



HAL
open science

Les propriétés à basses températures des alliages des métaux “ normaux ” avec des solutés de transition

G.J. van den Berg, J. de Nobel

► **To cite this version:**

G.J. van den Berg, J. de Nobel. Les propriétés à basses températures des alliages des métaux “ normaux ” avec des solutés de transition. Journal de Physique et le Radium, 1962, 23 (10), pp.665-671. 10.1051/jphysrad:019620023010066500 . jpa-00236659

HAL Id: jpa-00236659

<https://hal.science/jpa-00236659>

Submitted on 4 Feb 2008

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

LES PROPRIÉTÉS A BASSES TEMPÉRATURES DES ALLIAGES DES MÉTAUX « NORMAUX » AVEC DES SOLUTÉS DE TRANSITION

Par G. J. VAN DEN BERG et J. DE NOBEL,
Kamerlingh Onnes Laboratorium, Leiden

Résumé. — Exposé général sur les anomalies observées aux basses températures dans les propriétés de ces alliages. Il s'agit de la résistance électrique, de l'influence d'un champ magnétique sur les résistances électriques et thermiques, de l'effet Hall, ainsi que de la thermoélectricité et de la chaleur spécifique. Le pouvoir thermoélectrique peut excéder les valeurs usuelles de quelques ordres de grandeur, tandis que les anomalies de la chaleur spécifique indiquent la présence d'une entropie magnétique due aux solutés de transition.

On présentera une confrontation provisoire entre les résultats de l'expérience et ceux des théories.

Abstract. — The low temperature anomalies of the resistivity, the electrical and thermal magnetoresistance, the Hall effect, the thermoelectric power and the specific heats in dilute alloys of transition elements in normal metals are reviewed. In particular the thermoelectric power may become larger than in the pure metals by several order of magnitude. The specific heat anomalies display the magnetic entropy due to the spin of the solutes. A tentative comparison between theory and experiment is presented.

Sans parler des expériences sur la résistance électrique des métaux « purs », pendant lesquelles un minimum fut découvert pour quelques métaux dans la courbe de la résistance électrique en fonction de la température [1], les recherches détaillées sur les diverses propriétés des alliages des métaux « normaux » avec des solutés de transition ont été ouvertes par Gerritsen et Linde en 1949. Ces auteurs [2] publiaient en 1951 leurs résultats de mesures de la résistance d'alliages dilués de Mn dans l'Ag. Non seulement un minimum, mais aussi un maximum étaient déterminés pour quelques concentrations aux basses températures. Les auteurs mentionnés supposaient une interaction *s-d-s* des électrons de conduction de la matrice avec les ions de manganèse possédant une couche *d* partiellement remplie. Ceci les conduisit à des mesures dans un champ magnétique [3], parce que ce champ pourrait avoir une grande influence à cause de la séparation du niveau *3d*. Les résultats furent les suivants : à 4 °K et dans un champ magnétique de 20 kOe les fils avec des concentrations de Mn plus petites de 0,04 % atomique montraient une variation positive et avec des concentrations plus grandes de 0,04 % atomique une variation négative. Une telle variation avait été trouvée déjà en 1941 par Nakhimovitch [4] pour le Au-Fe.

Les recherches furent étendues aux alliages dilués de Cr, Mn, Fe, Co, et Ni [5] dans Cu, Ag et Au, tant que la solubilité le permit. Pour Mn, Cr, et Fe [6] comme impureté dans l'or un maximum et un minimum furent mesurés pour une concentration d'environ 0,1 % atomique en même temps avec une diminution de la résistance dans un champ magnétique. Le cas fut le même pour du Mn dans le Cu [5, 7] mais pas pour du Fe [8] dans ce

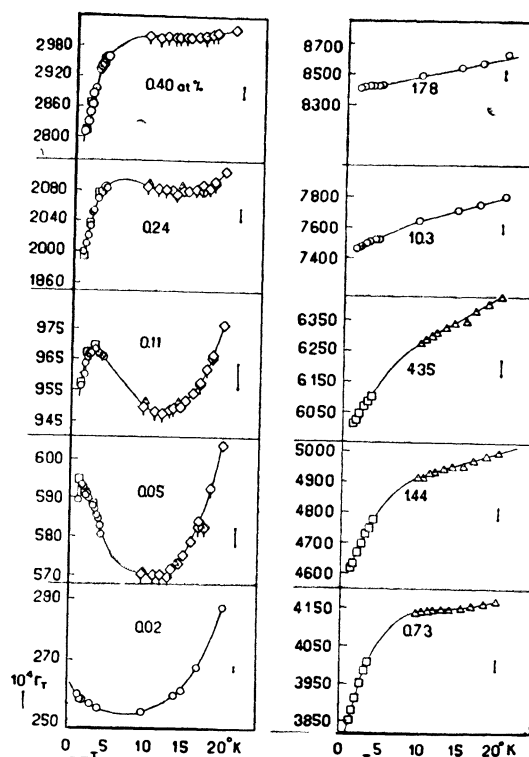


Fig. 1. — La variation de la résistivité (exprimée par le rapport $R_T/R_{273} = r_T$) avec la température de la mesure des alliages dilués Ag-Mn. La teneur est indiquée pour chaque courbe. Voyez [2].

métal. Le minimum dans les courbes des autres alliages n'est pas si sûr quant à la cause (voyez ci-dessous).

