

CRYSTAL STRUCTURE AND MAGNETIC PROPERTIES OF $RTSi_2$ COMPOUNDS (R – RARE EARTH, T – TRANSITION METAL)

Alina Gil

Institute of Technical Education, Pedagogical University
Al. Armii Krajowej 13/15, 42-200 Częstochowa

ABSTRACT

The ternary intermetallics containing rare earth have particularly intriguing magnetic properties.

In this work properties of $RTSi_2$ compounds are discussed (R – rare earth, T – transition metal).

Most of the $RTSi_2$ compounds crystallize in the orthorhombic $CeNiSi_2$ – type structure (space group $Cmcm$). Some of them crystallize in orthorhombic $TbFeSi_2$ and $YIrGe_2$ or monoclinic $NdRuSi_2$ – type structure, which are closely related to $CeNiSi_2$ structure.

They were found to display various types of magnetic ordering: ferromagnetic, collinear antiferromagnetic, sine wave modulated or helicoidal.

The magnetic properties of the $RTSi_2$ compounds are analyzed in terms of the RKKY theory and crystal electric field effect.

WSTĘP

Związki międzymetaliczne zawierające w swoim składzie ziemie rzadkie posiadają szczególnie interesujące własności magnetyczne.

W pracy tej omówione zostały własności związków $RTSi_2$ (R – ziemia rzadka, T – metal przejściowy).

Większość z nich krystalizuje w strukturze rombowej typu $CeNiSi_2$ (grupa przestrzenna $Cmcm$). Niektóre z nich krystalizują w strukturze rombowej typu

$TbFeSi_2$ i $YIrGe_2$ lub jednoskośnej typu $NdRuSi_2$, które są ściśle powiązane ze strukturą $CeNiSi_2$.

Związki te reprezentują różne typy uporządkowań magnetycznych: ferromagnetyczne, kolinearne antyferromagnetyczne, sinusoidalnie modulowane i helikoidalne.

Własności magnetyczne związków $RTSi_2$ były analizowane w oparciu o teorię RKKY i efekt pola krystalicznego (CEF).

STRUKTURA KRystaliczna

Związki międzymetaliczne typu $RTSi_2$, gdzie R – ziemia rzadka, T – metal przejściowy z grupy 3d, krystalizują w różnych typach rombów struktur. Tabela 1 przedstawia rozkład struktur krystalicznych tego typu związków.

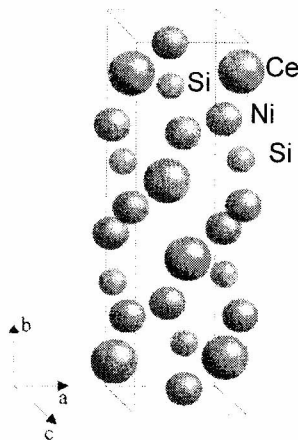
Większość z nich krystalizuje w strukturze typu $CeNiSi_2$ [1]. Rozkład atomów w komórce elementarnej opisuje grupa przestrzenna $Cmcm$ (rys. 1), w której wszystkie atomy tj. R, T, Si_1 i Si_2 zajmują pozycje 4(c) o następujących współrzędnych:

$(0, y, \frac{1}{4})$; $(0, -y, \frac{3}{4})$; $(\frac{1}{2}, \frac{1}{2} + y, \frac{1}{4})$; $(\frac{1}{2}, \frac{1}{2} - y, \frac{3}{4})$.

Tabela 1. Rozkład struktur krystalicznych dla poszczególnych związków typu $RTSi_2$

	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
Mn	●	●	●	●	●									
Fe	●	●	●	●										
Co		○		○	○		○	○	○	○	○	○	○	○
Ni	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Cu		○												
Ru		◇		◇										
Rh	○	○	○	○	○		○							
Pd		+												
Ir	○	○	○	○	○		○	○						
Pt		○												

○ $CeNiSi_2$ (rombowa $Cmcm$) ● $TbFeSi_2$ (rombowa $Cmcm$)
 + $YIrGe_2$ (rombowa $Immm$) ◇ $NdRuSi_2$ (jednoskośna $P21/m$)



