

# „Fizyka materii skondensowanej i struktur półprzewodnikowych” (1101-4FS22)

Tomasz Kazimierczuk

Zakład Fizyki Ciała Stałego  
Instytut Fizyki Doświadczalnej  
Wydział Fizyki  
Uniwersytet Warszawski

- Wykład

dr Tomasz Kazimierczuk

Środa, 11:15-13:00

Sala 2.22

- Ćwiczenia

dr hab. Wojciech Pacuski

Środa, 13:15-15:00

Sala B0.17

# Organizacja zajęć, warunki zaliczenia

- **Wykład** - obecność nie jest obowiązkowa, ale **wiedza z wykładu – tak**
- **Ćwiczenia** - **obecność obowiązkowa** – będzie sprawdzana lista obecności (akceptowane są maksimum 2 nieobecności nieusprawiedliwione)
- Na ćwiczeniach premiowana będzie aktywność; można przygotować się do prezentacji rozwiązania na podstawie listy zadań

# Warunki zaliczenia

- Dwa kolokwia, na każdym – 3 zadania po 3 pkt:  
 $2 \times 3 \times 3$  pkt. = **18 pkt.**
- Ogólna aktywność w trakcie ćwiczeń (w tym – zadania rozwiązywane na ćwiczeniach) **2 pkt.**
- Zaliczenie ćwiczeń: **minimum 10 pkt.** oraz nie więcej niż 2 nieusprawiedliwione nieobecności.
- Egzamin pisemny (test + 3 zadania po 5 pkt.) (15+15) = **30 pkt.**
- **Razem** **50 pkt.**
- Egzamin ustny
- Ostateczny wynik zależy od wszystkich powyższych elementów

# Warunki zaliczenia

- Osoby, które nie zaliczyły ćwiczeń w normalnym trybie - mogą uzyskać zaliczenie przystępując do egzaminu pisemnego w 1. terminie.  
Warunek zaliczenia ćwiczeń: uzyskanie 15 pkt./30 pkt. z egzaminu (+ obecność na ćwiczeniach).
- Osoby, które w ten sposób zaliczą ćwiczenia, są dopuszczone do egzaminu ustnego w sesji normalnej.
- Do egzaminu pisemnego w sesji poprawkowej dopuszczeni są wszyscy.
- Osoby, które wcześniej nie zaliczyły ćwiczeń będą dopuszczone do poprawkowego egzaminu ustnego pod warunkiem uzyskania z części pisemnej minimum 15 pkt./30 pkt. (+ obecność na ćwiczeniach).

# Kolokwia, egzaminy pisemne

- Podczas testów egzaminacyjnych nie można korzystać z żadnych notatek.
- Na częściach zadaniowych egzaminów pisemnych i na kolokwiach można korzystać z **własnoręcznie napisanych** notatek (maksimum 3 strony A4).

# Terminy

- Kolokwia: 20 kwietnia, godz. 9:00 – 12:00  
1 czerwca, godz. 9:00 – 12:00
- Egzamin pisemny: 17 czerwca, godz. 9:00 – 13:00
- Egzamin ustny: 19 czerwca
- Egzamin poprawkowy – do ustalenia

**Powyższe terminy mogą ulec zmianie!**

# Literatura

- Ch. Kittel, „Wstęp do fizyki ciała stałego”, PWN 1999 (druk na żądanie)
- H. Ibach, H. Lüth, „Solid state physics”, 4th edition, Springer 2009
- P.Y. Yu, M. Cardona, „Fundamentals of Semiconductors”, 3rd edition, Springer 2001
- K. Sierański, M. Kubisa, J. Szatkowski, J. Misiewicz, „Półprzewodniki i struktury półprzewodnikowe”, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej 2002
- N.W. Ashcroft, N.D. Mermin, „Fizyka Ciała Stałego”, PWN 1986



# Literatura, c.d.

- P.W. Atkins, „Chemia Fizyczna”, PWN 2001
- J. Ginter, “Wstęp do fizyki atomu, cząsteczki i ciała stałego”, PWN 1979
- J. M. Ziman – „Wstęp do teorii ciała stałego” PWN, 1977
- W.A. Harrison, „Teoria ciała stałego”, PWN 1976
- i inne . . .

# Materiały na [www.fuw.edu.pl](http://www.fuw.edu.pl)

- dr hab. P. Fita, dr hab. J. Szczytko – WdOiFMS:  
<http://www.fuw.edu.pl/wiki/WdOiFMS>
- prof. R. Stępniewski – WMDFMSiO:  
<http://www.fuw.edu.pl/~stepniew>
- prof. R. Stępniewski - skrypt do wykładu „Podstawy Fizyki Półprzewodników”:  
<http://www.fuw.edu.pl/~stepniew/PFP.pdf>
- Strona niniejszego wykładu:  
<http://www.fuw.edu.pl/~tkaz/teaching/fms2019>

# Kondensacja

- Substancja niekondensująca?