Après cette introduction historique les auteurs exposeront, pour abrégé, la situation récente con-

cernant l'anomalie de la courbe $R - T$, dans un champ magnétique ou non. Un métal normal comme impureté ne cause pas une anomalie dans la courbe $R - T$ [9], les anomalies trouvées dans quelques cas sont dues à des métaux de transition. Des mesures de la résistance de Cu-Sn, de Cu-Fe et de Cu-Sn-Fe par Knook c. s. l'ont montré directement [11]. De ces expériences on peut calculer la concentration du Fe dans ces alliages de Cu-Sn, qui ont un minimum pour la courbe $R - T$. D'une autre manière, indirectement, Gold c. s. [12] pouvaient démontrer la présence du fer par la mesure du pouvoir thermoélectrique d'un alliage Cu-Sn, dont la résistance montrait un minimum à basse température [12]. Cr, Mn et Fe excepté, il n'est pas sûr que les autres métaux de la première série de transition causent une anomalie. Cependant Linde [13] trouva une température anormalement haute pour le minimum de V dans l'or. Co cause dans Cu seulement un minimum à une concentration relativement grande [14]. Également ici Fe peut jouer un rôle. Ni ne cause pas d'anomalies dans Cu et Au ; de même peut être pour Co dans Au [5, 15].

Avant de passer à la deuxième série de métaux

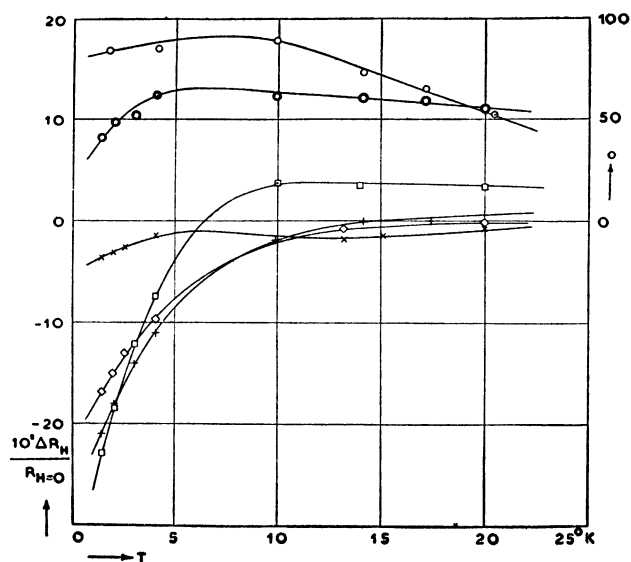


FIG. 2. — La variation de la magnéto-résistance de Ag-Mn avec la température dans un champ magnétique de 20 kOe. La teneur c en % atomique. Voyez [3].

○ $c = 0$ □ $c = 0,05$ ◇ $c = 0,24$
 ○ $c = 0,02$ + $c = 0,15^5$ × $c = 0,61$

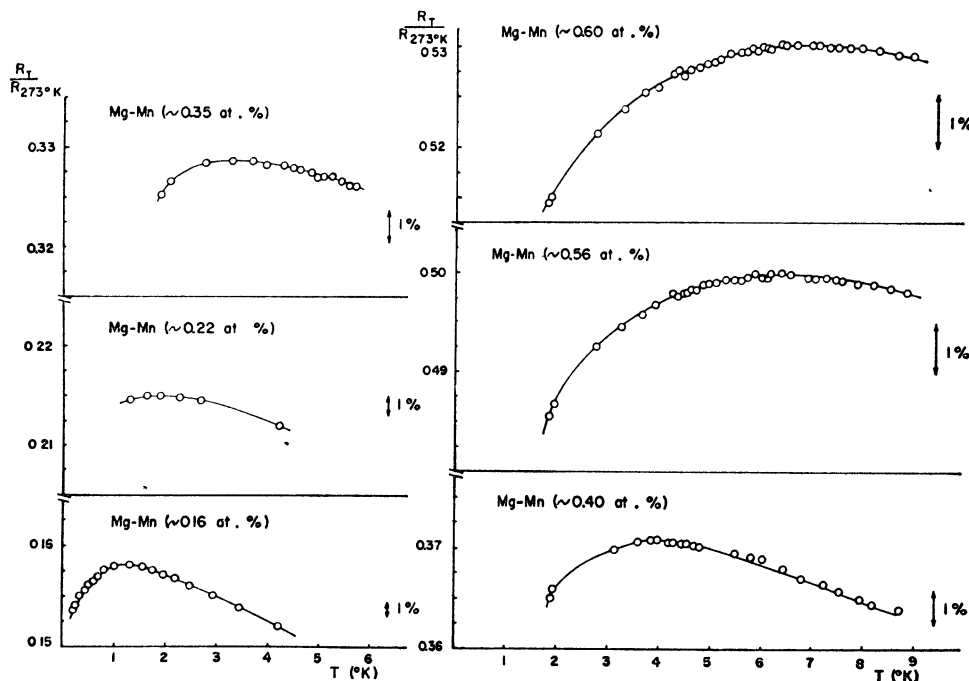


FIG. 3. — La variation de la résistivité avec la température d'après les mesures sur de nombreux alliages Mg-Mn. Voyez [18].

de transition, les auteurs veulent mentionner les résultats des expériences concernant des alliages de Mn et Cr dans Zn [16, 17] et de Mn dans Al, Mg [18] et Cd [17]. Les alliages de Mn dans Zn [16] ont un minimum dans la courbe R vs T ; selon quelques mesures la concentration 0,12 % at. Mn

pourrait avoir non seulement un minimum mais aussi un maximum [16]. D'autres auteurs ne trouvaient pas de maximum au-dessus de 1,8 °K pour toutes les concentrations possibles [17]. Les alliages de Cr dans Zn montraient une résistance électrique croissante à température décroissante [16]. Des

alliages de Sn dans le Zn, préparés d'une même manière par les mêmes auteurs, se comportaient normalement. La résistance à 4,2 °K de Zn-Mn 0,12 % atomique décroît dans un champ magnétique croissant jusqu'à 30 kOe et puis aug-

