

物質科学の魅力  
多様な世界と普遍的な法則

機能性物質物性研究室 (V 研)  
寺崎一郎

- ▶ 自然科学の未解決の問題
- ▶ 多くなると何かが変わる
- ▶ 拡大する物質の物理学
- ▶ 相転移： 多様な世界と普遍的な法則の典型
  - 磁場で溶ける磁束の氷
  - 電流で溶ける電子の氷
- ▶ V 研： 面白くて役に立つ物質の物理学
- ▶ まとめ

宇宙の不思議

もっと遠くには何があるのか

極微の世界の不思議

物質は何からできているか

この2つは、「我々はどこから来たのか」という根源的な疑問に直結する、面白さが「自明な」問題

物理学は、少数の基本法則と少数の基本粒子がこの世の全てを形作っている・・・と信じている学問

・・・しかし、

WHAT DON'T WE KNOW?

## What Is the Universe Made Of

Every once in a while, cosmologists are dragged, kicking and screaming, into a universe much more unsettling than they had any reason to expect. In the 1500s and 1600s, Copernicus, Kepler, and Newton showed that Earth is just one of many planets orbiting one of many stars, destroying the comfortable Medieval notion of a closed and tiny cosmos. In the 1920s, Edwin Hubble showed that our universe is constantly expanding and evolving, a finding that eventually shattered the idea that the universe is unchanging and eternal. And in the past few decades, cosmologists have discovered that the ordinary matter that makes up stars and galaxies and people is less than 5% of everything there is. Grappling with this new understanding of



In the dark. Dark matter holds galaxies together; supernovae measurements point to a mysterious dark energy.

Science 309 (2005) 78

- ▶ 我々の世界が、100 に満たない種類の元素が膨大な数集まってできているならば、日常生活の全ての事柄が疑問となって浮上する
  - 空が青く、木々が緑なのはなぜか
  - 水は蒸気になったり凍ったりするのはなぜか
  - 金属はぴかぴかでガラスは透明なのはなぜか
  - 硬度、導電性、磁性の源はなにか

# 多くなると何かが変わる

2002年(平成14年)12月24日

火曜日

41934号

(日刊)

## 天声人語

「スモール・

イズ・ビューテ  
イフル」と英国  
の経済学者シュ  
ーマッハー氏が  
唱えたところ、環境保護に  
関心を持つ人の中で「モ  
ア・イズ・ワース(多い  
ことは悪い)」という表  
現も流行した。大量生産  
大量消費を戒める標語だ  
▼ノーベル物理学賞学者  
のP・アンダーソン氏は  
これをもじり「モア・イ  
ズ・ディファレント(多  
いと様相が変わる)」と  
言った▼物理学は万物の  
基本法則を求め、極微の  
世界に入り込んだ。少数  
の基本粒子が理解できれ  
ばすべてわかると信じた  
からだ▼だが、日常接す  
る物質には基本粒子が気  
の遠くなるほどたくさん  
詰まっている。軟らか  
い、硬い、重い、軽い、  
磁石につく、つかないな  
ど、性質もさまざまだ。  
基本粒子の種類は少ない  
のに、膨大な数が集まる  
と想像を超える多様性が

## 閑 聞 新 日 享 月

現れてくる。基本粒子を  
いくら調べても、物事は  
わからない。簡潔な言い  
回しにこんな主張が込め  
られていた。それが、新  
しい研究領域を生み出す  
呼び水にもなった▼アン  
ダーソン氏は、先日、東  
京大学から名誉博士号を  
受けるために来日した。  
貧困の研究でノーベル経  
済学賞を受けたアマール  
テ  
ィア・セン博士に続き、  
2人目の東大名誉博士  
だ。79歳の誕生日が目前  
だったが、かくしゃくと  
したものだ▼数が増  
えると変わるのは、物質  
に限ったことではなから  
う。例えば、政治や経済  
の世界の女性や若手はど  
うだろう。ある程度の数  
が集まって初めて、全体  
の質に変化が出るのでは  
ないか。「多くなると何  
かが変わる」。魅力的な  
言葉だ。物理の世界にと  
どめておくのは惜しい。

