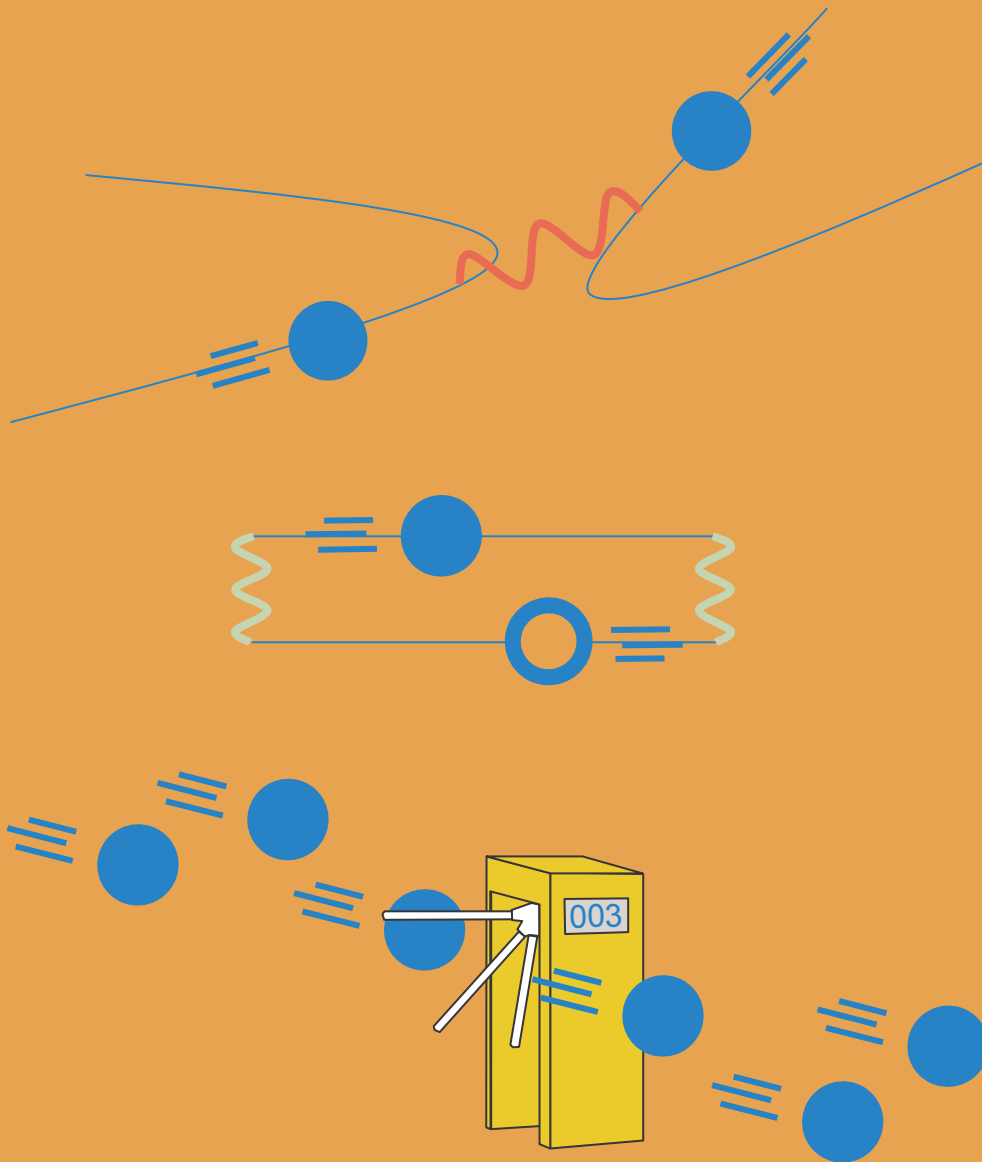


Interactions between electrons, mesoscopic Josephson effect and asymmetric current fluctuations



Benjamin Huard
Quantronics Group
SPEC – CEA Saclay

THESE DE DOCTORAT DE L'UNIVERSITE PARIS 6

Spécialité :

Physique des Solides

Présentée par

Benjamin HUARD

Pour obtenir le grade de DOCTEUR DE L'UNIVERSITE PARIS 6

Sujet de la thèse :