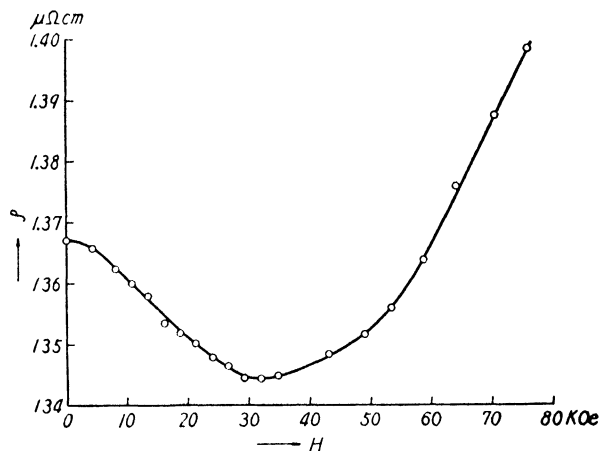


Fig. 4. — La résistance spécifique en fonction du champ magnétique d'un alliage Zn-Mn 0,12 % atomique à une température de 4,24 °K. Voyez [16].

mente [16]. Pour un alliage Cu-Mn 5,4 % atomique la magnéto-résistance reste négative jusqu'à un champ de 76 kOe en montrant de l'hystérésis. La magnéto-résistance pour l'alliage Zn-Cr 0,10 % at. reste positive à 4,24 °K dans un champ magnétique jusqu'à 76 kOe. Des alliages de Mn et de Fe dans Al [18] se comportent normalement à basses

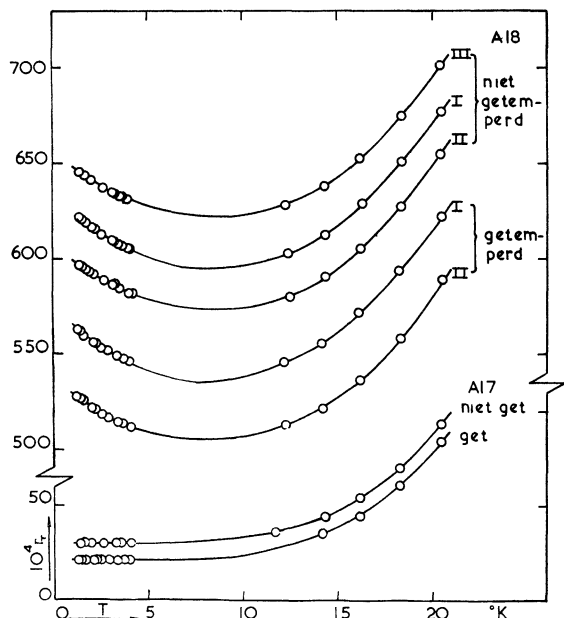


Fig. 5. — La variation de la résistivité $\rho_T = R_T/R_{273}$ avec la température d'après les mesures sur un alliage Au-Mo (A18) et du métal de base Au (A17). L'effet d'un recuit est indiqué. Les courbes supérieures I, II et III concernant les fils pas recuits. Voyez [11].

températures pendant que les alliages de Mn dans le Mg sont comparables à ceux dans Ag, Au et Cu. Pour 0,60 % at. Mn dans le Mg un maximum paraît à une température d'environ 6 °K [18]. Ici il est possible de déterminer la courbe R vs T jusqu'à quelques degrés au-dessous de cette température. Une courbe horizontale, mesurée au-dessous de 0,5 °K ne fut pas publiée jusqu'à maintenant. Pour des concentrations plus petites que 0,04 % at. de Mn les courbes $R - T$ montrent seulement un minimum au-dessus de 2 °K. Une expérience très récente concernant du Cd pur et un alliage Cd-Mn 5 % atomique avait resp. comme résultat une courbe $R - T$ normale et une courbe avec un minimum à 4,5 °K environ [17].

Quant à la deuxième série, des mesures ont été exécutées sur les alliages dilués suivants : Au-Pd, Ag-Pd, Cu-Pd, Au-Rh, Cu-Rh, Cu-Ru [11], Au-Mo [19]. Seulement dans l'alliage Au-Mo la

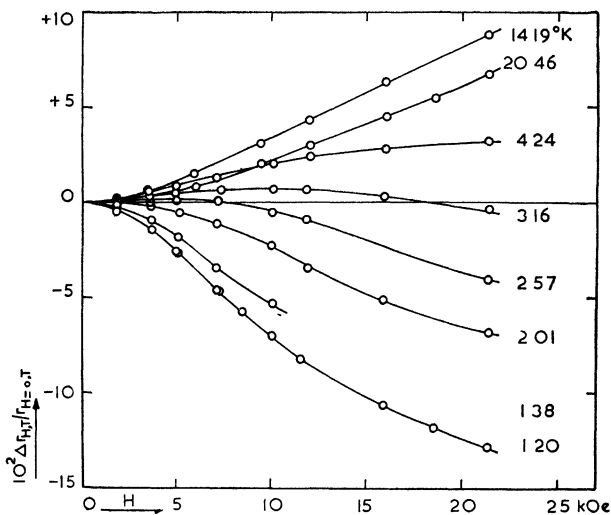


Fig. 6. — La magnéto-résistance de Au-Mo (A18 I dans la figure 5) en fonction du champ magnétique à diverses températures. Voyez [11].

