

超伝導

Tinkham: Introduction to Superconductivity (McGraw Hill, 1996)

P.G.de Gennes: Superconductivity of Metals and Alloys
(Benjamin, 1966)

K.Fossheim and A.Sudbo:
Superconductivity: Physics and Applications (John Wiley, 2004)

中嶋貞雄: 超伝導入門 (培風館, 1974)

恒藤敏彦: 超伝導・超流動 (岩波書店, 1993)

H																	He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra	Ac															

Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

- Al** 通常の結晶形で超伝導になる物質
- Si** 高圧下やアモルファス状態など特殊な条件下でのみ超伝導になる物質
- Cu** 超伝導相が見つかっていない物質

図 1.1 超伝導元素を表す周期表.

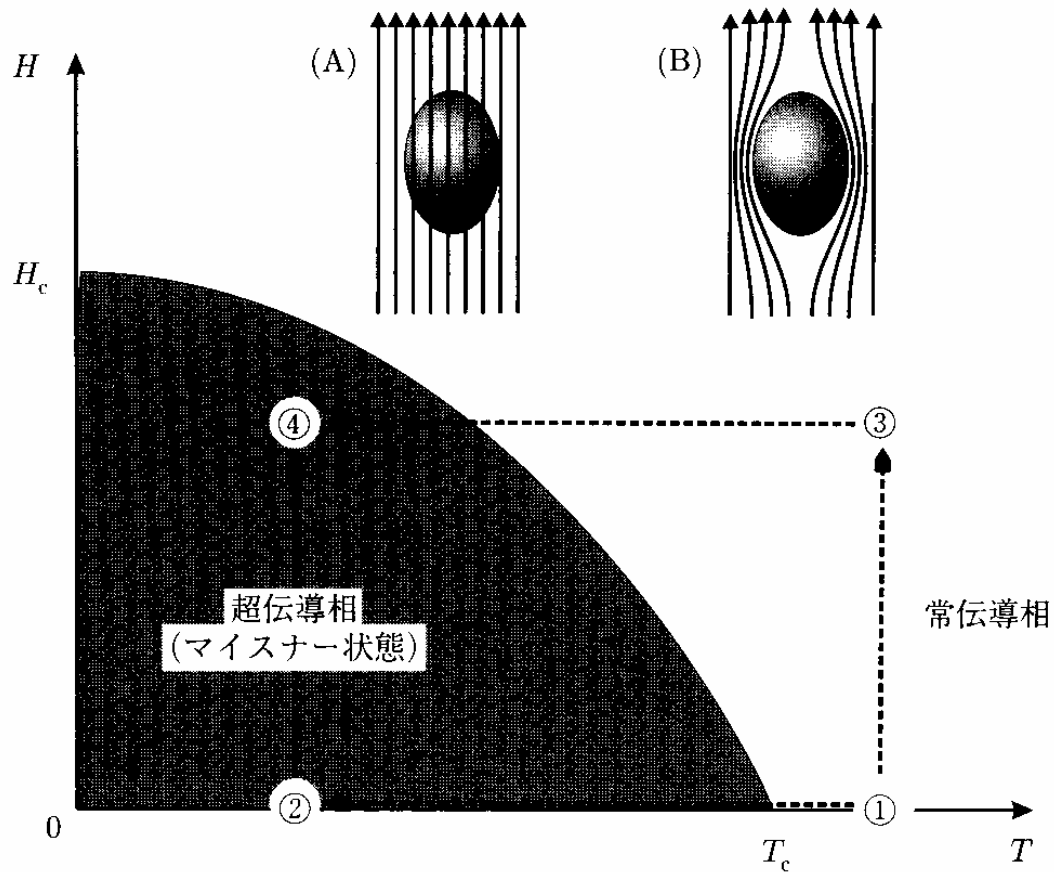


図 1.2 温度-磁場平面上的超伝導体の相図. 常伝導相の①という点から出発して, 超伝導相の④という点に至る 2 つの経路が示してある. もしも超伝導体が「単なる完全導体」であったとすると, ①→②→④の経路で④に至る場合には外部磁場をかけてもそれを打ち消すような遮蔽電流が流れるため図 (B) のように磁場は排除されるが, ①→③→④の経路では③の時点で試料内部に侵入した磁場は④においても排除されないため, 図 (A) のような状況になってしまう. マイスナー相は熱力学的状態であるから, ④に至る経路の如何によらず図 (B) のような状況が実現される.

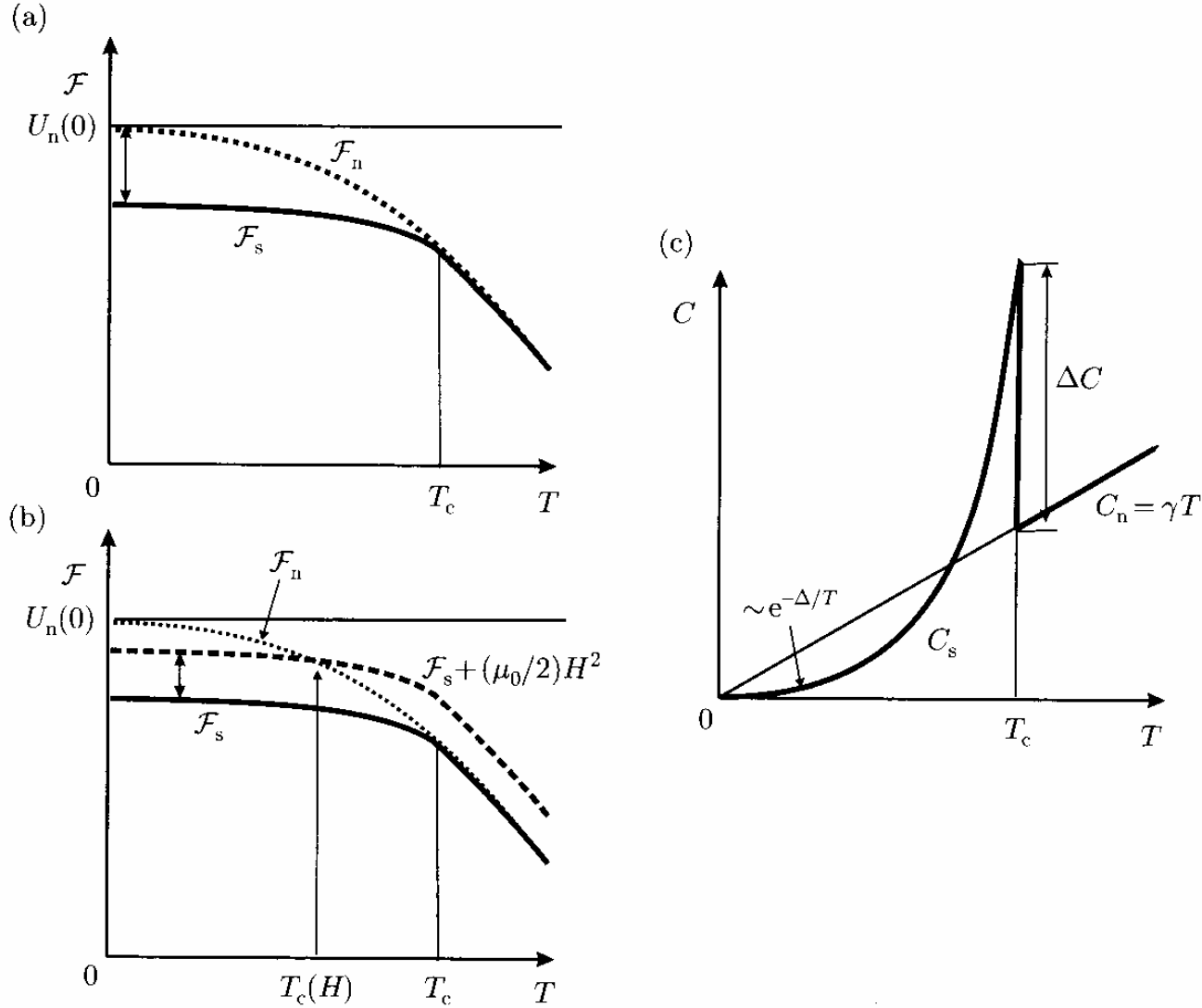


図 1.3 (a) ゼロ磁場における超伝導状態の自由エネルギー $\mathcal{F}_s(T)$ と常伝導状態の自由エネルギー $\mathcal{F}_n(T)$. (b) 磁場がかかった場合, $\mathcal{F}_s(T)$ は $(\mu_0/2)H^2$ だけ持ち上がる. $\mathcal{F}_n(T)$ との交点が $T_c(H)$ を与える. (c) 超伝導状態および常伝導状態の比熱.

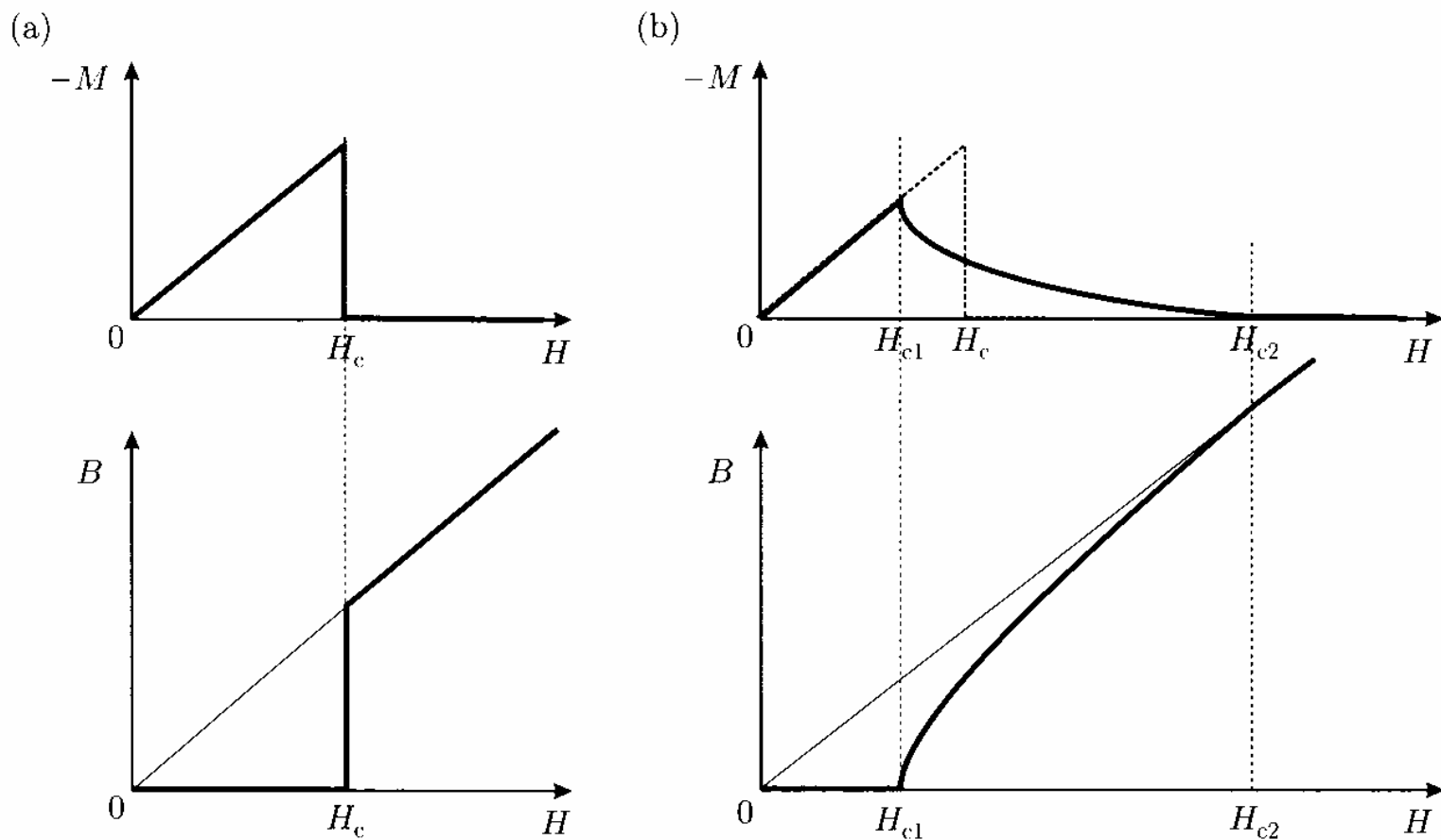


図 1.4 (a) 第 I 種超伝導体, および (b) 第 II 種超伝導体, の熱平衡磁化 M と内部磁束密度 B の外部磁場依存性.

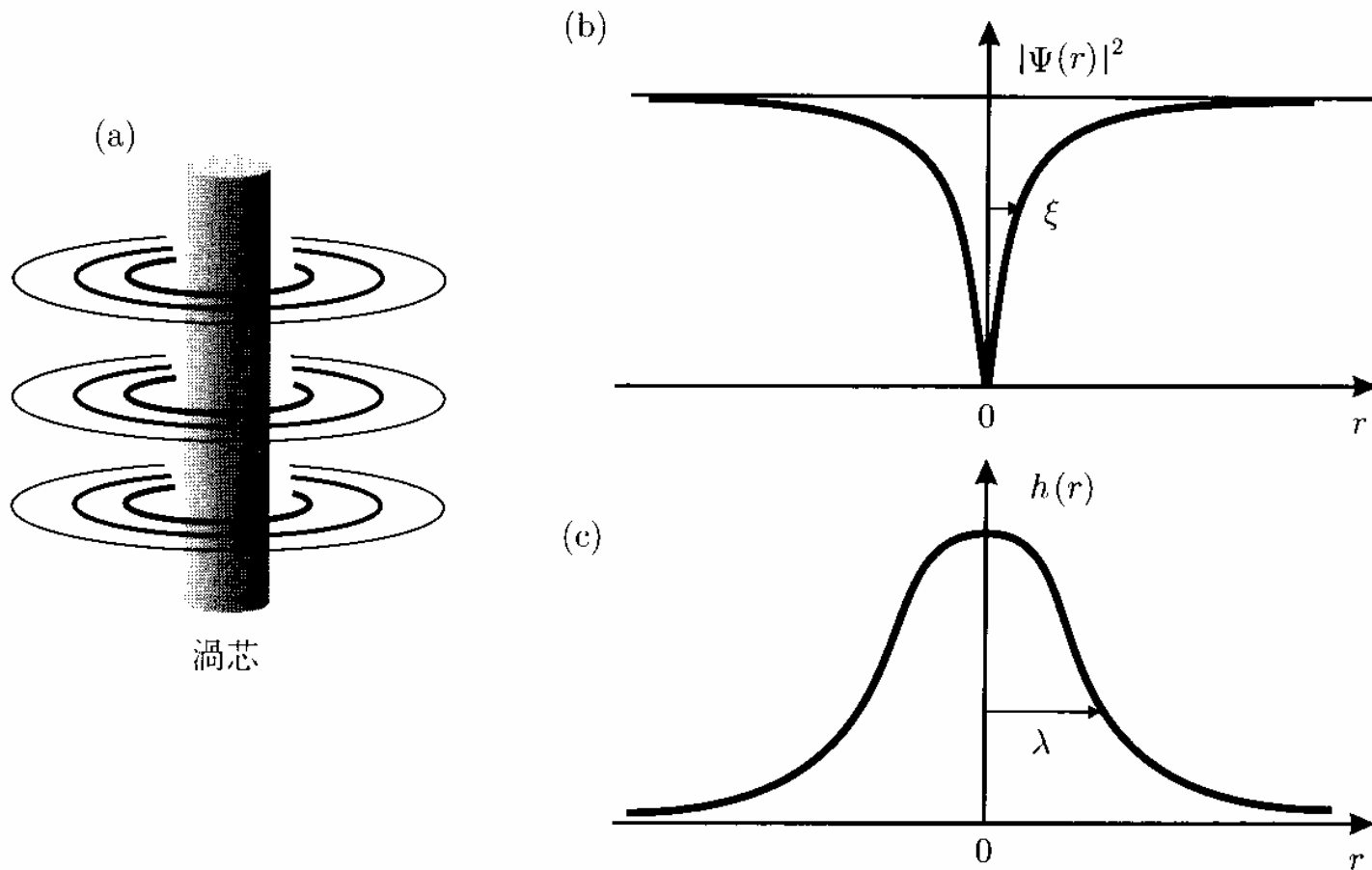


図 1.5 量子渦糸の構造. (a) 超伝導電流, (b) 秩序パラメーター, (c) 局所磁場, の動径方向分布.

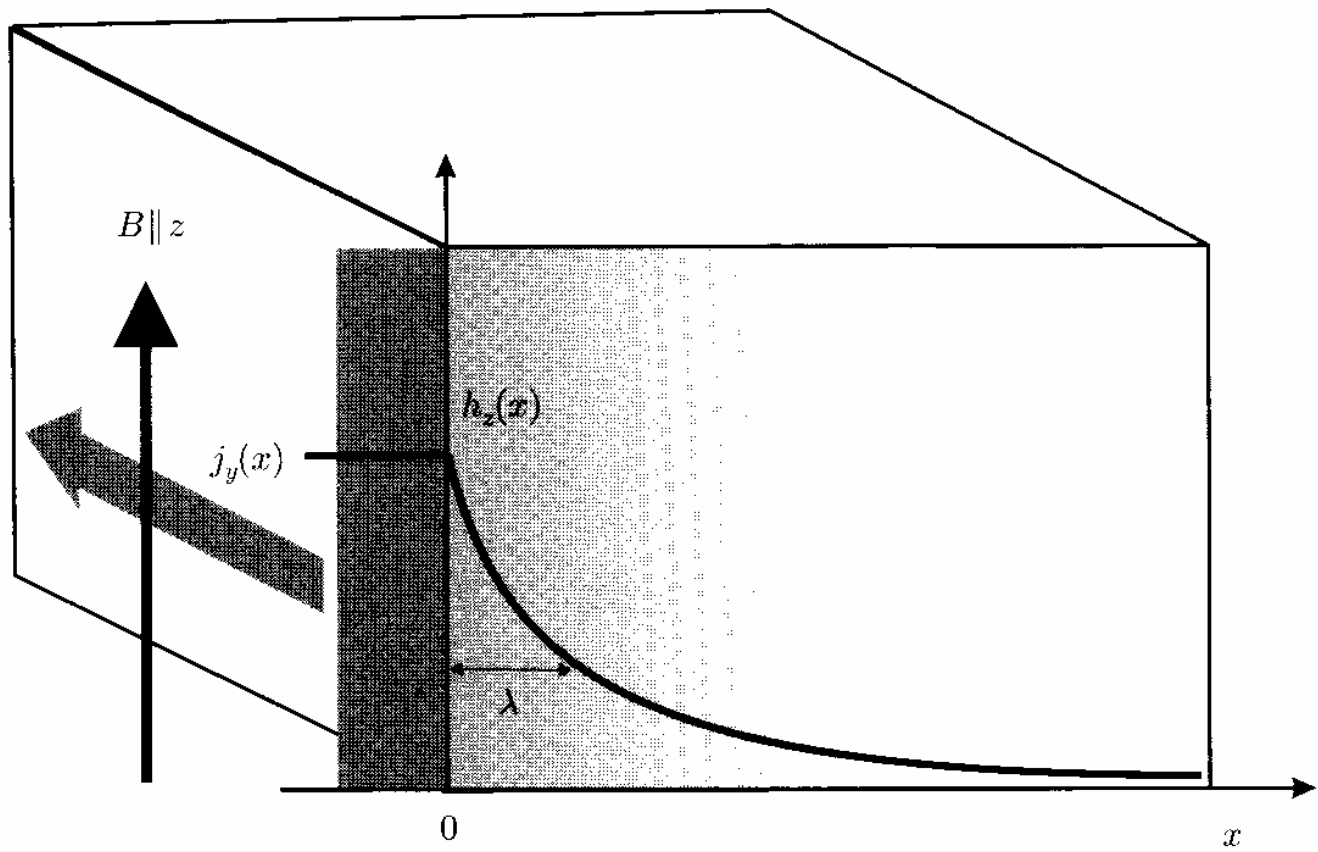


図 1.6 超伝導体の表面からの磁場の侵入.

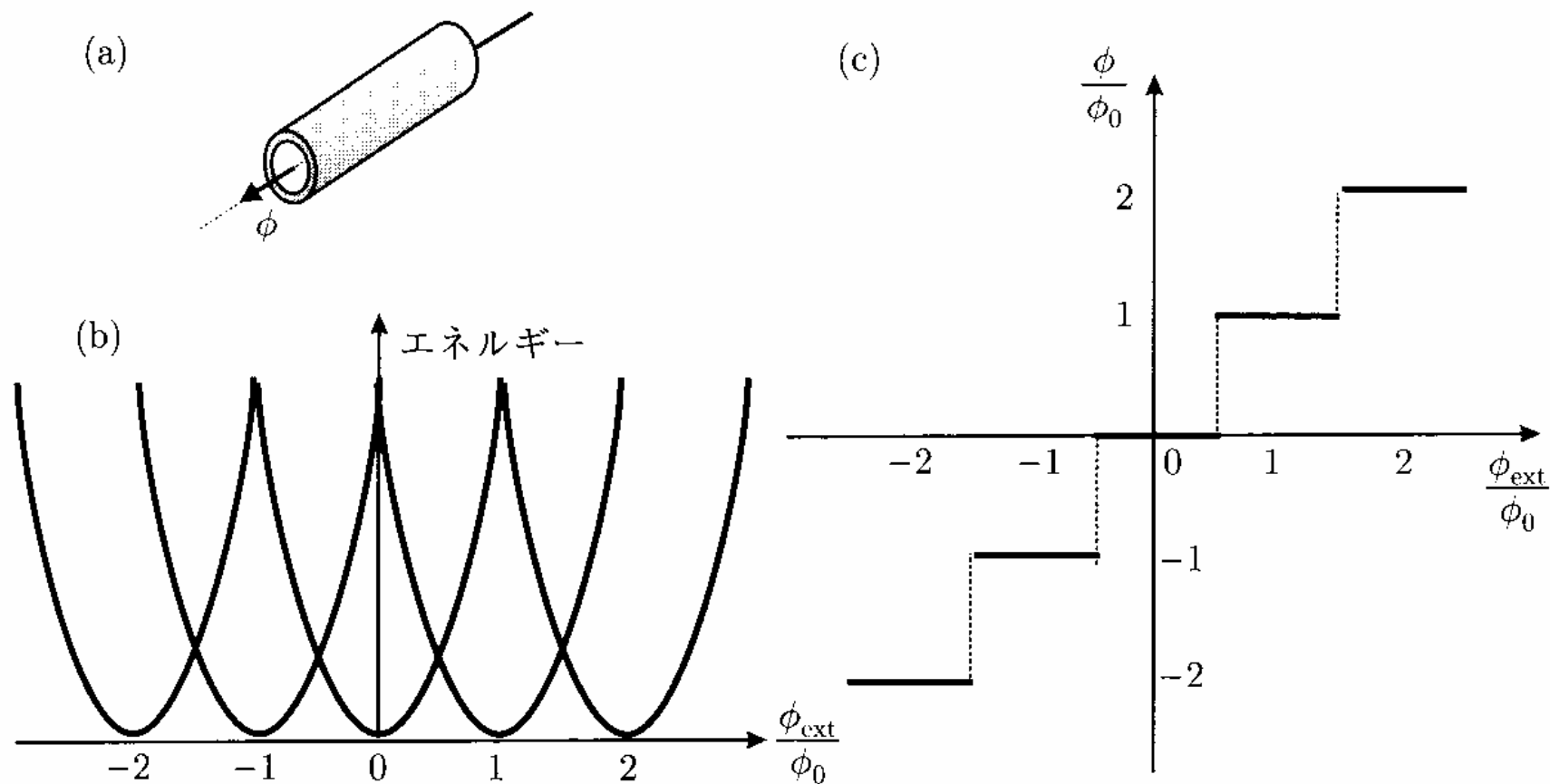


図 1.7 (a) 超伝導体の中空円筒を一様な外部磁場中に置いた系. (b) 系の自由エネルギーを外部磁束 ϕ_{ext} の関数として表したもの. (c) 外部磁束 ϕ_{ext} に対する, 円筒内部の磁束 ϕ の変化.

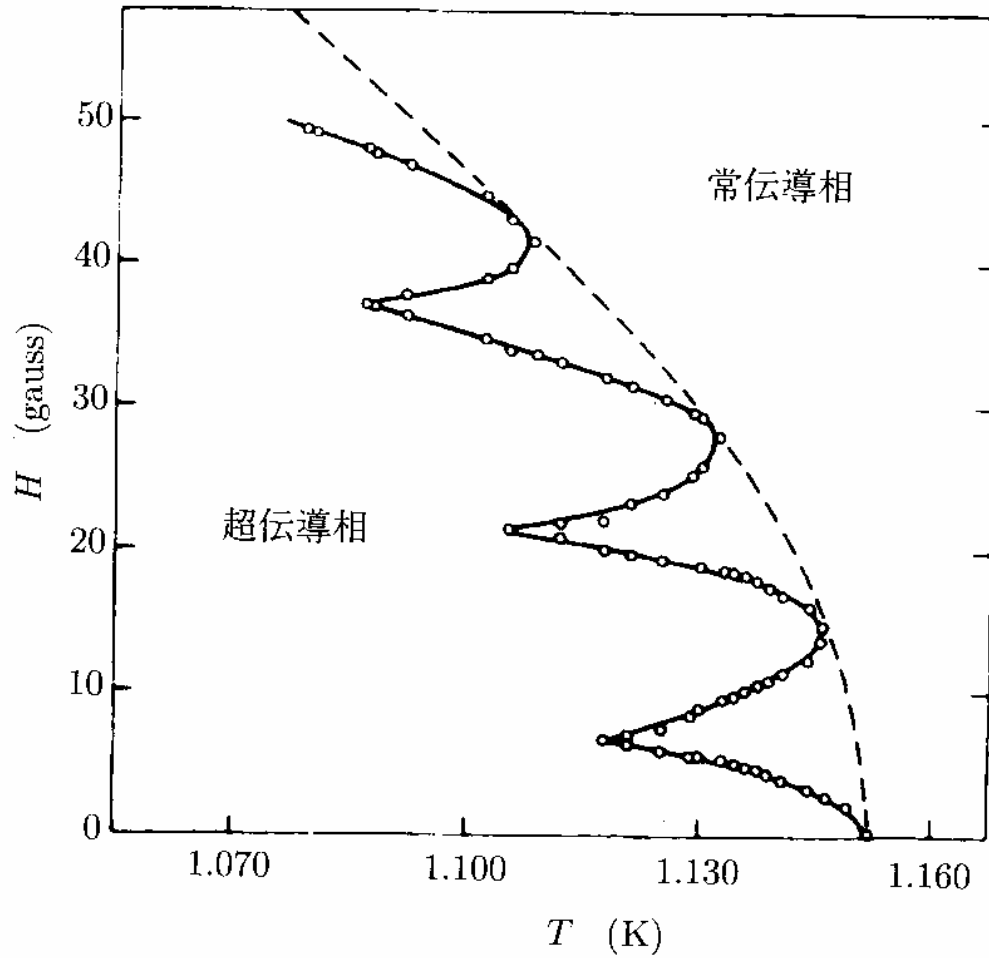


図 1.8 $1.32 \mu\text{m}$ 径のアルミニウムの中空円筒で観測されたリトル-パークス振動.
 [R. P. Groff and R. D. Parks, Phys. Rev. **176** (1968) 567] 振動
 周期は円筒の面積あたり磁束量子 1 本という磁束密度の値に対応している.

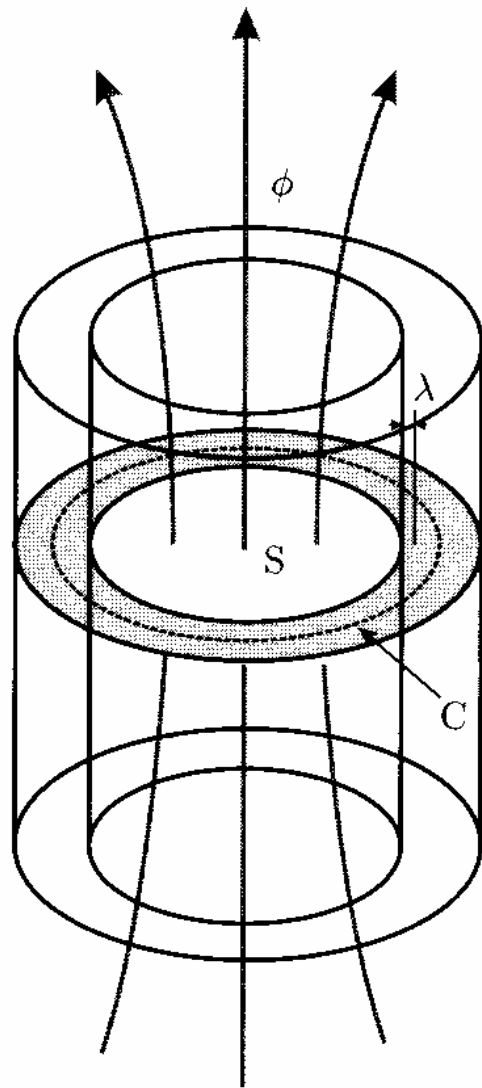
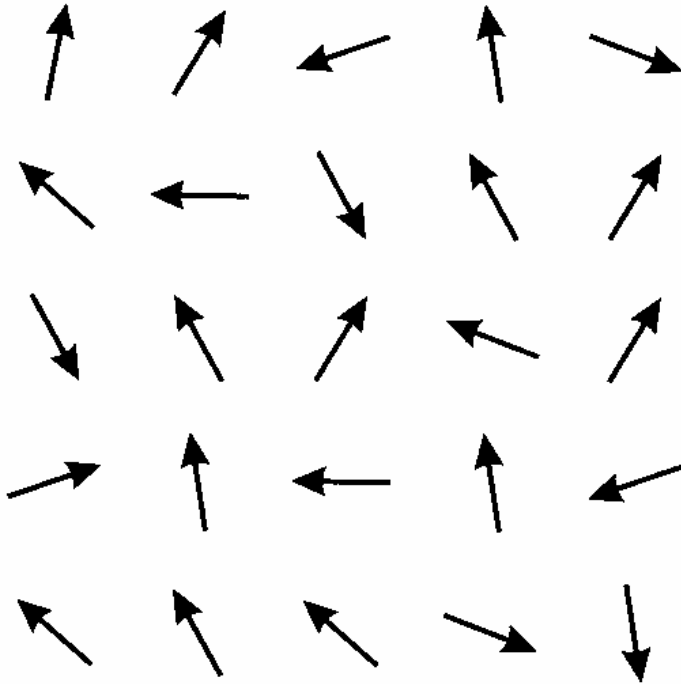


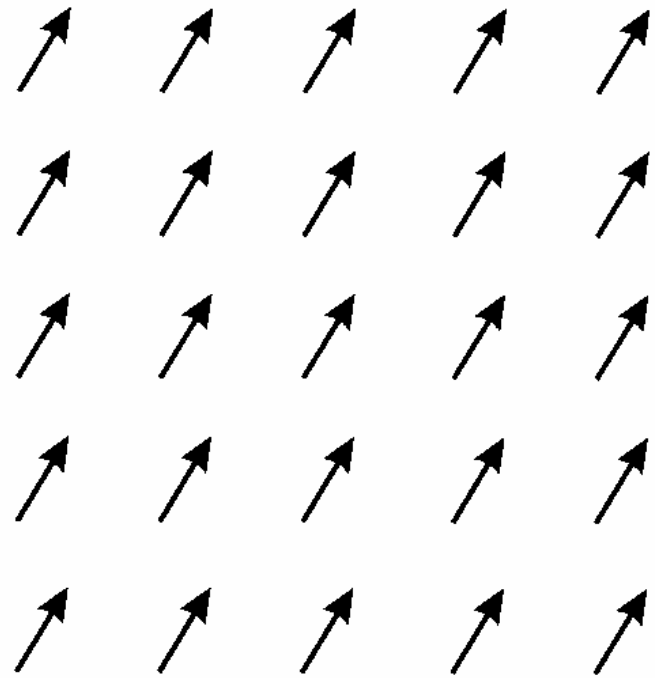
図 1.9 中空円筒の超伝導体における磁束の量子化. (1.18) 式の積分路 C は図中の破線のように表面から侵入長 λ よりも十分深く入ったところにとる.

(a)



$T > T_c$

(b)



$T = 0$

図 2.1 強磁性体の (a) 常磁性状態 ($T > T_c$), (b) 強磁性状態 ($T < T_c$). ここに示したのは $T = 0$ ですべてのスピンの向きがそろった強磁性の基底状態である.

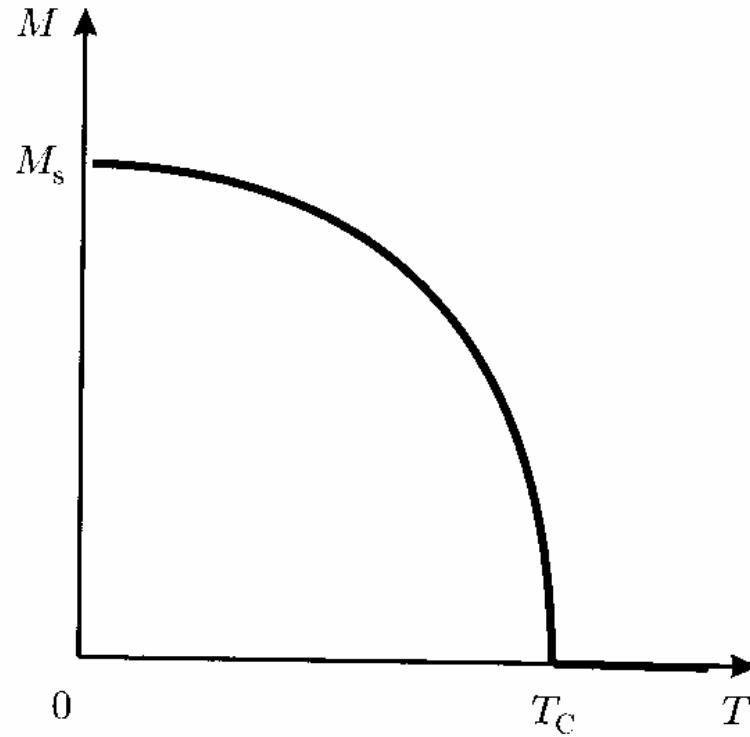


図 2.2 強磁性体の磁化 (秩序パラメーター) の温度変化. 転移点における秩序パラメーターの変化は連続的である. M_s はミクロな磁化がすべてそろった場合の磁化の大きさで, 飽和磁化と呼ばれる.

