

量子ホール効果を用いた アクシオン探査

岩崎愛一

二松学舎大学

PTEP 2024 (2024), Phys. Lett. B 846 (2023)

QCDアクシオンは現在最も有力な暗黒物質の候補であり、その発見は、手詰まりの素粒子理論の発展を一気に進める。($m_a = 10^{-6}\text{eV} \sim 10^{-3}\text{eV}$)

様々なアクシオン探査が行われてきたが、微弱なシグナルのため、遅々として進んでいない。

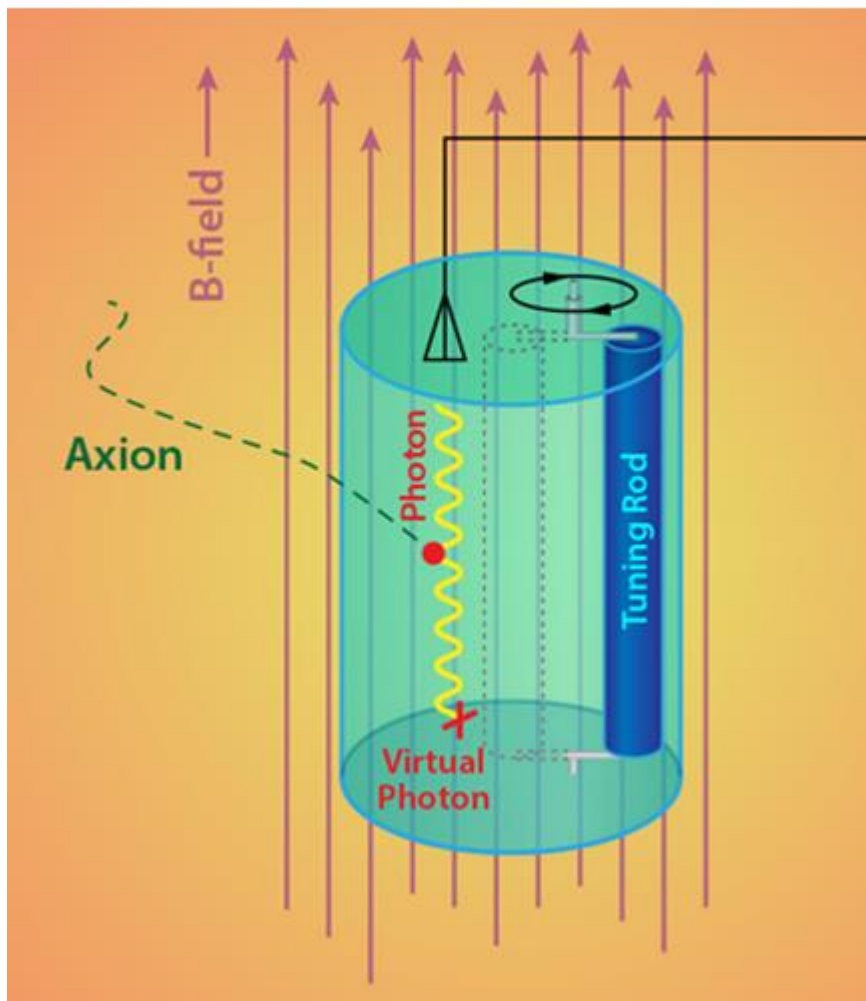
ここでは、量子ホール効果の実験で、すでにアクシオンの影響が見られることを説明する。

(ただし低温100mK以下、面積 $\sim 10^{-3}\text{cm}^2$ 以上)

アクシオン質量 $\sim 10^{-5}\text{eV}$ を示唆している

アクシオンの影響か否かを確認する実験を提案する

なぜ、量子ホール効果に顕著にアクシオン効果が現れるか？



ADMX (QCDアクシオンに対して最も感度の良い装置)

$$2.8 \times 10^{-6} \text{eV} \sim 4.2 \times 10^{-6} \text{eV}$$

$$L_{aEB} = k_a \alpha \frac{a(\vec{x}, t) \vec{E} \cdot \vec{B}}{f_a \pi}$$

アクシオン場

$$a(\vec{x}, t) \propto \cos((m_a + k_a^2/2m_a)t)$$

extremely small $\sim 10^{-21}$

$$\simeq \cos(m_a t)$$

強磁場中で、共鳴管を利用して、アクシオンが生み出したマイクロ波を検出（磁場中でアクシオンは共鳴管の金属を通してマイクロ波を生成）

Axions can interact with a strong magnetic field and set up a radio signal C. BOUTAN/

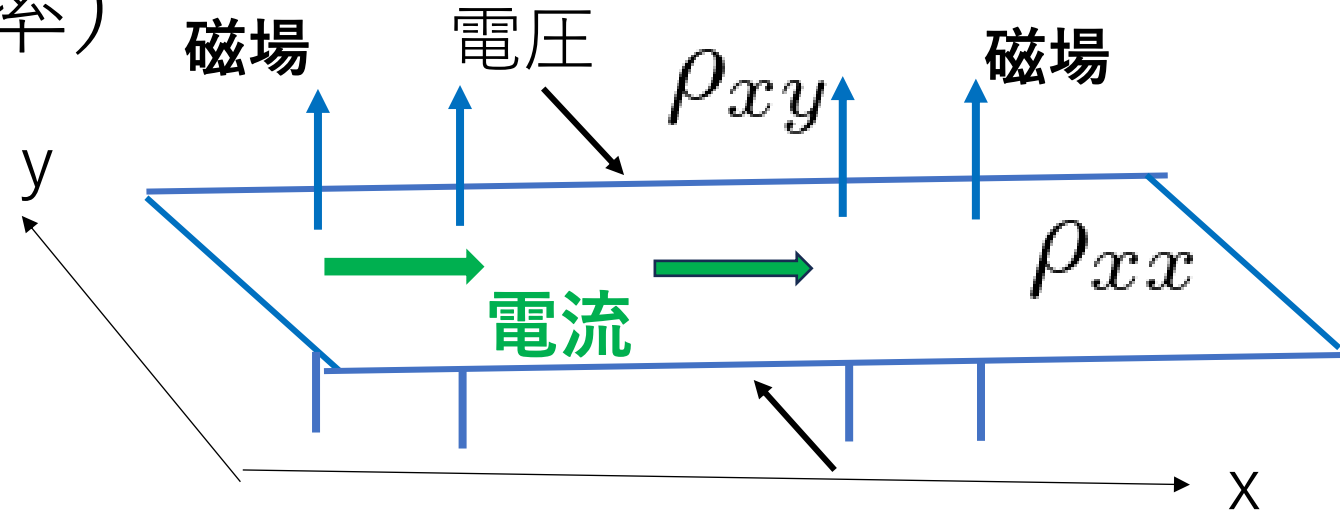
PACIFIC NORTHWEST NATIONAL LABORATORY; ADAPTED BY APS/ALAN STONEBRAKER

量子ホール効果とは？

2次元電子系（半導体） + **強磁場**（～10テスラ）
(電子密度 $\sim 10^{11}/\text{cm}^2$)