résistance et la magnéto-résistance étaient anormales [11, 19]. De la troisième série les alliages Au-Ta, Au-Ir, Au-Os et Au-Re furent examinés [11]. Un minimum dans la courbe $R - T$ fut observé pour Au-Os et Au-Re. Résumant, on peut déclarer que les plus grands effets anormaux sont causés par les métaux de transition avec le plus grand nombre d'électrons dépareillés dans une couche d (Cr : $3d^5 4s$; Mn : $3d^5 4s^2$; Fe : $3d^6 4s^2$; Mo : $4d^5 5s$; Os : $5d^6 6s^2$ et Re : $5d^5 6s^2$).

Pouvoir thermoélectrique. — En 1957 les premières mesures ont été publiées sur le pouvoir thermoélectrique (P. T.) des alliages Ag-Mn 0,01-0,49 % atomique [20]. Il parut de nouveau [21] que le P. T. dû à un métal de transition est plus de cent à mille fois plus grand que celui correspondant

à la théorie de Sommerfeld [22]. En fonction de la concentration le P. T. à 3 °K montrait une très grande valeur négative de quelques $\mu\text{V}/^\circ\text{K}$ à une concentration, qui dépendait du traitement thermique. Cependant pour des concentrations plus de 0,3 % at. le P. T. deviendrait de nouveau positif. Des recherches japonaises montraient pour le Cu-Mn une valeur positive au-dessous de 20 °K pour des concentrations entre 0,03 et 5,4 % atomique. En 1955 déjà MacDonald et Pearson [23] essayèrent de trouver une relation entre le P. T. anormal et le minimum dans la courbe R vs T d'alliages dilués de Fe aussi bien que de métaux du groupe B (Sn, Ga, Ge, In) dans le Cu. Dans ces derniers alliages, selon e. a. De Vroomen [24] le Fe serait la cause du comportement anormal. En 1960, Gold c. s. [12] vérifièrent cela distinctement par les

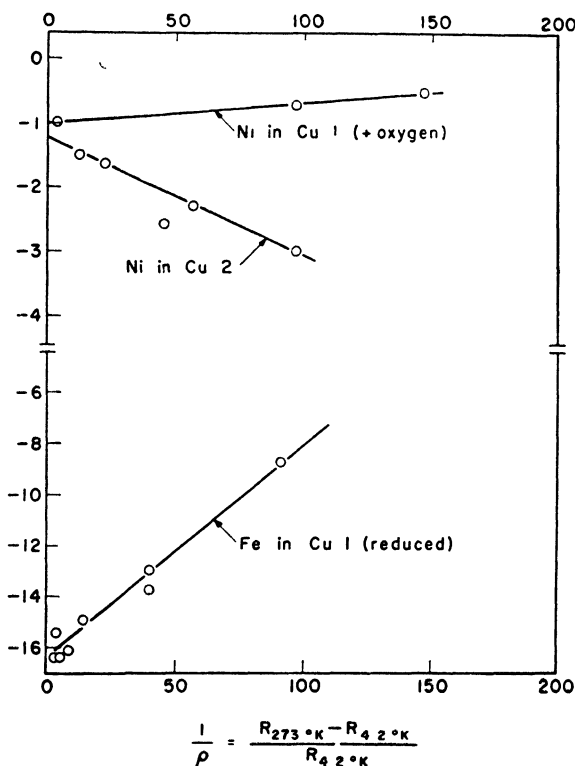


FIG. 7. — La variation du pouvoir thermoélectrique (P. T.) à 15 °K avec l'inverse de la résistance résiduelle pour les alliages dilués Cu-Ni et Cu-Fe. Voyez [12].

mesures du P. T. Admettant que le Fe, qui était lié à l'oxygène dans le Cu, est libéré par les métaux du groupe B, on pouvait interpréter mieux les courbes du P. T. en fonction de la concentration.

Puisqu'il était mieux de rechercher sur le même échantillon la résistance électrique aussi bien que le pouvoir thermoélectrique pour fixer une relation entre les deux, on a exécuté à Ottawa de telles investigations sur les alliages de Cr, Mn, Fe et Co dans d'Al [15] et de Cu [14]. Les mesures de Cu-Mn

ne sont pas tout à fait d'accord avec les mesures japonaises ; pour les concentrations de 0,01-1,0 % at. le P. T. est positif aux plus basses températures [14]. Pour le Cr, le Fe et le Co dans le Cu et l'Al le P. T. mesuré était complètement négatif [14, 15] et « géant ». Les mêmes résultats furent obtenus pour le Mn dans le Zn et le Mg par Hedgcock et Muir [25]. Ils déterminaient récemment aussi le P. T. des alliages de Mn dans l'Al. Bien que la courbe R vs T pour les concentrations 0,005 à 0,046 % atomique fût normale, les chercheurs mentionnés pensaient avoir découvert un P. T. partiellement anormal. Un calcul du P. T. basé sur les expériences de De Vroomen c. s. [26], donne un résultat normal, comparable à celui de l'Al pur.