Rysunek 1. Struktura krystaliczna typu $CeNiSi_2$

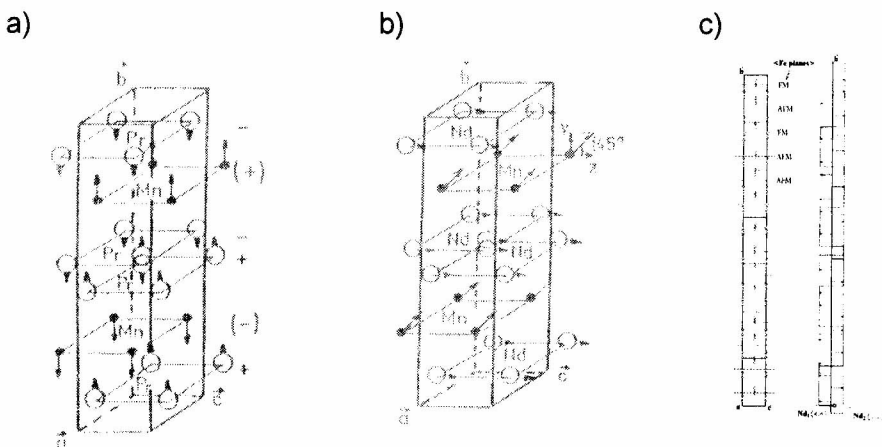
Związki RMnSi_2 ($R = \text{La} - \text{Nd}$) i RFeSi_2 ($R = \text{La} - \text{Sm}$) krystalizują w strukturze typu TbFeSi_2 [2], która jest również opisana grupą przestrzenną Cmcm z atomami w pozycjach 4(c). Struktura TbFeSi_2 jest bardzo podobna do struktury CeNiSi_2 , różnica polega jedynie na innej kolejności warstw z poszczególnymi atomami.

Związki $(\text{Ce}, \text{Nd})\text{RuSi}_2$ krystalizują w układzie jednoskośnym opisanym grupą przestrzenną $\text{P2}_1/\text{m}$ [3], będącym zdeformowaną strukturą typu CeNiSi_2 . Związek CePdSi_2 krystalizuje w strukturze typu YrGe_2 [4] (grupa przestrzenna Immm). Również ten typ struktury jest powiązany z CeNiSi_2 .

Własności magnetyczne

Związki RMnSi_2 ($R = \text{La} - \text{Sm}$) krystalizują w strukturze typu TbFeSi_2 . Podsić manganowa tych związków wykazuje uporządkowanie ferromagnetyczne. Temperatury Curie dla tych związków są od 386 K dla LaMnSi_2 do 464 K dla SmMnSi_2 . Pomiary namagnesowania w niskich temperaturach wykazują, że związki PrMnSi_2 i NdMnSi_2 mają dodatkowe przejście magnetyczne. PrMnSi_2 staje się antyferromagnetykiem ($T_N = 35$ K), podczas gdy w NdMnSi_2 poniżej $T_C = 40$ K obserwuje się wzrost namagnesowania [5]. Badania neutronograficzne wykonane w temperaturze 4.2 K pokazują, że struktura magnetyczna związku PrMnSi_2 składa się z ferromagnetycznie uporządkowanych momentów magnetycznych Pr ułożonych wzdłuż osi b w sekwencji (+ + - -) (rys. 2a), a momenty magnetyczne Mn są antyferromagnetycznie sprzężone z sąsiednimi warstwami Pr. Momenty magnetyczne są równoległe do osi b.

W związku NdMnSi_2 momenty magnetyczne neodymu i manganu tworzą strukturę ferromagnetyczną, przy czym moment podsić Nd jest równoległy do osi c, podczas gdy momenty magnetyczne w podsić Mn są odchyłone pod kątem 45° od kierunku osi c (rys. 2b).



Rysunek 2. Struktury magnetyczne związków: a) PrMnSi_2 , b) NdMnSi_2 , c) NdFeSi_2 [5, 6]

W związkach $RFeSi_2$ na atomach Fe nie obserwuje się zlokalizowanego momentu magnetycznego. Badania mössbauerowskie wykonane przy zastosowaniu izotopu ^{57}Fe w temperaturze 4.2 K pokazują jedynie występowanie nadsubtelnego pola transferu [6].