# Kondensacja

- Substancja niekondensująca

→ gaz doskonały cząstek klasycznych

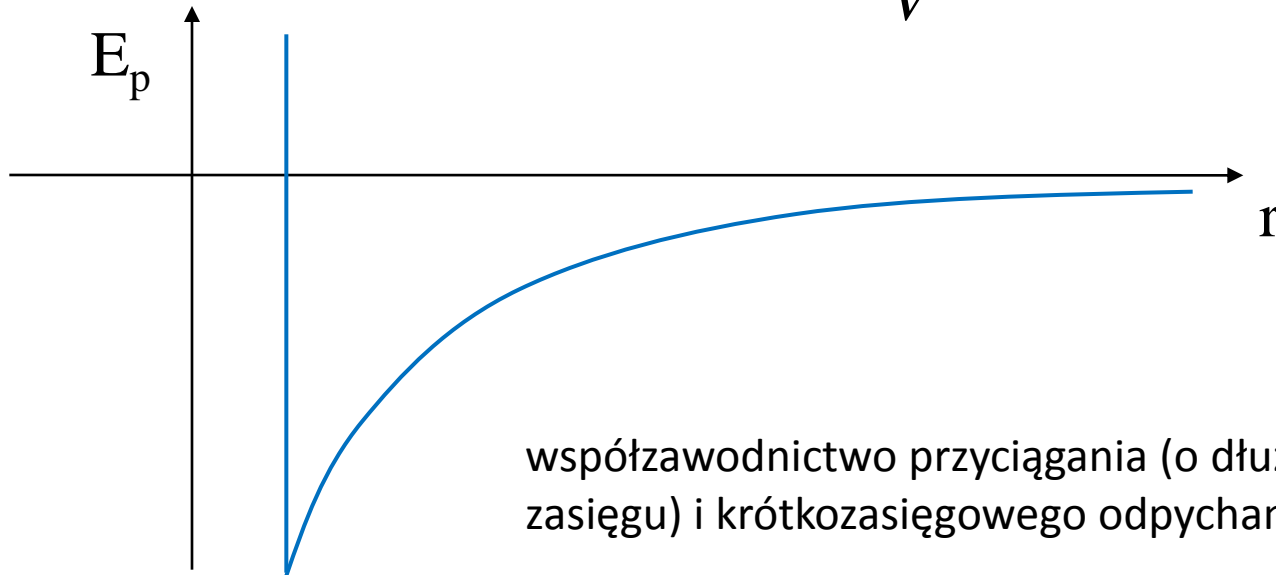
- brak oddziaływań między cząstkami
- brak korelacji kwantowych (takich, jakie wynikają ze stosowania statystyk kwantowych odpowiednio dla bozonów i fermionów)
- energia wewnętrzna – tylko „energia kinetyczna” (cząstki są swobodne, energia wewnętrzna nie zależy od odległości między nimi, a więc od objętości)

$$U = nC_V T + U_0$$

# Kondensacja

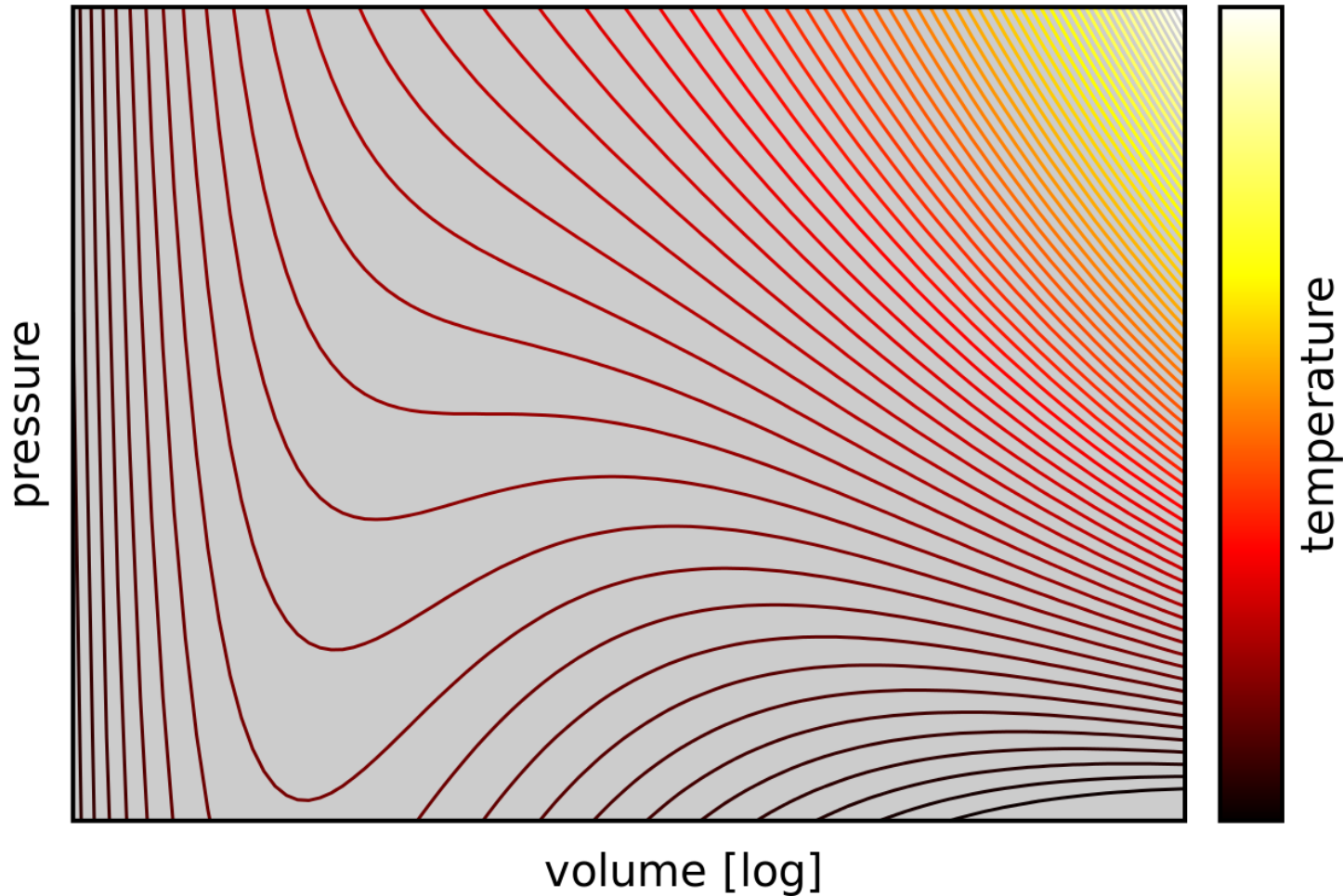
Przykład substancji kondensującej – gaz van der Waalsa

- Równanie stanu  $\left(p + \frac{n^2 a}{V^2}\right)(V - nb) = nRT$
- Energia wewnętrzna  $U = nC_V T - \frac{n^2 a}{V} + U_0 = E_{kin} + E_{pot}$



