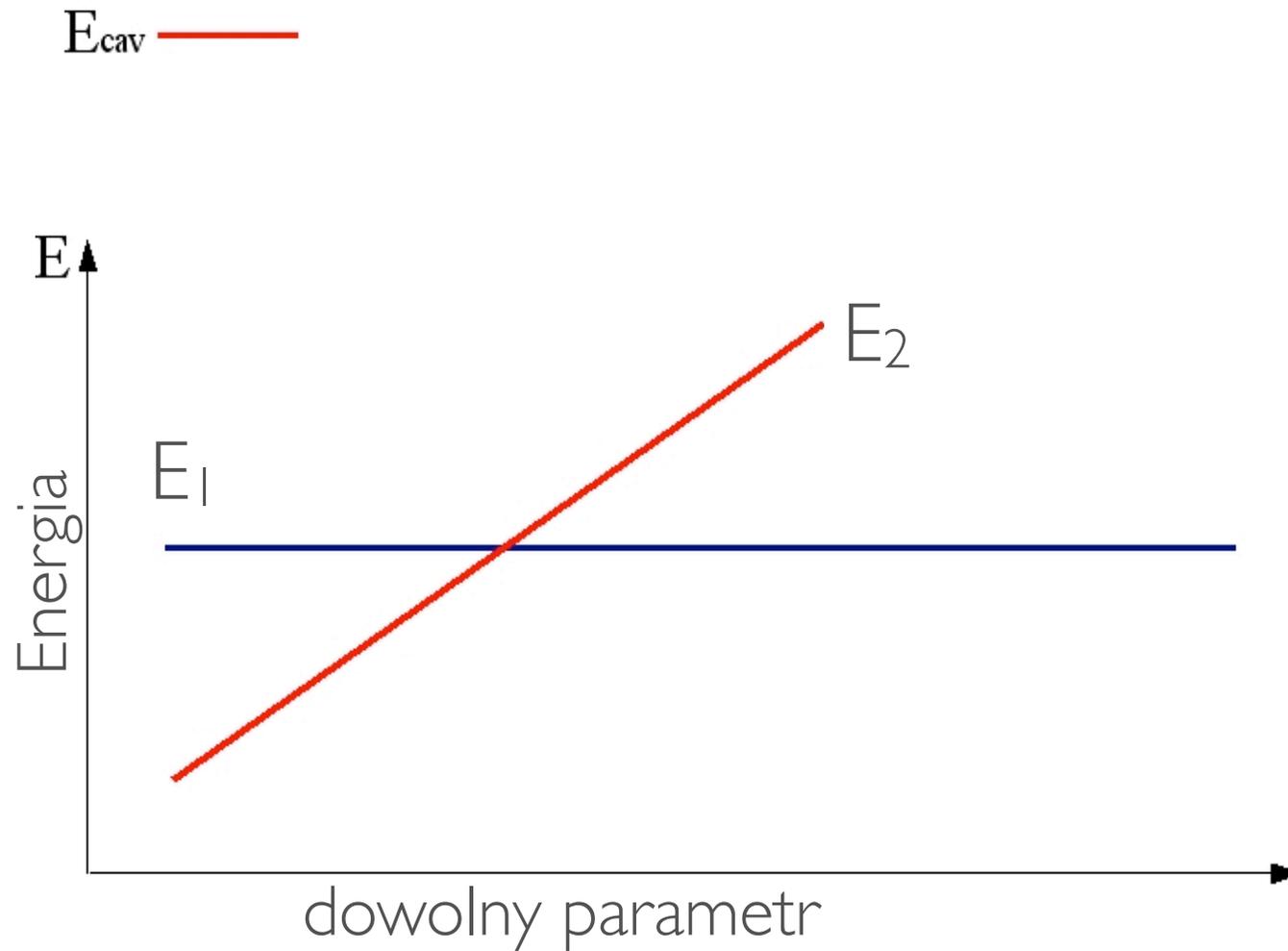
$$\delta(k_{//}) = E_C(k_{//}) - E_X(k_{//})$$

odstrojenie = detuning

Rabi splitting

$$\Omega \propto \sqrt{\frac{f_{osc} N_{QW}}{L_c}}$$

sprężenie



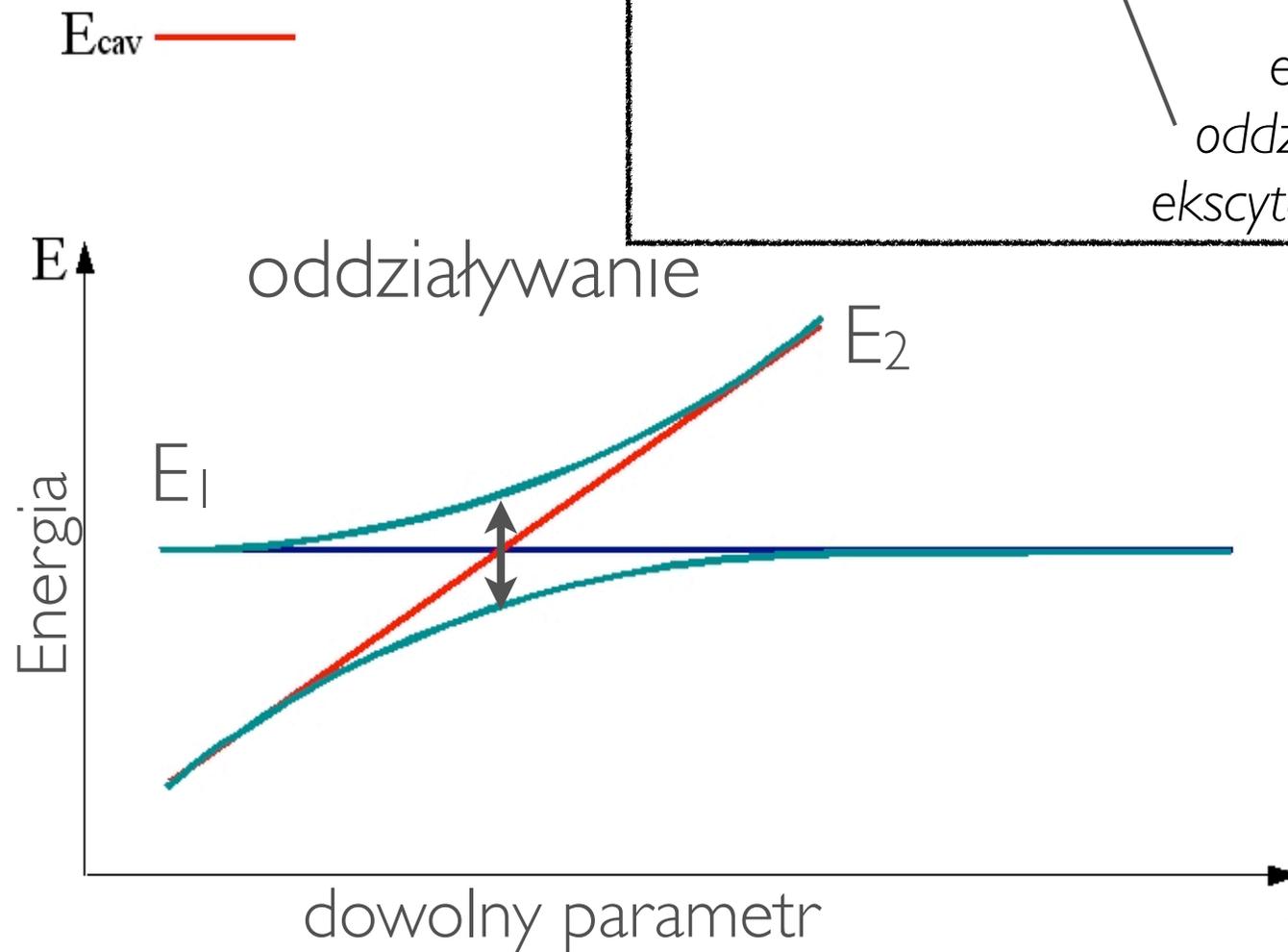
(temperatura, położenie, pole magnetyczne, itd...)

sprzężenie

Macierz oddziaływania

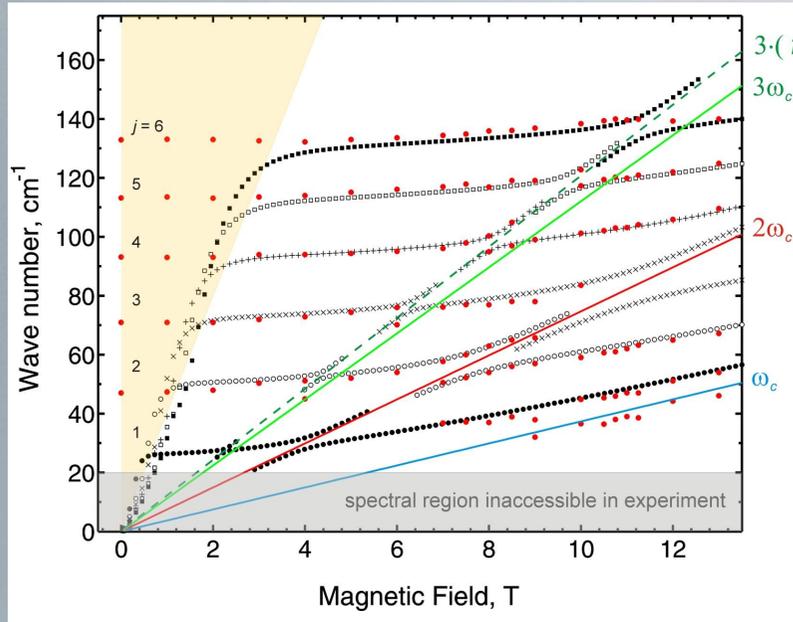
$$M(k_{//}) = \begin{pmatrix} E_C(k_{//}) & \frac{\hbar\Omega}{2} \\ \frac{\hbar\Omega}{2} & E_X(k_{//}) \end{pmatrix}$$

energia
oddziaływania
ekscytynu i fotonu



(temperatura, położenie, pole magnetyczne, itd...)

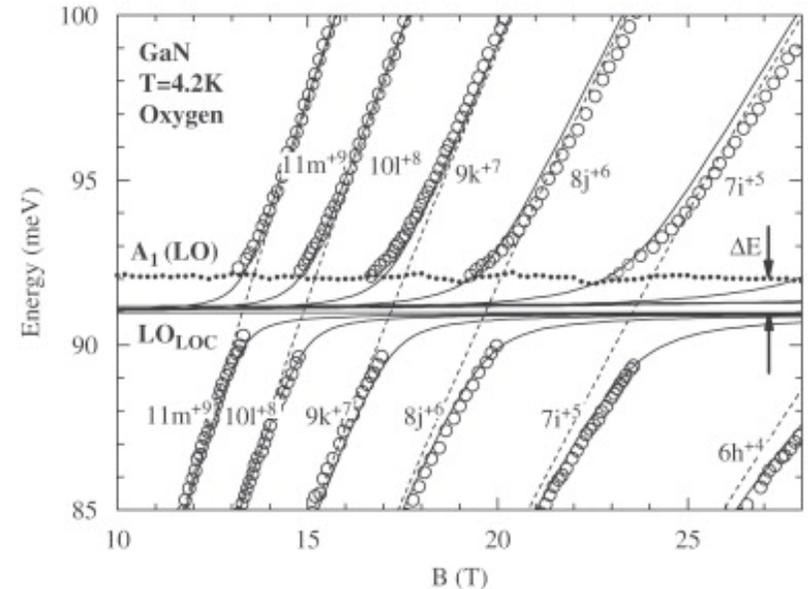
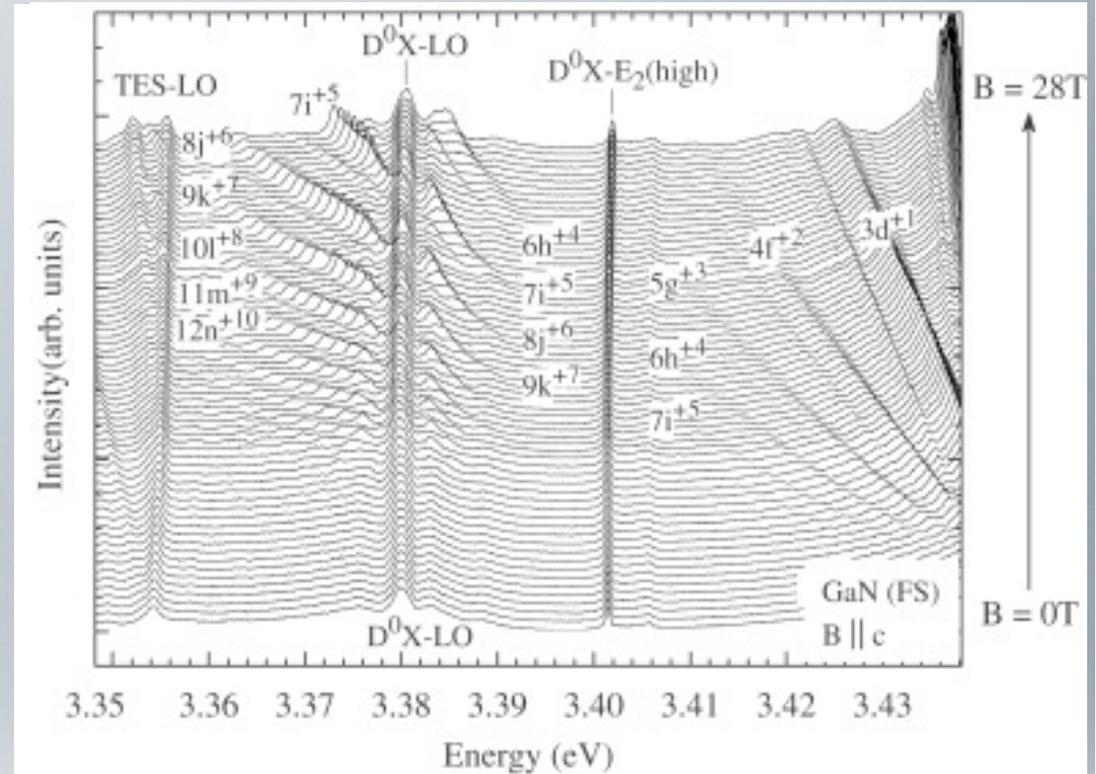
oddziaływanie między stanami: przykłady



