

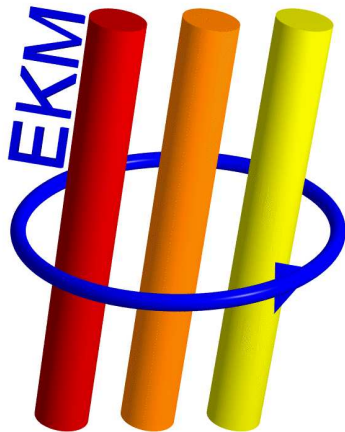
# Magnetyczne metale i izolatory – od antycznych odkryć do współczesnej teorii

Krzysztof Byczuk

Instytut Fizyki Teoretycznej, Uniwersytet Warszawski, Polska

Instytut Fizyki, Uniwersytet Augsburgski, Niemcy

*12 wrzesień, 2005*



Główna myśl

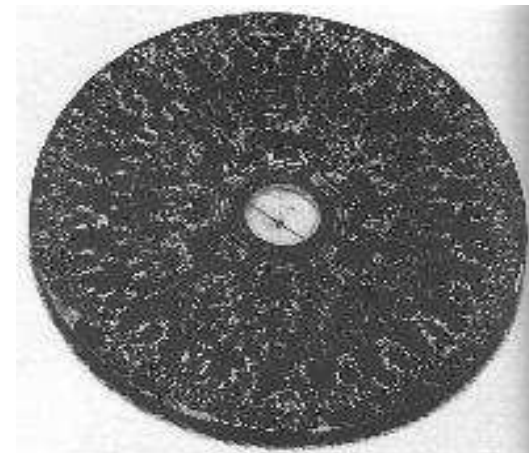
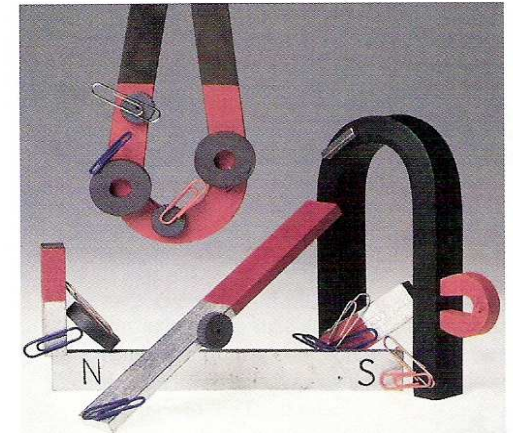
# Magnetyzm

- zjawisko kwantowe
- zjawisko emergentne

# Magnetyzm

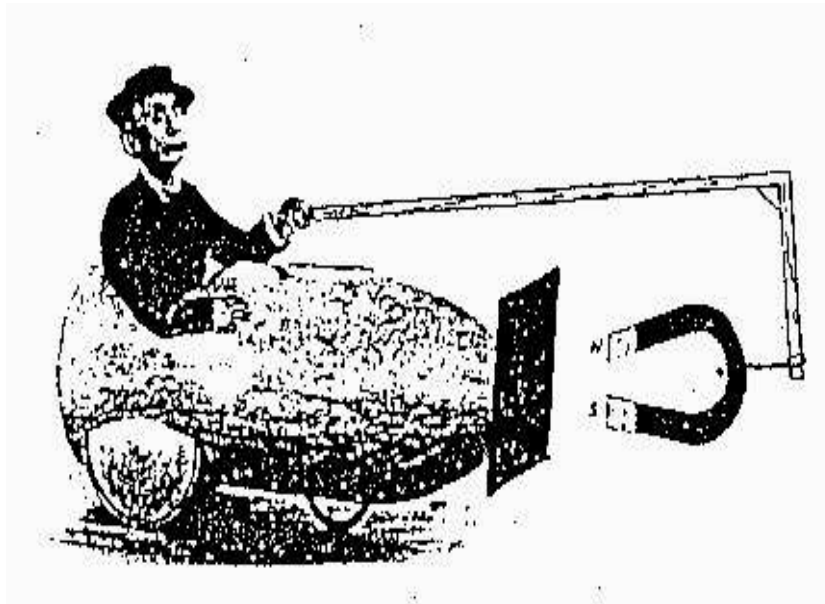
*grupa zjawisk do których zalicza się przyciąganie żelaza obserwowane w magnetytach i magnesach ...*