# Gaz van der Waalsa

## Van der Waals Isotherms



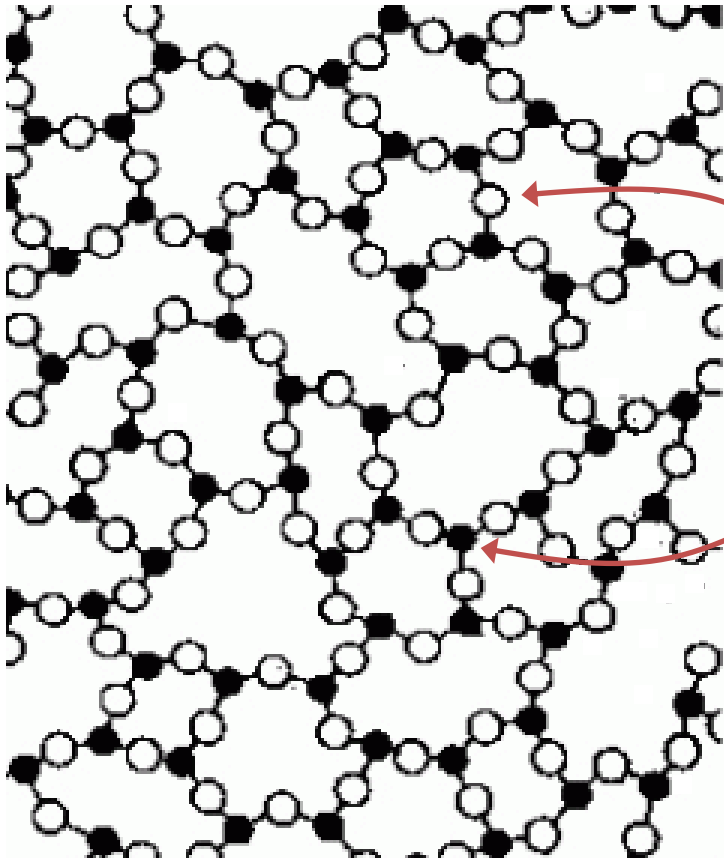
# Kondensacja

- ***Materia skondensowana*** – tym terminem najczęściej określamy materię pozostającą w stanie, w którym średnie odległości między cząsteczkami są tego samego rzędu co rozmiary cząsteczek i w związku z tym oddziaływania międzycząsteczkowe stają się na tyle silne, że (w odpowiednio niskiej temperaturze!) energia potencjalna może przeważać nad kinetyczną. Ma to miejsce np. w przypadku cieczy czy ciała stałego.
- ***Kondensacja*** – możliwa jest też dla cząstek słabo lub w ogóle nie oddziałujących ze sobą – np. kondensacja Bosego-Einsteina (makroskopowe obsadzenie kwantowego stanu podstawowego dla bozonów) może zachodzić także dla nieoddziałujących cząstek. Wtedy bozony muszą się znajdować w odległościach wzajemnych niewielkich w porównaniu z tzw. długością koherencji funkcji falowej opisującej ich stan.

- ***Kondensacja*** – co najmniej bliski porządek (ciecze, ciała stałe amorficzne, szkła) lub także daleki porządek (ciała krystaliczne)



# Dwuwymiarowy odpowiednik $\text{Al}_2\text{O}_3$

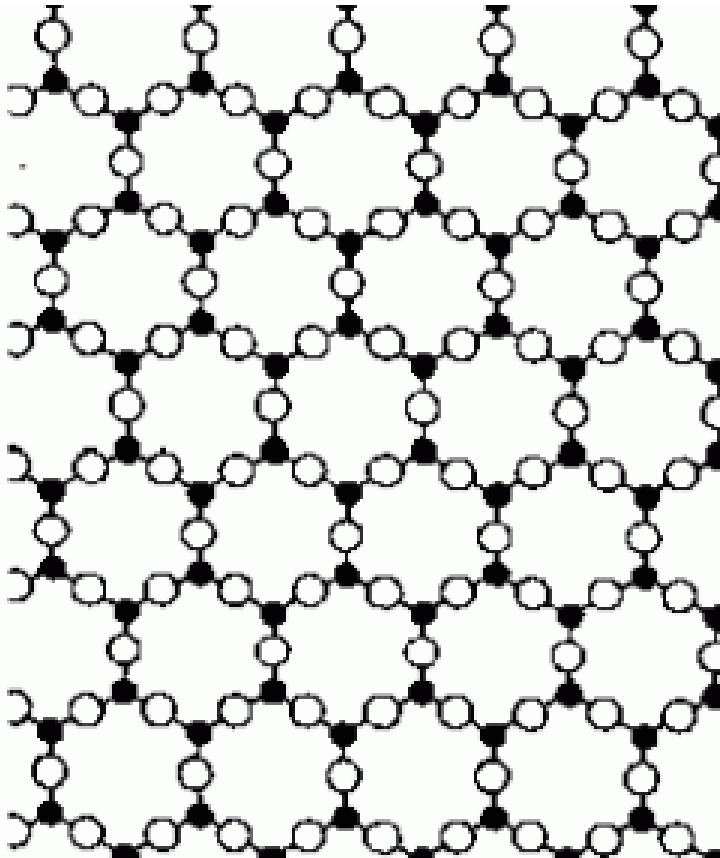


## *Bliski porządek*

- ciała bezpostaciowe (amorficzne),  
ciecze przechłodzone
- każdy „biały” atom ma 2 czarnych  
sąsiadów
- każdy „czarny” atom ma 3 białych  
sąsiadów
- brak symetrii translacyjnej

*R. Stępniewski, Współczesne metody doświadczalne fizyki materii skondensowanej i optyki*

# Dwuwymiarowy odpowiednik $\text{Al}_2\text{O}_3$



*Daleki porządek* - kryształ

Symetria translacyjna

*R. Stępniewski, Współczesne metody doświadczalne fizyki materii skondensowanej i optyki*

