



SÉRIE A, N° 3191  
N° D'ORDRE : 4063

# THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES  
DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES PHYSIQUES

PAR

**PIERRE-GILLES DE GENNES**

1<sup>re</sup> THÈSE. — Contribution à l'étude de la diffusion magnétique des neutrons.

2<sup>e</sup> THÈSE. — PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

Soutenues le 9 décembre 1957 devant la Commission d'Examen

MM. F. PERRIN, *Président.*

Y. ROCARD

J. FRIEDEL

L. NEEL

(Université de Grenoble)

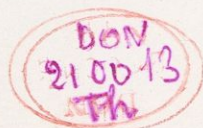
} *Examineurs.*



PRESSES UNIVERSITAIRES DE FRANCE

CONTRIBUTION A  
L'ÉTUDE DE LA DIFFUSION MAGNÉTIQUE DES NEUTRONS

40R.  
489 (4063)





# THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES  
DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES PHYSIQUES

PAR

**PIERRE-GILLES DE GENNES**

1<sup>re</sup> THÈSE. — Contribution à l'étude de la diffusion magnétique  
des neutrons.

2<sup>e</sup> THÈSE. — PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

Soutenues le 9 décembre 1957 devant la Commission d'Examen

MM. F. PERRIN, *Président.*

Y. ROCARD  
J. FRIEDEL  
L. NEEL  
(Université de Grenoble)

} *Examinateurs.*



PRESSES UNIVERSITAIRES DE FRANCE  
108, BOULEVARD SAINT-GERMAIN, PARIS

1959

# FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

Doyen..... J. PÉRÈS

## PROFESSEURS

G. JULIA .....	T	Anal. sup. et Algèbre sup.	VASSY .....	Physique de l'atmosphère.
E. DARMOIS .....	T	Enseignement de Physique.	DESTOUCHES .....	Théories physiques.
FOCH .....	T	Méc. phys. et expérimentale.	M. PRUVOST .....	T Géologie.
PAUTHENIER .....	T	Electrotechnique générale.	AMIEL .....	T Chimie (P.C.B.).
DE BROGLIE .....	T	Théories physiques.	HOCART .....	T Minéralogie.
PRENANT .....	T	Anatomie et Histol. comparées.	J.-P. MATHIEU .....	T Physique (P.C.B.).
GARNIER .....	T	Géométrie supérieure.	COUTEAUX .....	T Biologie animale (P.C.B.).
PÉRÈS .....	T	Mécanique des fluides et appl.	MAY .....	T Biologie animale (P.C.B.).
LAUGIER .....	T	Physiologie générale.	CHOQUET .....	T Calc. diff. et intégral.
M. CURIE .....	T	Physique (P.C.B.).	FELDMANN .....	Biologie (P.C.B.).
BARRABE .....	T	Géol. struct. et Géol. appliquée.	GUINIER .....	T Physique (P.C.B.).
G. DARMOIS .....	T	Calc. des prob. et Phys. math.	JOST .....	T Biologie (P.C.B.).
J. BURCART .....	T	Géogr. phys. et Géol. dynam.	FORTET .....	T Calc. des probabilités.
PLANTEFOL .....	T	Botanique.	SCHWARTZ .....	T Méth. mathém. de la Phys.
GRASSÉ .....	T	Evol. des êtres organisés.	CHOUARD .....	T Physiologie végétale.
PRÉVOST .....	T	Chimie organique.	MALAVARD .....	T Aviation.
BOULIGAND .....	T	Appl. de l'analyse à la Géom.	BRELOT .....	T Calcul différentiel.
CHAUDRON .....	T	Chimie appliquée.	NORMANT .....	T Chimie (P.C.B.).
WYART .....	T	Minéralogie.	BENARD .....	T Chimie (P.C.B.).
TEISSIER .....	T	Zoologie.	BUVAT .....	T Botanique (E.N.S.).
MANGENOT .....	T	Biologie végétale.	DUGUE .....	T Statistiques mathématiques.
P. AUGER .....	T	Physique quantique et Relat.	GELOSO .....	Chimie (S.P.C.N.).
MONNIER .....	T	Physiologie des fonctions.	SOULAIRAC .....	T Psychophysiologie.
PIVETEAU .....	T	Géologie.	ULRICH .....	T Physiologie végétale.