- manetyt  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  (Magnezja, prowincja Turcji)
- znane w starożytnych Chinach i Grecji (800 pne)
- kompas - największy wynalazek ludzkości

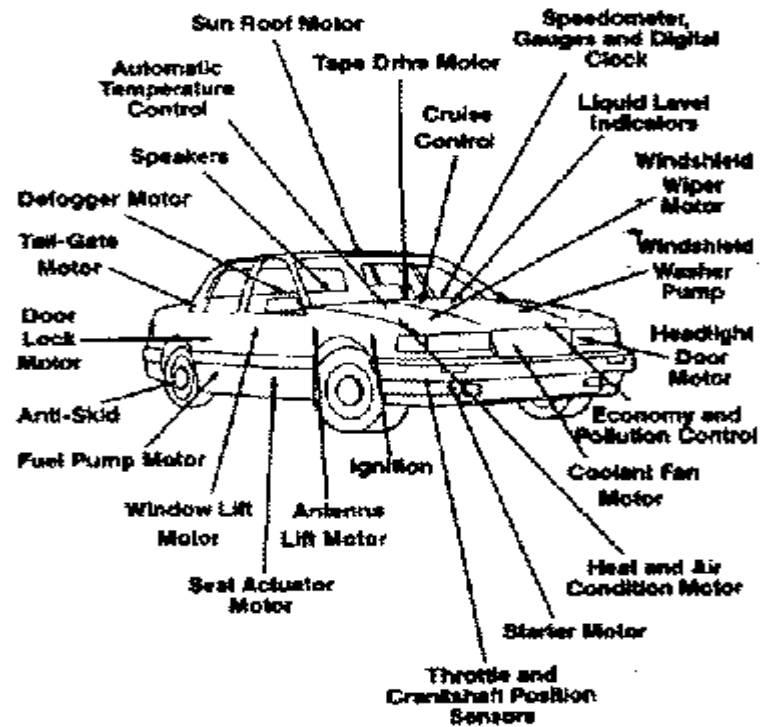


Chiński kompas z XVI wieku

## Zabawy z magnesami



## Wiele zastosowań...



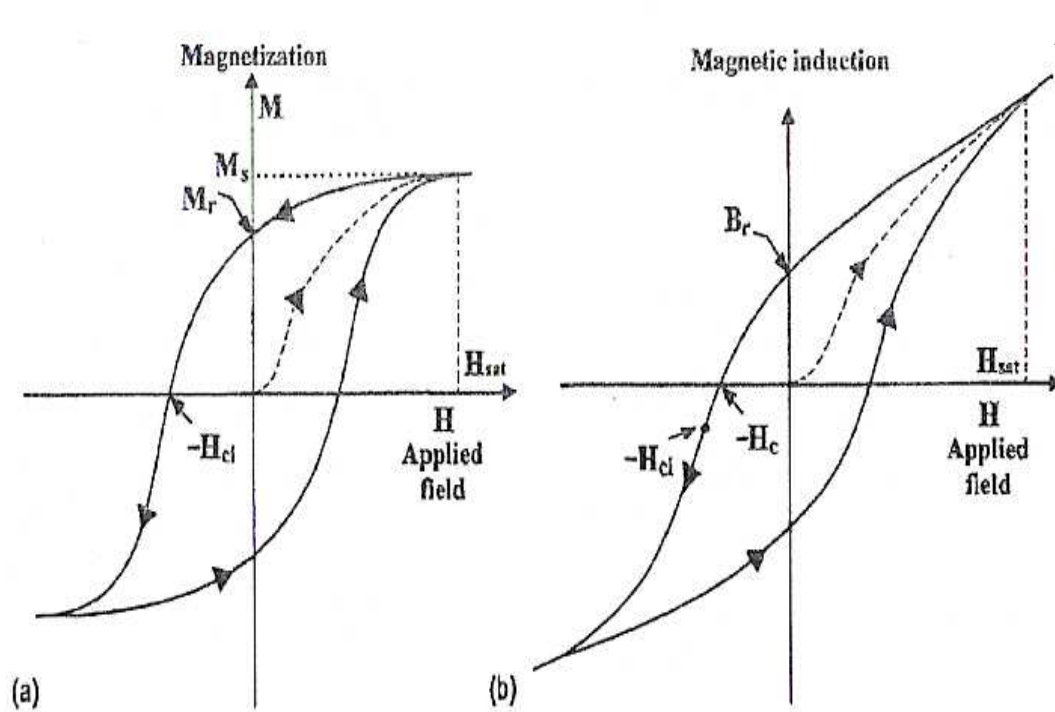
Nowoczesny samochód zawiera kilkadziesiąt magnesów trwałych