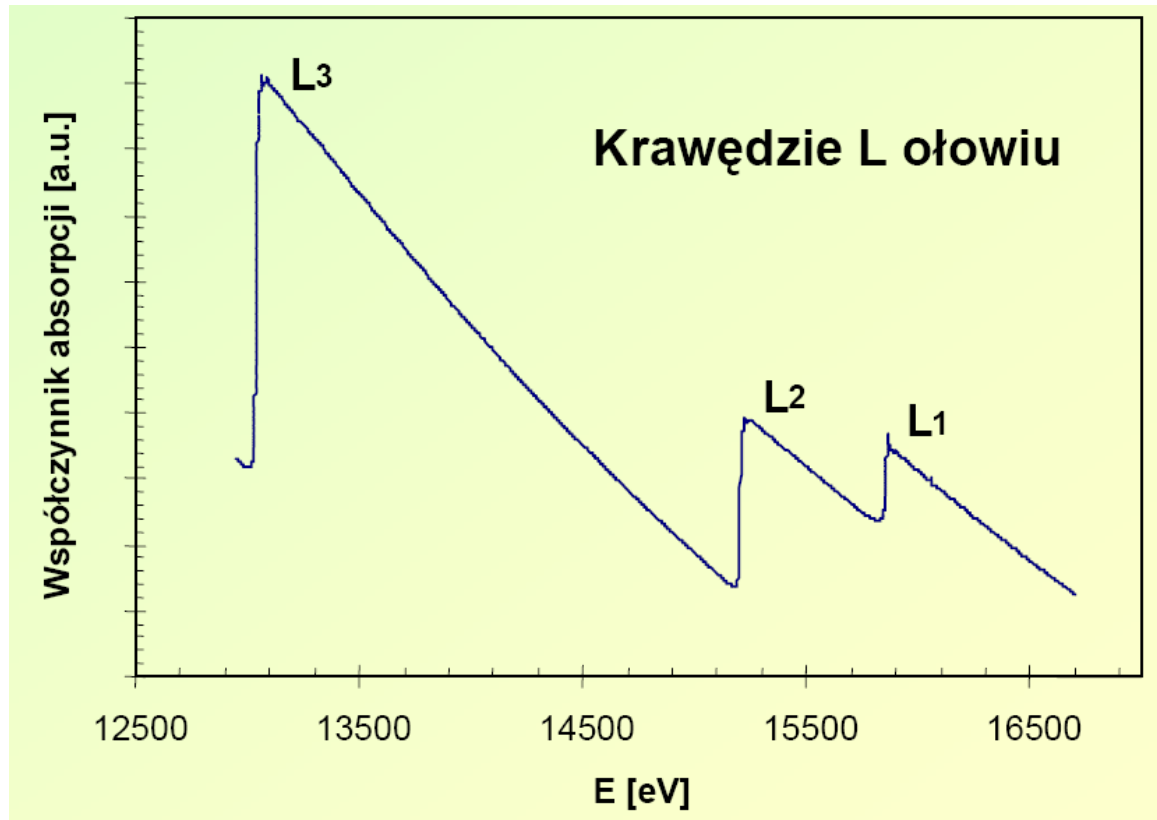
# Badania bliskiego porządku

***Badania dalekiego porządku*** – metody dyfrakcyjne  
(patrz wykład:

*R. Stępniewski, Współczesne metody doświadczalne fizyki materii skondensowanej i optyki)*

***Badania bliskiego porządku*** – np. metody EXAFS  
(Extended X-ray Absorption Fine Structure) oraz  
XANES (X-ray Absorption Near Edge Structure)

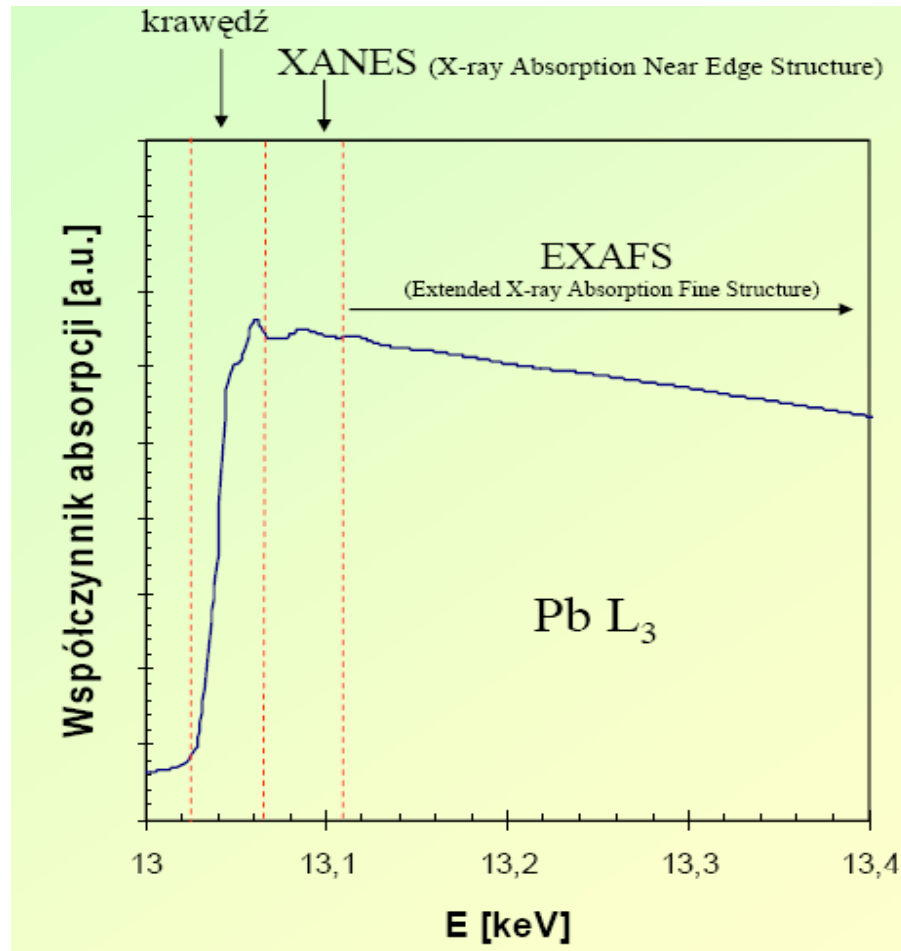
# Badania bliskiego porządku - XANES



$n = 2 \Rightarrow L: L_1 (2s_{1/2}), L_2 (2p_{1/2}), L_3 (2p_{3/2})$

dr inż. Agnieszka Witkowska, dr hab. inż. Jarosław Rybicki,  
Politechnika Gdańska, Wydział FTiMS, Katedra Fizyki Ciała Stałego,  
[http://mif.duo.netstrefa.pl/badstruk\\_files/EXAFS.pdf](http://mif.duo.netstrefa.pl/badstruk_files/EXAFS.pdf)

