

Korelacje przestrzenne między nośnikami uwięzionymi w półprzewodnikowych kropkach kwantowych

(wybrane wyniki z rozprawy habilitacyjnej)

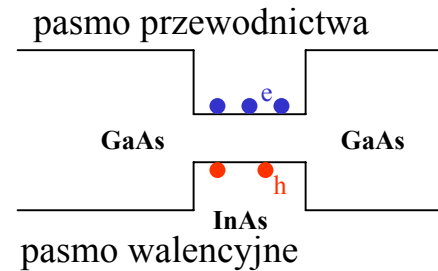
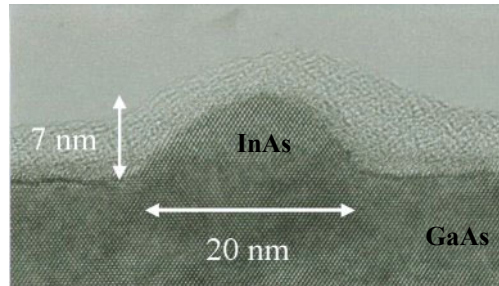
Bartłomiej Szafran

Kraków 12.05.2006

Półprzewodnikowe kropki kwantowe

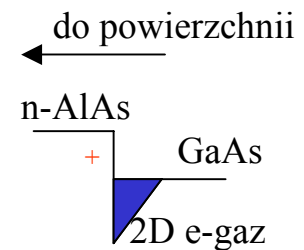
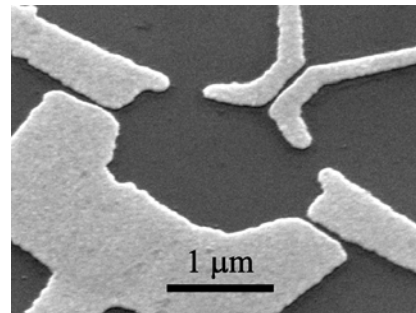
trójwymiarowe wnęki potencjału dla nośników o rozmiarach rzędu 10-100 nm

Samozorganizowane:

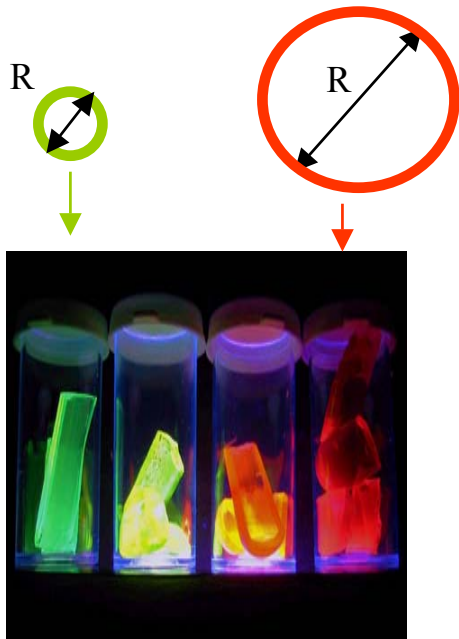


uwięzienie 3D - dyskretne widmo energii – sztuczny atom

Kropka elektrostatyczna wycięta potencjałem elektrostatycznym z dwuwymiarowego gazu elektronowego:

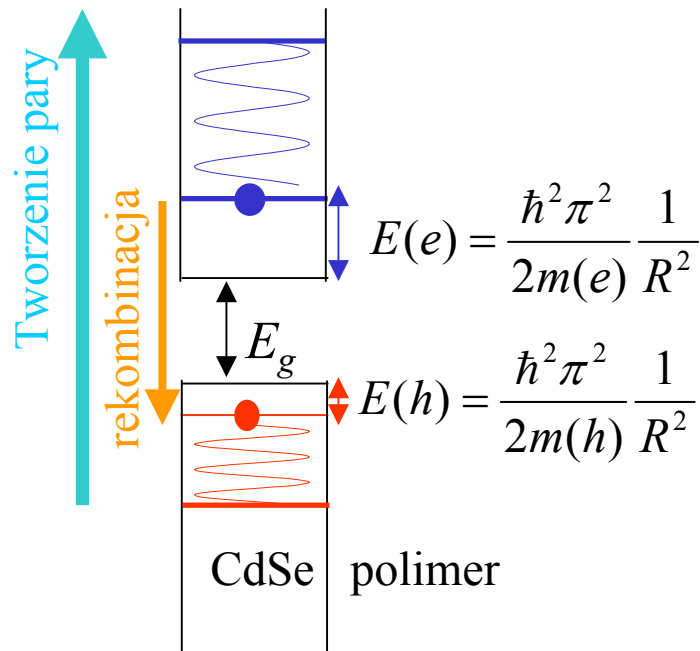


Przykładowe zastosowania

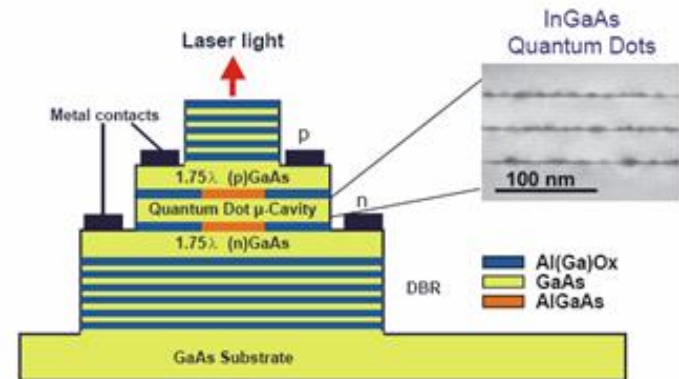


Kropki kwantowe CdSe w matrycy polimerowej
kwantowy efekt rozmiarowy:

rozmiar=energia kinetyczna uwięzionych nośników = barwa

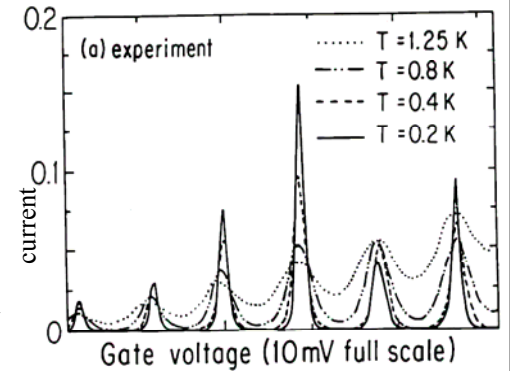
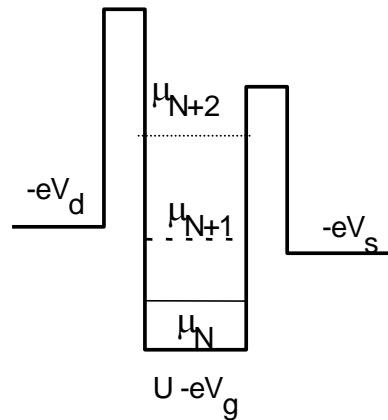
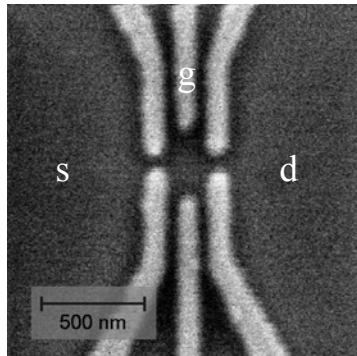


Laser na kropkach kwantowych
(mały prąd progowy,
wysoka stabilność temperaturowa)



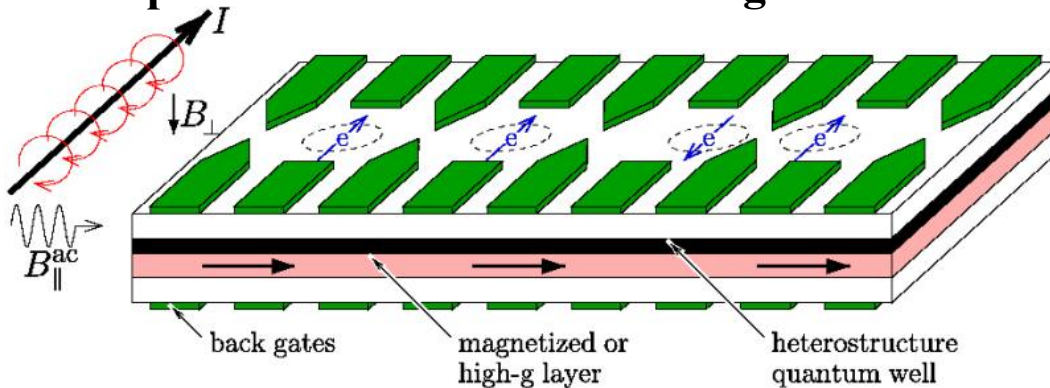
Przykładowe zastosowania cd.

Tranzystor jednoelektronowy



potencjały chemiczne $N+1$ – elektronów $\mu_{N+1} = E_{N+1} - E_N$

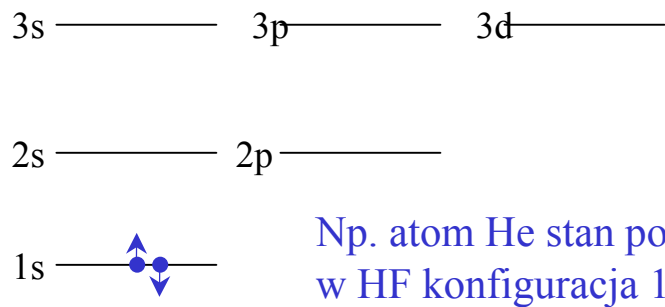
Spinowa kwantowa bramka logiczna na wielokrotnych kropkach kwantowych



Badania podstawowe

- 1) Sztuczne atomy i sztuczne molekuly
- 2) Układy elektronowe w zakresie ułamkowego kwantowego efektu Halla
- 3) Kropki o kształcie pierścienia – zjawiska związane z efektem Aharonova-Bohma

Podejście Hartree-Focka: określona konfiguracja (obsadzenie orbitali jednoelektronowych)

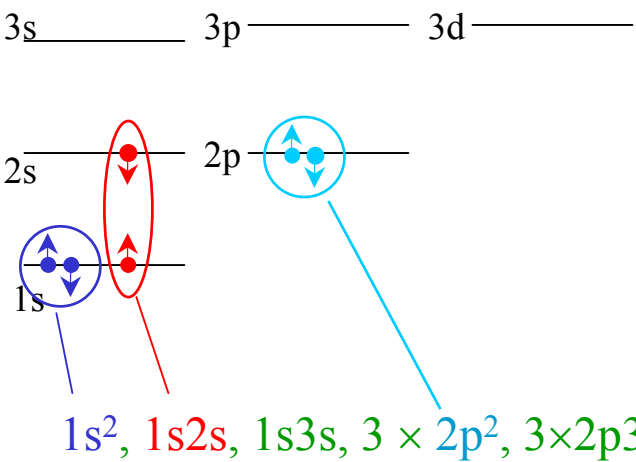


$$\Psi(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_N) = \frac{1}{\sqrt{N!}} \begin{vmatrix} \chi_1(\mathbf{x}_1) & \chi_2(\mathbf{x}_1) & \dots & \chi_N(\mathbf{x}_1) \\ \chi_1(\mathbf{x}_2) & \chi_2(\mathbf{x}_2) & \dots & \chi_N(\mathbf{x}_2) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \chi_1(\mathbf{x}_N) & \chi_2(\mathbf{x}_N) & \dots & \chi_N(\mathbf{x}_N) \end{vmatrix}$$

Np. atom He stan podstawowy w HF konfiguracja $1s^2$

Dla He ($L=0, S=0$)

Mieszanie konfiguracji: naprawdę ustalone są symetrie nie obsadzenie poziomów jednoelektronowych



Konfiguracje o odpowiedniej symetrii jako baza

$$\Psi(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_N) = \sum c_l \begin{vmatrix} \chi_1^l(\mathbf{x}_1) & \chi_2^l(\mathbf{x}_1) & \chi_3^l(\mathbf{x}_1) \\ \chi_1^l(\mathbf{x}_2) & \chi_2^l(\mathbf{x}_2) & \chi_3^l(\mathbf{x}_2) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \chi_1^l(\mathbf{x}_N) & \chi_2^l(\mathbf{x}_N) & \chi_3^l(\mathbf{x}_N) \end{vmatrix}$$

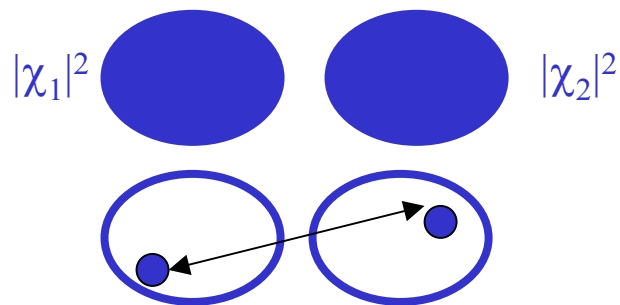
Większość prac z rozprawy hab.: dokładne rozwiązanie równania **Schroedingera** dla $N < 5$ elektronów

zbieżność uzyskiwana:
dla około 50 konfiguracji dla 2 elektronów
około 5000 konfiguracji dla 5 elektronów