ROCARD .....	T	Physique (E.N.S.).	MARÉCHAL .....	T Optique théor. et appl.
H. CARTAN .....	T	Mathématiques (E.N.S.).	KIRRMANN .....	T Théories chimiques.
LAFFITTE .....	T	Chimie générale.	CHADEFAUD .....	Botanique.
FAVARD .....	T	Mécanique générale.	DESTRIAU .....	T Physique (M.P.C.).
COULOMB .....	T	Physique du Globe.	Mlle LE BRETON .....	Physiologie générale.
Mlle COUSIN .....	T	Biologie animale (P.C.B.).	SALEM .....	T Mathématiques générales.
CHRÉTIEN .....	T	Chimie minérale.	LELONG .....	T Mathématiques générales.
P. DRACH .....	T	Zoologie.	DEVILLERS .....	Anat. et Histol. comparées.
KASTLER .....	T	Physique.	EHRESMANN .....	T Topologie algébrique.
EPHROSSI .....	T	Génétique.	FRANÇON .....	Physique (M.P.C.).
WURMSER .....	T	Biol. physico-chimique.	GLANGEAUD .....	T Géographie physique et Géologie dynamique.
RIVIÈRE .....	T	Géologie (S.P.C.N.).	GONEMENT .....	T Mathématiques (M.P.C.).
GAUTHERET .....	T	Biologie végétale (P.C.B.).	PISOT .....	T Calcul des probabilités.
LUCAS .....	T	Recherches physiques.	F. ROCH .....	T Géologie.
A. THOMAS .....	T	Biologie cellulaire.	SCHATZMANN .....	Astrophysique.
ARNULF .....	T	Optique appliquée.	TERMIER .....	T Paléontologie stratigraphique.
M. MORAND .....	T	Physique.	ZAMANSKY .....	T Mathématiques générales.
SOLEILLET .....	T	Physique.	JOLIOT .....	T Physique nucléaire et Radioac- tivité.
FORTIER .....	T	Méc. expér. des fluides.	LENNUIER .....	Physique (P.C.B.).
DANJON .....	T	Astronomie.	RIZET .....	Génétique.
FROMAGEOT .....	T	Chimie biologique.	ROUTHIER .....	Géologie appliquée.
LAPORTE .....	T	Phys. génér. et radioactivité.	Mme TONNELAT .....	Théories physiques.
JANET .....	T	Méc. anal. et Méc. céleste.	DIXMIER .....	Mathématiques (M.P.C.).
PETIT .....	T	Biologie maritime.	SOUGHAY .....	Chimie (P.C.B.).
QUENEY .....	T	Météor. et Dyn. atmosphér.	AIGRAIN .....	Physique (P.C.B.).
GALLIEN .....	T	Embryologie.	BRUSSET .....	Chimie (P.C.B.).
EICHHORN .....	T	Biologie végétale (P.C.B.).	M. LÉVY .....	Physique théorique.
DE CUGNAC .....	T	Biologie végétale (P.C.B.).	LENORMANT .....	Physiologie.
Mlle CAUCHOIS .....	T	Chimie physique.	Mme CHAIX .....	Chimie biologique.
THELLIER .....	T	Physique du Globe.	Mme HUREL-PY .....	Biologie végétale (P.C.B.).
L'HÉRITIER .....	T	Génétique.	PIAUX .....	Chimie (P.C.B.).
GRIVET .....	T	Radioélectricité.	BRUN .....	Mécanique expérimentale des fluides.
PONCIN .....	T	Mécanique des fluides.	LEDERER .....	Chimie biologique.
THIRY .....	T	Mécanique appliquée.	Mme DUBREIL-JACOTIN .....	Mathématiques.
DUBREIL .....	T	Arith. et théor. des nombres.	Mme LELONG-FERRAND .....	Mathématiques (E.N.S.).
QUELET .....	T	Chimie organique.	BELLAIR .....	Géologie (S.P.C.N.).
ÇAGNIARD .....	T	Géophysique appliquée.	COTTE .....	T Physique (M.P.C.).
CHAMPETIER .....	T	Chimie macromoléculaire.	J. DUBOIS .....	Chimie.
CUVILLIER .....	T	Géol. struct. et Géol. appl.	LAMOTTE .....	Zoologie (E.N.S.).
JUNG .....	T	Pétrographie.	LE ROLLAND .....	Mécanique des fluides.
TRILLAT .....	T	Microscopie et diffraction électro- nique.	MICHEL .....	Chimie (P.C.B.).
WIEMANN .....	T	Chimie organ. structurale.		
JACQUINOT .....	T	Spectrosc. et Phys. céleste.		