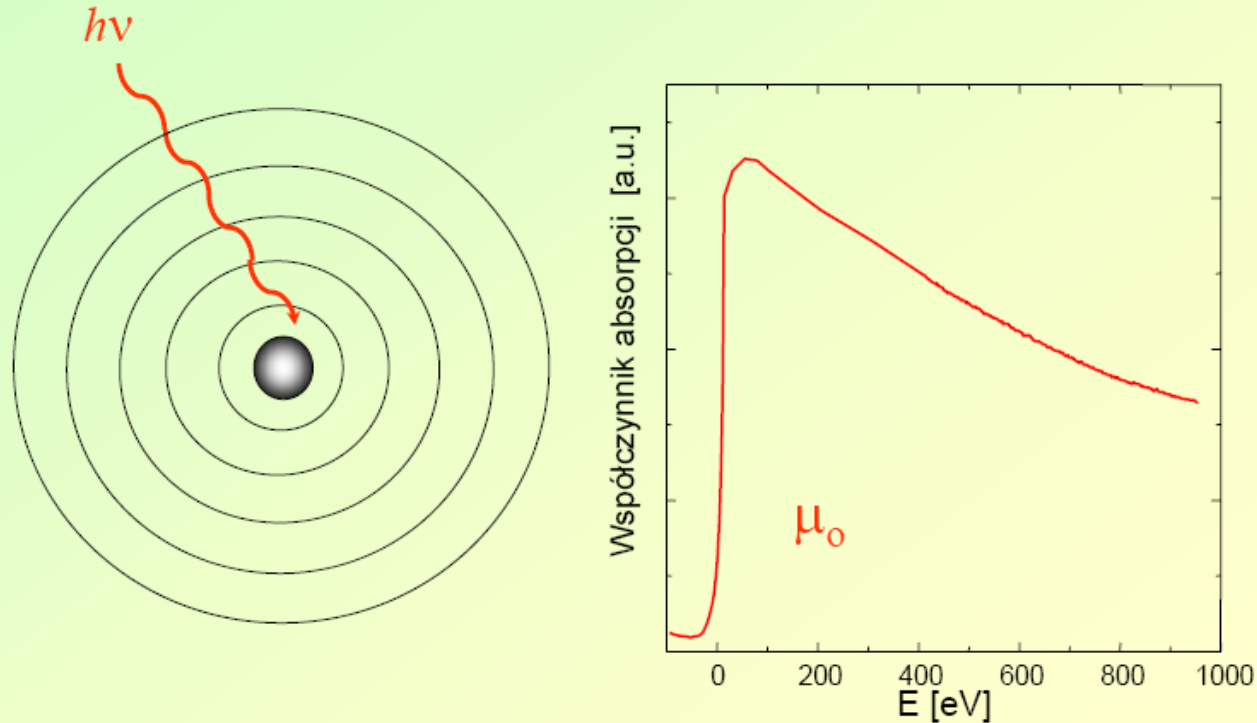
# Badania bliskiego porządku - EXAFS



dr inż. Agnieszka Witkowska, dr hab. inż. Jarosław Rybicki,  
Politechnika Gdańska, Wydział FTiMS, Katedra Fizyki Ciała Stałego,  
[http://mif.duo.netstrefa.pl/badstruk\\_files/EXAFS.pdf](http://mif.duo.netstrefa.pl/badstruk_files/EXAFS.pdf)

# Badania bliskiego porządku - EXAFS

## EXAFS – idea zjawiska

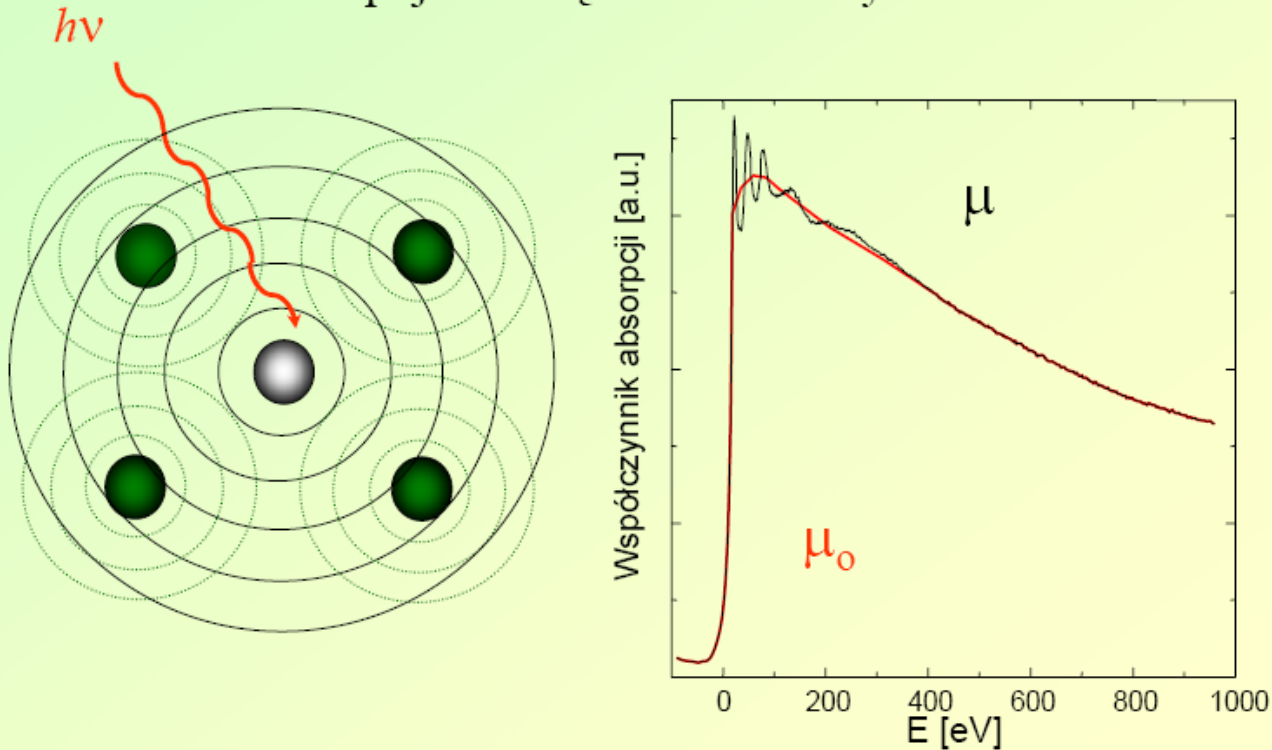


dr inż. Agnieszka Witkowska, dr hab. inż. Jarosław Rybicki,  
Politechnika Gdańska, Wydział FTiMS, Katedra Fizyki Ciała Stałego,  
[http://mif.duo.netstrefa.pl/badstruk\\_files/EXAFS.pdf](http://mif.duo.netstrefa.pl/badstruk_files/EXAFS.pdf)