# More is different

## ▶ アンダーソンの言葉

- ひとつひとつが理解できても、  
たくさん集まるとすべてが変わる
- 水は1分子  $\text{H}_2\text{O}$  では凍らない、たくさん集めると凍る
- たくさんの原子・電子を集めたときに何が起こるか？  
「創発性」(emergence) の物理学

## ▶ 物質の性質を決めているのは電子だけなのに・・・

- 磁性体 (ビデオテープ)
- 誘電体 (携帯電話)
- 超伝導体 (リニアモーターカー)
- 半導体 (コンピュータ)
- 光学材料 (DVD)

## ▶ 私たちは、物質の機能のすべてを予言できていない。

- 物質の物理学には至る所にフロンティアがある

物理学会発表件数 素粒子・原子核・宇宙 500 件  
物性 3500 件

# 1985年以降のノーベル物理学賞

- ▶ 1985 量子ホール効果
- ▶ 1986 走査トンネル顕微鏡
- ▶ 1987 高温超伝導
- ▶ 1989 イオントラップ
- ▶ 1991 ソフトマター
- ▶ 1994 中性子散乱
- ▶ 1996  $^3\text{He}$  の超流動
- ▶ 1997 レーザー冷却
- ▶ 1998 分数量子ホール効果

赤字は発見から  
数年以内の受賞

- ▶ 2000 半導体 LSI
- ▶ 2001 原子のボーズ凝縮
- ▶ 2003 超伝導の理論
- ▶ 2005 量子光学
- ▶ 2007 巨大磁気抵抗
- ▶ 2009 光通信
- ▶ 2010 グラフェン
- ▶ 2012 単一光子・原子操作

これ以外に化学賞をもらった物理学者もいる。2011年の化学賞は準結晶



# 拡大する物質の物理学





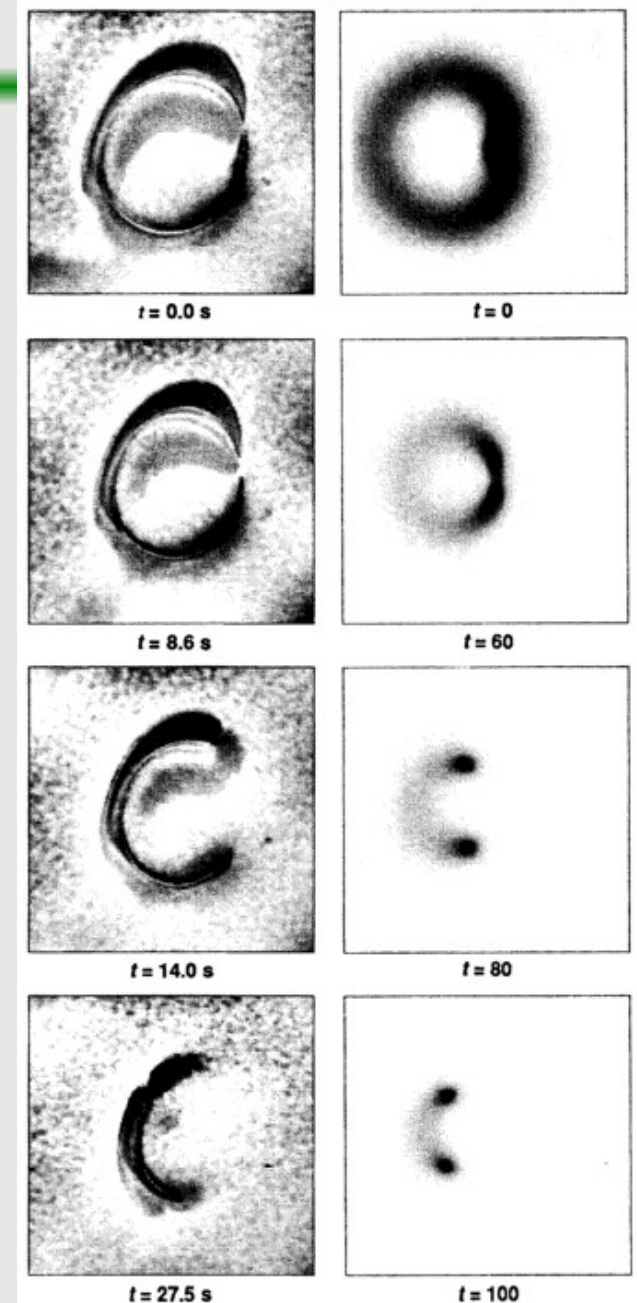
## Cosmology in the Laboratory: Defect Dynamics in Liquid Crystals