# Przemysłowa produkcja

Rocznie produkuje się 30g magnesów stałych na statystycznego mieszkańca globu

- metale ziem rzadkich - 1940'
- stopy Sm-Co - 1960'
- stopy Nd-Fe-B - 1980'
- stopy Sm-Fe-N - 1990'

# Histeresa magnetyczna



$$B = \mu_0(H + M)$$

Koercja  $H_c$  mała - magnesy miękkie

Koercja  $H_c$  duża - magnesy trwałe

Siła magnesu  $(BH)_{\max} \sim$  zgromadzona energia w magnesie o optymalnym kształcie

Obecnie  $(BH)_{\max} \sim 540 \text{ kJ/m}^3$  i podwaja się co 12 lat

# Oddziaływania magnetyczne

opisuje XIX wieczna elektrodynamika Maxwell'a - Faraday'a

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$$



# Magnetyzm w fizyce klasycznej

tw. Bohr'a (1911) i van Leeuwen (1919)

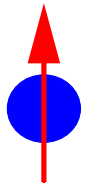
*wedle praw fizyki klasycznej (niekwantowej) wypadkowa magnetyzacja  
substancji makroskopowej wynosi zero*

magnetyzm nie może istnieć!?

# Teoria kwantowa (1925-26)

Istnieje stały moment magnetyczny elektronu

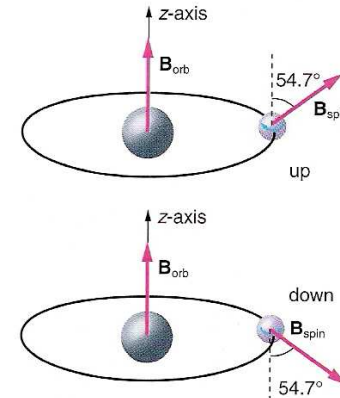
elektron ma spin  $\hat{S}$  ( $S_z = \pm \hbar/2$ )



$$\mathbf{m}_s = -\frac{\mu_B}{\hbar} \langle \hat{S} \rangle$$

$\mu_B = e\hbar/2m$  - magneton Bohr'a

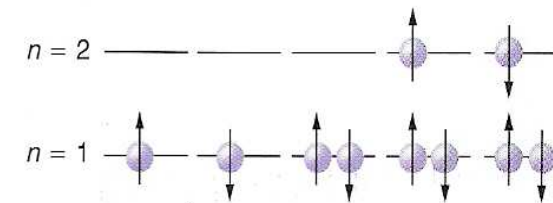
Elektrony są fermionami - obowiązuje zakaz Pauliego



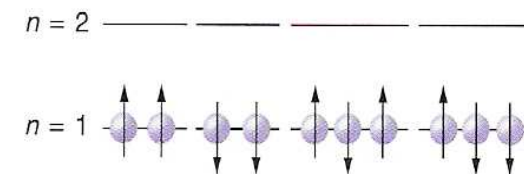
$$\mathbf{m} = -\frac{\mu_B}{\hbar} (\mathbf{L} + 2\mathbf{S}) - \frac{e^2}{4m} \langle r^2 \rangle \mathbf{B}$$



