

SUPRALEDNING

FÖRELÄSNINGS-
ANTECKNINGAR

I

LÅGTEMPERATURFYSIK

AV

TORD CLAESON

FYSISKA INSTITUTIONEN
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
GÖTEBORGS UNIVERSITET

GÖTEBORG

1984

SUPRALEDNING

(del av kurs i Lågtemperaturfysik, CTH/GU)
anteckningar till föreläsningar hållna av
TORD CLAESON

Fysiska institutionen, CTH/GU

Dessa anteckningar är en sammanfattning av föreläsningarna över supraledningsavsnittet. Fylligare kommentarer ges på föreläsningarna. Ytterligare material kommer att delas, eller lånas, ut. Dessutom bör läsaren komplettera sin kunskapsinhämtning genom att konsultera en del av den rika litteratur, som finns. Böcker och översikter kan lånas från föreläsarens bokhylla, Fysik- eller Chalmersbiblioteket.

En fullständig täckning av supraledningsfältet eftersträvas ej. Vi diskuterar elementära fakta och modeller samt koncentrerar behandlingen till sådana aspekter och idéer, som kommer tillbaka inom andra grenar av fysiken. Laborationer rörande tunnel- och Josephsoneffekter kompletterar föreläsningarna - supraledningsdelen av den lågtemperaturlaboration, som ingår i grundkursen i fasta tillståndets fysik, förutsätts vara känd. Övningsuppgifter kommer att komplettera framställningen; vissa avsnitt lämnas helt till övningsexemplen.

För att spara på kopieringskostnaderna är dessa anteckningar komprimerade - det gäller både innehåll och typografi. Eftersom stoffet omarbetas successivt kan utskriften, och i vissa fall även beteckningarna, variera mellan de olika kapitlen. Läsaren bes ha överseende med detta och dessutom uppmanas han, att framföra (konstruktiv) kritik till gagn för nästa omgång.

Preliminärt disponeras föreläsningstiden på följande sätt:

<u>Föreläsning</u>	<u>Innehåll</u>	<u>Kapitel</u>
1	Introduktion, grundläggande egenskaper	I
2	Termodynamik, tvåvätskemodell, elektrodynamisk respons, Landaus och Pippards modeller	II, III
3	Supraledare i magnetiska fält, typ I/typ II, intermediärt tillstånd, Ginzburg-Landaus teori	IV, V, VI
4	Mikroskopisk teori (BCS)	VII
5	Tunnelfenomen	VIII
6	Utvidgningar av BCS-teorin, systematiska trender, parbrytande mekanismer, högtemperatursupraledare	IX, X, XI
7,8	Makroskopiska kvanteffekter, högfrequensegenskaper, Josephsoneffekterna	XII
9	Tillämpningar av supraledande tunnelfeffekter; SQUID, dator, högfrequensdetektorer	XII
10	Tillämpningar, sammanfattning, avancerade koncept, reserv	

Om möjligt, skulle jag vilja bedriva undervisningen i diskussionsform, då svåra, särskilt intressanta eller dunkla punkter tas upp. Översikter skulle då ges, men detaljer lämnas till självstudium. Detta fordrar dock en aktiv medverkan från åhörarna, så att de är förberedda och diskussionshungriga. Kursavsnittet kan, i stor utsträckning, utformas efter deltagarnas önskemål. Seminarieuppgifter och projektarbeten kan ges.

Lycka till med studierna!

Göteborg i november 1983

Tord Claeson
Tord Claeson

SUPRALEDNING

föreläsningssanteckningar

Innehållsförteckning

I.	INLEDNING	1
1.	Historik	1
2.	Resistansens sprängvisa försvinnande	3
3.	Supraledning, en universell egenskap	4
4.	Kritiskt fält	6
5.	Meissnereffekt	8
6.	Penetrationsdjup	9
7.	Specifikt värme	10
8.	Termisk ledningsförmåga	11
9.	Termoelektriska effekter	12
II.	TERMODYNAMISKA BETRÄKTELSE R FÖR EN SUPRALEDARE	13
1.	Supraledare i magnetiskt fält	13
2.	Fria energin från specifika värmes	15
3.	Två-vätskemodellen	18
4.	Växelströmsresistans tolkad i två-vätskemodell	18
III.	ELEKTROMAGNETISK RESPONS	20
1.	Perfekt ledare	20
2.	Londons teori	21
3.	Kvantiserat flöde	22
4.	Koherenslängd	22
5.	Sammanfattning	25
IV.	SUPRALEDARE I MAGNETISKA FÄLT	26
1.	Geometriberoende	26
2.	Intermediära tillståndet	28
3.	Observationer av intermediära tillståndet	29
4.	Ytenergi	30
5.	Typ II supraledning	31
V.	GINZBURG-LANDAU S TEORI	33
1.	Ginzburg-Landau s ekvationer	35
2.	Karakteristiska längder	36
3.	κ	38
4.	Ytenergi för domänväggar	38
5.	Nukleering av supraledning vid H_{c2}	39
6.	Gitter av flödestrådar	40
7.	Ytsupraledning	41
8.	Magnetiskt fasdiagram för typ II supraledare	41
9.	Närhetseffekt - överlagrade filmer i metallisk kontakt	41
10.	Fluktuationer	43-44