ISAAC CHUANG, RUTH DURRER, NEIL TUROK, BERNARD YURKE

**Table 1.** Defects and their role in cosmology.

Defect	Homotopy group	Behavior
Walls	$\pi_0(\mathcal{M}_0)$	Rapidly dominate universe. Disastrous unless formed late.
Strings	$\pi_1(\mathcal{M}_0)$	Global or gauged—scale with density in the universe.
Monopoles	$\pi_2(\mathcal{M}_0)$	Gauged—rapidly dominate universe. Global—scale with density in the universe.
Textures	$\pi_3(\mathcal{M}_0)$	Gauged—relax to vacuum. Global—scale with density in the universe.

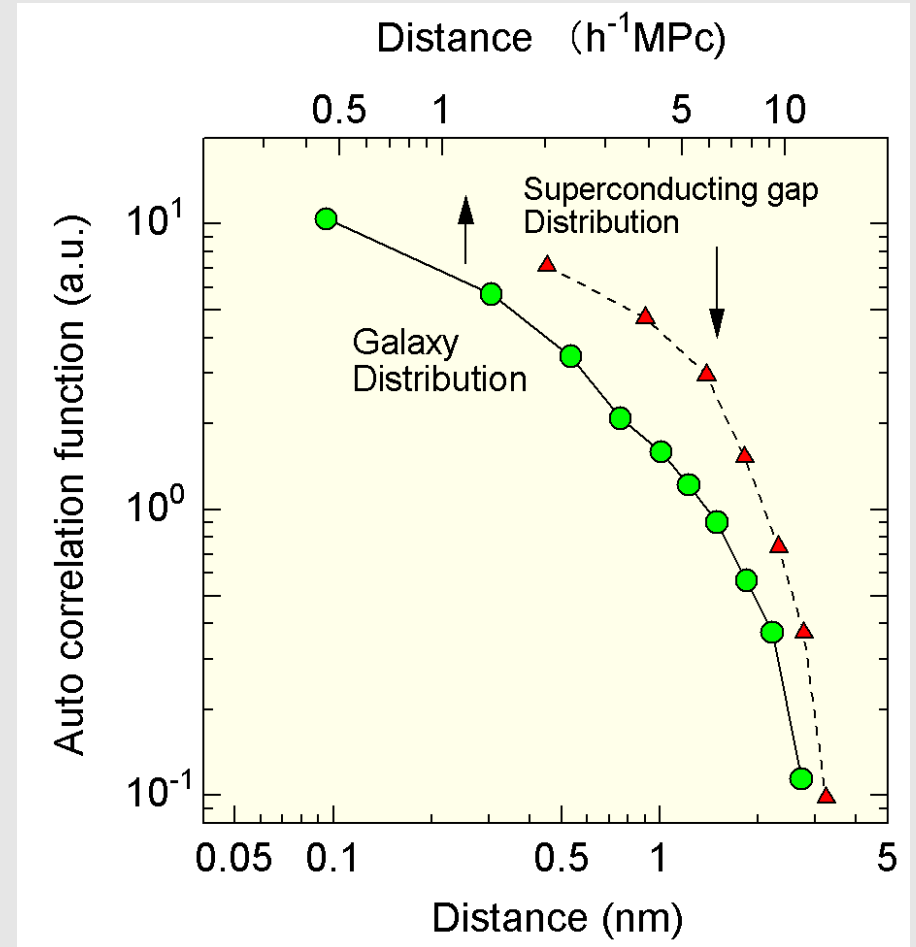
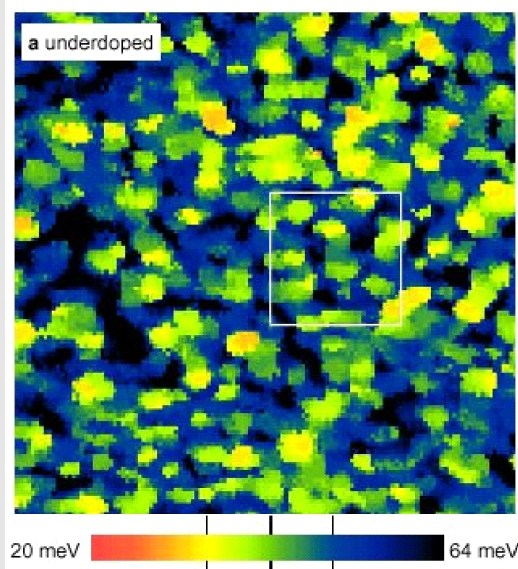
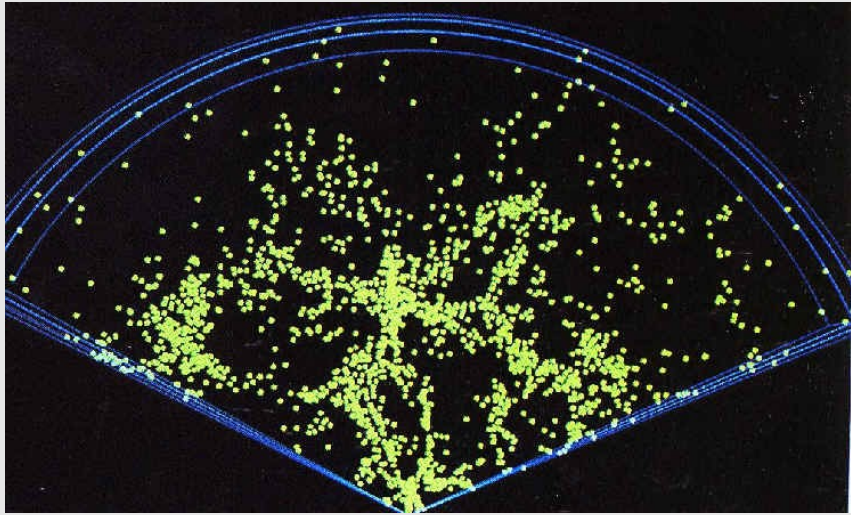
Chuang et al. Science 251 (1991) 1336