Allowed



Not allowed



## Dia, para, ferro, ...

- diamagnetyk  $\mathbf{M} \sim -\mathbf{B}$
- paramagnetyk  $\mathbf{M} \sim \mathbf{B}$
- ferro, antyferro, ferrimagnetyk w  $T < T_c$ ,  
 $T_c$  temperatura krytyczna

$$\mathbf{M}(\mathbf{r}) \neq 0$$



Żaba jest diamagnetyczna

istnieje spontaniczna gęstość namagnesowania bez zewnętrznego pola magnetycznego

# Pole wymienne

wewnętrzne pole magnetyczne potrzebne do uporządkowania magnetycznego

$$E_{ex} \sim \mu_B B_{ex} \sim k_B T_c$$

	$T_c [K]$	$k_B T_c [meV]$	$B_{ex} [T]$
Fe	1043	89,9	1552,8
Co	1393	20,1	2073,9
Ni	631	54,4	939,4
Gd	292	25,0	431,7
EuO	69,3	6,0	103,2

$$B_{lab} < 10, \dots, 20 T$$

# Teoria magnetyzmu

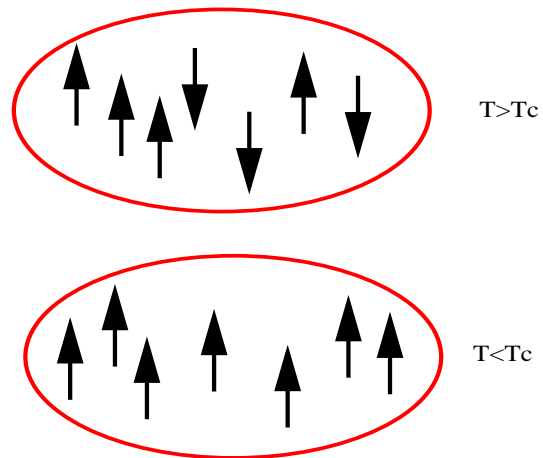
Q: Skąd pochodzi magnetyzm ciał stałych?

A: Nie istnieje jedna uniwersalna teoria mikroskopowa wyjaśniająca magnetyzm ciał stałych,

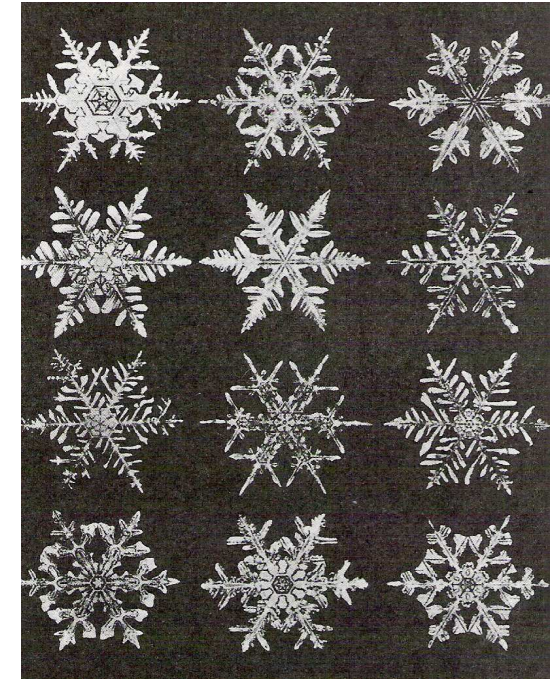
ale ...