# Badania bliskiego porządku - EXAFS

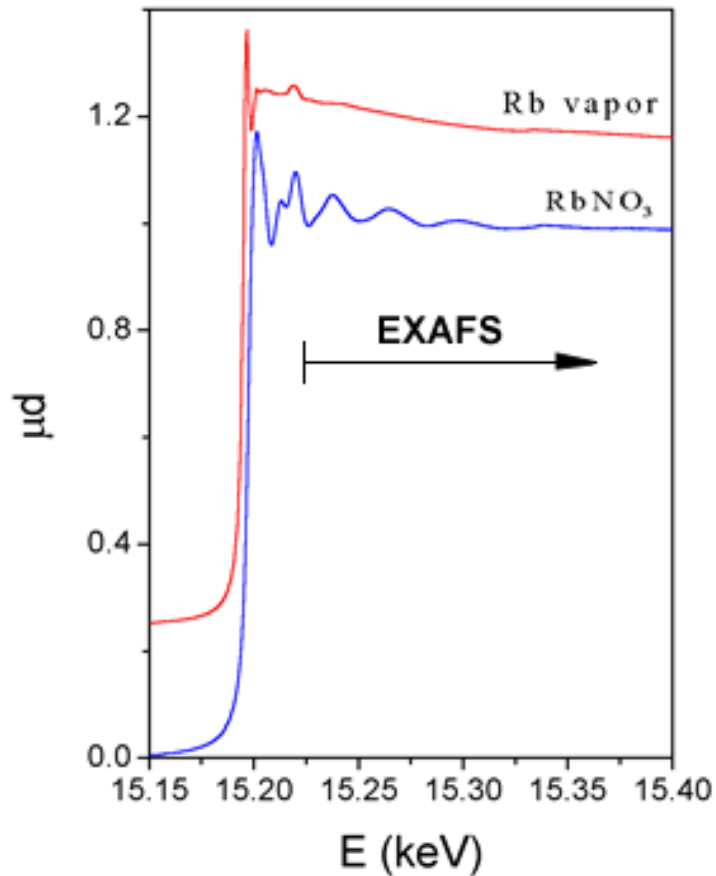
## EXAFS – idea zjawiska

EXAFS nie pojawia się dla izolowanych atomów



dr inż. Agnieszka Witkowska, dr hab. inż. Jarosław Rybicki,  
Politechnika Gdańska, Wydział FTiMS, Katedra Fizyki Ciała Stałego,  
[http://mif.duo.netstrefa.pl/badstruk\\_files/EXAFS.pdf](http://mif.duo.netstrefa.pl/badstruk_files/EXAFS.pdf)

# Badania bliskiego porządku - EXAFS



Research Group for X-ray Absorption Spectroscopy  
ESRF, Grenoble

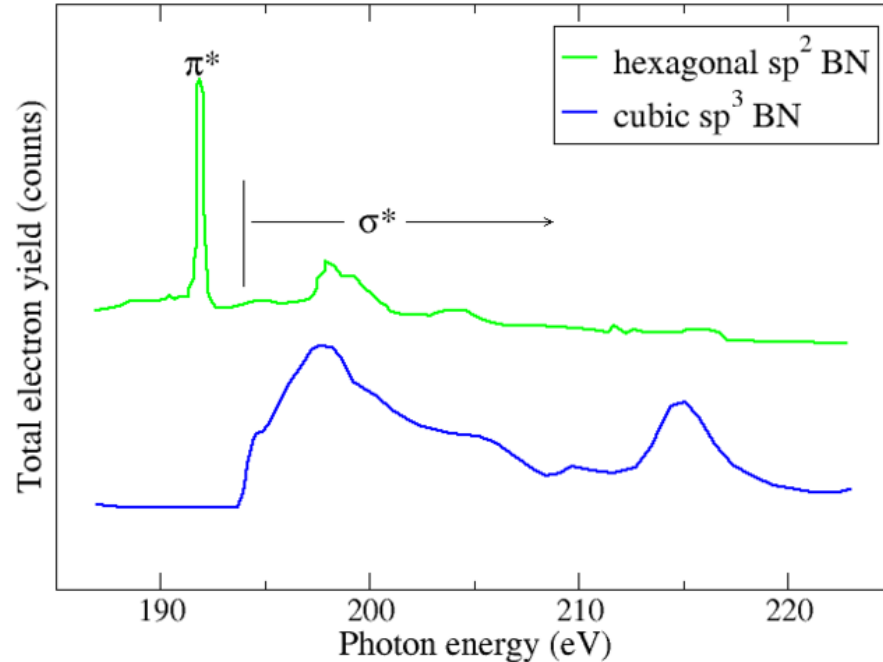
<http://www.p-ng.si/~arcon/xas/exafs/exafs.htm>

*X-ray absorption spectra of RbNO<sub>3</sub> water solution and rubidium vapour in the energy range of Rb K-edge.*



# Badania bliskiego porządku - EXAFS

Na osi pionowej – po prostu natężenie prądu neutralizującego.



<http://en.wikipedia.org/wiki/XANES>

*Normal-incidence boron 1s X-ray absorption spectra for two types of BN powder. The cubic phase shows only  $\sigma$ -bonding while the hexagonal phase shows both  $\pi$  and  $\sigma$  bonding.*

# Badania bliskiego porządku

Metody te są lokalną sondą strukturalną. Pozwalają na:

1. selektywne badanie otoczenia wybranego rodzaju atomów (!)
2. wyznaczenie funkcji korelacji par atomów  
(prawdopodobieństwa znalezienia kolejnego atomu w funkcji odległości od atomu centralnego – tzw. fotoabsorbera)
3. liczby sąsiadów w kolejnych strefach koordynacyjnych
4. ustalenie parametrów lokalnego otoczenia domieszki

Szeroki zakres zastosowań – molekuly, kryształy, szkła, ciecze, układy biologiczne

# Krystalizacja Wignera

Kondensacja zachodzi, jeśli *energia potencjalna przeważa nad kinetyczną* (odpowiednio niska temperatura)

Krystalizacja Wignera: spontaniczne porządkowanie swobodnych ładunków w sieć (w 2D – sieć trójkątna), minimalizujące kulombowskie oddziaływanie odpychające

PHYSICAL REVIEW B **79**, 045406 (2009)