HF: oddziaływanie elektron-elektron przez uśrednione pole – zaniebane korelacje elektron-elektron

Przykład: dwie wyspy ładunku jednoelektronowego

HF – oddziaływanie
całych rozkładów ładunku:



Naprawdę: elektrony z różnych
wysp reagują na swoje względne położenie

Czyli : albo konfiguracja jednoelektronowa (np. $1s^2 2s^2 p^4$) jest dobrym przybliżeniem
albo korelacje elektron-elektron są silne (efekty kolektywne)

w chemii kwantowej: korelacje **definiowane** względem przybliżenia HF (restricted)

Problem rozprawy habilitacyjnej:

jak nośniki reagują na siebie nawzajem, jakie są skutki ich skorelowania

Korelacje przestrzenne między nośnikami uwięzionymi w półprzewodnikowych kropkach kwantowych

Przegląd 17 publikacji: 12 *Physical Review B*, 2 *Journal of Physics CM*, 1 *Europhysics Letters*, 1 *European Physical Journal D*, 1 *Physica E*

Spis treści / przybliżony plan referatu :

1 Porządkowanie ładunku i spinu w kwazjednowymiarowych kropkach kwantowych

2 Efekty korelacyjne w ładowaniu kropek pojedynczymi elektronami

3 Klasyczne cechy korelacji w zakresie ułamkowego efektu Halla

4 Stany kilkuelektronowe dla pary kropek kwantowych sprzężonych bocznie

5 Kilkuelektronowe stany koncentrycznych układów kropka - pierścień i pierścień-pierścień

6 Efekty orbitalne pola magnetycznego skierowanego w płaszczyźnie kropki

7 Triony ekscytonowe w pojedynczych i podwójnych kropkach kwantowych

8 Skorelowana lokalizacja elektronów i dziur w podwójnych sprzężonych pionowo kropkach kwantowych

(standardowy) hamiltonian masy efektywnej dla sztucznych atomów GaAs/AlGaAs podobny jest do atomowego

pojedynczy elektron:

$$h = -\frac{\hbar^2}{2m^*} \nabla^2 + V(r)$$

(z izotropową
pasmową masą efektywną
 $m^*=0.067 m_0$)

N -elektronów

$$H = \sum_{i=1}^N \left(h_i + \sum_{j>i}^N \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\epsilon r_{ij}} \right)$$

ze stałą dielektryczną $\epsilon=12.4$

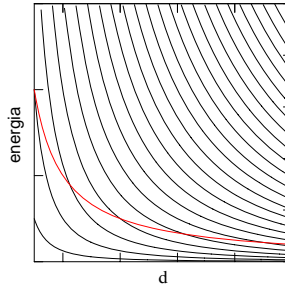
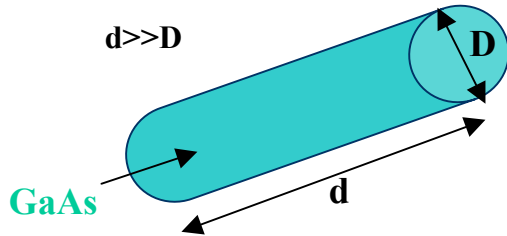
różnica atom sztuczny / atom naturalny - w potencjale uwięzienia $V(r)$

W atomach naturalnych $V(r) = -Z/r$ – dominujący → struktura powłokowa
elektry rdzenia i walencyjne

W atomach sztucznych $V(r)$ bywa (w kropkach dużych)
znacznie słabszy od oddziaływania elektron-elektron
→ silne skorelowana lokalizacja elektronów

→ silnie skorelowana lokalizacja elektronów

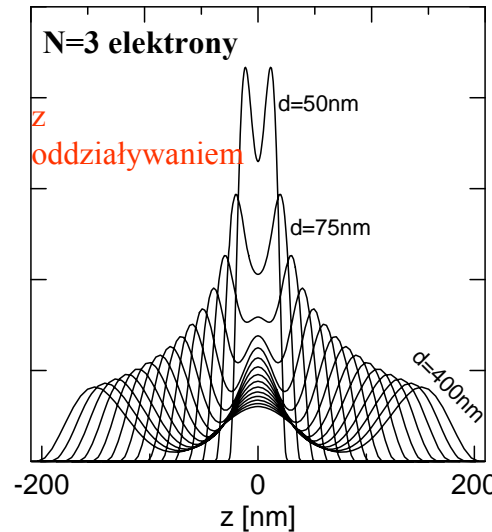
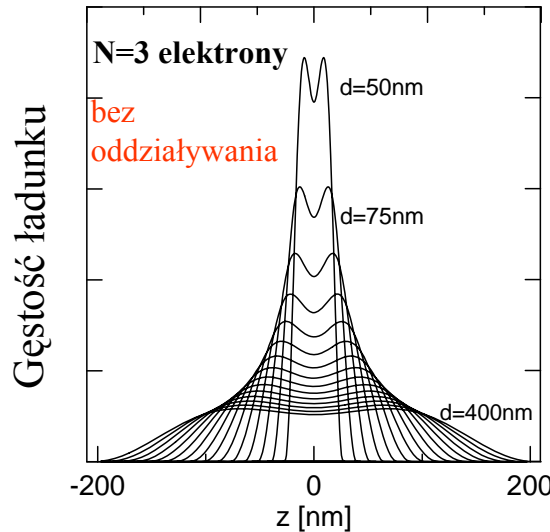
Kropka prawie jednowymiarowa :



Poziomy jednoelektronowe n^2/d^2

Energia oddziaływania kulombowskiego $1/d$

długie kropki (duże d) oddziaływanie e-e \gg energia kinetyczna (rzadki gaz elektronowy)



Gęstość elektronowa rozmyta na ile możliwe – minimalna energia kinetyczna

krystalizacja wignerowska (proces ciągły)

Gdy oddziaływanie dominuje – powstają rozdzielone wyspy ładunku jednoelektronowego (kryształ elektronowy, kryształ Wignera, molekula Wignera). Energia oddziaływania minimalizowana kosztem energii kinetycznej związanej z lokalizacją.

PHYSICAL REVIEW B **70**, 035401 (2004)

Spatial ordering of charge and spin in quasi-one-dimensional Wigner molecules

B. Szafran,^{1,2} F. M. Peeters,¹ S. Bednarek,² T. Chwiej,^{1,2} and J. Adamowski²

¹Departement Natuurkunde, Universiteit Antwerpen (Campus Drie Eiken), B-2610 Antwerpen, Belgium

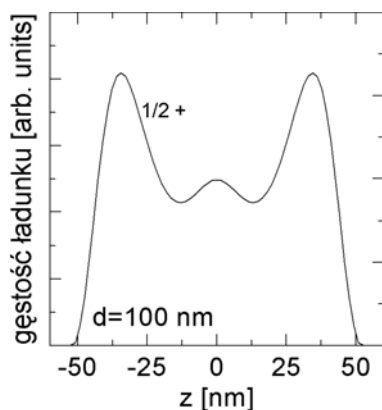
²Faculty of Physics and Nuclear Techniques, AGH University of Science and Technology, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Poland

(Received 19 January 2004; published 2 July 2004)

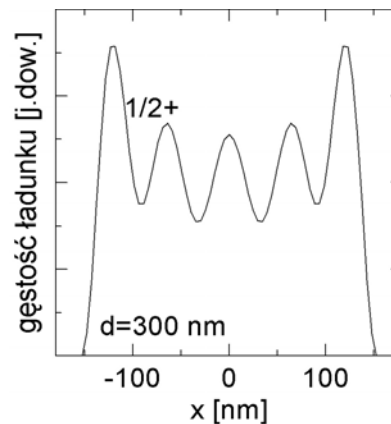
Uporządkowanie ładunku a uporządkowanie spinu

Tw. Lieba i Mattisa (1962) - niskospinowy stan podstawowy 1D bez pola magnetycznego

Czy występuje antyferromagnetyczne przestrzenne uporządkowanie spinów?

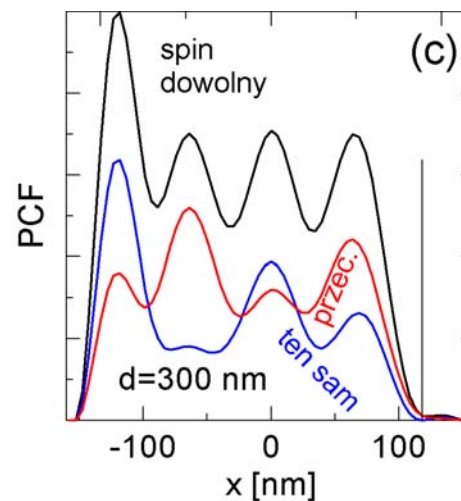
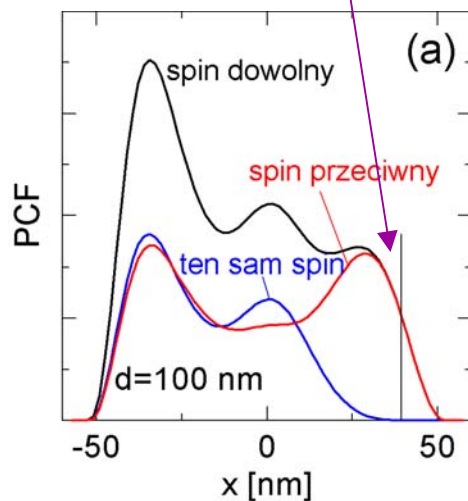


$N=5$



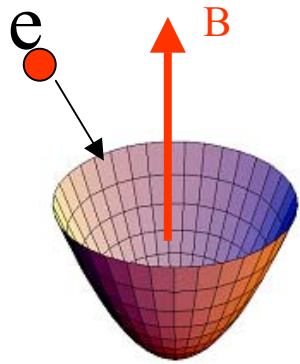
załóżmy, że jeden elektron jest tutaj gdzie są pozostałe i jaki mają spin ?

Funkcja korelacji par:



Antyferromagnetyczny porządek spinowy obejmuje całą kropkę gdy ładunek uporządkowany w molekułę Wignera

Elektron w polu magnetycznym: atom a kropka kwantowa



$$h = -\frac{\hbar^2}{2m^*} \nabla^2 + \frac{1}{8} m^* \omega_c^2 r^2 + \frac{1}{2} \hbar \omega_c l + g^* \mu_B B S_z + V(r)$$

czynniki diamagnetyczny
„ciśnienie magnetyczne” $-\mu_o \cdot B$

$-\mu_s \cdot B$

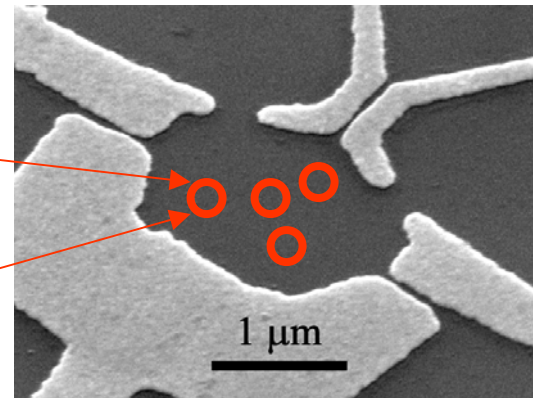
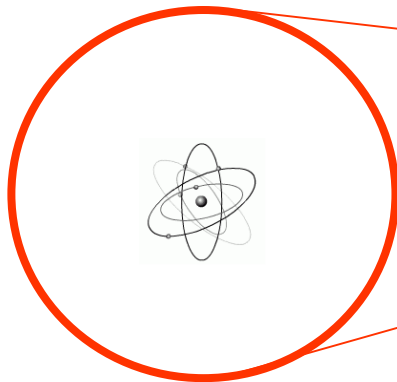
Częstość cyklotronowa

$$\omega_c = eB/m^*$$

najniższy poziom Landaua ($V=0$) $|\Psi|^2 = N \exp(-eBr^2/2\hbar)$

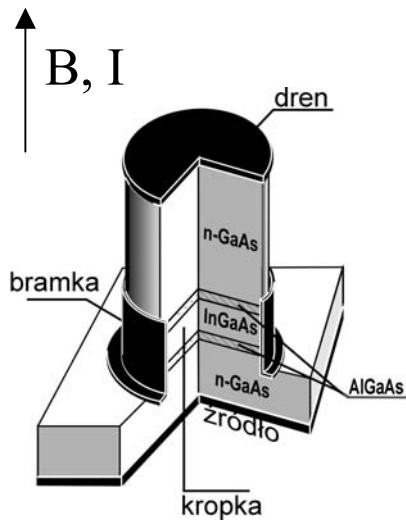
Orbita Landaua $R_L = (2\hbar/eB)^{1/2}$ | taka jak w próżni!