Wzbudzenia magnetoplazmonowe w GaN/AlGaN
 K. Nogajewski, J. Łusakowski, M. Grynberg

Magneto-spectroscopy of donor-bound excitons in GaN

A. Wysmolek^{a,1}, R. Stępniewski^a, M. Potemski^b



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

foton o wektorze falowym

$$\vec{k} = (k_x, k_y, k_z)$$

w mikrownęce posiada skwantowaną współrzędną z (w kierunku wzrostu mikrownęki o dł. L_C):

$$k_z = \frac{2\pi}{L_C}$$

posiada więc energię:

$$E(\vec{k}) = \frac{\hbar c}{n} |\vec{k}| = \frac{\hbar c}{n} \sqrt{\left(\frac{2\pi}{L_C}\right)^2 + k_{II}^2}$$

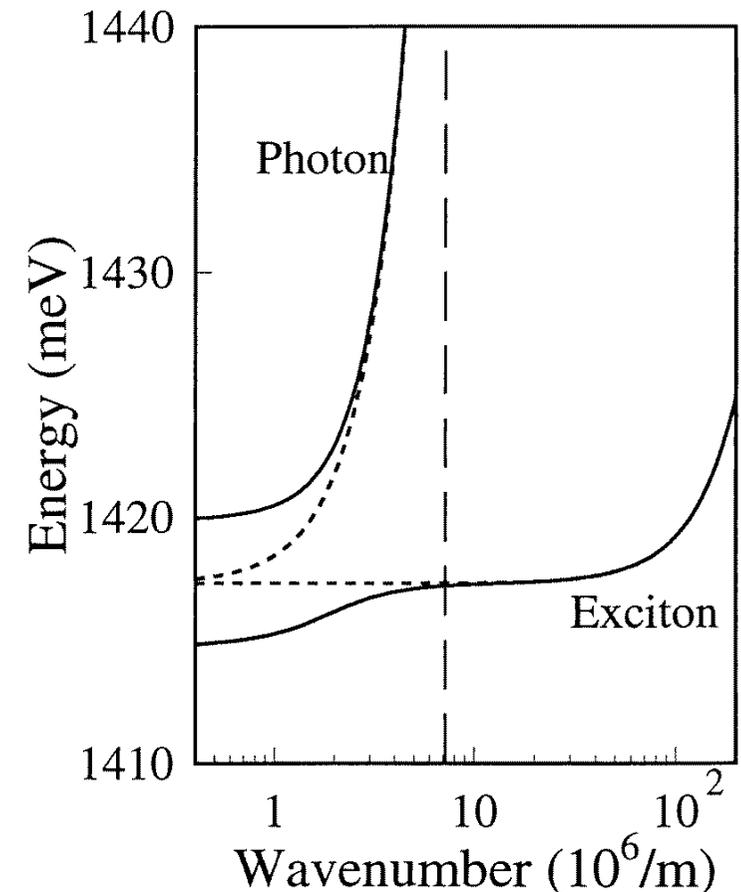


image after: M. S. Skolnick et al.
Semicond. Sci. Technol. 13, 645 (1998)

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

$$E(\vec{k}) = \frac{\hbar c}{n} |\vec{k}| = \frac{\hbar c}{n} \sqrt{\left(\frac{2\pi}{L_C}\right)^2 + k_{II}^2}$$

ponieważ interesują nas małe wektory falowe k_{II} można zastosować przybliżenie:

$$\sqrt{\varepsilon^2 + a^2} \approx a + \frac{\varepsilon^2}{2a}$$

i zapisać energię w postaci:

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

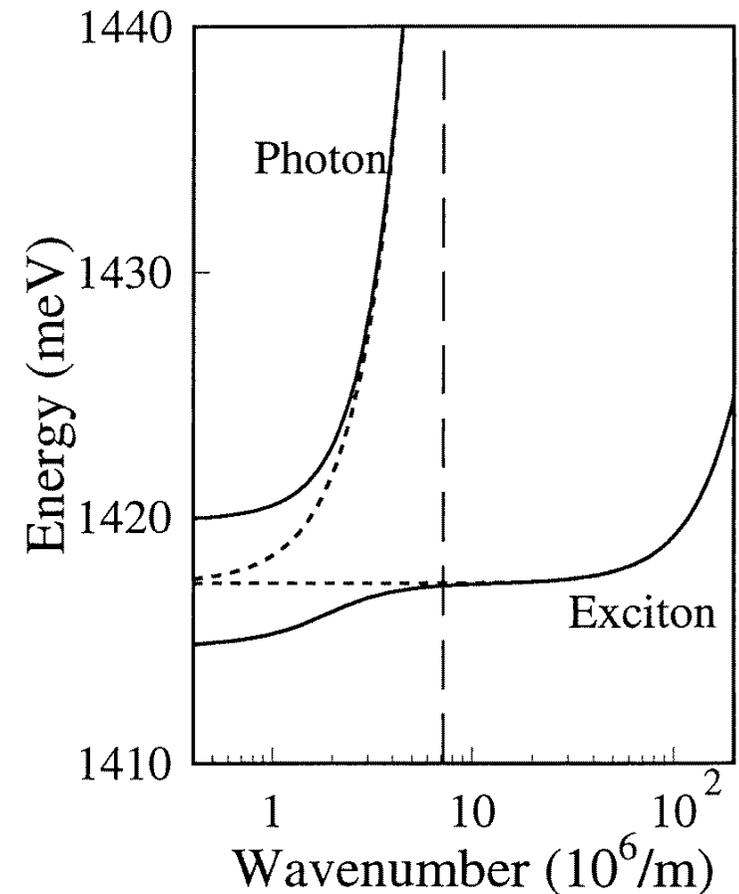


image after: M. S. Skolnick et al.
Semicond. Sci. Technol. 13, 645 (1998)

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

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

wnioski:

foton o masie efektywnej !!!

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

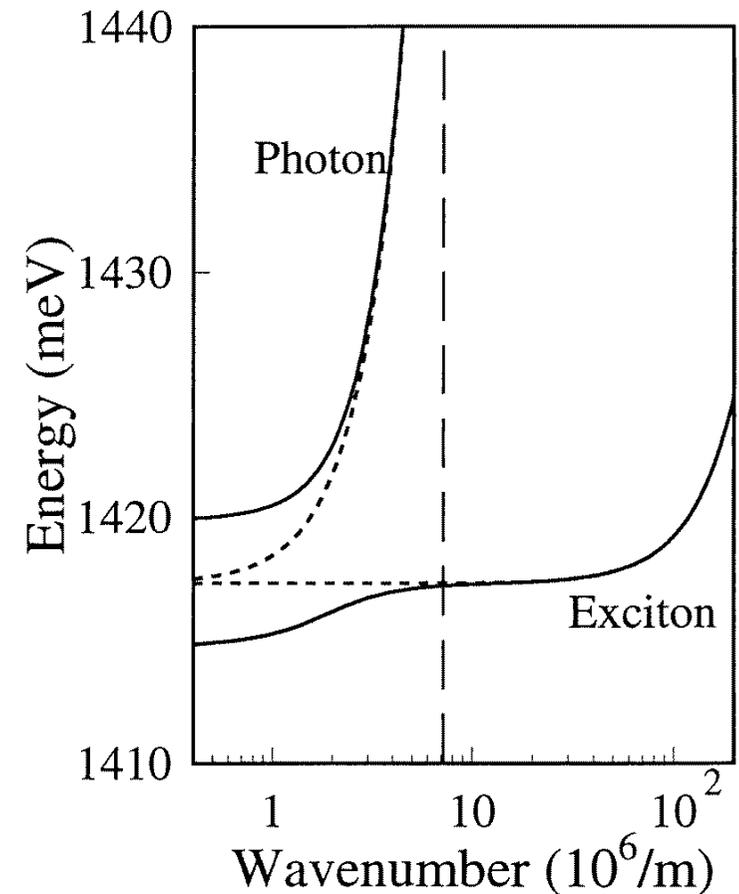


image after: M. S. Skolnick et al.
Semicond. Sci. Technol. 13, 645 (1998)

POLARYTONY W MIKROWNĘCE

experimental access

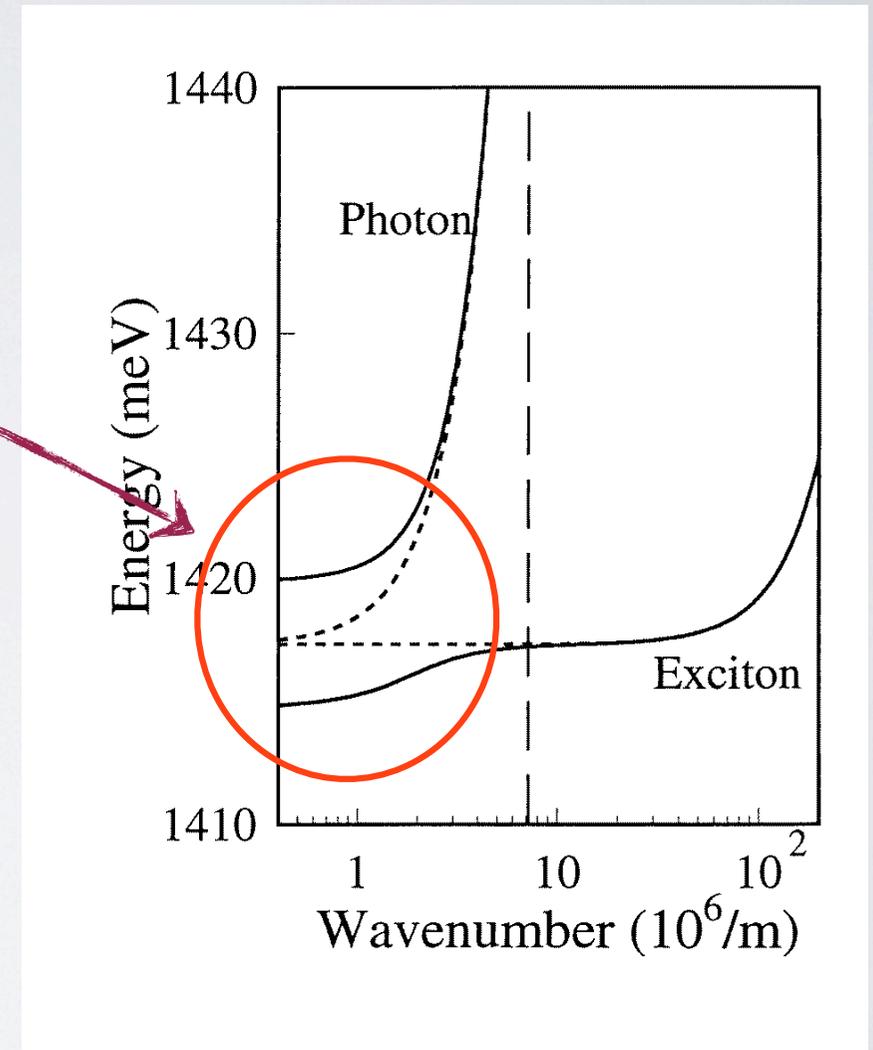
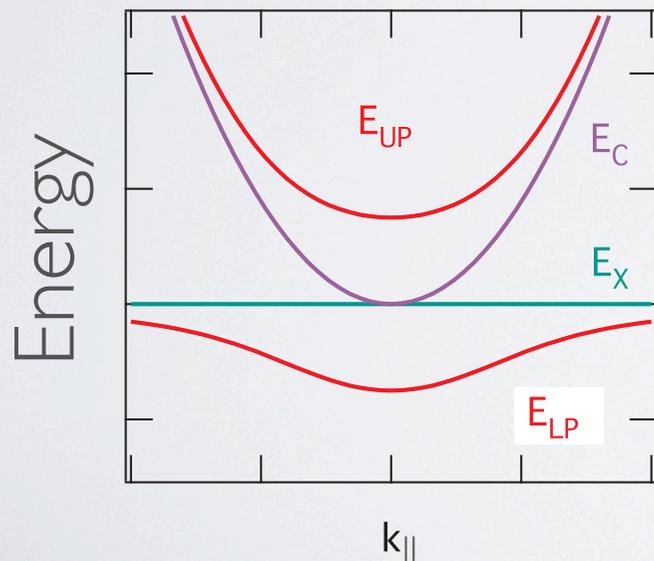
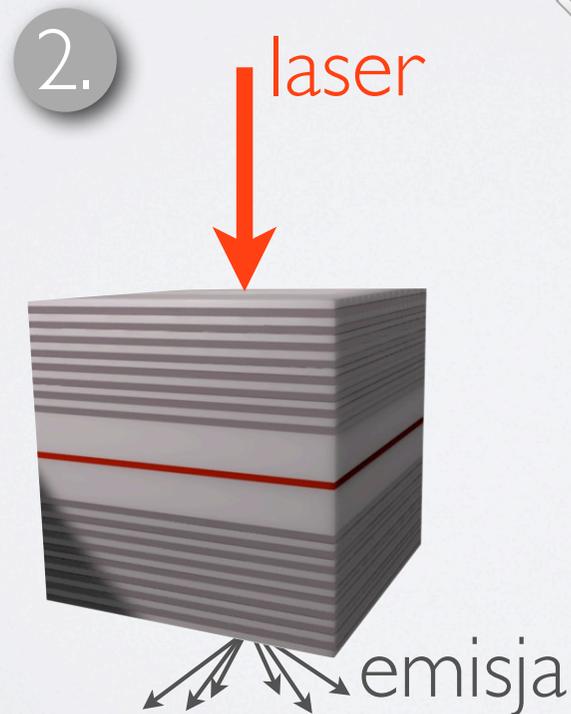
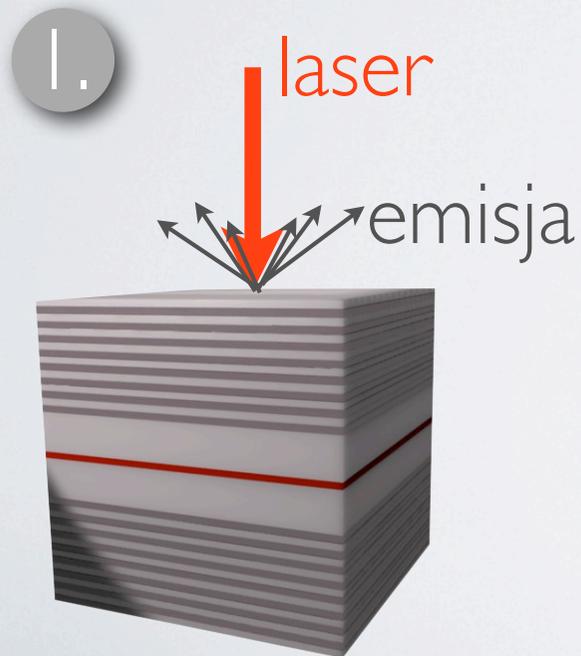
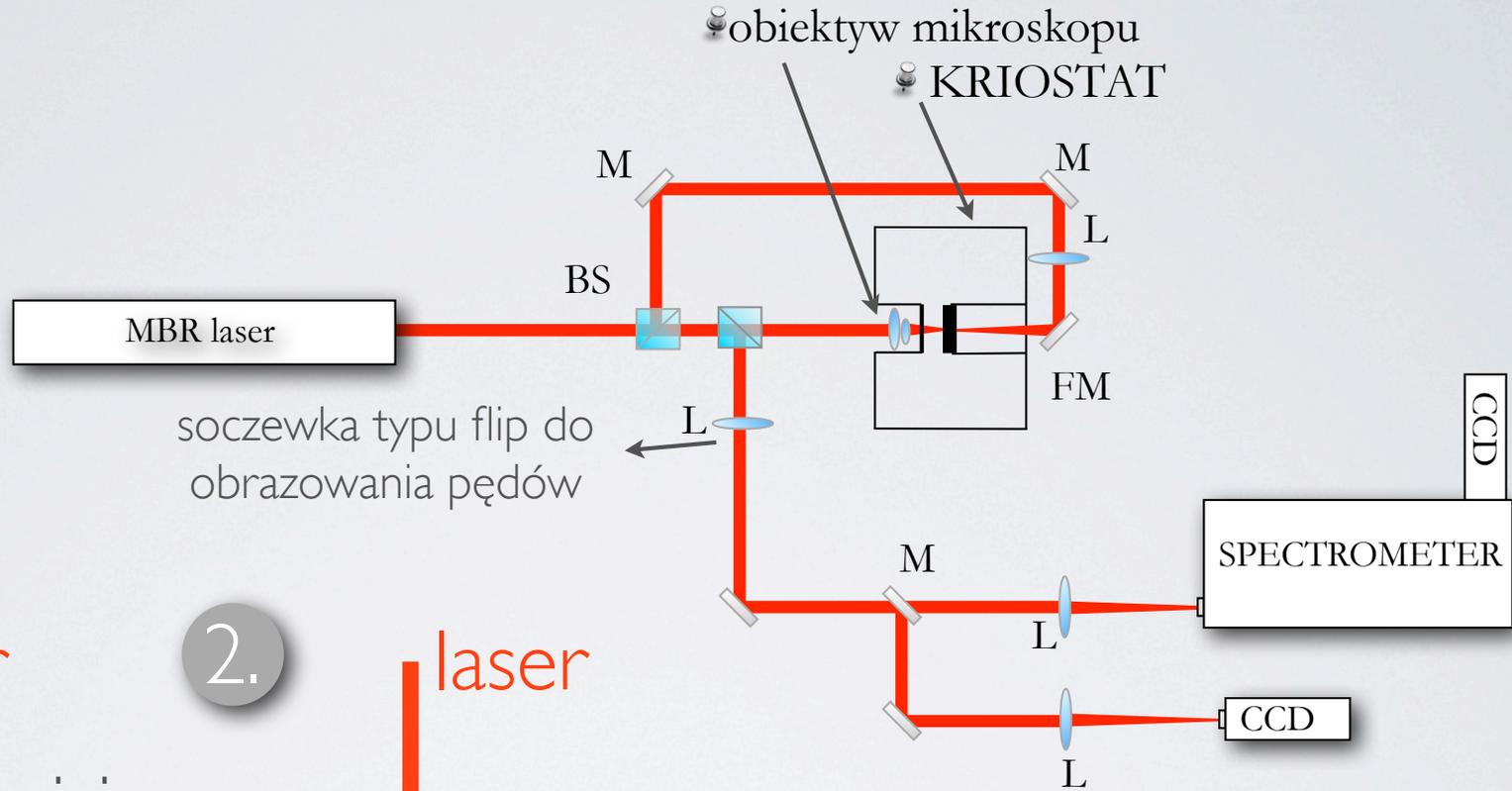