**Addition spectra of Wigner islands of electrons on superfluid helium**

Emmanuel Rousseau,<sup>\*</sup> Dmitri Ponarin,<sup>†</sup> Likourgos Hristakos,<sup>‡</sup> Olivier Avenel, Eric Varoquaux, and Yuri Mukharsky  
*Service de Physique de l'État Condensé Centre de Saclay, 91191 Gif-sur-Yvette cedex, France*

J Low Temp Phys (2007) 148: 193–197 - szczegóły konstrukcyjne

# Krystalizacja Wignera

PHYSICAL REVIEW B **79**, 045406 (2009)

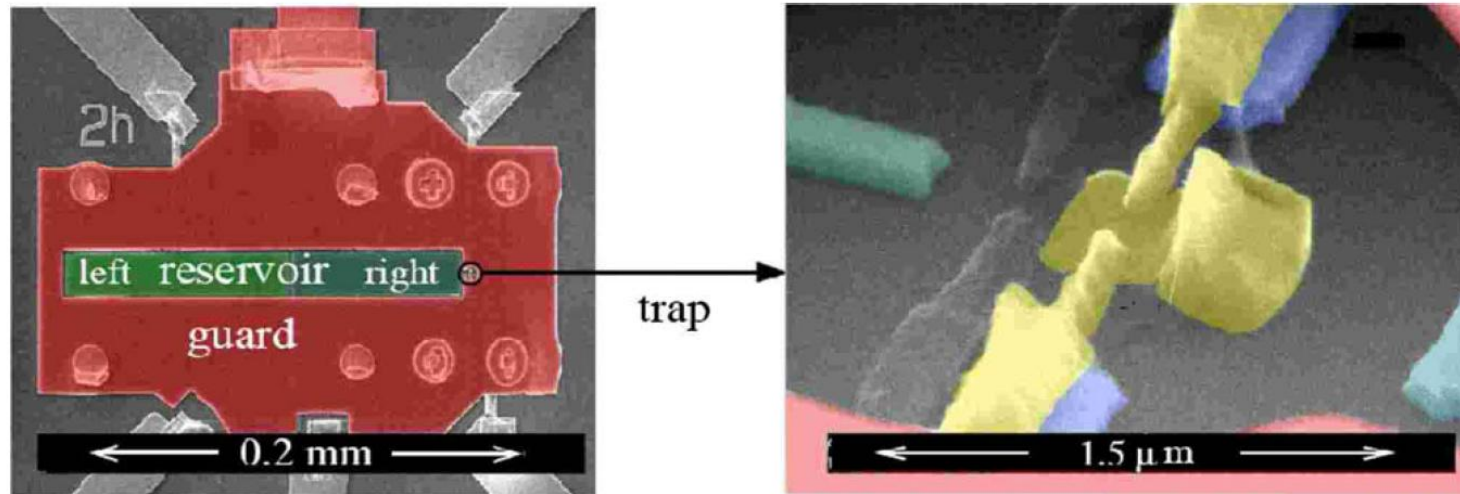
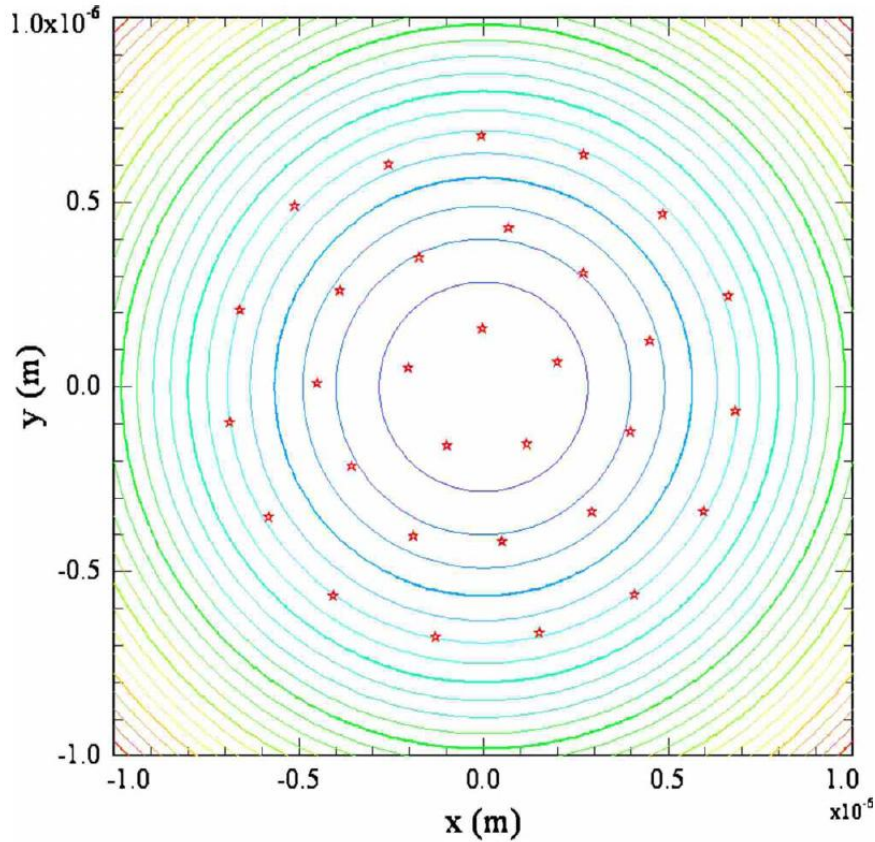


FIG. 2. (Color online) Scanning electron microscopy (SEM) picture of the complete microfabricated device (left) and magnified view of the electron trap (right).

Temperatury milikelwinowe !!!

# Krystalizacja Wignera



$$H = \sum_{i=1}^N \left\{ -\frac{\hbar^2 \nabla_i^2}{2m_e} + \frac{m_e \omega_0^2}{2} r_i^2 \right\} + \sum_{i < j}^N \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 |\vec{r}_i - \vec{r}_j|}$$

FIG. 11. (Color online) Wigner molecule in a parabolic trap with 31 electrons. Lines represent potential contours; the minimum of the parabola is centered on (0,0). Stars represent the electrons. The ground-state configuration is the configuration (5,11,15) as in Kong *et al.* (Ref. 46).