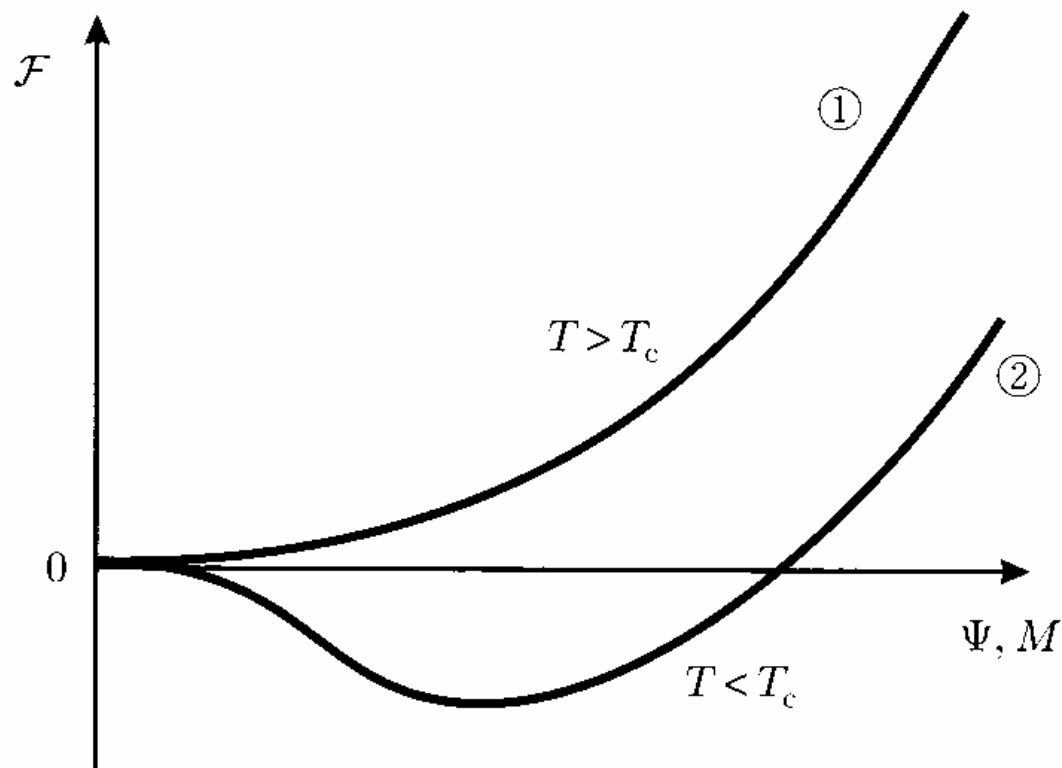


図 2.3 (2.1) 式 (および (2.4) 式) の自由エネルギー. 2つの曲線はそれぞれ, $T > T_c$, $T < T_c$ での関数形を表す. 横軸は秩序パラメーターを表し, 強磁性体では M , 超伝導体では Ψ がそれに当たる.

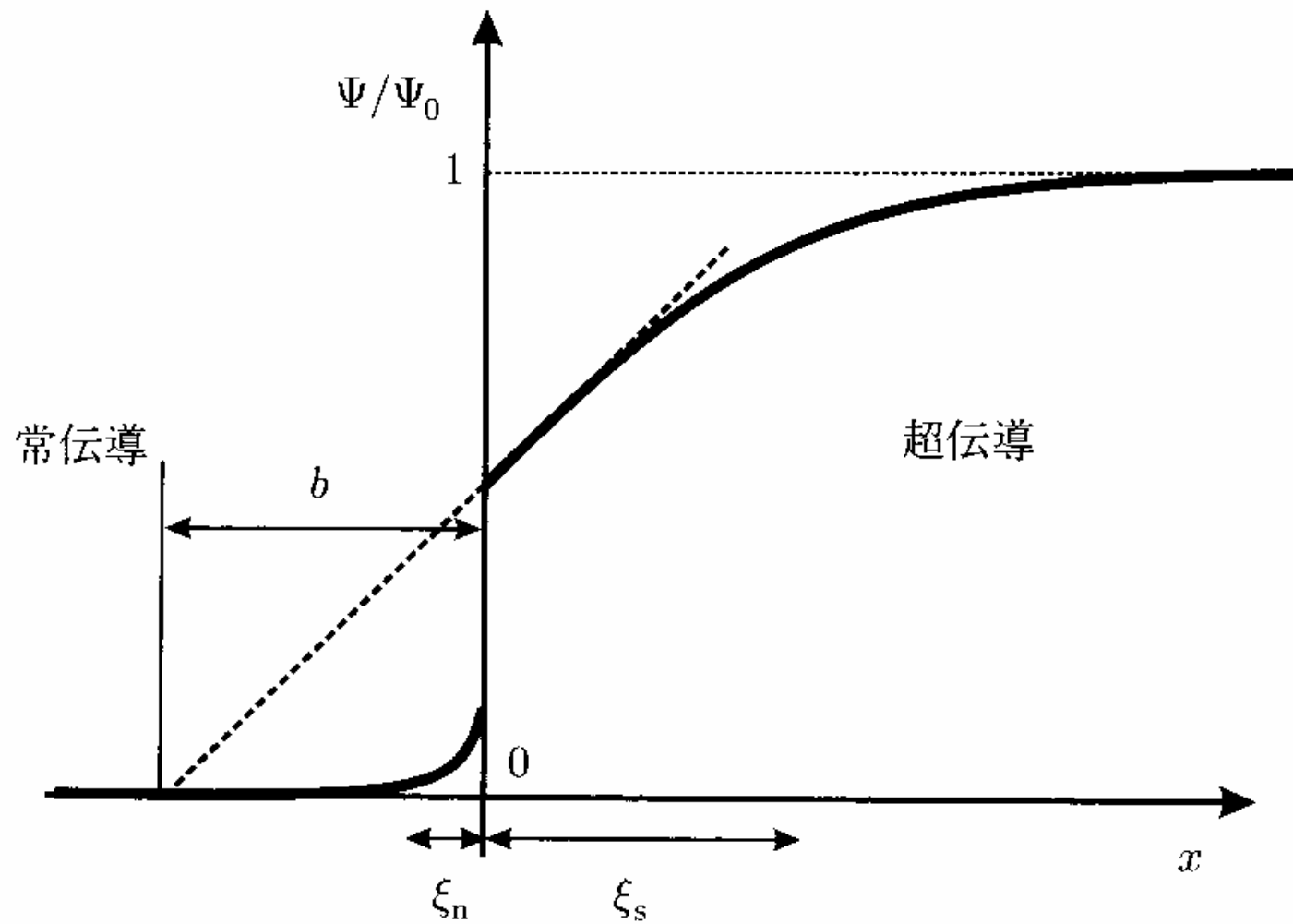


図 2.4 超伝導波動関数の境界条件.

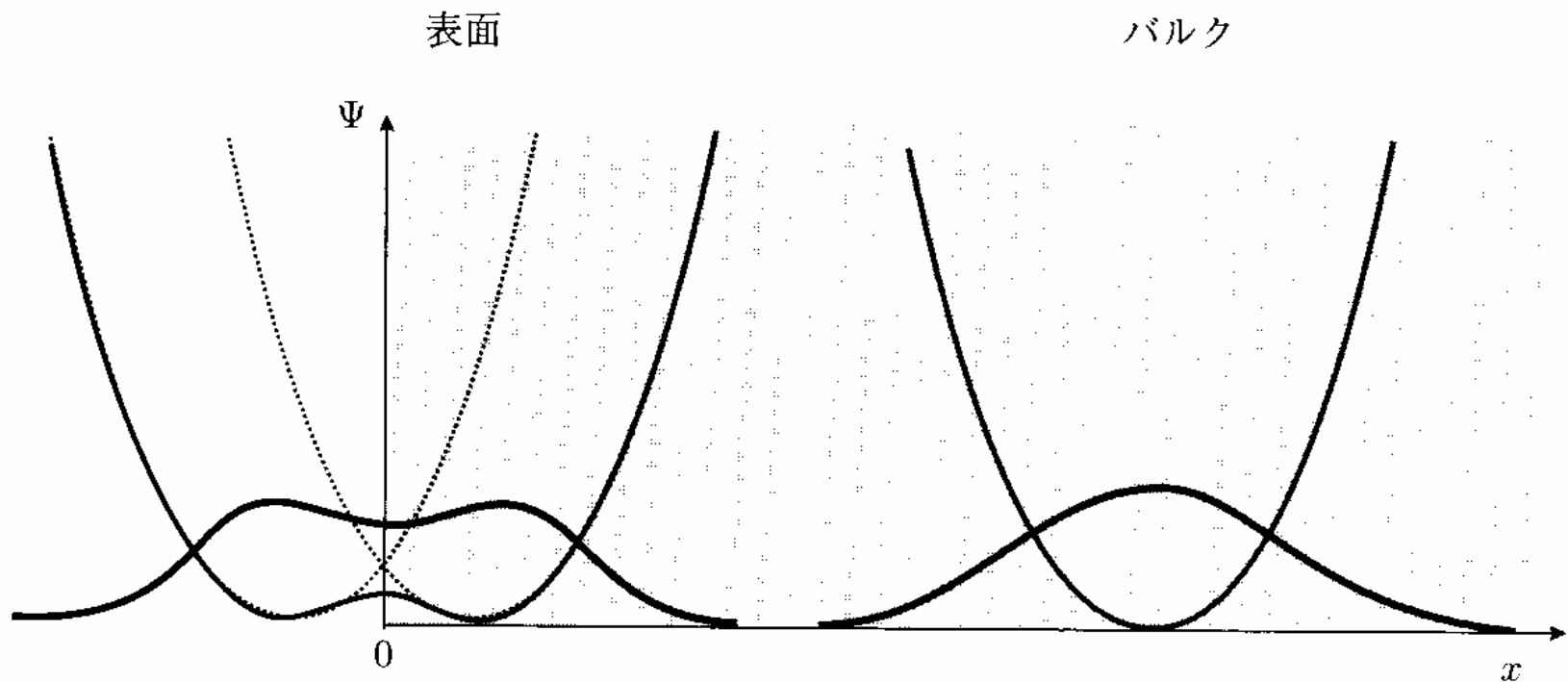


図 2.5 (2.27) 式に対応する調和振動子のポテンシャル. 中心座標 x_0 を表面から ξ 程度のところに置くと, 表面での境界条件によって放物線を折り返したような実効ポテンシャルになるため, バルクよりも低い固有値が得られる.

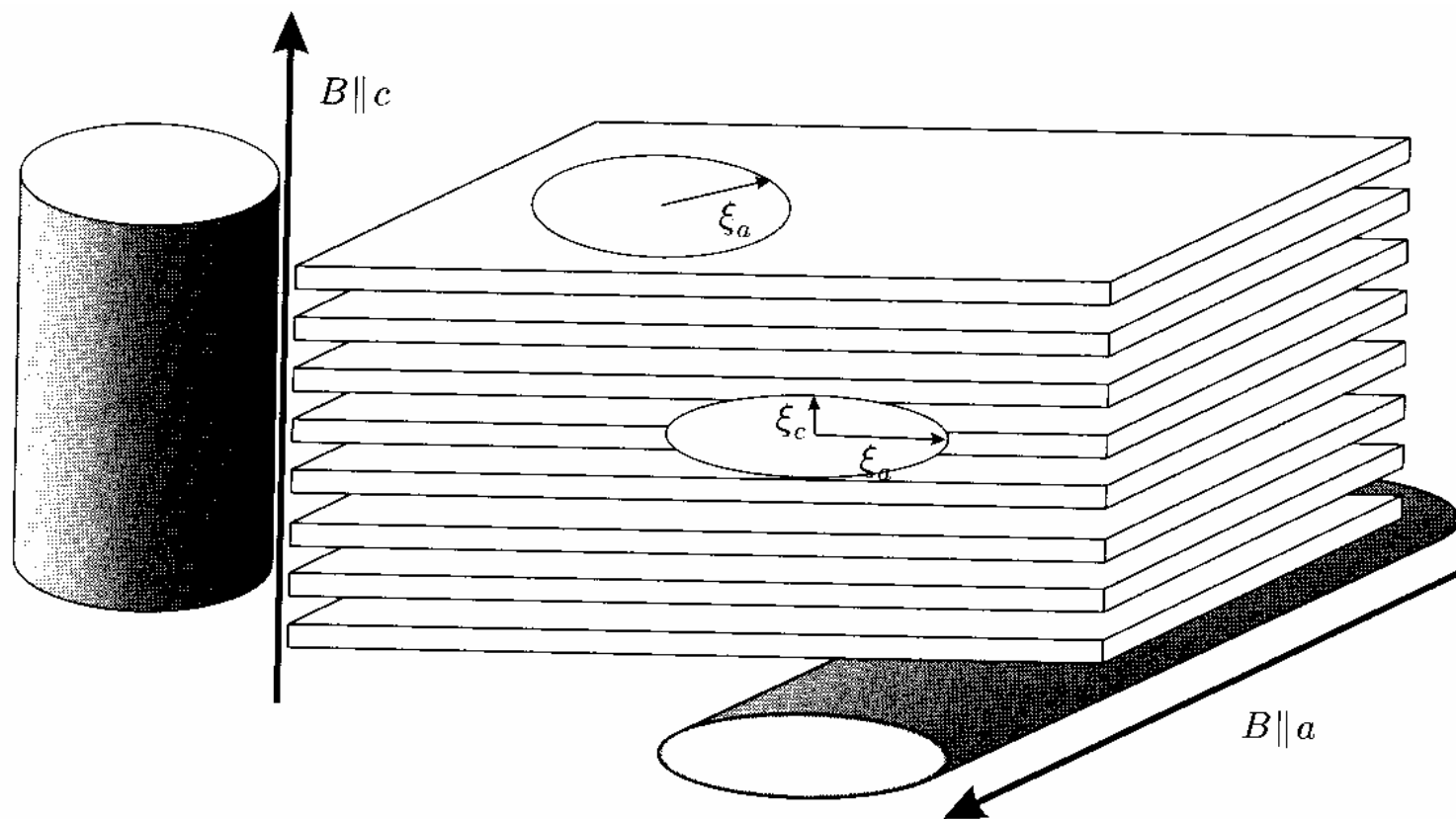


図 2.6 層状超伝導体における異方的な渦糸.

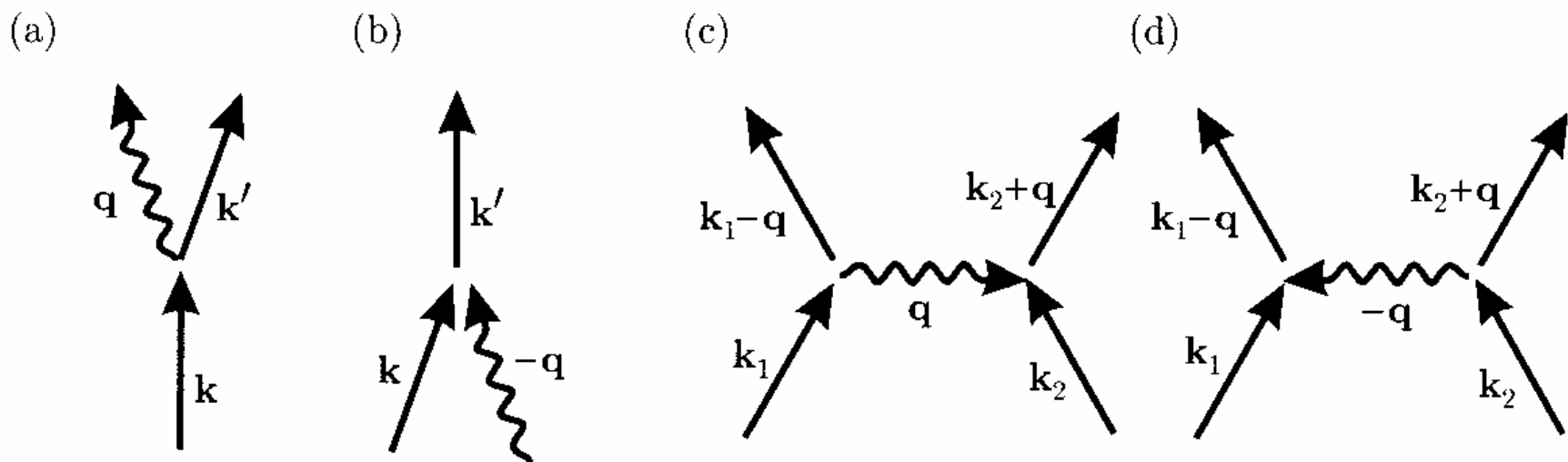


図 3.1 (a)(b) 電子フォノン散乱過程. (c)(d) フォノンを介した電子間相互作用.

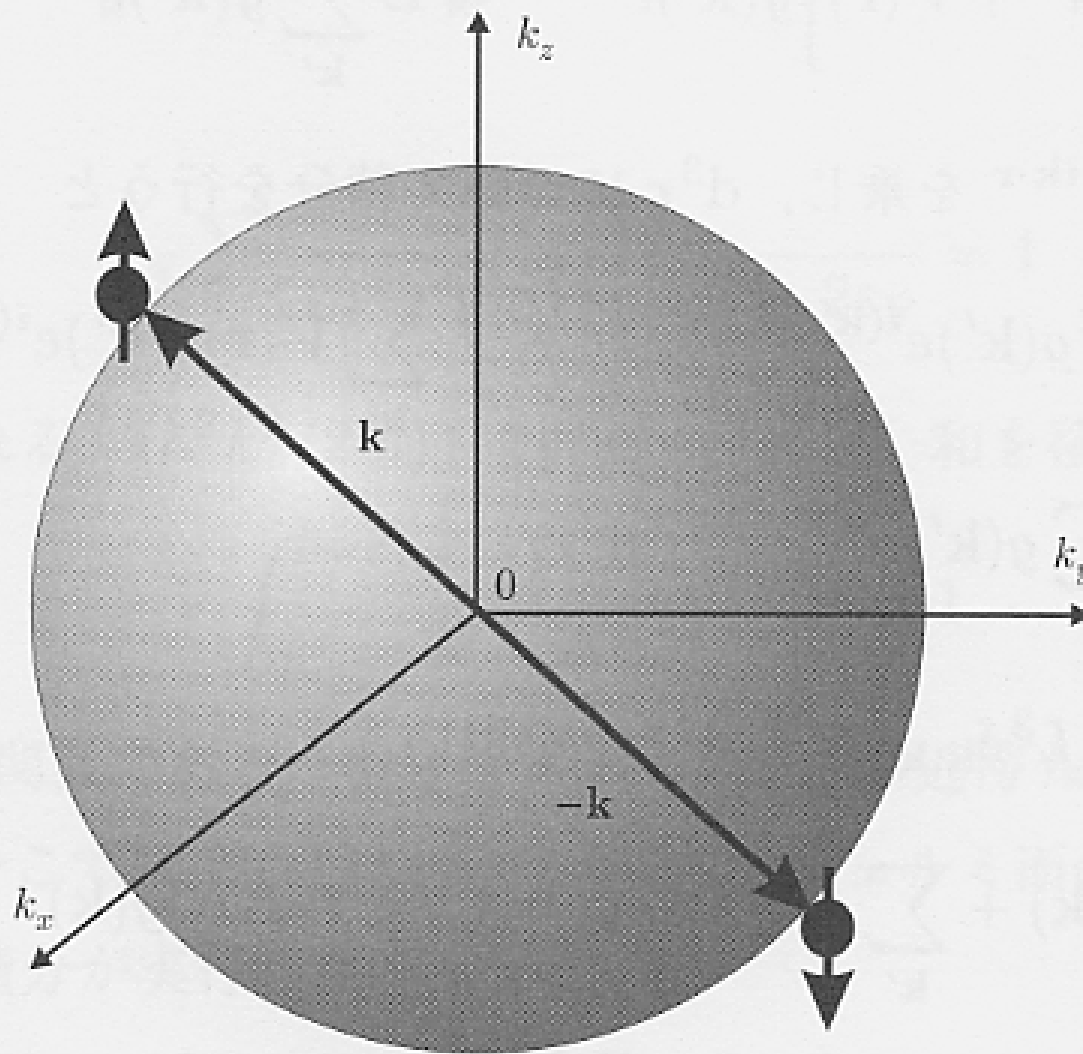


図 3.2 クーパー対の模式図. フェルミ面上の2つの電子 (\mathbf{k}, \uparrow) と ($-\mathbf{k}, \downarrow$) の間に引力が働く場合, それらはクーパー対を形成する.

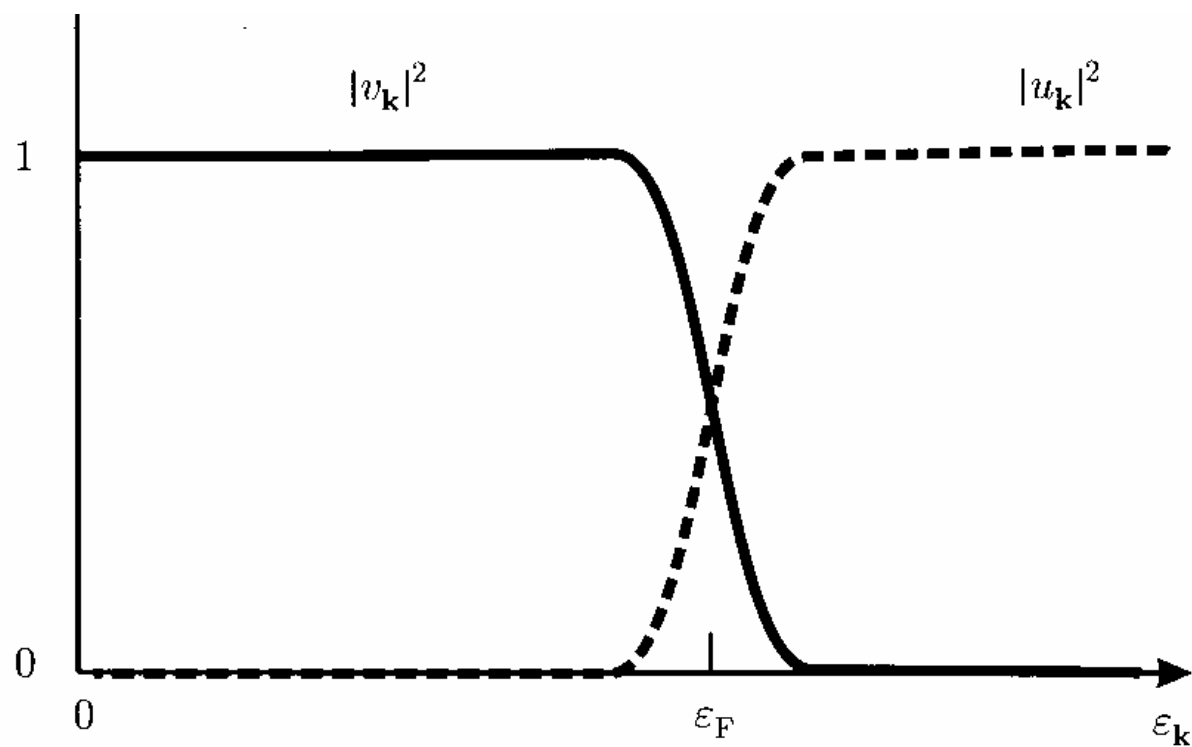


図 3.3 $u_{\mathbf{k}}^2$ と $v_{\mathbf{k}}^2$ のエネルギー依存性を模式的に示したもの. $u_{\mathbf{k}}^2$ および $v_{\mathbf{k}}^2$ の変化はフェルミ準位の周りの Δ 程度の幅で起こる.

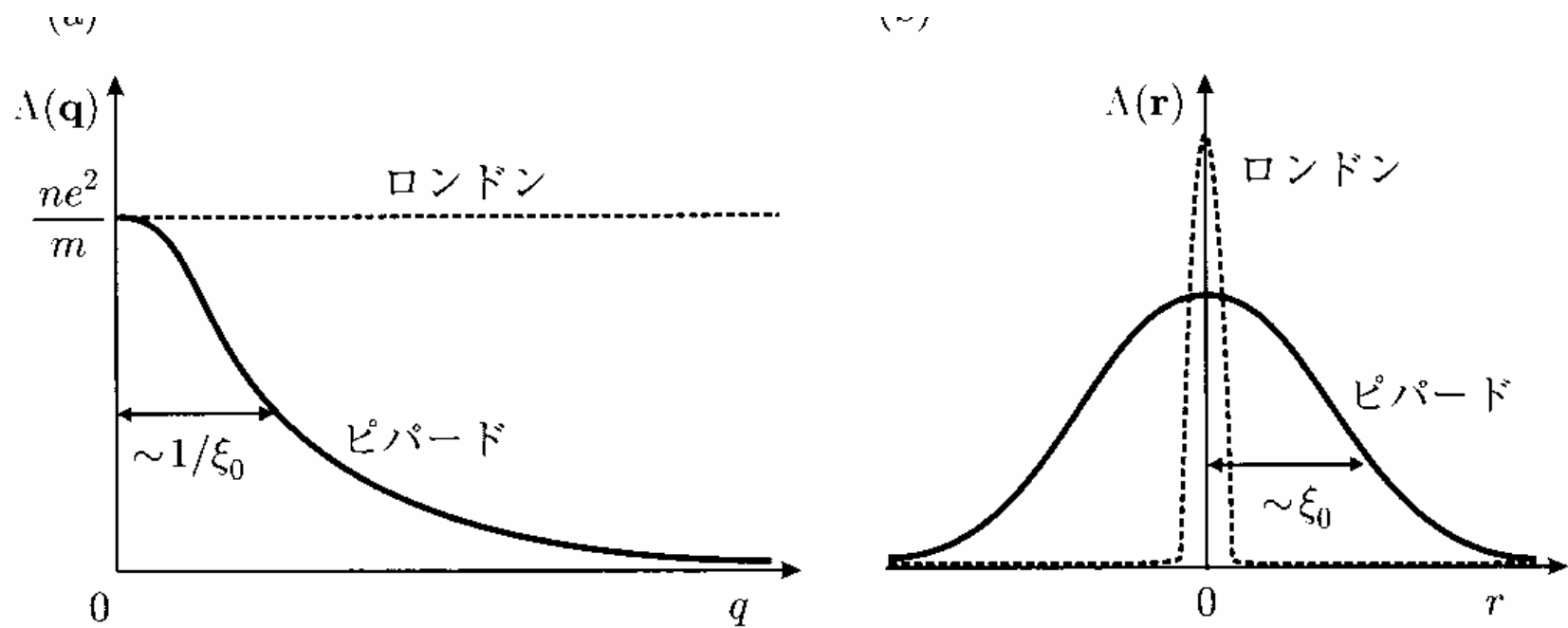


図 3.4 (a) 超伝導体の電磁応答を与える $\Lambda(\mathbf{q})$ と, (b) それをフーリエ変換した実空間の応答関数 $\Lambda(\mathbf{r})$.

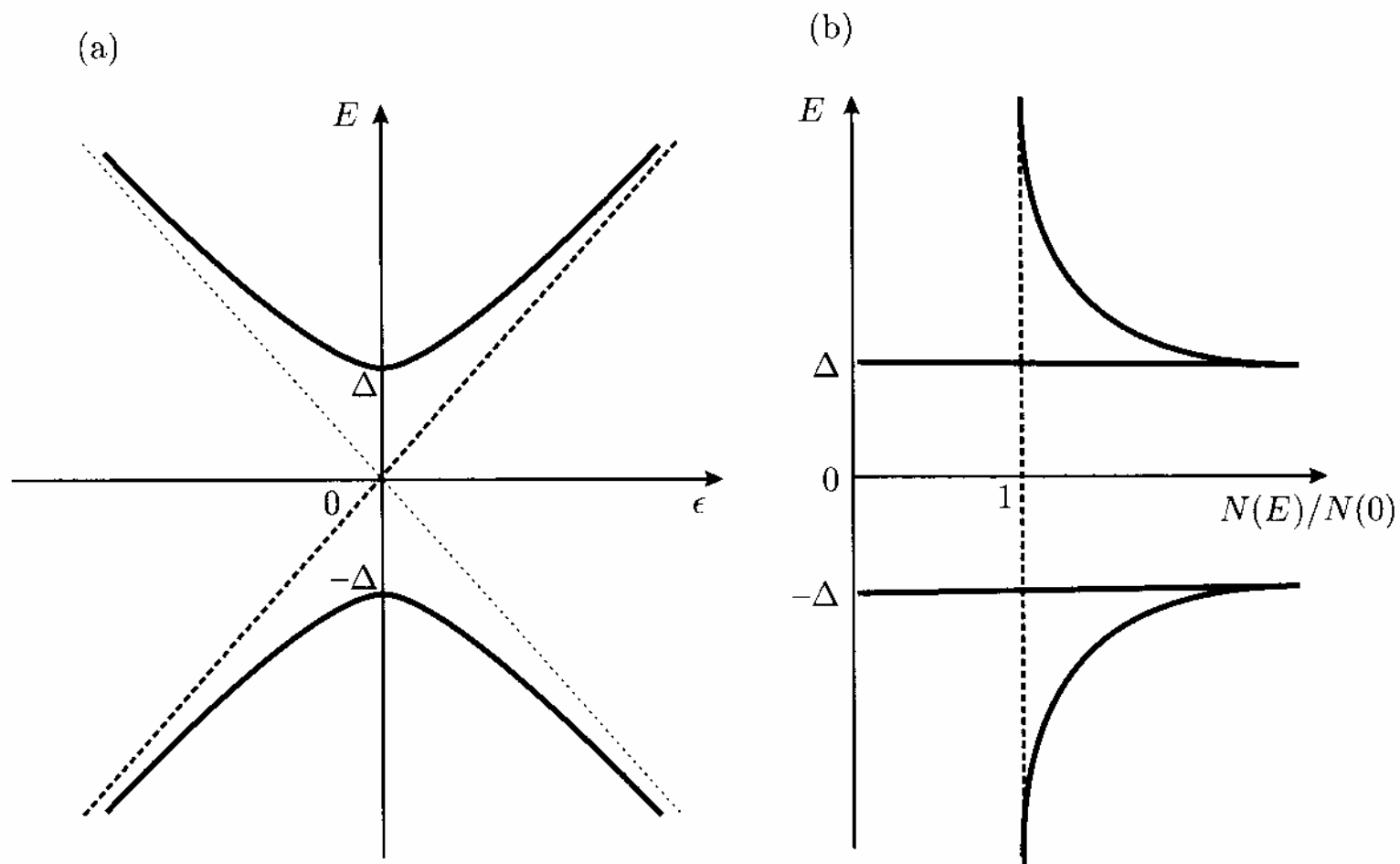


図 3.5 常伝導状態 (破線) および超伝導状態 (実線) の (a) 分散関係と (b) 状態密度.

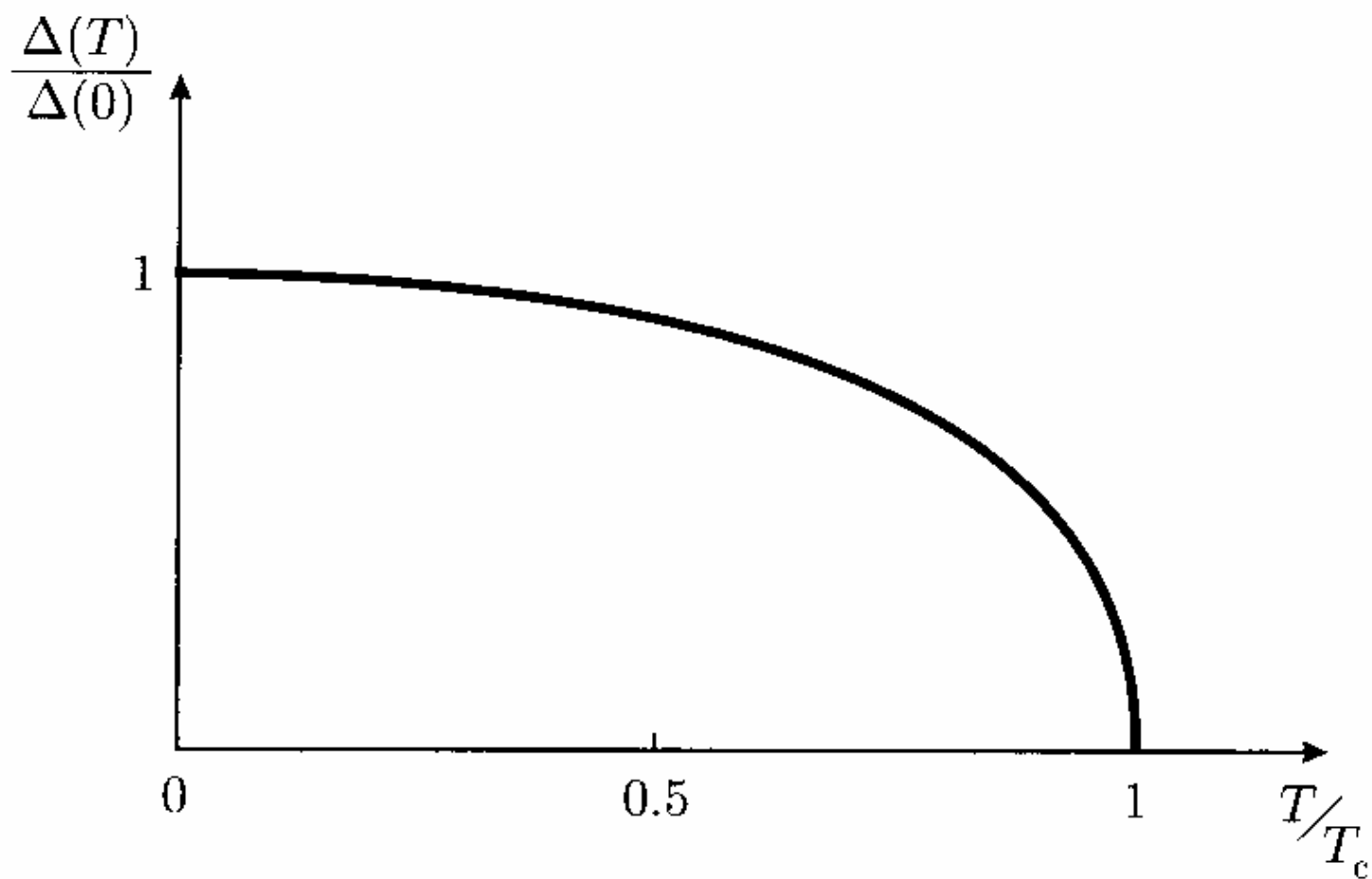


図 3.6 超伝導ギャップ Δ の温度依存性.