**Fig. 3.** A time sequence showing the evolution of a  $\pi_3$  "texture" in a freely suspended thin film of nematic liquid crystal (left column) and as simulated numerically (right column). The texture breaks at one point to form a monopole-antimonopole pair, which then moves around the ring to annihilate on the far side. Each frame shows a region  $260 \mu\text{m}$  in width.

# 宇宙の不均一、電子の不均一

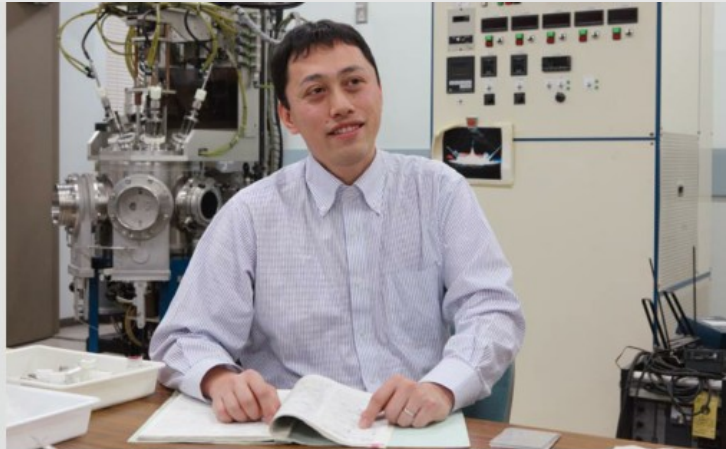
Astrophys. J. 332 (1988) 44



Lang et al. Nature  
415 (2002) 412

Terasaki J. Phys. Conf. Ser. 31 (2005) 51

# 電子が見るブラックホール



Kazuhiko Deguchi

1976年生まれ。2004年京都大学大学院理学研究科博士後期課程修了。同年京都大学理学研究科COE研究員。同年12月から現職。専門は低温物理学・超伝導・磁性。

M 研が見つけた、準結晶の重い電子系には、量子臨界状態が安定に存在する

量子臨界状態は、ブラックホールとよくにて、物理量に特異点があられる

理フィロソフィアの最新号を参照

## 電子の小宇宙に潜むブラックホール

出口和彦 物質理学専攻助教

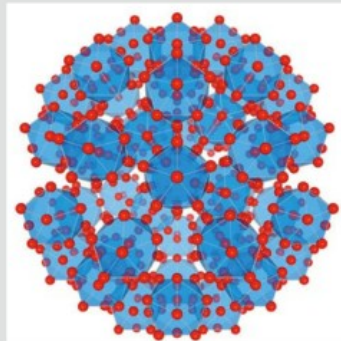
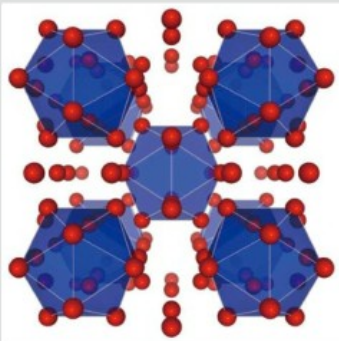
### 発見された第3の固体

私たちの周囲にある物質の多くは「結晶<sup>\*1</sup>」とよばれるもので、その中の原子やイオンは規則正しく整列している（図1）。その例は数限りなく存在し、私たちの体に不可欠な塩、

携帯電話や太陽電池に使われているシリコン、ハイブリッド車や電気自動車のモーターに使われている磁石、ダイヤモンドなどの宝石、金・銀・銅などの金属などがすぐに思いつくであろう。

窓に使われるガラスも身近な存在であるが、その中の原子はでたらめに配列し、「アモルファス<sup>\*2</sup>」とよばれている。結晶とアモルファスの存在は古くから知られているが、「準結晶<sup>\*3</sup>」が発見されたのは1980年代に入ってからのものである。図2に示すように準結晶は原子配置が特殊ではあるが規則性をもつため、回折実験では結晶と似たような性質を示すが、その回転対称性は結晶では許されないものであったため、どちらにも分類できなかった。

この「第3の固体」を発見したシェヒトマン<sup>\*4</sup>博士は、2011年のノーベル化学賞を単独で受賞することになった。シェヒトマン博士の発見以来、原子がどのように並んでいるかという準結晶の構造については研究が

