

## University of Groningen

### s-f Interaction in metals

Vertogen, Gerrit

**IMPORTANT NOTE: You are advised to consult the publisher's version (publisher's PDF) if you wish to cite from it. Please check the document version below.**

*Document Version*

Publisher's PDF, also known as Version of record

*Publication date:*

1968

[Link to publication in University of Groningen/UMCG research database](#)

*Citation for published version (APA):*

Vertogen, G. (1968). *s-f Interaction in metals*. s.n.

**Copyright**

Other than for strictly personal use, it is not permitted to download or to forward/distribute the text or part of it without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license (like Creative Commons).

The publication may also be distributed here under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license. More information can be found on the University of Groningen website: <https://www.rug.nl/library/open-access/self-archiving-pure/taverne-amendment>.

**Take-down policy**

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

*Downloaded from the University of Groningen/UMCG research database (Pure): <http://www.rug.nl/research/portal>. For technical reasons the number of authors shown on this cover page is limited to 10 maximum.*

## Summary

The s-d or s-f interaction between conduction electrons and ionic spins has been and still is subject of many studies.

The importance of this interaction lies in the fact that, at least in principle, it can explain the resistivity and magnetic properties of dilute alloys and of the heavy rare-earth metals.

In this thesis the following topics concerning the s-f interaction are considered:

- 1) the influence of a helicoidal state of the ionic spin system on the conduction electrons;
- 2) the influence of higher order terms in the perturbation expansion on the indirect interaction between the ionic spins via the conduction electrons;
- 3) the ground state of a system of conduction electrons interacting with an ionic spin via the s-f interaction in terms of an exactly soluble model.

The first topic is considered in Chapter II. The results show that in general depolarization will occur.

Also, an alternative approach to the depolarization is given based on a first order perturbation theory.

In view of the analysis presented in Chapter II two questions arise.

First, is it a consistent procedure to determine the magnetic structure in terms of an indirect interaction via the conduction electrons and afterwards calculate the eigenfunctions of the conduction electrons in the resulting magnetic structure ?

Secondly, does the Spin Hamiltonian formalism also hold for an electron gas, where a great number of excited states exists close to the ground state ?

For these two reasons the indirect interaction between the ionic spins was analyzed in more detail.

The results of this analysis presented in the Chapters III and IV clearly show that one runs into troubles, if one neglects the correlation between the conduction electrons and the states of the ionic spin system.

The difficulties are due to the dynamical character of the s-f interaction.

The properties of the angular momentum operators are responsible for the divergency, which appears at the Fermi surface, as clearly demonstrated by using the Goldstone-Hugenholtz diagrammatic analysis.

In Chapter V a method is presented to avoid the divergencies which appear at the Fermi surface, in the case of a ferromagnetic s-f interaction.

This method discusses the problem in terms of the Zener theory and the Rayleigh-Schrödinger perturbation theory. Zener's ideas are used by minimizing the first order correction both to the polarization degree of the free electron gas and to the mutual orientations of the ionic spins.

The state obtained in this way is used as a zeroth order approximation of the true one.

Perturbation theory is now applied to this state.

In this way no terms appear which diverge at the Fermi surface.

An energy up to second order in the exchange coupling constant  $J$  is obtained, which is lower than the R.K.K.Y. result for a ferromagnetic spin system.

Also, no corrections to the magnetization of the ionic spinsystem appear up to first order in  $J$ .

Finally, an exactly soluble model is presented in Chapter VI.

This model shows a bound state both for ferromagnetic and antiferromagnetic s-f interaction.

Among other things, this model leads to the interesting conclusion that one should not expect a B.C.S. type ground state in the case of the full Hamiltonian as proposed, for instance, by Yosida.

## Samenvatting

De s-d of s-f wisselwerking tussen geleidingsselectronen en ionenspins is een onderwerp dat sterk in de belangstelling staat.