$B=10T \rightarrow R_L=11.5 \text{ nm}$



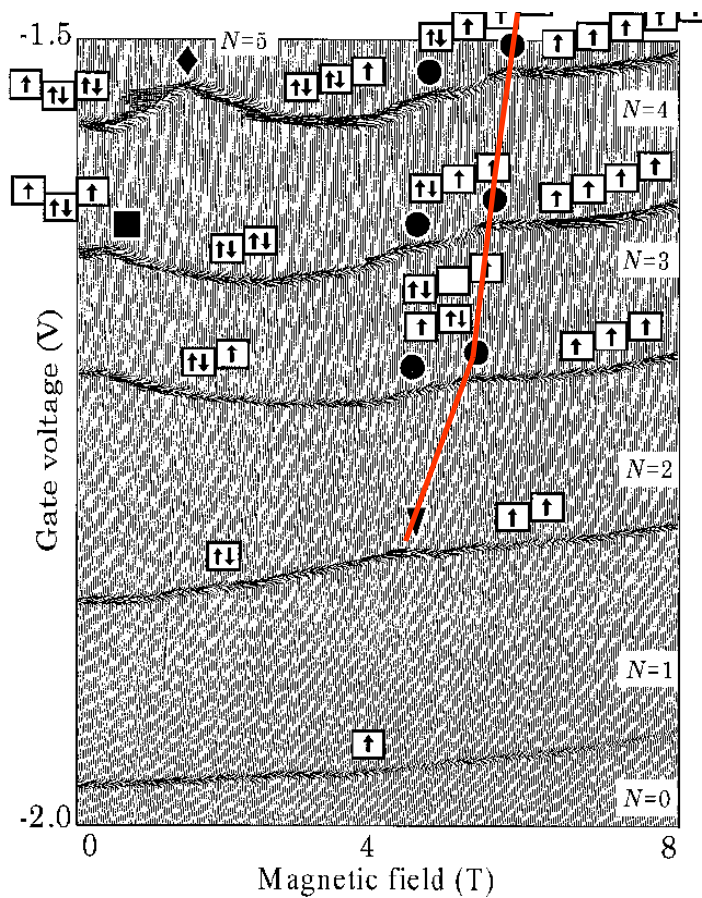
orbita Landaua w 10T: 20 razy większa od atomu

lecz – mieści się w dużej kropce kwantowej.
wszystkie elektrony można sprowadzić do
najniższego poziomu Landaua

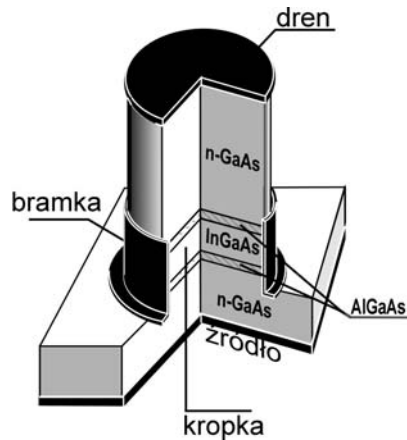


S. Tarucha i inni,
 Phys. Rev. Lett, 77 (1997) 3613
 L. Kouwenhoven,
 Science, 278 (1997) 1789

na prawo od czerwonej linii zajęty
 wyłącznie najniższy poziom Landaua $\nu=1$



Zastosowanie metody oddziaływania konfiguracji do realnej struktury



Model urządzenia: Poisson-Schroedinger

Kwantowy problem własny rozwiązany

- 1) HF
- 2) Oddziaływaniem konfiguracji

Porównanie - efekty skorelowania elektronów
w wynikach doświadczalnych

PHYSICAL REVIEW B **67**, 115323 (2003)

Correlation effects in vertical gated quantum dots

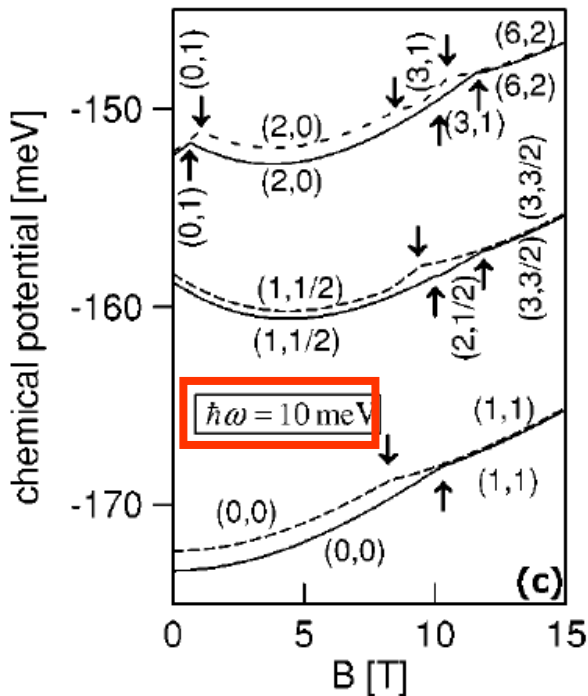
B. Szafran, S. Bednarek, and J. Adamowski*

Faculty of Physics and Nuclear Techniques, University of Mining and Metallurgy (AGH), Kraków, Poland

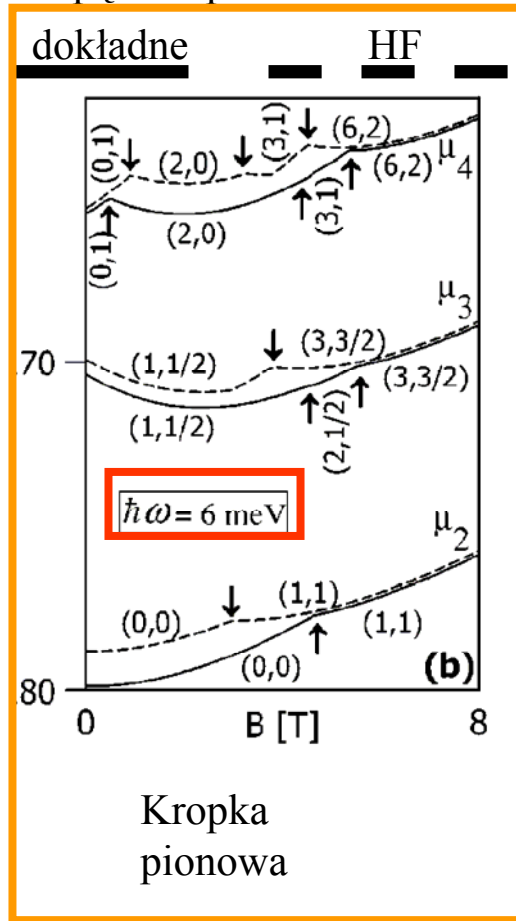
(Received 19 October 2002; revised manuscript received 20 December 2002; published 19 March 2003)

Stały potencjał uwięzienia bocznego: jak sprawdza się przybliżenie określonego obsadzenia orbitali jednoelektronowych

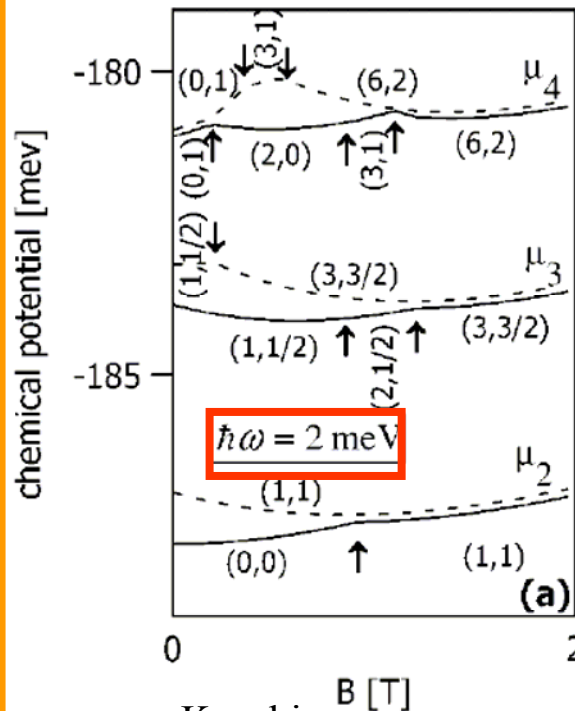
(l,s) - moment pędu i spin układu elektronowego



Dla kropek samozorganizowanych $\hbar\omega$ nawet 20 – 40 meV.



Kropka pionowa

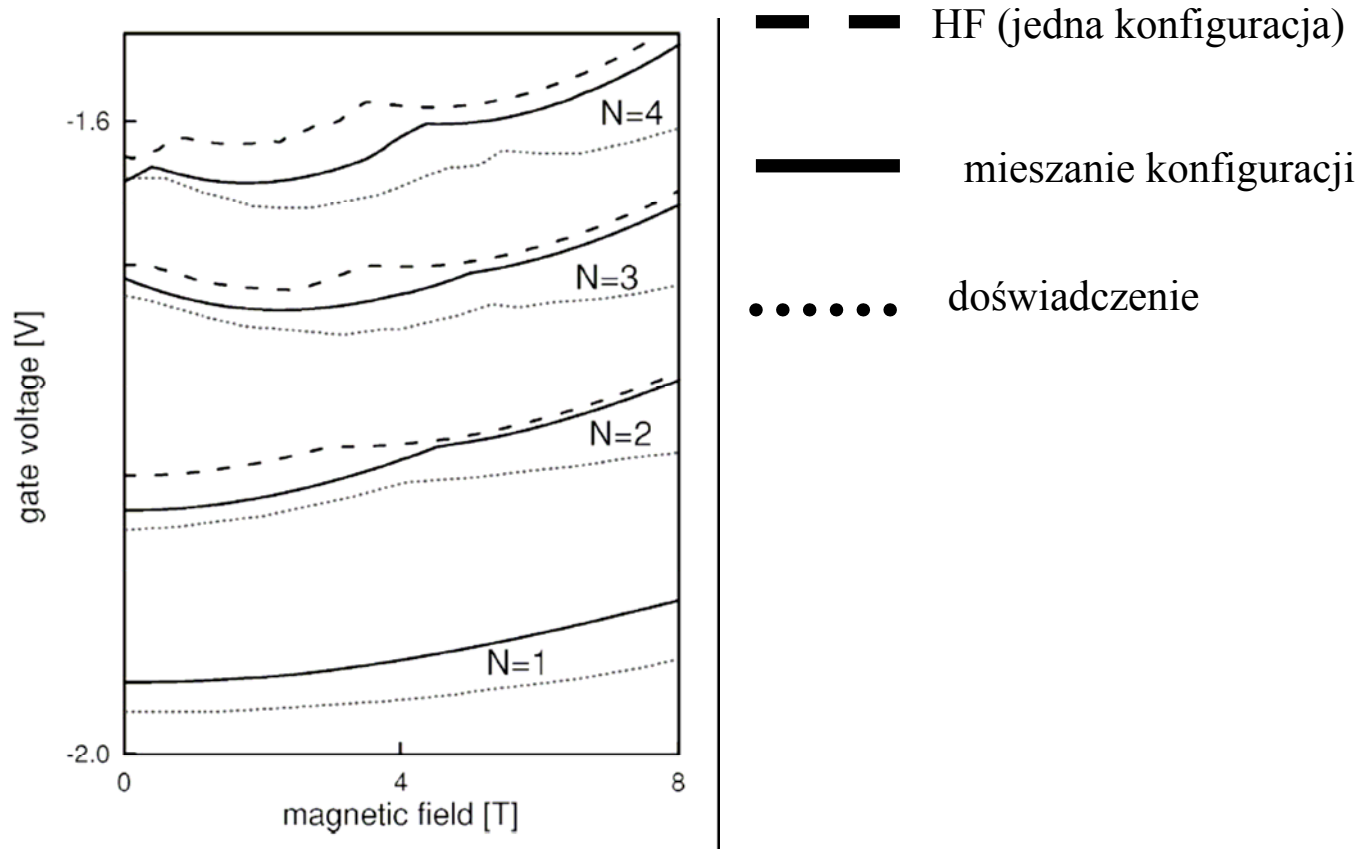


Kropki boczne

HF faworyzują polaryzację spinową

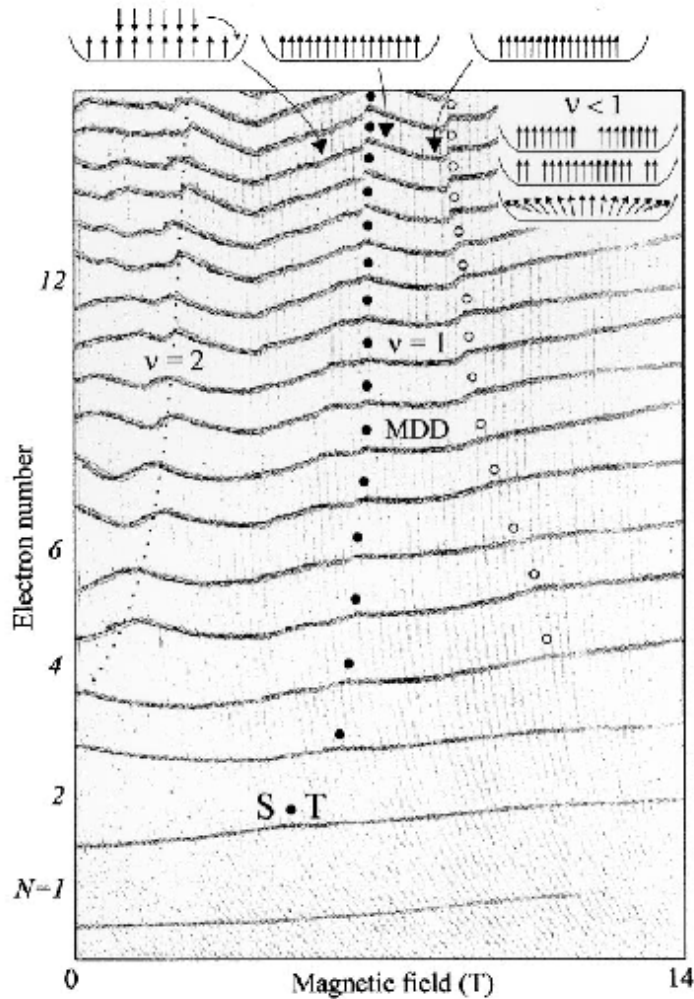
Korelacje tym silniejsze (HF mniej dokładny) im słabsze uwięzienie