L'effet Hall. — Peu de mesures à très basses températures sont connues concernant les alliages mentionnés ci-dessus. Blue [27] mesurait le coefficient de Hall d'alliages dilués de Mn, Fe, Co et Ni

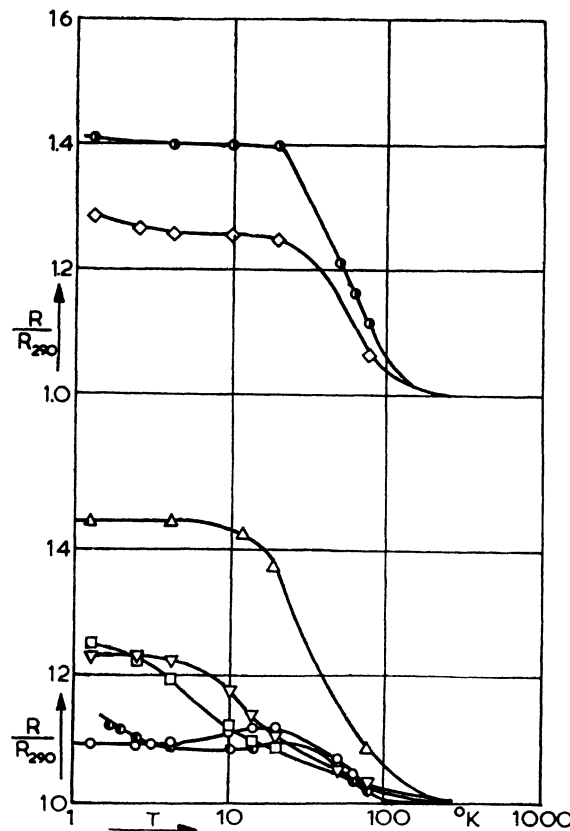


FIG. 8. — Le coefficient de Hall relatif en fonction de la température pour des alliages dilués de Cu-Mn et de Ag-Mn. Voyez [29].

- ◇ Cu-Mn 0,01 % at.
- Ag-Mn 0,01 % at.
- Ag-Mn 0,09 % at.
- ▽ Ag-Mn 1,0 % at.
- Cu-Mn 0,1 at. %
- ⊠ Ag-Mn 0,3 % at.
- Ag-Mn 0,09 % at. pour un champ magnétique de 0 kOe
- △ Ag-Mn 4,2 % at. pour $H = 10$ kOe.

dans du Cu, mais seulement à une température ambiante et à 77 °K dans des champs magnétiques jusqu'à 10 kOe. Pour les alliages Au-Cr 0,03 et 0,05 % atomique Teutsch et Love [28] trouvaient une augmentation du coefficient aux très basses températures. Des recherches d'alliages Ag-Mn, Cu-Mn et les métaux Ag et Cu donnaient des résul-

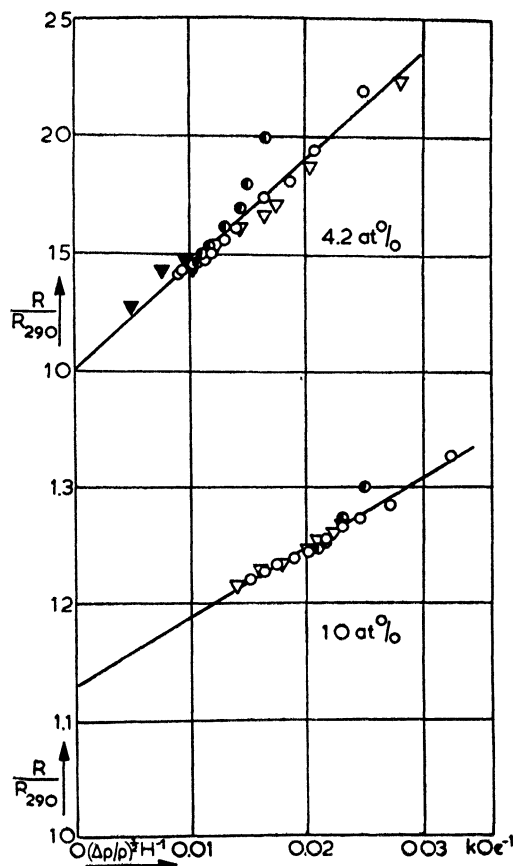


Fig. 9. — Le coefficient de Hall en fonction de la magnétisation (exprimée par $(\Delta\rho/\rho)^{1/2} H^{-1}$) pour les alliages Ag-Mn 1,0 et 4,2 % atomique. Voyez [29].

○ 1,3 °K champ décroissant ● champ croissant.
 ▼ 4,2 °K champ décroissant ▼ champ croissant.

tats compliqués [29]. Seulement pour Ag-Mn 1,0 et 4,2 % at. le coefficient pouvait être représenté par un coefficient normal et un coefficient anormal. Le premier parut être augmenté resp. de 10 % et 0 % relativement à celui de 293 °K ; le deuxième était proportionnel à l'aimantation et fut déterminé par la relation $[\Delta\rho/\rho] = AJ^2$ trouvée par Schmitt et Jacobs pour Cu-Mn [7].

La conductibilité thermique. — Cette propriété, en tant que due aux électrons, des alliages concernés, montre une anomalie analogue à celle de la résistance électrique. Aux températures de l'hélium liquide la conductibilité thermique électronique peut augmenter au lieu de décroître, quand

un champ magnétique est appliqué. Chari et de Nobel [30] ont fait des mesures sur quelques alliages de Ag-Mn. Le plus grand accroissement de 28 % fût mesurée à 1,5 °K en cas d'un alliage de Ag-Mn 0,14 % at. dans un champ de 25 kOe.