ホール抵抗（ホール伝導率）

$$\rho_{xy} \ (\sigma_{xy})$$



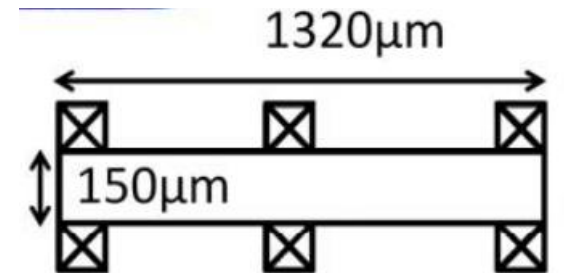
整数量子ホール効果

電子間クーロン相互作用は重要でない（効かない）

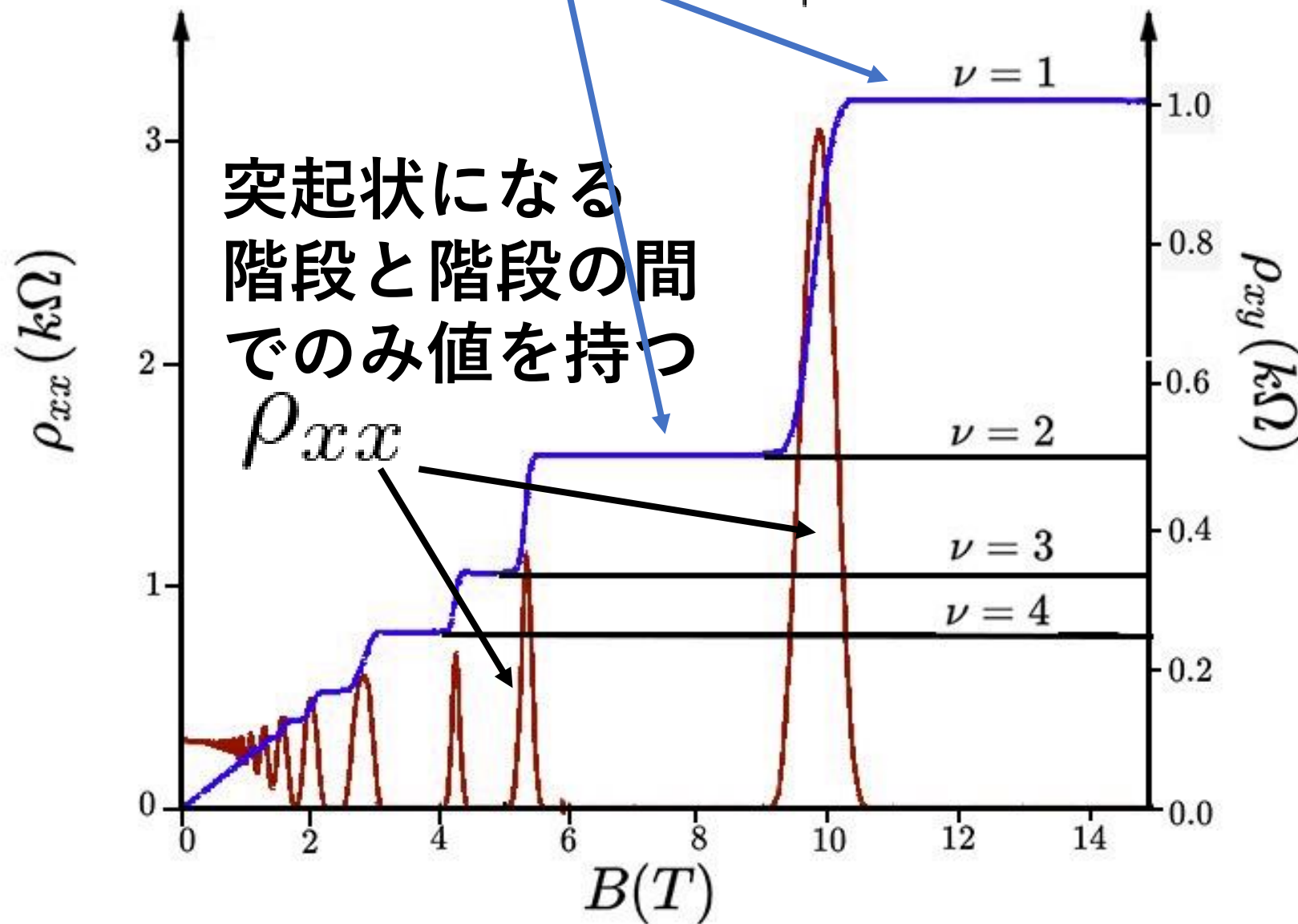
不純物効果が重要

強磁場 → **アキシオン**による
マイクロ波の発生

X. Wang, et.al.
Phys. Rev. B93 (2016)



$$\rho_{xy} = \frac{2\pi}{e^2} \times \frac{1}{n+1} \quad n = 0, 2, 3, \dots$$



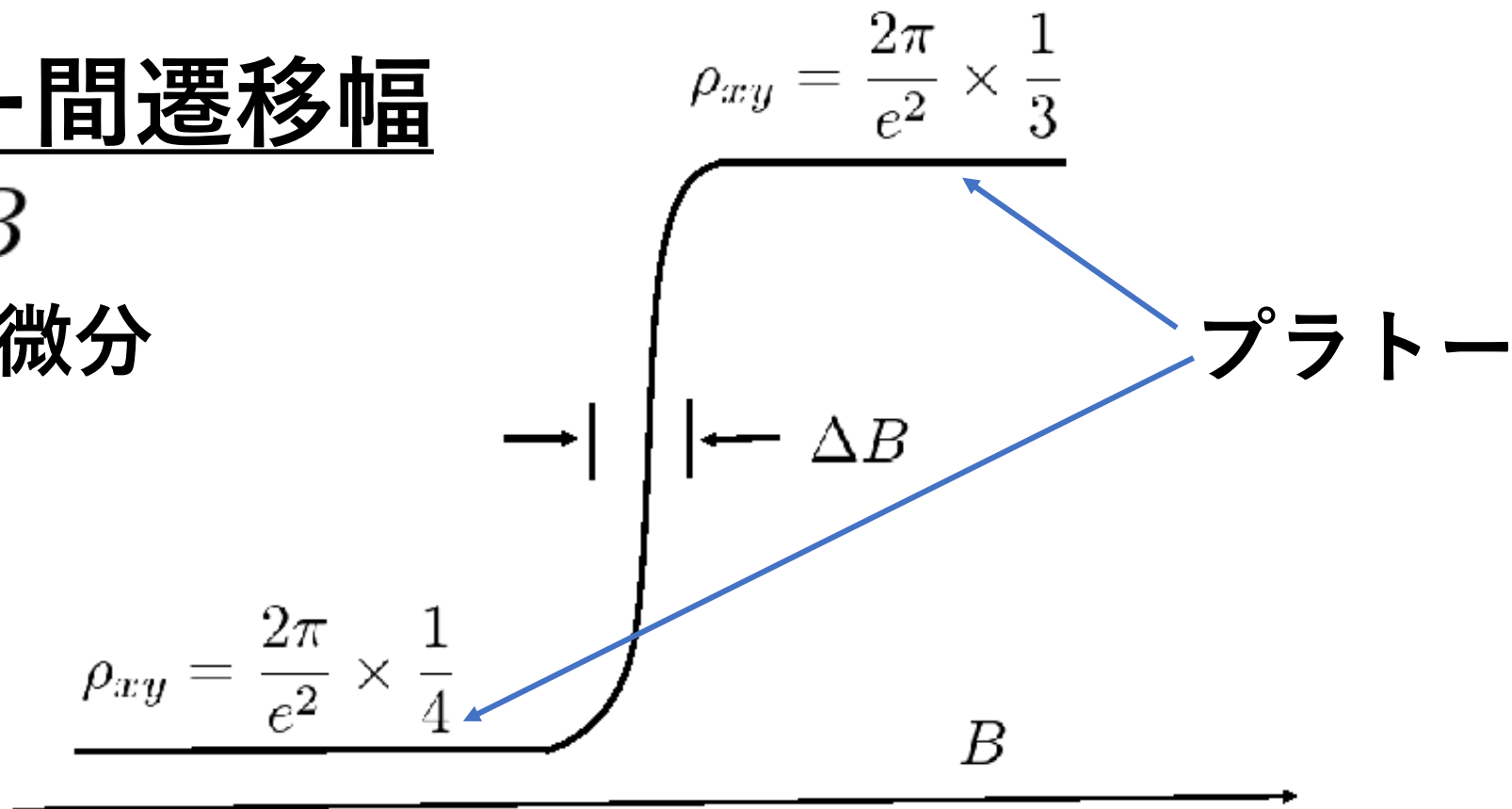
どこに注目するか？

プラトー間遷移幅

ΔB

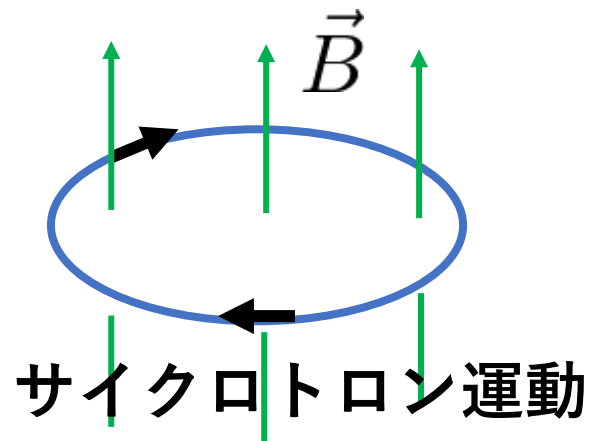
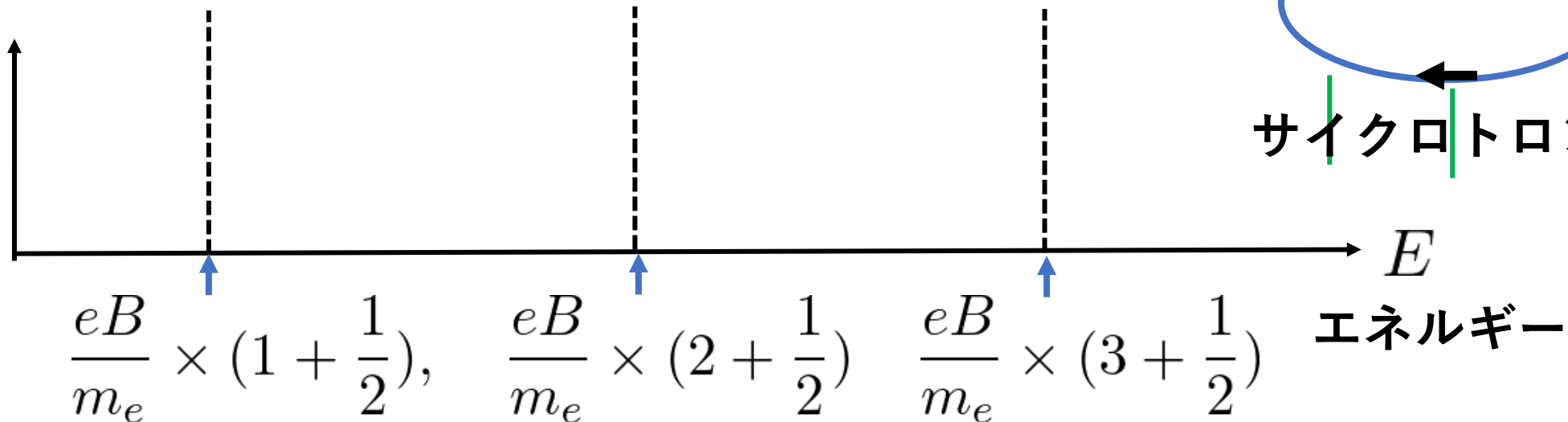
あるいは、微分

$$\frac{d\rho_{xy}}{dB}$$



磁場中の2次元電子系(ランダウ準位) 状態密度 (不純物なし) デルタ関数

状態密度



ただし、 m_e は半導体中の有効質量 ; $m_e = 0.076 \times 0.51 \text{ MeV}$

in GaAs

ランダウ準位

$$E_{n\pm} = \frac{eB}{m_e} \times (n + \frac{1}{2}) \pm g\mu_B B$$

$$g \simeq 0.44$$

サイクロトロンエネルギー

$$\frac{eB}{m_e} \simeq 1.7 \times 10^{-2} \text{ eV} \frac{B}{10 \text{ T}}$$

ゼーマンエネルギー

$$g\mu_B B \simeq 3 \times 10^{-4} \text{ eV} \frac{B}{10 \text{ T}}$$

状態密度 (不純物 potential $V(\text{impurity}) \ll \frac{eB}{m_e}$)

局在長

$$\xi(E) \propto |E - E_{n\pm}|^{-\nu} \rightarrow \infty$$

for $E \rightarrow E_{n\pm}$ with $\nu \sim 2.4$

localized states

localized states

不純物に捕まった

局在状態

(電流を運ばない)

中心に近づくほど局在状態
の広がり大きい

extended state

extended state

系全体に広がった状

態 (電流を運ぶ)

ΔE

$E_{n\pm}$

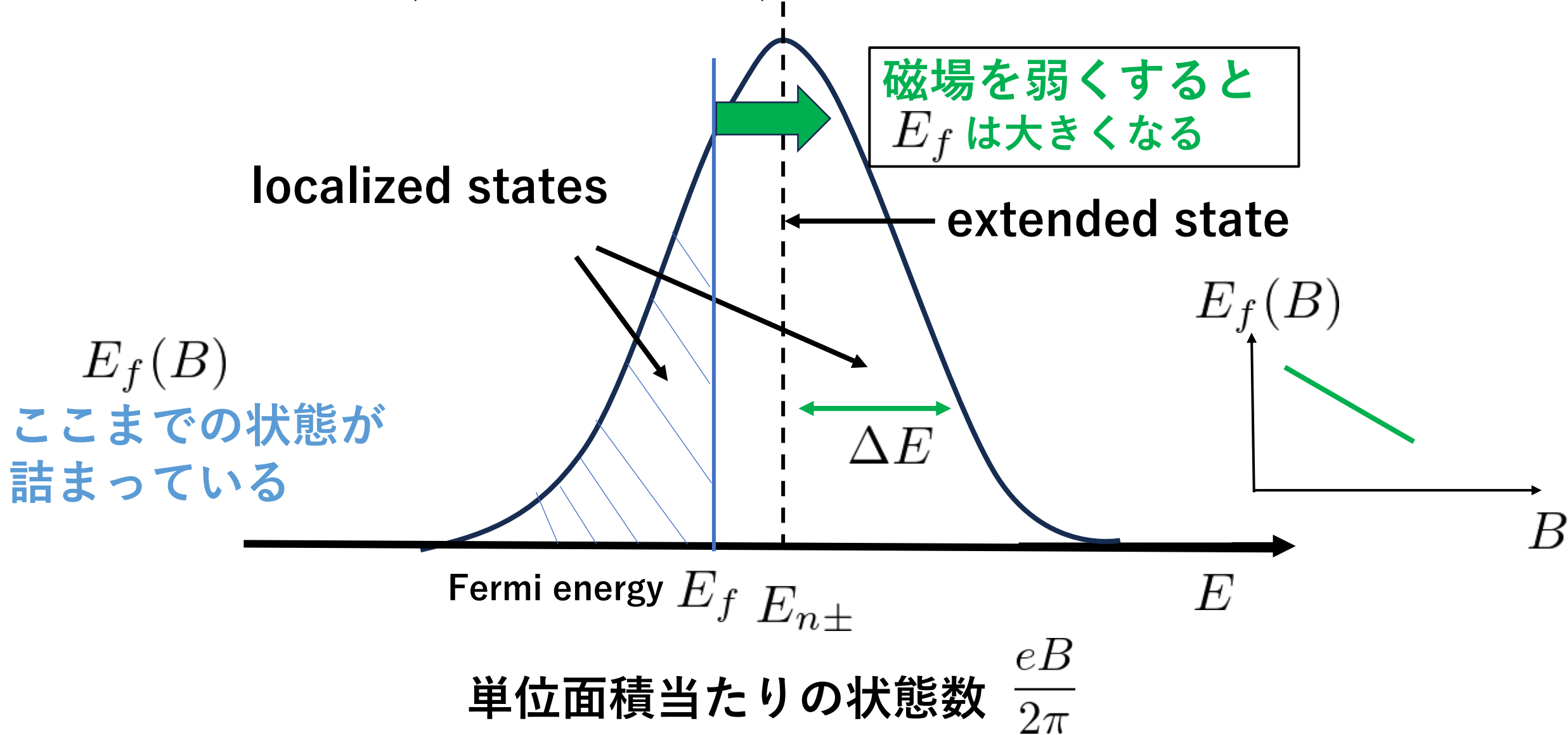
E

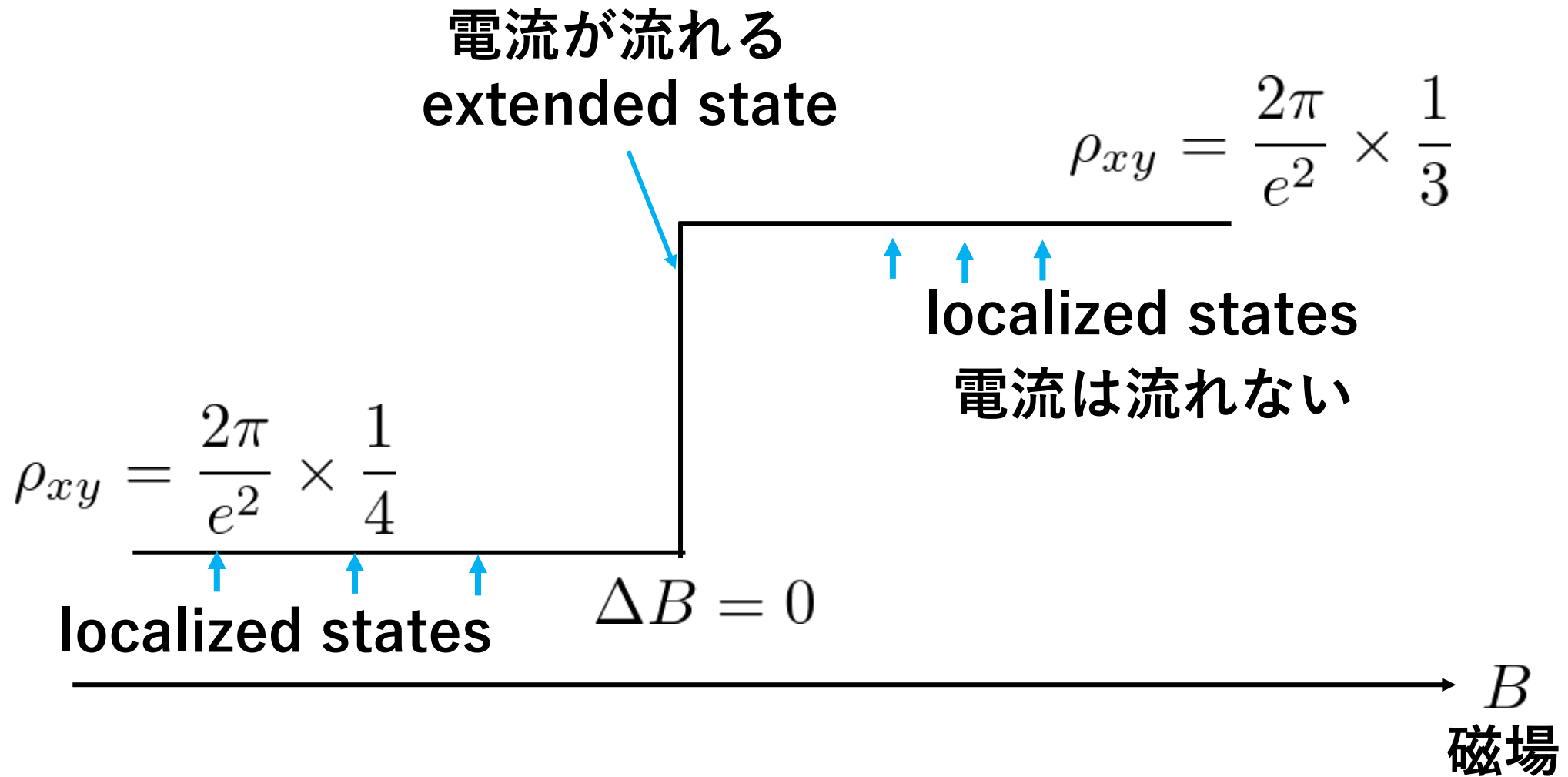
エネルギー

単位面積当たりの状態数

$\frac{eB}{2\pi}$

状態密度 (不純物効果)