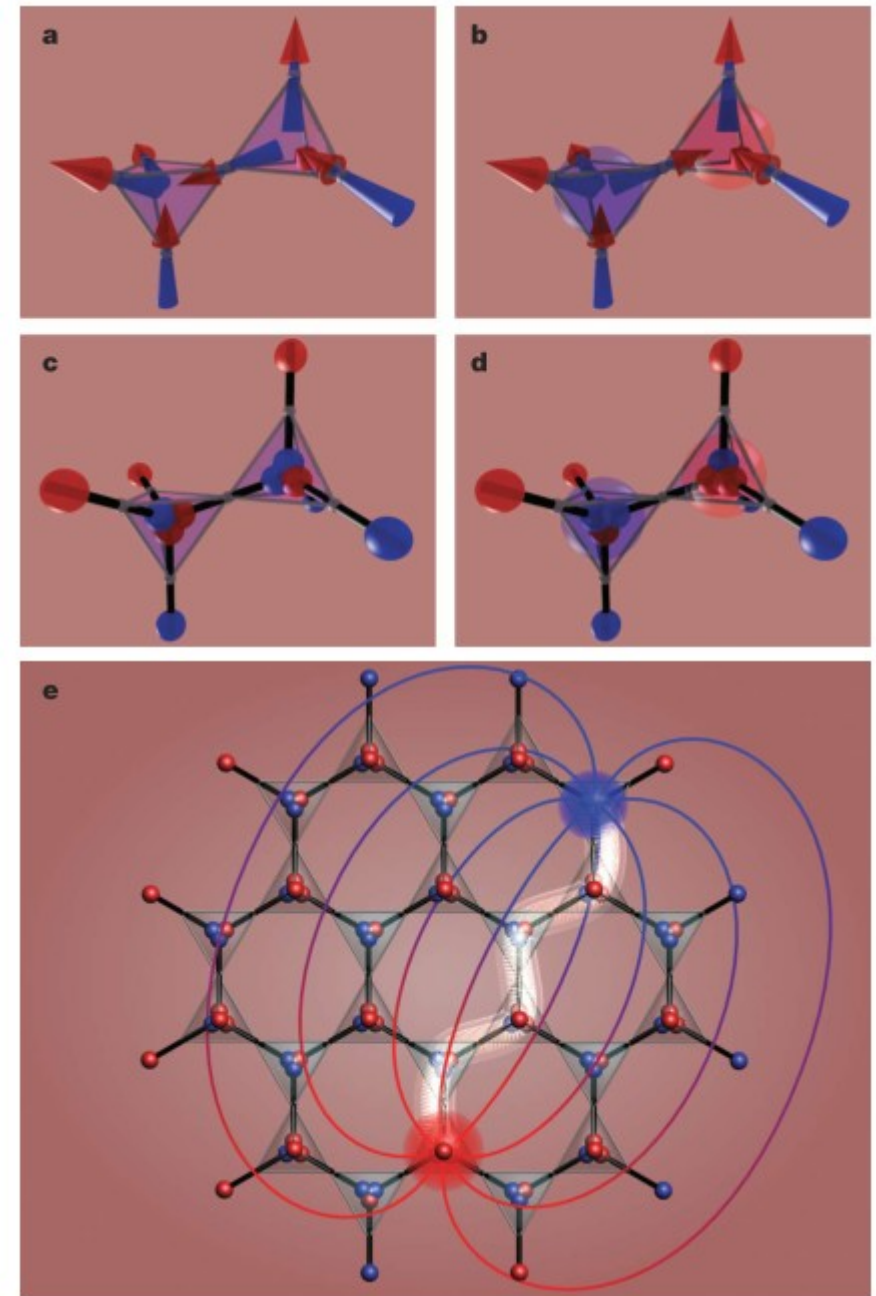




## Magnetic monopoles in spin ice

C. Castelnovo<sup>1</sup>, R. Moessner<sup>1,2</sup> & S. L. Sondhi<sup>3</sup>

**Figure 2 | Mapping from dipoles to dumbbells.** The dumbbell picture (c, d) is obtained by replacing each spin in a and b by a pair of opposite magnetic charges placed on the adjacent sites of the diamond lattice. In the left panels (a, c), two neighbouring tetrahedra obey the ice rule, with two spins pointing in and two out, giving zero net charge on each site. In the right panels (b, d), inverting the shared spin generates a pair of magnetic monopoles (diamond sites with net magnetic charge). This configuration has a higher net magnetic moment and it is favoured by an applied magnetic field oriented upward (corresponding to a [111] direction). e, A pair of separated monopoles (large red and blue spheres). A chain of inverted dipoles ('Dirac string') between them is highlighted in white, and the magnetic field lines are sketched.