De belangstelling hiervoor vindt zijn oorzaak in het feit dat - tenminste in principe - de weerstand en de magnetische eigenschappen van verdunde legeringen en de zware zeldzame aardmetalen verklaard kunnen worden met behulp van deze wisselwerking.

In dit proefschrift zijn de hierna volgende onderwerpen, die betrekking hebben op s-f wisselwerking, behandeld:

- 1) de invloed van een spiraalvormige structuur van het systeem van ionenspins op de geleidingsselectronen;
- 2) de invloed van hogere orde termen uit de storingsontwikkeling op de indirecte wisselwerking tussen de ionenspins via de geleidingsselectronen;
- 3) de grondtoestand van een systeem van geleidingsselectronen, dat in s-f wisselwerking staat met een ionenspin met behulp van een exact oplosbaar model.

Het eerste onderwerp is behandeld in hoofdstuk II. De hier gevonden resultaten tonen aan, dat er in het algemeen depolarisatie zal plaatsvinden.

In dit hoofdstuk is de depolarisatie eveneens behandeld door toepassing van eerste orde storingstheorie.

De analyse van hoofdstuk II doet twee vragen rijzen:

- 1) is de gevolgde procedure wel consistent om eerst de magnetische structuur te bepalen uitgaande van een indirecte wisselwerking via de geleidingsselectronen en vervolgens de eigenfuncties van de geleidingsselectronen te berekenen in de resulterende magnetische structuur van het systeem van ionenspins;
- 2) kan het spin Hamiltoniaan formalisme wel worden toegepast op een electronengas, dat immers een groot aantal aangeslagen toestanden bezit, welke vlak bij de grondtoestand liggen ?

Om beide redenen werd de indirecte wisselwerking tussen de ionenspins meer gedetailleerd onderzocht.

De resultaten van deze analyse, weergegeven in de hoofdstukken III en IV, laten duidelijk zien dat er moeilijkheden gaan optreden, indien de correlatie tussen de geleidingsselectronen en de toestand van het systeem van ionenspins niet in aanmerking genomen wordt.

Deze moeilijkheden zijn een direct gevolg van het dynamische karakter van de s-f wisselwerking.

De eigenschappen van de operatoren, die de draaiimpuls beschrijven, zijn verantwoordelijk voor de aan het Fermi oppervlak optredende divergentie, zoals duidelijk aangetoond wordt door gebruik te maken van de diagrammatische analyse van Goldstone en Hugenholtz.

In hoofdstuk V is een methode beschreven om, in geval van een ferromagnetische s-f wisselwerking, de aan het Fermi oppervlak optredende divergenties te vermijden.

Deze methode behandelt het probleem door de Zener theorie en de Rayleigh-Schrödinger storingstheorie te combineren. De ideeën van Zener zijn gebruikt door de eerste orde correctie zowel naar de polarisatiegraad van het vrije electronengas als naar de onderlinge orientaties van de ionenspins te minimaliseren.

De aldus verkregen toestand wordt nu opgevat als een nulde orde benadering van de werkelijke grondtoestand.

De storingstheorie wordt nu toegepast op de door minimalisatie verkregen toestand.

Op deze wijze krijgt men geen termen, die aan het Fermi oppervlak divergeren. Tevens werd een energie tot op tweede orde in de koppelingsconstante  $J$  verkregen, die lager is dan het R.K.K.Y. resultaat voor een ferromagnetisch systeem, terwijl geen correcties tot op eerste orde in  $J$  optreden wat de magnetisatie van het systeem van ionenspins betreft.

Tot slot is in hoofdstuk VI een exact oplosbaar model beschreven.

Dit model laat zien dat er zowel in het geval van een ferro- als antiferromagnetische s-f wisselwerking een gebonden toestand verschijnt.

Een zeer interessante conclusie is verder, dat in het geval van de volledige Hamiltoniaan geen grondtoestand van het B.C.S. type te verwachten valt, dit in tegenstelling tot de opinie van b.v. Yosida.