image after: M. S. Skolnick et al.
Semicond. Sci. Technol. 13, 645 (1998)

TYPOWY UKŁAD EKSPERYMENTALNY

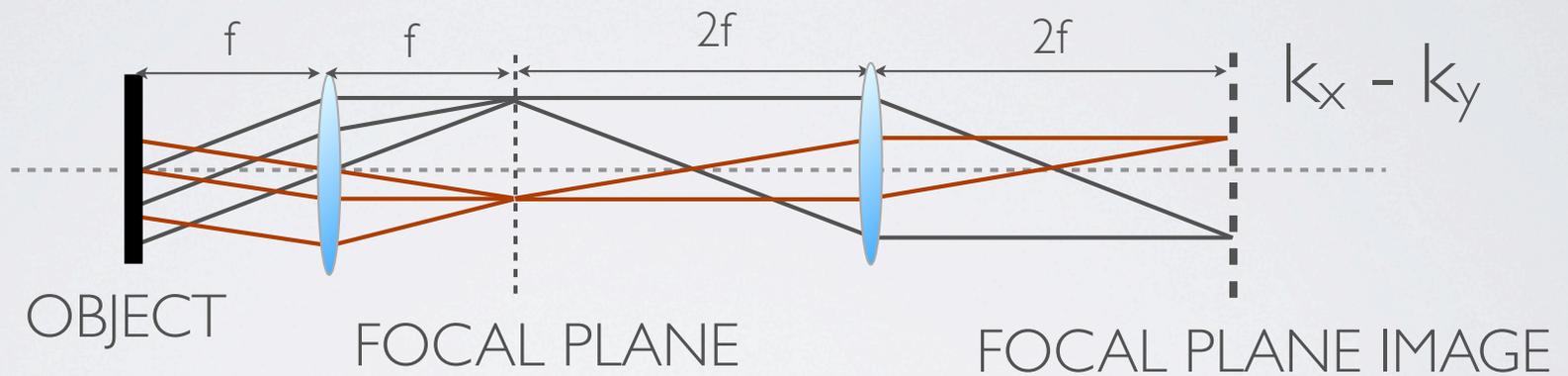


$$k_{\parallel} = k \sin \theta_{ext} = \frac{E(\theta_{ext})}{\hbar c} \sin \theta_{ext}$$

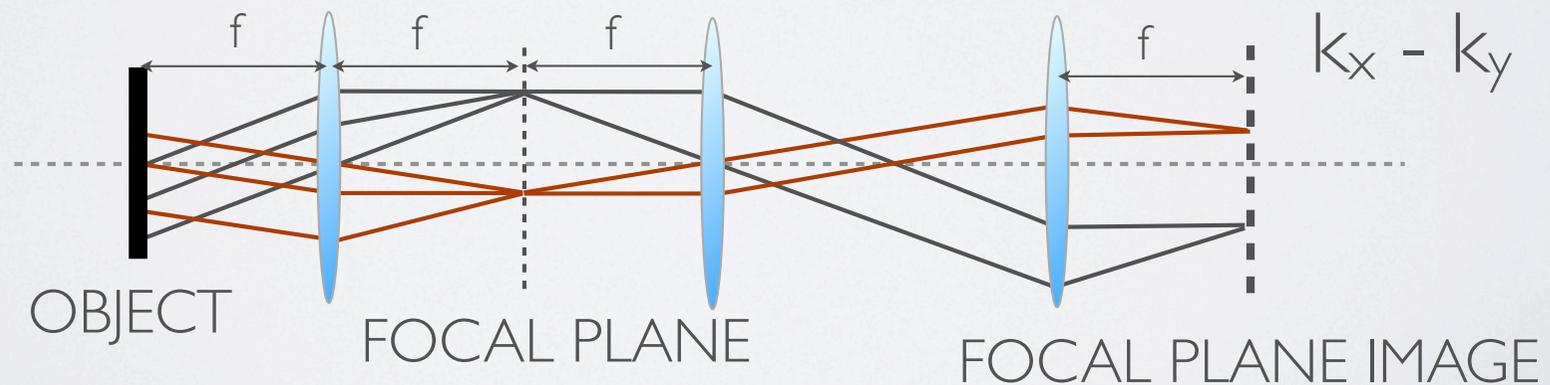
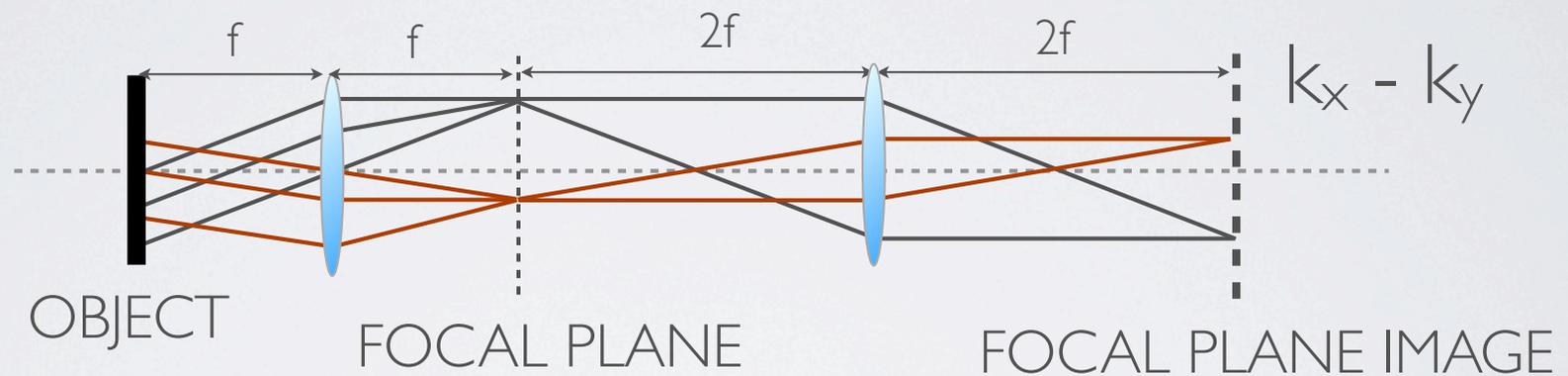
REAL (x) & MOMENTUM (k) SPACE



REAL (x) & MOMENTUM (k) SPACE

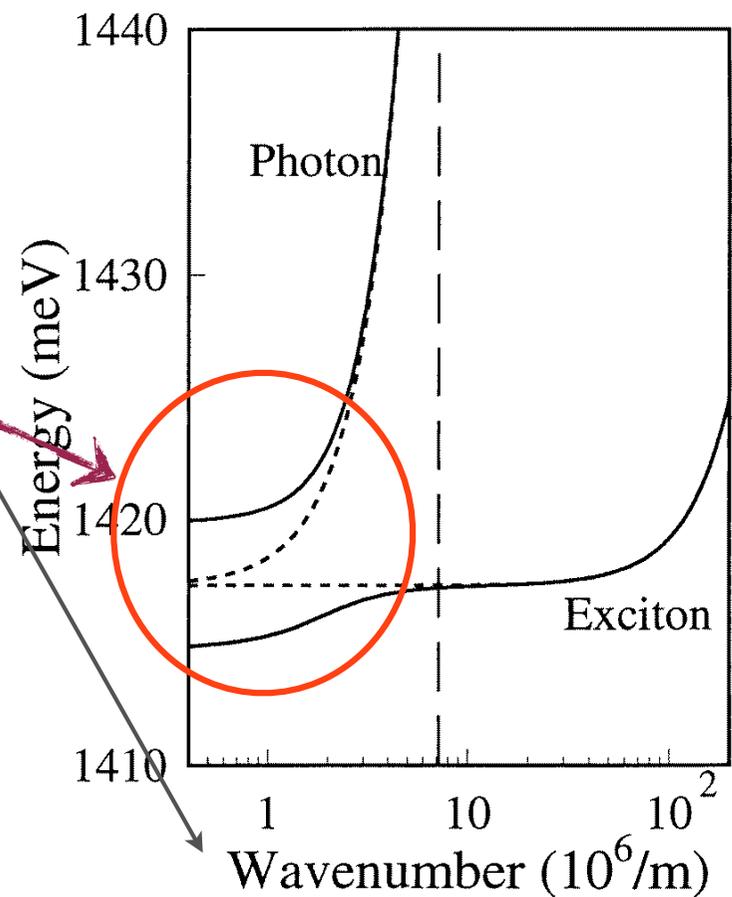
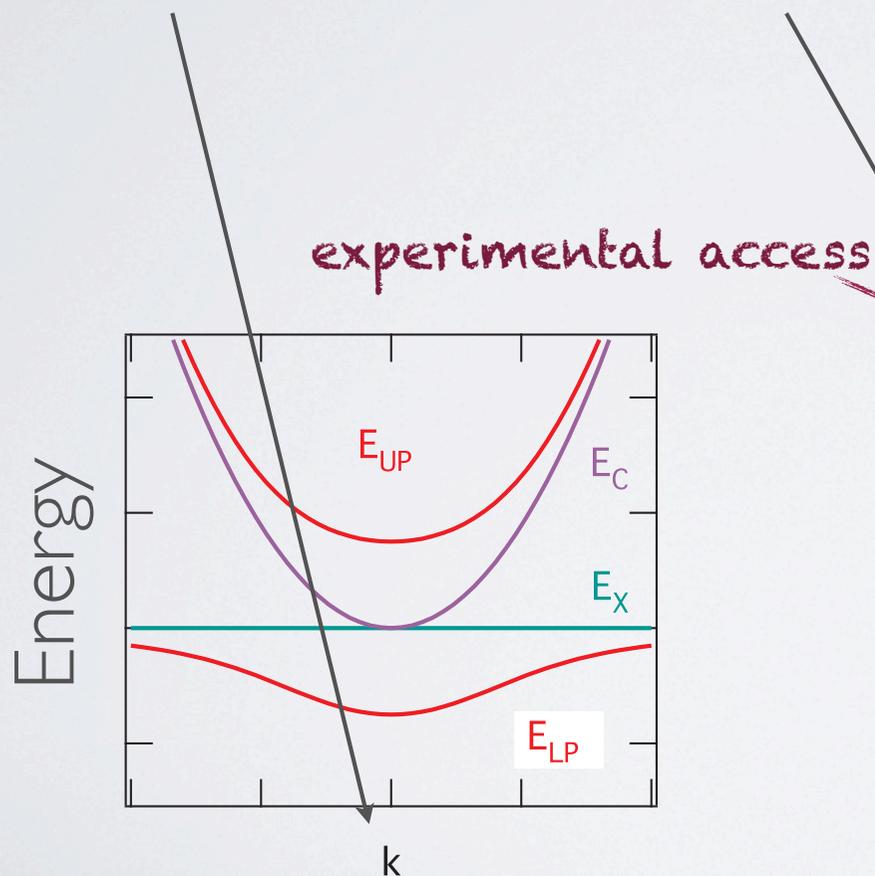