無限に大きな系

有限系

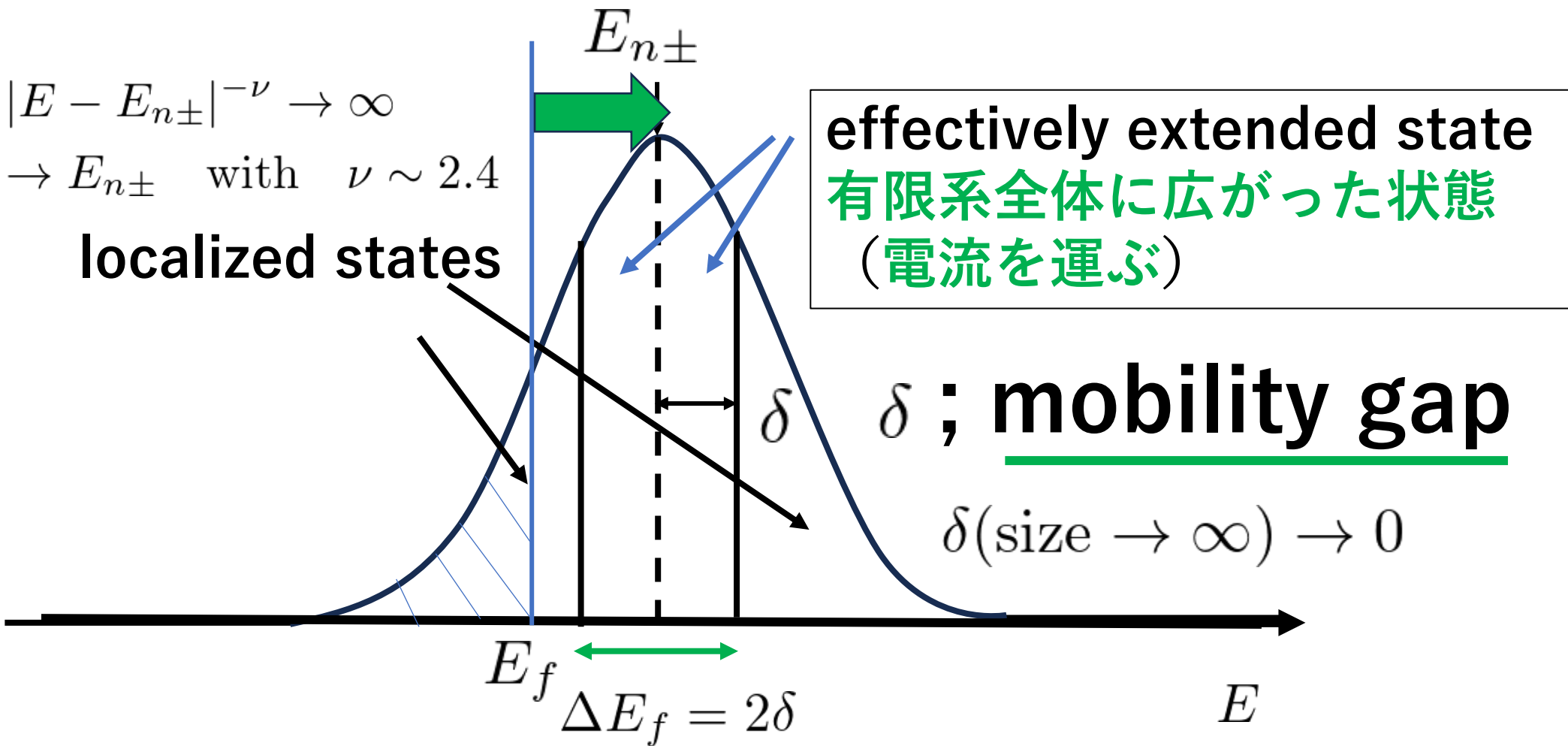
局在状態でも、系の大きさより大きい

局在長

$$\xi(E) \propto |E - E_{n\pm}|^{-\nu} \rightarrow \infty$$

for $E \rightarrow E_{n\pm}$ with $\nu \sim 2.4$

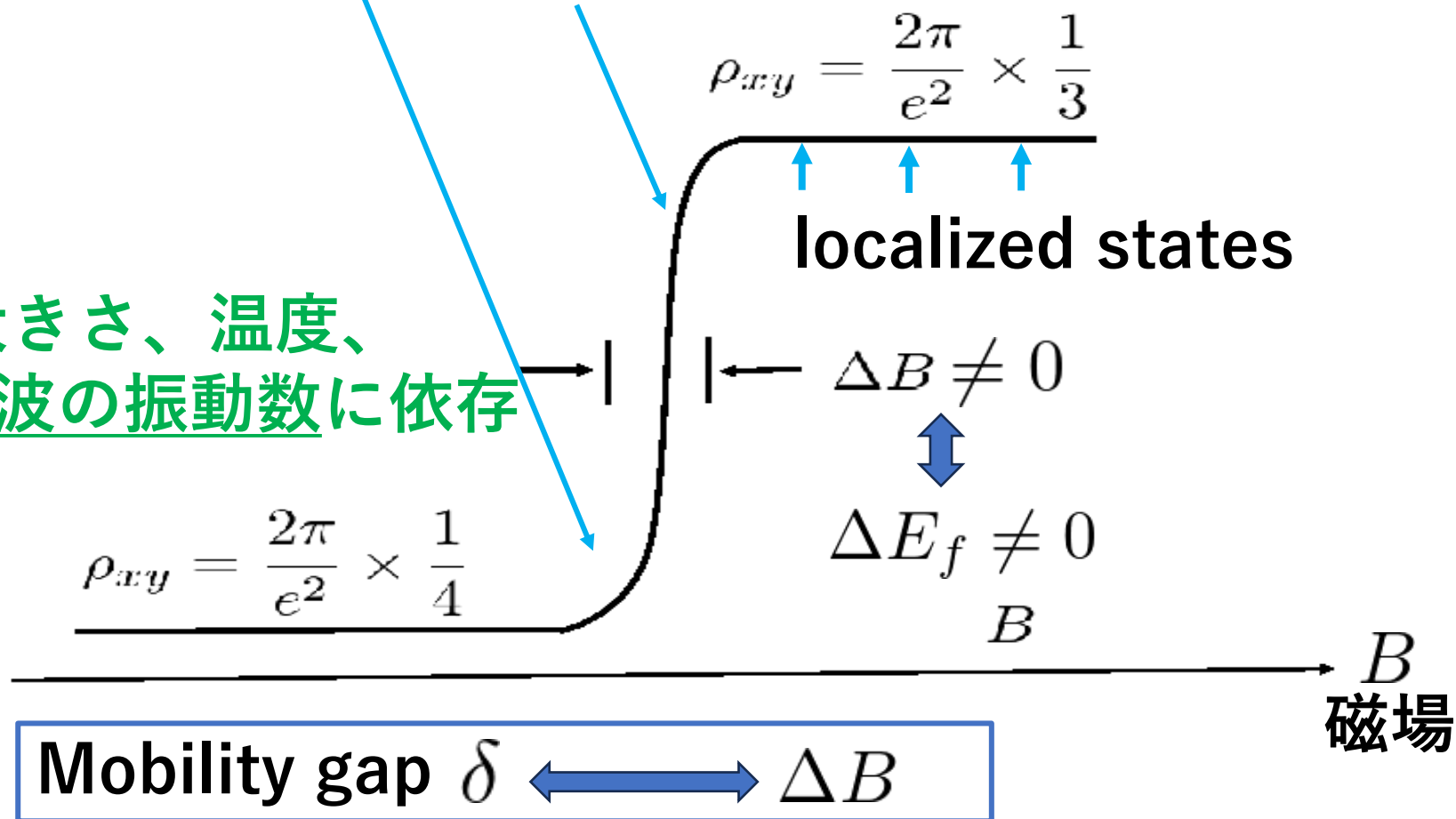
localized states



Mobility gap ; 系の大きさに依存

effectively extended state

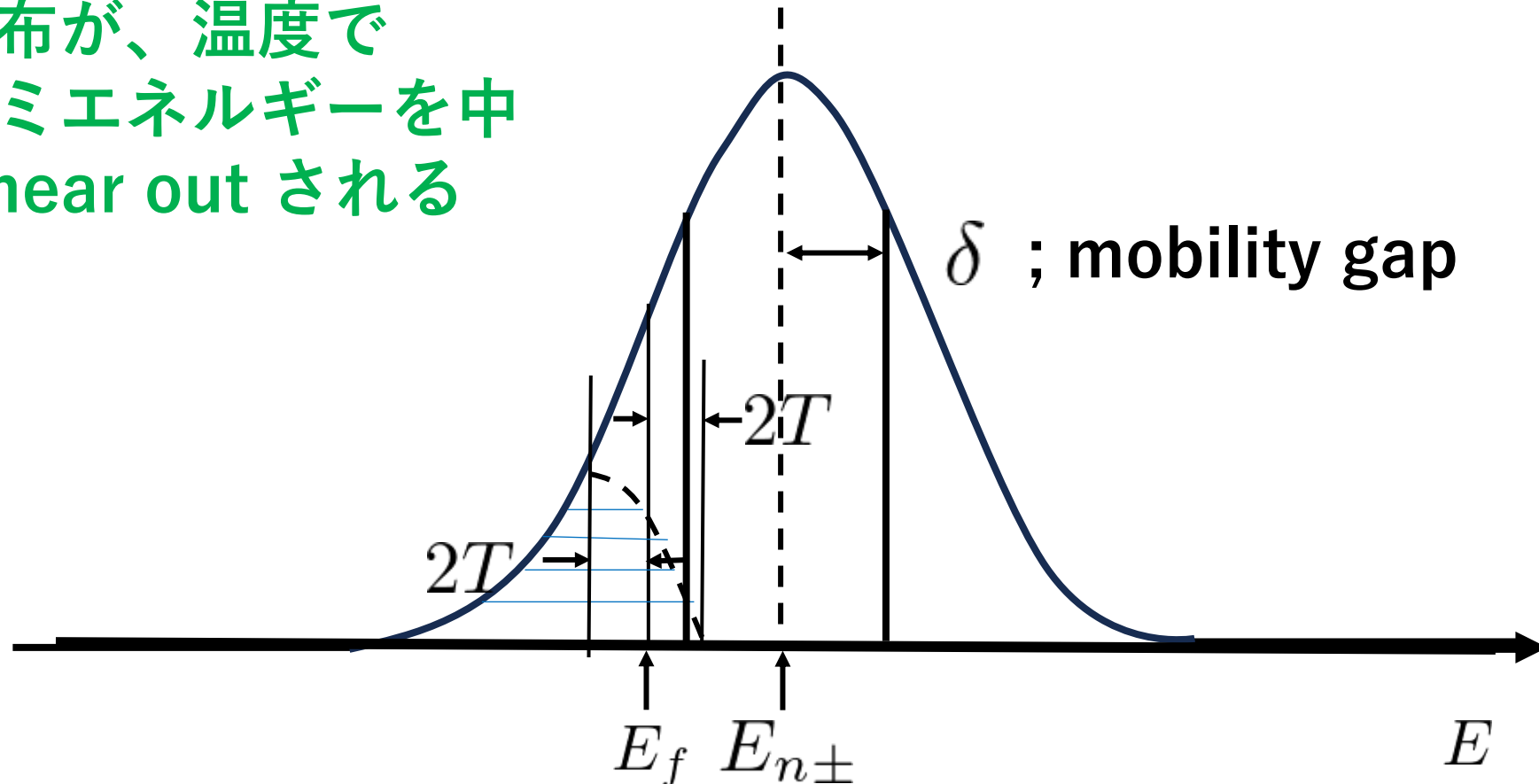
ΔB は、系の大きさ、温度、
外部マイクロ波の振動数に依存



mobility gapの大きさが, ΔB を決める

有限温度効果

電子分布が、温度で
フェルミエネルギーを中心
にsmear out される

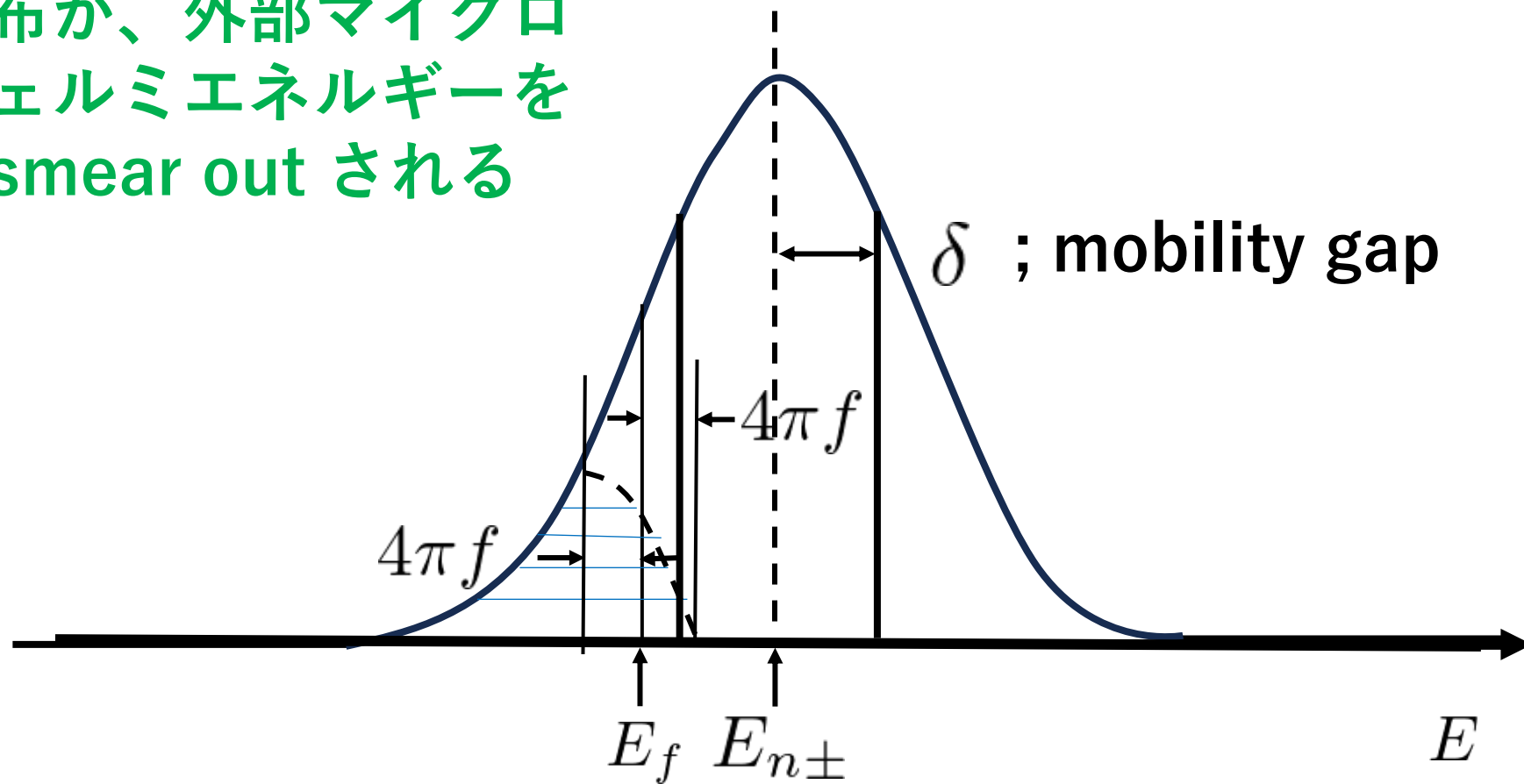


近似

E_f を中心に幅 $2T$ だけ広がる
(T は実際の温度ではない。)

マイクロ波効果（振動数 f ）

電子分布が、外部マイクロ波でフェルミエネルギーを中心にsmear out される



近似

E_f を中心に幅 $4\pi f$ だけ広がる
(f は実際の振動数ではない)

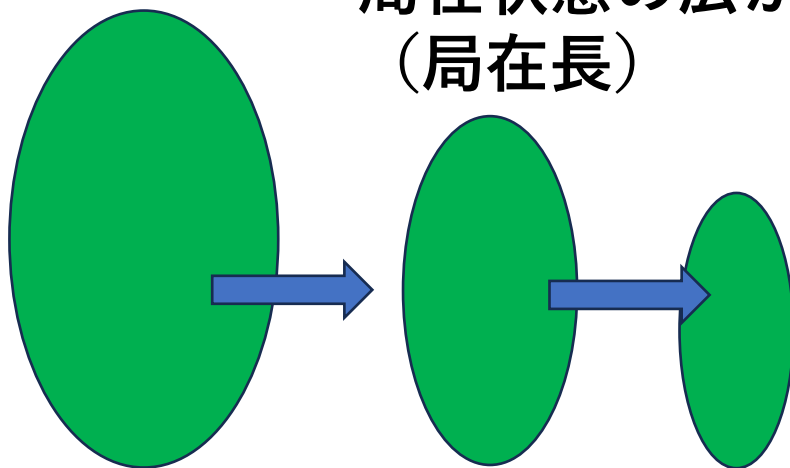
局在長