Potencjał realistyczny (z równania Poissona)

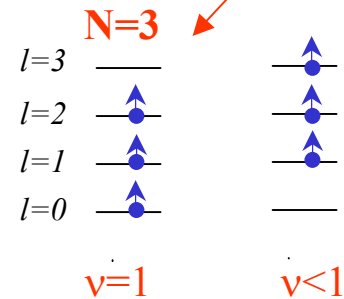
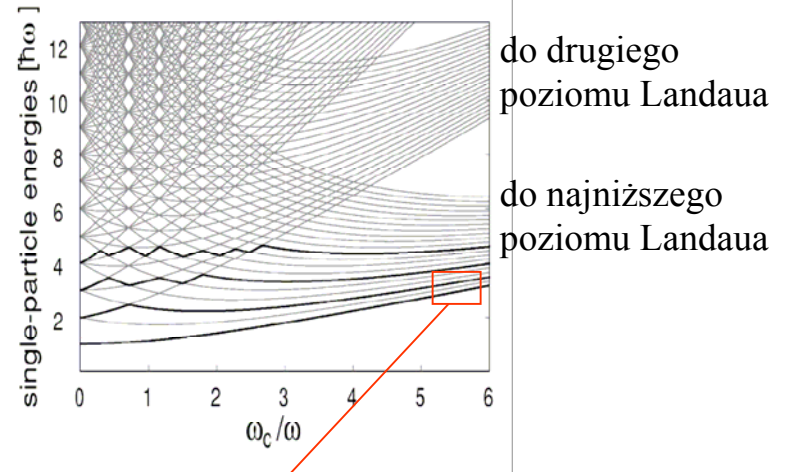


Uwzględnienie korelacji wyraźnie zbliża wyniki modelu do danych eksperymentalnych

na $\nu=1$ ewolucja się **nie** kończy



oscylator harmoniczny 2D + pole magnetyczne
widmo **Focka-Darwina**



T.H. Osterkamp i inni,
Phys. Rev. Lett. 82, (1999), 2931

Obsadzenie poziomów jednoelektronowych
przy rozpadzie stanu $\nu=1$

Korelacje dla spolaryzowanego spinowo układu w zakresie ułamkowego efektu Halla ($\nu < 1$)

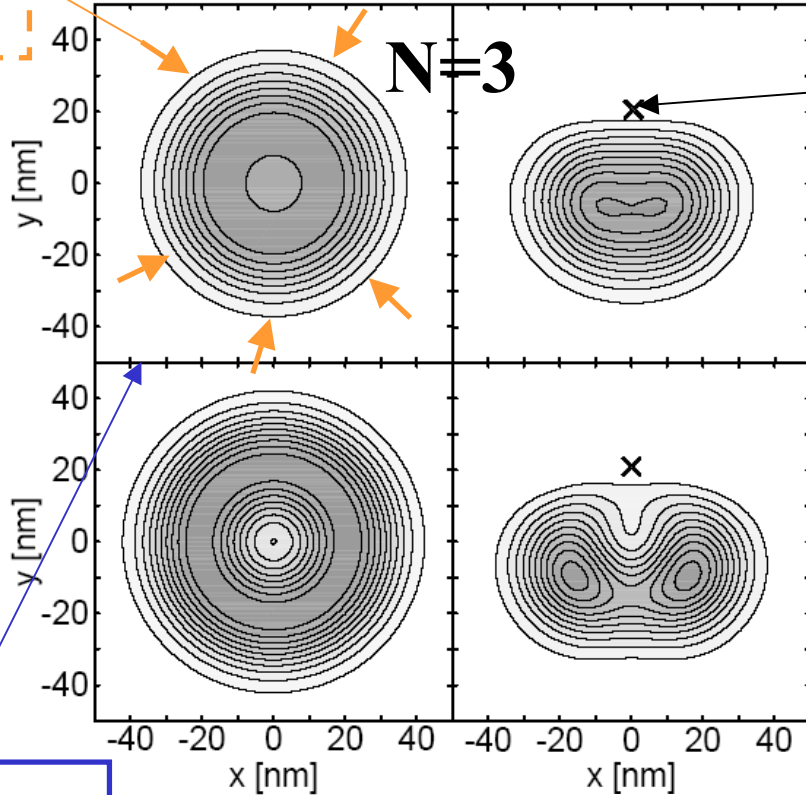
Gęstość ładunku

Funkcja korelacji par

$$\frac{1}{8} \mu^* \omega_c^2 r^2$$

$L=3$
($\nu=1$)

$L=6$
($\nu=1/2$)

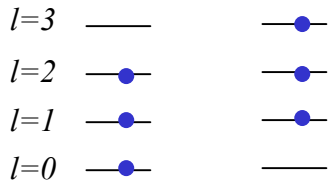


Krzyżyk: położenie jednego z elektronów

oddziaływanie konfiguracji

korelacje o molekularnej formie w wewnętrznych stopniach swobody układu

$N=3$



$\nu=1$ $\nu=1/2$

PHYSICAL REVIEW B 69, 125344 (2004)

Anisotropic quantum dots: Correspondence between quantum and classical Wigner molecules, parity symmetry, and broken-symmetry states

B. Szafran,^{1,2} F. M. Peeters,¹ S. Bednarek,² and J. Adamowski²

¹Departement Natuurkunde, Universiteit Antwerpen (Campus Drie Eiken), B-2610 Antwerpen, Belgium

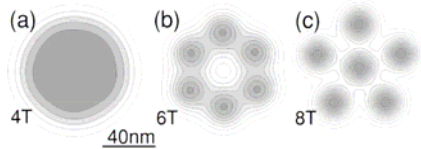
²Faculty of Physics and Nuclear Techniques, AGH University of Science and Technology, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Poland

(Received 7 November 2003; published 30 March 2004)

Rozpad stanu MDD ($\nu=1$) oraz molekuly Wignera w przybliżeniu HF

gęstość ładunku HF

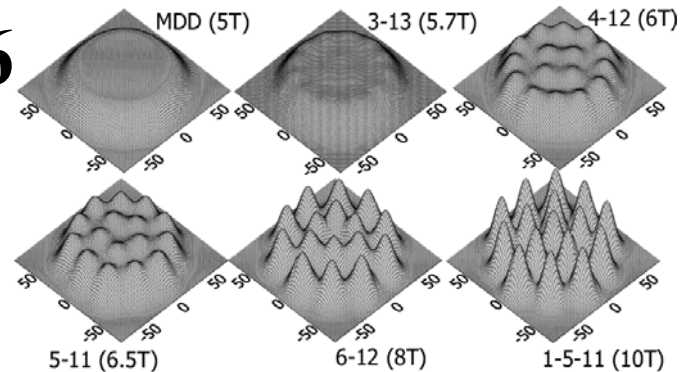
N=6



MDD
($\nu=1$)

$\nu < 1$

N=16



- 1) HF łamie symetrię potencjału uwięzienia, aby opisać rozdzielanie elektronów przy $\nu < 1$ – powstają molekuly Wignera
- 2) molekuly Wignera występują w różnych izomerach
- 3) po rozpadzie MDD w stanie podstawowym – izomery z elektronami raczej na obrzeżach kropki
- 4) $B \rightarrow \infty$: wyspy ładunku HF kurczą się do punktowych ($|\Psi|^2 = C \exp(-eB(\mathbf{r} - \mathbf{R})^2/2\hbar)$) rozkład elektronów jak dla klasycznych ładunków punktowych

minimum klasycznej energii potencjalnej
= znika energia wymiany
= energia kinetyczna lokalizacji wymrożona przez pole B

PHYSICAL REVIEW B 67, 045311 (2003)

Magnetic-field-induced transformations of Wigner molecule symmetry in quantum dots

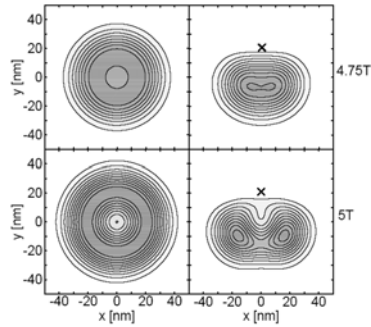
B. Szafran, S. Bednarek, and J. Adamowski

Faculty of Physics and Nuclear Techniques, University of Mining and Metallurgy (AGH), Kraków, Poland

(Received 5 November 2002; published 15 January 2003)

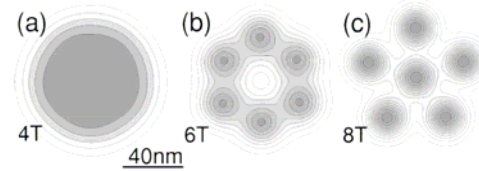
Pytanie: Jak odległe od prawdy są rozwiązania HF łamiące symetrię potencjału zewnętrznego ?

dokładne



**gęstość okrągła,
silne korelacje w wewnętrznych stopniach swobody**

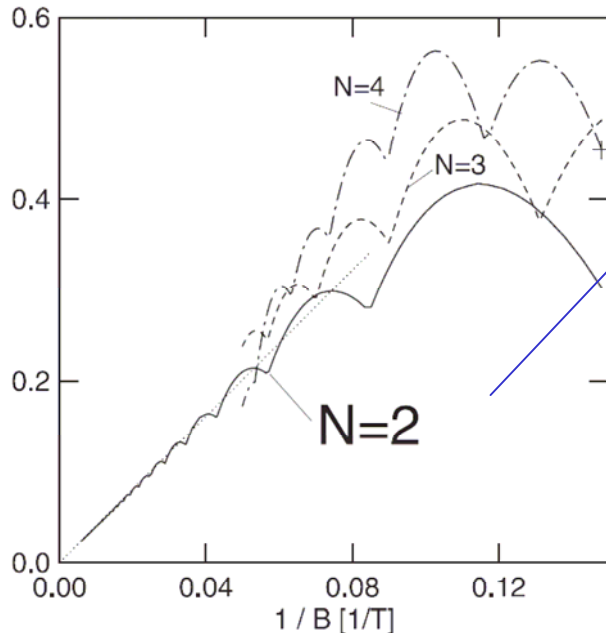
HF – gęstość ze złamaną symetrią



skorelowanie widoczne w układzie laboratoryjnym

Tw. wariacyjne $\langle F|H|F \rangle \geq E$ (stanu podstawowego) (równość jeśli $|F \rangle$ stan podstawowy)

$E(\text{HF}) - E(\text{dokładna})$ [meV]



**HF w granicy nieskończonego B daje rozwiązanie klasyczne.
HF w granicy nieskończonego B jest dokładny !
→ granica $B \rightarrow \infty$ jest naprawdę klasyczna !**

Czy stany własne z klasycznym rozkładem ładunku w skończonym B są wykluczone ?