REAL (\mathbf{x}) & MOMENTUM (\mathbf{k}) SPACE



POLARYTONY W MIKROWNECE

oś x :
!!! kąt emisji !!!
= pęd polarytonów



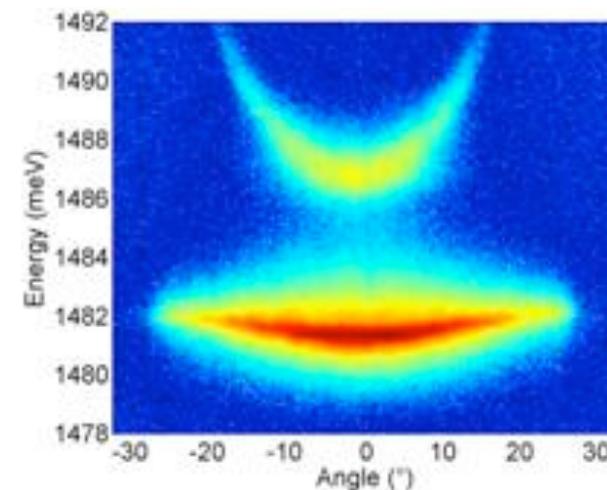
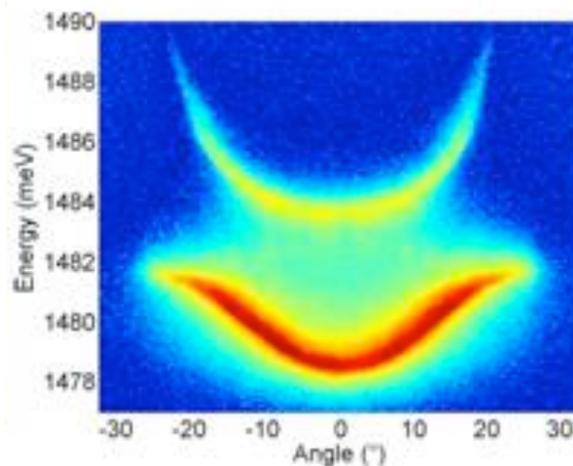
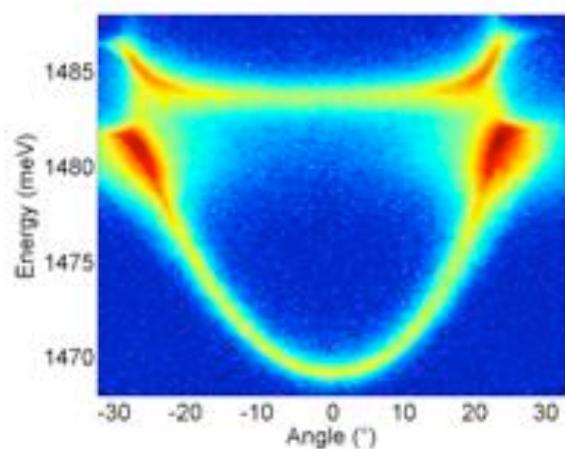
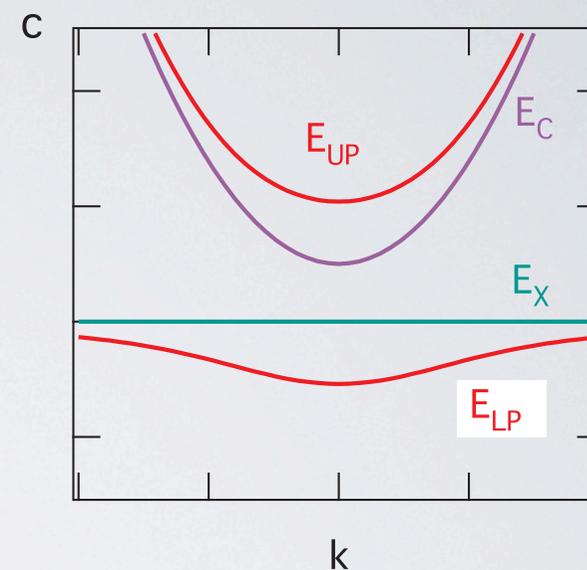
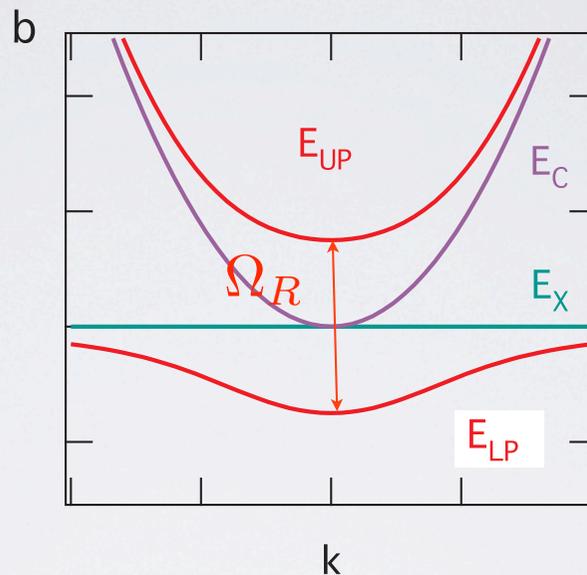
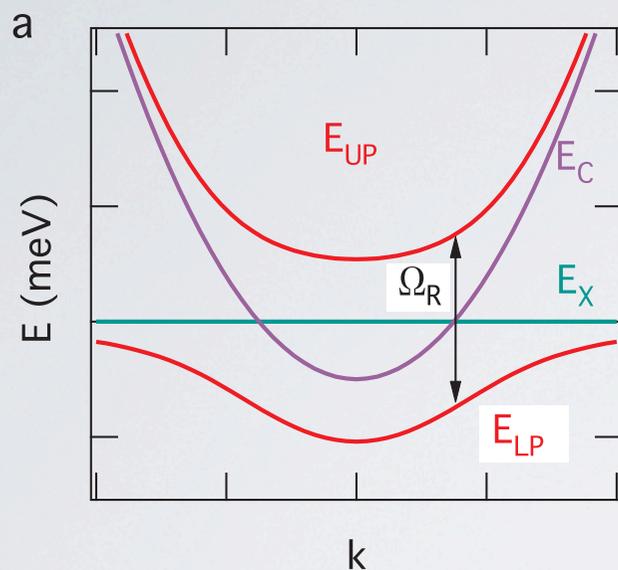
DISPERSION SHAPE AND DETUNING

vs. odstrojenie

negative

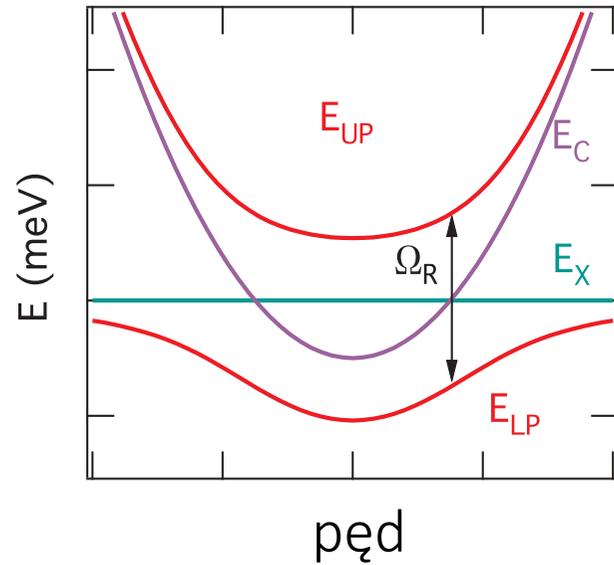
zero

positive

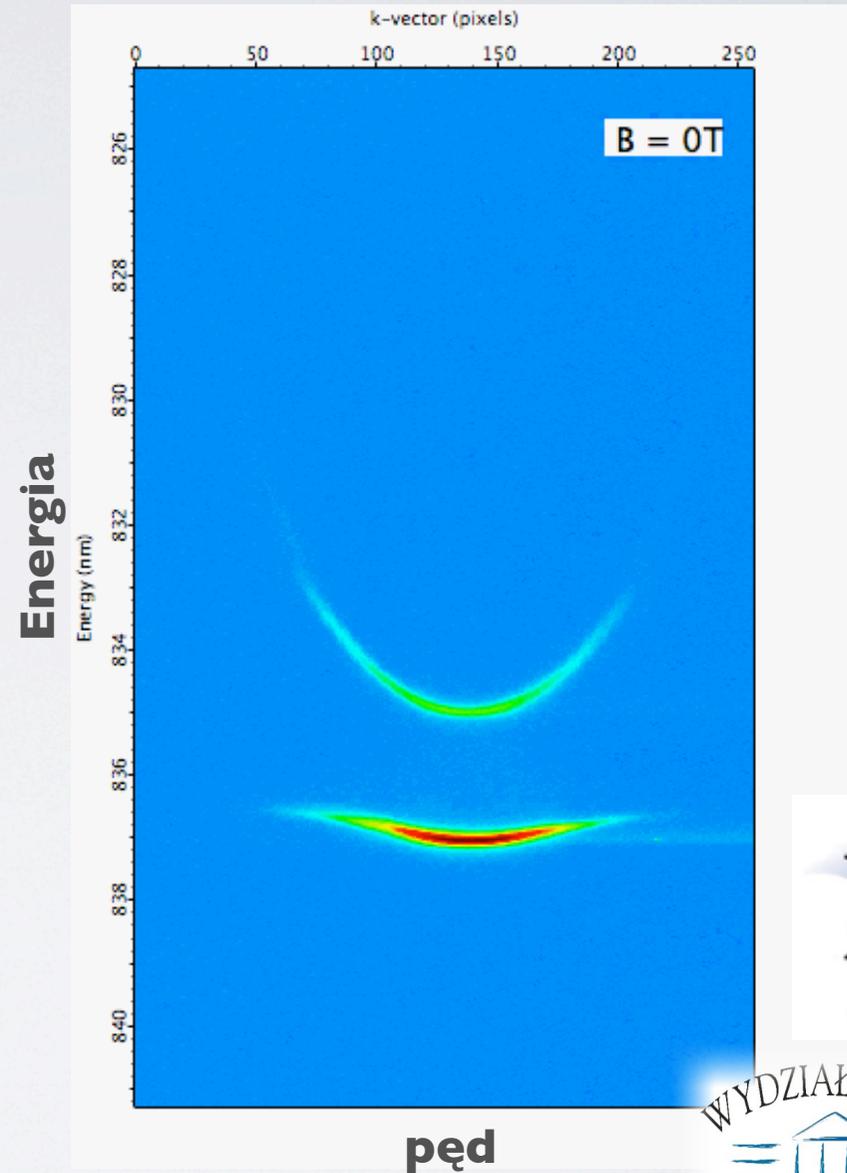


images after B. Deveaud et. al.

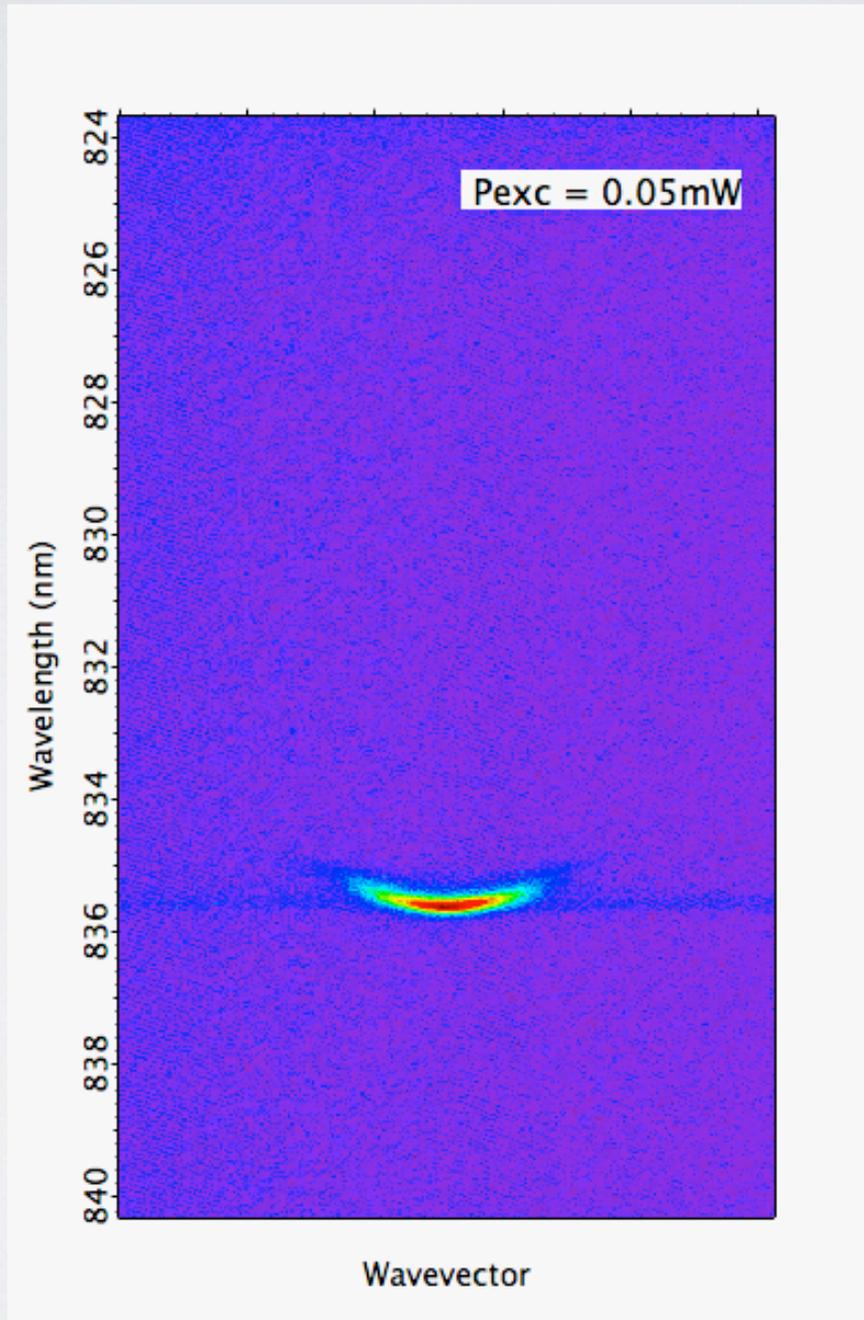
DYSPERSJA = ZALEŻNOŚĆ ENERGII OD PĘDU CZĄSTKI