Publications théoriques. — Depuis les suggestions théoriques de Korringa et Gerritsen en 1953 concernant les anomalies dans la courbe R vs T plusieurs autres furent publiées par Schmitt [32], Schmitt-Jacobs [7], Owen-Browne-Arp-Kip [33], Yosida [34], Dekker [35], Brailsford-Overhauser [36], De Vroomen-Potters [24], Guénault-MacDonald [37], Kasuya [38] et Bailyn [39]. Les dernières publications se rapportent surtout au pouvoir thermoélectrique.

Les suggestions peuvent être partagées principalement en deux groupes : celle partant d'un champ moléculaire (Schmitt [32], Owen c. s. [33], Yosida [34], De Vroomen-Potters [24], Kasuya [38], Bailyn [39]) et celle prenant comme point de départ l'interaction de paires d'ions (Dekker [35], Brailsford-Overhauser [36]).

Le modèle d'un champ moléculaire peut donner l'anomalie du P. T. d'une manière raisonnable, pendant que l'anomalie dans la courbe $R - T$ peut être mieux décrite par l'autre modèle. De Vroomen-Potters [24] voudraient proposer prudemment que les paires d'ions causent l'anomalie dans la résistance électrique, pendant que le pouvoir thermoélectrique anormal serait dû aux ions isolés. La correction, appliquée par ces auteurs à la théorie de Yosida, devrait être ajoutée également aux calculs avec les paires d'ions.

Pour terminer, soit mentionner que Friedel et ses collaborateurs [40] ont discuté l'idée des états liés virtuels pour les ions introduits dans le métal de base et qu'ils ont commencé à faire comprendre le phénomène des moments magnétiques localisés. Nous nous référons pour cela et aussi pour le développement du moment magnétique localisé par Anderson [41] à l'exposé de M. Friedel.

Chaleur spécifique. — En partant du schéma de Blandin-Friedel [40] des expériences de 1,3 à 21 °K au moins ont été exécutées par De Nobel et Du Chatenier sur la chaleur spécifique des alliages Ag-Mn [42], Cu-Mn, Au-Cr, Au-Mn, Ag-Cr, Cu-Cr, Cu-Fe, Cu-Ni, Zn-Cr, Zn-Mn, Zn-Fe, Al-Mn et Al-Fe [43]. Dans ce schéma il y a été indiqué dans quel système une anomalie dans la chaleur spécifique fut déterminée (voyez le schéma ci-dessous). En cas de comportement anormal, une courbe, qui peut être décrite comme une superposition de courbes «Schottky», fut trouvée. Le maximum dans la courbe C/T en fonction de T paraît se déplacer en général vers des températures plus hautes en fonction de la teneur croissante du métal de transition. Franck, Manchester et Martin [44] ont

TABLEAU

PRÉSENCE D'ANOMALIES DANS LA RÉSISTANCE ÉLECTRIQUE ET DANS LA CHALEUR SPÉCIFIQUE DES ALLIAGES.
FRIEDEL PRÉDIT DES EFFETS DE CORRÉLATION AU-DESSUS DE LA LIGNE ÉPAISSE DANS CE SCHÉMA.

	Au	Ag	Cu	Mg	Zn	Al
Cr	+ ●	●	+ ●		+ ●	▲
Mn	+ ●	+ ●	+ ○ ● [45]	+ ○ [50]	+ ●	— Δ [51]
Fe	+		+ ○ ● [44]	+	▲	— ▲
Co	? ○ [47]		? ○? [40]			
Ni	—		— ▲			

- + la résistance montre une anomalie.
 — la résistance ne montre pas d'anomalie.
 ? anomalie douteuse.
 ● chaleur spécifique anormale, de Nobel et du Chatenier.
 ○ chaleur spécifique anormale, d'autres chercheurs.
 ▲ chaleur spécifique normale, de Nobel et du Chatenier.
 Δ chaleur spécifique normale, d'autres chercheurs.

recherché également le système Cu-Fe jusqu'à 0,4 °K. Ils ont conclu que les courbes n'ont pas le caractère décrit ci-dessus et que le maximum ne se déplace pas en fonction de la teneur en soluté.

C'était la question de savoir si les courbes de C/T en fonction de T pour les alliages et les métaux purs concernés coïncideraient vers les températures plus hautes. Pour cette raison De Nobel et Du Chatenier ont mesuré aussi la chaleur spécifique des métaux purs : Au, Ag et Cu entre 1,3 et 30 °K [43]. En effet les courbes pour les alliages avec le Cr coïncident ; pour ceux avec le Mn et Fe elles divergent.

Des recherches sur ce sujet ont été faites également par Zimmerman et ses collaborateurs, Hoare et Crane (les systèmes Cu-Mn [45], Cu-Co [46] et Au-Co [47]). Un point de controverse a été de savoir comment les courbes pour les alliages se comportent vers les températures plus basses. Nous nous référons aux considérations de Marshall [48] qui donnent l'influence de la teneur du métal de transition sur la contribution anormale à la chaleur spécifique, ainsi que la dépendance de cette contribution de la température. C'est pour cela que Du Chatenier et Miedema [43] ont examiné la chaleur spécifique de deux alliages de Cu-Mn jusqu'à 0,05 °K. Une deuxième anomalie se produit, due au spin nucléaire du Mn. Les expériences sont continuées avec des alliages de Cu-Cr, notamment parce que seulement 1 % du chrome naturel possède un spin nucléaire.

Coefficient de dilatation. — White [49] a constaté que le coefficient de dilatation de deux alliages de Cu-Mn montre la même anomalie que la chaleur spécifique comme fonction de la température. En faisant une séparation de l'entropie en trois termes,

originaires du réseau, des électrons et de l'énergie magnétique, il déduit, que la contribution magnétique au paramètre de Grüneisen (γ_m) est relativement grande ($\approx 3,2 \pm 0,2$).