Accuracy of the Hartree-Fock method for Wigner molecules at high magnetic fields
 THE EUROPEAN PHYSICAL JOURNAL D
 B. Szafran^{1,2,a}, S. Bednarek¹, J. Adamowski¹, M.B. Tavernier², E. Anisimovas², and F.M. Peeters²
¹ Faculty of Physics and Nuclear Techniques, AGH University of Science and Technology, Kraków, Poland
² Departement Natuurkunde, Universiteit Antwerpen (UIA), 2610 Antwerpen, Belgium
 Received 18 August 2003 / Received in final form 24 October 2003
 Published online 6 January 2004 – © EDP Sciences, Società Italiana di Fisica, Springer-Verlag 2004

Uwzględnić korelacje i zbadać potencjały o niskiej symetrii

PHYSICAL REVIEW B 69, 125344 (2004)

Anisotropic quantum dots: Correspondence between quantum and classical Wigner molecules, parity symmetry, and broken-symmetry states

B. Szafran,^{1,2} F. M. Peeters,¹ S. Bednarek,² and J. Adamowski²

¹Departement Natuurkunde, Universiteit Antwerpen (Campus Drie Eiken), B-2610 Antwerpen, Belgium

²Faculty of Physics and Nuclear Techniques, AGH University of Science and Technology, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Poland

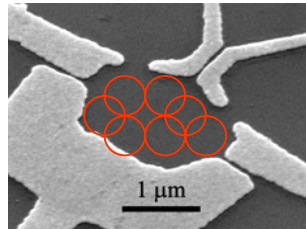
(Received 7 November 2003; published 30 March 2004)

Wielocentrowa metoda oddziaływania konfiguracji

- * baza funkcji najniższego poziomu Landaua z przekrywającymi się orbitalami dla jednego elektronu

$$\Psi_{\mu}(\mathbf{r}) = \sum_{i=1}^M c_i^{\mu} \psi_{\mathbf{R}_i}(\mathbf{r}),$$

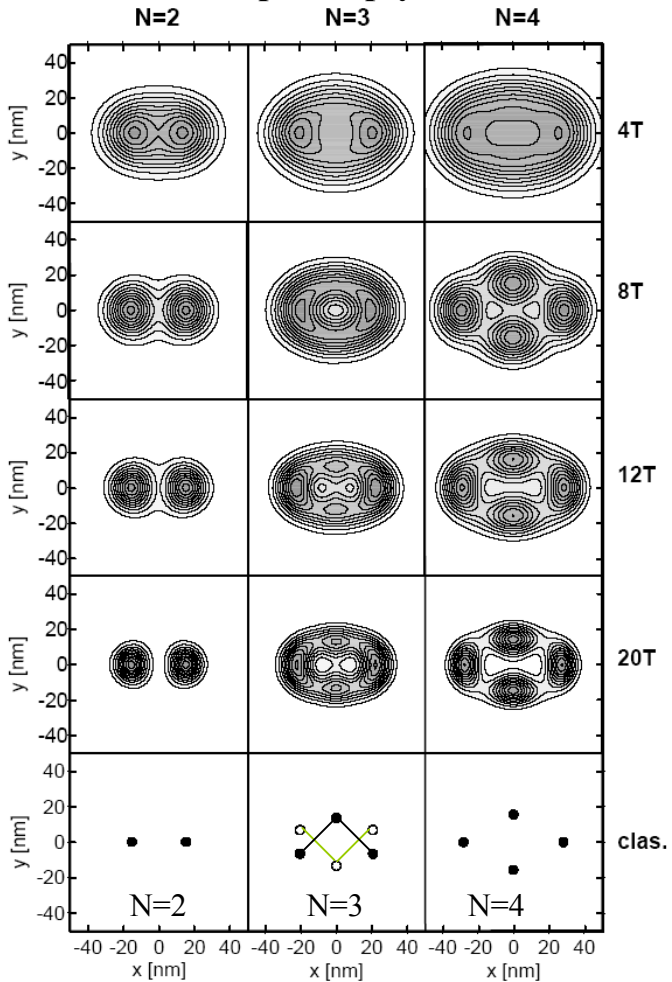
$$\psi_{\mathbf{R}}(\mathbf{r}) = \sqrt{\frac{\alpha}{2\pi}} \exp\left\{ -\frac{\alpha}{4}(\mathbf{r}-\mathbf{R})^2 + \frac{i\beta}{2}(x-X)(y+Y) \right\}$$



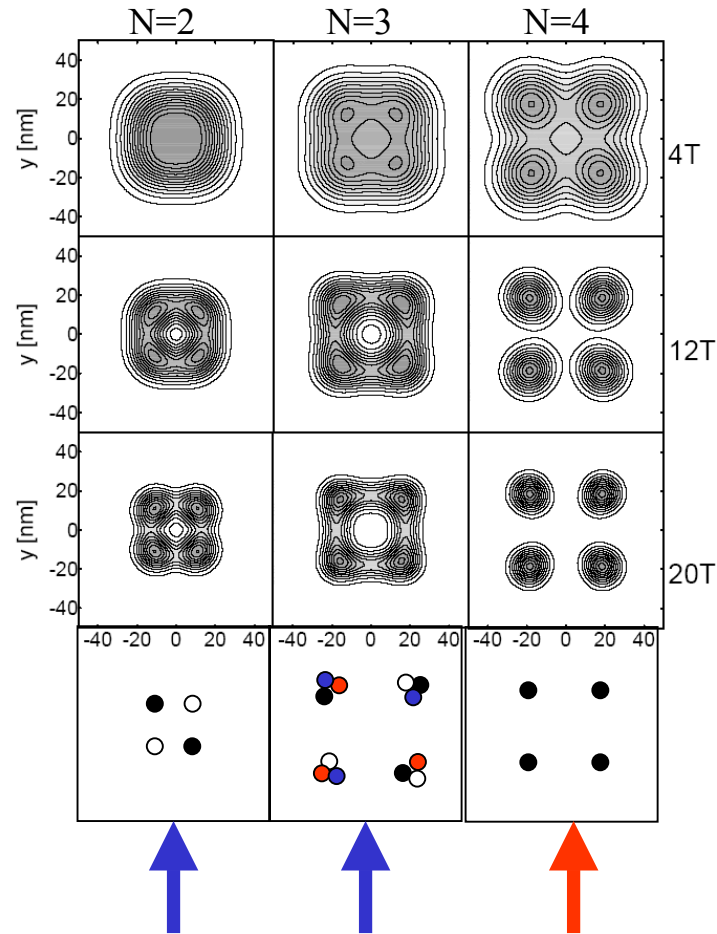
- * baza świetnie opisuje również wyższe pasma Focka-Darwina (wyższe poziomy Landaua)
- * umożliwia dokładne rozwiązanie problemu kilkuelektronowego przy niskiej lub zaburzonej symetrii potencjału uwięzienia, dla kropek wielokrotnych

Jak osiągnięta jest granica klasyczna w rozkładzie ładunku ??

Kropka eliptyczna



Kropka kwadratowa



W nieskończonym polu B gęstość ładunku dąży do wszystkich równoważnych klasycznych konfiguracji

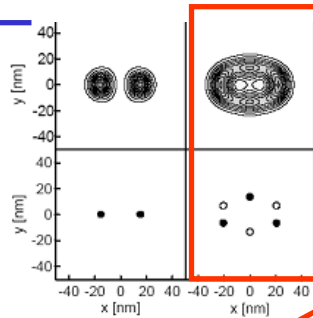
Krystalizacja wignerowska (wyspy ładunku jednoelektronowego) tylko gdy układ klasyczny jest niezdegenerowany

Gdy układ klasyczny zdegenerowany -- superpozycja „klasycznych” rozkładów, odtwarza symetrię zewnętrzną.

DEGENERACJA
KLASYCZNA

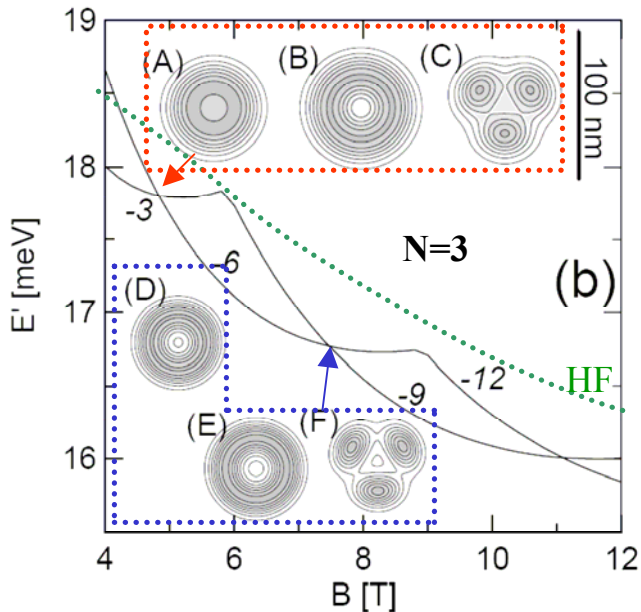
Klasyczna degeneracja a transformacje symetrii przy $v < 1$

Układ klasycznie niezdegenerowany
Brak transformacji symetrii, gładka ewolucja z B do granicy klasycznej



Klasyczna degeneracja:
transformacje symetrii
(własności układu
zmieniają się w sposób
nieciągły)

Kropka kołowa



Konstrukcja stanów o złamanej symetrii

$$\Psi_{BS} = (\Psi_1 + e^{i\phi} \Psi_2) / \sqrt{2}$$

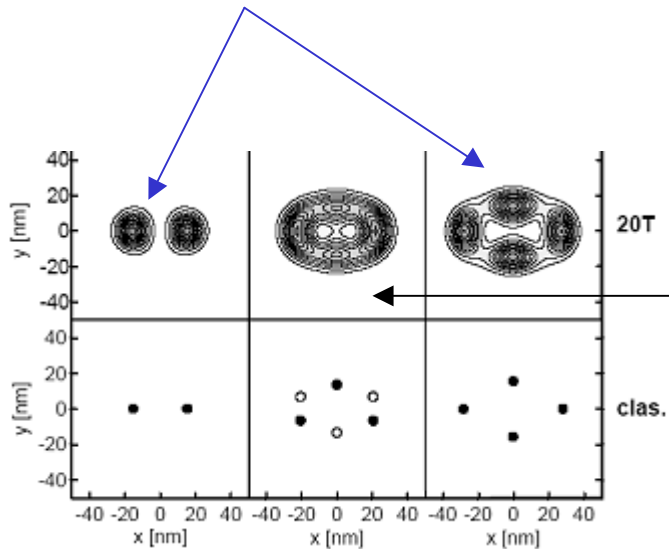
sąsiednie z sekwencji symetrii stanu podstawowego

Przy transformacjach symetrii

istnieją dokładne stany własne o klasycznym rozkładzie ładunku.

Wyspy ładunku w stanach o złamanej symetrii kurczą się do punktów – znika zaniedbany przez HF efekt korelacyjny.

krystalizacja wignerowska gęstości ładunku



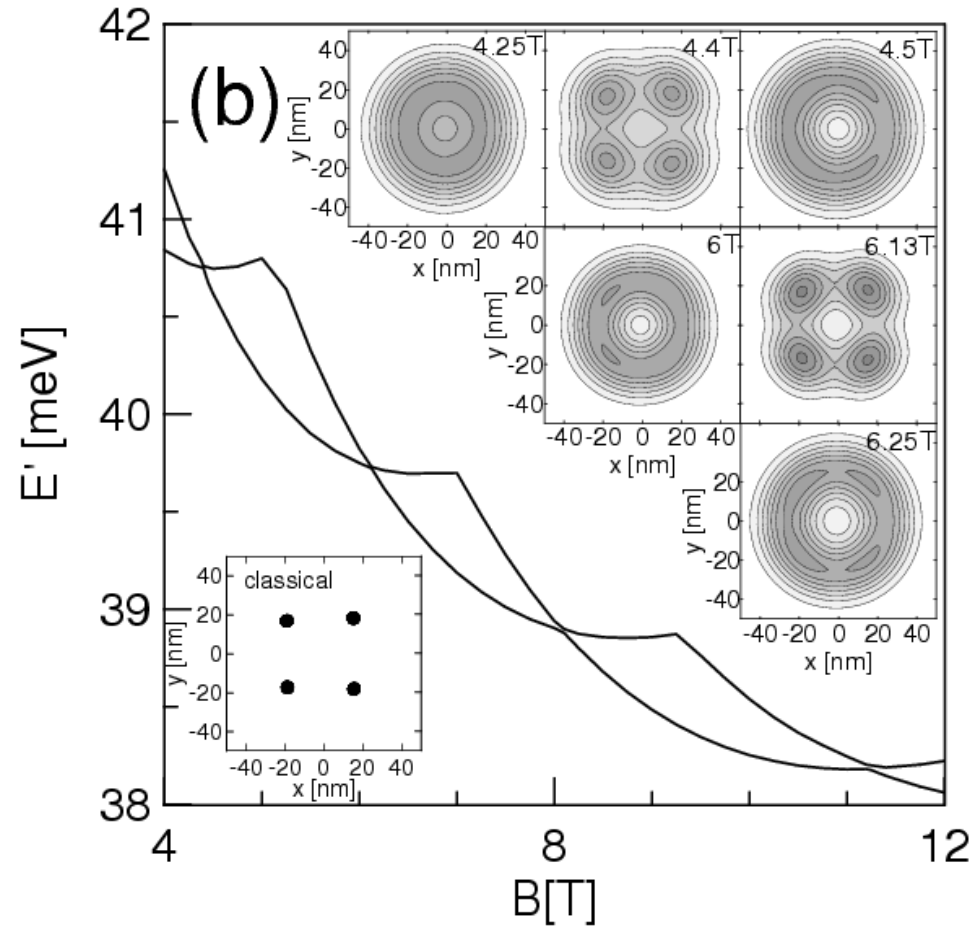
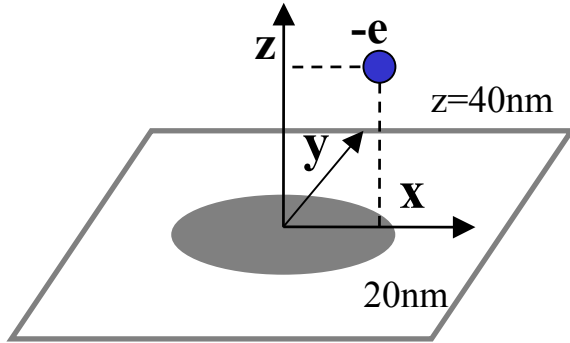
Stan bez krystalizacji wignerowskiej (bez rozdzielonych wysp jednoelektronowych)
Czy taki stan ma własności kryształu czy cieczy elektronicznej?