# Spontaniczne łamanie symetrii

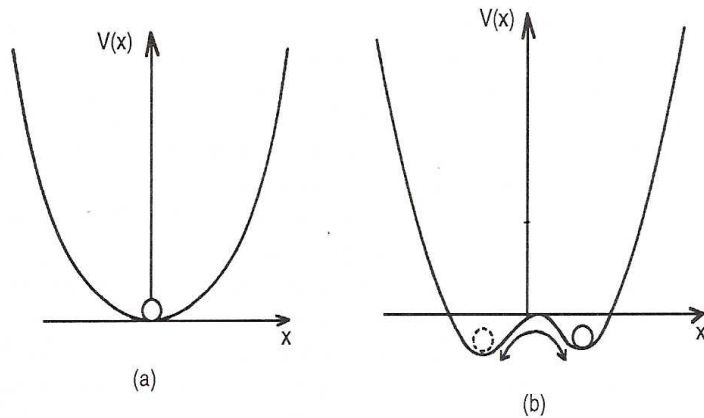
pojawianie się magnetycznego uprządkowania poniżej temperatury krytycznej jest związane ze **spontanicznym łamaniem symetrii w układzie**



poniżej  $T_c$  układ spontanicznie łamie symetrię wyróżniając jeden kierunek namagnesowania

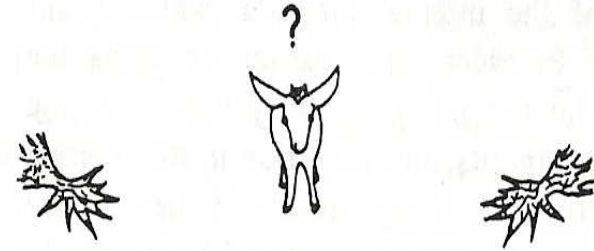


# Spontaniczne łamanie symetrii

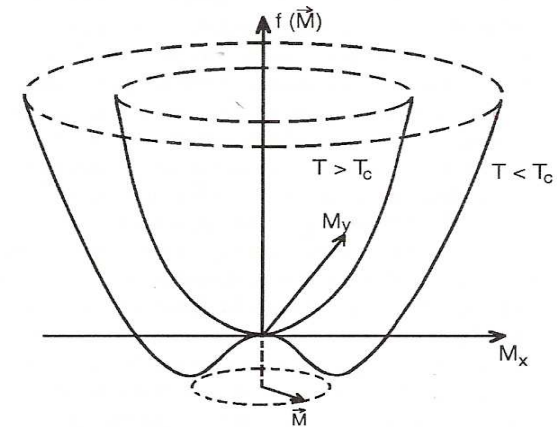


wiele równoważnych stanów podstawowych - wybrany tylko jeden  
nowa próżnia kwantowo-mechaniczna  $|FM\rangle \equiv |\uparrow\uparrow \dots \uparrow\rangle$   
uporządkowanie dalekiego zasięgu - sztywność spinowa  
zjawisko kolektywne  $10^{23}$