- masa, energia
- **oddziaływania** pomiędzy polarytonami (polaryton-polaryton, spinowe, polaryton - fonon)



MOŻLIWE CZYSTE LASEROWANIE !



co to jest

? POLARYTON ?

co można z nim zrobić



KONDENSAT BOSEGO - EINSTEINA



NADCIEKŁOŚĆ I WIRY KWANTOWE



OBRAZOWANIE MECHANIKI KWANTOWEJ -
FUNKCJE FALOWE STANÓW ZWIĄZANYCH

polarytony

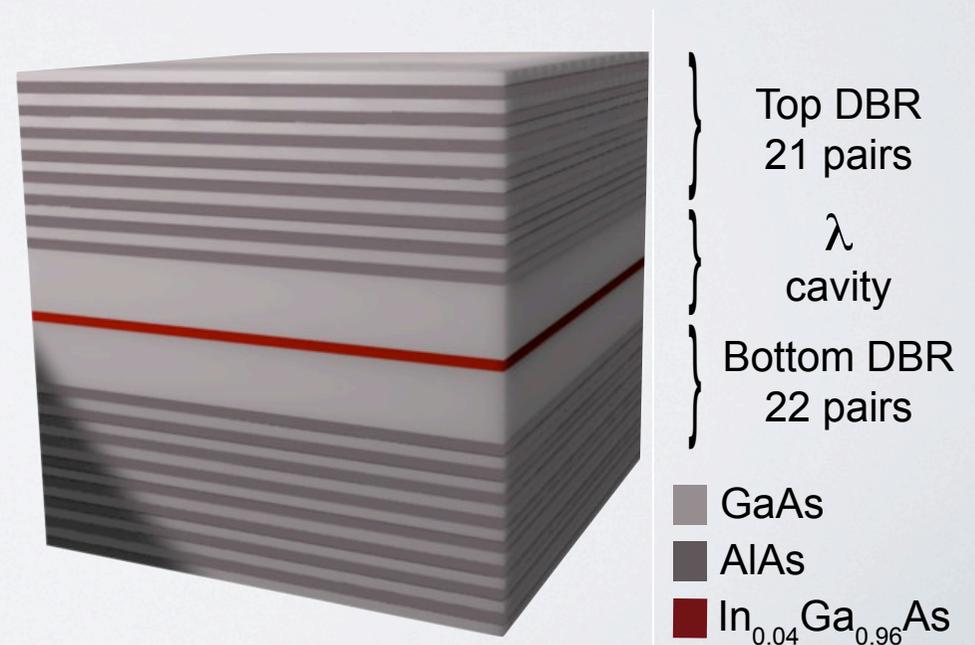
POLARYTON = EKSCYTON + PHOTON

50% materia + 50% światło

(lub w dowolnym innym podziale procentowym)

Polarytony

- mają małą masę efektywną (są lekkie)
- mogą mieć pęd - mogą się poruszać w płaszczyźnie próbki
- są bozonami



KONDENSAT ?

- nowy stan materii tworzony przez bozony w niskiej temperaturze

STANY SKUPIENIA:

(powszechne)

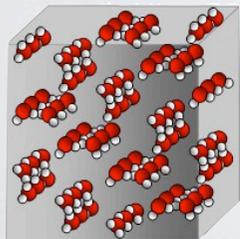
przejście
fazowe

- ciało stałe
- ciecz
- gaz
- plazma

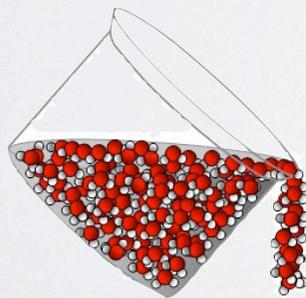
ALE RÓWNIEŻ (mniej znane):

- stany nieklasyczne (szkła, żele, zole)
- nadprzewodniki
- stany nadciekłe
- stany superstałe
- stany kwantowego efektu halla
- ciecze nadkrytyczne
- materia zdegenerowana
- materia dziwna
- materia Rydbergowska
- i wiele innych...

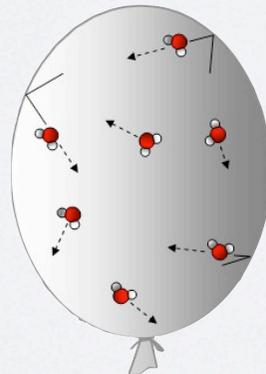
 H₂O



SOLIDE
glace



LIQUIDE



GAZ
Vapeur d'eau

KONDENSAT ?

- nowy stan materii tworzony przez bozony w niskiej temperaturze

STANY SKUPIENIA:

(powszechne)

ALE RÓWNIEŻ (mniej znane):

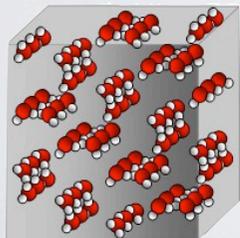
przejście
fazowe

- ciało stałe
- ciecz
- gaz
- plazma

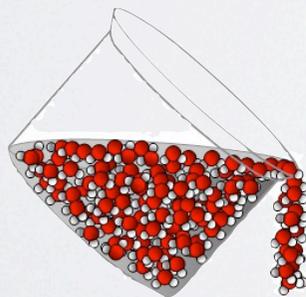
**KONDENSAT
BOSEGO -
EINSTEINA**

- stany nieklasyczne (szkła, żele, zole)
- nadprzewodniki
- stany nadciekłe
- stany superstałe
- stany kwantowego efektu halla
- ciecze nadkrytyczne
- materia zdegenerowana
- materia dziwna
- materia Rydbergowska
- i wiele innych...

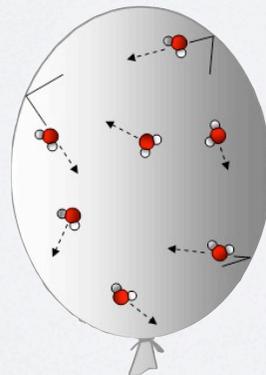
 H₂O



SOLIDE
glace



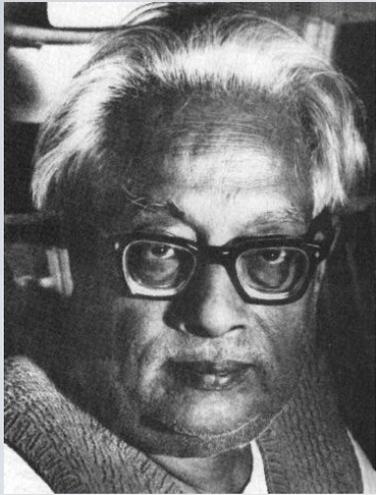
LIQUIDE



GAZ
Vapeur d'eau

KONDENSAT

1924 - 1925
odkrycie teoretyczne

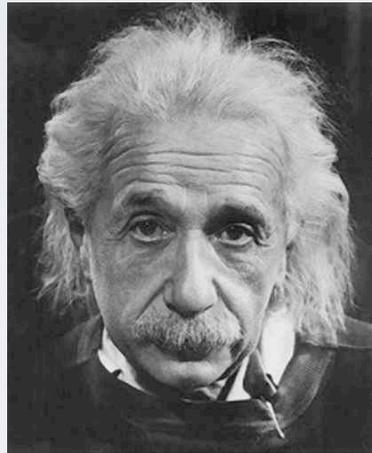


Satyendra
Natah Bose

Statystyka kwantowa kwantów światła (fotony)

S. N. Bose, Z. Phys. 26, 178 (1924)

- wiele fotonów w tym samym stanie kwantowym
- całkowita nierozróżnialność dwóch fotonów w tym samym stanie

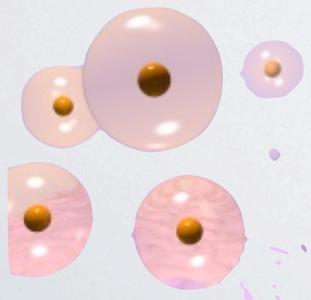


Albert Einstein

Nie tylko światło, ale i materia (bozony) mogą mieć te same własności.

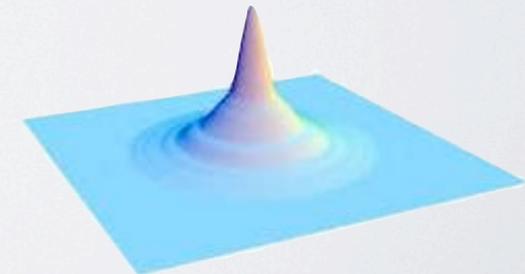
A. Einstein, Sitzungsber. Preuss. Akad. Wiss.,
Bericht 3, p. 18 (1925)

Recepta:

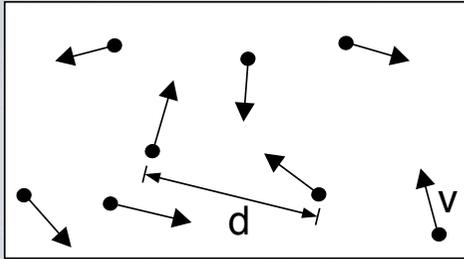


$\downarrow T$, pułapka

przejście fazowe (II rodzaju)

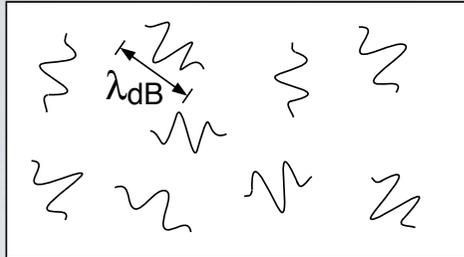


KONDENSAT (schemat)



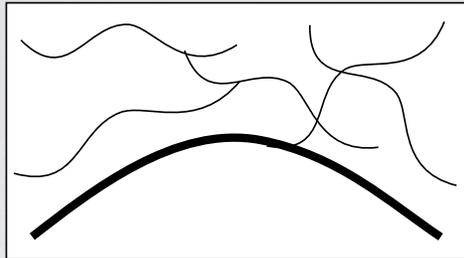
High Temperature T:
thermal velocity v
density d^{-3}
"Billiard balls"

Wysoka temperatura:
"kule bilardowe"



Low Temperature T:
De Broglie wavelength
 $\lambda_{dB} = h/mv \propto T^{-1/2}$
"Wave packets"

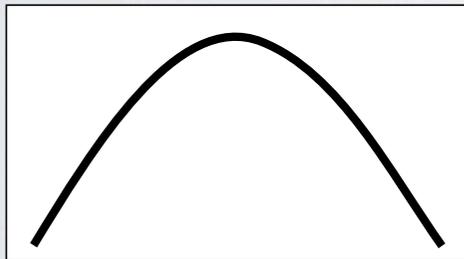
Niska temperatura:
"paczka falowa"



$T = T_c$:
BEC
 $\lambda_{dB} \approx d$
"Matter wave overlap"

Temperatura krytyczna:
"przekrywanie się paczek falowych"

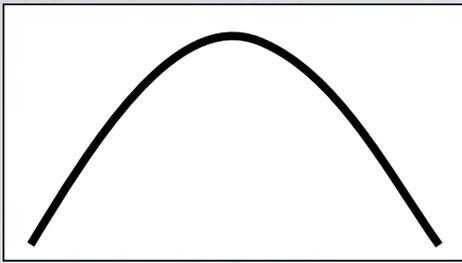
"zupa kwantowa" nierozróżnialnych cząstek



$T = 0$:
Pure Bose condensate
"Giant matter wave"

Zero bezwzględne:
"makroskopowa fala materii"

źródło: WHEN ATOMS BEHAVE AS WAVES: BOSE-EINSTEIN
CONDENSATION AND THE ATOM LASER
W. Ketterle, Nobel Lecture, December 8, 2001



T=0:
Pure Bose
condensate
"Giant matter wave"

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

Zero bezwzględne:
“makroskopowa fala materii”

Makroskopowa
faza kwantowa

- Makroskopowe obsadzenie stanu podstawowego
- Wzrost spójności czasowej
- Pojawienie się korelacji dalekiego zasięgu (long-range order)

zdolność do
interferencji !!

Fizyka kwantowa w skali makroskopowej !

HISTORIA realizacji eksperymentalnej



*Techniki chłodzenia laserowego :
Nagroda Nobla z Fizyki 1997*

Steven Chu
Claude Cohen-Tannoudji
William D. Philips

70 lat po pracach Bosego & Einsteina... 1995

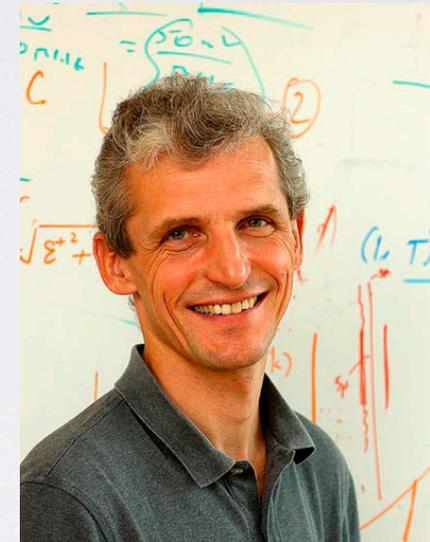


Gaz atomów rubidu
schłodzony do 170nK !!!