VI.	KRITISKA STRÖMMAR. PRAKTISKA SUPRALEDARE	46
1.	Kritisk ström i tråd	46
2.	Intermediärt tillstånd orsakat av ström	47
3.	Termisk propagation av normalt område	47
4.	Kritisk ström för typ II supraledare	47
5.	Praktiska högfältssupraledare	47
	<u>App:</u> J.A. Catterall: High-Field Superconducting Materials	49
VII.	MIKROSKOPISK TEORI FÖR SUPRALEDNING	59
1.	Egenskaper som leder till modellval	59
2.	Strategi för modellval	61
3.	Coopers problem - ett par	61
4.	Attraktiv potential	63
5.	BCS-teorin, sammanfattning	65
	<u>App:</u> T. Claeson, S. Lundqvist: The Microscopic Theory of Superconductivity - Verifications and Extensions	67
VIII.	TUNNELEXPERIMENT	97
1.	Grundläggande ekvationer	97
2.	Supraledande tunnling	97
3.	Temperaturberoende energigap och $2\Delta/kT_c$	97
4.	Anisotropier	97
5.	Tomasch-effekt	98
6.	Foton- och fononstimulerad tunnling	98
7.	Multipartikel-tunneleffekter	98
8.	Fononeffekter. Stark koppling hos supraledare.	98
9.	Tunnelspektroskopi. Föroreningar i barriären.	98
10.	Punktkontakt. Vakuumtunnling.	98
	<u>App:</u> R. Meservey, B.B. Schwartz: Density of States by Tunneling in Superconductors	100
	<u>App:</u> J.R. Schrieffer: Single Particle Tunneling in Superconductors	108
IX.	SYSTEMATIK HOS T_c I PERIODISKA SYSTEMET	117
1.	Icke-övergångsmetaller	117
2.	Övergångsmetaller	118
3.	Isotopeffekten	118
X.	SUPRALEDNING OCH MAGNETISM	119
1.	Utspädda legeringar. Positiv (ferromagnetisk) växelverkan	120
2.	Gaplös supraledning	121
3.	Utspädda legeringar; negativ växelverkan	122
4.	Utspädda legeringar med inre fält. Spinnglas.	122
5.	Pauli-begränsning av kritiska fältet	123

6.	Magnetiskt ordnade strukturer - ferromagnetism kontra supraledning	124
7.	Anti-ferromagnetiska supraledare	126
XI.	JAKT PÅ HÖGTEMPERATURSUPRALEDARE	127
1.	A15 supraledare	128
	<u>App:</u> J.R. Schrieffer: Theories of Enhancement Effects	130
XII.	MAKROSKOPISKA KVANTEFFEKTER. JOSEPHSONEFFEKTERNA	135
A.	Supraledning som makroskopiskt kvantfenomen	135
1.	Cooper-par	135
2.	Koherenslängd	135
3.	Vågfunktion för elektronpar	137
4.	Resistanslöshet	137
5.	Inverkan av magnetiskt fält	137
6.	Kvantiserat flöde	138
7.	Elektrodynamiska ekvationer	139
8.	Elektromagnetisk respons	139
	a. dc, lågfrekvens	140
	b. rf och mikrovåg	140
	c. normalkonduktans	141
9.	Ytimpedans	141
10.	Transmissionsledning	143
11.	Mycket höga frekvenser	144
B.	Svagt kopplade supraledare	145
12.	Josephsonkvationerna	145
13.	Olika typer av element	146
14.	Jämförelse supraledare/svag länk	148
15.	Magnetiska fält	148
16.	Kvantinterferens mellan två punktformiga övergångar	148
17.	Kvantinterferens inom en övergång	150
18.	Stora tunnelövergångar	151
19.	Växelströmseffekten	152
	a. likspänning	152
	b. applicerade mikrovågor	153
	c. självinducerade steg	155
20.	Vågekvation för fasdifferens	155
	a. Meissnereffekt för svag länk	156
	b. plasmaoscillationer	156
	c. vågutbredning	157
21.	Bindningsenergi	157

22. Några exempel	159
A. $V = 0, I = 0, B \neq 0$	159
B. $V = 0, I \neq 0, B \neq 0$	159
C. $V \neq 0, B \neq 0$	161
23. Olika strömbidrag	162
24. RSJ-modellen; spänning-resp. strömkälla	163
25. I-V-karakteristik	164
a. parström	164
b. resistivt shuntad övergång	164
c. inverkan av kapacitans	167
d. tunnelövergång	168
26. Josephsoninduktans	169
27. Mekaniska modeller	169
28. Elektroniska analoger	171
29. Solitoner i långa övergångar	171
30. Tillämpningar	175
31. SQUID, kvantinterferometer	175
a. dc-SQUID	176
b. rf-SQUID	180
c. flödestransformator	184
d. användningsområden	184
32. Datortillämpningar	187
a. logiska kretsar	187
b. minneselement	191
c. kraftförsörjning	192
d. system	192
33. Högfrekvenstillämpningar	193
a. videodetektor	194
b. Josephsonblandare	194
c. parametriska förstärkare	194
d. kvasipartikelblandare	195
e. summering av prestanda	195
34. Bibliografi	196

Kommentar: Avsnitten 1-11 är repetition av tidigare behandlat stoff. 12-20, 22-25 är centrala avsnitt. Tillämpningar behandlas översiktligt i 29-33. En utförligare behandling av tillämpningar ges i utdelade (lånade) uppsatser.