**zjawisko emergentne** - nowa jakość

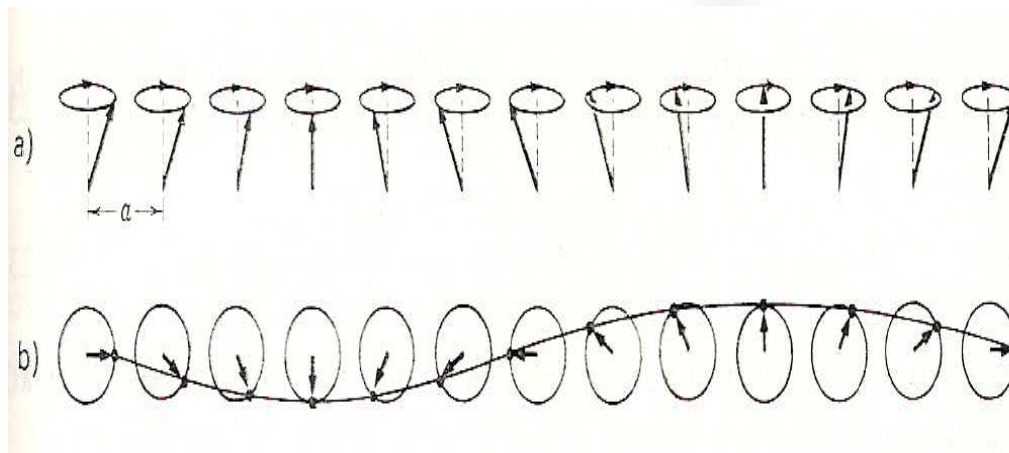
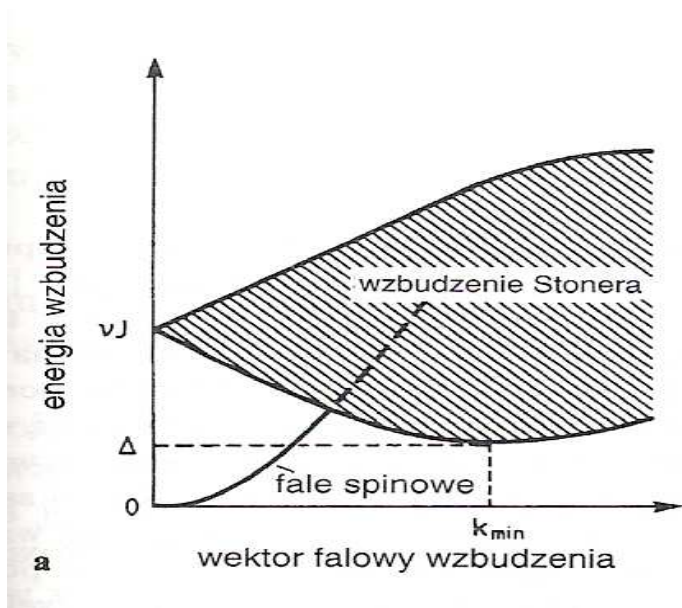
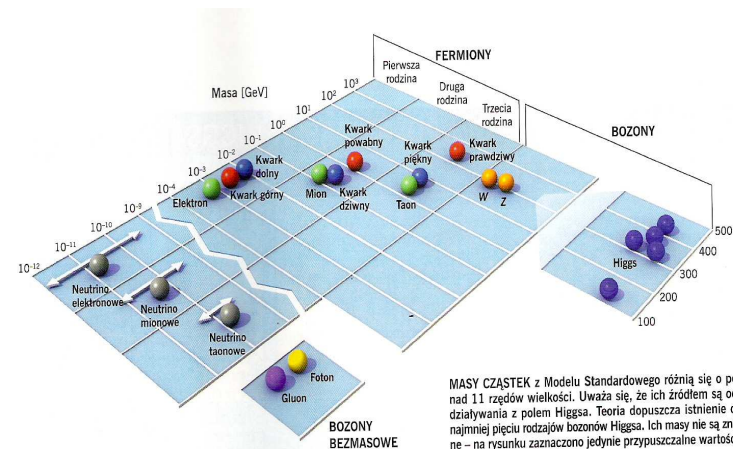


Jean Buridan (AD 1300 – 1350)  
S. Fubini, 1974<sup>1</sup>



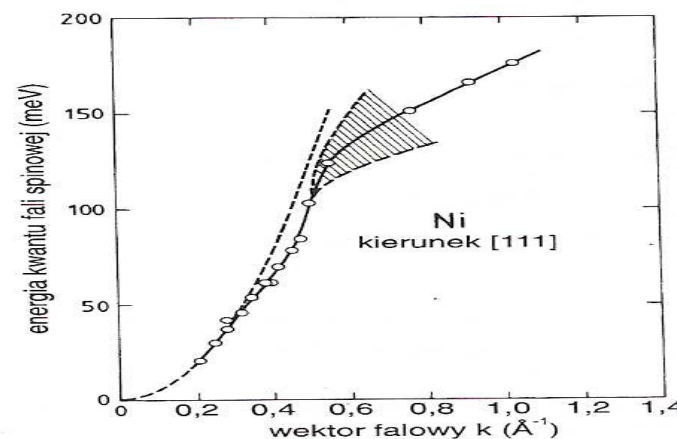
# Emergentne cząstki - magnony

elementarne wzbudzenia ferromagnetyka rozchodzą się w postaci **fal spinowych**, kwanty których nazywamy **magnonami**



$$i[H, \sigma_q^\dagger]|FM\rangle = \omega_q \sigma_q^\dagger|FM\rangle$$

$$\omega_q \sim q^2, \text{ w polu } \omega_q \sim q^2 + h - \text{mody Goldstone'a}$$