Pomiary podatności magnetycznej dla związków $LaFeSi_2$ i $CeFeSi_2$ wykazały, że nie zależy ona od temperatury [5]. $PrFeSi_2$ jest kolinearnym ferromagnetykiem ($T_C = 26$ K), a moment magnetyczny prazeodymu jest równoległy do osi b, podczas gdy w $NdFeSi_2$ obserwuje się modulowaną antyferromagnetyczną strukturę ($T_N = 6.5$ K), w której kierunek [010] odpowiada kierunkowi modulacji i momentu magnetycznego (rys. 2c).

Własności magnetyczne związków $RCoSi_2$ zostały określone w oparciu o wyniki pomiarów podatności magnetycznej w zakresie temperatur od 2 do 250 K [7] oraz pomiary neutronograficzne [8].

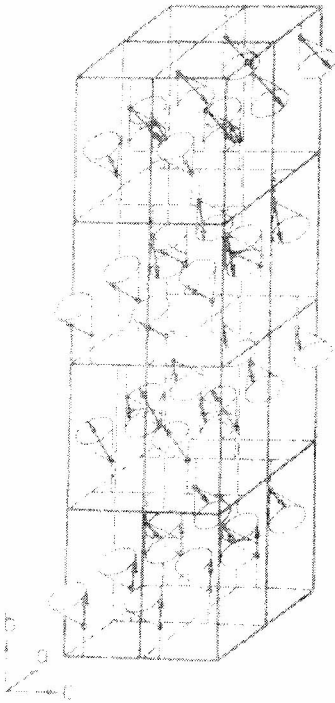
Wyniki badań magnetycznych pokazują, że związek z cerem jest paramagnetykiem Pauliego w całym zakresie temperatur, natomiast pozostałe związki z $R = Nd, Sm, Gd, Tb, Dy, Ho, Er$ oraz Tm wykazują uporządkowanie antyferromagnetyczne poniżej temperatury 20 K. Wartości efektywnych momentów magnetycznych w stanie paramagnetycznym są w dobrej zgodności z wartościami dla swobodnych jonów R^{3+} ziem rzadkich. Dla związków z ciężkimi ziemiami rzadkimi temperatura Néela nie spełnia skalowania de Gennes'a [9].

Badania neutronograficzne pokazały, że związki $HoCoSi_2$ i $DyCoSi_2$ mają strukturę antyferromagnetyczną typu G [10]. W $TbCoSi_2$ obserwowana jest spirala złożona (rys. 3a) [8]. Momenty magnetyczne atomów w pozycjach S_1 i S_3 tworzą jedną spiralę, a w pozycjach S_2 i S_4 drugą. Wartości momentów magnetycznych w temperaturze 4.2 K, zlokalizowanych na jonach R^{3+} w $(Dy, Ho)CoSi_2$ są mniejsze niż dla jonów swobodnych. Może to być związane z wpływem pola krystalicznego.

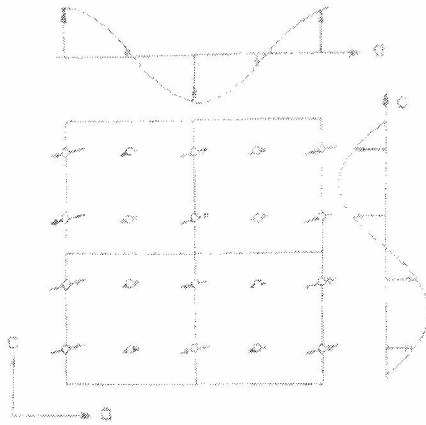
Z pomiarów podatności magnetycznej wynika, że związek $NdCoSi_2$ staje się antyferromagnetykiem poniżej temperatury 2.5 K. Pomiary neutronograficzne wykonane w Laboratoire Léon Brillouin [11] wskazują na uporządkowanie helokoidalne z okresem modulacji 0.1457 Å. Moment magnetyczny skierowany jest wzdłuż osi b, a temperatura Néela wynosi $T_N = 2.15$ K.