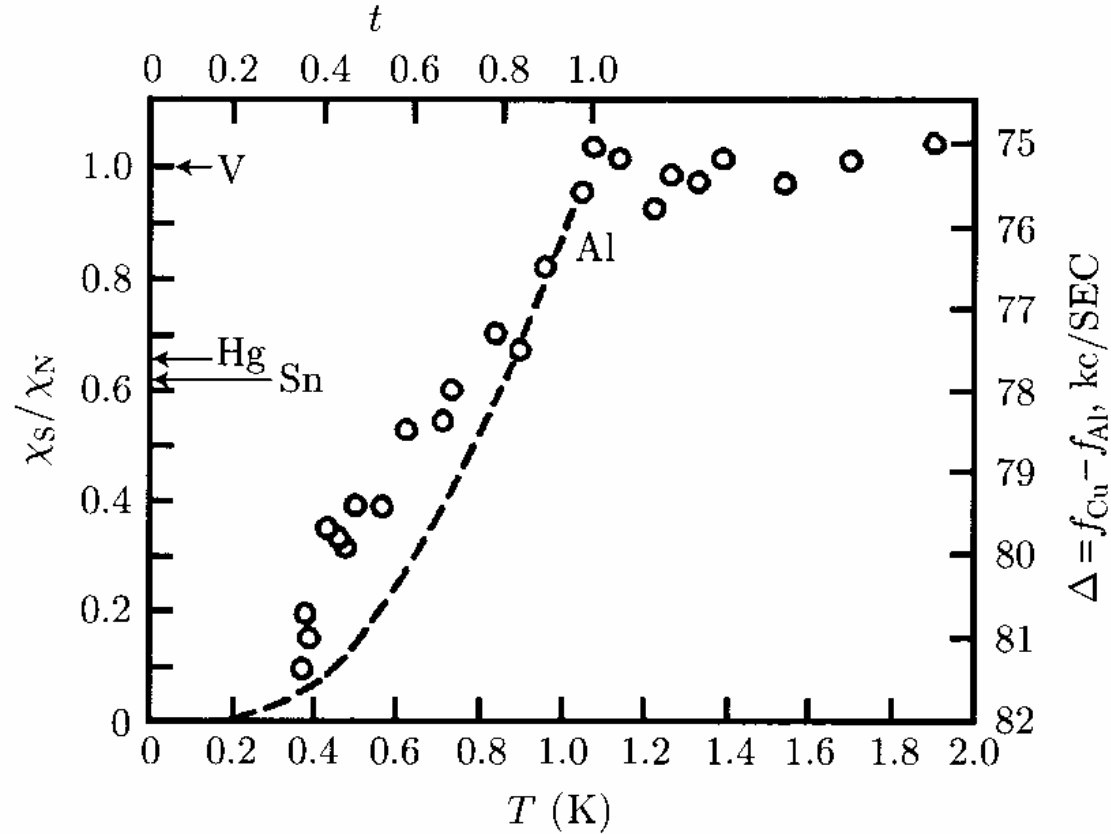


図 3.7 超伝導体のスピン磁化率の温度依存性を表す芳田関数 (破線). 実験点はアルミニウムの NMR ナイト・シフトのデータ. [R. H. Hammond and G. M. Kelly, Phys. Rev. Lett. **18** (1967) 156]

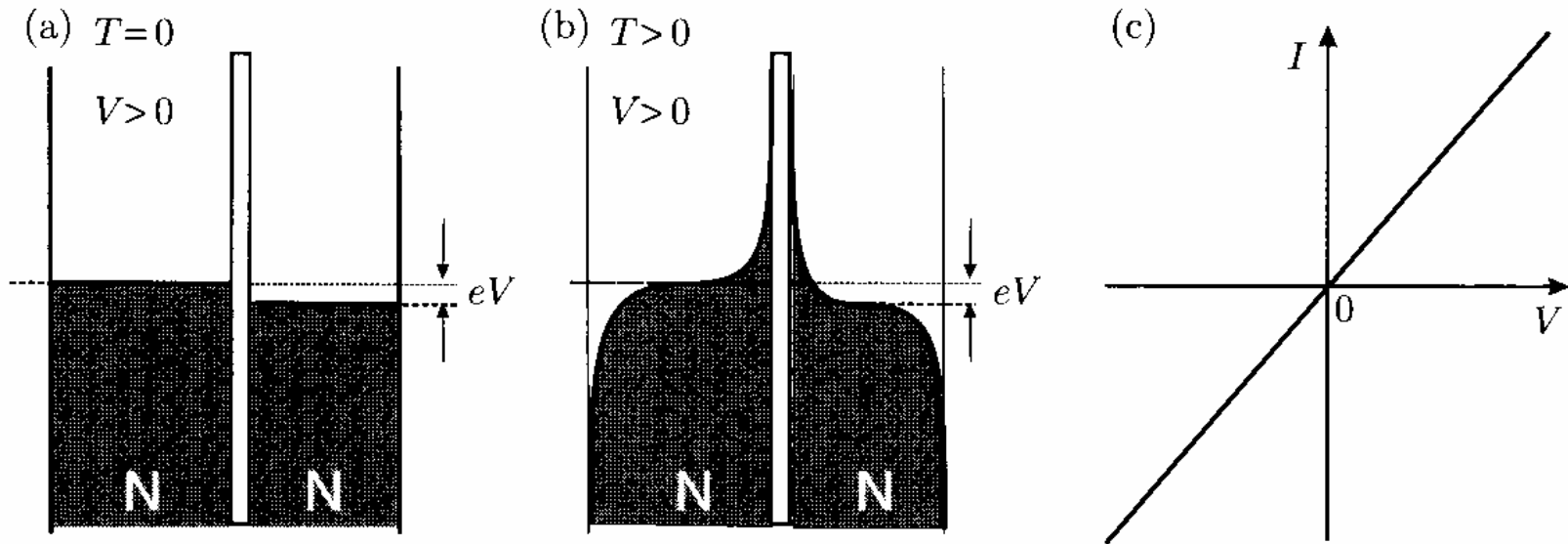
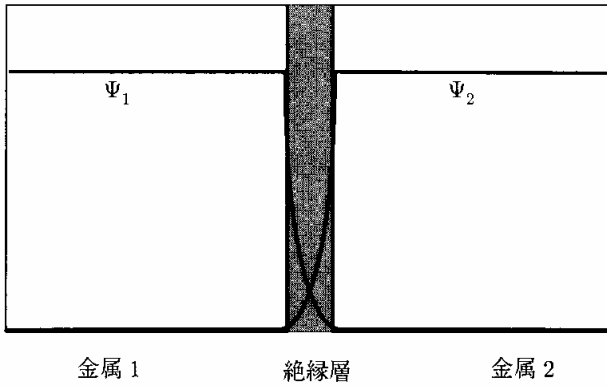


図 3.9 (a) 常伝導/常伝導トンネル接合 (NIN 接合) のエネルギー状態密度 ($T = 0$). (b) 有限温度の電子分布. (c) 電流電圧 (I-V) 特性.

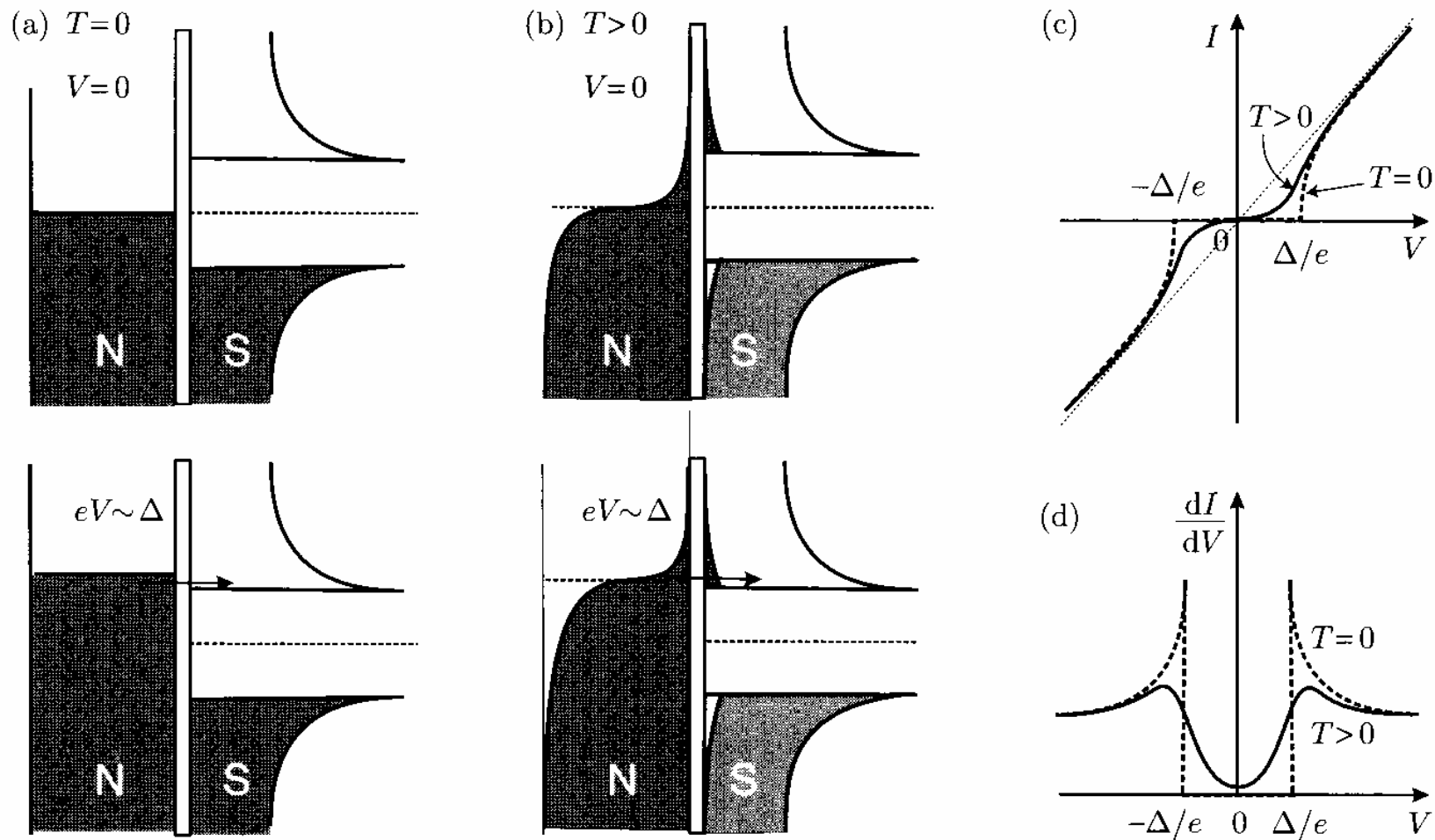


図 3.10 (a) 超伝導/常伝導トンネル接合 (SIN 接合) のエネルギー状態密度 ($T = 0$). (b) 有限温度での電子分布. (c) 電流電圧 (I - V) 特性. (d) トンネルコンダクタンス.

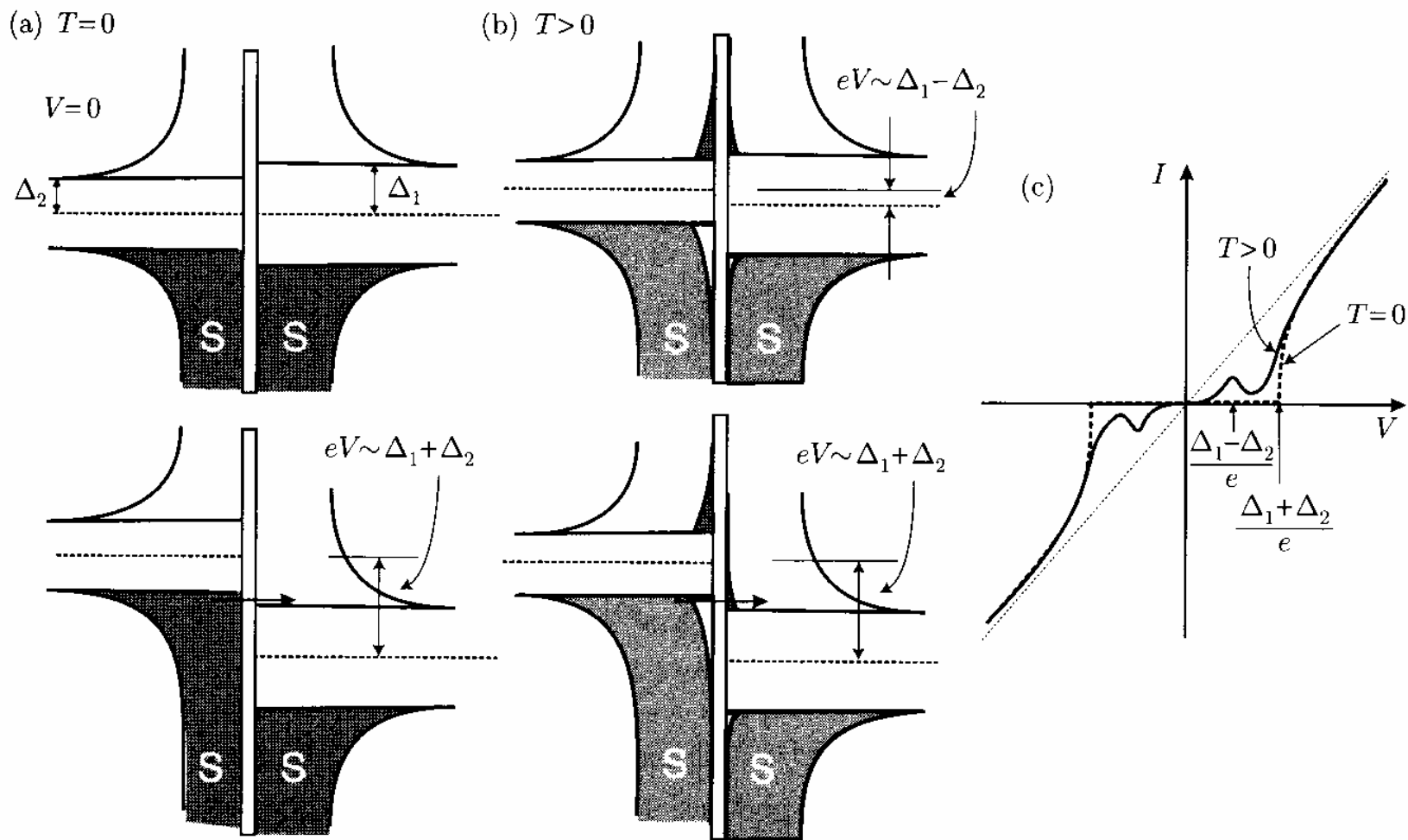


図 3.11 (a) 超伝導/超伝導トンネル接合 (SIS 接合) のエネルギー状態密度 ($T = 0$). (b) 有限温度での電子分布. (c) 電流電圧 (I-V) 特性.

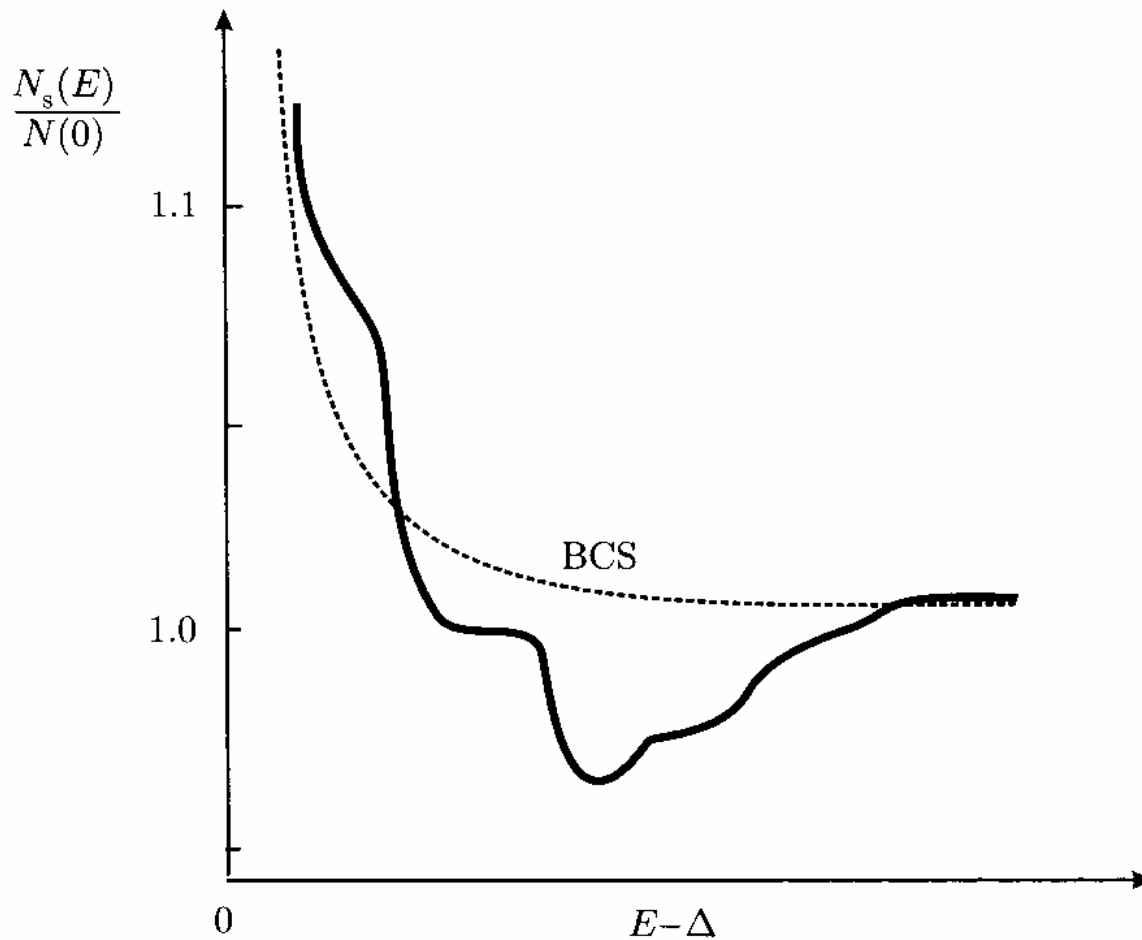


図 3.12 鉛のトンネルスペクトルに現れるフォノン構造. 破線は BCS 状態密度, 実線は実験から求められた状態密度である. 状態密度に現れている微細構造はフォンスペクトルを反映したものである. [W. L. McMillan and J. M. Rowell, in “Superconductivity” ed. R. D. Parks (Marcel Dekker, New York, 1969) chap. 11]

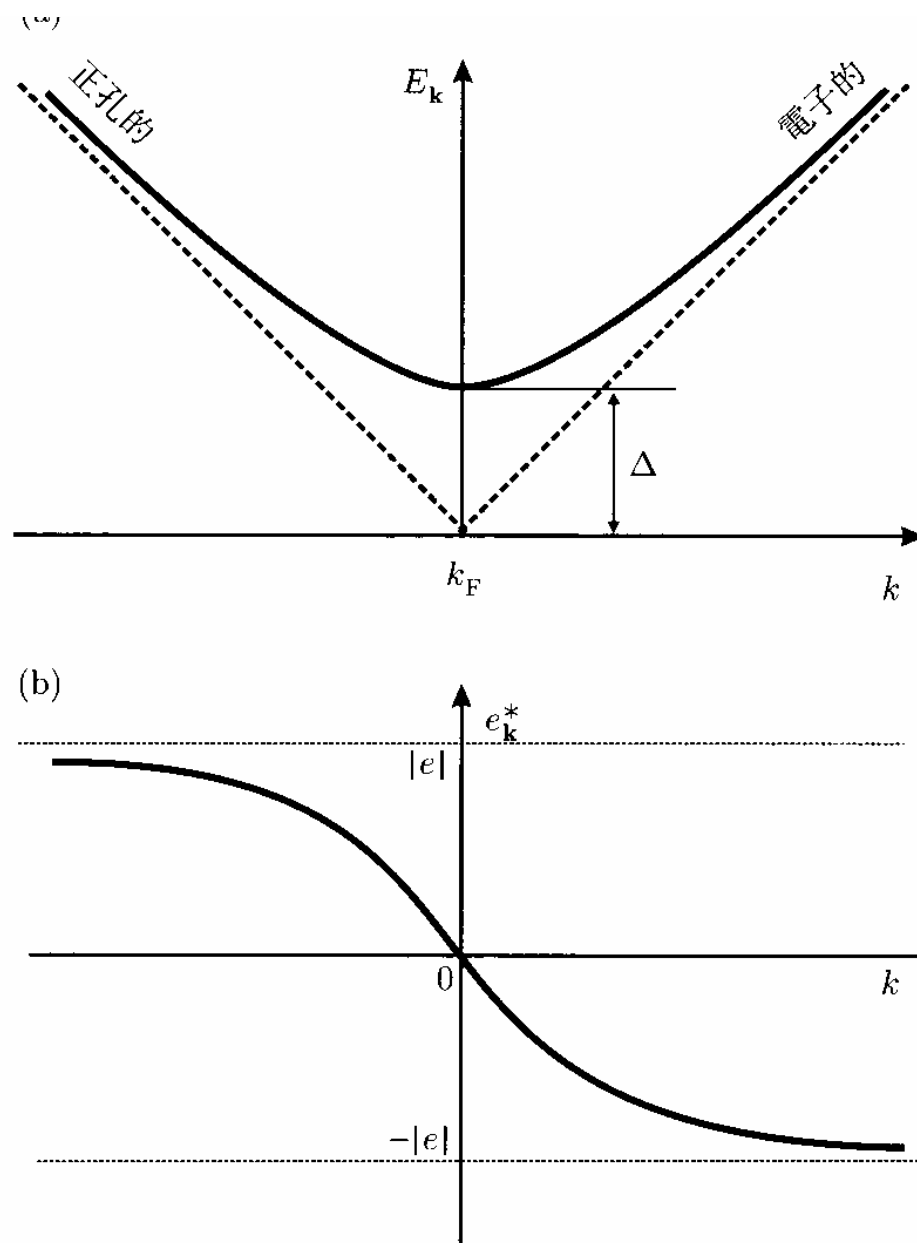


図 3.13 (a) 準粒子のエネルギースペクトル. 実線は超伝導状態, 破線は常伝導状態を表す. (b) 準粒子が運ぶ電荷.

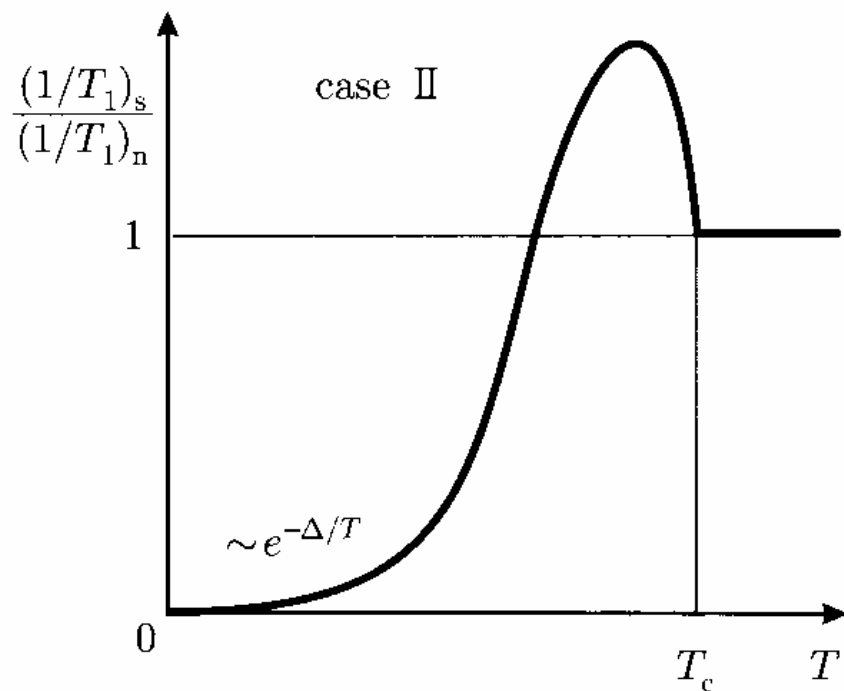
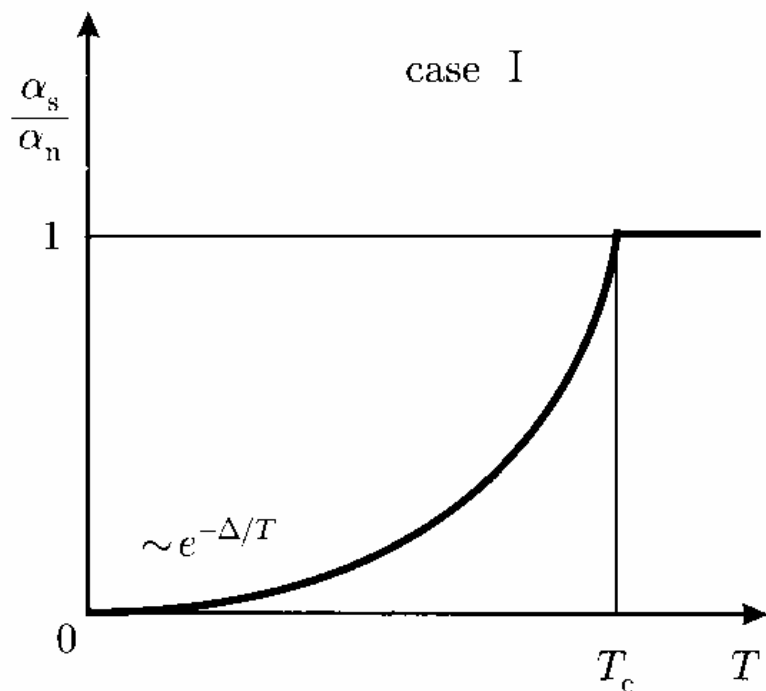


図 3.14 超伝導体のコヒーレンス因子. (a) 超音波吸収. (b) 核磁気緩和率.

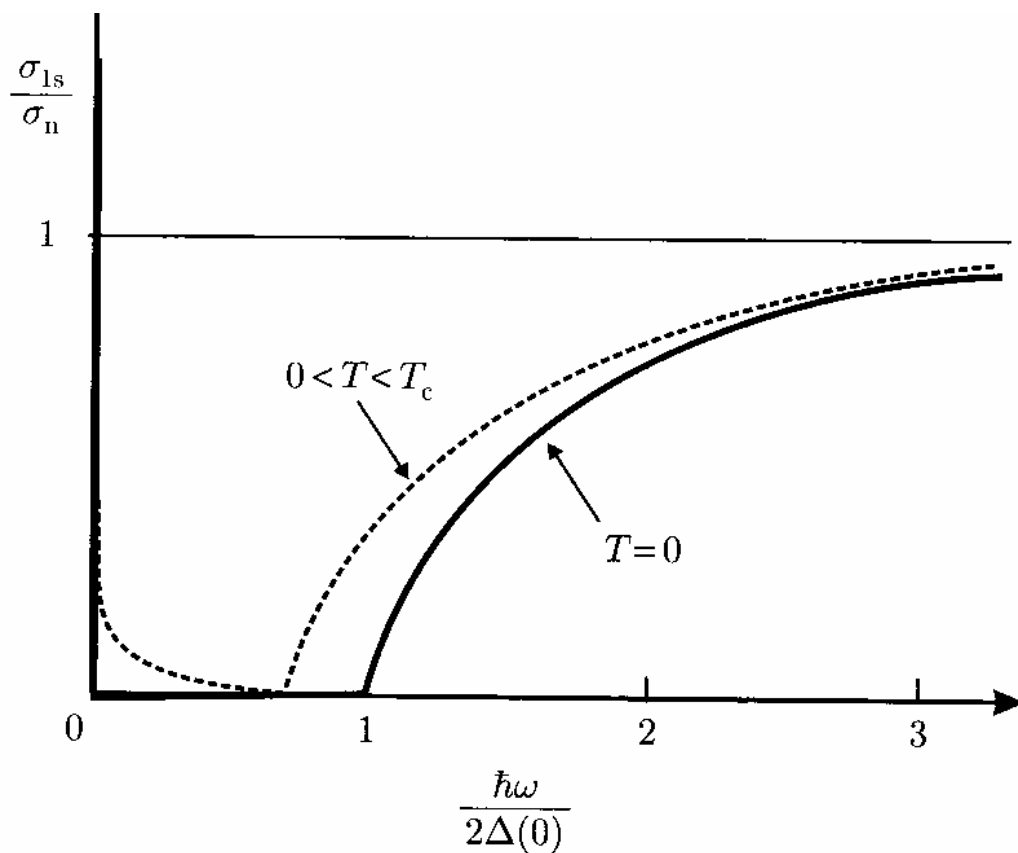


図 3.15 超伝導体の電磁波吸収スペクトルを表す光学伝導度の実部. 実線は $T = 0$, 破線は $0 < T < T_c$ でのふるまいを表す. このスペクトルは常伝導状態での吸収確率との比で表示されていることに注意.

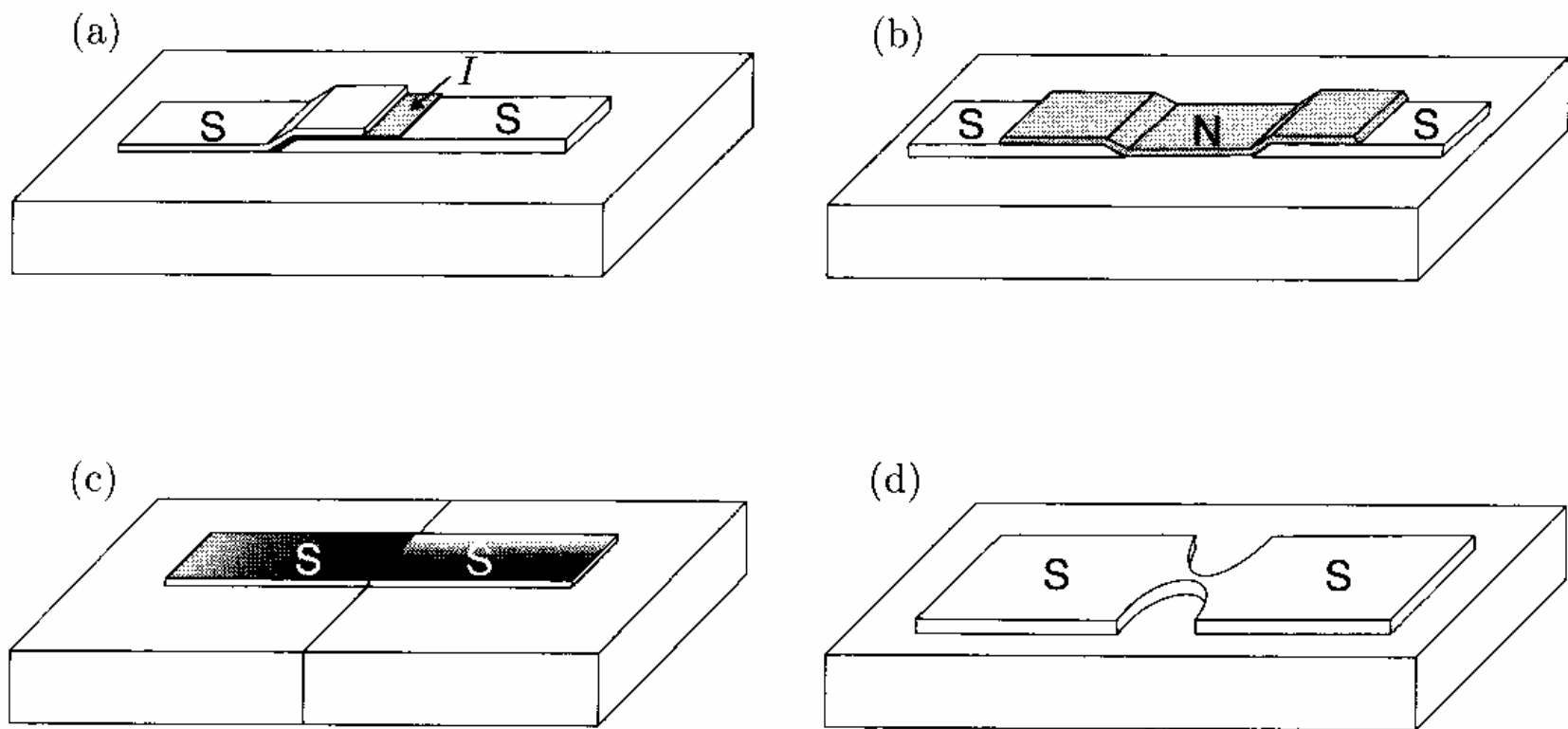


図 4.1 ジョセフソン接合のいろいろ. (a) SIS トンネル接合, (b) SNS 接合, (c) 粒界接合, (d) マイクロブリッジ.

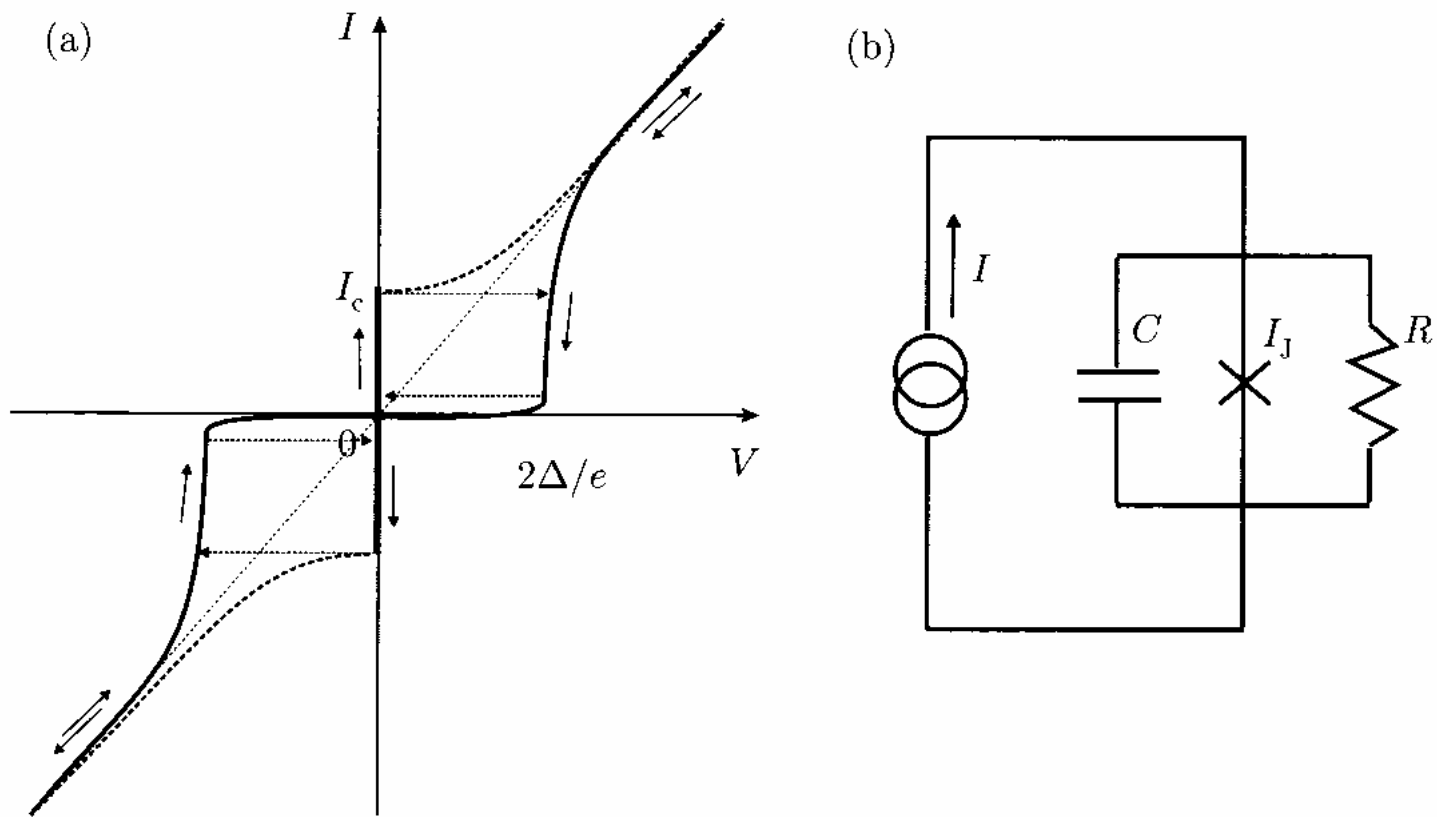


図 4.2 ジョセフソン接合の I-V 特性. 図 3.11 に示した準粒子トンネル電流による I-V 特性に加えて, クーパー対のトンネルによるジョセフソン電流がある. I-V 特性の詳細はシャント抵抗やキャパシタンスなど外付け回路による. 実線はアンダーダンプト, 破線はオーバーダンプトの場合.