$$\xi(E) \propto |E - E_{n\pm}|^{-\nu} \rightarrow \infty$$

for $E \rightarrow E_{n\pm}$ with $\nu \sim 2.4$

有限温度効果

局在状態の広がり
(局在長)

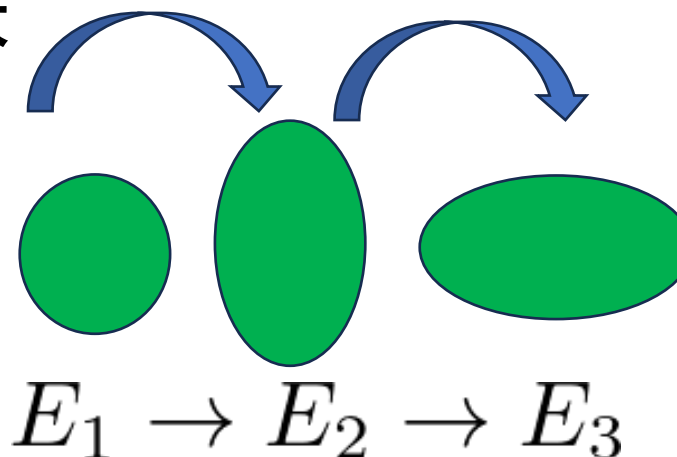


温度上昇と共に局在長が短くなる

エネルギー間隔が温度以下の
状態をホッピング

$$|E_i - E_j| \leq T$$

T -> 増大



局在長が系の大きさ
以下になる温度が存在 T_c
それ以上の温度では
ホッピング伝導

それ以下では、
電流は通常の電気伝導

温度が高いほど、
mobility gapは大きい

有限系

外部マイクロ波も同様の効果
振動数が高いほど、
mobility gapは大きい

$$\delta(T_1) \geq \delta(T_2)$$

for $T_1 \geq T_2$

$\delta(T)$

T

ホッピング

$E_{n\pm}$

$$\delta(f_1) \geq \delta(f_2)$$

for $f_1 \geq f_2$

$\delta(f)$

f

$$\delta(T \geq T_c) \geq \delta(T = 0)$$

E

温度やマイクロ波でmobility gapが広がる

飽和振動数（温度）

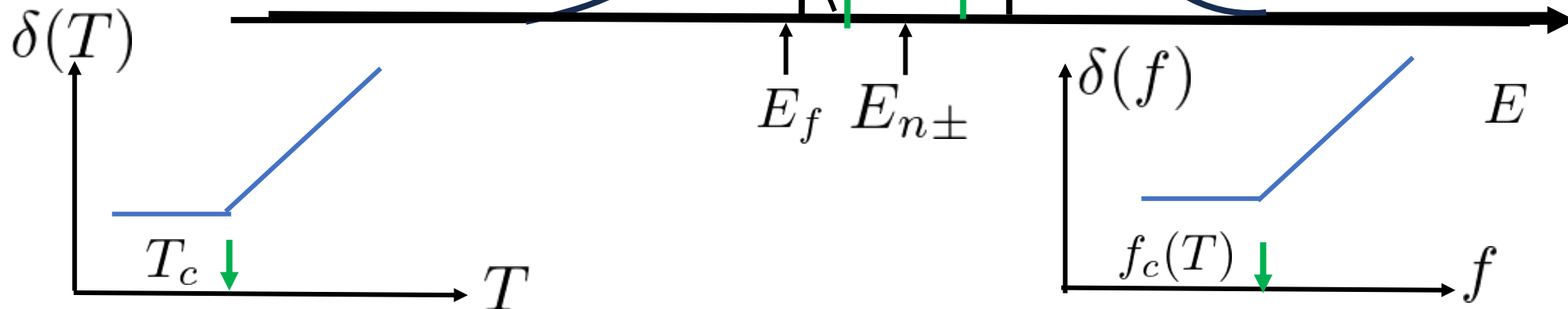
Mobility gapは、ある振動数（温度）以下では、 $f=0(T=0)$ と同じ