INTERACTIONS ENTRE ELECTRONS, EFFET JOSEPHSON MESOSCOPIQUE ET FLUCTUATIONS ASYMETRIQUES DU COURANT

préparée au sein du

SERVICE DE PHYSIQUE DE L'ETAT CONDENSE, CEA-SACLAY

soutenue le 22 septembre 2006

devant le jury composé de:

H. Bouchiat

R. Combescot

A. Georges

L. Glazman (rapporteur)

H. Pothier (directeur de thèse)

C. Strunk (rapporteur)

À ma belle

Remerciements

Je me souviens aujourd'hui de mon premier contact avec la Physique. Comme pour beaucoup de chercheurs, mon intérêt pour ce domaine s'est révélé au contact d'une personne exceptionnelle. Avec Yvette Casini, mon professeur au lycée, j'ai compris pour la première fois que l'édifice mathématique fournit un cadre conceptuel idéal pour appréhender les lois de la nature. Nos multiples discussions m'ont présenté une science vivante d'une grande richesse bien que bâtie sur un nombre restreint de principes élémentaires. Le fait qu'un cerveau humain puisse prédire la vitesse d'un skieur, la trajectoire d'une comète, la dilatation d'un gaz ou encore identifier les constituants élémentaires de la matière me stupéfie encore aujourd'hui. Yvette m'a rendu passionné de Physique à vie.

Cette thèse représente une étape importante dans ma relation à la Physique. Pour la première fois, l'approfondissement de ma compréhension des lois de la nature passait non seulement par la communication avec des érudits, mais aussi en participant personnellement à l'effort de recherche. Il n'est pas du tout évident de trouver la bonne façon de conduire des travaux de recherche. La vie d'un chercheur est une longue ascension vers la compréhension des lois de la nature. Au début de ma thèse, je partais pieds nus pour cette escalade. Ces trois années et demie passées au sein du groupe Quantronique m'ont non seulement fourni de bonnes chaussures et tout l'équipement nécessaire à la suite de mes recherches mais m'ont de plus permis de prendre le téléphérique.

Le groupe Quantronique est constitué de scientifiques de très haut niveau, modestes et à la bonne humeur contagieuse. Travailler avec eux fût un bonheur intense tant au niveau scientifique que personnel. Je remercie tout particulièrement mon guide de montagne Hugues Pothier qui est tout ce que je désire devenir. Merci pour m'avoir donné les clefs pour aborder un problème scientifique ouvert du point de vue théorique et expérimental, merci pour sa confiance précoce lorsqu'il m'envoyait en conférence et merci pour sa bonne humeur, ses blagues et sa façon d'égayer rapidement une journée mal commencée. Merci enfin pour sa générosité dans la correction de ce manuscrit. Je

VIII Remerciements

remercie Daniel Estève pour sa confiance et son affection, pour consacrer autant de temps à ses “récréations” pendant lesquelles il m’expliquait des notions très variées de Physique ou pendant lesquelles il venait tourner les boutons de l’expérience en cours. Sa double identité de super-héros lui permet de remplir à la fois des charges administratives importantes, d’être parfaitement au courant des expériences en cours, de nous donner les bonnes impulsions au bon moment, de donner une bonne leçon de courage et de jouer le rôle d’un père protecteur. Merci aussi à Norman Birge dont l’ouverture d’esprit, les qualités pédagogiques et l’envie de comprendre ont été particulièrement motivantes. J’ai beaucoup apprécié le recul de Cristian Urbina sur la science et sur les rapports humains en général, ses points de vue m’ont permis de relier les différentes branches de mes nouvelles connaissances en un arbre cohérent. Merci à Maria Luisa Della Rocca et Martin Chauvin dont les sourires ensoleillaient le labo du sous-sol, et avec qui j’ai pris un grand plaisir à collaborer. Merci à Anne Anthore pour avoir si bien préparé le terrain et qui a pris soin de partager ses connaissances au début de ma thèse. Merci à Denis Vion pour son enthousiasme sans égal lors de mes exposés et pour son dévouement pour rendre la vie plus simple au labo. Merci à Pief Orfila et Pascal Senat pour m’avoir simplifié la tâche si souvent. Merci aussi à Philippe Joyez, Grégoire Ithier, Peter Vom Stein, Eddy Collin, Hélène Le Sueur, Nicolas Boulant, Patrice Bertet, François Nguyen, Phil Meeson et Abdel Aassime pour avoir contribué à la formidable ambiance du groupe. Merci à tout le groupe pour les félicitations et encouragements permanents et la confiance qui me fut prêtée. Merci aussi à Sandrine Thunin, Nathalie Royer, Pierre Janvier et Eric Vincent qui permettent au service de bien fonctionner.