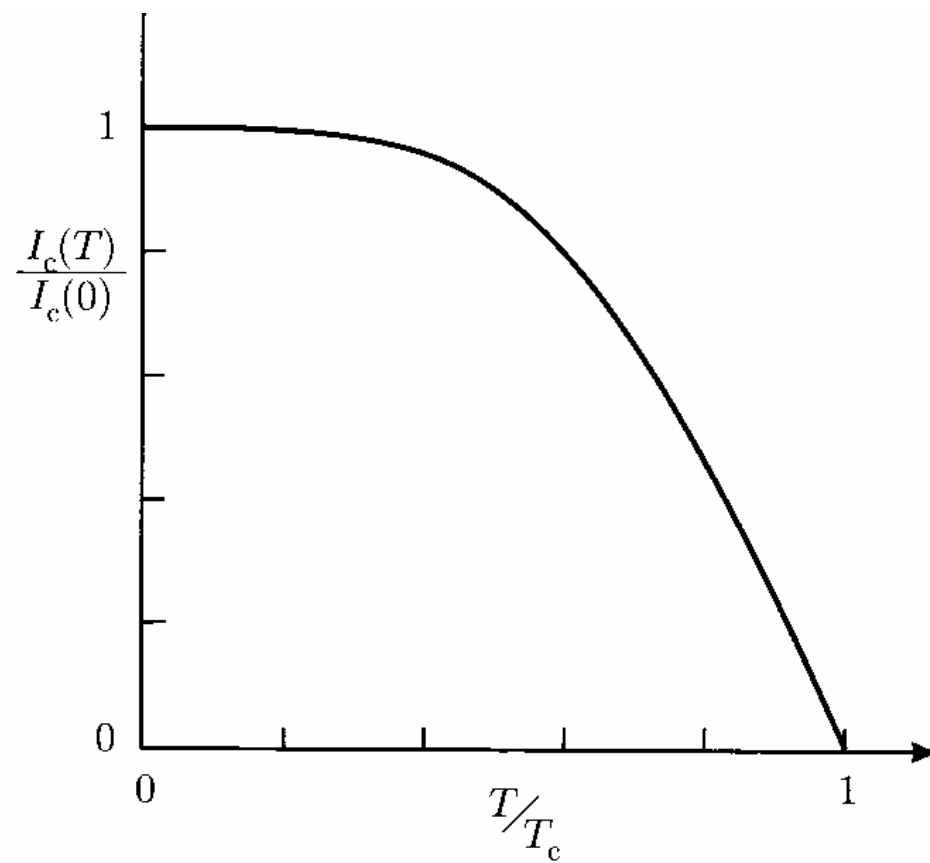


図 4.3 アンベガオカー-バラトフによるジョセフソン臨界電流の温度依存性 $I_c(T)$.

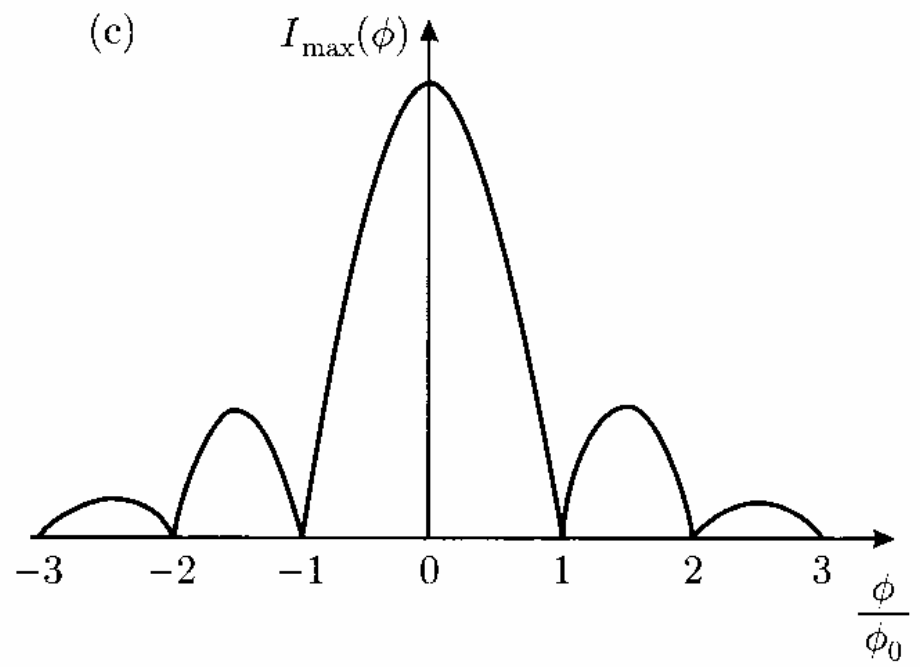
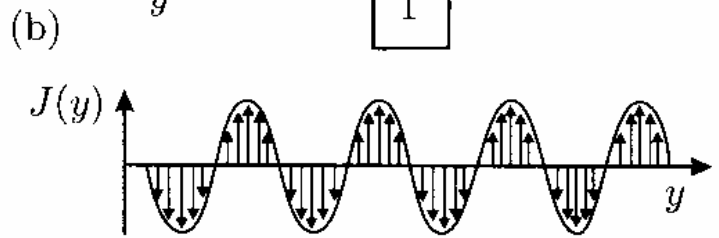
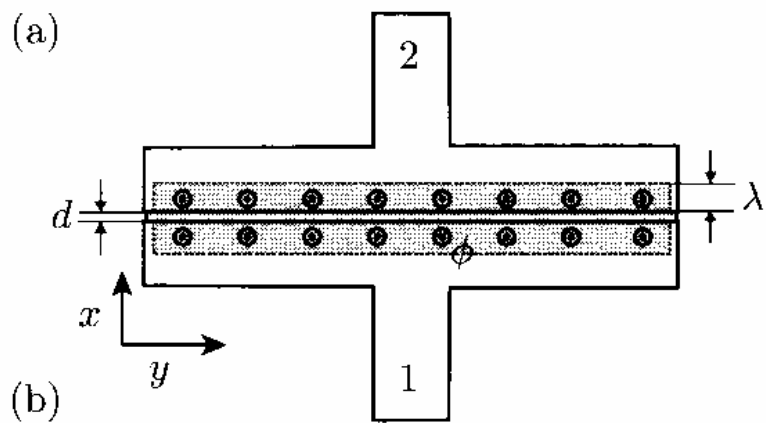


図 4.4 (a) ある程度の長さ (幅) をもつジョセフソン接合. (b) 電流分布. (c) 接合にかかる磁束に対する最大電流の変化.

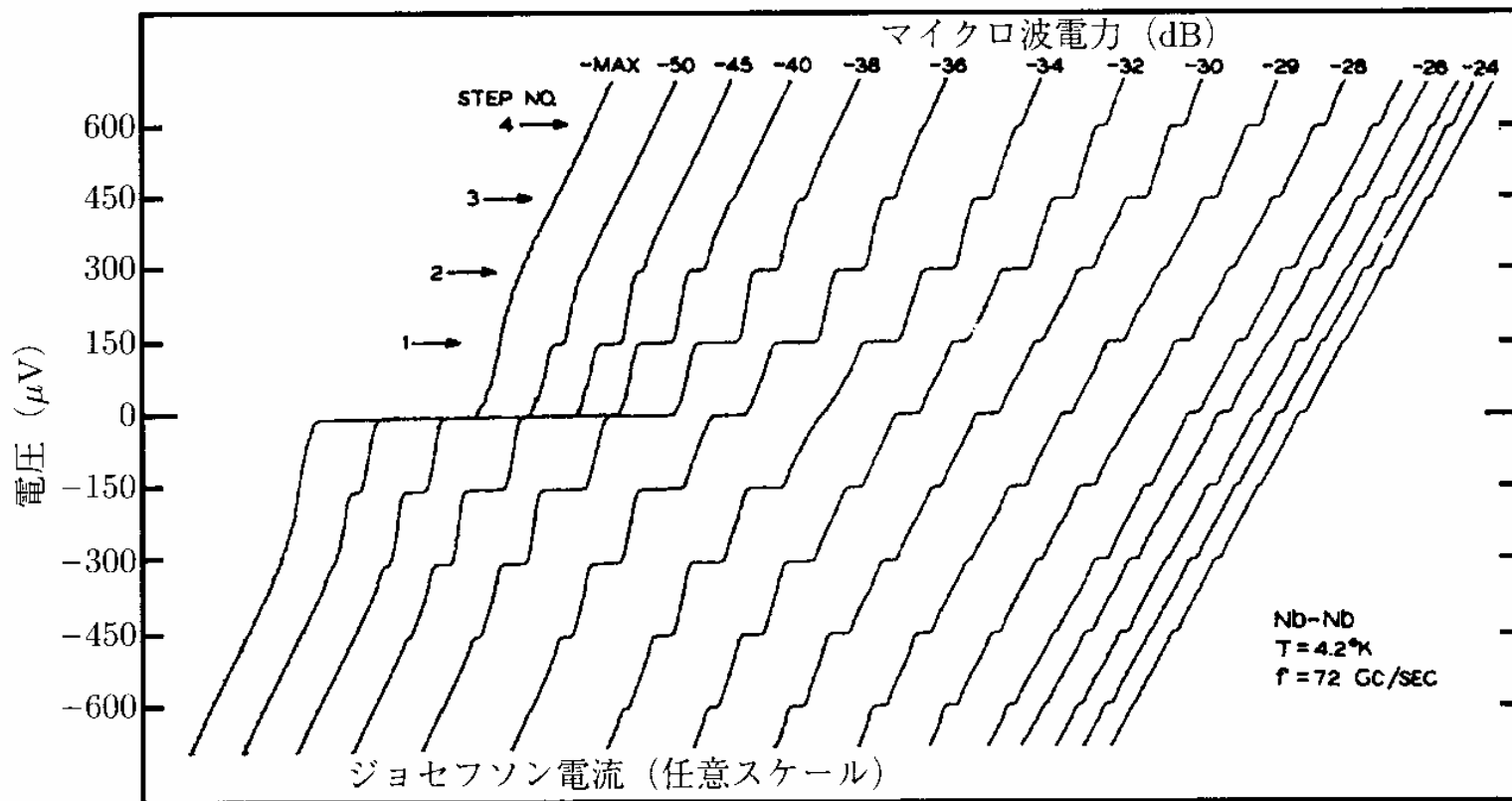


図 4.5 ジョセフソン接合に交流を印加したときの電流電圧特性. $2|e|V_0 = n\hbar\Omega$ (n は整数) という条件のところでステップがみられる (シャピロ・ステップ). [C. C. Grimes and S. Shapiro, Phys. Rev. **169** (1968) 397]

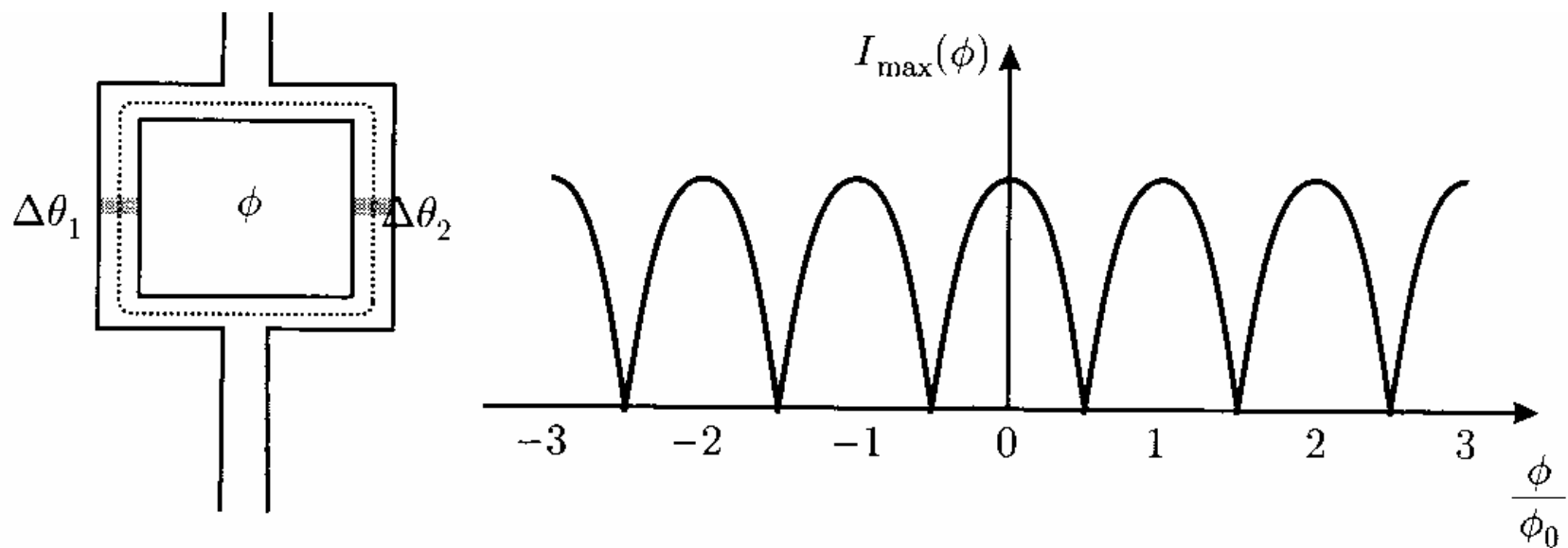


図 4.6 (a) dc-SQUID 構造. 点線は (4.38) 式の積分経路を表す. (b) ループを貫く磁束による臨界電流値の変化.

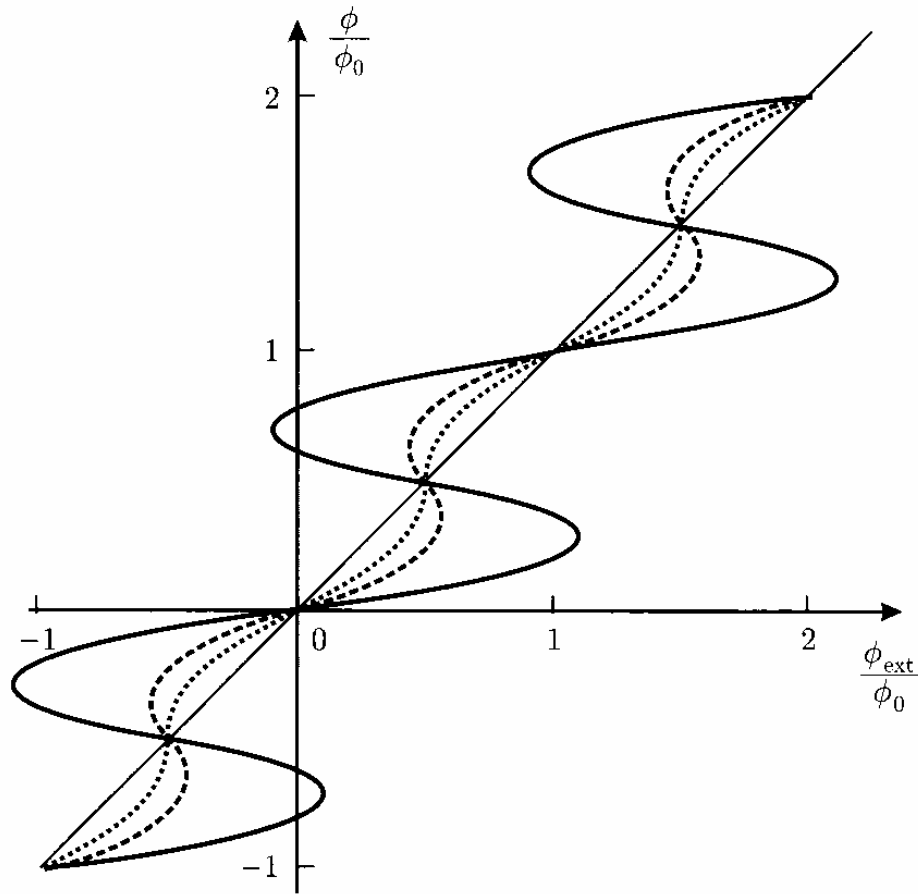


図 4.7 SQUID 素子に外部からかけた磁束 ϕ_{ext} とループを貫く磁束 ϕ との関係. 直線は遮蔽効果がない場合で, 点線, 破線, 実線の順に LI_c の値を大きくした場合を示している.

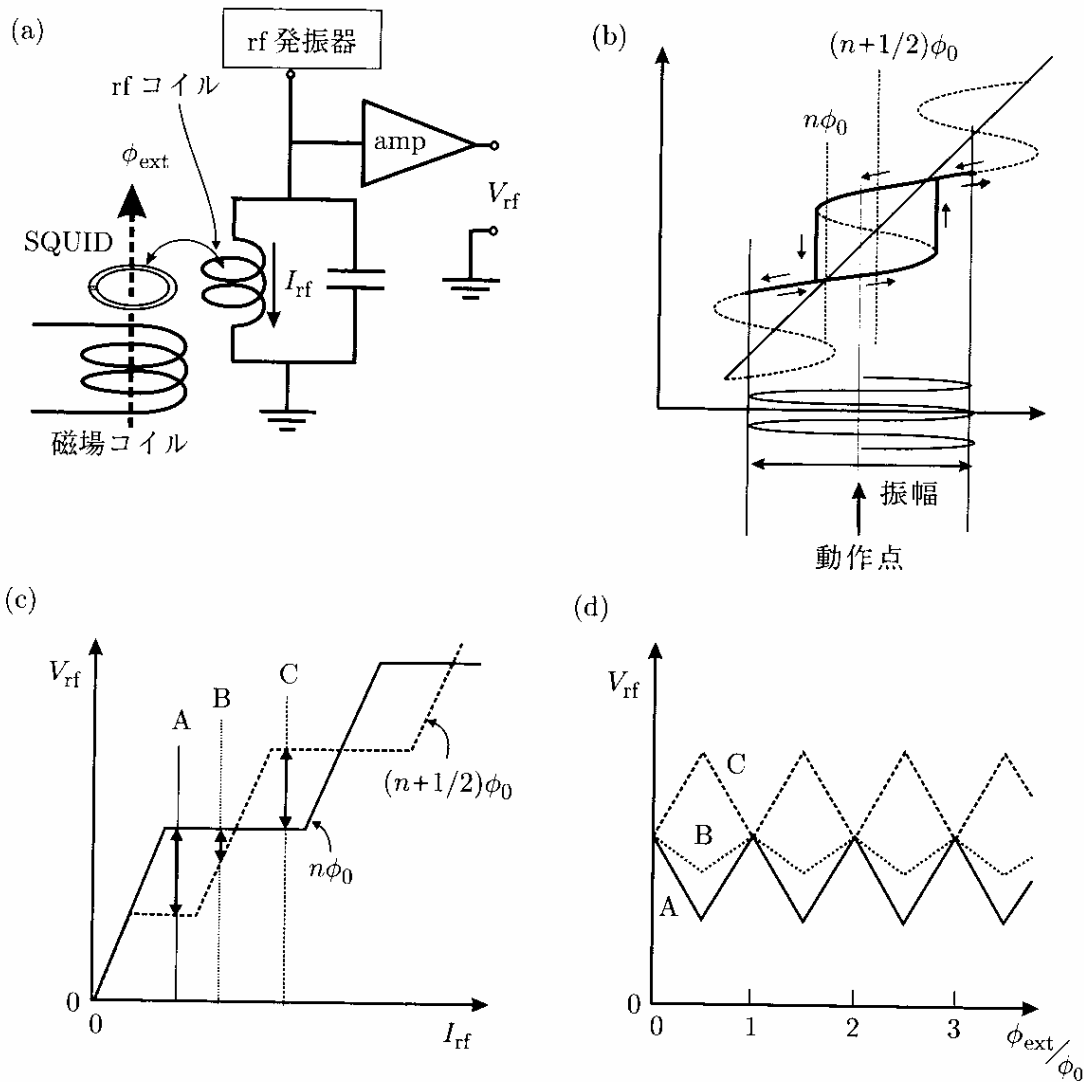


図 4.8 (a) 典型的な rf-SQUID 回路. 高周波コイルとの誘導結合により SQUID ループに交流磁束が印加される. 磁場コイルと表示されたコイルは静磁場を印加するためのものである. (b) 外部磁束を交流で変化させた場合の SQUID ループの応答. (c) ϕ_{ext} の値を固定して I_{rf} を変化させたとき V_{rf} が階段状に変化するようす. 実線は $\phi_{ext} = n\phi_0$ の場合, 破線は $\phi_{ext} = (n+1/2)\phi_0$ の場合を示す. (d) I_{rf} の値を図 (c) の A,B,C の点に固定して ϕ_{ext} を変化させたときに得られる三角パターン.

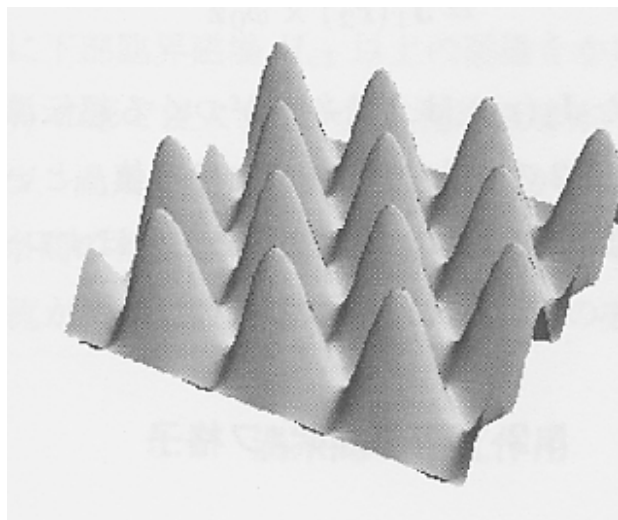
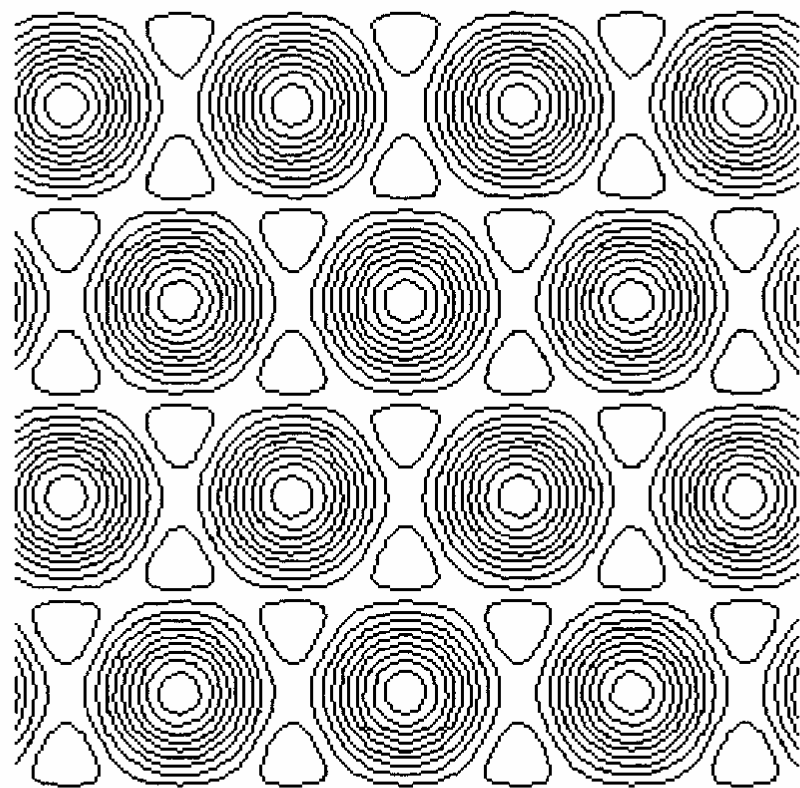
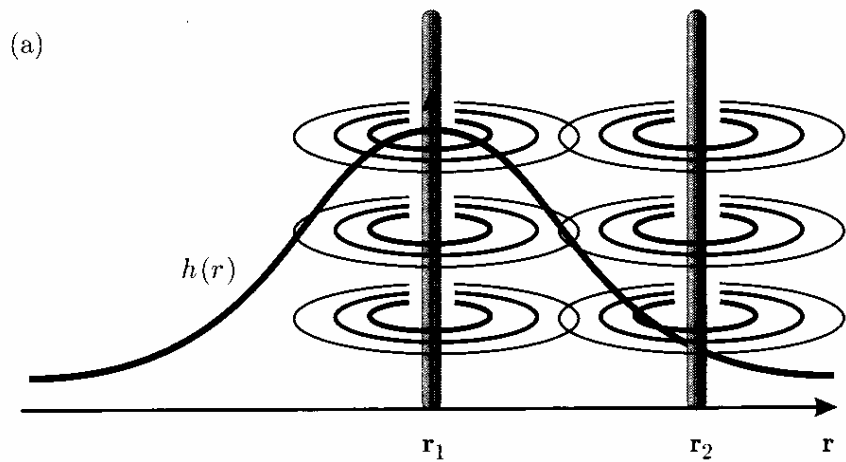
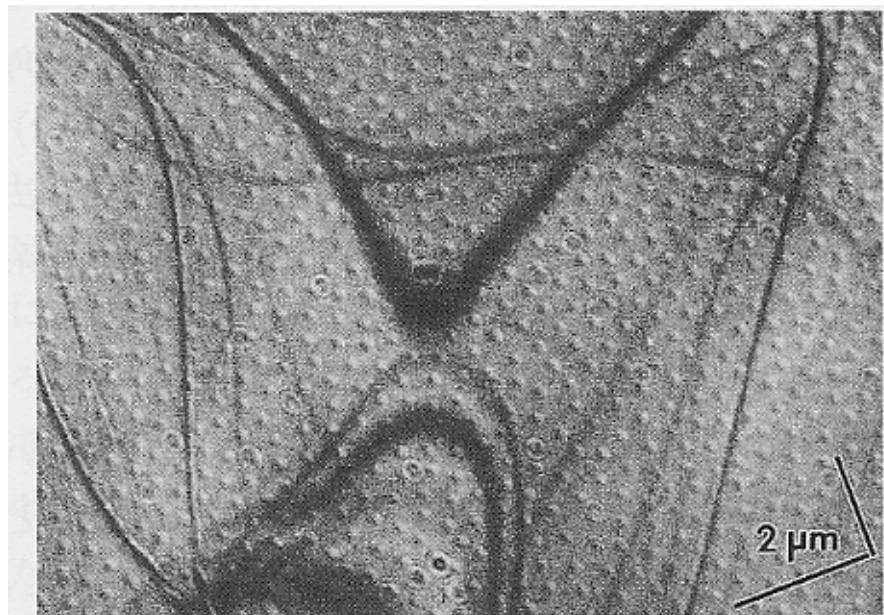
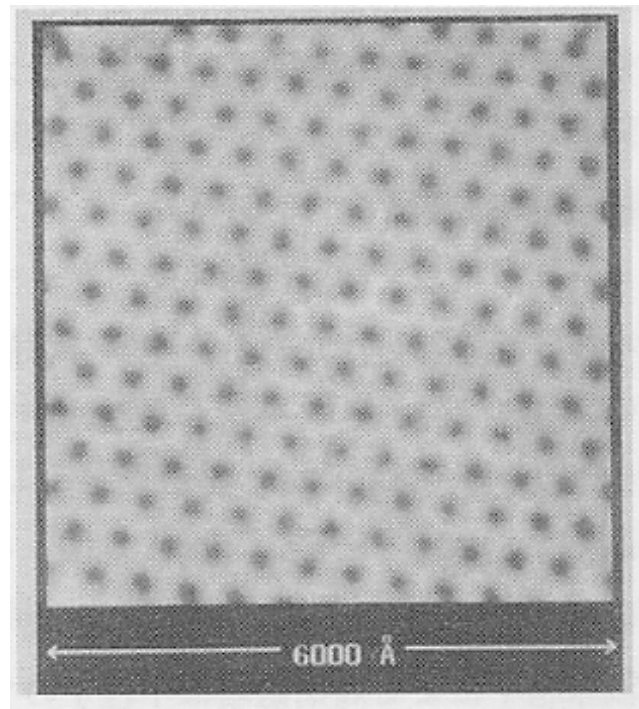
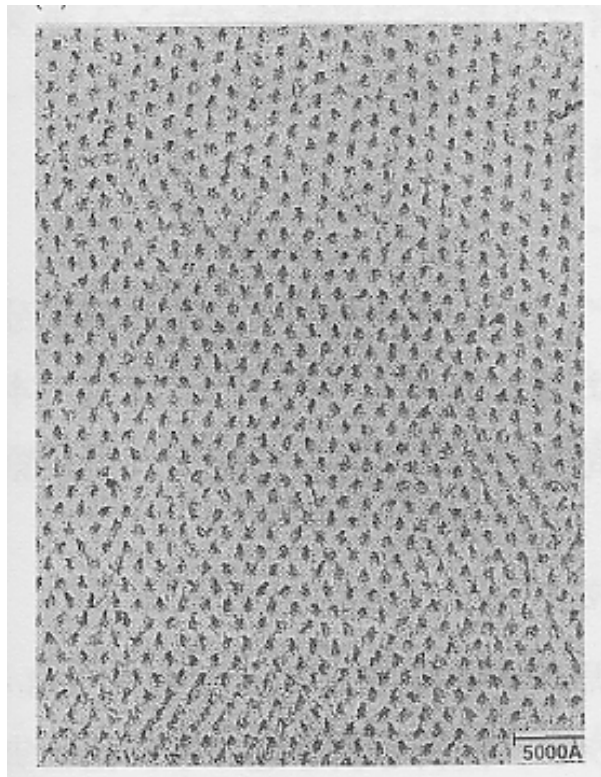


図 5.1 第 II 種超伝導体の混合状態における渦糸のアブリコソフ格子. (a) 2 本の平行な渦糸. 実線は一方の渦糸がつくる局所磁場分布. (b) 渦糸の三角格子の磁場分布. (c) $|\Psi(\mathbf{r})|^2$ の空間分布.



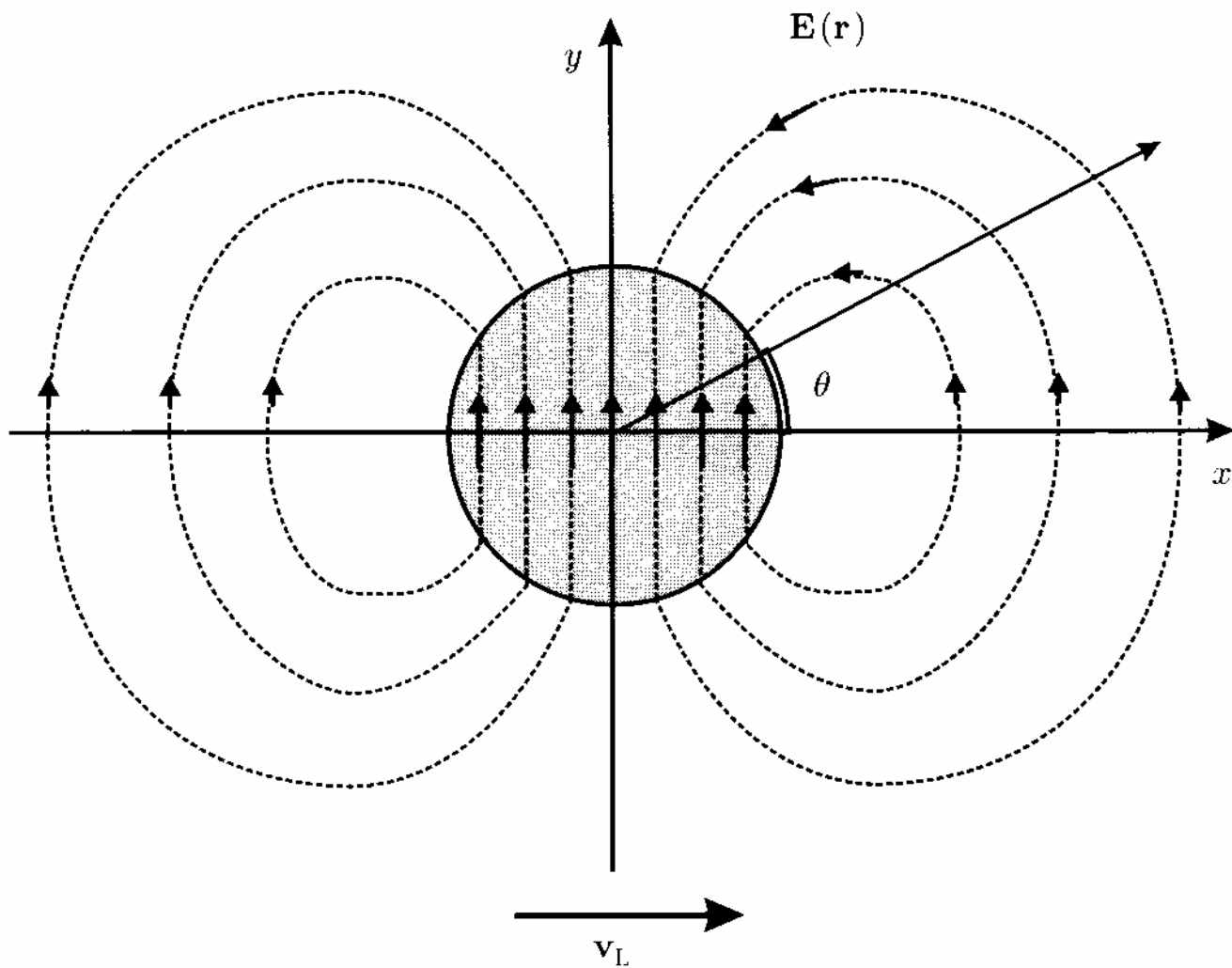


図 5.3 速度 \mathbf{v}_L で x 方向に動く渦糸がつくる局所電場のようす.