Kryształ elektroniczny:

- 1) dalekozasięgowy porządek w funkcji korelacji par (kryterium nie do zastosowania przy niewielkiej liczbie elektronów)
- 2) ulegnie przyszpileniu (pinning) w wyniku dowolnie słabego zaburzenia

$\nu < 1$ w kropkach kołowych: reakcja na słabe zewnętrzne zaburzenie: **ciecz elektronowa czy kryształ elektronowy?**

ujemnie naładowany
defekt poza osią kropki

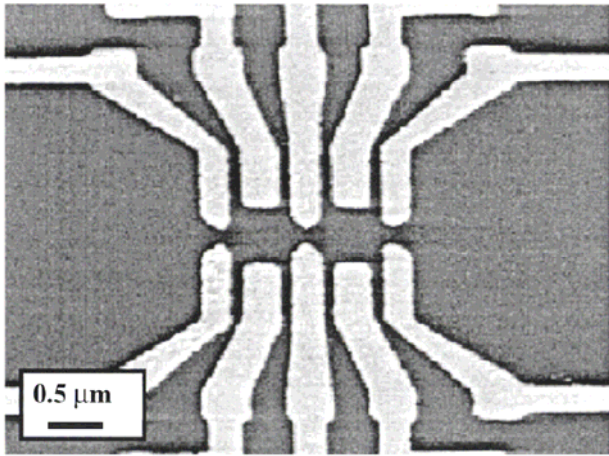


Europhys. Lett., **66** (5), pp. 701–707 (2004)
Re-entrant pinning of Wigner molecules
in a magnetic field due to a Coulomb impurity

B. SZAFRAN^{1,2} and F. M. PEETERS¹

Układy w których gęstość ładunku
nie jest skryształizowana
wignerowsko tylko przy
transformacjach symetrii reagują
na zewnętrzne zaburzenie jak
kryształ elektronowy. Poza nimi –
reagują jak ciecz.

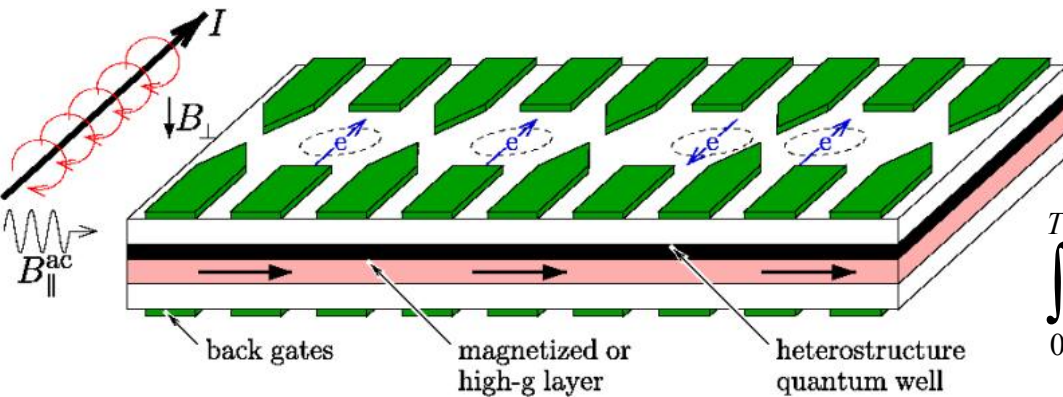
Sztuczna molekula



Duncan PRB 63 045311 (2001)

stopień kowalencyjności orbitali
regulowany napięciem na centralnej bramce

Kwantowa bramka logiczna na spinach



Impulsowa sprzężenie spinowe Heisenberga

$$H_s(t) = J(t) \mathbf{S}_1 \cdot \mathbf{S}_2$$

$$J = E_{\text{triplet}} - E_{\text{singlet}} \text{ energia wymiany}$$

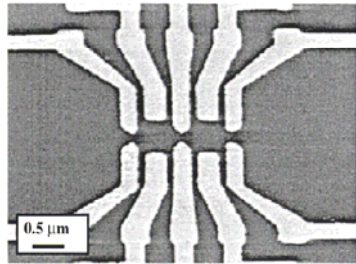
$$\int_0^T dt J(t) = \pi \hbar \quad \text{-operator wymiany (swap)}$$

$$(S_1, S_2) \rightarrow (S_2, S_1)$$

$J=0.1\text{meV}$ daje $T=20\text{ ns}$

Loss & DiVincenzo PRA 57 120 (1998)

Problem:



PHYSICAL REVIEW B 70, 205318 (2004)

Exchange energy tuned by asymmetry in artificial molecules

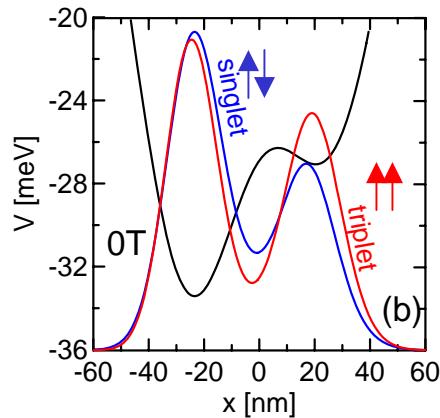
B. Szafran,^{1,2} F. M. Peeters,¹ and S. Bednarek²

¹Departement Fysica, Universiteit Antwerpen (Campus Drie Eiken), B-2610 Antwerpen, Belgium
²Physics and Nuclear Techniques, AGH University of Science and Technology, al. Mickiewicza 30, 30-060 Kraków, Poland

kropki duże: nawet bez bariery międzykropkowej ładunki ulegną rozdzieleniu
– singlet i tryplet ulegną degeneracji – kontrola spinu wykluczona

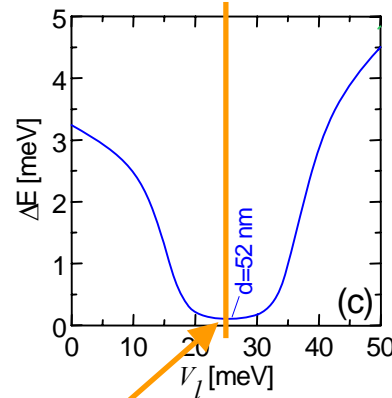
Jak temu zaradzić:

Asymetria potencjału uwięzienia wielokrotnie zwiększa energię wymiany.



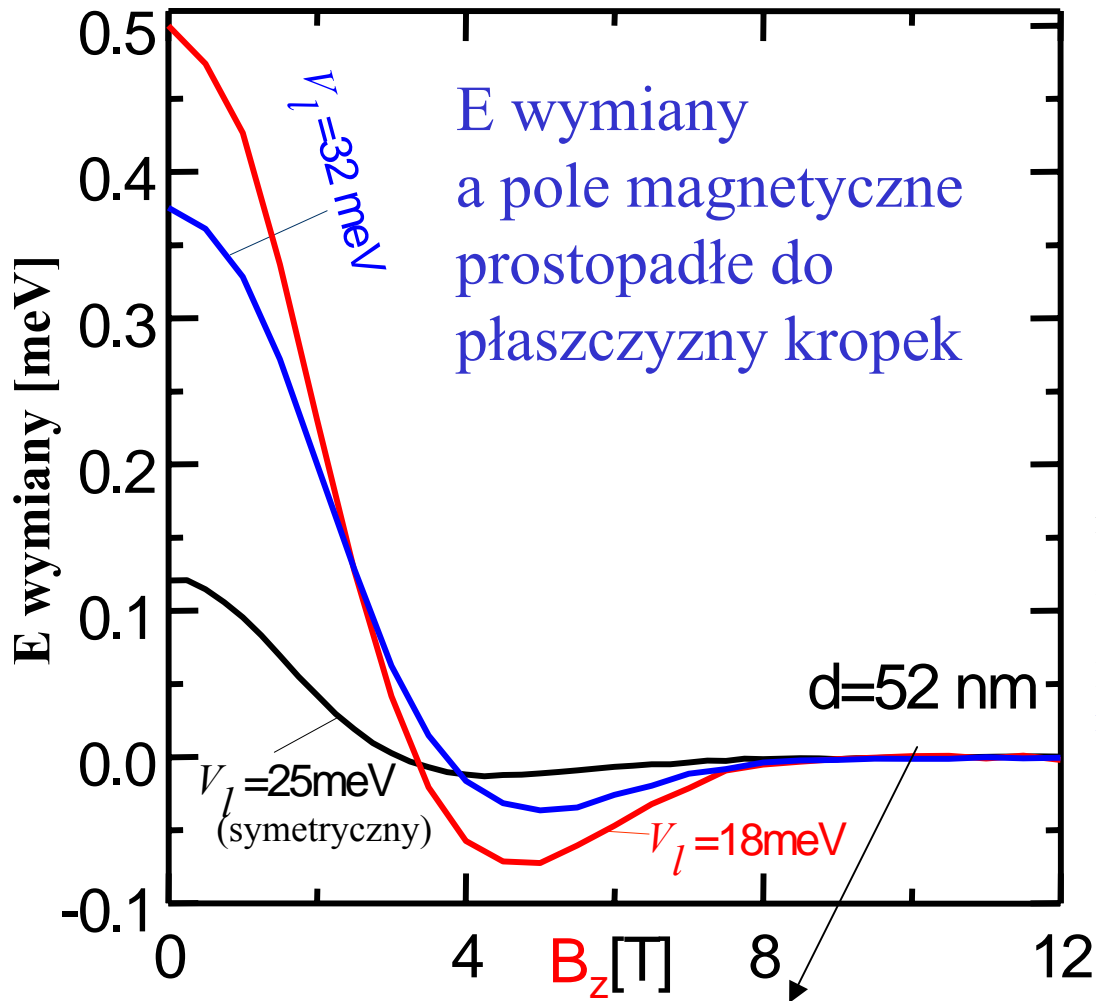
trypletowi zajmowanie głębszej kropki utrudnia zakaz Pauliego

Energia wymiany



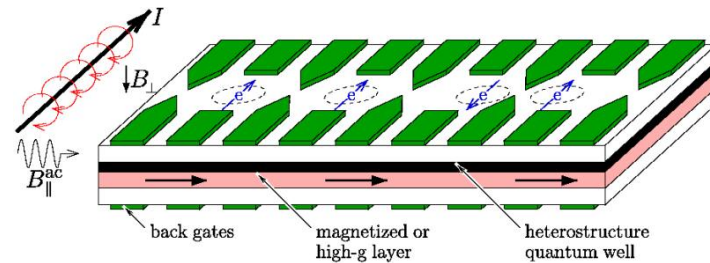
Potencjał symetryczny

**E. wymiany - minimalna (!)
gdy układ symetryczny**



E wymiany
a pole magnetyczne
prostopadłe do
płaszczyzny kropek

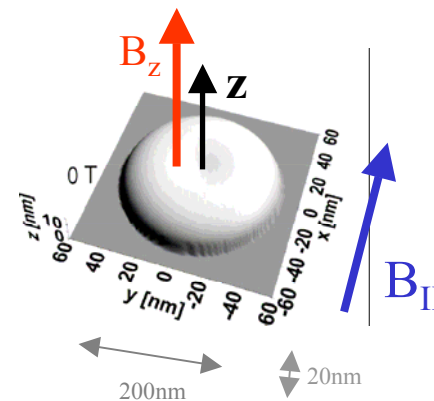
Wymiana znika gdy elektrony
rodzielone polem



Silne pole magnetyczne – konieczne dla operacji
na pojedynczym spinie

Rozszczepienie Zeemana: $\Delta E = g\mu_B B$

Kompromis: pomiary przy pomocy pola
równoległego do płaszczyzny uwięzienia
10 T



Wiadomo, że efekty orbitalne B_{II} mniejsze, ale jakie one są ?