Enfin, je tiens à remercier les nombreuses personnes avec qui j’ai eu l’occasion de discuter pendant ma thèse et qui m’ont permis d’améliorer la qualité du manuscrit. Parmi elles : Gilles Montambaux, Joachim Ankerhold, Xavier Waintal, Hermann Grabert, Hélène Bouchiat, Frédéric Pierre, Bertrand Reulet, Marco Aprili, Christian Glattli, Boris Altshuler, Igor Aleiner, Yuri Nazarov, Juan Carlos Cuevas, Michel Devoret et Marcelo Goffman.

Je remercie chaleureusement Leonid Glazman, Christoph Strunk, Hélène Bouchiat, Antoine Georges, Roland Combescot et Hugues d’avoir fait partie du jury. Ce manuscrit serait d’ailleurs de bien moins bonne qualité sans les commentaires avisés d’Hugues Pothier, Daniel Estève, Cristian Urbina, Norman Birge, Gilles Montambaux et Hélène Bouchiat.

Je remercie mes parents pour leur amour et leur soutien sans borne. Merci à Gilberte, Antoinette, Jacqueline et Maurice pour leur affection et merci à mes beaux-parents de m’avoir si vite accepté dans la famille. Enfin, merci à celle qui se reconnaîtra.

Paris, Octobre 2006

Benjamin Huard

Contents

1	Introduction	1
1.1	Interactions between electrons in metals	3
1.1.1	Theoretical and experimental status before this work . .	3
1.1.2	Intensity of Coulomb interaction	5
1.1.3	Effect of magnetic impurities on energy exchange between electrons	6
1.2	Josephson effect through a short coherent conductor	8
1.3	Asymmetric current fluctuations	11

Part I Interactions between electrons in metals

2	Phase coherence and weak localization	17
2.1	Weak Localization	18
2.1.1	Diffuson and Cooperon	18
2.1.2	Basic weak localization effect	20
2.1.3	Coupling to dynamic degrees of freedom: phase coherence time	22
2.1.4	Spin-orbit coupling	23
2.1.5	Magnetoresistance: a direct way of measuring the weak localization effect.	25
2.1.6	Magnetoresistance measurements	26
2.2	Phase coherence time limitations due to interactions	32
2.2.1	Coulomb interaction	32
2.2.2	Electron-phonon coupling	36
2.2.3	Magnetic impurities	37
2.2.4	Summary of the results on phase coherence used in the interpretation of our experiments	42
2.3	Experimental results and open questions	44
2.3.1	Quantitative analysis of the magnetic impurity concentration	44

2.3.2	Which value for the spin S does enter in the spin-flip rate ?	45
2.3.3	Conclusions	46
3	Energy relaxation experiments	49
3.1	Semiclassical approach to transport	50
3.2	Link between the distribution function and interactions between electrons	51
3.2.1	Weak interaction regime	51
3.2.2	Strong interaction regime	52
3.2.3	Intermediate regime	53
3.3	Measurement of the distribution function by tunneling spectroscopy	54
3.3.1	Tunneling rate in case of a superconducting probe	54
3.3.2	Tunneling rate in case of a resistive probe	57
3.4	Inelastic processes limiting the lifetime of electrons	64
3.4.1	Coulomb interaction between electrons	64
3.4.2	Electron-phonon interaction	71
3.4.3	Paper on the Intensity of Coulomb interaction between quasiparticles in diffusive metallic wires	73
3.4.4	Comments on the paper	91
3.4.5	Interactions mediated by magnetic impurities	92
3.4.6	Paper on the Effect of magnetic impurities on energy exchange between electrons	96
3.4.7	Comments on the paper	105
3.5	Conclusions	108

Part II Mesoscopic Josephson effects

4	Landauer formalism	113
4.1	Scattering approach	113
4.2	PIN of various conductors	114
4.3	Limitations of Landauer formalism	116
5	Josephson effect through a coherent conductor	117
5.1	Mesoscopic superconductivity	118
5.1.1	Bogoliubov-de Gennes theory for superconductivity	118
5.1.2	Andreev reflection	119
5.1.3	Andreev bound states	121
5.1.4	Measurable quantities deduced from the Andreev spectrum	123
5.2	Current-phase relation measurement	128
5.2.1	Josephson junction dynamics	129
5.2.2	Current-phase relation measurement	137