$$\delta(f) = \delta(f = 0)$$

$$\text{for } f \leq f_c$$

$$\delta(T) = \delta(T = 0)$$

$$\text{for } T \leq T_c$$



mobility gap

臨界振動数（温度）以下では、ホッピング伝導はない。
通常の電気伝導が優勢

ΔB 低温で飽和

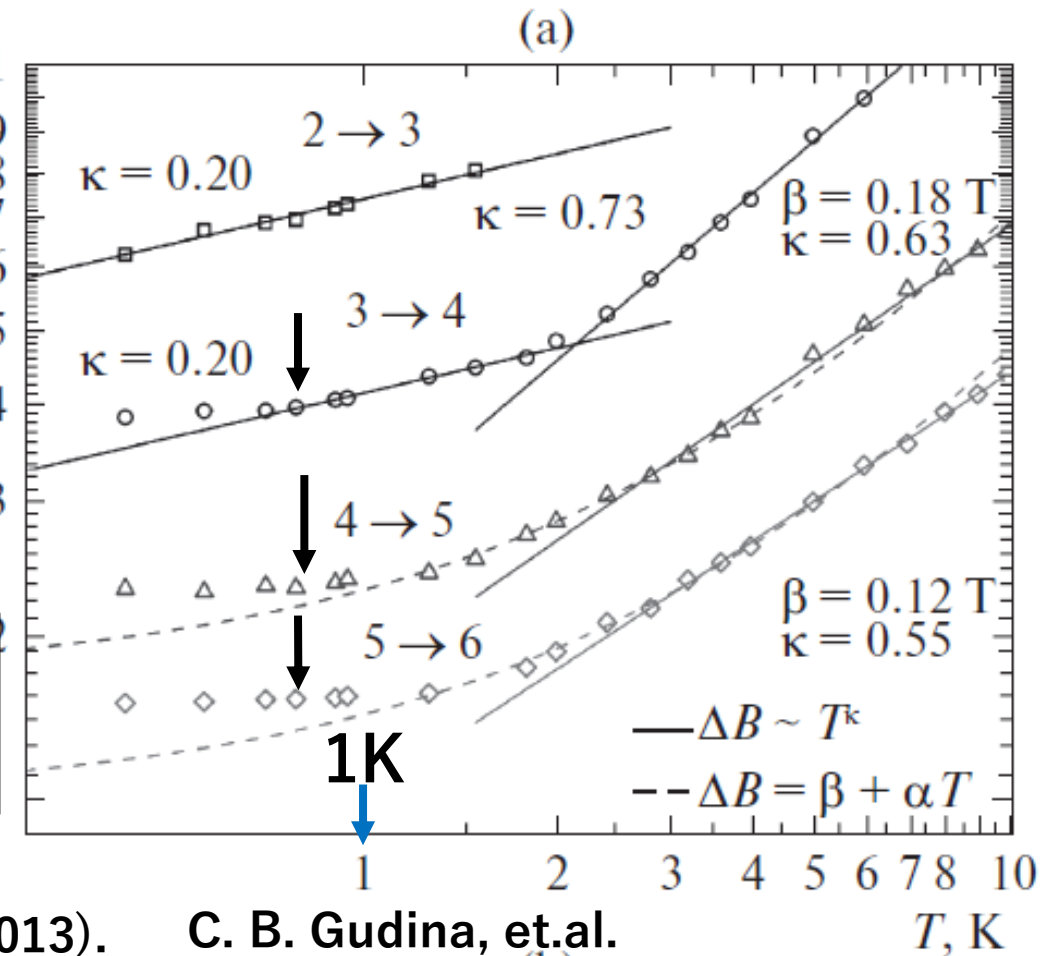
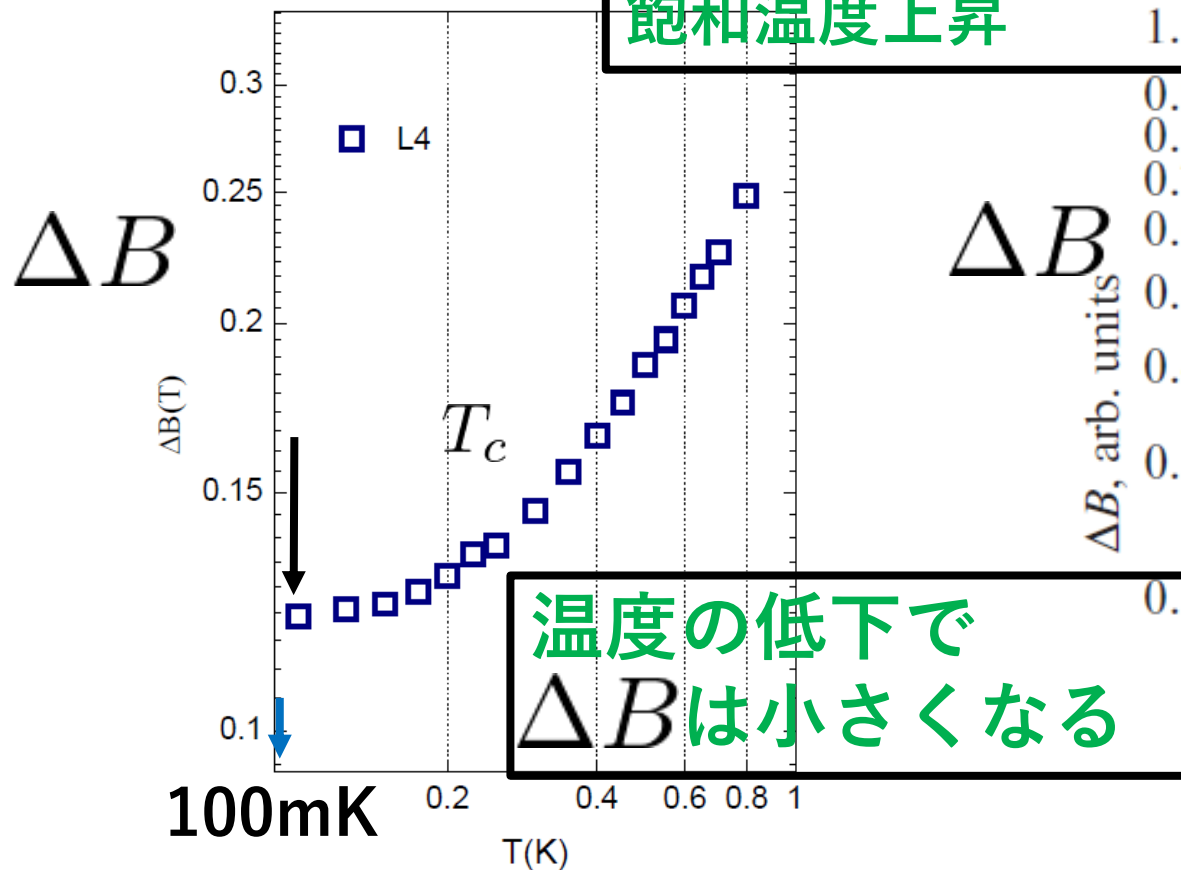
アクションの影響がない場合

$300\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$

$2.1\mu\text{m} \times 0.6\mu\text{m}$

GaAs/AlGaAs

$\text{In}_{0.81}\text{Al}_{0.19}\text{As}/\text{In}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$



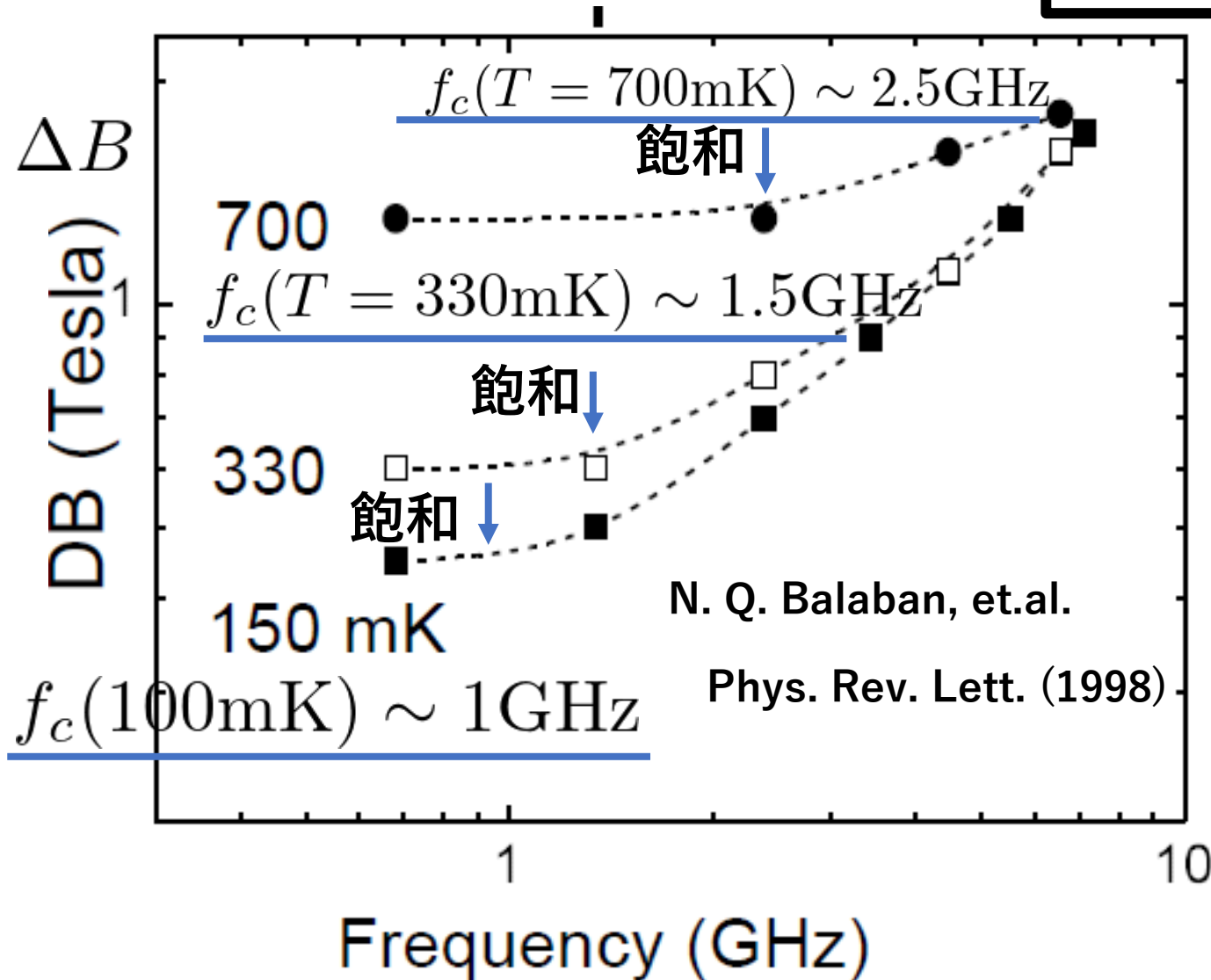
N. A. Doodoo-Amoo, doctoral theses, whiterose. ac. uk (2013).

C. B. Gudina, et.al.

Semiconductors 52, (2018)

サイズ $164\mu m \times 64\mu m$

アクションの影響がない場合

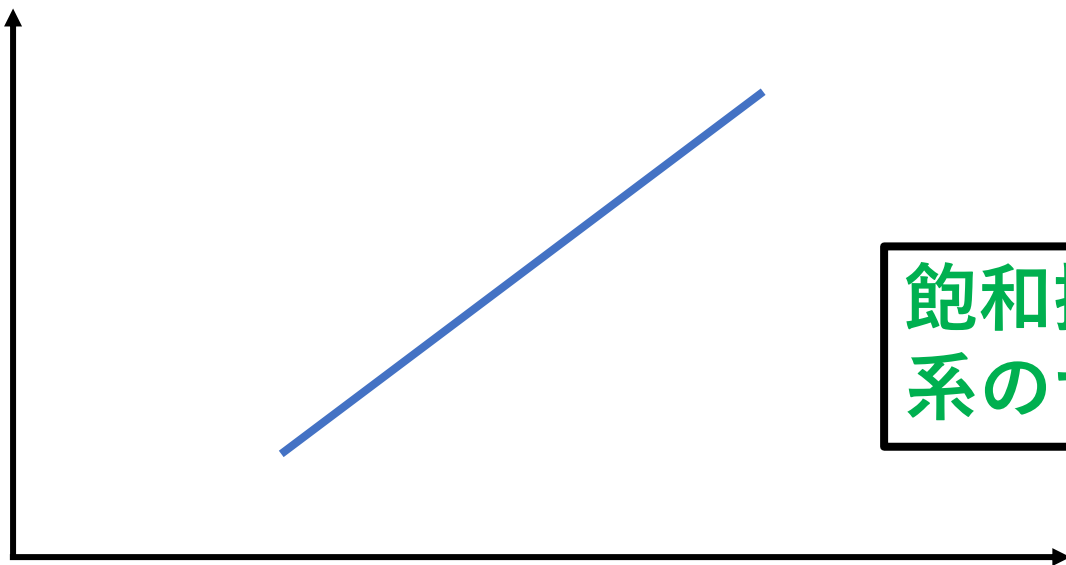


振動数の低下で
 ΔB は小さくなる
 $\delta(f) \rightarrow small$
as $f \rightarrow small$

飽和振動数； ΔB 一定
 $\delta(f) = \delta(f_c(T))$
for $f < f_c$

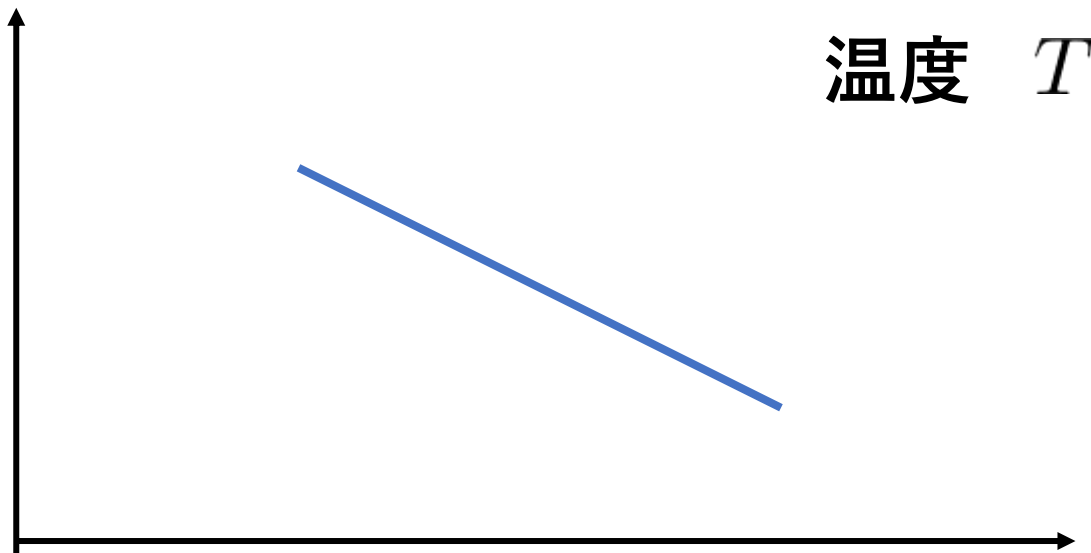
温度の低下で 飽和振動数低下
 $f_c(T) \rightarrow small$
for $T \rightarrow small$