PHYSICAL REVIEW B 70, 235335 (2004)

In-plane magnetic-field-induced Wigner crystallization in a two-electron quantum dot

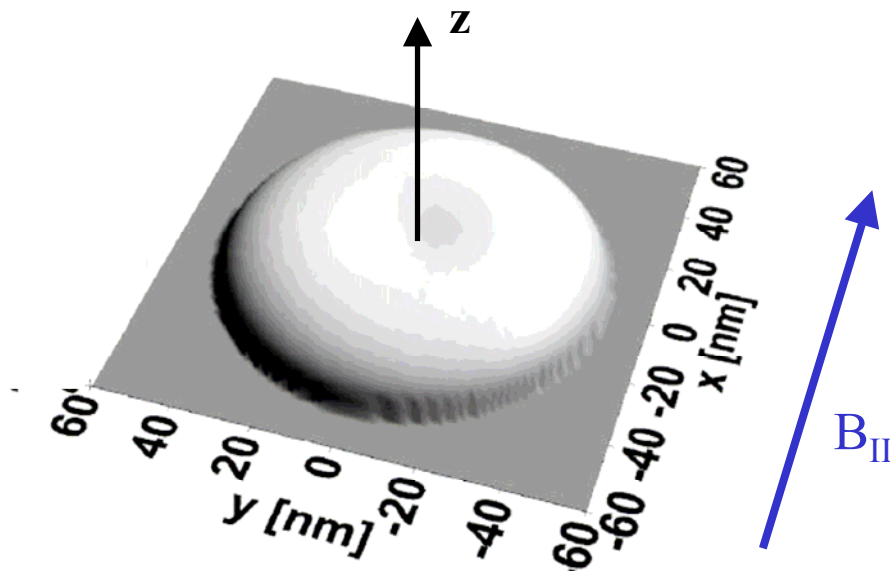
B. Szafran,^{1,2} F. M. Peeters,^{1,*} S. Bednarek,² and J. Adamowski²

¹Departement Fysica, Universiteit Antwerpen, (Campus Drie Eiken), B-2610 Antwerpen, Belgium

²Faculty of Physics and Nuclear Techniques, AGH University of Science and Technology, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Poland

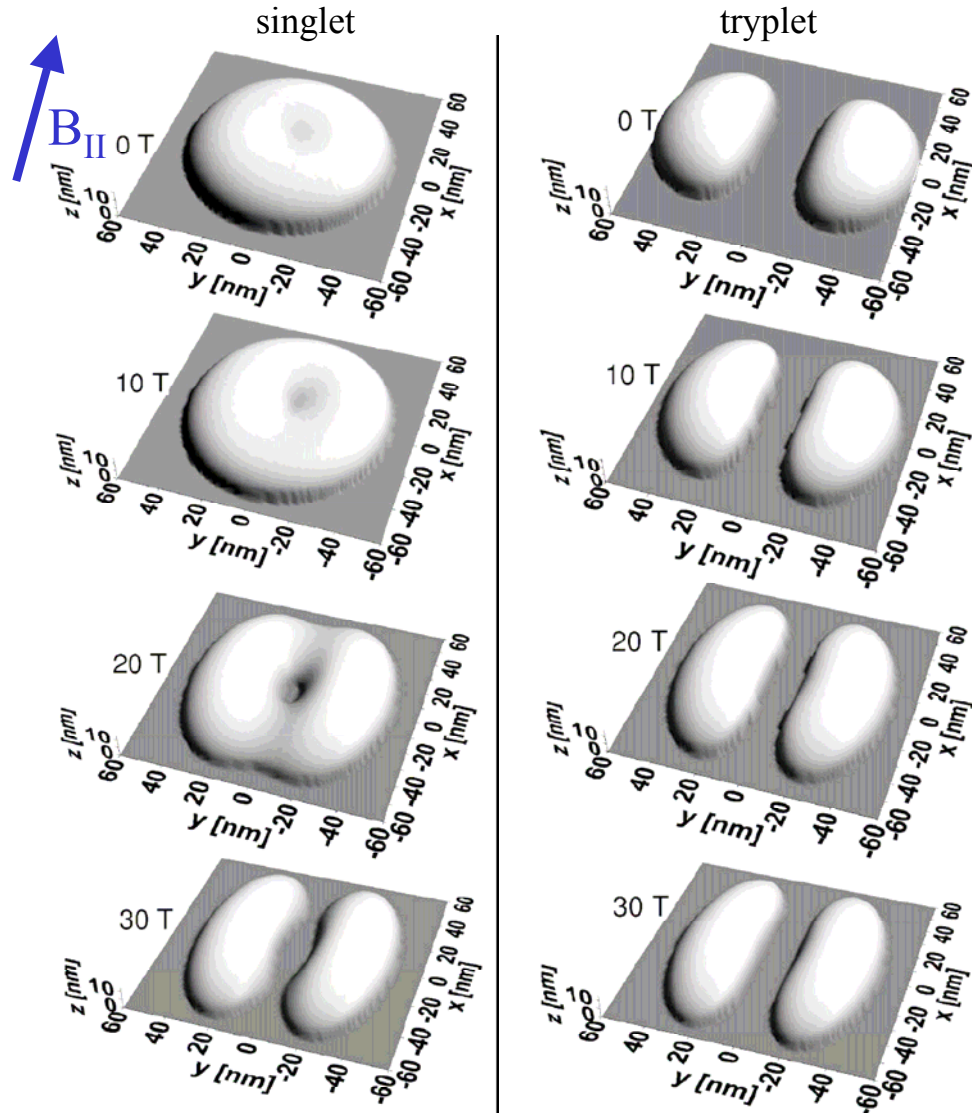
(Received 21 June 2004; revised manuscript received 31 August 2004; published 23 December 2004)

symetria obrotowa wokół osi z $\hbar\omega_x = \hbar\omega_y = 3$ meV
silnie uwięzienie w z $\hbar\omega_z = 12$ meV,
pole $B \parallel x$ – łamiące symetrię obrotową wokół
osi z

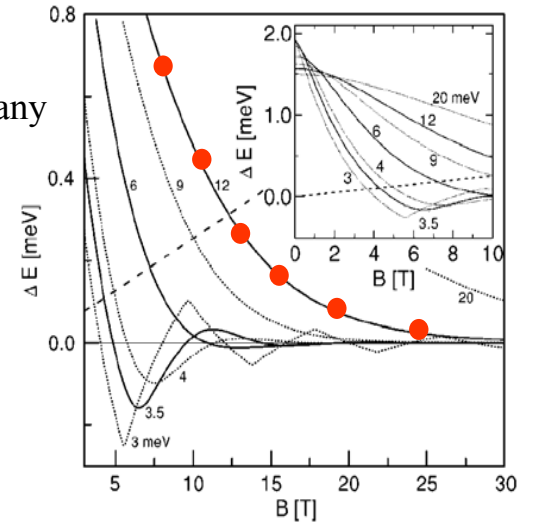


Jak B_{\parallel} modyfikuje gęstość ładunku

$\hbar\omega_x = \hbar\omega_y = 3 \text{ meV}$, $\hbar\omega_z = 12 \text{ meV}$, Pole $B \parallel x$

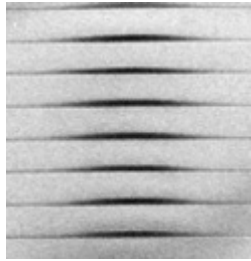


E. wymiany



Krystalizacja wignerowska: wyspy ładunku wydłużone w kierunku pola, degeneracja energii orbitalnych singlet-triplet

Skorelowana lokalizacja elektronów i dziur w sprzężonych pionowo kropkach



„Stosy” samorosnących kropek kwantowych InGaAs/GaAs
Fafard, Applied Physics Letters, 76, 2268 (2000).

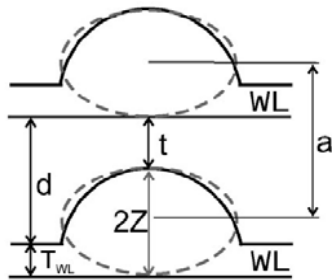
PHYSICAL REVIEW B, VOLUME 64, 125301

Parity symmetry and energy spectrum of excitons in coupled self-assembled quantum dots

B. Szafran,* S. Bednarek, and J. Adamowski

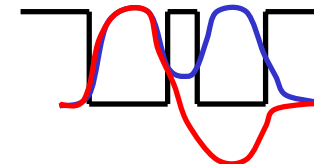
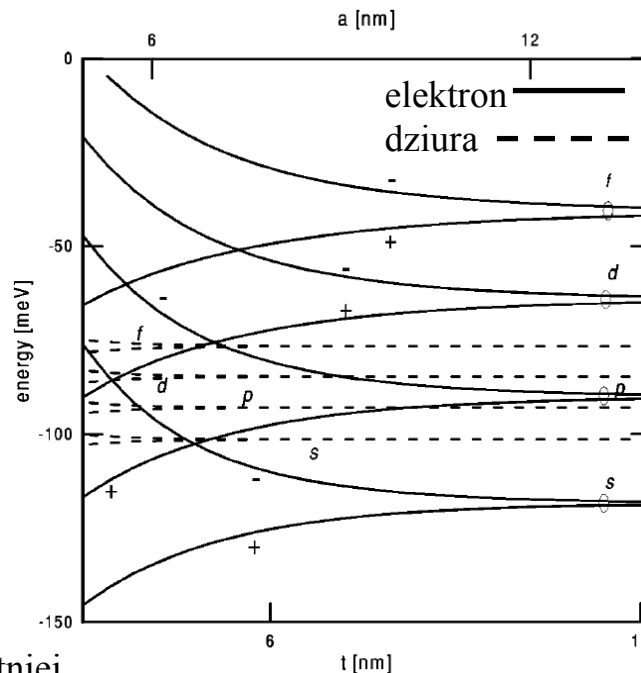
Faculty of Physics and Nuclear Techniques, University of Mining and Metallurgy (AGH), Cracow, Poland

(Received 22 November 2000; published 5 September 2001)



Idealnie symetryczny model struktury

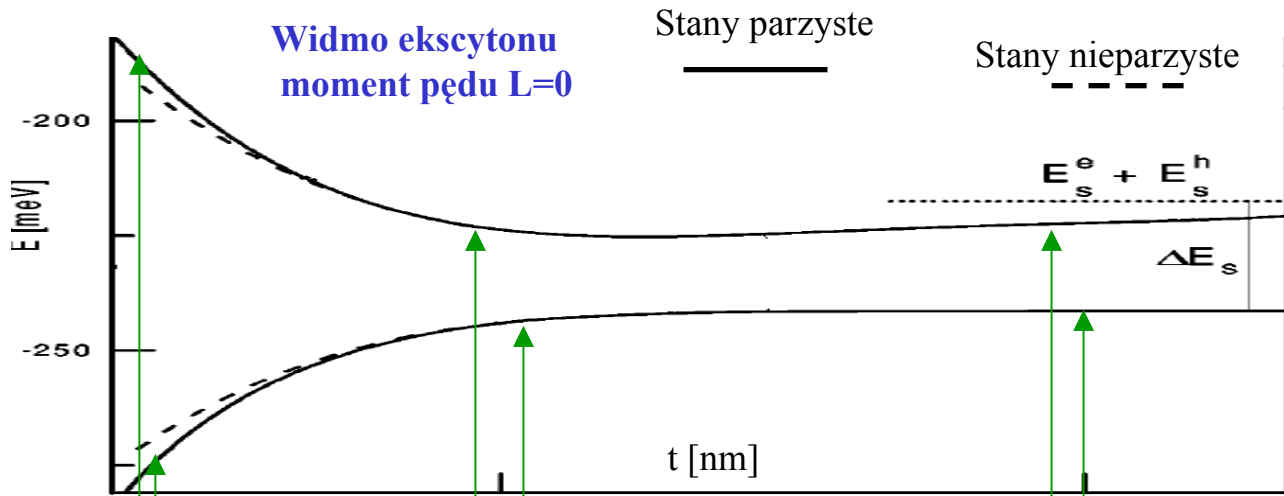
Elektron tworzy orbitale „kowalencyjne” znacznie chętniej niż dziura



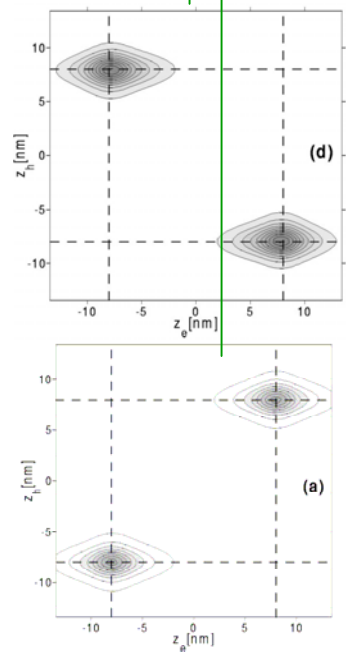
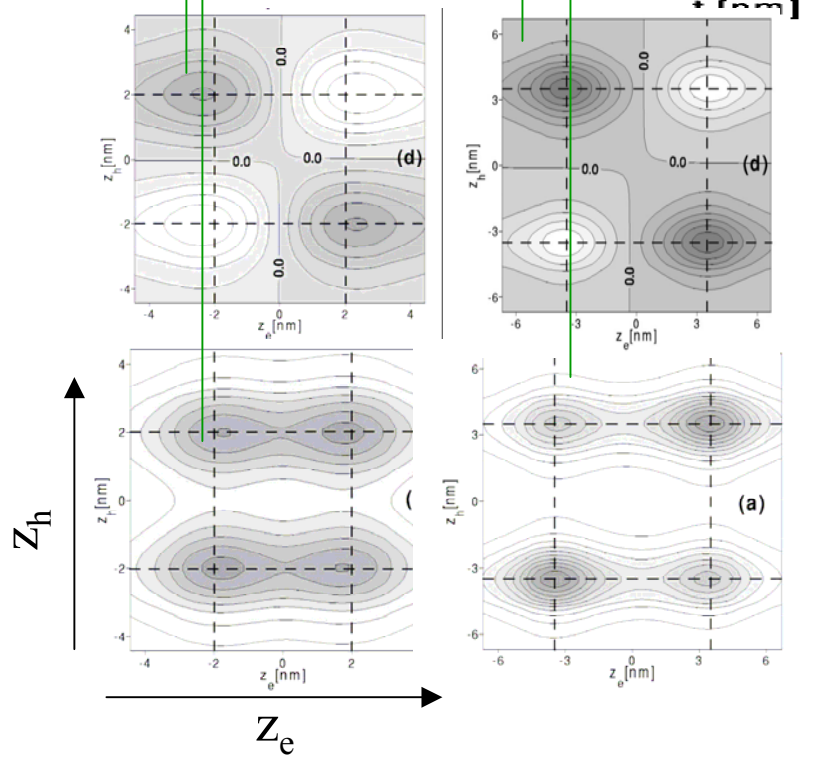
+ orb. wiązący
- orb. antywiązący

Degeneracje w słabym sprzężeniu:

Korelacje przestrzenne w *jednej* samozorganizowanej kropce niewielkie. Dla *pary* kropek jednak – wprost przeciwnie.