Jeszcze inną strukturę magnetyczną obserwuje się dla związku $ErCoSi_2$ [12]. Badania neutronograficzne wskazują na strukturę sinusoidalnie modulowaną (rys. 3b) z wektorem falowym $k = (0.467, 0, 0.5)$ poniżej temperatury $T_N = 2.6$ K. Określony moment magnetyczny leży w płaszczyźnie ac, a jego wartość jest znacznie zaniżona w porównaniu z wartością dla swobodnego jonu Er^{3+} . Również temperatura Néela jest mniejsza niż określona z badań magnetycznych ($T_N = 4.5$ K). Wszystko to wskazuje na duży wpływ pola krystalicznego.

a)



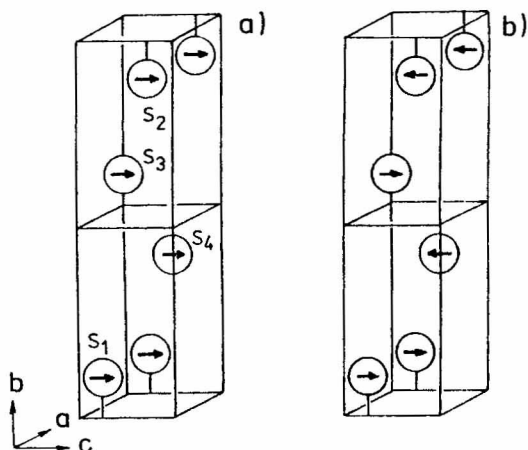
b)



Rysunek 3. Struktury magnetyczne związków: a) TbCoSi_2 [8], b) ErCoSi_2 [12]

Badania magnetyczne i neutronograficzne związków RNiSi_2 odkrywają szereg ciekawych własności magnetycznych tego typu związków.

Związki PrNiSi_2 i NdNiSi_2 posiadają kolinearną strukturę ferromagnetyczną F (rys. 4a) poniżej temperatur odpowiednio $T_C = 20 \text{ K}$ i 9.5 K [13, 15], natomiast związki z $R = \text{Sm, Gd, Tb, Dy, Ho, Er}$ są antyferromagnetykami w niskich temperaturach [14, 15]. Temperatura Néela zmienia się od 36.7 K dla TbNiSi_2 do 3.1 K dla ErNiSi_2 . Powyżej temperatury Néela podatność magnetyczna spełnia prawo Curie-Weissa, a wartości efektywnych momentów magnetycznych są zbliżone do wartości dla jonów swobodnych R^{3+} . Uporządkowanie magnetyczne jest typu G (+ - + -) (rys. 4b). Momenty magnetyczne ziem rzadkiej w płaszczyznach $z = \frac{1}{4}$ i $\frac{3}{4}$ są ze sobą sprzężone ferromagnetycznie, podczas gdy sprzężenie między płaszczyznami jest antyferromagnetyczne. We wszystkich związkach momenty są równoległe do osi c. Temperatury Néela nie spełniają skalowania de Gennes'a, a zachowanie to może być rozumiane na bazie teorii pola krystalicznego.



Rysunek 4. Struktury magnetyczne obserwowane w związkach RNiSi₂: a) ferromagnetyczna, b) antyferromagnetyczna

Późniejsze badania neutronograficzne związków RNiSi₂ (R = Ho, Dy, Er) wskazują na bardziej złożony charakter struktur magnetycznych:

W związku HoNiSi₂ [16] momenty magnetyczne Ho porządkują się antyferromagnetycznie wzdłuż osi c poniżej 10 K, lecz uporządkowanie jest typu C(+ - - +);

Dla DyNiSi₂ [17] poniżej temperatury $T_N = 24$ K zaobserwowano dwie fazy magnetyczne z trzema wektorami falowymi $k_1 = (0, 1/5, 0)$, $k_2 = (0, 1, 0) = 5k_1$ i $k_3 = (0, 0.6, 0) = 3k_1$;

W związku ErNiSi₂ [18] poniżej temperatury $T_N = 3.4$ K obserwuje się współistnienie dwóch faz magnetycznych związanych z wektorami falowymi $k_1 = (\frac{1}{2}, 0, 0)$ i $k_2 = (0.1262, 0.022, 0.2273)$, a moment magnetyczny Er zmienia się wzdłuż osi b.