5.2.3	I-V characteristics	138
5.2.4	Current-phase relation, theory versus experiment	143
5.2.5	Origin of the asymmetry in $I_b^{I_{exp}}(\varphi)$	154
5.2.6	Another method to measure the current-phase relation	155
5.3	Measurement of the phase-inductance relation	158
5.3.1	Principle of the measurement	158
5.3.2	Comparison with theory at zero temperature	163
5.4	Conclusions	164

Part III Asymmetric current fluctuations

6	Full Counting Statistics	167
6.1	Generating function formalism	168
6.1.1	General definitions	168
6.1.2	Derivation of the generating function in the Keldysh formalism	169
6.1.3	Link with the spectral density of noise	171
6.2	Application of the Full Counting Statistics theory to coherent conductors	172
6.2.1	General case	173
6.2.2	Tunnel junction	175
6.3	Full counting statistics for incoherent conductors	176
6.3.1	Thermalized conductor	176
6.3.2	Diffusive wire	177
7	Josephson junction as a current noise detector	179
7.1	Josephson junction in a noisy environment	180
7.1.1	Setup of the measurement device	180
7.1.2	Ideal case	181
7.1.3	Simple signature of non-Gaussian noise	182
7.2	Characterization of the circuit	182
7.2.1	NIS junction properties	182
7.2.2	Josephson junction properties	184
7.2.3	Summary of the electrical quantities	188
7.3	Influence of the current noise in the tunnel junction on the switching dynamics	189
7.3.1	Gaussian noise	189
7.3.2	Beyond Gaussian noise	198
7.4	Classical escape dynamics of a Josephson junction in presence of non-Gaussian noise	204
7.4.1	Numerical simulations	204
7.4.2	Perturbative calculation	205
7.5	Comparison between theory and experiment	207
7.6	Conclusions	212

Part IV Experimental techniques

8	Sample processing	217
8.1	Optical lithography	217
8.1.1	Mask fabrication	217
8.1.2	Metallic layers	218
8.1.3	Dielectric layers	219
8.2	E-beam lithography	220
8.2.1	Principle	220
8.2.2	Resists	221
8.2.3	Exposure	222
8.3	Metal deposition	224
8.3.1	Cleaning	225
8.3.2	Tunnel junctions	225
8.4	Ion implantation	225
8.4.1	Apparatus	225
8.4.2	Calculation of the concentration	226
9	Low temperature measurements	229
9.1	Sample holder	229
9.1.1	Electron-electron interactions experiments	229
9.1.2	Full counting statistics (FCS) experiments	229
9.1.3	Atomic contact experiments	230
9.2	Noise filtering	231
9.2.1	Attenuating and amplifying a signal	232
9.2.2	Band selection	232
9.3	Technical schemes and pictures of the circuits	232
9.4	Fabrication of each particular sample	239
9.4.1	Experiments of chapters 2 and 3	239
9.4.2	Experiments of chapter 5	240
9.4.3	Experiments of chapters 7	240
A	Fundamental constants and formula	243
A.1	Fundamental constants and material parameters	243
A.2	Useful formula	244
A.2.1	Spin calculations	244
A.2.2	Fermi functions	245
B	Specific calculations	247
B.1	Heat equation	247
B.1.1	Electrons temperature in a hot wire	247
B.1.2	Heating of the pads	248
B.2	Sensitivity of the Relax experiments	249
B.3	Diffusive conductor transmissions	252

B.4	Critical current through a short conductor	252
B.4.1	Single channel	252
B.4.2	Diffusive conductor	253
B.5	Switching current at first order	254
B.6	Reflectometry transition	255
B.7	Resonant activation	256
B.7.1	Function $f(Q,x)$	256
B.8	Amplitude of the micro-wave current as a function of the power	256
B.9	Full Counting Statistics for a coherent metallic wire	257
B.9.1	Normal leads (N-wire-N)	257
B.9.2	One superconducting lead (N-wire-S)	258
C	Experimental stuff	261
C.1	Electrical properties of the discrete elements in the counting experiment	261
C.2	Plasma frequency of a Josephson junction as a function of s . .	262
C.3	Small field effect on the conductance of an NIS junction	263
D	Translation between the notations of this work and previous ones	265
	References	267
	Index	275