Nie schodzą do zera,
 lecz rozszczepienie
 - energia oddziaływania
 elektron-dziura



Szafran, Bednarek, Adamowski
 PRB 64, 125301 (2001)

Oddziaływanie elektron-dziura prowadzi do pojawienia się stanów „ciemnych” z których rekombinacja jest zabroniona nie przez symetrię tylko przez rozdzielenie przestrzenne elektronu i dziury

Brak sprzężenia tunelowego

Przybliżona parzystość
 jednocząstkowa

Stany ciemne i jasne mieszane polem elektrycznym

PHYSICAL REVIEW B 71, 205316 (2005)

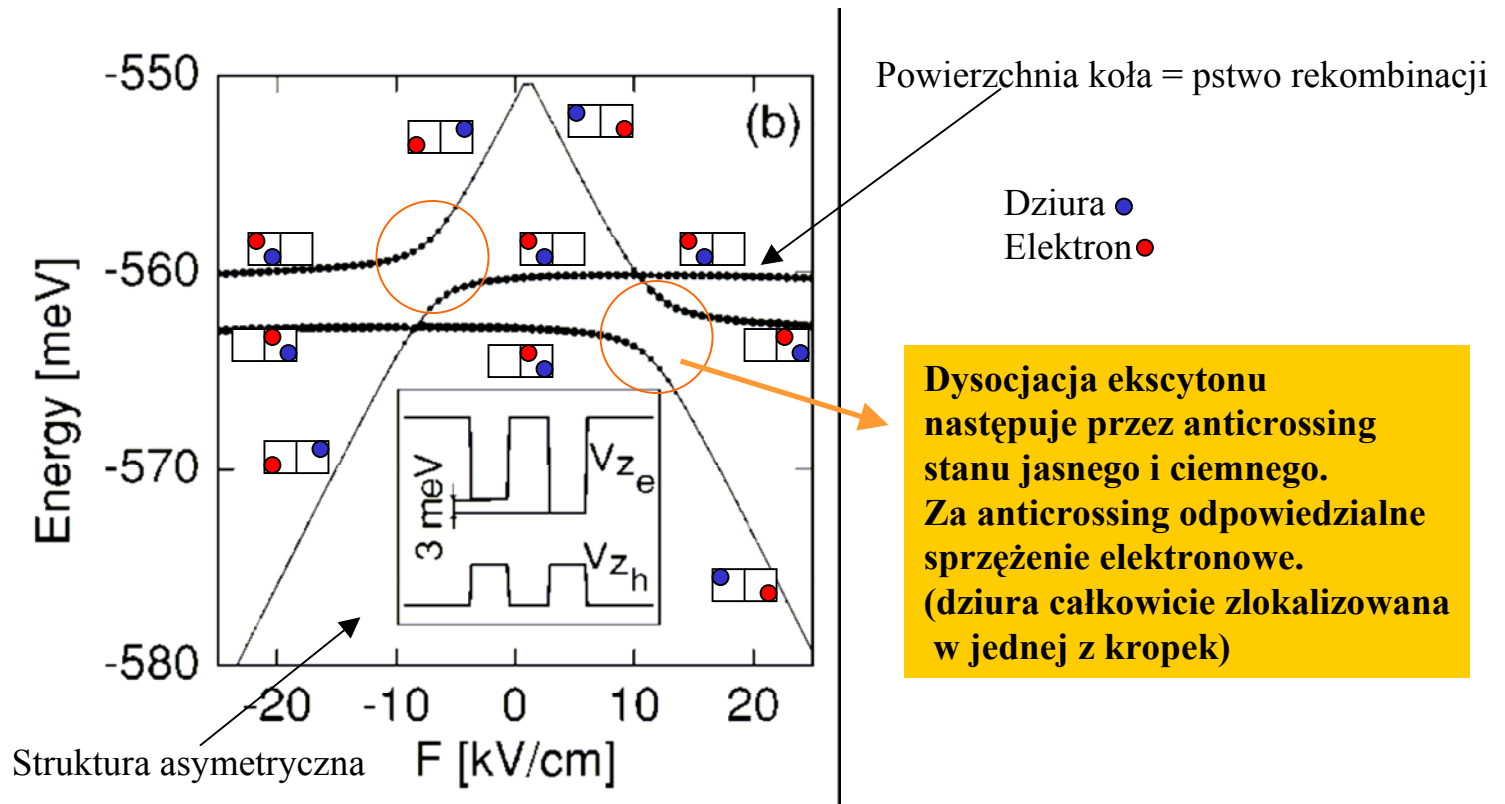
Exciton and negative trion dissociation by an external electric field in vertically coupled quantum dots

B. Szafran,^{1,2} T. Chwiej,^{1,2} F. M. Peeters,¹ S. Bednarek,² J. Adamowski,² and B. Partoens¹

¹Departement Fysica, Universiteit Antwerpen (Campus Drie Eiken), Universiteitsplein 1, B-2610 Antwerpen, Belgium

²Faculty of Physics and Applied Computer Science, AGH University of Science and Technology, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Poland

(Received 27 July 2004; revised manuscript received 15 November 2004; published 26 May 2005)



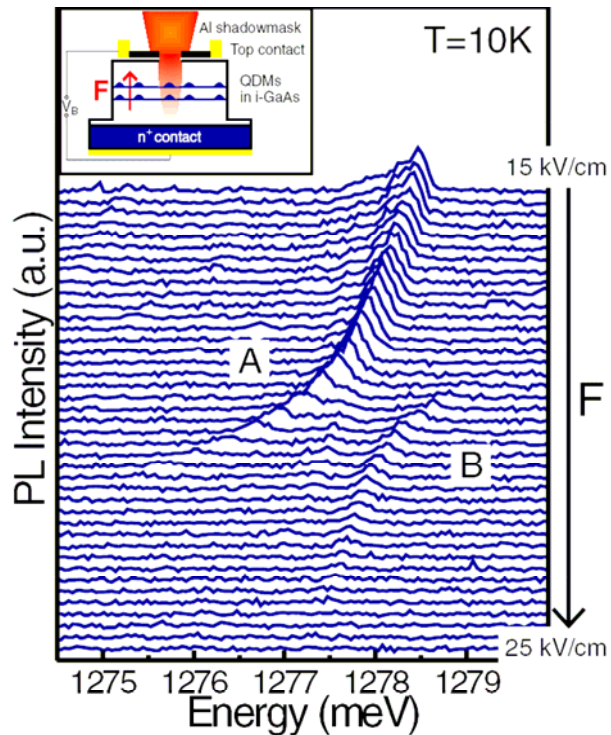
**Exciton and negative trion dissociation by an external electric field
in vertically coupled quantum dots**

B. Szafran,^{1,2} T. Chwiej,^{1,2} F. M. Peeters,¹ S. Bednarek,² J. Adamowski,² and B. Partoens¹

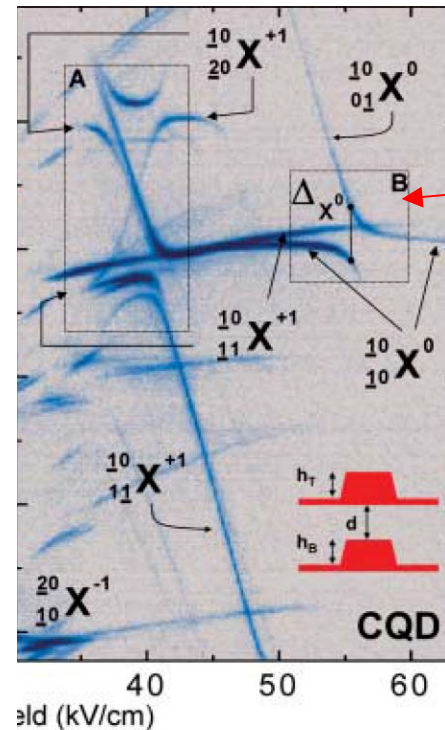
¹Departement Fysica, Universiteit Antwerpen (Campus Drie Eiken), Universiteitsplein 1, B-2610 Antwerpen, Belgium

²Faculty of Physics and Applied Computer Science, AGH University of Science and Technology, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Poland

(Received 27 July 2004; revised manuscript received 15 November 2004; published 26 May 2005)



Krenner PRL 94 057402 (2005)
wysłany październik 2004



Dysocjacja
przez anticrossing
jasny / ciemny
w eksperymentach

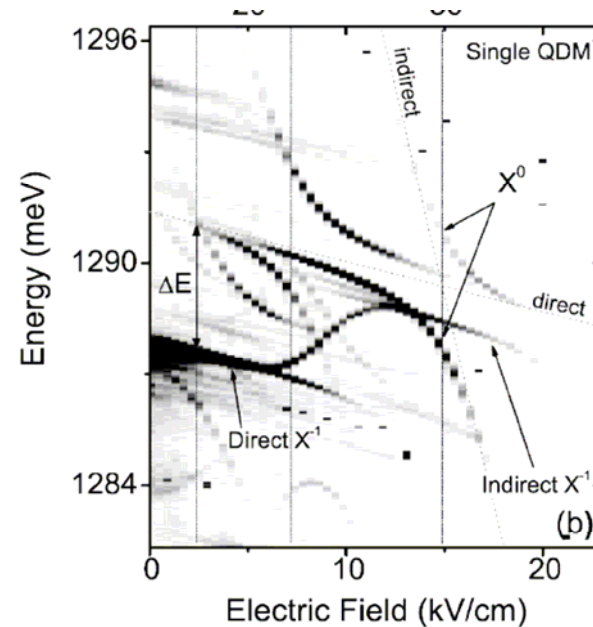
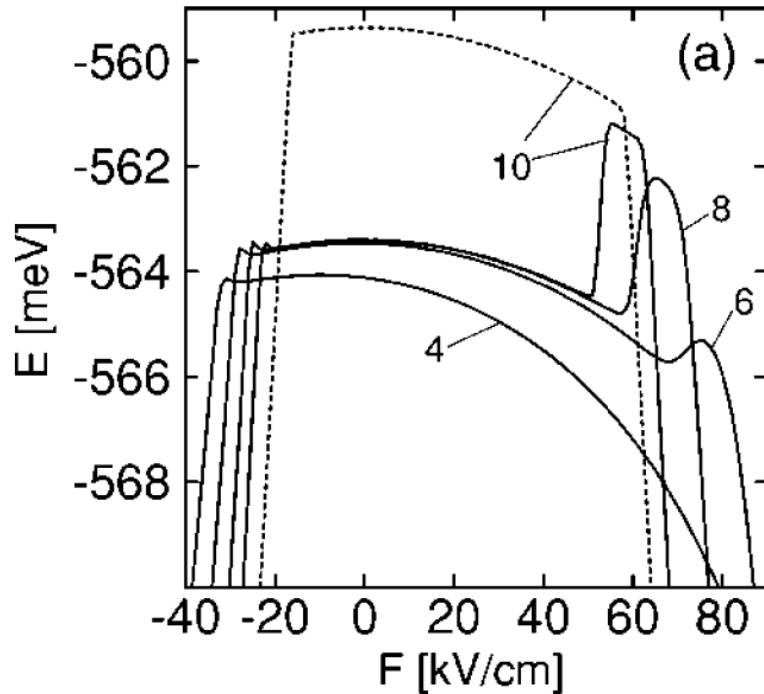
Stinaff, Science 311 636 (2006)

Dysocjacja trionu wywołana polem elektrycznym

Eksperyment

Krenner i inni Phys. Rev. Lett. **97**, 076403 (2006)

Teoria



PHYSICAL REVIEW B 71, 205316 (2005)

Exciton and negative trion dissociation by an external electric field in vertically coupled quantum dots

B. Szafran,^{1,2} T. Chwiej,^{1,2} F. M. Peeters,¹ S. Bednarek,² J. Adamowski,² and B. Partoens¹

¹Departement Fysica, Universiteit Antwerpen (Campus Drie Eiken), Universiteitsplein 1, B-2610 Antwerpen, Belgium

²Faculty of Physics and Applied Computer Science, AGH University of Science and Technology, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Poland

(Received 27 July 2004; revised manuscript received 15 November 2004; published 26 May 2005)

Wnioski z przedstawionych wyników

Efekty korelacyjne silne gdy oddziaływanie $\gg \Delta E$ między poziomami jednocząstkowymi (kropki rozległe, silne pola magnetyczne, słabe sprzężenie tunelowe między kropkami podwójnymi).

Skorelowanie nośników \rightarrow widoczne w eksperymencie ładowania kropek kolejnymi elektronami.

W zakresie ułamkowego efektu Halla:

- 1) Krystalizacja wignerowska na wyspy jednoelektronowe jeśli symetria zewnętrznego potencjału na to pozwala.**
- 2) Gdy symetria nie pozwala: układ zazwyczaj reaguje na zewnętrzne zaburzenie jak ciecz elektronowa, a tylko niekiedy (transformacje symetrii) jak kryształ elektronowy.**

Oddziaływanie elektron-dziura \rightarrow stany jasne i ciemne ekscytonu w podwójnych kropkach.