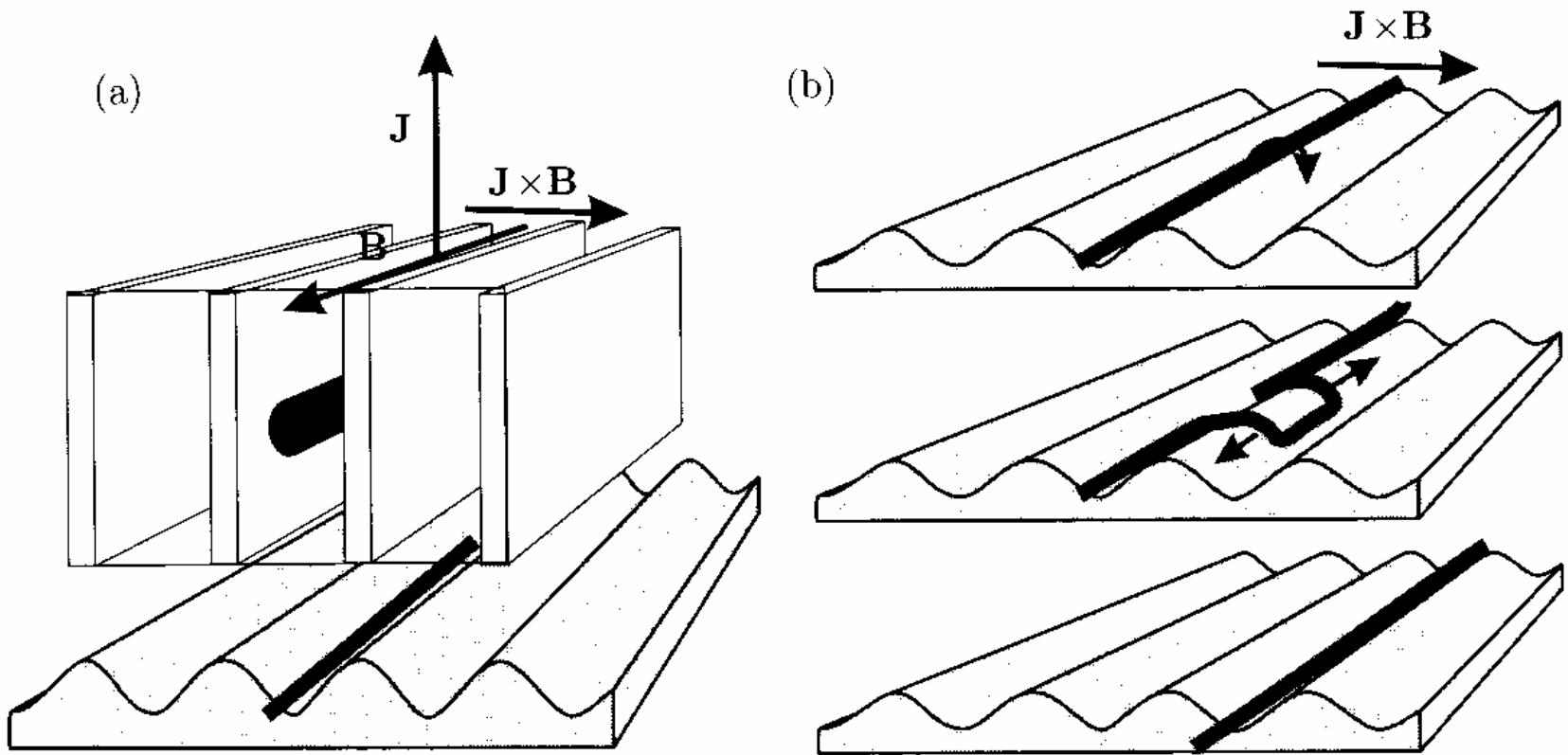


図 5.4 (a) 磁束 (転位) は固有ピン留めポテンシャル (パイエルス・ポテンシャル) の谷に捉えられる. (b) 隣接する谷への移動は, キンク・反キンク対の生成とそれらの拡散によって起こる.

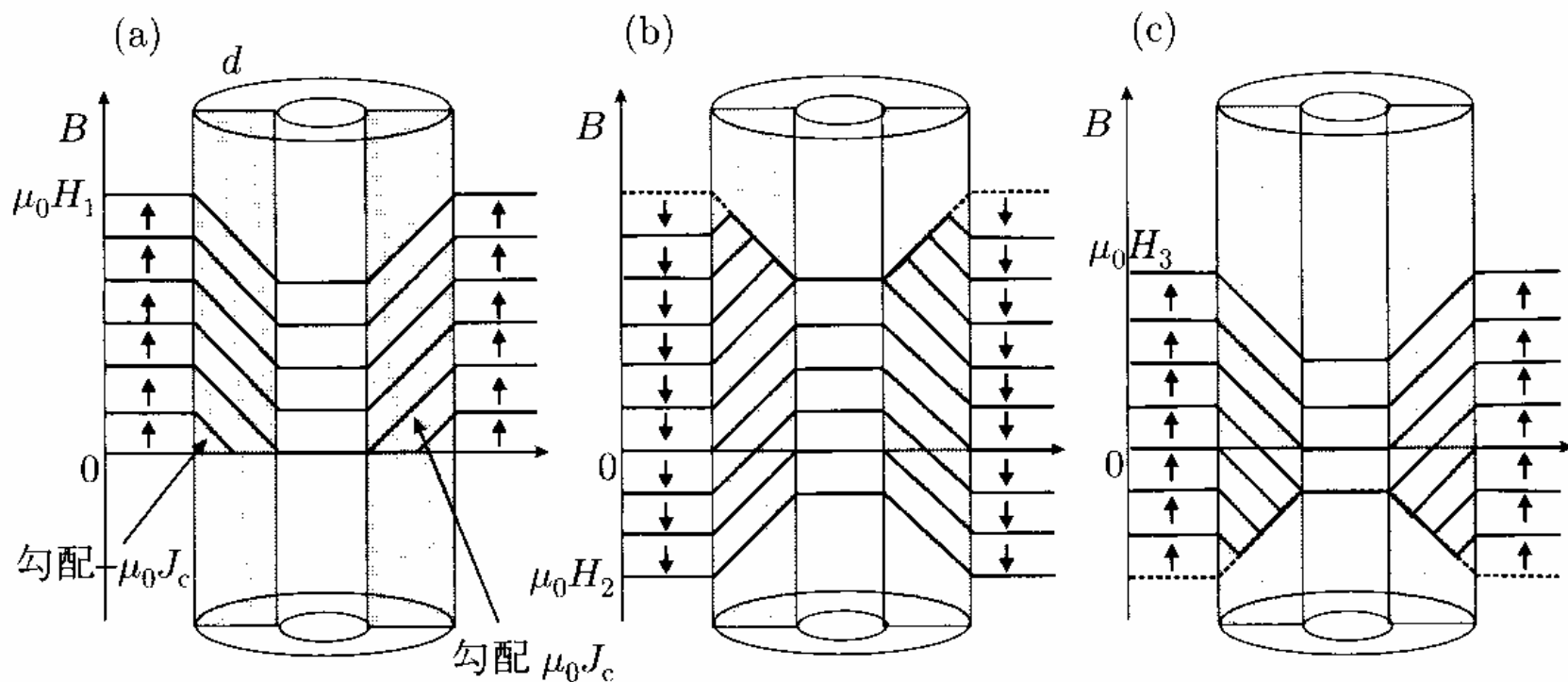


図 5.5 硬い (ピン留めの強い) 超伝導体でできた円筒に外部磁場をかけたときの磁束の侵入のようす. (a) 印加磁場を $H = 0$ から $H = H_1$ まで増加させたときの $B(r)$ の変化. (b) 次に, 磁場を $H = H_1$ から $H = H_2$ まで減少させたときの $B(r)$ の変化. (c) 再び磁場を増加させて, $H = H_2$ から $H = H_3$ まで変えたときの $B(r)$ の変化.

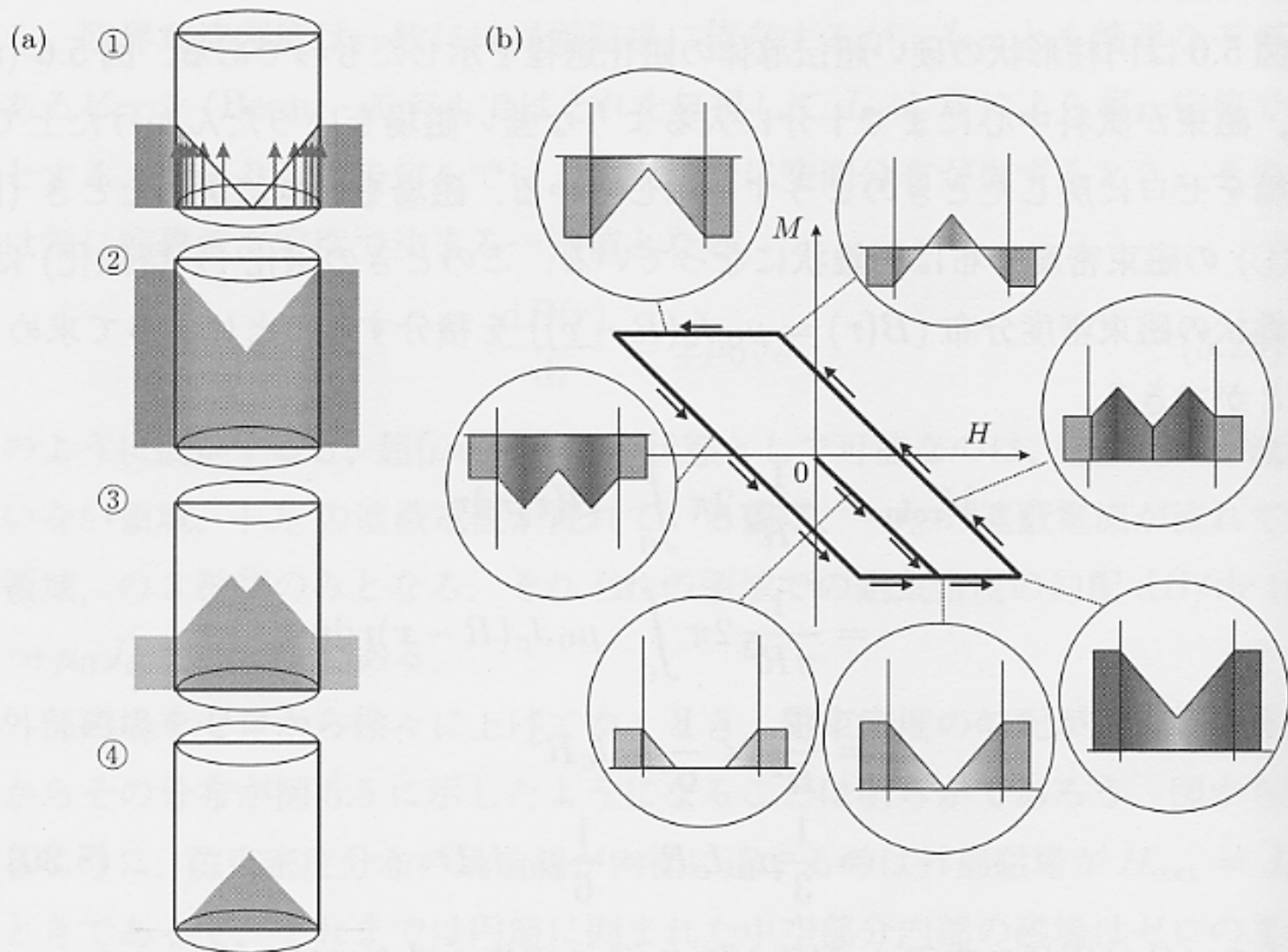


図 5.6 円柱形状の硬い超伝導体に対して磁場をかけたときの磁束密度分布. (a)十分に強い磁場をいったんかけてから磁場をゼロに戻すときの磁束密度分布. ④は最大残留磁化の状態を表す. (b) 磁気履歴曲線とその上の各点における磁束分布.

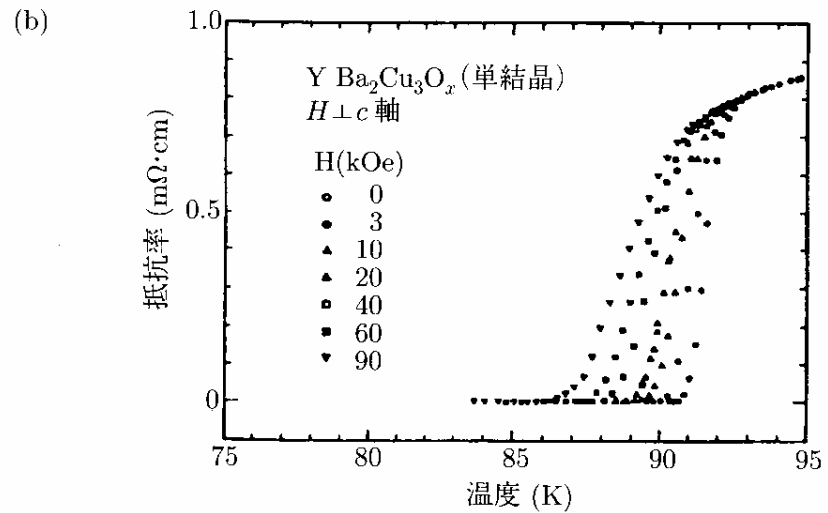
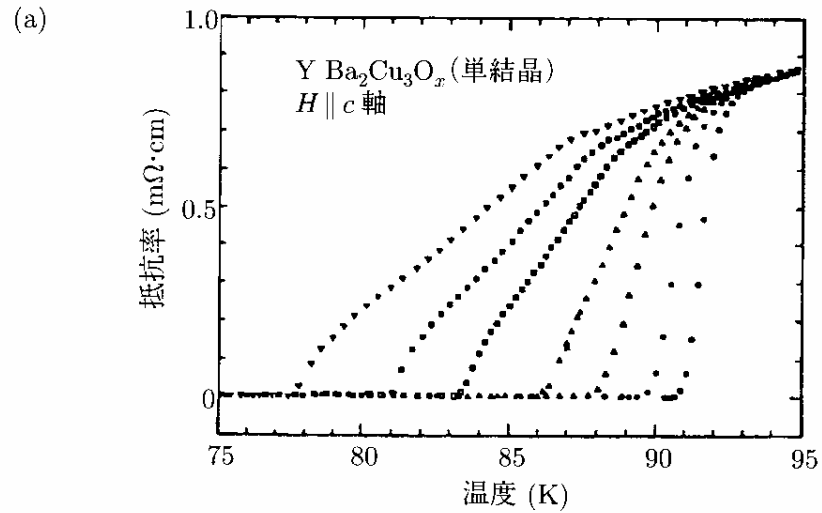


図 6.1 高温超伝導体 YBCO の超伝導転移. (a) $H \parallel c$ ($H \perp$ 層面), (b) $H \perp c$ ($H \parallel$ 層面). [Y. Iye *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **26** (1988) L1057]

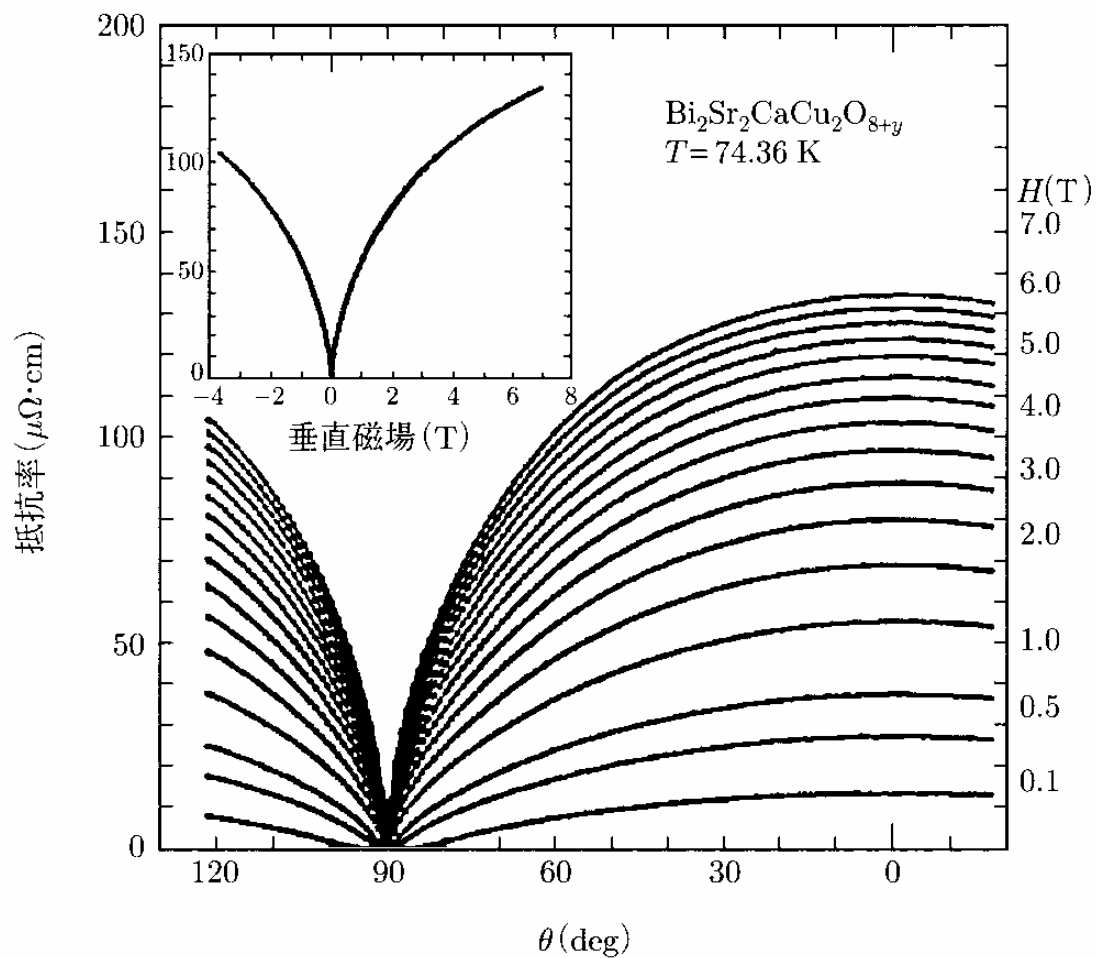
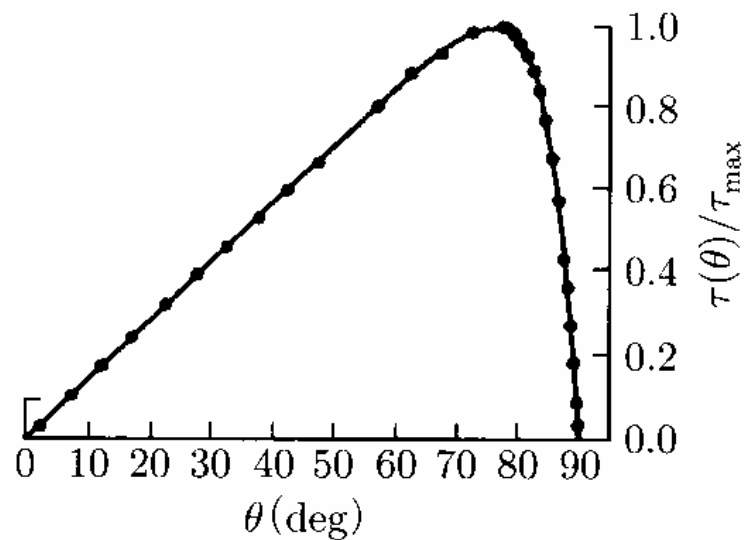


図 6.2 BSCCO の超伝導転移領域における抵抗の磁場角度依存性. 挿入図は垂直磁場成分 $H \cos \theta$ でスケールした結果. [Y. Iye *et al.*, *Physica C* **166** (1990) 62]

(a)



(b)

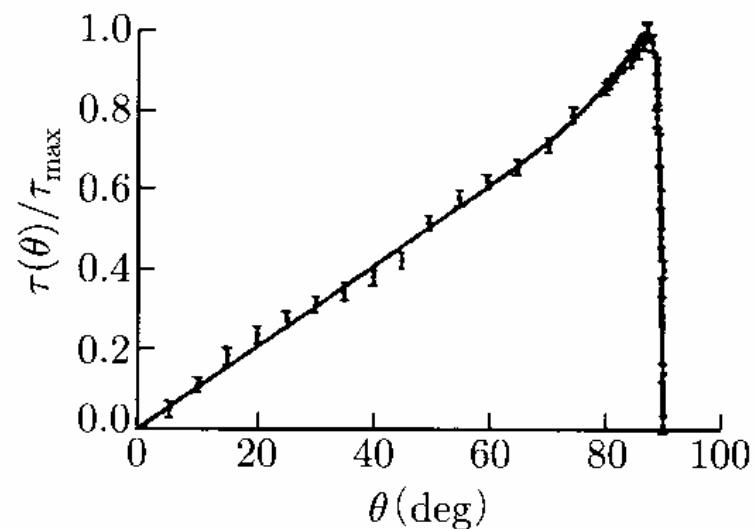


図 6.3 高温超伝導体の可逆領域における磁気トルクの角度依存性. (a) YBCO, (b) BSCCO. 曲線は (6.1) 式のフィッティングを示す. [Farrel *et al.*, Phys. Rev. Lett. **64** (1990) 1573, Phys. Rev. Lett. **64** (1991)]

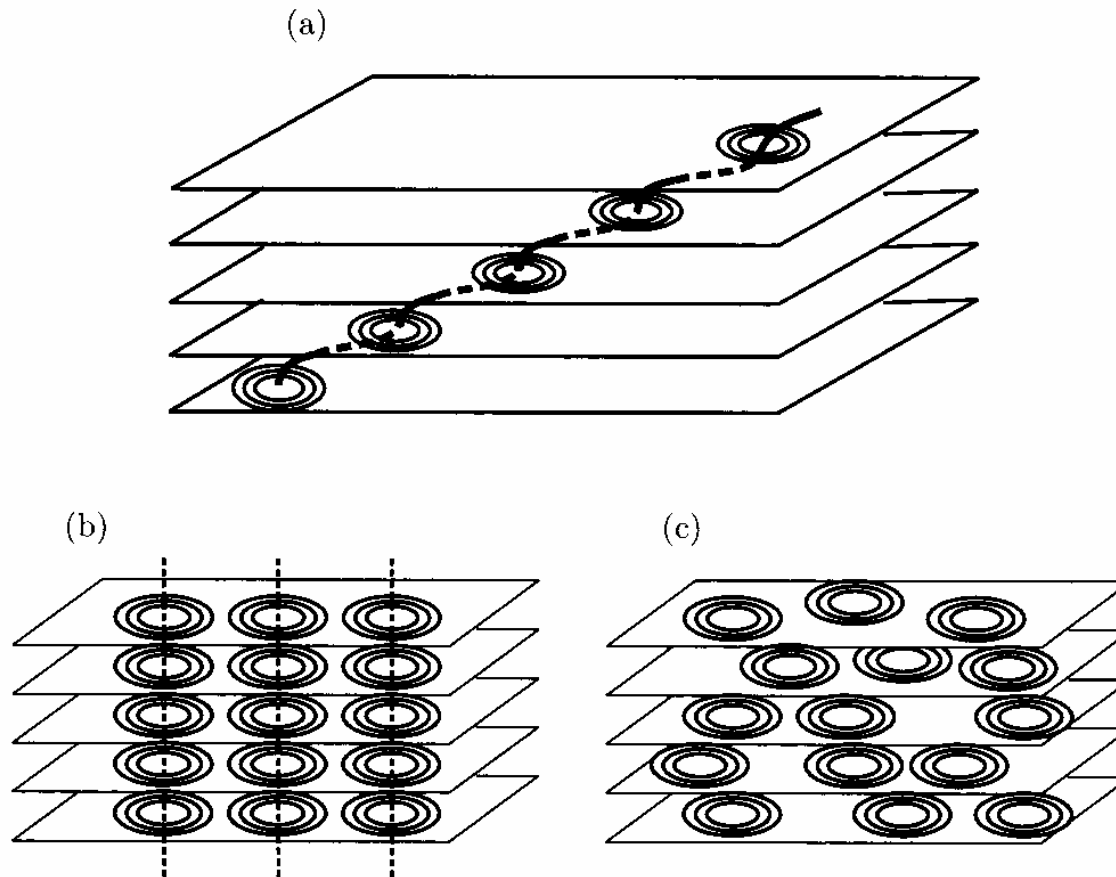


図 6.4 (a) 層状超伝導体におけるパンケーキ渦とジョセフソン・ストリング. (b) 層間の結合が比較的強い場合. (c) 層間の結合がきわめて弱い 2 次元的な場合には, 異なる層のパンケーキ渦は互いにほぼ独立にふるまう.

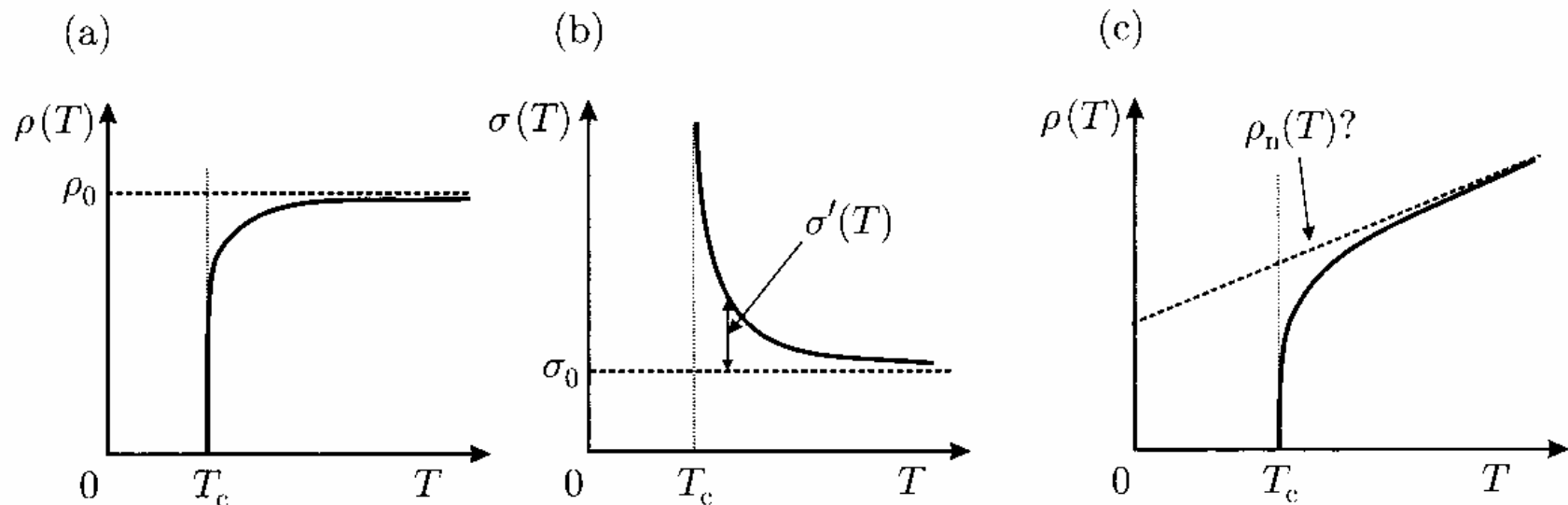


図 6.5 (a) 通常の超伝導体における電気抵抗の温度変化. 点線は常伝導状態の抵抗を表す. (b) 電気伝導度の温度変化. 常伝導状態の伝導度を引き算したものがパラ伝導度である. (c) 高温超伝導体における電気抵抗の温度変化. この場合「常伝導状態の伝導度」を見積もることは単純ではない.

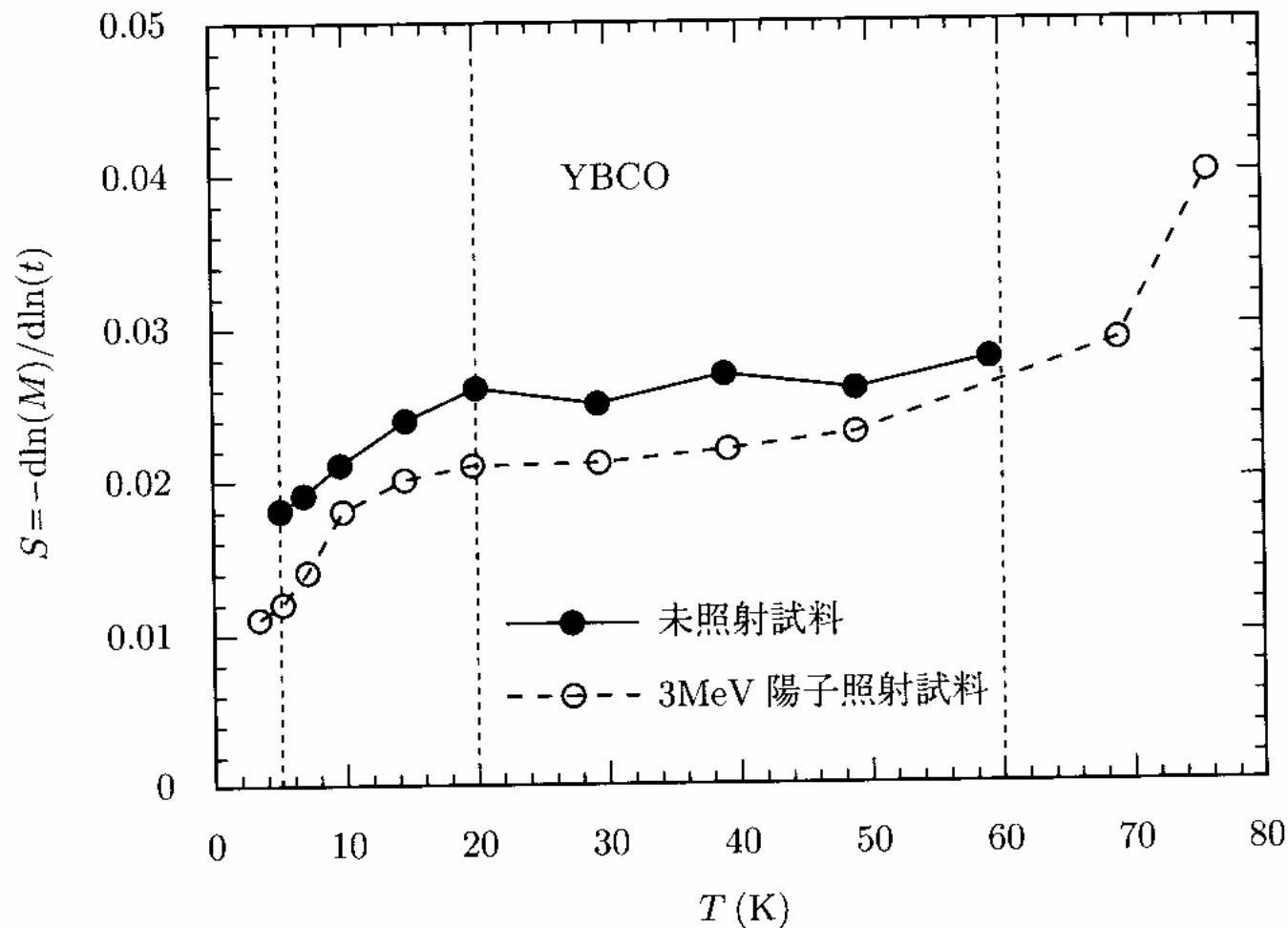


図 6.6 高温超伝導体 (YBCO) における非平衡磁化の緩和率 $S = -d(\ln M)/d(\ln t)$ の温度依存性. [Y. Yeshurun *et al.*, Rev. Mod. Phys. **68** (1996) 911]

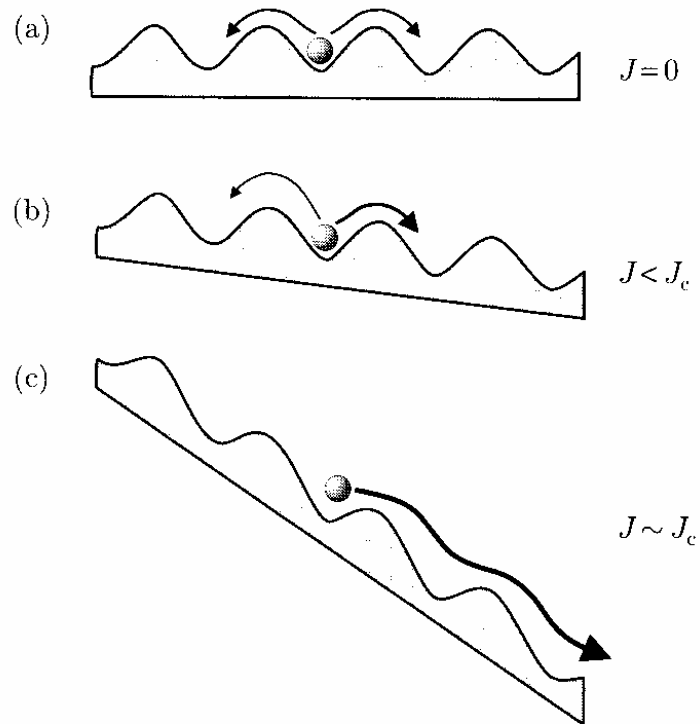


図 6.7 磁束に対するピン留めポテンシャルの模式図. (a) $J = 0$ の場合, 熱活性によって磁束は隣接するピン留め位置へとホッピングするが, 左右へのホッピングが等確率なので正味の運動は生じない. (b) $0 < J < J_c$ の場合, ローレンツ力によって左右のポテンシャル障壁の高さに差ができてホッピング確率に不均衡が生じるため, 平均として磁束の拡散的運動が起こる. (c) 電流密度が非常に大きくなって ($J \approx J_c$) ローレンツ力がピン留め力を超えると, 磁束の運動はホッピングではなく連続的なフローに移行する.

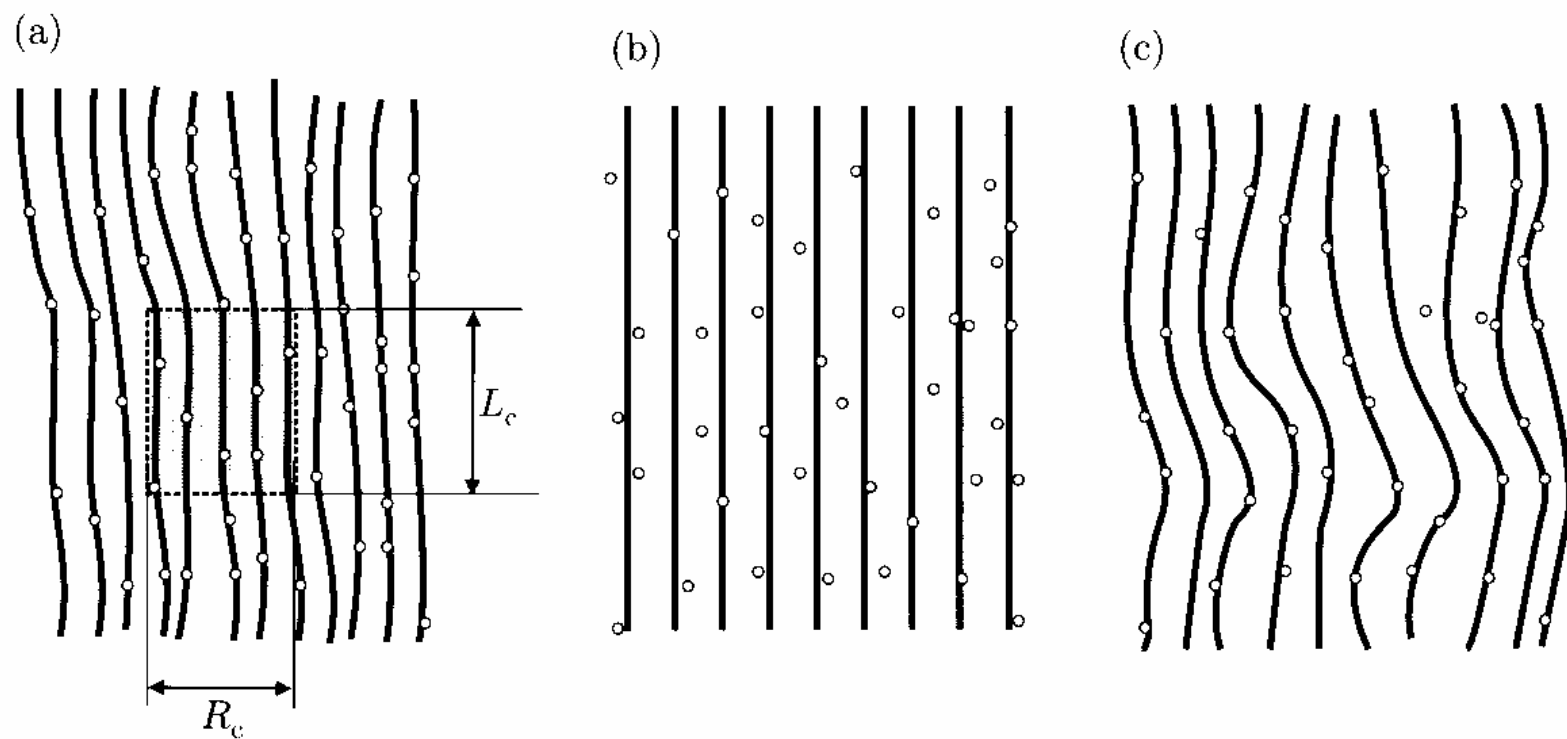


図 6.8 (a) 磁束系の相関長と磁束バンドルの概念. (b) ランダムに分布したピン留め中心と剛体的磁束格子の相互作用. (c) 柔らかい磁束多体系の場合.