$f_c(T, L)$



飽和振動数の温度、
系のサイズ依存性

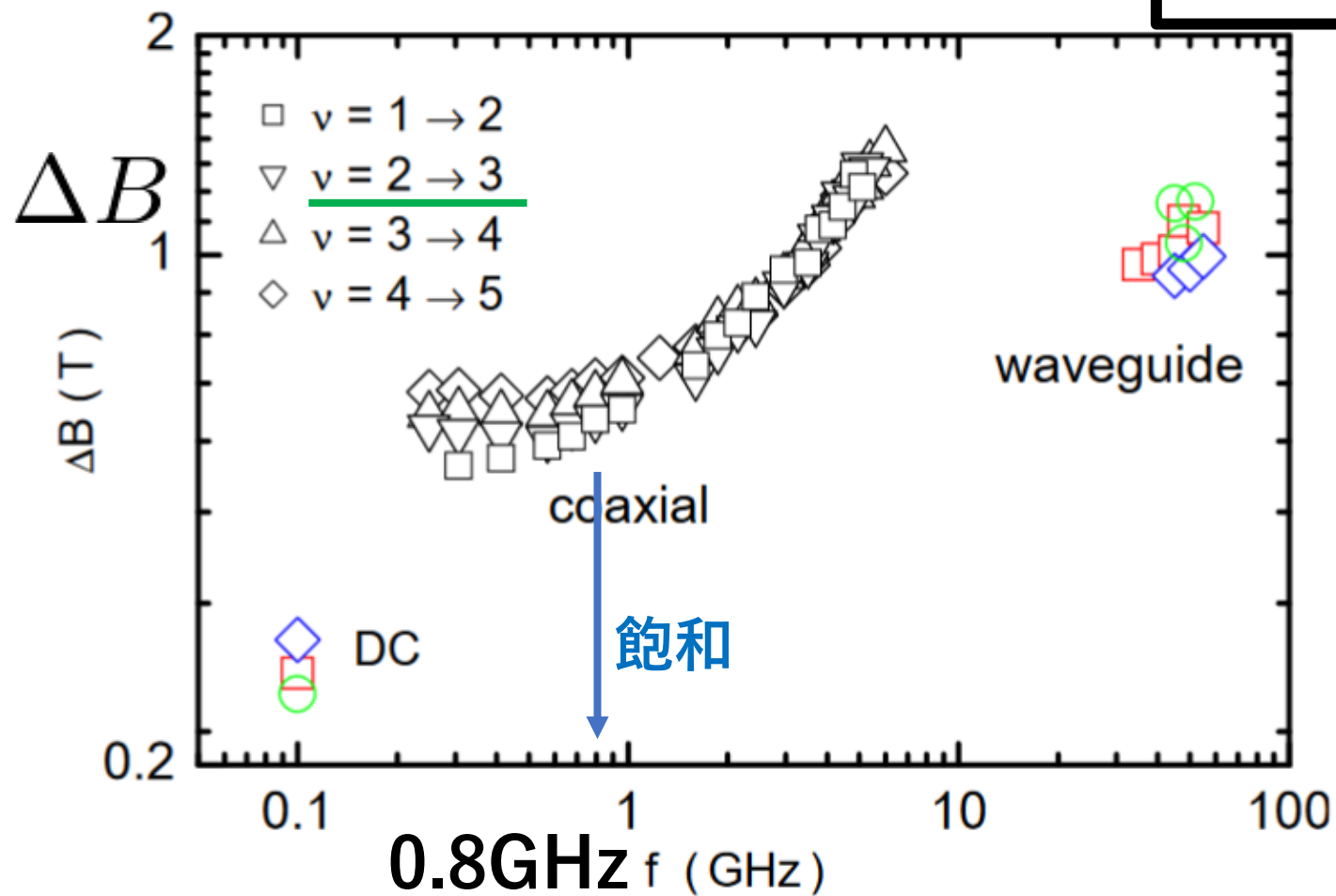
$f_c(T, L)$



サイズ L

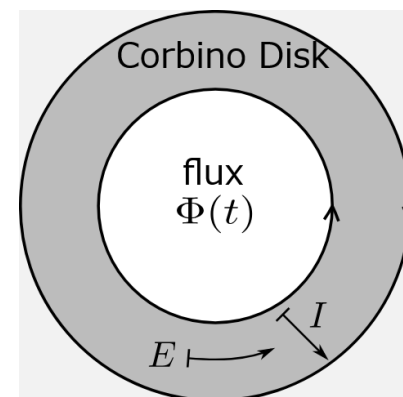
温度100mK サイズ $5\text{mm} \times 20\mu\text{m}$

アキシオンの影響がない場合



温度100mK

$$f_c(100\text{mK}) = 0.8\text{GHz}$$



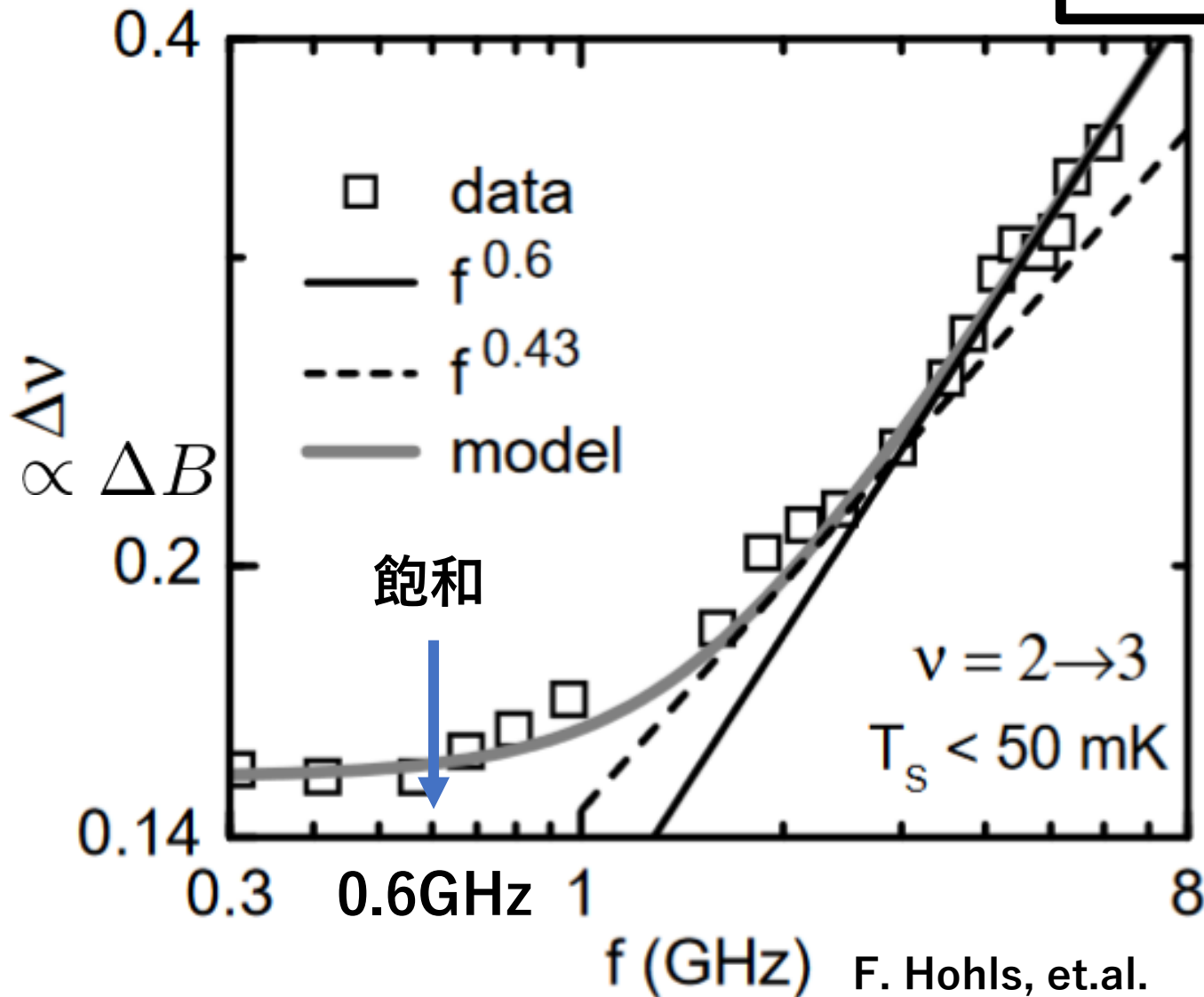
Corbino geometry

F. Hohls, et.al.

Phy. Rev. Lett. 89 (2002)

低温=50mK サイズ $5\text{mm} \times 20\mu\text{m}$

アクションの影響がない場合



F. Hohls, et.al.
Physica B. 298 (2001)

飽和振動数 $f_c(T, L)$

$f_c(T) \rightarrow \text{small}$

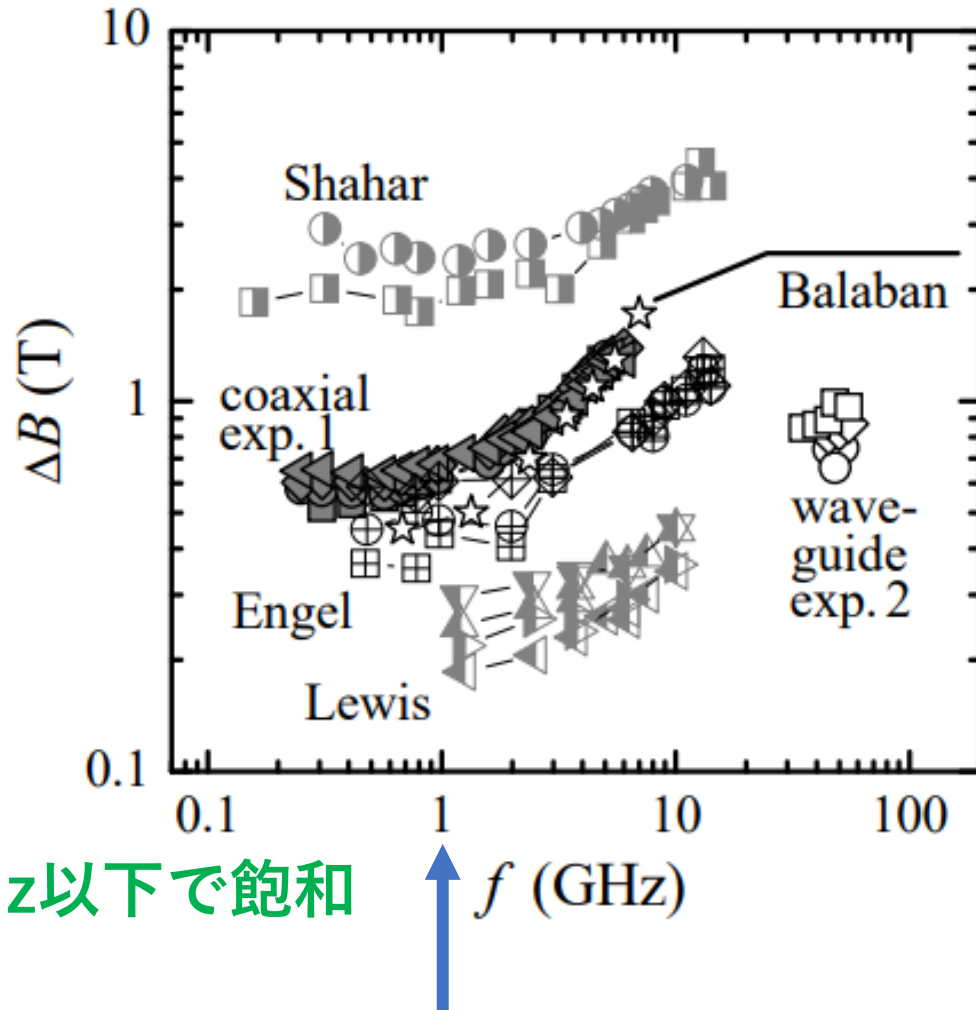
for $T \rightarrow \text{small}$

$f_c(T, L) \rightarrow \text{small}$

for size $L \rightarrow \text{large}$

$$\underline{f_c(T = 50\text{mK}) = 0.6\text{GHz}}$$

アキシオンの影響がない場合



1GHz以下で飽和

f (GHz)