Secrétaire général : C. MONIER

## TABLEAU RÉCAPITULATIF DES NOTATIONS

$A$ .....	coefficient de champ moléculaire.
$A(\vec{R})$ .....	densité locale de porteurs.
$\vec{a}_1, \vec{a}_2, \vec{a}_3$ .....	côtés de la maille élémentaire du cristal.
$a, b$ .....	états initial et final du système de $N$ spins + 1 neutron (chap. I <sup>er</sup> ).
$b$ .....	distance aux plus proches voisins en interaction magnétique avec le site pris pour origine.
$c$ .....	vitesse de la lumière (chap. I <sup>er</sup> ).
$c$ .....	coefficient intervenant dans le calcul des susceptibilités différentielles (chap. III).
$C$ .....	concentration (chap. IV).
$D$ .....	coefficient de diffusion intrinsèque.
$-e$ .....	charge de l'électron.
$E$ .....	énergie du système de spins.
$E(\vec{K})$ .....	énergie d'une onde de spin de vecteur d'onde $\vec{K}$ .
$F$ .....	énergie libre.
$F(\vec{K})$ .....	facteur de forme d'un ion magnétique.
$f(\vec{R})$ .....	fonction de modulation pour l'onde de spin.
$g$ .....	rapport gyromagnétique d'un ion.
$\gamma$ .....	défini par (I.9).
$\mathcal{H}$ .....	hamiltonien.
$\mathcal{H}_H$ .....	hamiltonien dans l'approximation de Heisenberg.
$\vec{H}_{eB}$ .....	champ magnétique extérieur appliqué au nœud $\underline{R}$ .
$i = \sqrt{-1}$ .	
$j$ .....	indice d'électron (chap. I <sup>er</sup> et V).
$\vec{j}$ .....	courant de spins (chap. IV).
$2 J_{\underline{R}-\underline{R}'}$ .....	intégrale d'échange.
$2 J$ .....	intégrale d'échange (quand il n'en existe qu'une).
$\vec{K}_0, \vec{K}_1$ .....	vecteurs d'onde initial et final du neutron.
$K_B$ .....	constante de Boltzmann.
$m_n$ .....	masse du neutron.
$m_e, m$ .....	masse de l'électron.
$p$ .....	indice d'électron.
$p_{\vec{K}}(\omega)$ .....	fonction de distribution (chap. II).
$\vec{R}p$ .....	coordonnée du $p^e$ électron.
$\underline{R}$ .....	coordonnée d'un nœud de réseau.
$r_0 = \frac{e^2}{mc^2}$ .....	rayon classique de l'électron.
$r_1$ .....	défini, conformément à (III.2.6) (voir chap. III).

$\vec{S}$ .....	spin d'un ion.
$\vec{S}_p$ .....	spin du $p^e$ électron (chap. V).
$\vec{T}$ .....	spin total du spécimen.
T .....	température.
$T_C$ .....	température de Curie.
$T_N$ .....	température de Néel.
$\alpha_R$ .....	coefficient du développement d'Yvon généralisé.
$\beta_R^{(x)} \beta_R^{(y)} \beta_R^{(z)}$ .....	coefficients analogues en dessous du point de transition.
$\gamma_{R'-R}(t)$ .....	fonction de corrélation des spins (modèle de Heisenberg).
$\gamma_{R'-R}^{(0)}, \gamma_{R'-R}$ .....	corrélation instantanée.
$\Gamma_{\vec{K}}$ .....	demi-largeur de la distribution $p_{\vec{K}}(\omega)$ .
$\vec{\epsilon}$ .....	translation d'ensemble des électrons (chap. V).
$\Delta$ .....	température de Curie paramagnétique.
$\nabla f$ .....	gradient de $f$ .
$\nabla^2 f = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial z^2}$ .....	
$\Phi(R_1 \dots R_{N_c})$ .....	fonction d'onde électronique (chap. I <sup>er</sup> et V).
$\Phi_{\vec{K}}(R)$ .....	déphasage intervenant dans l'onde de spin (chap. V).
$\chi$ .....	susceptibilité par porteur (par ion dans le modèle de Heisenberg) au-dessus du point de transition.
$\chi_0 = \frac{(g\mu_B)^2 S(S+1)}{3 K_B T}$ .....	susceptibilité en l'absence d'interactions d'échange.
$\chi_0^{(z)}$ .....	susceptibilité différentielle dans la direction parallèle à l'aimantation spontanée, en dessous de $T_c$ .
$\chi_0^D$ .....	susceptibilité différentielle, pour la même valeur de l'aimantation spontanée, mais en l'absence d'interactions d'échange.
$\hbar \vec{K}$ .....	transfert d'impulsion du neutron (chap. I <sup>er</sup> à IV).
$\vec{K}$ .....	vecteur d'onde de spin (chap. V).
$\vec{\mu}$ .....	moment magnétique.
$\langle \vec{\mu} \rangle_T$ .....	moyenne thermique de $\vec{\mu}$ en l'absence de champ extérieur.
$\mu_B$ .....	magnéton de Bohr.
$\psi$ .....	angle entre aimantation et vecteur diffusion (chap. III et IV).
$\psi(R_1 \dots R_N, \vec{S}_1 - \vec{S}_N)$ .....	fonction d'onde à N électrons pour l'onde de spin.
$\hbar\omega$ .....	transfert d'énergie.
$\omega_c$ .....	fréquence de coupure (chap. II).
$\theta$ .....	angle entre $\vec{K}_0$ et $\vec{K}_1$ .
$\frac{d\sigma}{d\Omega}$ .....	section efficace différentielle (angle solide $d\Omega$ ).
$\Sigma$ .....	entropie.
$\vec{\tau}$ .....	vecteur du réseau réciproque (chap. III et V).
$\tau$ .....	temps de relaxation des porteurs au niveau de Fermi (chap. IV).