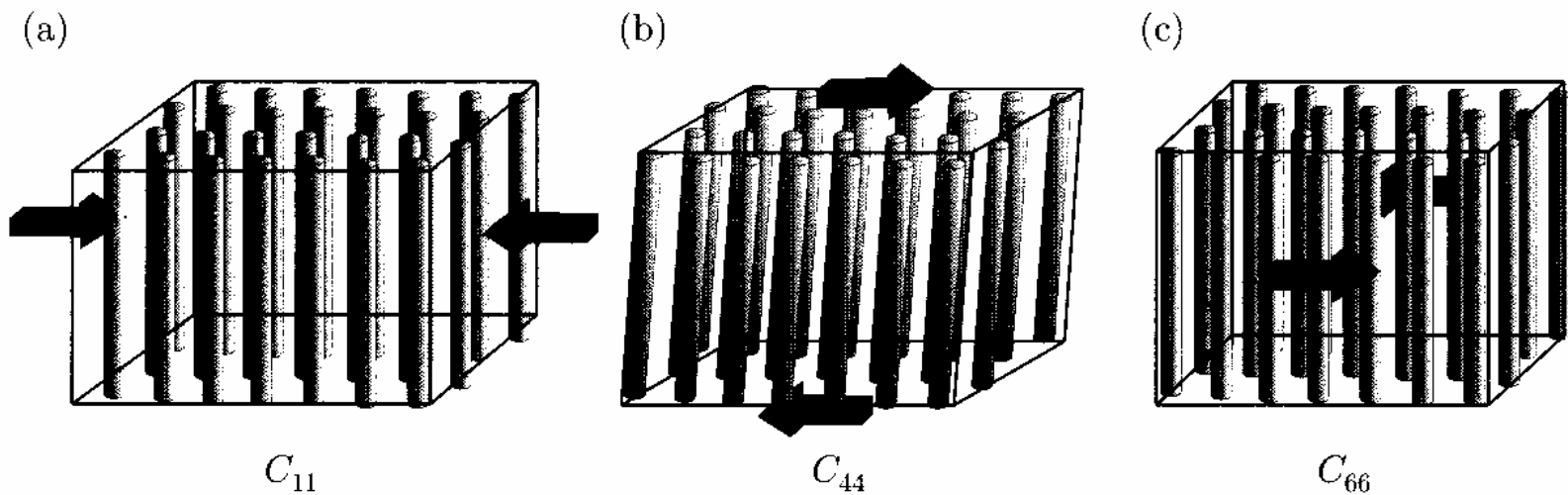


図 6.9 磁束格子の弾性変形による歪みの様子：(a) 一様圧縮 (compression) (C_{11}), (b) ねじれ (傾け) 変形 (tilt) (C_{44}), (c) ずれ変形 (shear) (C_{66}).

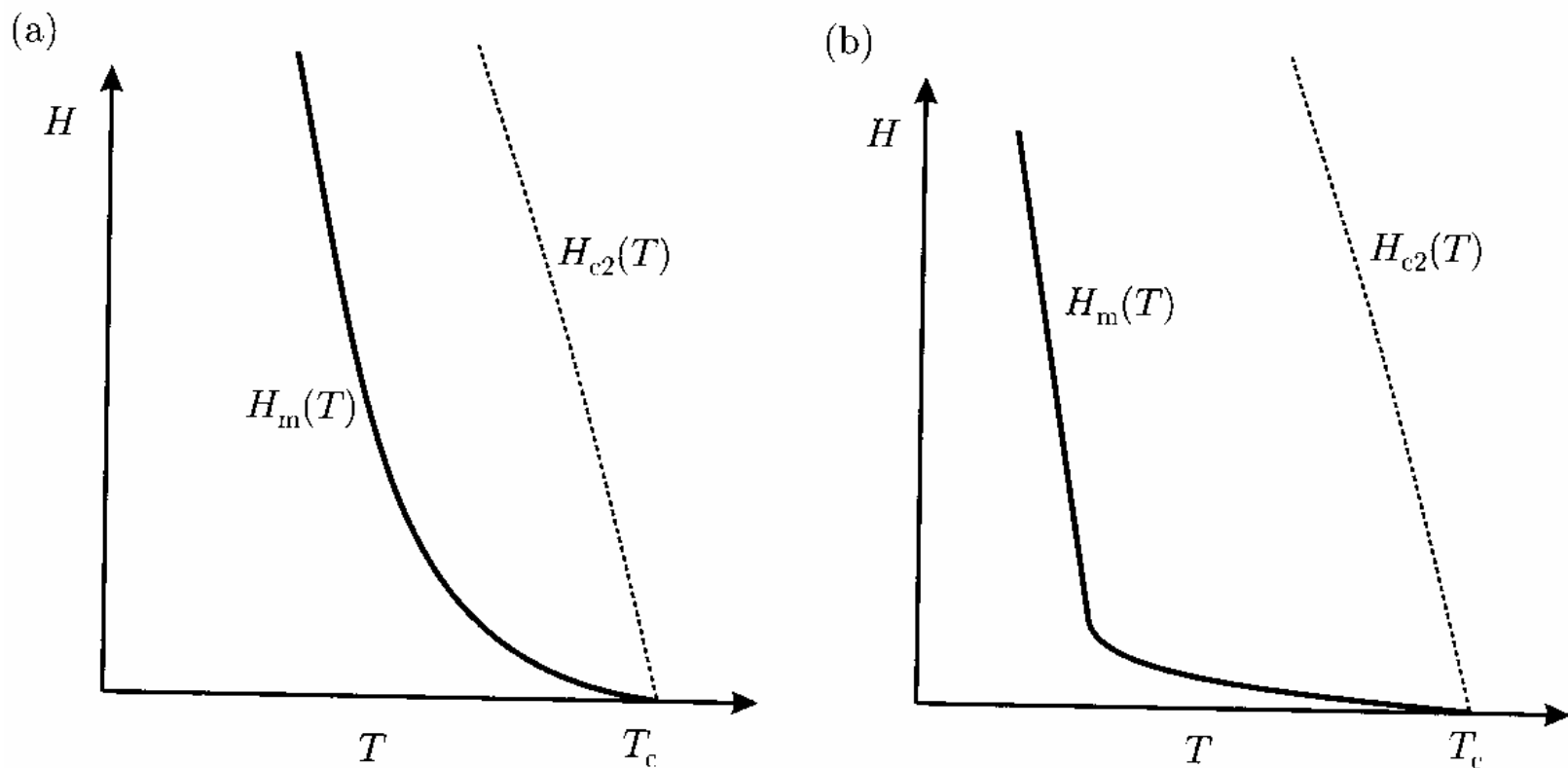


図 6.10 高温超伝導体の磁束多体系の相図. (a) 比較的異方性の小さい YBCO の場合. (b) 2次元性の強い BSCCO の場合.

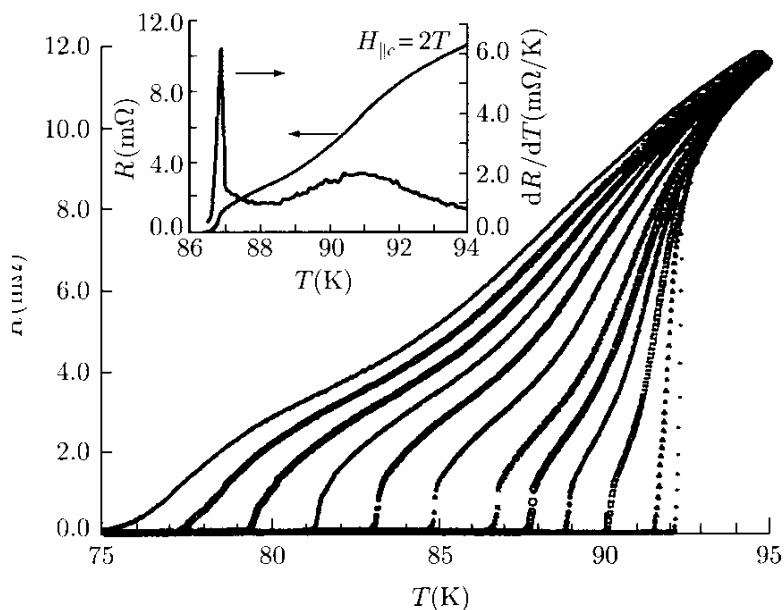
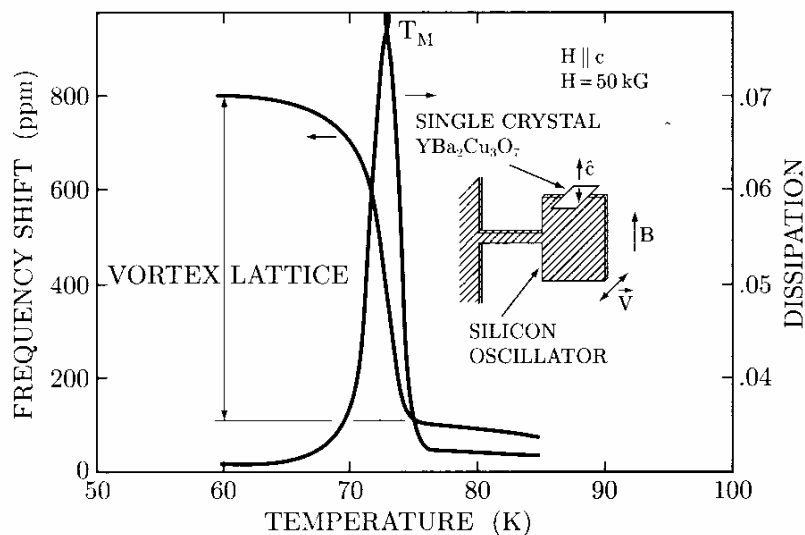


図 6.11 (a) 高温超伝導体試料を貼り付けたねじれ振動子の磁場中での共振のようす。 T_M と書かれた温度において共振周波数の急激なシフトとダンピングの鋭いピークがみられる。 [P. Gammel *et al.*, Phys. Rev. Lett. **61** (1988) 1666] (b) 双晶を取り除いた高温超伝導体 (YBCO) 単結晶の超伝導転移。 このデータは図 6.1 と基本的に同様のものであるが、より乱れの少ないこの試料では超伝導転移の途中に折れ曲がりがあることが明確に観測される。 これは磁束系の液相固相転移に対応している。 [W.K. Kwok *et al.*, Phys. Rev. Lett. **69** (1992) 3370]

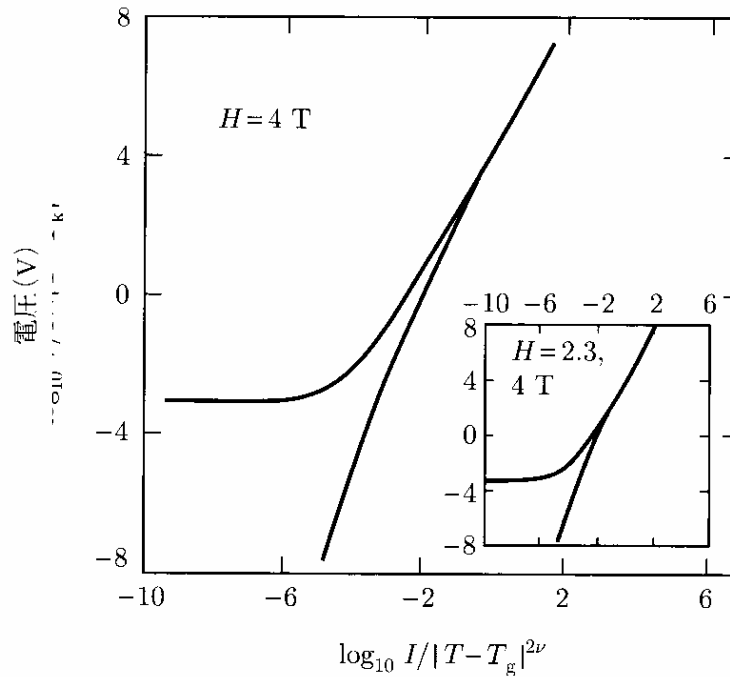
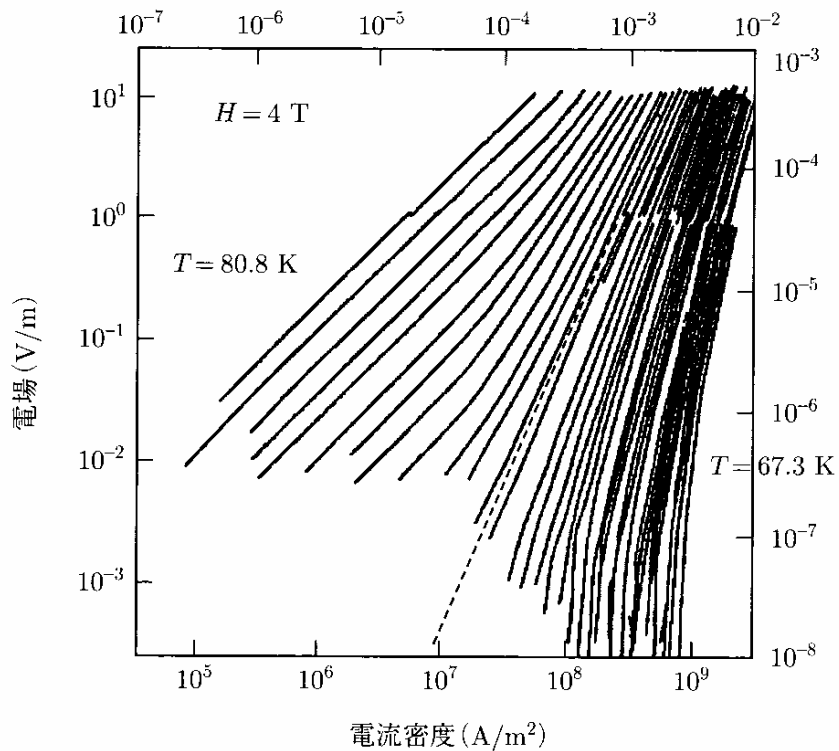


図 6.12 磁束ガラス転移のスケーリング解析. (a) 磁場中の YBCO 薄膜の電流電圧特性の温度変化のデータ. I-V 特性が冪乗則に従うところ (図の破線) が磁束ガラス転移温度 T_g に相当する. (b) T_g の上下の I-V 特性がそれぞれ 1 つのスケーリング関数にまとまることを示した図. [R. H. Koch *et al.*, Phys. Rev. Lett. **63** (1989) 1511]

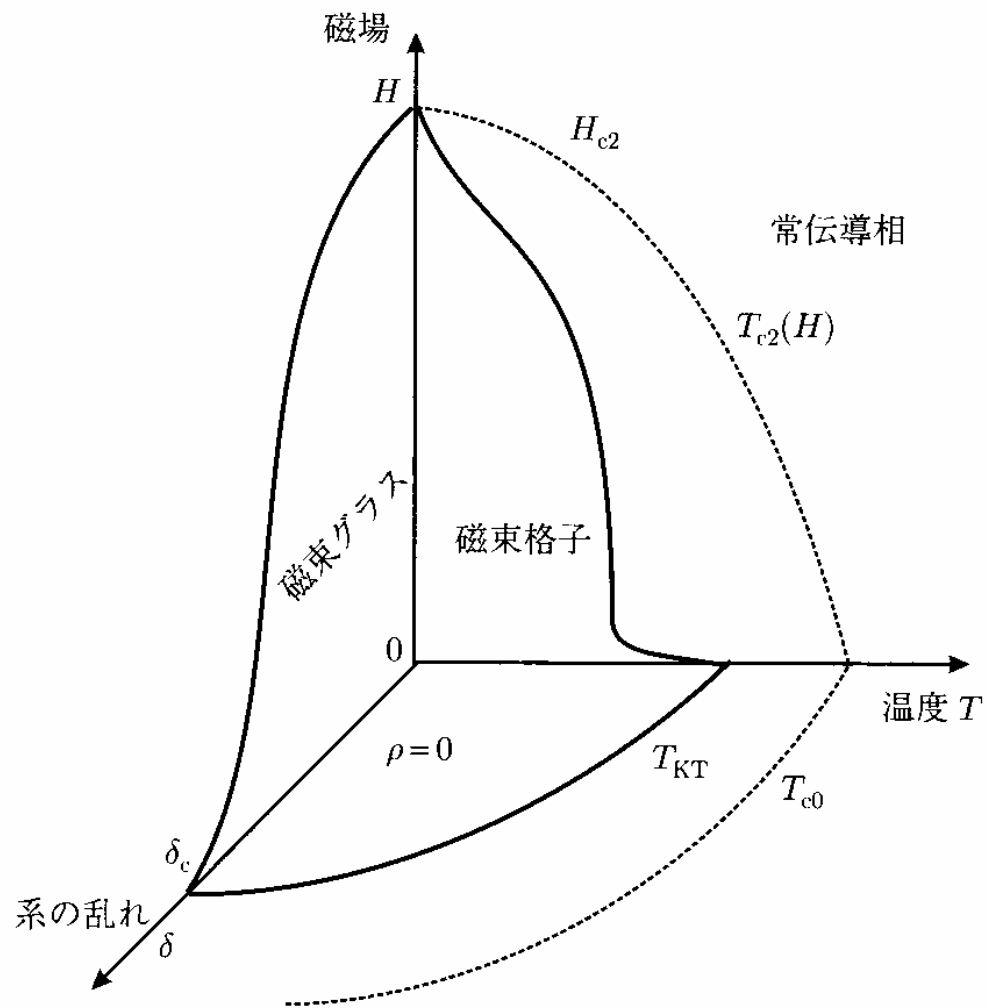


図 6.13 温度, 磁場, 系の乱れの強さ, を 3 つの軸にとって描いた磁束多体系の相図.

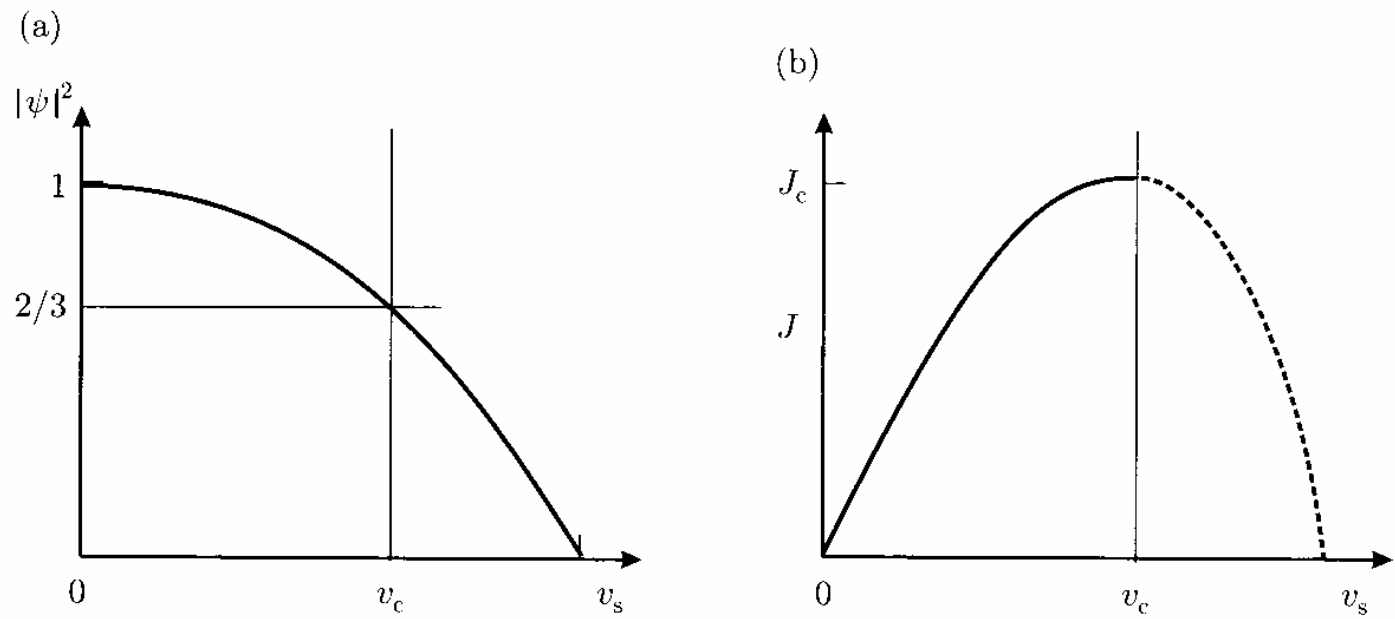


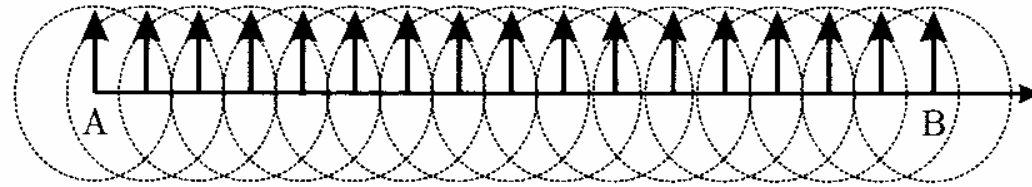
図 7.1 超流動速度の関数としての (a) 秩序パラメーターと, (b) 電流密度.

A

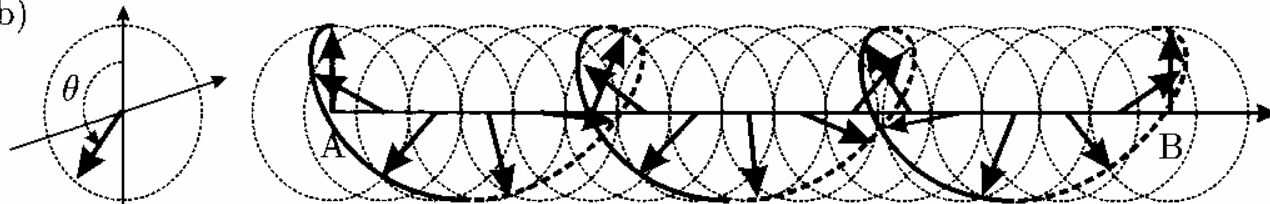
B



(a)



(b)



(c)

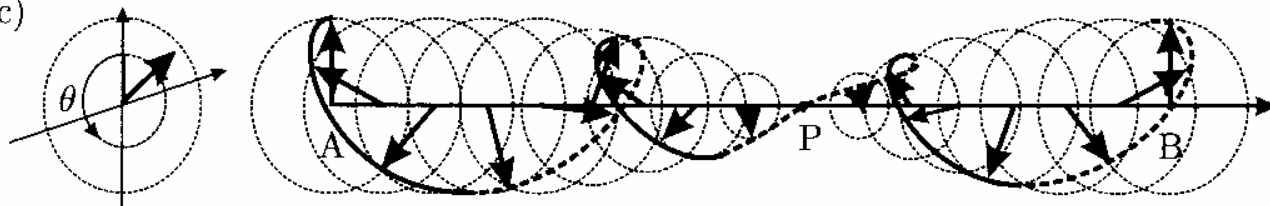


図 7.2 超伝導細線の点 AB 間の各点での秩序パラメーター $\Psi(x)$ を極座標表示で表したもの。(a) AB 間に電流が流れていない場合、 $\Psi(x)$ は場所によらず一定である。(b) ゼロ電位差で超伝導電流が流れている状態。極座標表示の $\Psi(x)$ は振幅が一定で位相が変化するので、らせんを描く。(c) AB 間に電位差 V が発生している状況。細線の途中 (点 P) に $|\Psi|$ の値が小さくなる場所ができて、そこで 2π だけの位相の跳び (位相スリップ) が周期的に起こることによって定常状態が保たれる。

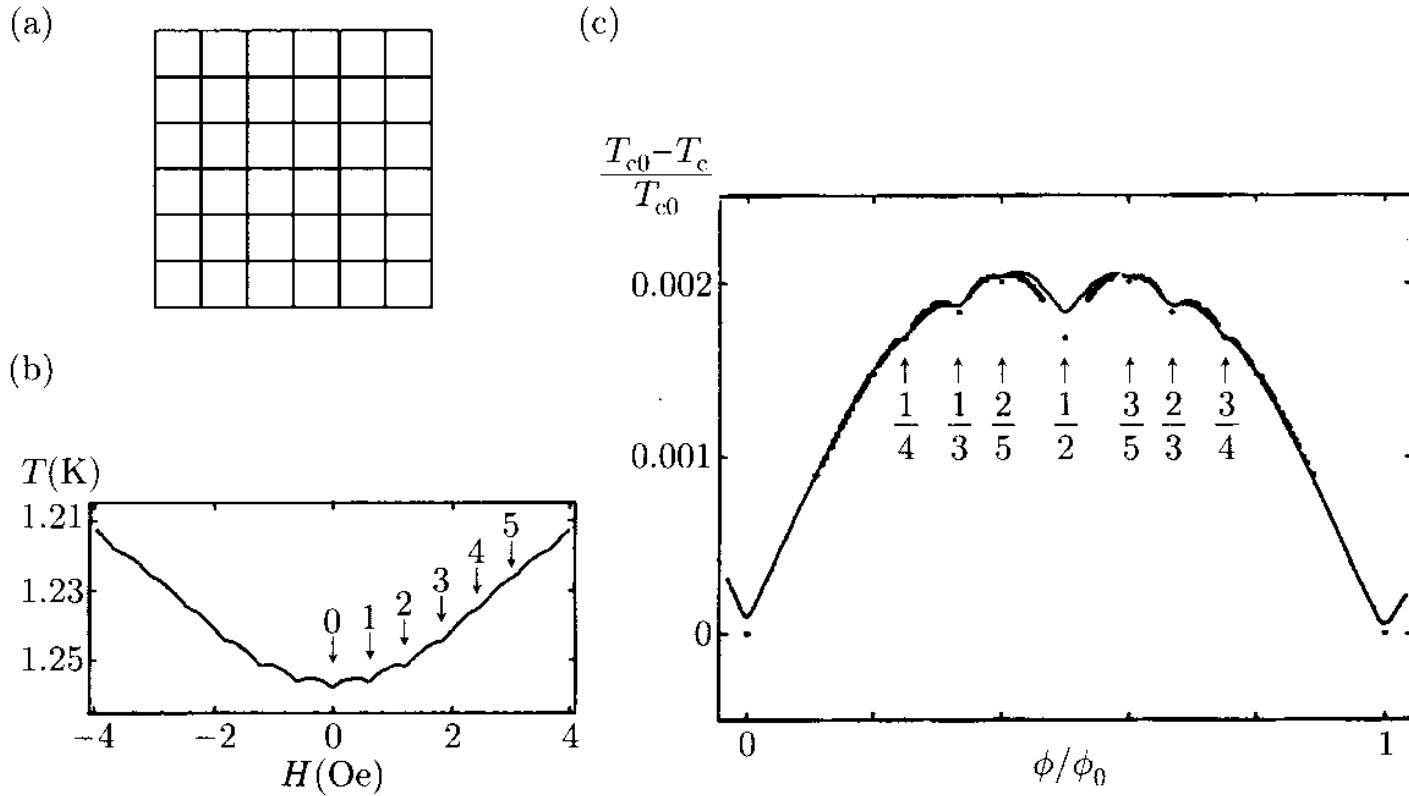


図 7.3 (a) 2次元正方格子の超伝導ネットワーク. (b) リトル-パークス振動. (c) 振動の1周期の中に現れる微細構造. [B. Pannetier *et al.*, Phys. Rev. Lett. **53** (1985) 1845]

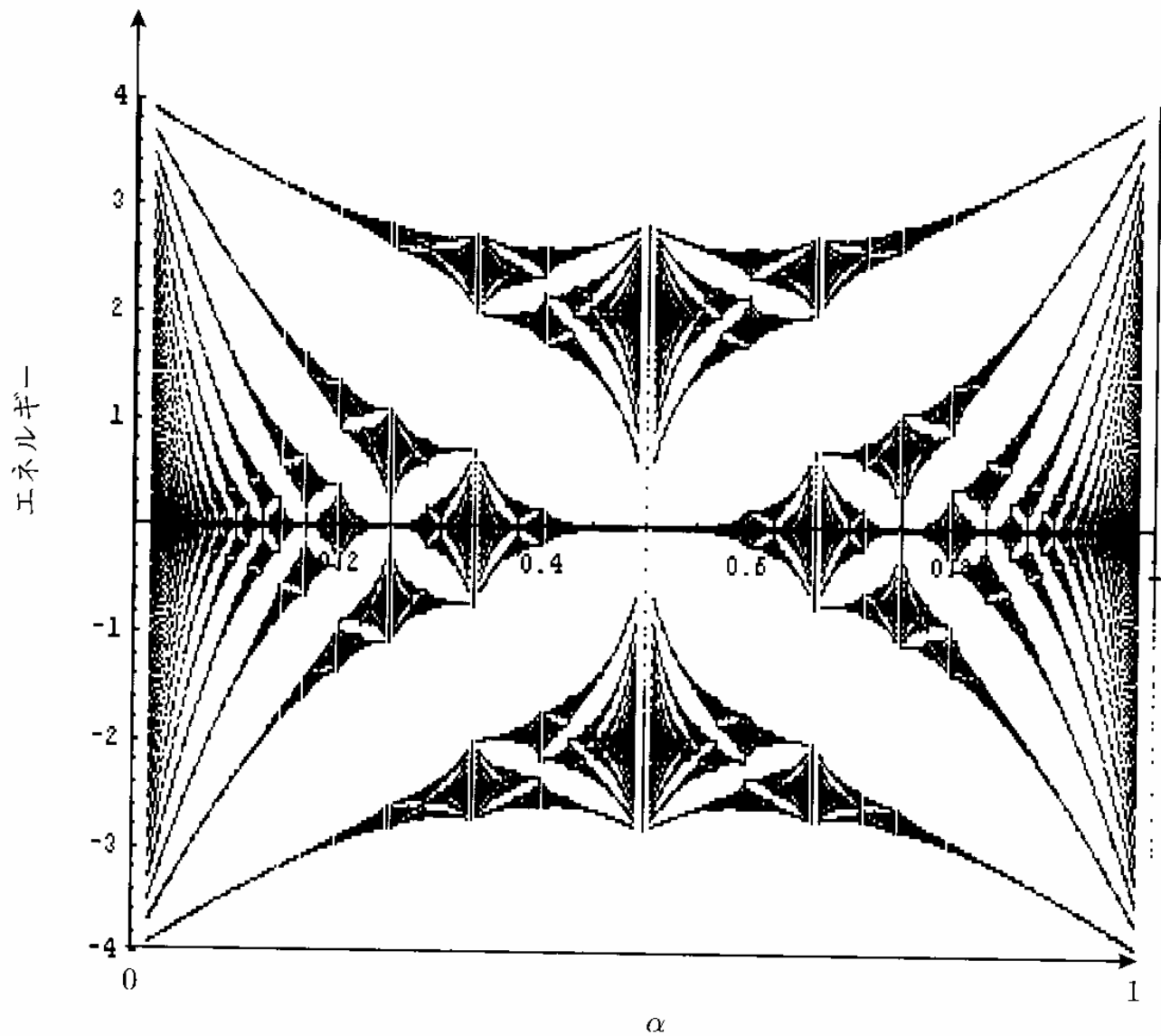
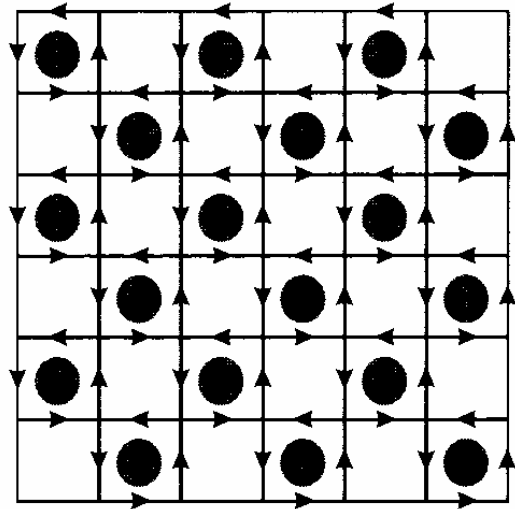


図 7.4 2次元正方格子上の電子系に磁場をかけたときの固有エネルギースペクトル (ホフスタッター・ダイアグラム).