Szczególne własności magnetyczne wykazują związki CeTSi₂, T = Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Rh, Ru, Pd, Ir, Pt), w których na skutek oddziaływania elektronów f ze stanami pasmowymi pojawiają się takie zjawiska jak mieszana wartościowość, efekt Kondo, ciężkie fermiony i in. Z tego względu stanowią one temat oddzielnej pracy [19].

PODSUMOWANIE

Wszystkie prezentowane w pracy związki mają podobną strukturę krystaliczną. Pod względem magnetycznym związki RTSi₂ charakteryzują się różnorodnością zachowań magnetycznych, za które odpowiedzialna jest głównie podsieć ziemi rzadkiej, natomiast atomy metali przejściowych z wyjątkiem manganu nie posiadają zlokalizowanego momentu magnetycznego. Przyczyn takiego zachowania się momentu magnetycznego należy doszukiwać się w strukturze elektronowej tych związków. W tabeli 2 zestawione są wyniki badań magnetycznych.

Tabela 2. Wyniki badań magnetycznych związków $RTSi_2$

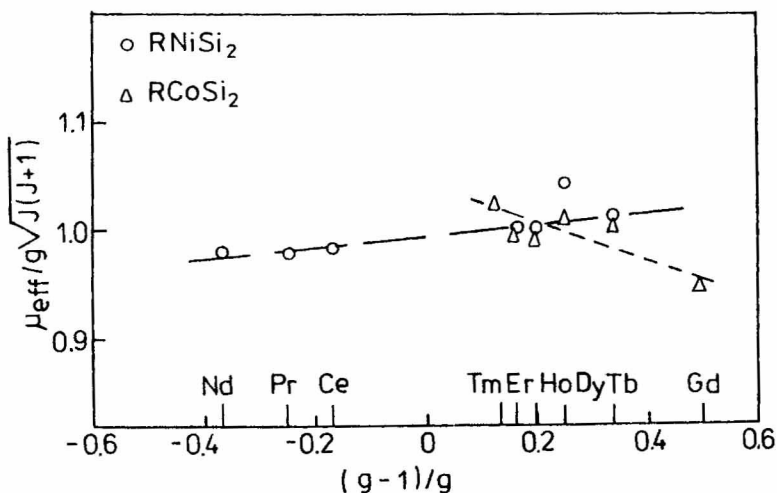
Związek	Struktura krystaliczna	TUM	$T_{N,C}$ [K]	μ_s [μ_B]	θ_p [K]	μ_{eff} [μ_B]	μ_{Mn} [μ_B]	Literatura
CeMnSi ₂	TbFeSi ₂	F	398	1.72	420	3.52	2.07	5
PrMnSi ₂	TbFeSi ₂	F, AF	434, 35	3.75	450	4.29	2.35	5
NdMnSi ₂	TbFeSi ₂	F	441	3.68	460	4.41	2.29	5
SmMnSi ₂	TbFeSi ₂	F	464	1.74	482	3.02		5
CeFeSi ₂	TbFeSi ₂	MW						5
PrFeSi ₂	TbFeSi ₂	F	26	2.05	44	3.5		5, 6
NdFeSi ₂	TbFeSi ₂	AF	6.5	2.22	41	3.6		5, 6
CeCoSi ₂	CeNiSi ₂	PP			-240	1.6		20
NdCoSi ₂	CeNiSi ₂	AF	2.5		-28	3.0		7
			2.15			2.18		11
SmCoSi ₂	CeNiSi ₂	AF	4					7
GdCoSi ₂	CeNiSi ₂	AF	7.5		-8	7.5		7
TbCoSi ₂	CeNiSi ₂	AF	18.5	8.62	-18	9.8		7, 8
DyCoSi ₂	CeNiSi ₂	AF	10.5	5.74	8	10.7		7, 8
HoCoSi ₂	CeNiSi ₂	AF	6.3	6.72	-6	10.5		7, 8
ErCoSi ₂	CeNiSi ₂	AF	4.5		-17	9.6		7
			2.6	4.63				12
TmCoSi ₂	CeNiSi ₂	AF	2.5		76	7.8		7
CeNiSi ₂	CeNiSi ₂	MW			-150	2.6		21
PrNiSi ₂	CeNiSi ₂	F	20	3.09	20	3.54		13
			22		19.1	3.5		15
NdNiSi ₂	CeNiSi ₂	F	9.5	2.38	8	3.57		13
			12		20.6	3.54		15
SmNiSi ₂	CeNiSi ₂	AF	9.8		-4	0.88		15
GdNiSi ₂	CeNiSi ₂	AF	21,	5.8*	-33	9.4		15, 22*
			19.3*					
TbNiSi ₂	CeNiSi ₂	AF	37.6,	8.4*	-17	9.84		15, 22*
			34*	8.7	-5	10.1		14
DyNiSi ₂	CeNiSi ₂	AF	25,	9.4*	-12	11.1		15, 22*
			23.5*	7.5	21	10.6		17
HoNiSi ₂	CeNiSi ₂	AF	10, 10*	9.3*	3	10.6		15, 22*
			10	8.13	3	11.05		16
ErNiSi ₂	CeNiSi ₂	AF	3.1		4	9.56		15
			3.4	7.6	20	10.11		18
CeCuSi ₂	CeNiSi ₂	K, HF			-47	2.5		23
CeRuSi ₂	NdRuSi ₂	K, FHF	10					24
CeRhSi ₂	CeNiSi ₂	MW						25
CePdSi ₂	YIrGe ₂	AF	6.8, 2.5	0.99	-50	2.88		26
CeIrSi ₂	CeNiSi ₂	MW						24
CePtSi ₂	CeNiSi ₂	K, HF			-17	2.56		27