4 miesiące później 1995

Gaz atomów sodu
(100 razy więcej atomów)

Carl Wieman
Eric Cornell
University of Colorado
at Boulder NIST-JILA

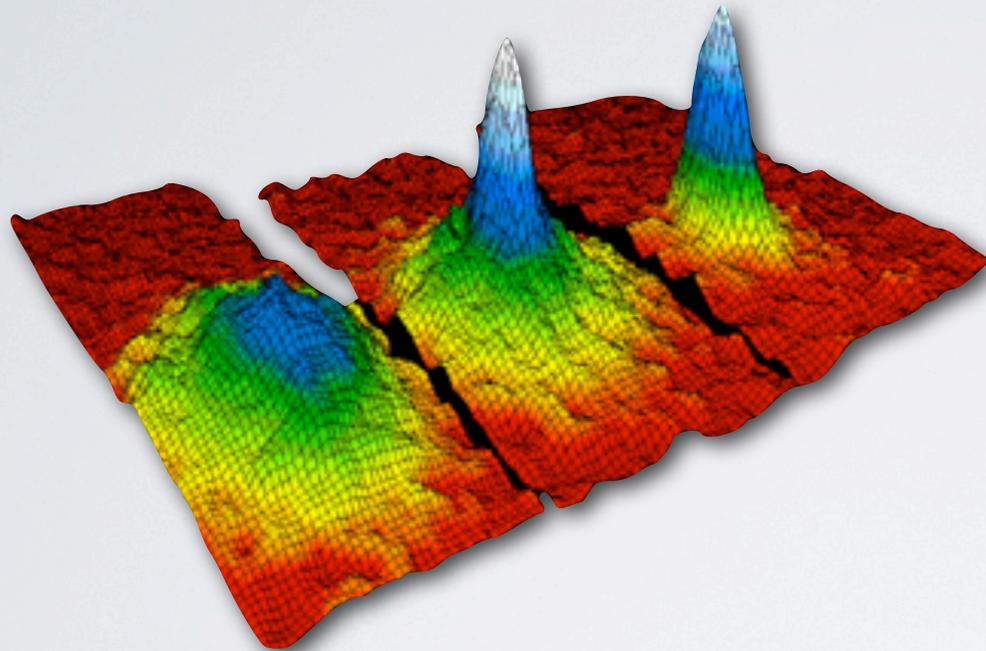


Wolfgang Ketterle
Massachusetts Institute
of Technology

Nagroda Nobla z Fizyki 2001

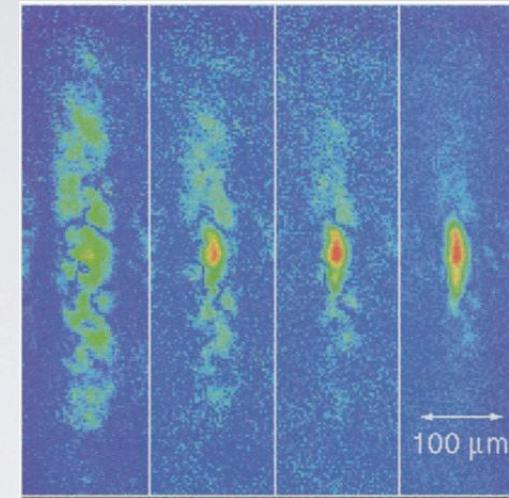
HISTORIA

c.d. - dane eksperymentalne



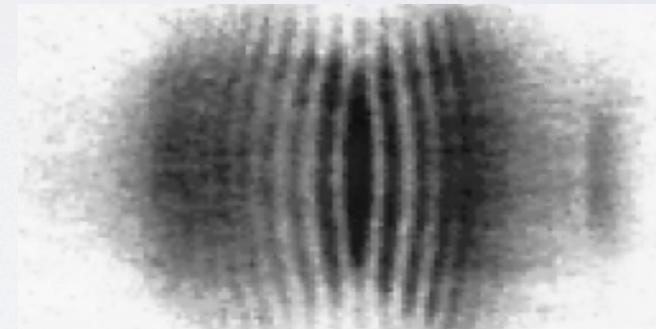
Rozkład prędkości gazu atomów rubidu.

M. H. Anderson et al., Science **269**, 198 (1995)



Niedestrukcyjna obserwacja kondensatu Bosego - Einsteina

M. R. Andrews et al., Science **273**, 84 (1996)



Interferencja pomiędzy dwoma atomowymi kondensatami Bosego - Einsteina

M. R. Andrews et al., Science **275**, 637 (1997)

KONDENSAT

w ciele stałym ?

w temperaturze pokojowej ?

Kwazi-cząstki bozonowe :

polarytony

POLARYTON = EKSCYTON + PHOTON

1/2 materia + 1/2 światło

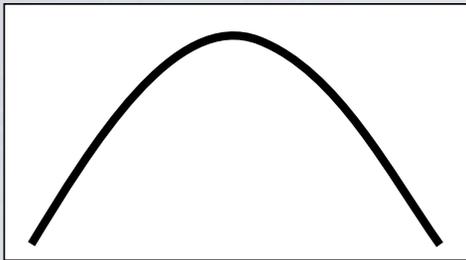
	atoms	POLARITONS
m	Rb: $10^4 m_e$	$10^{-4} m_e$
T	$10^{-7} K$	$>100 K$
N	$10^{14} / \text{cm}^3$	$<10^{11} / \text{cm}^2$
t	∞	10 ps
TRAP	(x,y,z)	(k_x, k_y)

podstawowe pytania:

- czy jest to możliwe ?
- jakie byłyby własności takiego stanu ?

zastosowania :

- spójne źródło światła
- urządzenia optoelektroniczne
- integracja w obwodach optoelektronicznych



T=0:
Pure Bose
condensate
"Giant matter wave"

Zero bezwzględne:
“makroskopowa fala materii”

Makroskopowa
faza kwantowa

- Makroskopowe obsadzenie stanu podstawowego

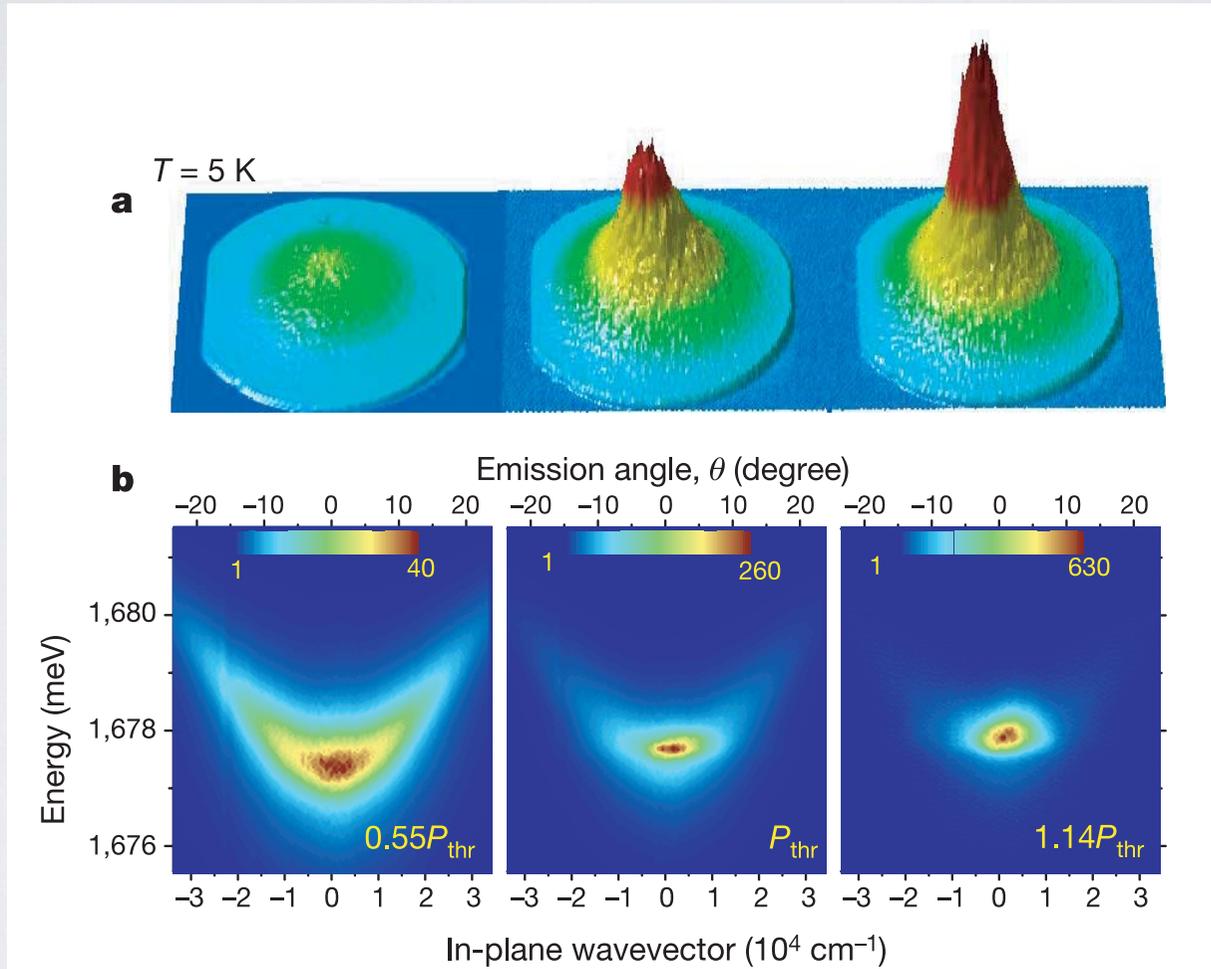
- Wzrost spójności czasowej
- Pojawienie się korelacji dalekiego zasięgu (long-range order)

zdolność do
interferencji !!

Bose-Einstein condensation of exciton polaritons

nature

J. Kasprzak¹, M. Richard², S. Kundermann², A. Baas², P. Jeambrun², J. M. J. Keeling³, F. M. Marchetti⁴, M. H. Szymańska⁵, R. André¹, J. L. Staehli², V. Savona², P. B. Littlewood⁴, B. Deveaud² & Le Si Dang¹



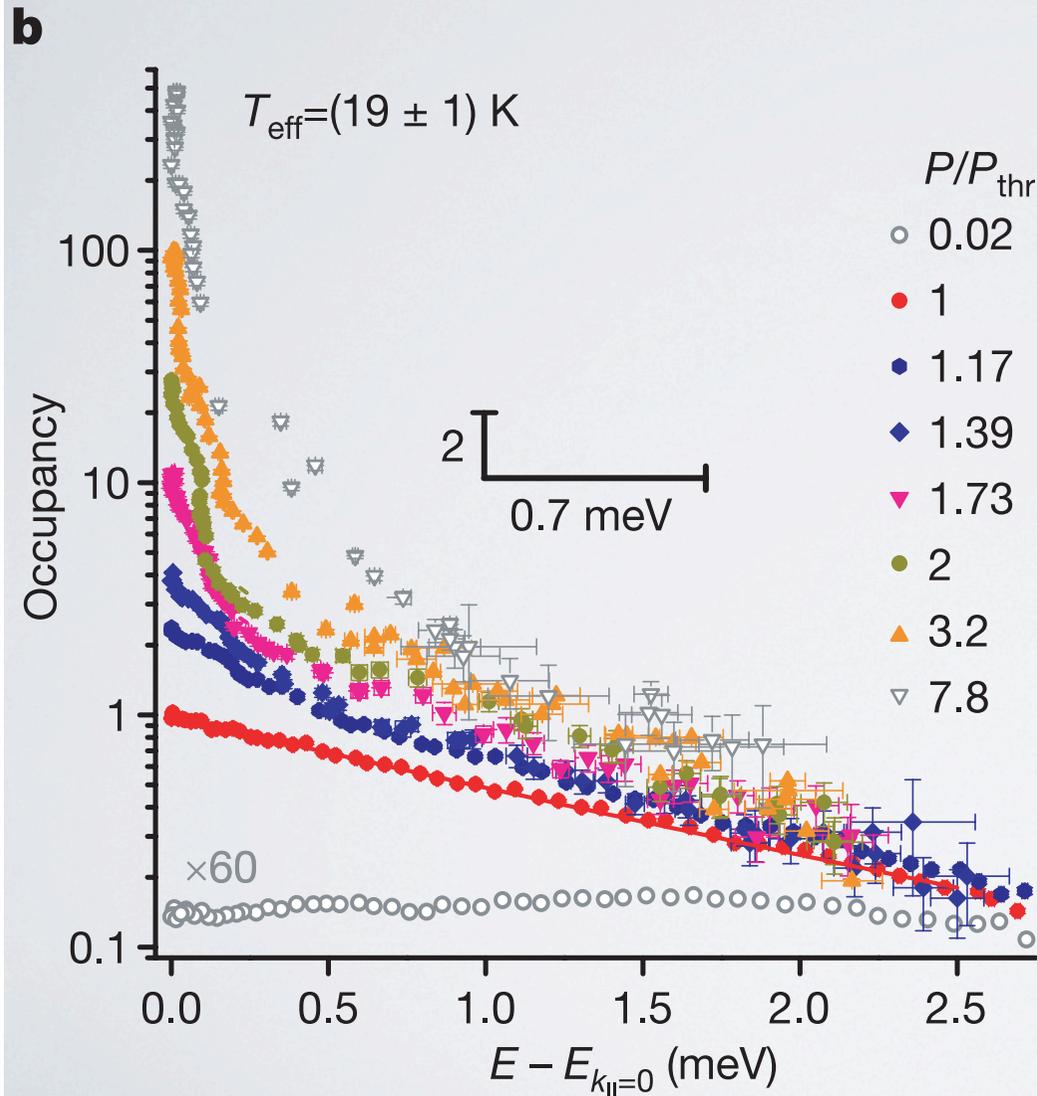
MAKROSKOPOWE
OBASEDZENIE STANU
PODSTAWOWEGO