(a)



(b)

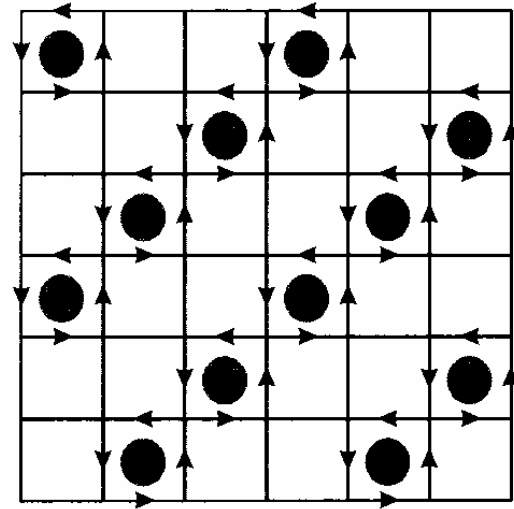
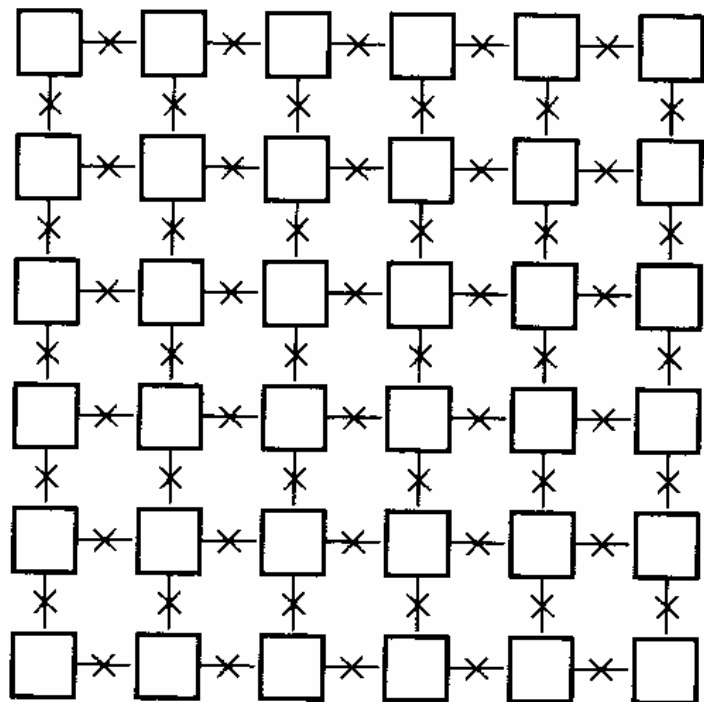


図 7.5 超伝導ネットワークにおける渦糸の安定配置. (a) $\alpha = 1/2$ の場合, (b) $\alpha = 1/3$ の場合.

(a)



(b)

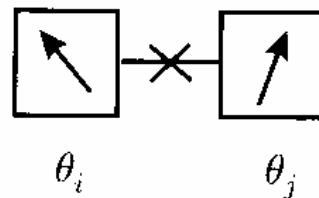


図 7.6 (a) 2次元正方格子のジョセフソン接合アレイ. 四角は超伝導の島を表す. 隣接する島はジョセフソン接合によって弱く結合している. (b) 各島の秩序パラメーターをベクトルとして表すとスピンのXYモデルと同型になる.

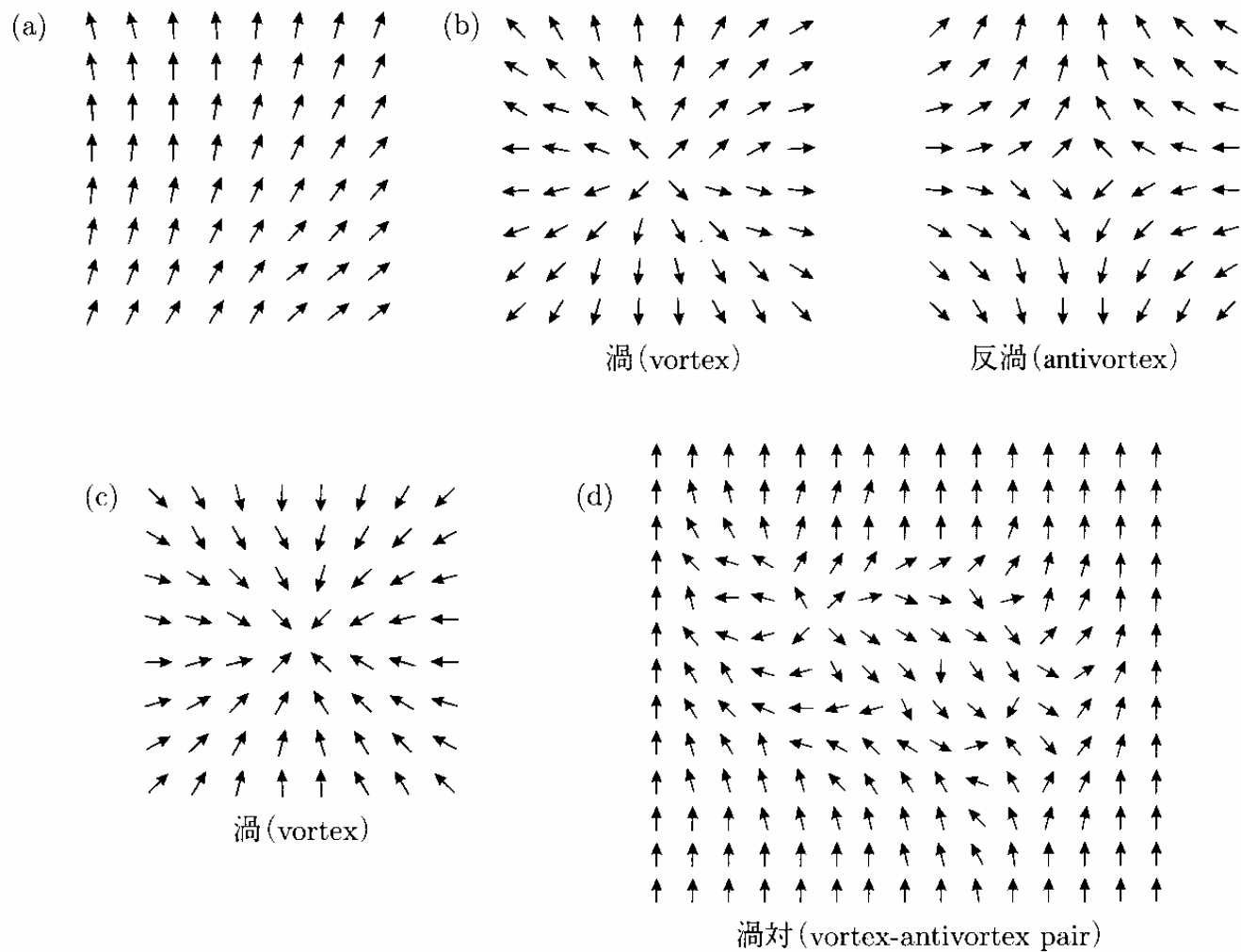


図 7.7 (a) 有限温度では，長波長のスピン波励起により長距離にわたるスピンの秩序は失われる．(b) トポロジカル欠陥である渦 (vortex) と反渦 (antivortex)．(c) このスピン配置は (b) と等価な渦である．(d) 渦・反渦の対 (vortex-antivortex pair)．

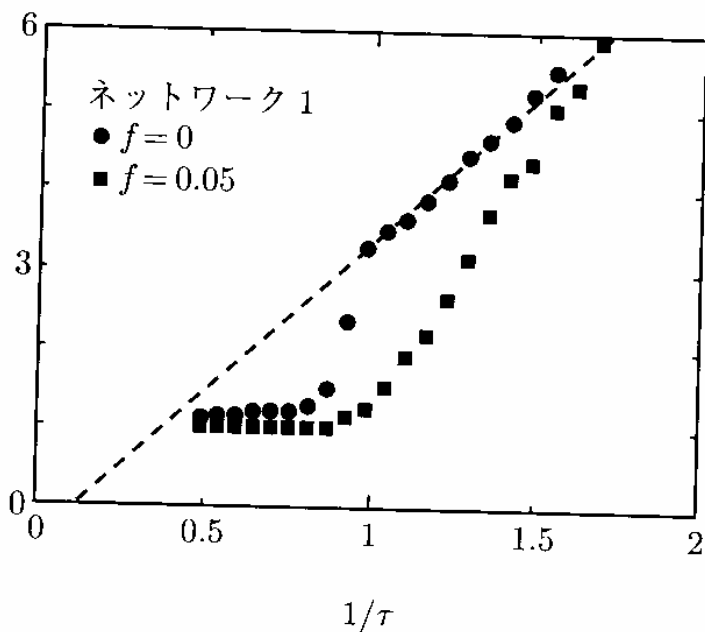
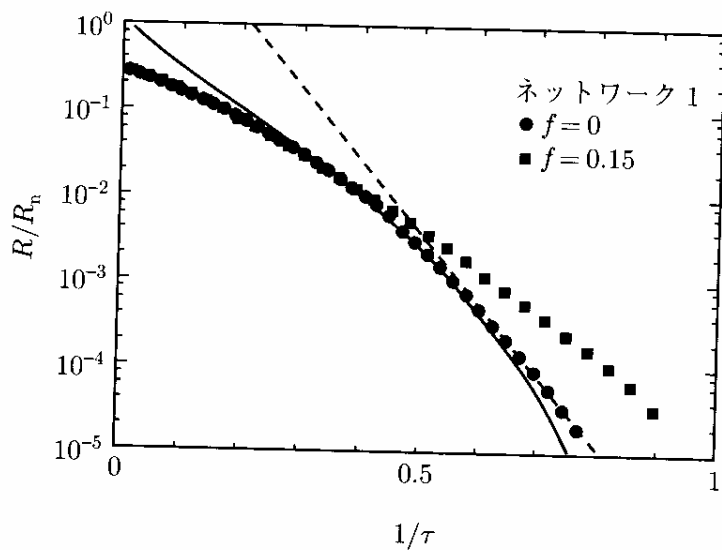


図 7.8 高い常伝導抵抗をもつ細線ネットワークでみられる KT 転移の特徴的ふるまい. (a) $T > T_{KT}$ での抵抗の温度依存性は (7.11) 式に従う. (b) $T = T_{KT}$ において $V \propto I^a$ の冪指数 a が 1 から 3 に跳ぶようすがみられる. [H. S. J. van der Zant *et al.*, Phys. Rev. **B50** (1994) 340]

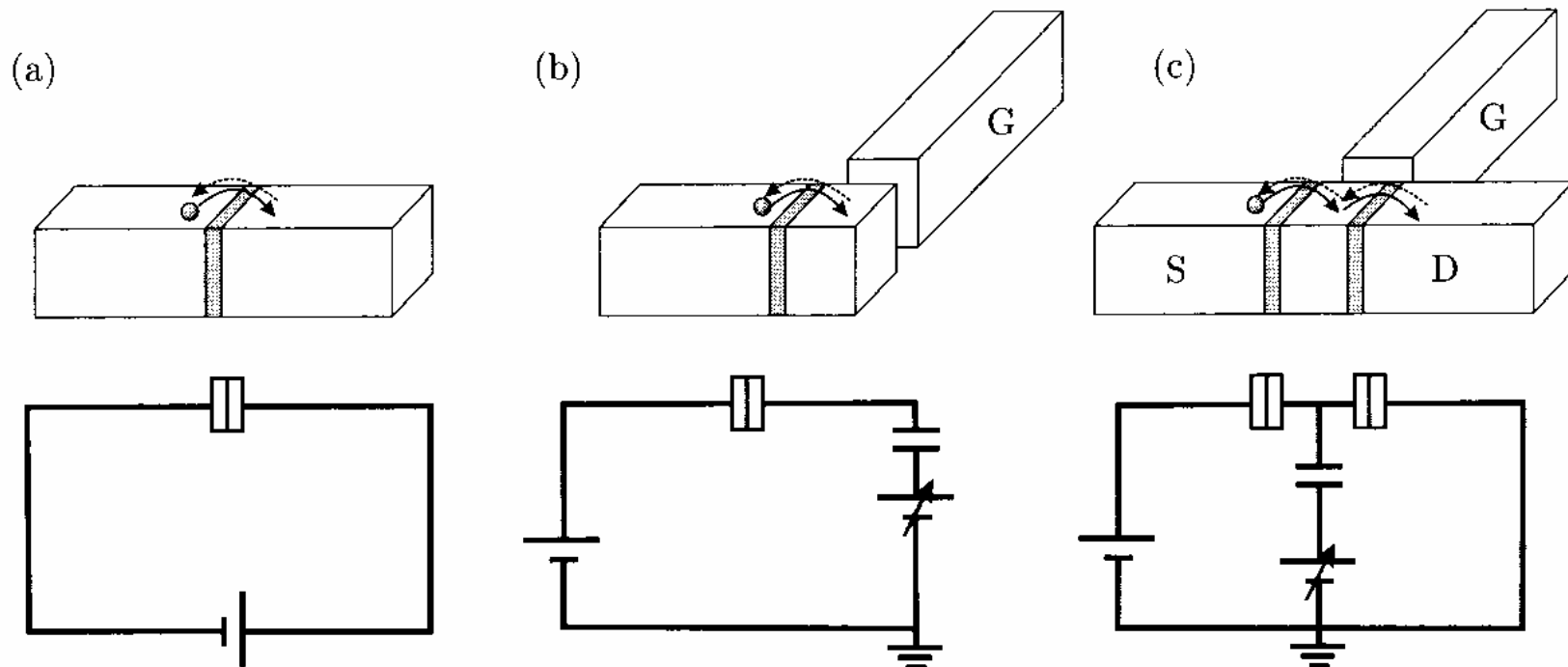


図 7.9 単電子帯電効果が現れる微小トンネル接合系. (a) 微小トンネル接合. (b) 単電子箱 (Coulomb box). (c) 単電子トランジスタ (single electron tunneling (SET) transistor).

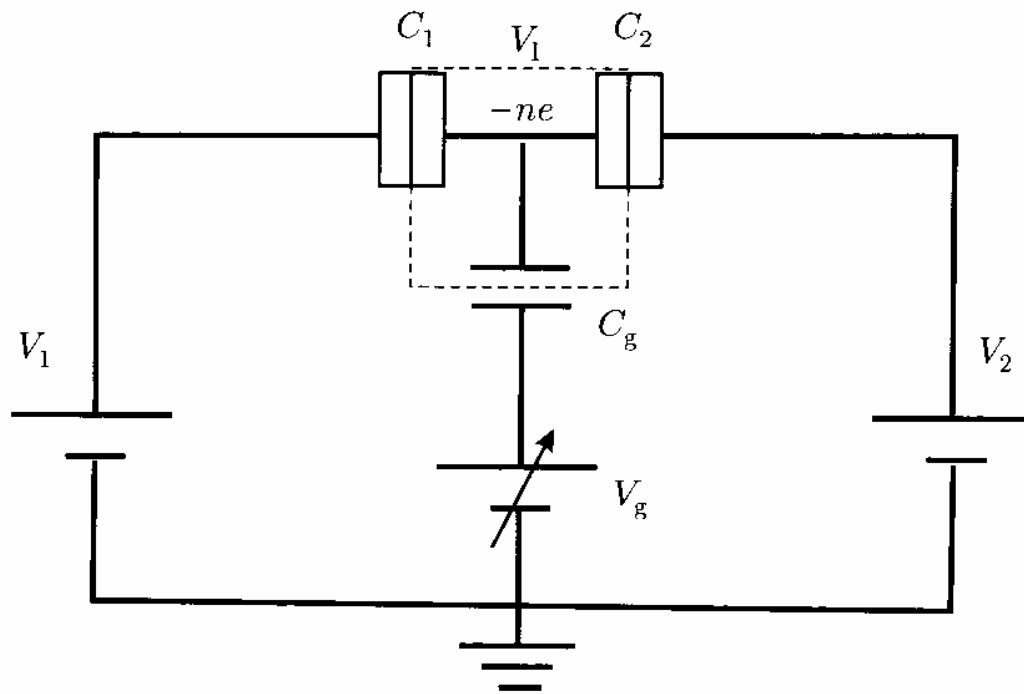


図 7.10 単電子トンネルトランジスタ (SET transistor) 回路.

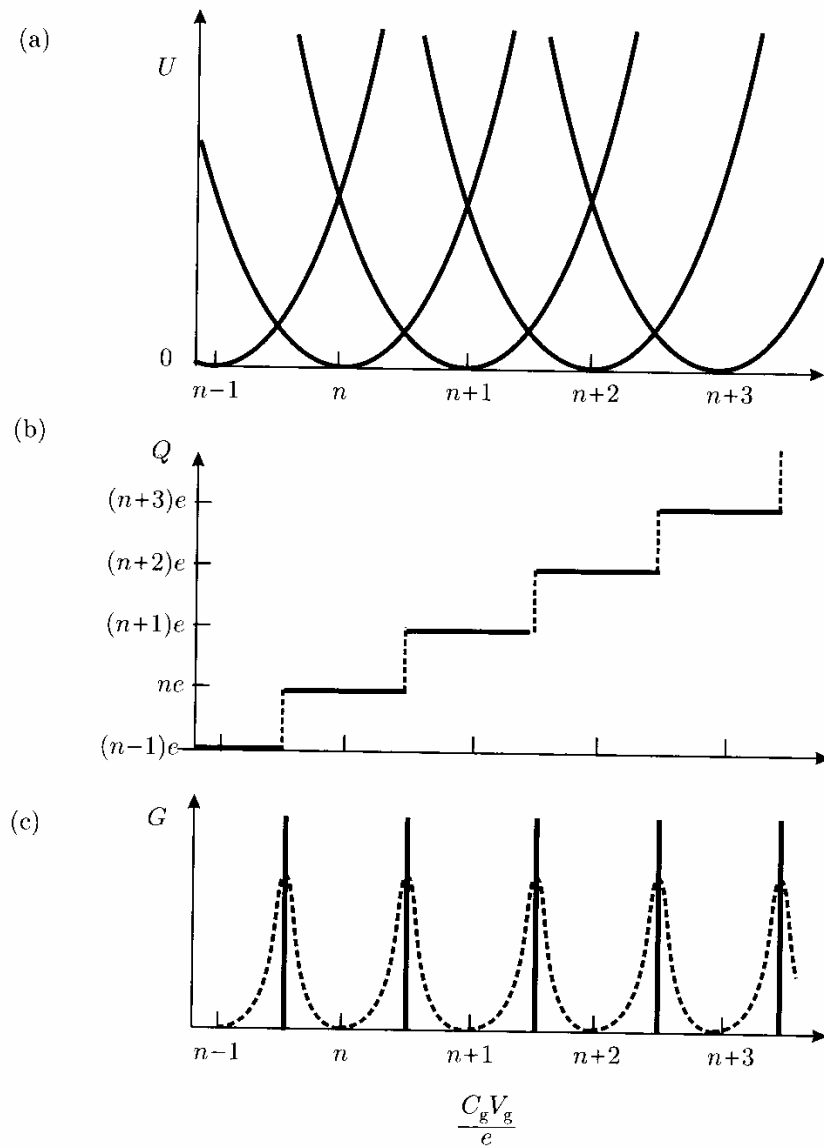


図 7.11 単電子トンネルトランジスタ (常伝導金属) の (a) エンタルピー. (b) 島の電荷. (c) コンダクタンスのクーロン振動 (破線は有限温度).

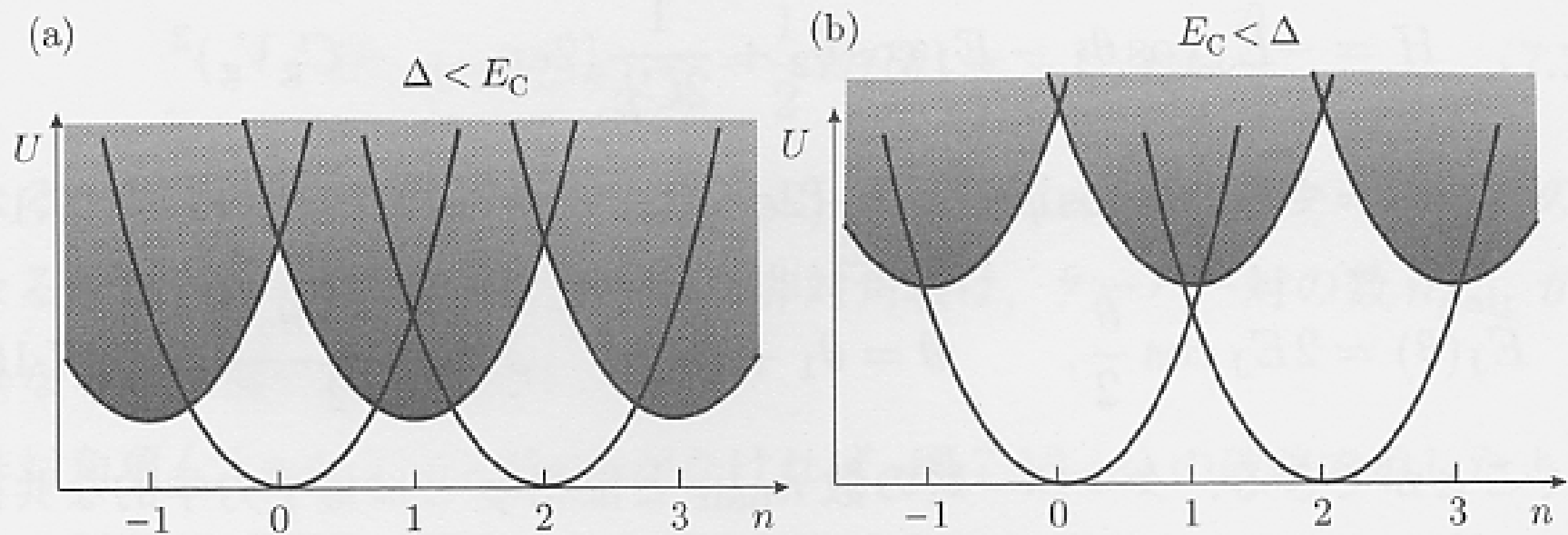


図 7.12 超伝導島をもつ SET トランジスタのエンタルピーと電流 (a) $\Delta < E_C$ の場合. (b) $E_C < \Delta$ の場合.

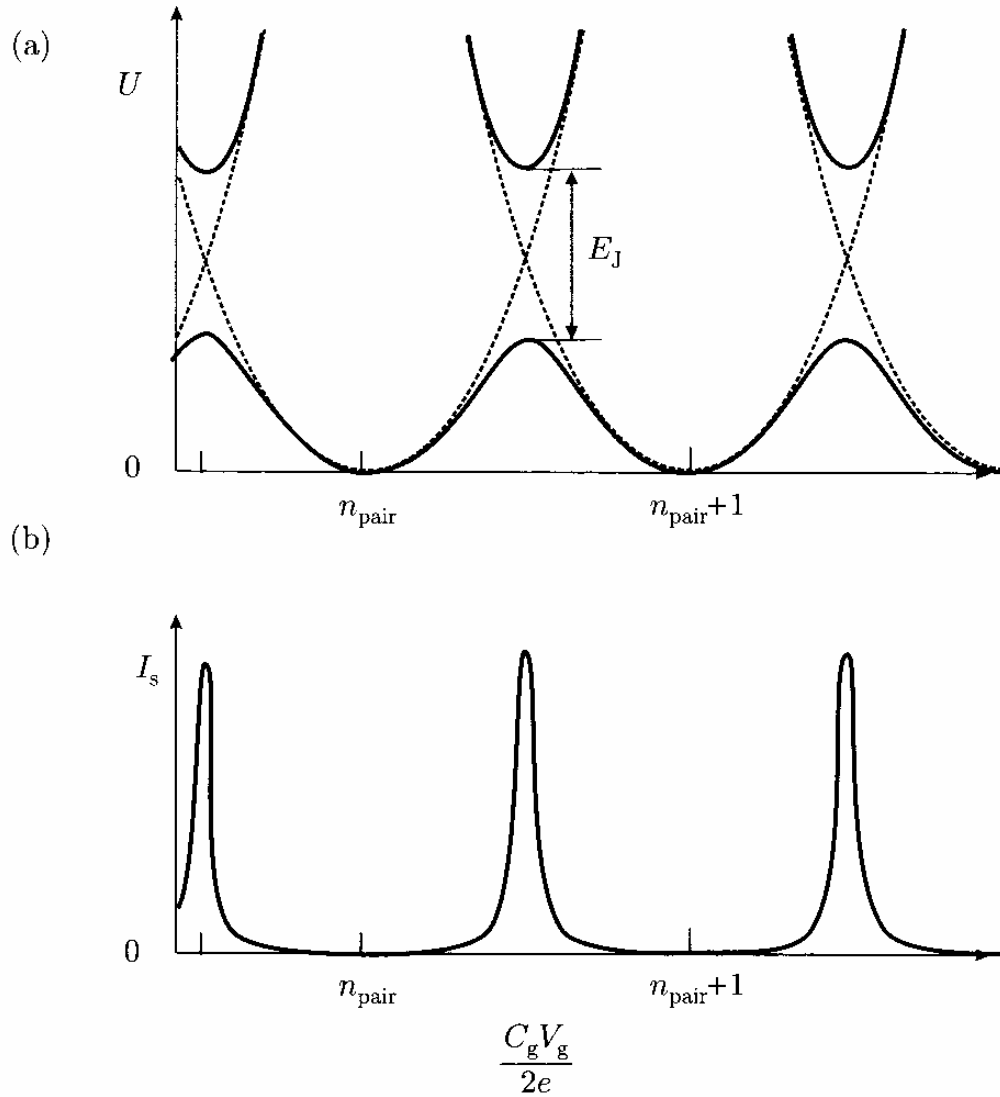


図 7.13 (a) 超伝導 SET トランジスタのエンタルピーのゲート電圧依存性. (b) ジョセフソン臨界電流のゲート電圧依存性.

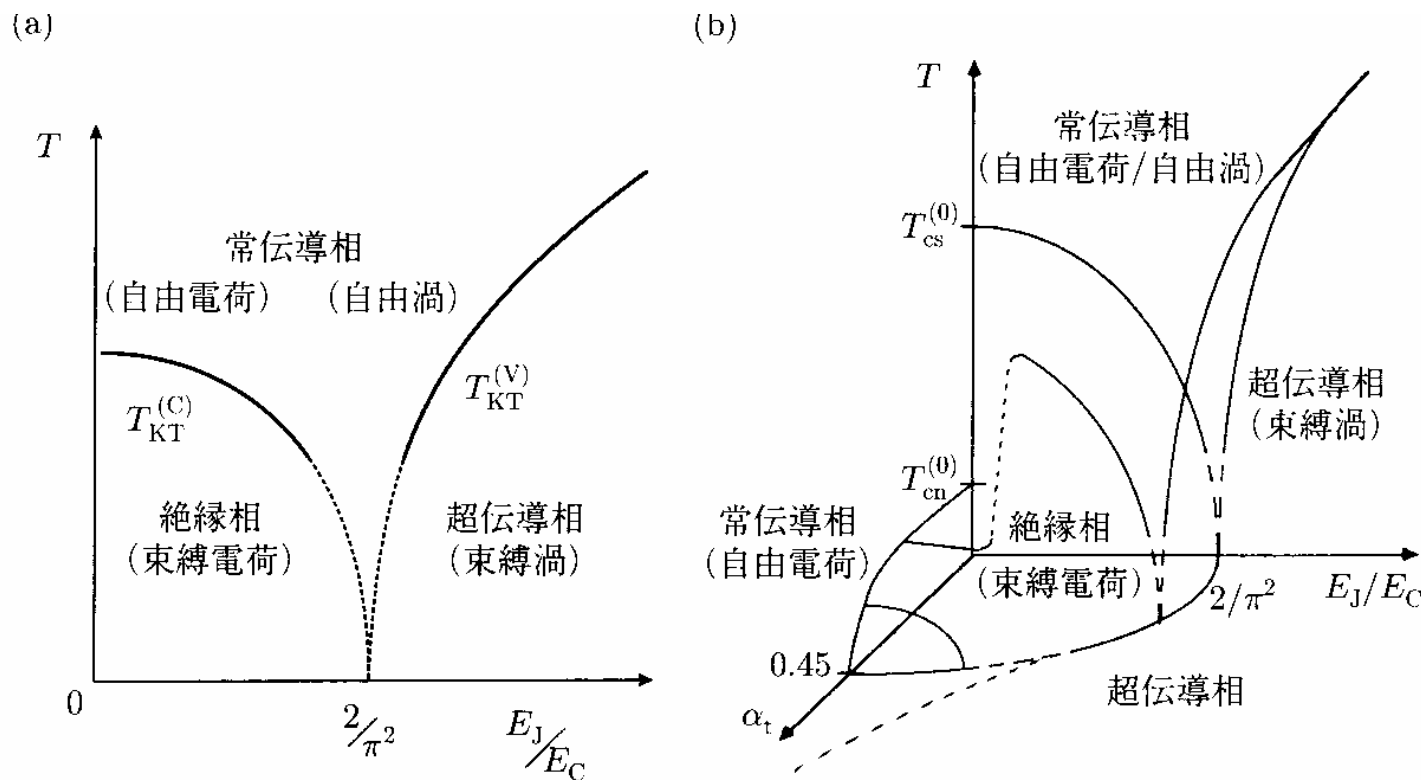
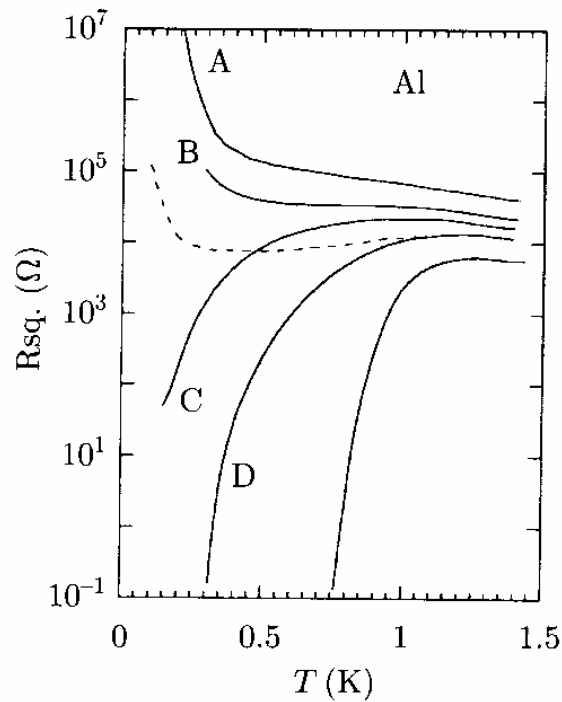


図 7.14 (a) 微小ジョセフソン接合の 2 次元アレイの相図を、温度 T とパラメーター E_J/E_C の平面上に描いたもの。 $E_J \ll E_C$ では電荷の KT 転移、 $E_J \gg E_C$ では渦糸の KT 転移が起こる。 (b) 散逸を表すパラメーター $\alpha_t \equiv R_Q/R_s$ も含めた相図。 $R_s \approx R_Q$ において SI 転移が起こる。 [Fazio and Shōne, Phys. Rev. **B43** (1991) 5307]

(a)



(b)

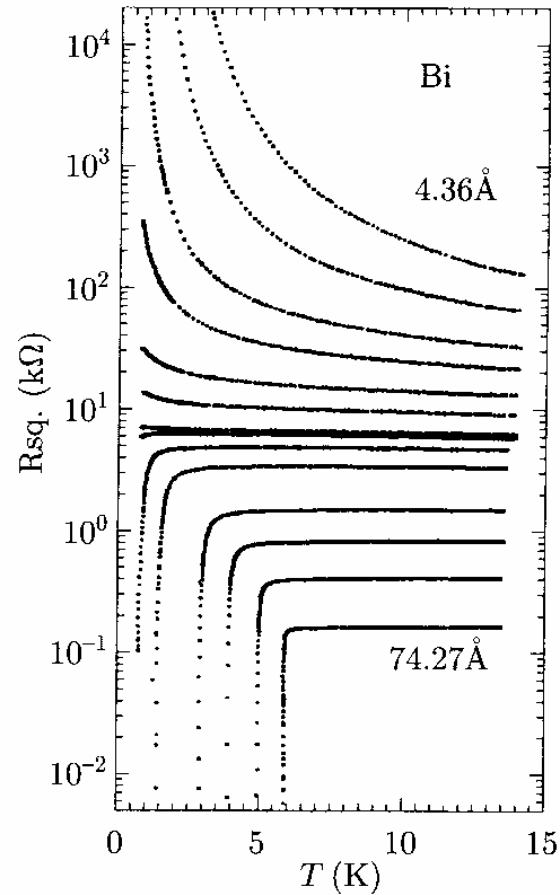


図 7.15 (a) 微小ジョセフソン接合アレイにおける超伝導・絶縁体 (SI) 転移. [Geerling *et al.*, Phys. Rev. Lett. **63** (1989) 326] (b) 低温蒸着によって作製されたビスマス超薄膜における SI 転移. [Haviland *et al.*, Phys. Rev. Lett. **62** (1989) 2180]

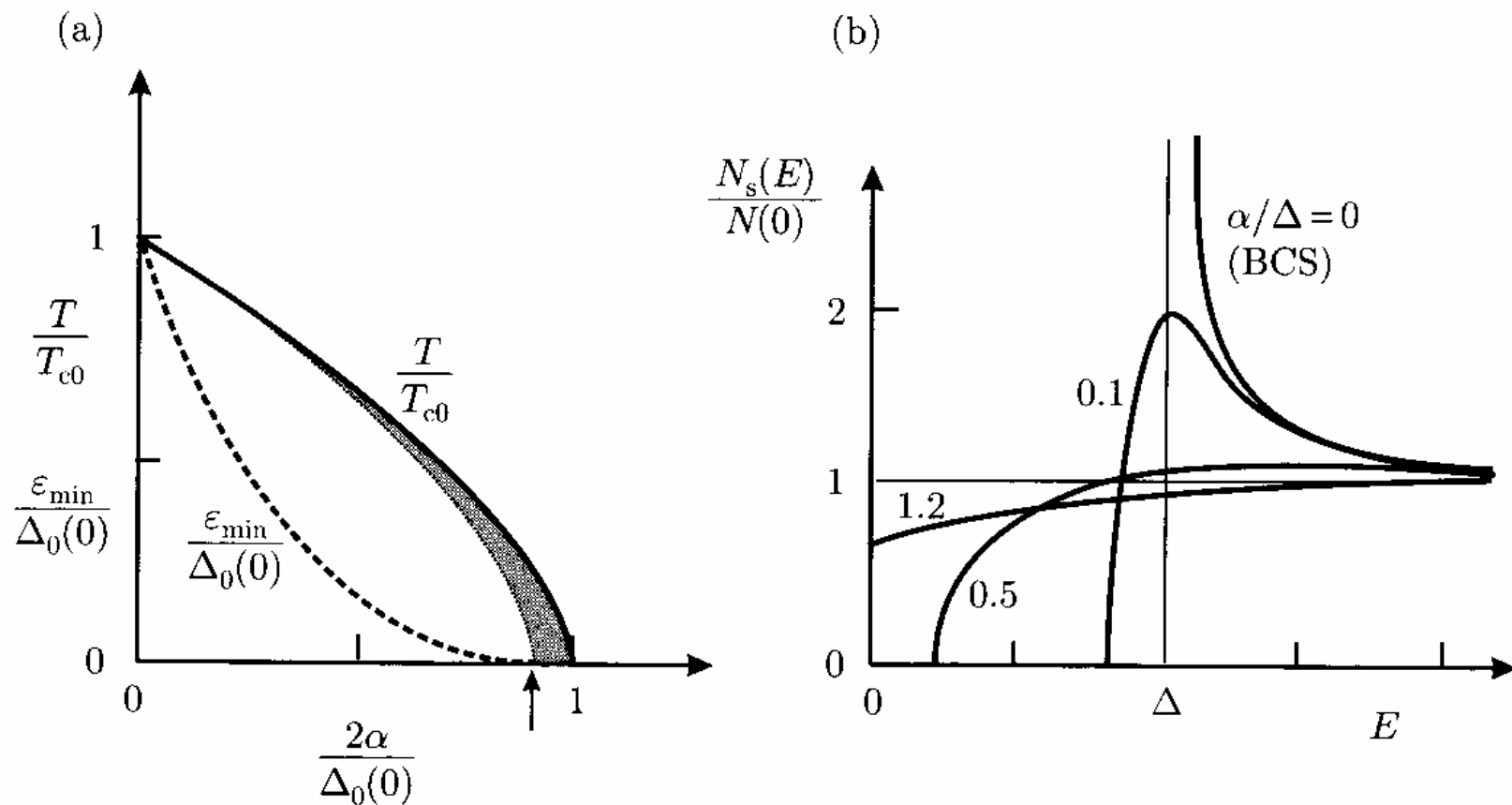


図 8.1 (a) 規格化された対破壊パラメーター $2\alpha/\Delta_0$ と規格化された転移温度 T_c/T_{c0} の間のユニヴァーサルな関係. 影を施した部分ではギャップレス超伝導状態が実現している. (b) 対破壊パラメーターのいろいろな値に対する状態密度 (超伝導ギャップ) のようすを示したもの.