Wartości efektywnych momentów magnetycznych dla poszczególnych związków są bliskie wartości dla swobodnego jonu R^{3+} , co oznacza, że atomy ziemi rzadkiej i manganu posiadają dobrze zlokalizowany moment magnetyczny i są odpowiedzialne za własności magnetyczne omawianych związków.

Niewielkie odchylenia, obserwowane między wartościami efektywnych momentów magnetycznych wyznaczonych eksperymentalnie, a wartościami teoretycznymi dla swobodnego jonu R^{3+} , mogą wynikać z silnego oddziaływania elektronów przewodnictwa ze zlokalizowanym momentem ziemi rzadkiej. W izotropowym modelu RKKY [9] zależność między wielkością doświadczalną i teoretyczną momentu magnetycznego (dla jonu swobodnego) wyraża się wzorem:

$$\mu_{\text{eff}}/g\sqrt{J(J+1)} = 1 + 2J_{\text{sf}}N(E_F)(g-1)/g$$

gdzie J_{sf} jest całką wymiany oddziaływania s-f, $N(E_F)$ – gęstością stanów elektronowych na powierzchni Fermiego. Zależność ta pozwala w oparciu o dane doświadczalne wyznaczyć wartość iloczynu $J_{\text{sf}}N(E_F)$. Dla niektórych związków $RTSi_2$ zależności te przedstawione są na rys. 5. Otrzymane wartości $J_{\text{sf}}N(E_F)$ są następujące: +0.018 dla $RNiSi_2$ i -0.105 dla $RCoSi_2$.



Rysunek 5. Stosunek efektywnego momentu magnetycznego wyznaczonego eksperymentalnie i momentu dla swobodnego jonu R^{3+} w funkcji parametru $(g-1)/g$ dla związków $RTSi_2$ ($T = Ni, Co$)