zwiększanie gęstości polarytonów

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

Bose-Einstein condensation of exciton polaritons

J. Kasprzak¹, M. Richard², S. Kundermann², A. Baas², P. Jeambrun², J. M. J. Keeling³, F. M. Marchetti⁴, M. H. Szymańska⁵, R. André¹, J. L. Staehli², V. Savona², P. B. Littlewood⁴, B. Deveaud² & Le Si Dang¹



rozkład Maxwella - Boltzmannna
w równowadze termicznej

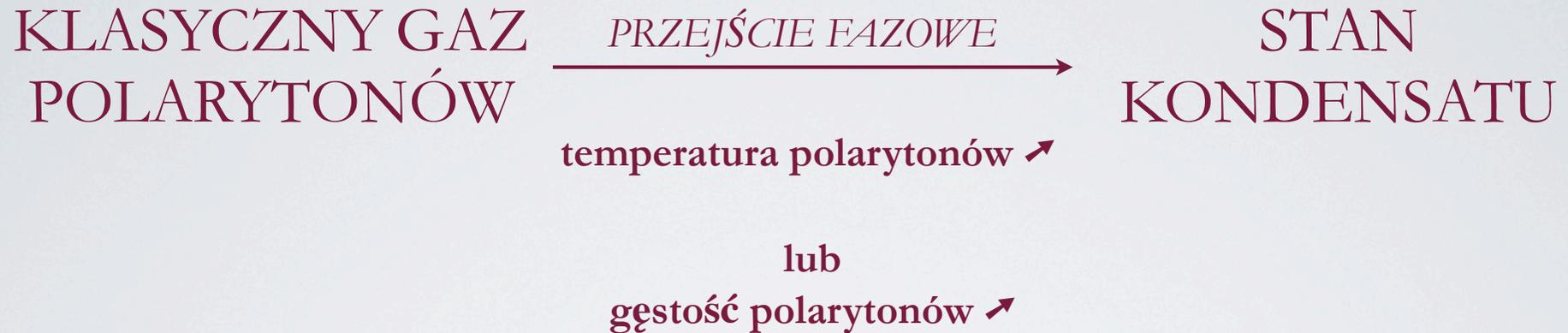
$$n_j = \frac{N}{Z} e^{-\frac{\varepsilon_j}{kT}}$$

rozkład Bosego- Einsteina w
stanie kondensatu

$$n_i = \frac{g_i}{Be^{\frac{\varepsilon_i}{kT}} - 1}$$

(z dokładnością do tego że kondensat polarytonów nie jest kondensatem w równowadze termodynamicznej : pojawianie się stanów wzbudzonych i zmiana gęstości stanów stanu podstawowego)

PRZEJŚCIE FAZOWE



+ niska temperatura (10K), nie jest konieczna dla materiałów o dużej przerwie energetycznej np. GaN

literatura: GaN based microcavities
prof. N. Grandjean EPFL, Lausanne

PRZEJŚCIE FAZOWE I RODZAJU

Istnienie nieciągłości (skoku) pierwszej pochodnej energii swobodnej (po jakiejś zmiennej termodynamicznej)

Istnienie nieciągłości (skoku) pierwszej pochodnej potencjału chemicznego po temperaturze

dostarczamy ciepło - temperatura nie zmienia się aż do zmiany fazy w całej objętości

ciało stałe
ciecz
gaz
↑
nieciągłość
gęstości

PRZEJŚCIE FAZOWE II RODZAJU

„przejścia ciągłe”

Pierwsza pochodna, ciepło właściwe, jest ciągła.

- nie ma utajonego ciepła przemiany dla dowolnej objętości ośrodka
- nie ma bariery energetycznej pomiędzy fazami
- fazy mogą współistnieć i zupełnie płynnie, bez wydatku energii, przechodzić jedna w drugą

Istnienie nieciągłości (skoku) kolejnej pochodnej potencjału chemicznego po temperaturze

**MAKROSKOPOWE FLUKTUACJE
PARAMETRU UPORZĄDKOWANIA
W OKOLICY PRZEJŚCIA FAZOWEGO !!!**

&

pojawienie się korelacji dalekiego zasięgu

PARAMETR UPORZĄDKOWANIA

coś co jest zero przed przemianą, a ma skończoną wartość po przemianie

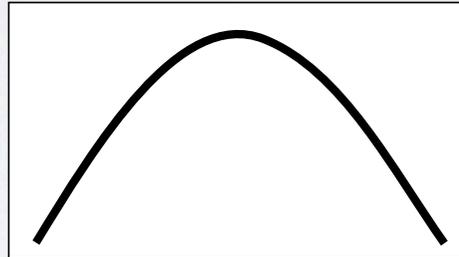
ORDER PARAMETER

$$g^{(1)}(\mathbf{r}, \mathbf{r}', \tau, t) = \langle \psi^*(\mathbf{r}, \tau, t) \psi(\mathbf{r}', \tau, t) \rangle$$

(macierz gęstości)

FIRST ORDER CORRELATION FUNCTION

SPÓJNOŚĆ FAZY !!!
czasowa i przestrzenna



T=0:
**Pure Bose
condensate**
"Giant matter wave"

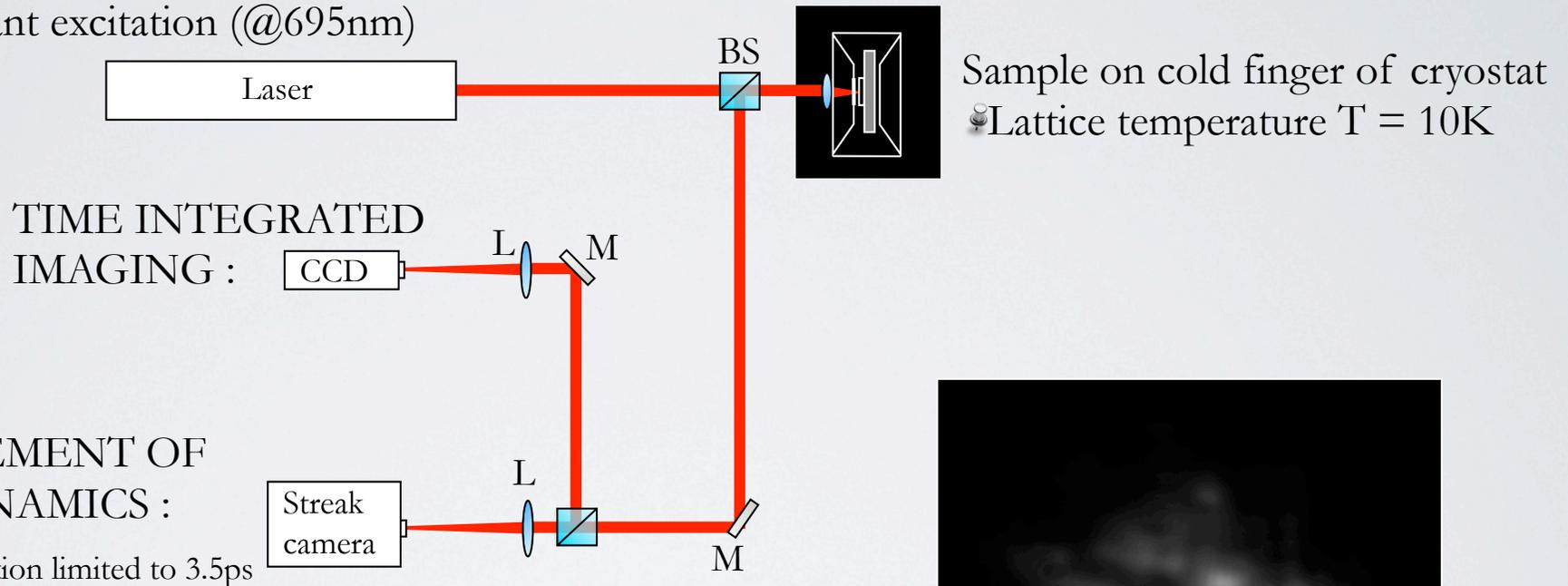
METODY EKSPERYMENTALNE

EXCITATION

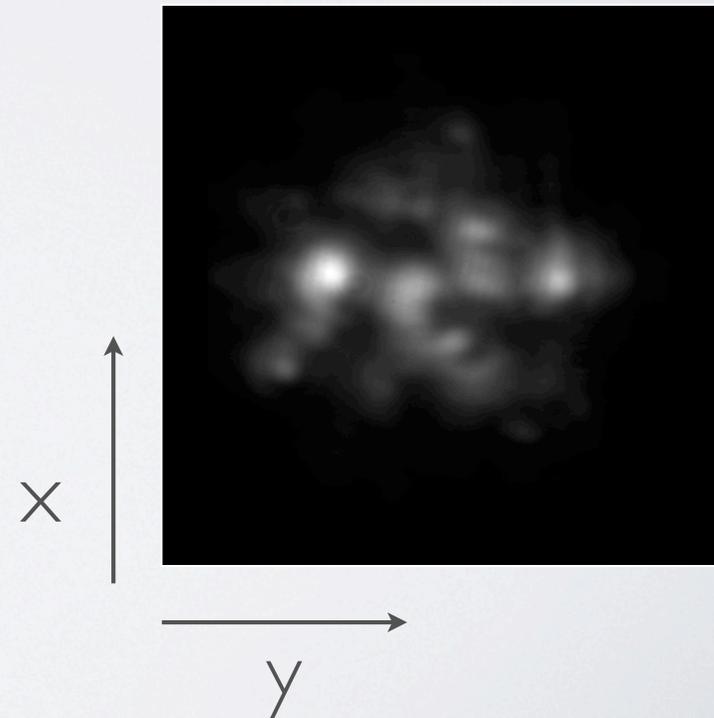
- Pulsed Ti:Sapphire (250fs pulse duration; $f=80\text{MHz}$ repetition rate) OR
- Cw Ti:Sapphire
- Non-resonant excitation (@695nm)

MICROSCOPE OBJECTIVE

- NA 0.5
- Spot size $15\mu\text{m}$
- Diffraction limited resolution



- Nieporządek
- Różne położenia dadzą różne obrazy



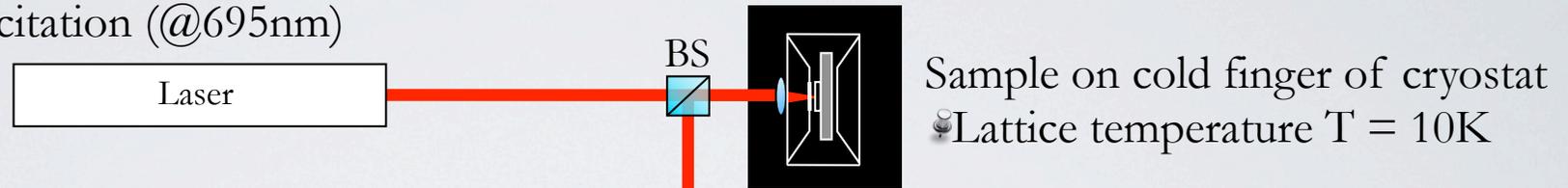
METODY EKSPERYMENTALNE

EXCITATION

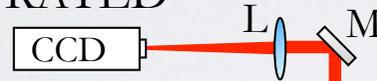
- Pulsed Ti:Sapphire (250fs pulse duration; $f=80\text{MHz}$ repetition rate) OR
- Cw Ti:Sapphire
- Non-resonant excitation (@695nm)

MICROSCOPE OBJECTIVE

- NA 0.5
- Spot size $15\mu\text{m}$
- Diffraction limited resolution



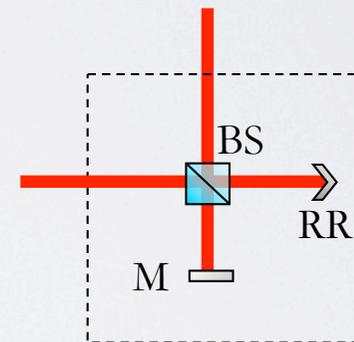
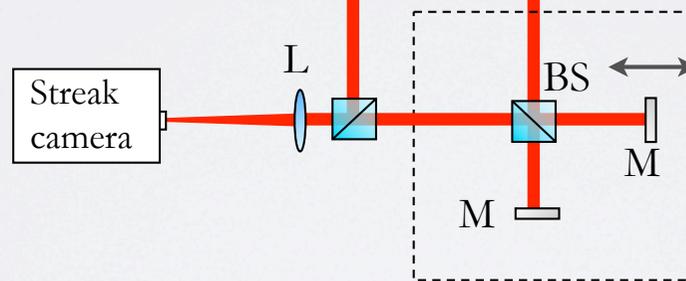
TIME INTEGRATED IMAGING :



Stabilized Michelson interferometer

MEASUREMENT OF TIME DYNAMICS :