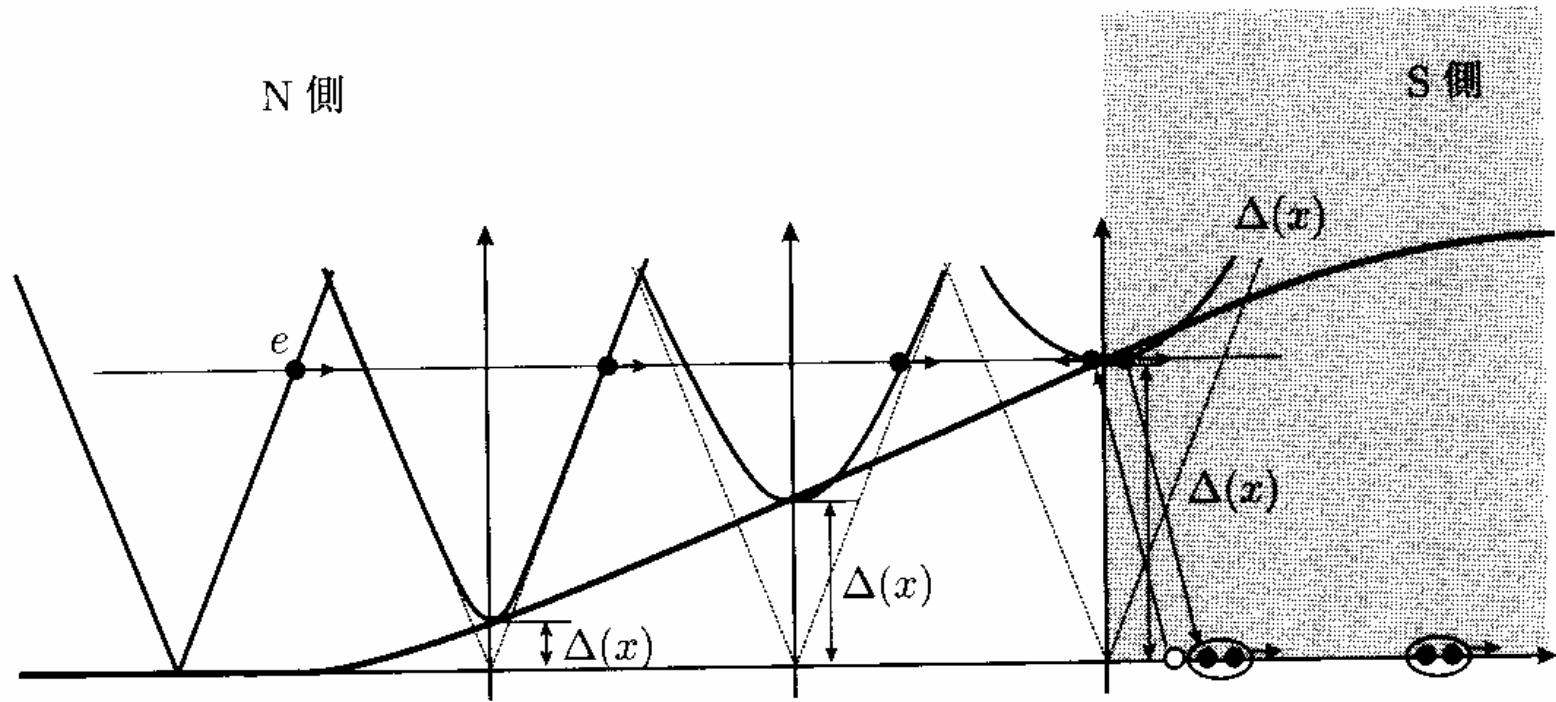


図 8.2 超伝導/常伝導 (SN) 界面における局所的な超伝導ギャップの変化. 常伝導側から電子が入射する場合.

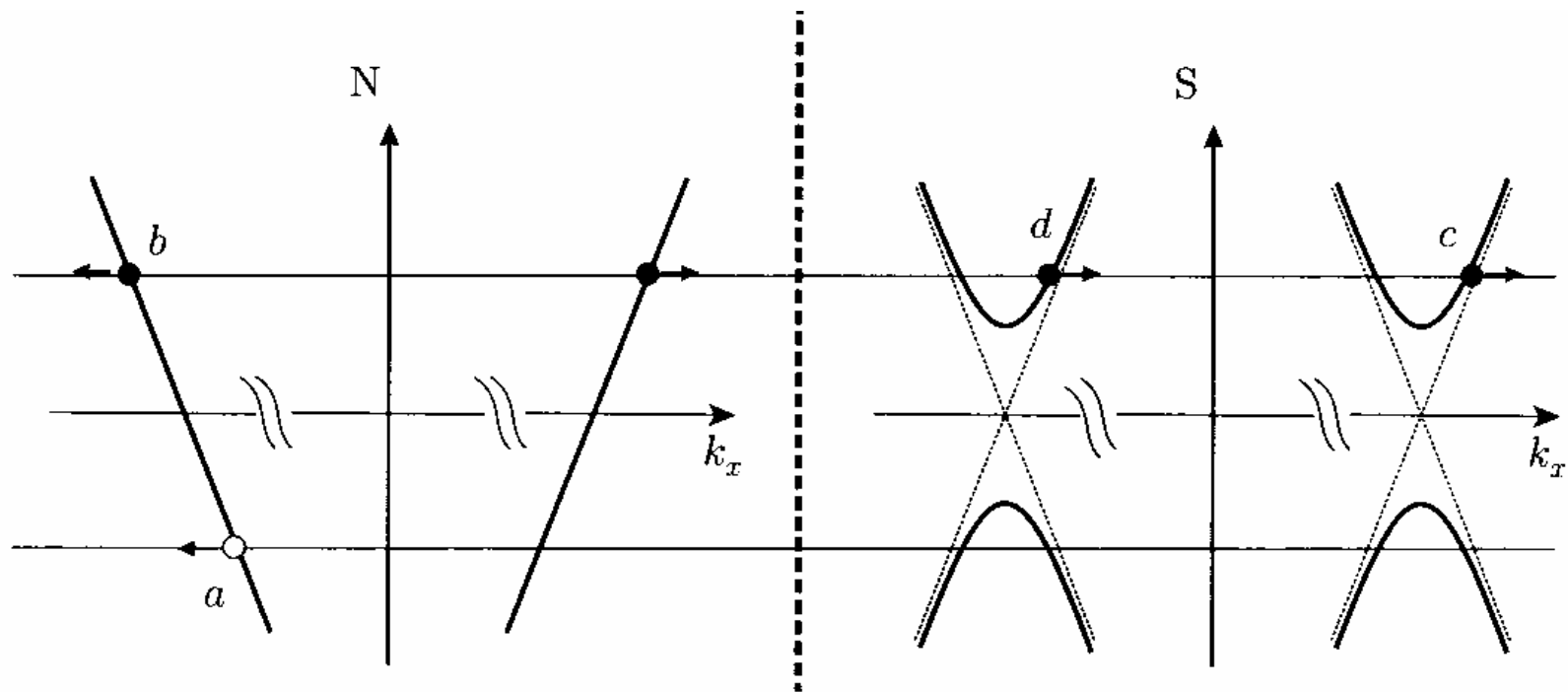


図 8.3 NS 界面における透過および反射過程.

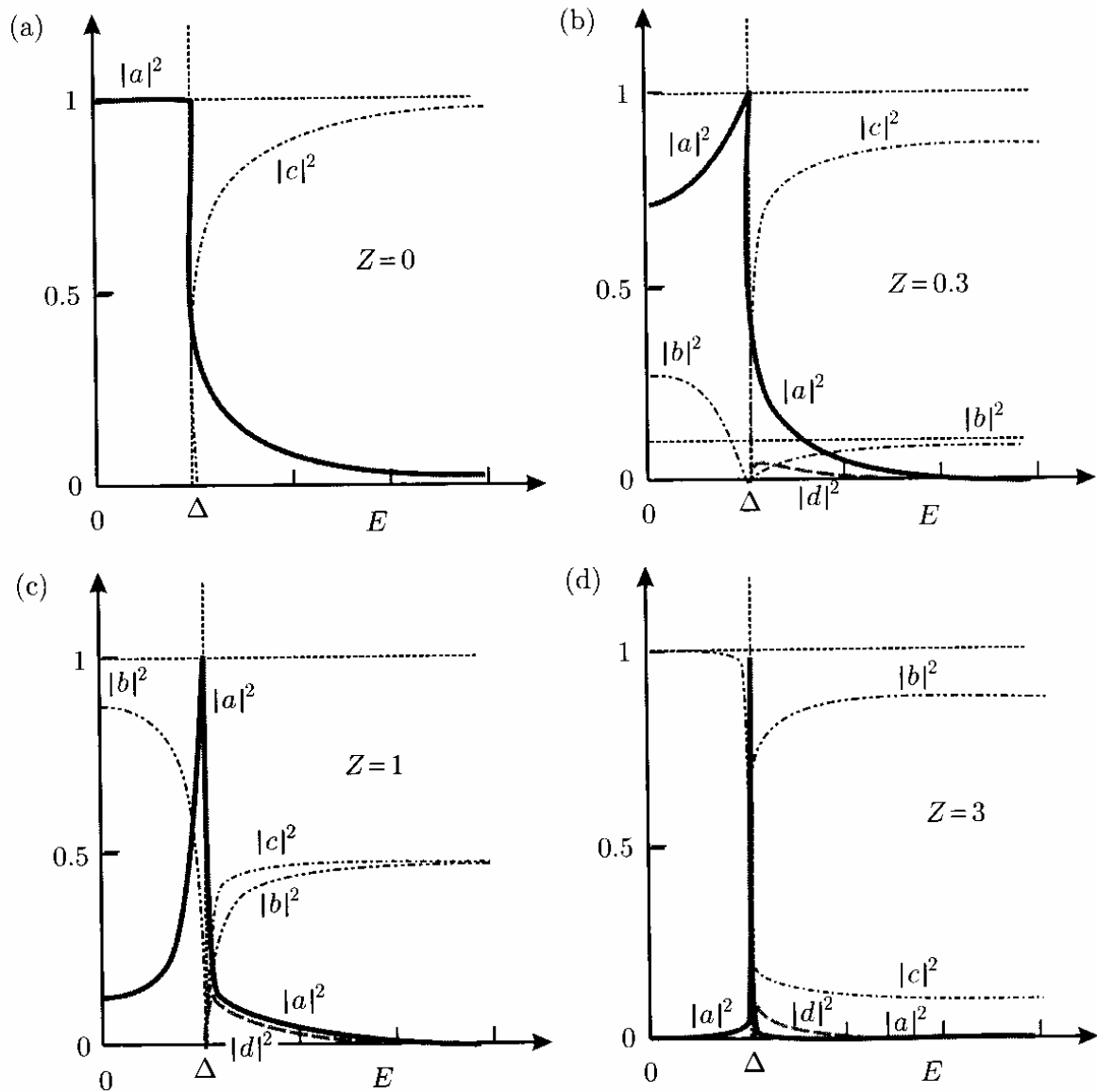


図 8.4 NS 界面における透過係数および反射係数のエネルギー依存性。 Z は界面での障壁の強さを表すパラメーターである。

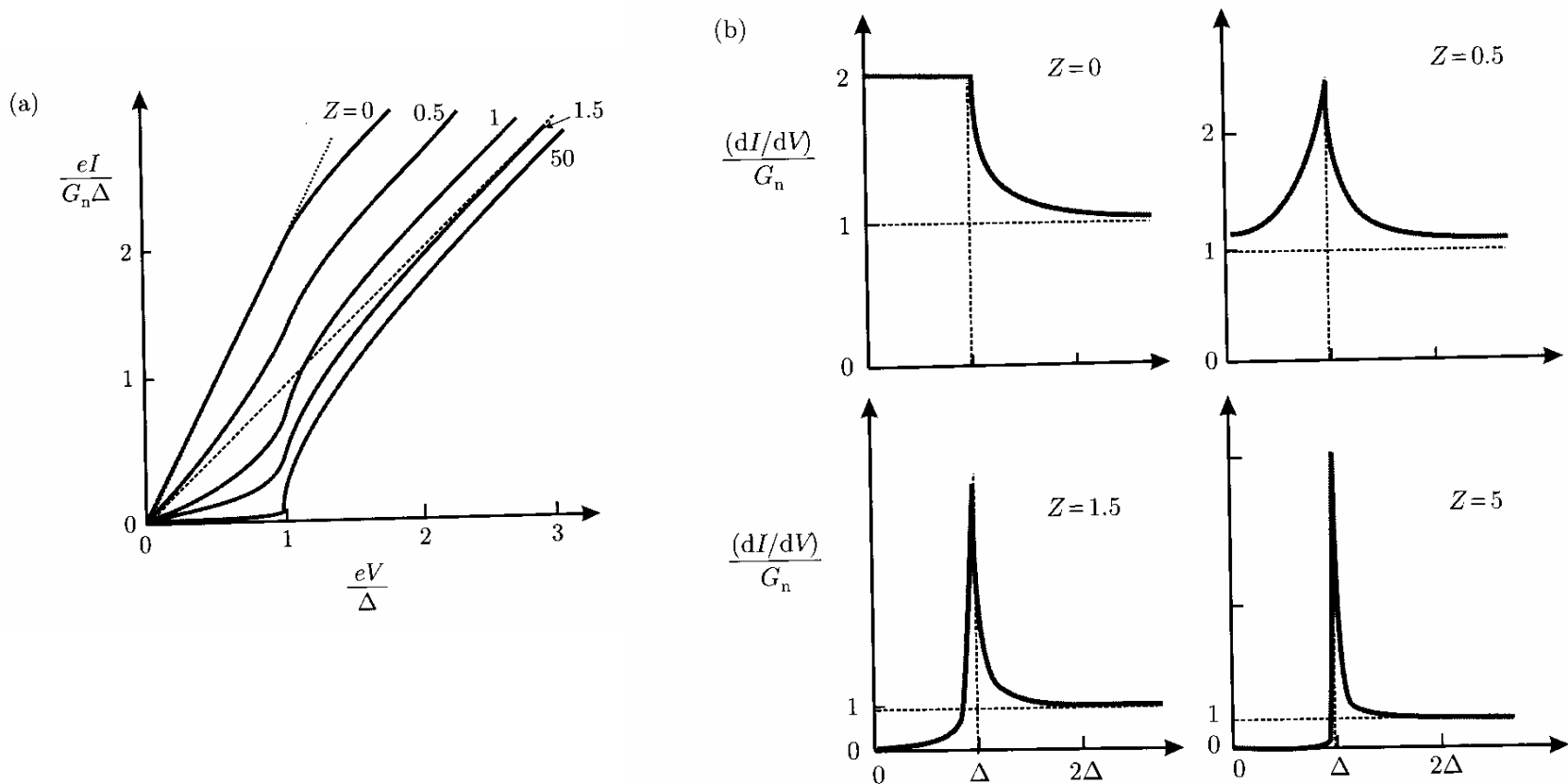
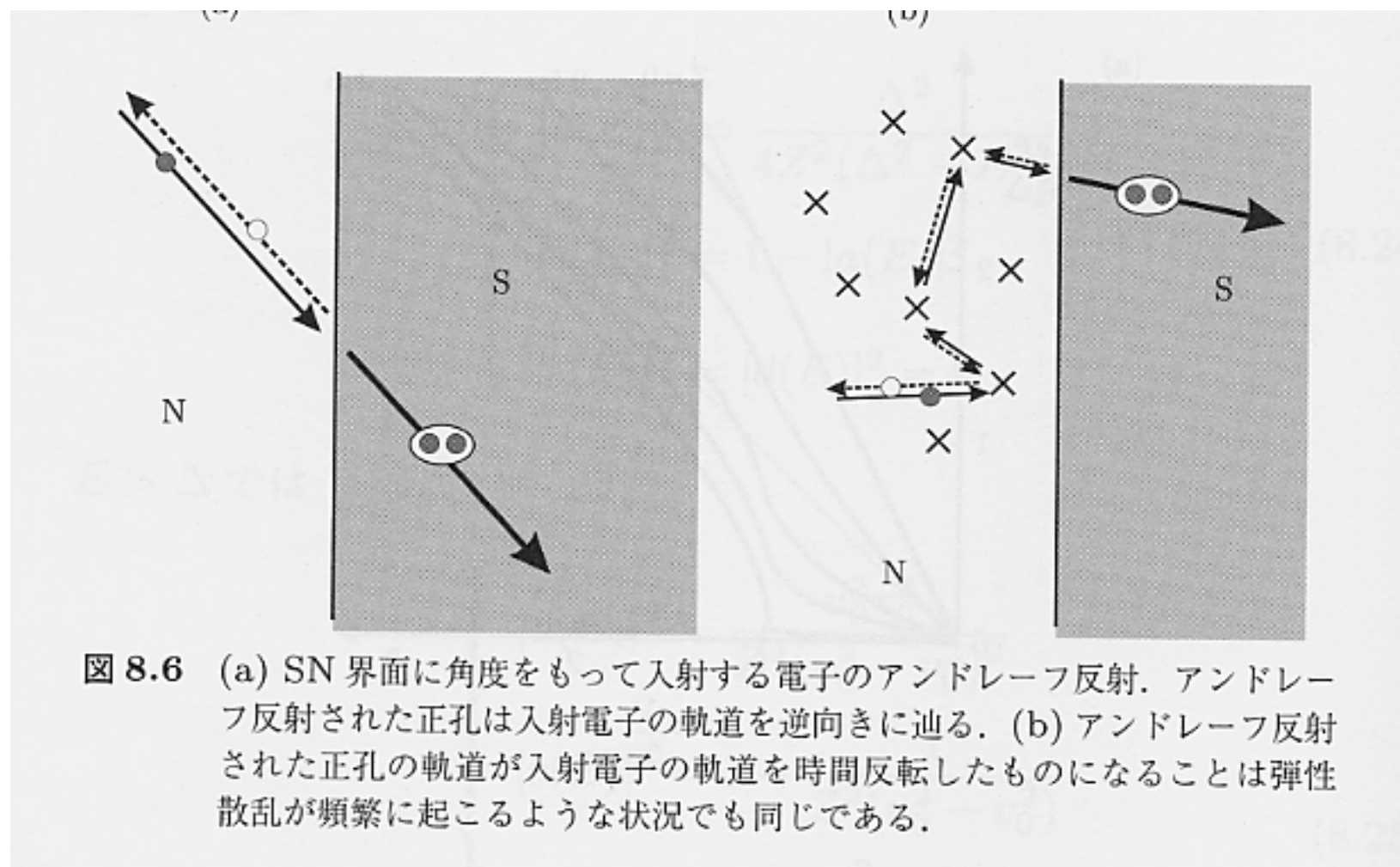


図 8.5 SN 界面の (a) I-V 特性と (b) 微分コンダクタンス，を障壁パラメーター Z のいろいろな値について示したもの ($T = 0$)。 (a) の破線は NN 界面の場合のコンダクタンス，点線はその 2 倍のコンダクタンスを表している。完全アンドレーフ反射の場合，コンダクタンスは NN 界面の場合の 2 倍になす



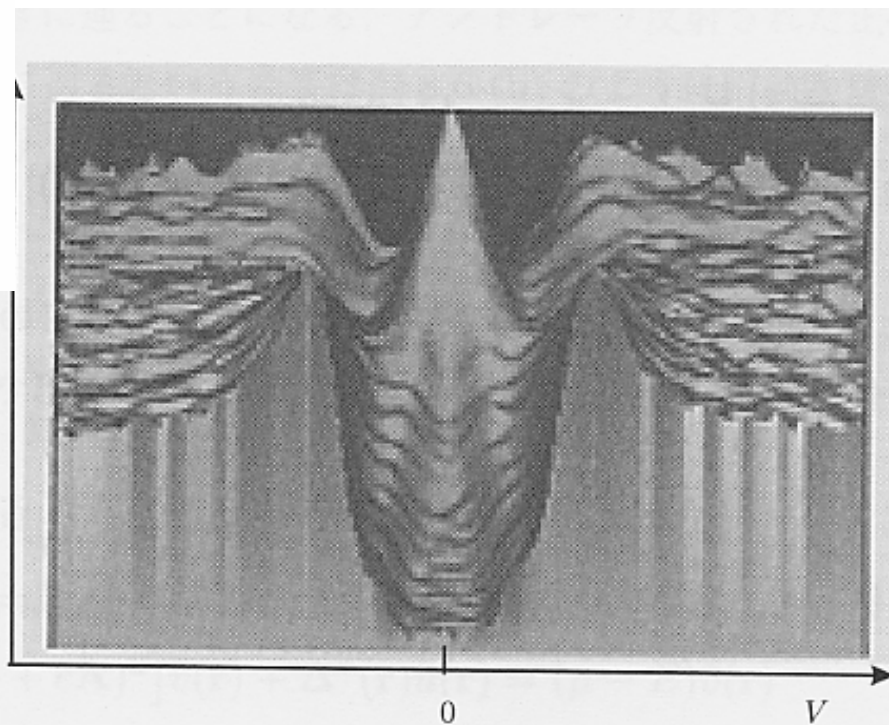
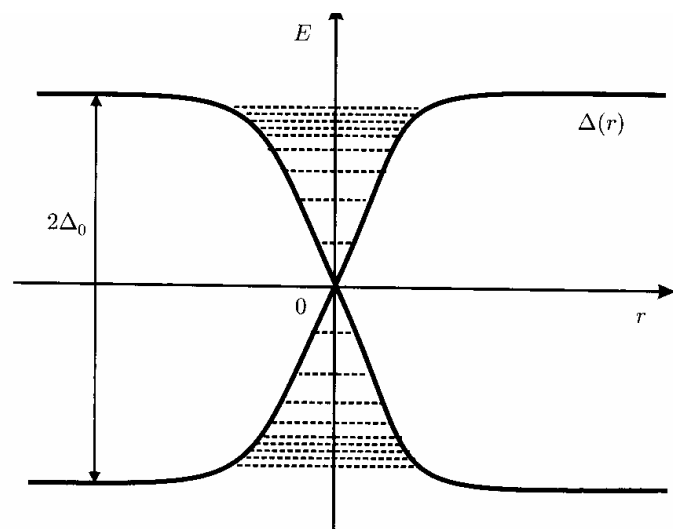
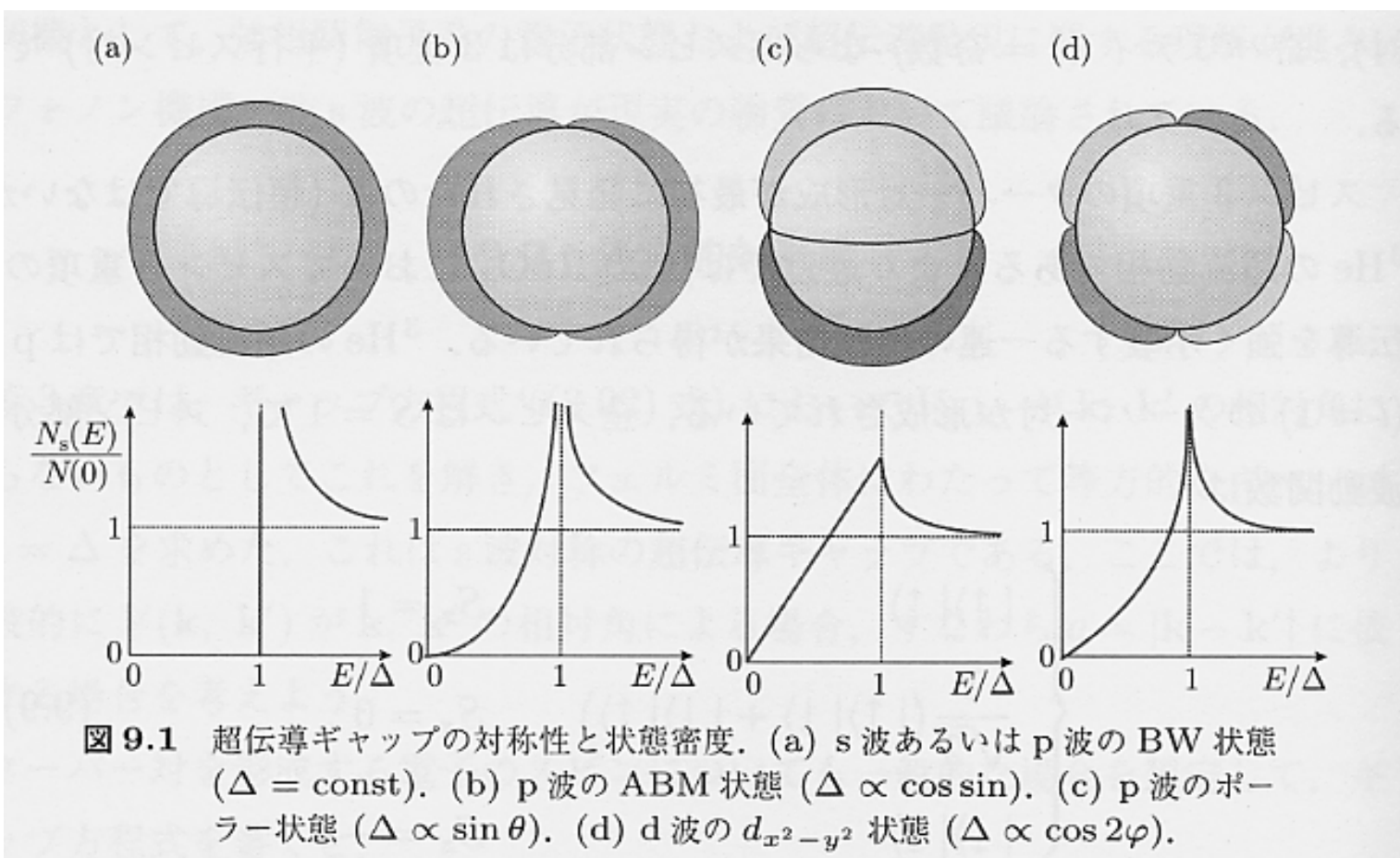


図 8.7 (a) 渦芯近傍の超伝導ギャップ $\Delta(r)$ の空間変化と準粒子束縛状態. (b) STM/STS によって測定された層状超伝導体 2H-NbSe₂ の渦芯近傍の局所微分コンダクタンススペクトル. [H. F. Hess *et al.*, Phys. Rev. Lett. **62** (1989) 214]



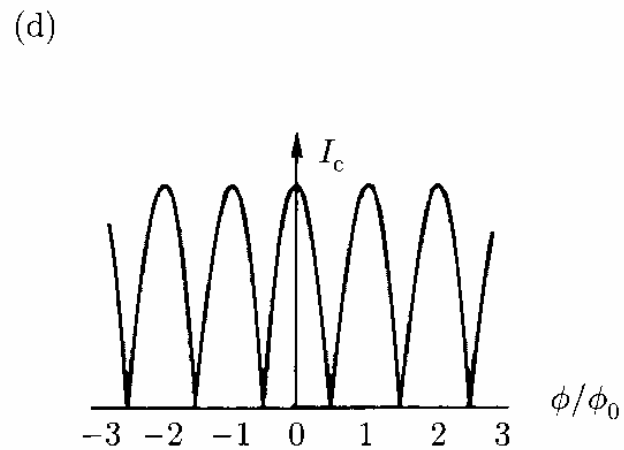
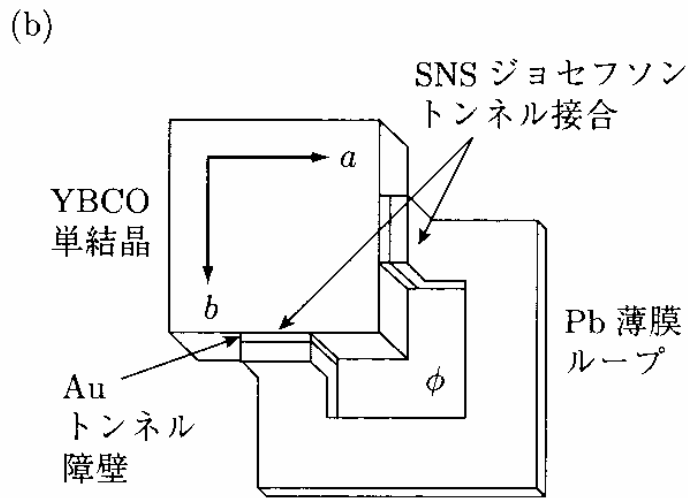
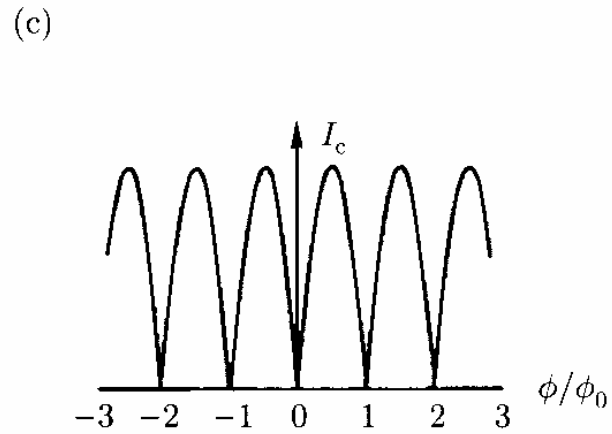
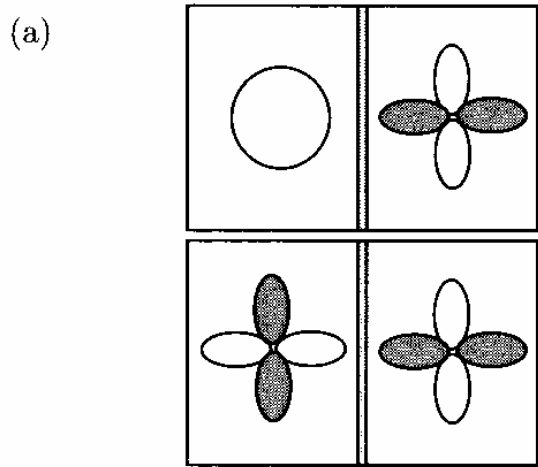


図 9.2 (a) ジョセフソン π -接合. (b) π -接合を含むコーナー型 dc-SQUID. (c) s 波超伝導体のみからなる通常の dc-SQUID の振動パターン. (d) 図 (b) のコーナー SQUID の振動パターン.

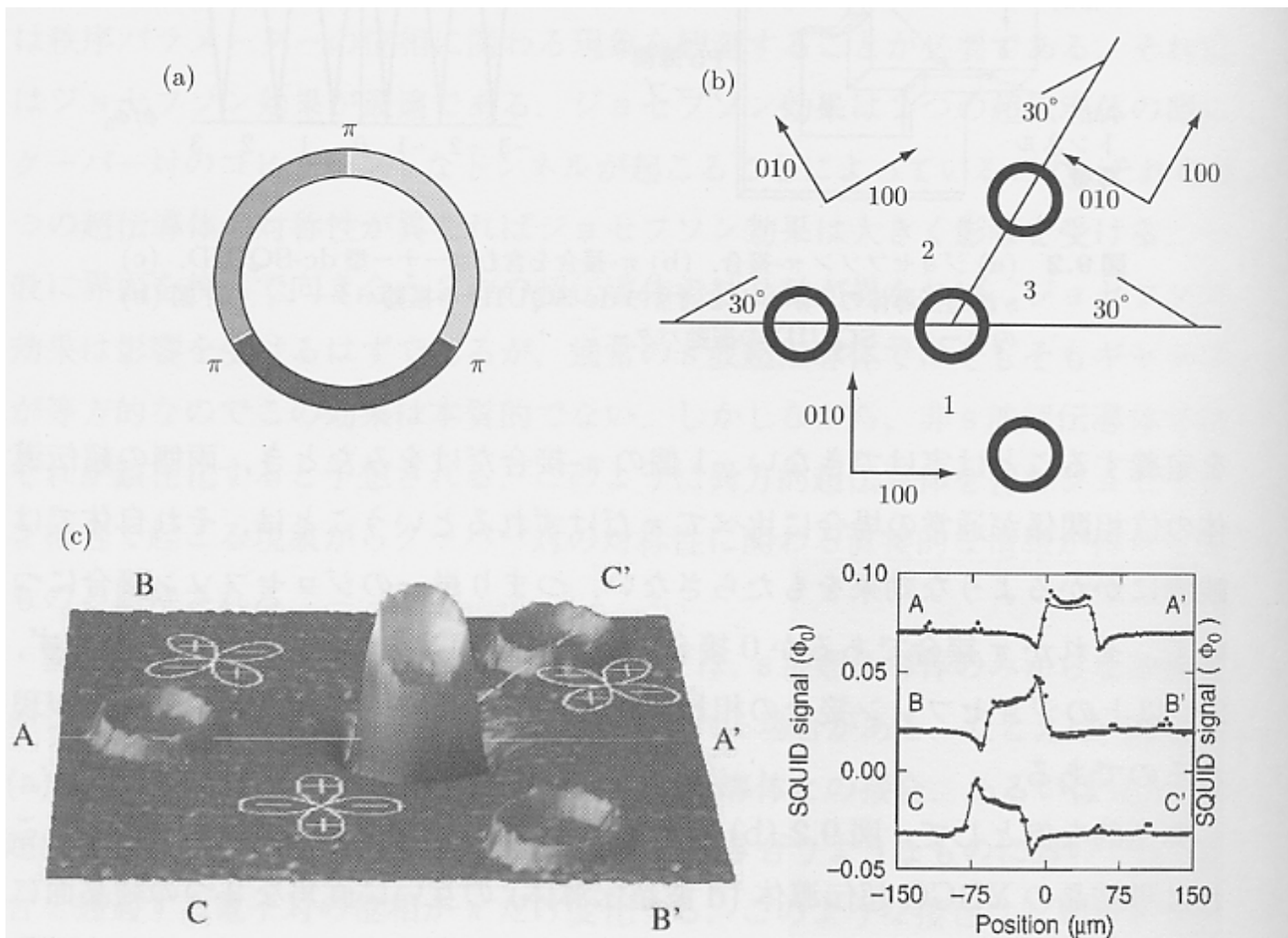


図 9.3 (a) 3つの π -接合を含むリング. (b) 結晶方位の異なる SrTiO_3 結晶3つを貼りあわせた基板に成長させたYBCO薄膜を加工して結晶境界部分にリングを形成したもの. (c) 走査SQUID顕微鏡による局所磁場測定の結果. 中央のリングには $\phi_0/2$ の磁束がトラップされている. [C. C. Tsuei and J. R. Kirtley, Rev. Mod. Phys. **72** (2000) 969]