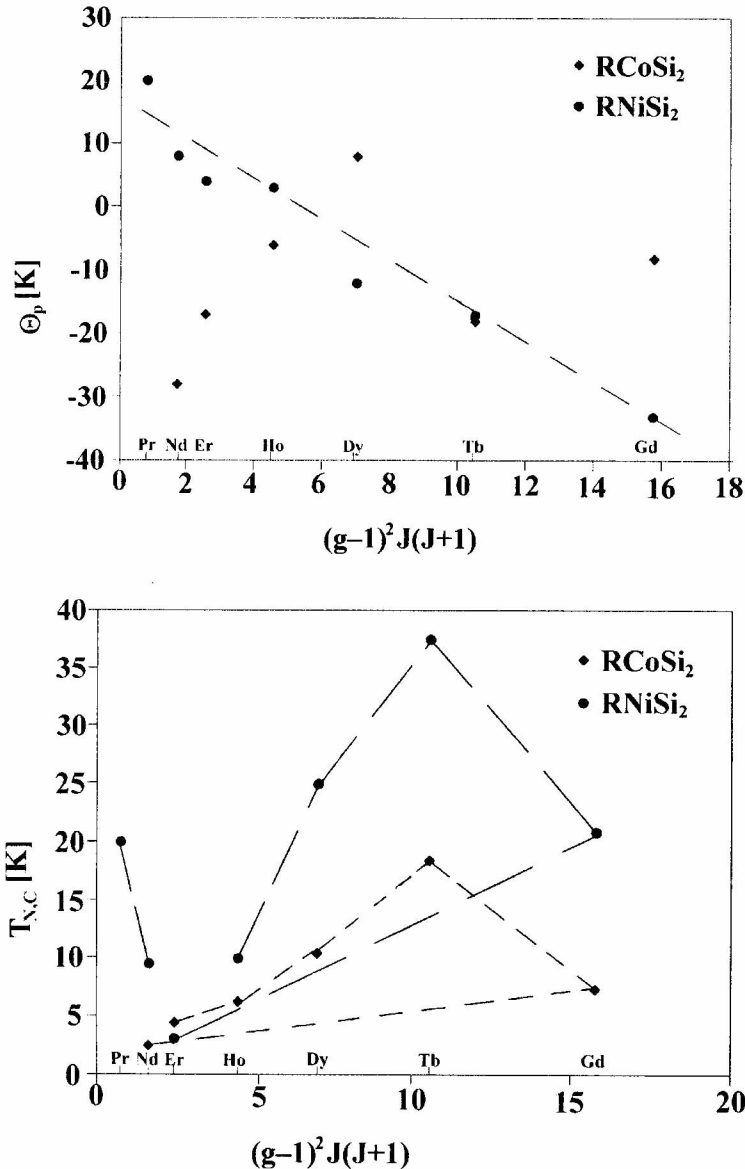
W przypadku momentów magnetycznych wyznaczonych w stanie uporządkowanym obserwuje się wyraźne zaniżenie momentu w porównaniu z wartością teoretyczną gJ , co często jest przypisywane efektowi pola krystalicznego.

W związkach międzymetalicznych omawianych w tej pracy moment ziemi rzadkiej określa właściwości magnetyczne, a ponieważ odległości między warstwami ziem rzadkich są większe niż 4 \AA , wyklucza się bezpośrednie oddziaływanie. W takim przypadku oddziaływanie magnetyczne pomiędzy silnie zlokalizowanymi elektronami 4f może być realizowane za pośrednictwem elektronów przewodnictwa (opisane modelem RKKY) lub efektu pola krystalicznego (CEF).

Według teorii RKKY, paramagnetyczna temperatura Curie θ_p oraz temperatury uporządkowań magnetycznych T_N lub T_C są proporcjonalne do funkcji de Gennes'a [9]:

$$G = (g - 1)^2 J(J + 1).$$

W związkach $RTSi_2$ temperatury uporządkowania magnetycznego T_N lub T_C oraz paramagnetyczna temperatura Curie θ_p dla związków $RCoSi_2$ nie spełniają skalowania de Gennes'a (rys. 6).



Rysunek 6. Zależność paramagnetycznych temperatur Curie (a) i temperatur Néela (b) od funkcji de Gennes'a dla związków $RTSi_2$

W odniesieniu do skalowania de Gennes'a T_N powinna osiągnąć maksimum dla związków z gadolinem. Przesunięcie maksimum T_N w stronę ciężkich ziem rzadkich może być spowodowane wpływem pola krystalicznego [28]. W takim przypadku człon pola krystalicznego powinien być dodany do hamiltonianu oddziaływania.

Związki $RTSi_2$ mają strukturę krystaliczną o niskiej rombowej symetrii (grupa przestrzenna Cmcm). Atomy ziemi rzadkiej zajmują pozycje 4(c) o symetrii punktowej mm. Odpowiadający hamiltonian będzie miał złożoną postać. Do chwili obecnej nie przeprowadzono badań, które pozwoliłyby na wyznaczenie wartości parametrów pola krystalicznego dla tych związków.