- Time resolution limited to 3.5ps



spójność
czasowa

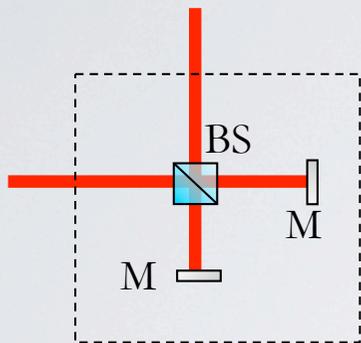
spójność
przestrzenna

MEASUREMENT OF SPATIAL COHERENCE

Operation principle

Stabilized Michelson interferometer

@ mirror- mirror configuration

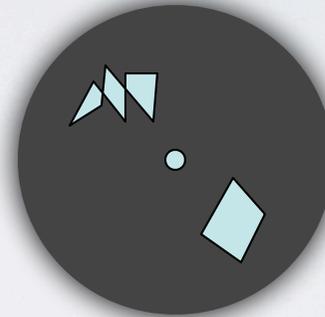


Mirror 1 arm



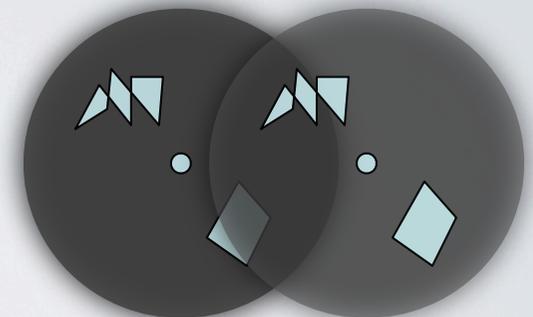
+

Mirror 2 arm

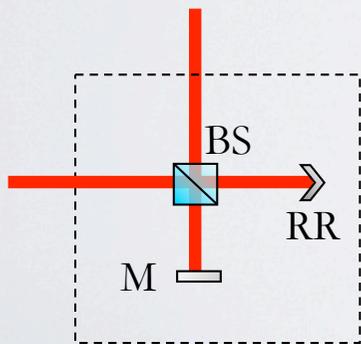


=

Interferogram



@ mirror - retroreflector configuration

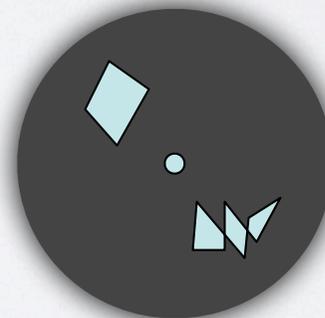


Mirror arm



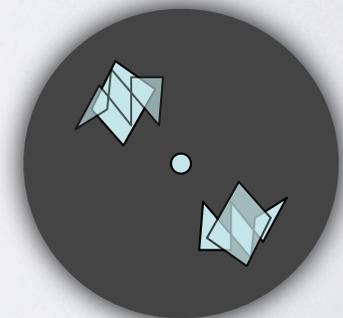
+

Retroreflector arm



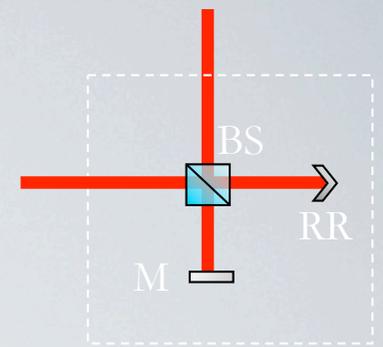
=

Interferogram



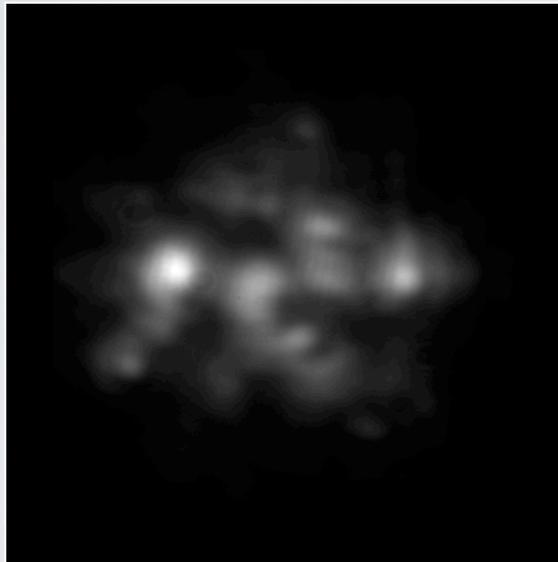
CONDENSED STATE OF POLARITONS

KONDENSAT VS OBRAZ INTERFERENCYJNY



- Experimental realization:

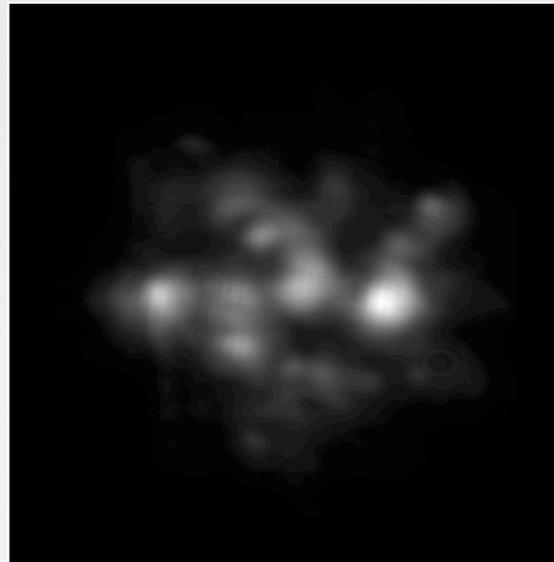
Mirror arm real space



20 μ m

+

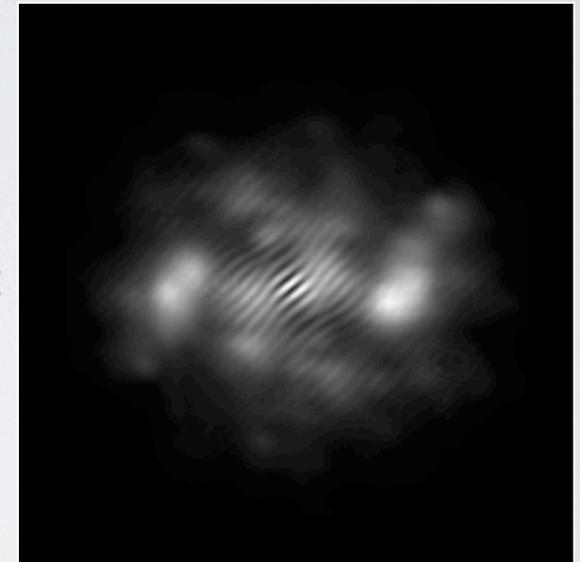
*Retroreflector arm
real space*



20 μ m

=

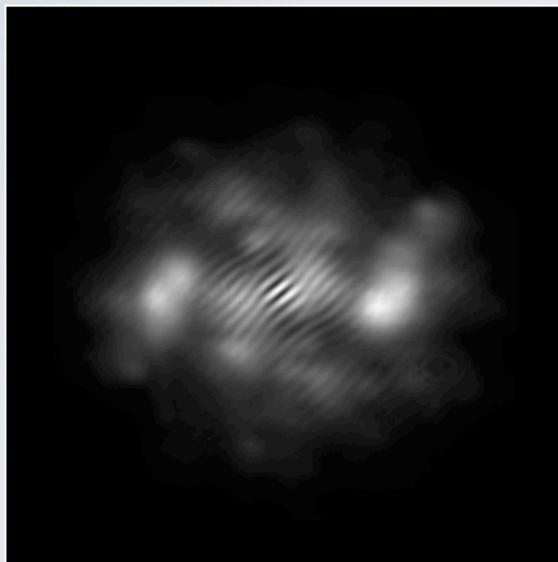
Interferogram



- Disorder in sample
- Different positions will give different interferograms

JAKĄ WIEDZĘ DAJE NAM INTERFEROGRAM

Interferogram



Po transformacie Fouriera (FFT)

- Informacja o amplitudzie
- Informacja o fazie

$$C(\mathbf{r}, \mathbf{d}) = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} = \frac{2\sqrt{I(\mathbf{r})I(\mathbf{r} + \mathbf{d})}}{I(\mathbf{r}) + I(\mathbf{r} + \mathbf{d})} g^{(1)}(\mathbf{r}, \mathbf{r} + \mathbf{d})$$

↑
kontrast

↑
funkcja korelacji

PARAMETR UPORZĄDKOWANIA

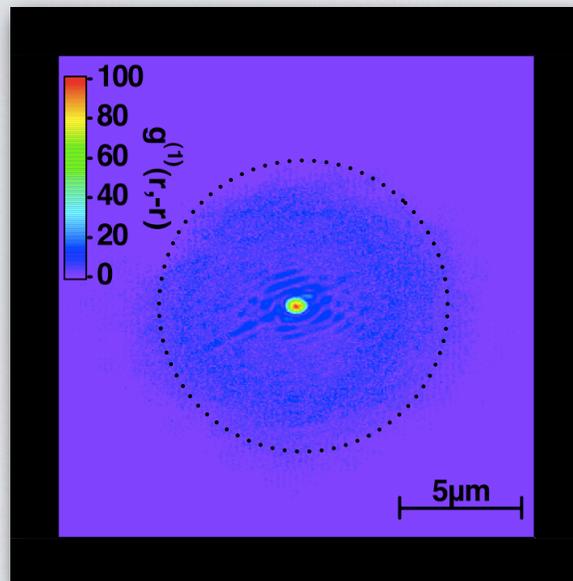
$$g^{(1)}(\mathbf{r}, \mathbf{r}', \tau, t) = \langle \psi^*(\mathbf{r}, \tau, t) \psi(\mathbf{r}', \tau, t) \rangle$$

PARAMETR UPORZĄDKOWANIA

MAPPOWANIE KORELACJI PRZESTRZENNEJ

$$g^{(1)}(\mathbf{r}, \mathbf{r}', \tau = 0) = \langle \psi^*(\mathbf{r}) \psi(\mathbf{r}') \rangle$$

PONIŻEJ PROGU KONDENSACJI



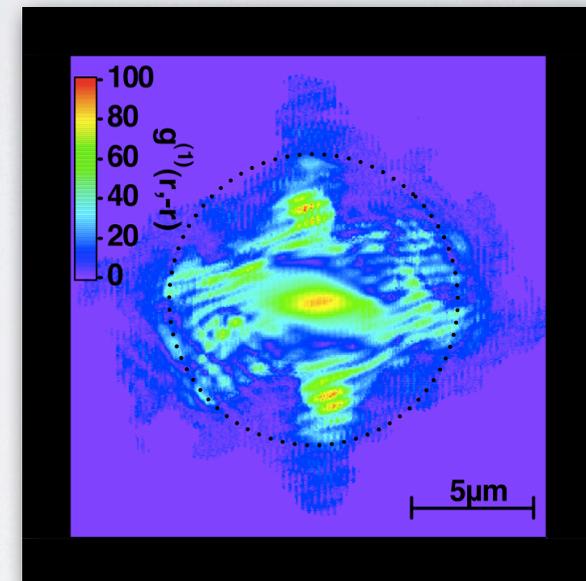
Korelacje na skalę termicznej długości fali de Broglie (λ)



Rozmiar korelacji na cały kondensat (25λ)



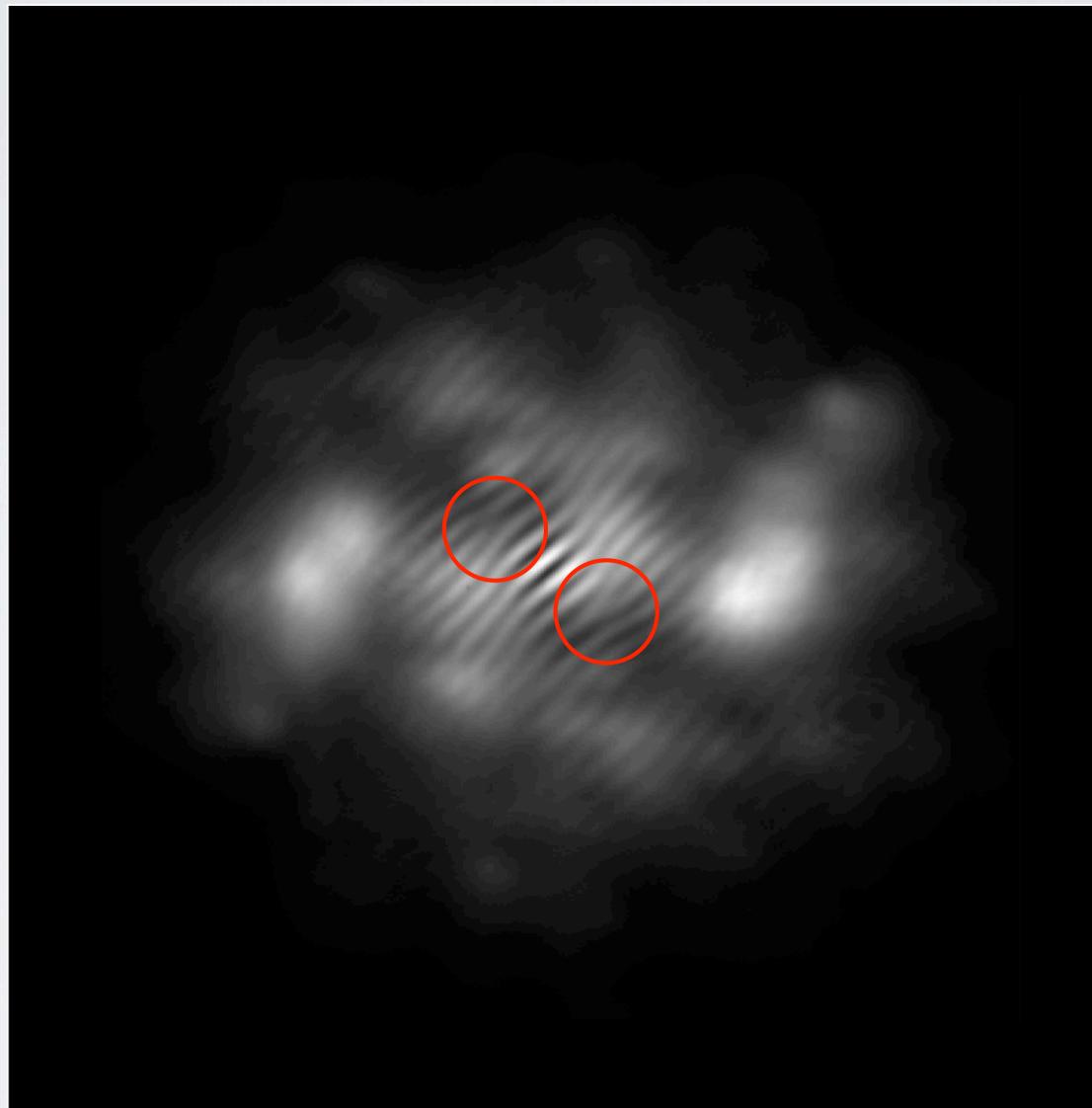
POWYŻEJ PROGU KONDENSACJI



FUNKCJA FALOWA NIESPÓJNEGO GAZU
POLARYTONÓW

FUNKCJA FALOWA KONDENSATU
KOLEKTYWNY STAN ZDELOKALIZOWANY

INTERFEROGRAM & WIRY KWANTOWE !!!



+ nadciekłość