CHAPITRE PREMIER

PRINCIPES  
DE LA DIFFUSION MAGNÉTIQUE DES NEUTRONS

**Résumé.** — Les formules de base utilisées dans la diffusion magnétique des neutrons sont démontrées et regroupées. Le cas spécifiquement envisagé est celui d'un cristal, formé d'ions magnétiques entre lesquels existent des interactions d'échange. En présence de telles interactions, le retournement du spin d'un ion demande de l'énergie. La diffusion peut donc être *inélastique*. La mesure des sections efficaces correspondantes permet d'obtenir des informations sur l'*intensité* et la *portée* des forces d'échange. Le traitement est limité aux substances où le moment magnétique orbital peut être considéré comme bloqué, et où l'effet de l'agitation thermique des ions peut être négligé.

Un neutron rencontrant un atome subit l'action :

- du noyau ;
- des électrons non appariés (s'il en existe).

Pour les ions, ou les atomes *magnétiques* usuels, les sections efficaces résultant de ces deux effets sont souvent *du même ordre de grandeur*, comme le montre le tableau suivant (neutrons de vitesse 2 200 m/s, section efficace différentielle vers l'avant,  $\frac{d\sigma}{d\Omega}$  atomes du diffuseur sans interaction entre eux) :

Élément	$4 \pi \frac{d\sigma}{d\Omega}$ (barns) (diffusion nucléaire)	$\sigma_{\text{total}}$ (barns) (absorption)	$4 \pi \frac{d\sigma}{d\Omega}$ (barns) (diffusion magnétique)
<sup>58</sup> Ni .....	24,4	4,2	(Ni <sup>++</sup> ) 4,8
<sup>59</sup> Co .....	7	34,8	(Co <sup>++</sup> ) 9,1
<sup>56</sup> Fe .....	12,8	2,6	(Fe <sup>+++</sup> ) 21,3
<sup>55</sup> Mn .....	2	12,6	(Mn <sup>++</sup> ) 21,3

Dans ces conditions, il est fréquemment possible de mesurer avec une bonne précision, la partie électronique de la diffusion, en retranchant de la section efficace totale une partie purement nucléaire, qui est bien connue en général dans le domaine des basses énergies.



1959. — Imprimerie des Presses Universitaires de France. — Vendôme (France)  
ÉDIT. N° 25 198                      IMPRIMÉ EN FRANCE                      IMP. N° 15 580

Participant d'une démarche de transmission de fictions ou de savoirs rendus difficiles d'accès par le temps, cette édition numérique redonne vie à une œuvre existant jusqu'alors uniquement sur un support imprimé, conformément à la loi n° 2012-287 du 1<sup>er</sup> mars 2012 relative à l'exploitation des Livres Indisponibles du XX<sup>e</sup> siècle.

Cette édition numérique a été réalisée à partir d'un support physique parfois ancien conservé au sein des collections de la Bibliothèque nationale de France, notamment au titre du dépôt légal. Elle peut donc reproduire, au-delà du texte lui-même, des éléments propres à l'exemplaire qui a servi à la numérisation.

Cette édition numérique a été fabriquée par la société FeniXX au format PDF.

La couverture reproduit celle du livre original conservé au sein des collections de la Bibliothèque nationale de France, notamment au titre du dépôt légal.

\*

La société FeniXX diffuse cette édition numérique en vertu d'une licence confiée par la Sofia – Société Française des Intérêts des Auteurs de l'Écrit – dans le cadre de la loi n° 2012-287 du 1<sup>er</sup> mars 2012.

Avec le soutien du