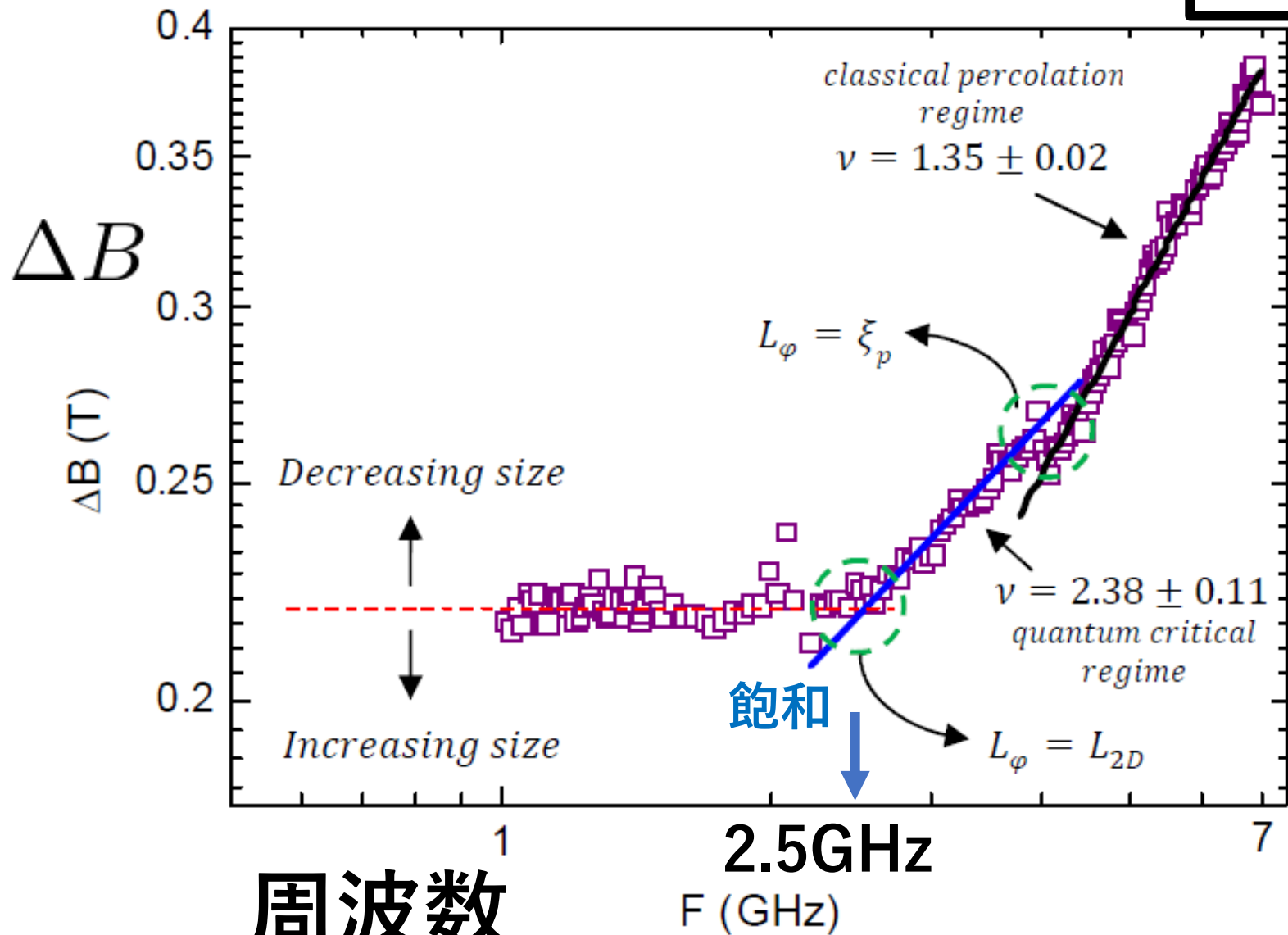
100mK程度以下では、
1GHz以下で飽和

F. Hohls, et.al.

Phy. Rev. Lett. 89 (2002)

温度35mK サイズ22mm × 30μm

アクシオンの影響あり



なぜ？

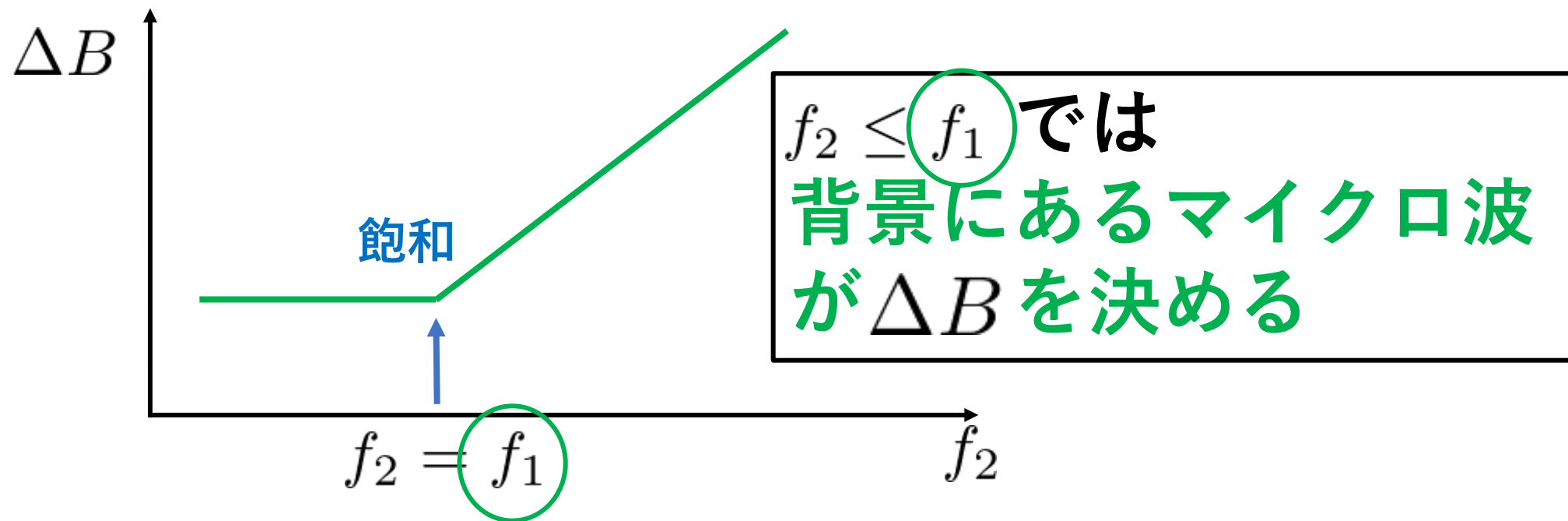
$$f_c(T = 35\text{mK}) \simeq 2.5\text{GHz}$$

アクシオンの影響

$$m_a = 2\pi f_c(35\text{mK}) = 2\pi \times 2.5\text{GHz} \simeq 10^{-5}\text{eV}$$

アクシオンの影響で飽和
振動数が2.5GHzと大きい

2種類のマイクロ波が作用
周波数 f_1 のマイクロ波が背景にある時、
異なるマイクロ波の周波数依存



$$22\text{mm} \times 30\mu\text{m} \xrightarrow{\text{面積}} S = 6.6 \times 10^{-3}\text{cm}^2 \quad T = 35\text{mK}$$

$$B \sim 5\text{T}$$

測定時間 = 1 秒

$$\frac{S}{N} \simeq 3.0 \times \left(\frac{A}{10^4}\right)^2 \left(\frac{S}{10^{-3}\text{cm}^2}\right)^2 \left(\frac{0.5 \times 10^{-4}\text{eV}}{\Delta E}\right)^2 \left(\frac{\rho_d}{0.3\text{GeVcm}^{-3}}\right)$$

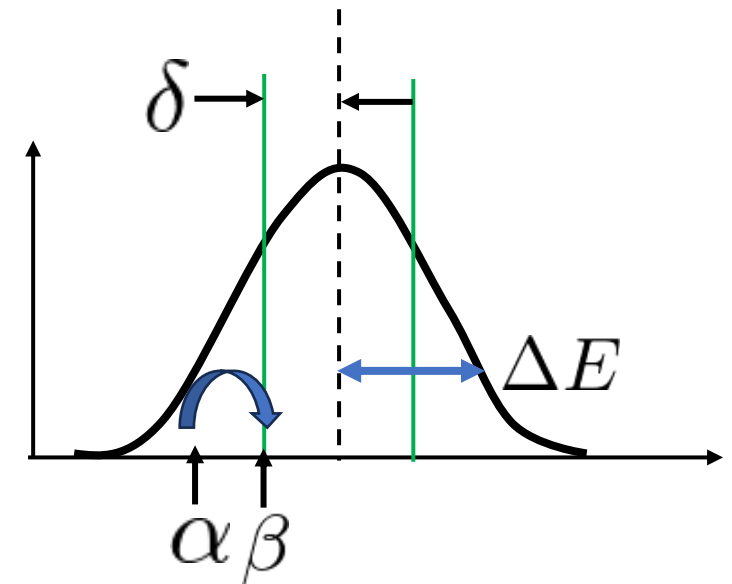
$$\times \left(\frac{B}{10\text{T}}\right)^3 \left(\frac{m_a}{10^{-5}\text{eV}}\right)^2 \left(\frac{100\text{mK}}{T}\right)^{3/2} \times (0.96)^2 \quad \text{or} \quad (0.37)^2$$

(KSVZ) (DFSZ)

$$\langle E_\alpha | x | E_\beta \rangle \equiv A l_B \quad l_B \simeq 10^{-6}\text{cm} \sqrt{B/5\text{T}}$$

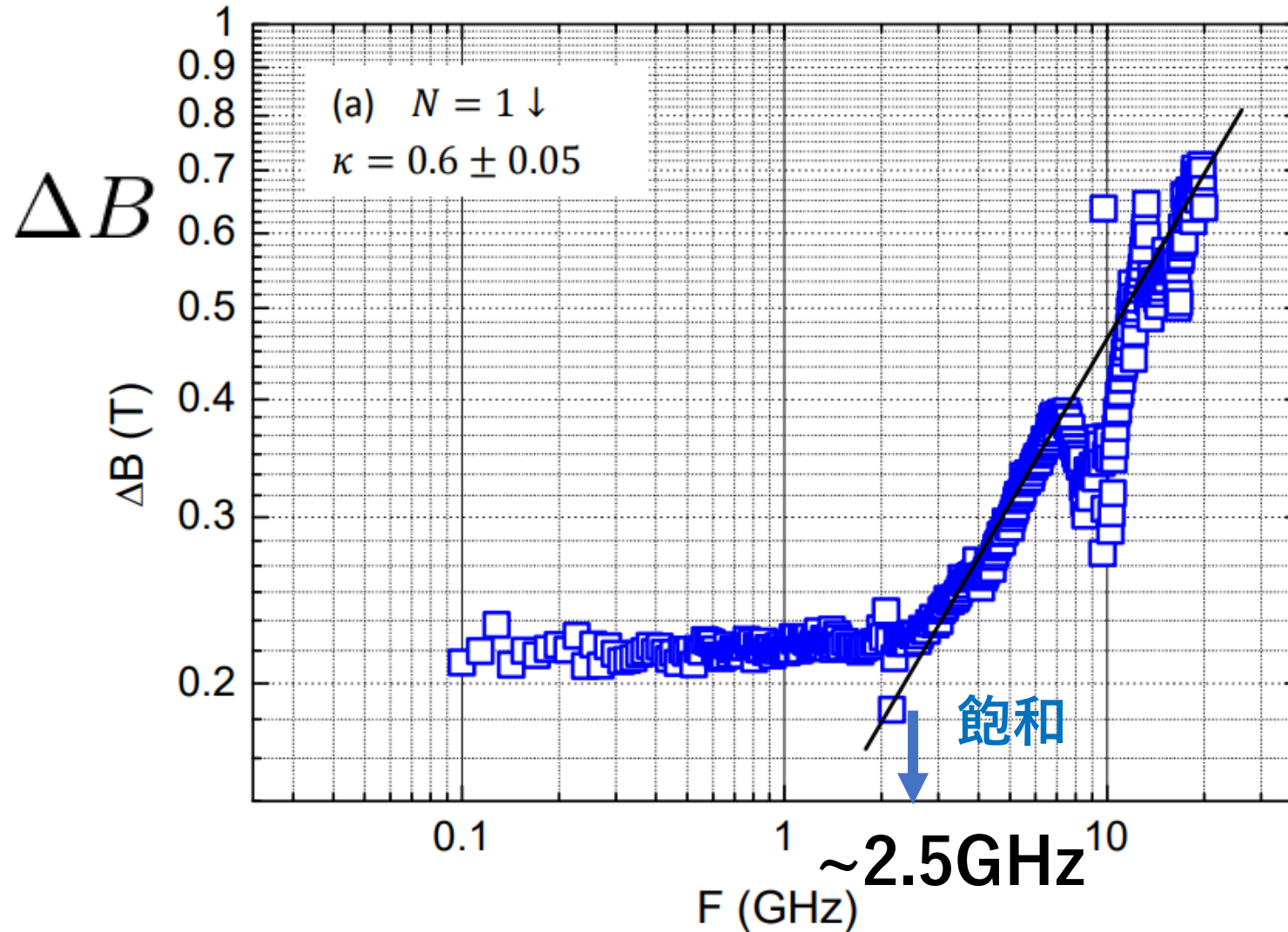
局在状態の電子が、アクシオンのマイクロ波吸収で、mobility gap内への遷移確率が高い（状態数が多い）