# Wiązanie kowalencyjne

Wiązania kowalencyjne (ewentualnie spolaryzowane) tworzą:

1. pierwiastki niemetaliczne z wyjątkiem gazów szlachetnych (np. C, Si, Ge ...)
2. cząsteczki chemiczne (np. N<sub>2</sub>, Cl<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> ...)
3. związki złożone z różnych pierwiastków, ale mających podobną elektroujemność (np. GaAs, SiC ...)

# Wiązanie jonowe

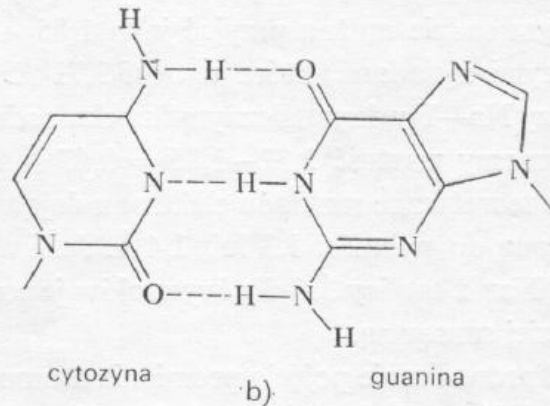
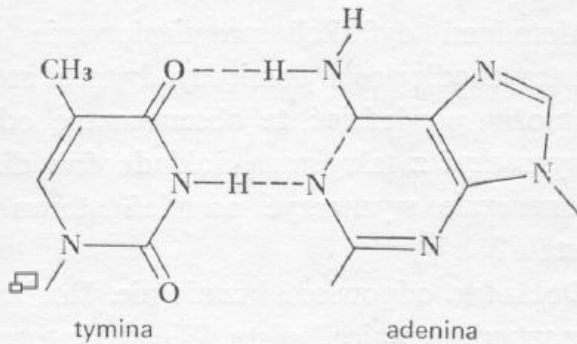
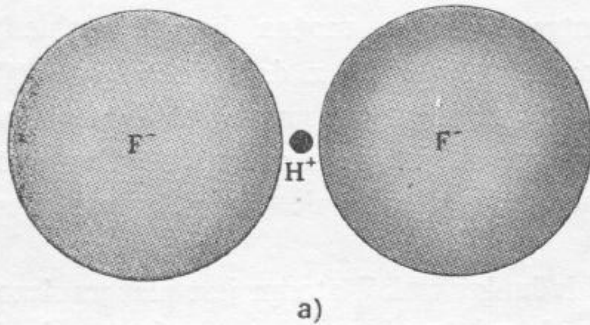
Duża różnica elektroujemności atomów – może tworzyć się **wiązanie jonowe**. W takiej sytuacji przeniesienie elektronu/elektronów z jednego atomu na drugi (jonizacja pierwszego, przyłączenie do drugiego) może w bilansie strat i zysków energetycznych (energia jonizacji – powinowactwo elektronowe) dać stabilność i powstanie wiązanie. Powstają jony o zamkniętych powłokach elektronowych.

Można z dobrym przybliżeniem założyć, że transfer ładunku pomiędzy obu wiążącymi się obiektami wynosi  $e$  lub całkowitą wielokrotność  $e$ .

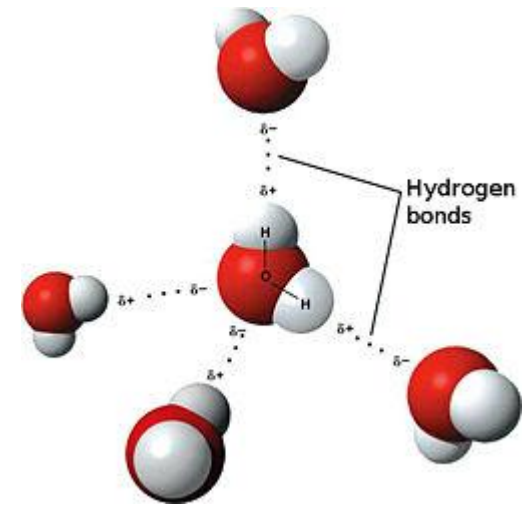


# Wiązanie wodorowe

Wiązanie wodorowe (energia około 0,1 eV) powstaje tylko pomiędzy atomami o największej elektroujemności – np. F ( $\chi = 3,98$ ), O ( $\chi = 3,44$ ), N ( $\chi = 3,04$ ) i ma charakter wiązania jonowego. Odpowiada ono za konformację białek, wiązanie pomiędzy obu niciami DNA, wiązanie pomiędzy cząsteczkami wody.



Rys. 3.14. a) Jon dwufluorku wodoru  $\text{HF}_2^-$  istnieje dzięki wiązaniu wodorowemu. Rysunek przedstawia graniczny model wiązania, graniczny w tym sensie, że przedstawiony proton nie ma elektronów. b) Wiązania wodorowe pomiędzy cząsteczkami organicznymi składowymi DNA. (Wg F. H. C. Cricka i J. D. Watsona.)



[http://en.wikipedia.org/wiki/Hydrogen\\_bond](http://en.wikipedia.org/wiki/Hydrogen_bond)

Ch. Kittel, Wstęp do fizyki ciała stałego



# Wiązanie wodorowe

W metalach:

- Bardzo istotny wkład do energii całkowitej wnoszą elektrony swobodne
- Są one zdelokalizowane na cały obszar metalu i „neutralizują” dodatnio naładowane rdzenie atomowe. Delokalizacja oznacza obniżenie energii kinetycznej (a więc i całkowitej)
- Im więcej elektronów – tym lepiej (silniejsze wiązanie)
- Metale krystalizują preferencyjnie w strukturach gęsto upakowanych (fcc, hcp, bcc), wiązanie jest nieukierunkowane
- Jony metalu mogą dość łatwo przemieszczać się pod wpływem siły zewnętrznej – ruch i przemieszczanie się dyslokacji – plastyczność.

# Wiązanie wodorowe

- W metalach alkalicznych delokalizowane mogą być tylko elektrony z ostatniej powłoki  $ns$ . W takich metalach łatwo zmienić długość wiązania (duża ściśliwość)
- W metalach z dalszych kolumn układu okresowego do wiązania dają istotny wkład głębsze powłoki (w szczególności w metalach przejściowych i ziemiach rzadkich niezamknięte powłoki  $d$  i  $f$ ). W takich metalach znacznie trudniej zmienić długość wiązania (mała ściśliwość)
- W metalach wiązania są najczęściej niezbyt silne, ale są też metale o silnym wiązaniu – np. wolfram