Celles des recherches mentionnées dans cet exposé, qui furent effectuées au Laboratoire Kamerlingh Onnes, faisaient partie du programme du groupe F. O. M.-T. N. O., financé partiellement par la « Nederlandse Organisatie voor Zuiver Wetenschappelijk Onderzoek ».

Note ajoutée à la discussion et pendant la correction de l'article.

Les mesures de la chaleur spécifique de deux alliages Au-Mn (0,08 et 0,12 % at.) ont montré la même anomalie, originaire du spin nucléaire de Mn, se présentant au-dessous de 0,5 °K. Cette anomalie de la chaleur spécifique pour deux alliages de Cu-Cr (0,1 et 0,6 % at.) commence à apparaître au-dessous de 0,1 °K et ne dépend pas de la teneur de Cr.

On peut décrire la chaleur spécifique aux basses températures par

$$c = 0,018/T^2 + 3,06 T \text{ mJ/mole } ^\circ\text{K}$$

pour Cu-Mn 0,15 % at.

$$c = 0,13/T^2 + 3,06 T \text{ mJ/mole } ^\circ\text{K}$$

pour Cu-Mn 1,0 % at.

$$c = \frac{6,3 \times 10^{-3}}{T^2} + 7,8 T + c_{\text{Au}} \text{ mJ/mole } ^\circ\text{K}$$

pour Au-Mn 0,08 % at.

$$c = \frac{10,0 \times 10^{-3}}{T^2} + 7,8 T + c_{\text{Au}} \text{ mJ/mole } ^\circ\text{K}$$

pour Au-Mn 0,12 % at.

$$c = \frac{16,3 \times 10^{-4}}{T^2} + 2,5 T \text{ mJ/mole } ^\circ\text{K}$$

pour Cu-Cr 0,1 et 0,6 % at.

Des premiers coefficients on peut déduire la différence d'énergie entre deux niveaux consécutifs de 0,0238 °K pour Cu-Mn et de 0,0203 °K pour Au-Mn.

Discussion

G. W. RATHENAU. — Mr. J. Bijvoet and Mr. de Hon at Amsterdam have started to investigate the magnetic interactions of 4f-atoms in a neutral metallic matrix. They measured the temperature