LITERATURA

- [1] O.I. Bodak, E.I. Gladyshevskii, *Sov. Phys. Cryst.*, 14 (1970) 859.
- [2] V.I. Yarovetz, Y.K. Gorolenko, *Vestn. Lvov. Univ. Ser. Khim.*, 23 (1981) 20.
- [3] K. Cenzual, R.R. Gladyshevsky, E. Parthe, *Acta Crystallogr.*, C48 (1992) 225.
- [4] M. Francois, G. Venturini, E. McRae, B. Malaman, B. Roques, *J. Less-Com. Met.*, 128 (1987) 249.
- [5] G. Venturini, B. Malaman, M. Meot-Meyer, D. Fruchart, G. le Caer, D. Malterre, B. Roques, *Revue de Chimie Minerale* 23 (1986) 162.
- [6] B. Malaman, G. Venturini, G. LeCaër, L. Pontonnier, D. Fruchart, K. Tomala, J.P. Sanchez, *Phys. Rev. B* 41 (1990b) 4700.
- [7] M. Pellizzione, H.F. Braun, J. Muller, *J. Magn. Mater.* 30 (1982) 33.
- [8] A. Szytuła, H. Ptasiwicz-Bąk, J. Leciejewicz, W. Bażela, *J. Magn. Mater.*, 80 (1989) 189.
- [9] P.G. de Gennes, *J. Phys. Radium* 23 (1962) 510, 630.
- [10] E.F. Bertaut, *Acta Crystallogr. A* 24 (1968) 217.
- [11] G. André, A. Oleś, A. Szytuła, *Phys. Stat. Solidi (a)* 116, K29 (1989).
- [12] G. André, F. Bourée, A. Oleś, W. Sikora, M. Kolenda, A. Szytuła, *J. Magn. Mater.* 124 (1993) 69.
- [13] P. Schobinger-Papamantellos, K.H.J. Buschow, *J. Alloys Comp.*, 185 (1992) 51.
- [14] P. Schobinger-Papamantellos, K.H.J. Buschow, *J. Less-Com. Met.*, 171 (1991) 321.
- [15] A. Gil, A. Szytuła, Z. Tomkowicz, K. Wojciechowski and A. Zygmunt, *J. Magn. Mater.* 129 (1994) 271.
- [16] P. Schobinger-Papamantellos, F. Fauth, K.H.J. Buschow, *J. Less-Com. Met.*, 252 (1997) 50.
- [17] P. Schobinger-Papamantellos, C. Ritter, K.H.J. Buschow, *J. Less-Com. Met.*, 264 (1998) 89.
- [18] P. Schobinger-Papamantellos, K.H.J. Buschow, C. Wilkinson, F. Fauth, C. Ritter, *J. Less-Com. Met.*, 189 (1998) 214.

- [19] A. Gil „Własności magnetyczne związków CeT_xX_2 ”, Prace Naukowe WSP w Częstochowie, Wychowanie Techniczne 5, Częstochowa 2002, s. 7-22.
- [20] O.I. Bodak, E.I. Gladyshevski, E.M. Levin, R.V. Lutsiv, Dopov. Akad. Nauk Ukr. RSR, Ser. A12 (1977) 1129.
- [21] V.K. Pecharsky, K.A. Gschneider, Jr., L.L. Miller, Phys. Rev. B vol. 43, no 10 (1991) 10906.
- [22] V. Ivanov, L. Vinokurova, A. Szytuła, J. Alloys Comp., 218 (1995) L24.
- [23] W.H. Lee, R.N. Shelton, Solid State Comm., 68 (1988) 443.
- [24] V.N. Nikiforov, V. Kovačik, I.O. Grishchenko, A.A. Velikhovski, J. Mirkovič, B.I. Shapiev, O.I. Bodak, Yu.D. Seropegin, Physica B 186 – 188 (1993) 514.
- [25] B. Chevalier, P. Rogl, K. Hiebl, J. Etourneau, J. Solid State Chem., 107 (1993) 327.
- [26] D.T. Adroja, B.D. Rainford, Physica B 230-232 (1997) 762.
- [27] W.H. Lee, K.S. Kwan, P. Klavins, R.N. Shelton, Phys. Rev. B vol. 42, no 10 (1990) 6542.
- [28] D.R. Noakes and G.K. Shenoy, Phys. Lett. A91 (1982) 35.