**zjawisko emergentne** - nowa jakość, nowe cząstki



# Mikroskopowy mechanizm

- oddziaływania elektrostatyczne

$$V(|r - r'|) = \frac{e^2}{|r - r'|}$$

- zasada wykluczania Pauliego

$$\Psi(r \uparrow, r' \uparrow) \rightarrow_{r \rightarrow r'} 0$$

wtedy  $\langle FM|V|FM\rangle$  jest mniejsze.

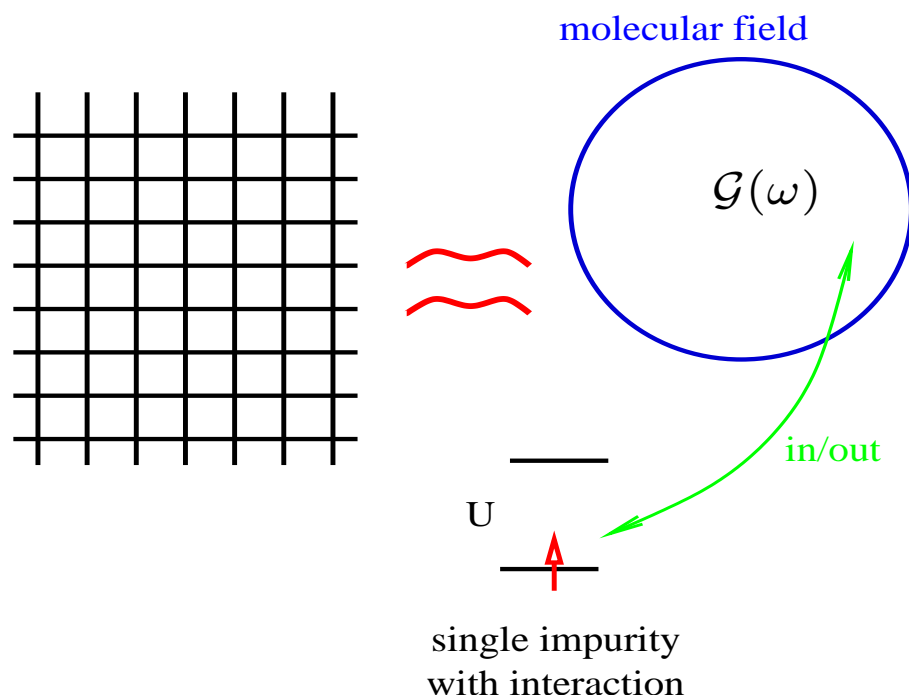
w pewnych warunkach układ wybiera równoległe ustawienie spinów aby zminimalizować swoją energię

# Materiałowe różnorodności

	metal	izolator
momenty wędrowne	Fe, Co, Ni, Gd (model Hubbard)	NiO, CoO, MnO Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , YTiO <sub>3</sub> , Lu <sub>2</sub> V <sub>2</sub> O <sub>7</sub> (izolatory Motta)
momenty zlokalizowane	Eu <sub>1-x</sub> Gd <sub>x</sub> S (model s-f)	EuO, EuS, EuTi, GdO (model Heisenberga)

# Dynamiczne średnie pole (1990')

Nierozwiązywany układ oddziałujących cząstek jest przybliżany pojedynczą cząstką oddziałującą z efektywnym polem



Pole molekularne Weiss'a  $\mathcal{G}(\omega)$  jest **dynamiczną** wielkością wyznaczaną w sposób samouzgodniony

Teoria ścisła w skończonej liczbie wymiarów

## Podsumowanie

# Magnetyzm

- zjawisko kwantowe
- zjawisko emergentne

*More is different* - P.W. Anderson, 1970'