電子密度 $\sim 10^{11}/\text{cm}^2$



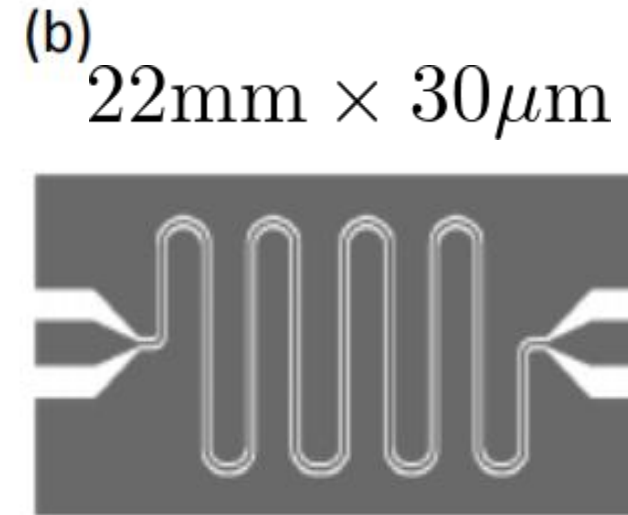
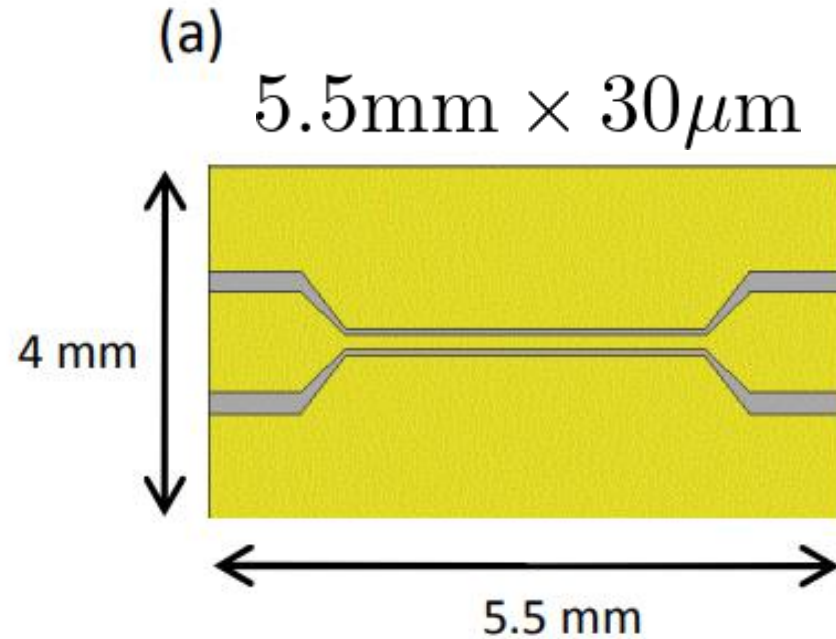
温度35mK サイズ $5.5\text{mm} \times 30\mu\text{m}$

アクションの影響あり



アクションの影響；
サイズを変えても
飽和振動数は変わらない
 $\sim 2.5\text{GHz}$

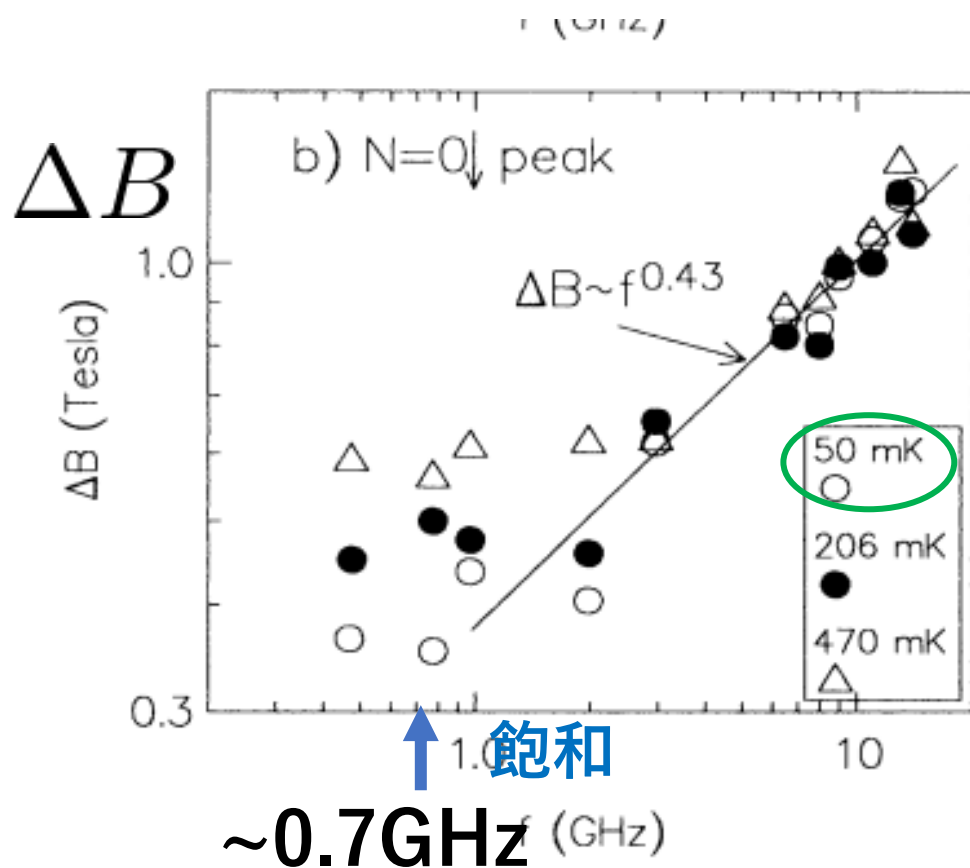
coplanar wave guide(cpw) (導波管)



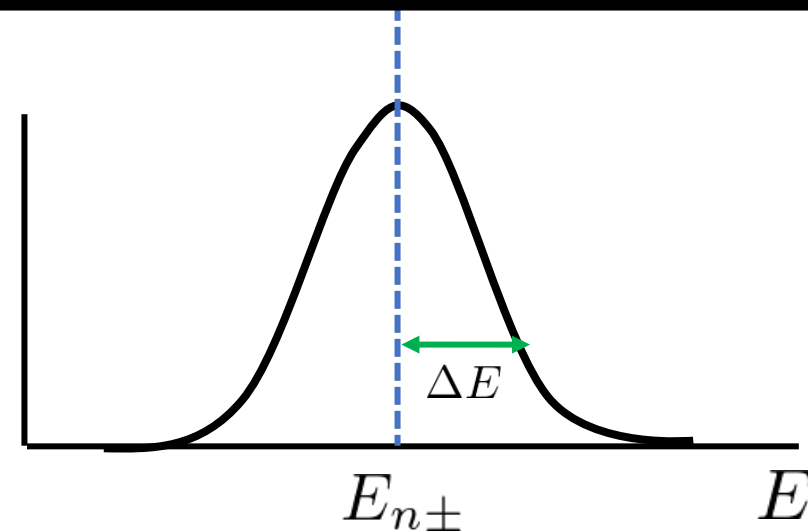
N. A. Dodoo-Amoo, doctoral theses, whiterose. ac. uk (2013).

温度50mK サイズ 14mm × 30 μ m

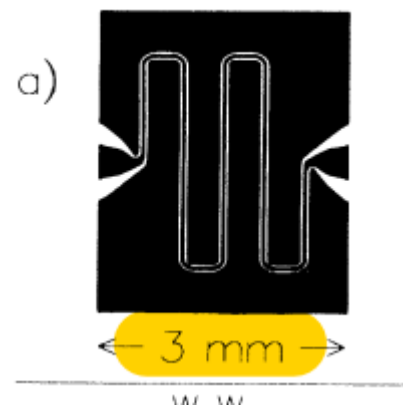
アキシオンの影響がない場合



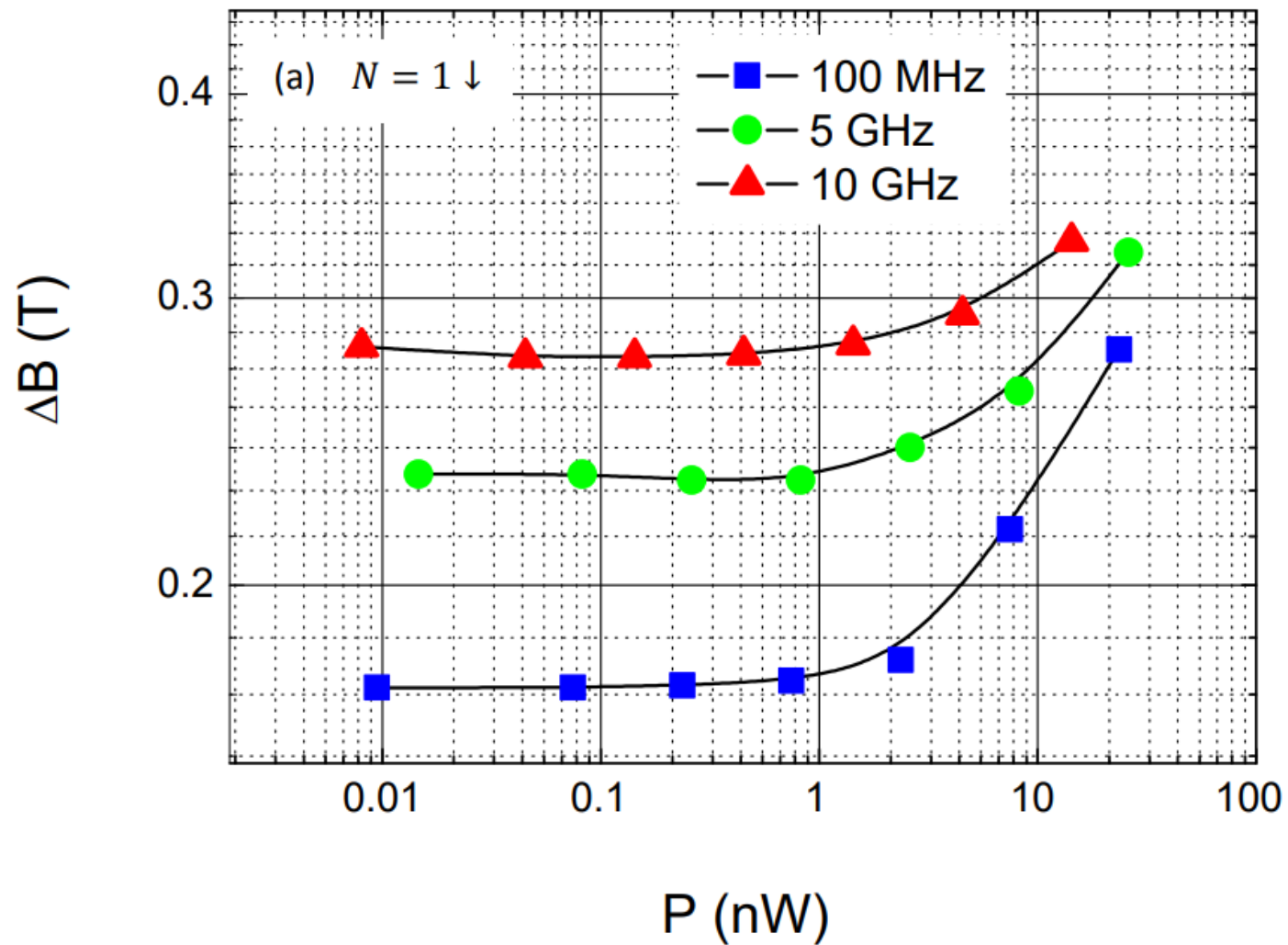
状態分布



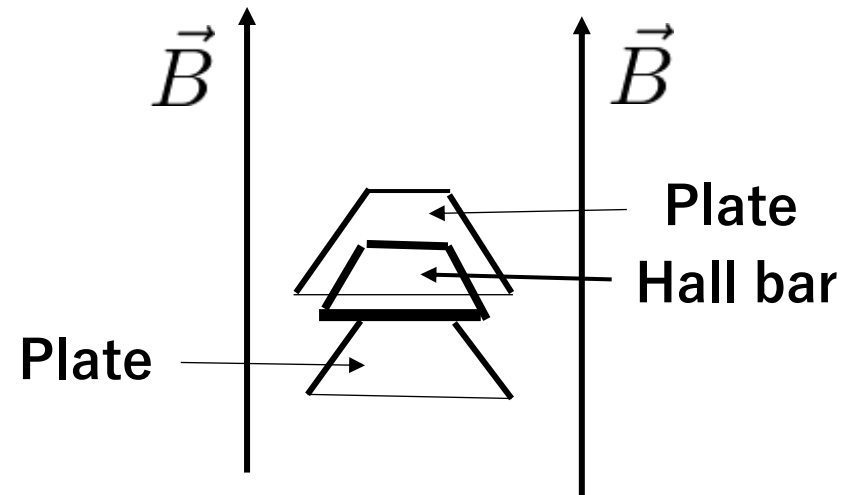
幅 ΔE が大きい試料
(アキシオンの効果ない?)



ΔB のマイクロ波強度依存性



金属板で試料(Hall bar)を挟む (マイクロ波を遮蔽)



結論

プラトー間遷移に対する
アクシオンの影響を調べた

アクシオンの影響が見える
のは、**極低温、大きな試料**

アクシオンの質量は
 $m_a \simeq 10^{-5} eV$