dependence of electric resistivity of magnesium alloyed with gadolinium. It is apparent that the interaction in this case is weak since they did not find any anomaly due to gadolinium for alloys containing about 0.1 at % Gd in the region above 1 °K. Mathiessen's rule seems to be obeyed rather well in between 1 and 293 °K.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] DE HAAS (W. J.), DE BOER (J.) et VAN DEN BERG (G. J.), *Physica*, 1933, **1**, 1115 ; Commun. Kamerlingh Onnes Laboratorium, Leiden, No. 233 b.
VAN DEN BERG (G. J.), *Thèse*, Université de Leyde, 1938; Proc. 7th Int. Conf. Low. Temp. Physics, Toronto, 1960, p. 246.
- [2] GERRITSEN (A. N.) et LINDE (J. O.), *Physica*, 1951, **17**, 573 ; Commun. Leiden No. 285 c.
- [3] GERRITSEN (A. N.) et LINDE (J. O.), *Physica*, 1951, **17**, 584 ; Commun. Leiden No. 285 d.
- [4] NAKHIMOVICH (N. M.), *J. Phys.*, U. S. S. R., 1941, **5**, 141.
- [5] GERRITSEN (A. N.) et LINDE (J. O.), *Physica*, 1952, **18**, 877 ; Commun. No. 290 d.
GERRITSEN (A. N.), *Physica*, 1953, **19**, 61 ; Commun. No. 291 c.
Mlle Los (G. J.) et GERRITSEN (A. N.), *Physica*, 1957, **23**, 633, Commun. No. 308 d.
GERRITSEN (A. N.), *Physica*, 1957, **23**, 1087 ; Commun. No. 309 d ; *Physica*, 1959, **25**, 489 ; Commun. No. 315 c (voyez le résumé !)
- [6] LINDE (J. O.), Proc. 5th Int. Conf. Low. Temp. Physics and Chem., 1957, p. 402 (University of Wisconsin Press, 1958).
- [7] SCHMITT (R. W.) et JACOBS (I. S.), *J. Phys. Chem. Solids*, 1957, **3**, 324.
- [8] PEARSON (W. B.), *Phil. Mag.* (7), 1955, **46**, 911.
WHITE (G. K.), *Can. J. Phys.*, 1955, **32**, 314.
DUGDALE (J. S.) et MACDONALD (D. K. C.), *Can. J. Phys.*, 1957, **35**, 271.
- [9] SCHMITT (R. W.), *Phys. Rev.*, 1954, **96**, 1446.
- [10] MACDONALD (D. K. C.), *Encyclopedia of Physics*, **14**, 153.
- [11] KNOOK (B.), *Thèse*, Université de Leyde, 1962 ; sera publié dans *Physica*.
- [12] GOLD (A. V.), MACDONALD (D. K. C.), PEARSON (W. B.) et TEMPLETON (J. M.), *Phil. Mag.* (8), 1960, **5**, 765.
- [13] LINDE (J. O.), *Physica*, 1958, **24**, S 109.
- [14] KJEKSHUS (A.) et PEARSON (W. B.), *Can. J. Phys.*, 1962, **40**, 98.
- [15] MACDONALD (D. K. C.), PEARSON (W. B.) et TEMPLETON (J. M.), *Proc. Roy. Soc.*, 1962, **266**, 161.
- [16] MUTÔ (Y.), Sc. Rep. RITU A, 1961, **13**, n° 1 ; *J. Phys. Soc.*, Japan, 1960, **15**, 2119.
- [17] MUIR (W. B.), *J. Phys. Soc.*, Japan, 1961, **16**, 2598.
- [18] HEDGCOCK (F. T.), MUIR (W. B.) et WALLINGFORD (E.), *Can. J. Phys.*, 1960, **38**, 376.
GAUDET (G.), HEDGCOCK (F. T.), LAMARCHE (G.) et WALLINGFORD (E.), *Can. J. Phys.*, 1960, **38**, 1134.
- [19] KNOOK (B.), Proc. 10th Int. Congress Refrigeration, Copenhagen, 1959, **1**, 69.
- [20] VAN DEN BERG (G. J.), Proc. 5th Int. Conf. Low Temp. Physics and Chem., 1957, p. 489 (University of Wisconsin Press, 1958).
- [21] BORLIUS (G.), KEESOM (W. H.), JOHANSSON (C. H.) et LINDE (J. O.), *Proc. Roy. Acad. Sc.*, Amsterdam, 1932, **35**, 15 ; Commun. No. 217 d.
- [22] SOMMERFELD (A.), *Z. Physik*, 1928, **47**, 1.
SOMMERFELD (A.) et BETHE (H.), *Handb. Physik*, 1934, **24/2**.
- [23] MACDONALD (D. K. C.) et PEARSON (W. B.), *Acta Met.*, 1955, **3**, 392 et 403.
- [24] DE VROOMEN (A. R.), *Thèse*, Université de Leyde, 1959.
DE VROOMEN (A. R.) et POTTERS (M. L.), *Physica*, 1961, **27**, 1083.
- [25] HEDGCOCK (F. T.) et MUIR (W. B.), *J. Phys. Soc.*, Japan, 1961, **16**, 2599.
- [26] DE VROOMEN (A. R.), VAN BAARLE (C.) et CUELENAERE (A. J.), Commun. No. 319 d ; *Physica*, 1960, **26**, 19.
- [27] BLUE (M. D.), *J. Phys. Chem. Solids*, 1959, **11**, 31.
- [28] TEUTSCH (W. B.) et LOVE (W. F.), *Phys. Rev.*, 1957, **51**, 1108.
- [29] FRANKEN (B.) et VAN DEN BERG (G. J.), Commun. No. 324 a ; *Physica*, 1960, **26**, 1030.
- [30] CHARI (M. S. R.) et DE NOBEL (J.), Commun. No. 313 b et Suppl. No. 114 b ; *Physica*, 1959, **25**, 60 et 84.
- [31] KORRINGA (J.) et GERRITSEN (A. N.), Commun. Suppl. No. 106 ; *Physica*, 1953, **19**, 457-507.
- [32] SCHMITT (R. W.), *Phys. Rev.*, 1956, **103**, 83.
- [33] OWEN (J.), BROWNE (M. E.), ARP (V.) et KIP (A. F.), *J. Phys. Chem. Solids*, 1957, **2**, 85.
- [34] YOSIDA (K.), *Phys. Rev.*, 1957, **106**, 893 ; 1957, **107**, 396.
- [35] DEKKER (A. J.), *Physica*, 1958, **24**, 697 et 1959, **25**, 1244.
- [36] BRAILSFORD (A. D.) et OVERHAUSER (A. W.), *J. Phys. Chem. Solids*, 1960, **15**, 140 et 1961, **21**, 127.
- [37] GUÉNAULT (A. M.) et MACDONALD (D. K. C.), *Phil. Mag.*, 1961, **6**, 1201.
- [38] KASUYA (T.), *Progr. Theor. Phys.*, Japan, 1959, **22**, 227.
- [39] BAILY (M.), Westinghouse Res. Report 029-B000-P 1.
- [40] VOYEZ : BLANDIN (A.) et FRIEDEL (J.), *J. Physique Rad.*, 1958, **19**, 537 et 1959, **20**, 160.
- [41] ANDERSON (P. W.), *Phys. Rev.*, 1961, **124**, 41.
- [42] DE NOBEL (J.) et DU CHATENIER (F. J.), Commun., Leiden, No. 317 c ; *Physica*, 1959, **25**, 969.
- [43] DU CHATENIER (F. J.) et DE NOBEL (J.), *Physica*, 1962, **28**, 181.
- [44] FRANCK (J. P.), MANCHESTER (F. D.) et MARTIN (D. L.), *Proc. Roy. Soc.*, 1961, **A 263**, 494.
- [45] ZIMMERMAN (J. E.) et HOARE (F. E.), *J. Phys. Chem. Solids*, 1960, **17**, 52.
CRANE (L. T.) et ZIMMERMAN (J. E.), *J. Phys. Chem. Solids*, 1961, **21**, 310.
- [46] CRANE (L. T.) et ZIMMERMAN (J. E.), *Phys. Rev.*, 1961, **123**, 113.
- [47] CRANE (L. T.), *Phys. Rev.*, 1962, **125**, 1902.
- [48] MARSHALL (W.), *Phys. Rev.*, 1960, **118**, 1519.
- [49] WHITE (G. K.), *J. Phys. Chem. Solids*, 1962, **23**, 171.
- [50] MARTIN (D. L.), *Canad. J. Physics*, 1961, **39**, 1385.
- [51] MARTIN (D. L.), *Proc. Phys. Soc.*, 1961, **78**, 1489.