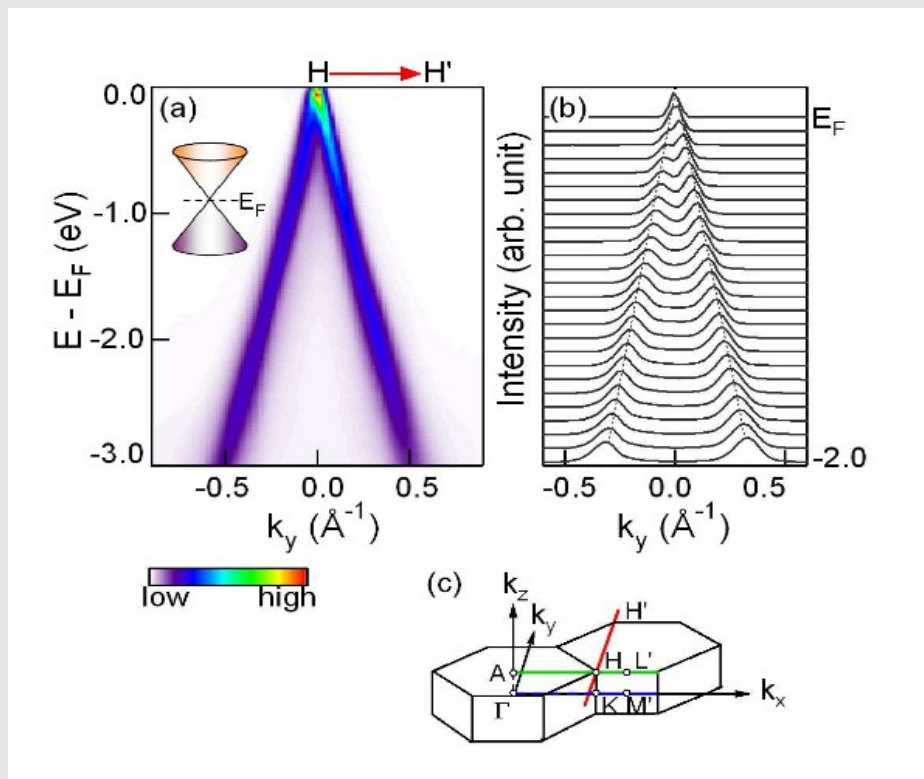


Nature 451 (2008) 42

## Two-dimensional gas of massless Dirac fermions in graphene

K. S. Novoselov<sup>1</sup>, A. K. Geim<sup>1</sup>, S. V. Morozov<sup>2</sup>, D. Jiang<sup>1</sup>, M. I. Katsnelson<sup>3</sup>, I. V. Grigorieva<sup>1</sup>, S. V. Dubonos<sup>2</sup> & A. A. Firsov<sup>2</sup>

Nature 438 (2005) 197



$$E = p^2 / 2m \text{ (massive)}$$

$$E = pc \text{ (massless)}$$

arXiv:cond-mat/0608069

Nature Physics

## Experimental Demonstration of Violations of the Second Law of Thermodynamics for Small Systems and Short Time Scales

G. M. Wang,<sup>1</sup> E. M. Sevick,<sup>1</sup> Emil Mittag,<sup>1</sup> Debra J. Searles,<sup>2</sup> and Denis J. Evans<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Research School of Chemistry, The Australian National University, Canberra ACT0200, Australia*

<sup>2</sup>*School of Science, Griffith University, Brisbane QLD4111, Australia*

(Received 4 March 2002; published 15 July 2002)

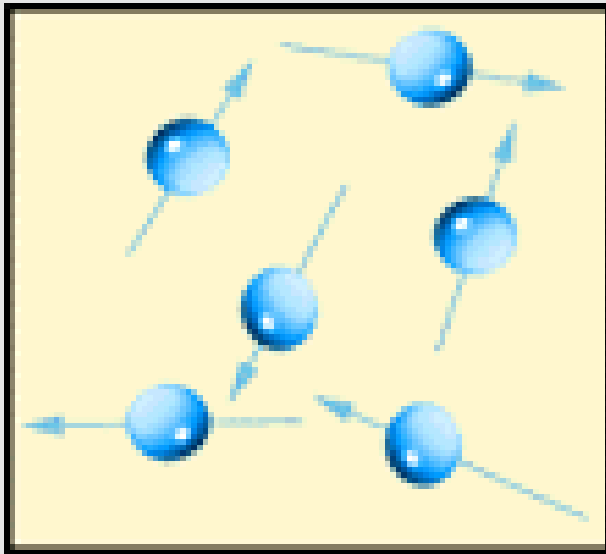
That entropy-consuming trajectories can be discerned for micron-sized particles over time scales on the order of seconds is particularly important to applications of nanomachines and to the understanding of protein motors. The fluctuation theorem points out that as these thermodynamic engines are made smaller and as the time of operation is made shorter, these engines are not simple scaled-down versions of their larger counterparts. As they become smaller, the probability that they will run thermodynami-

cally in reverse inescapably becomes greater. Consequently, these results imply that the fluctuation theorem has important ramifications for nanotechnology and indeed for how life itself functions.

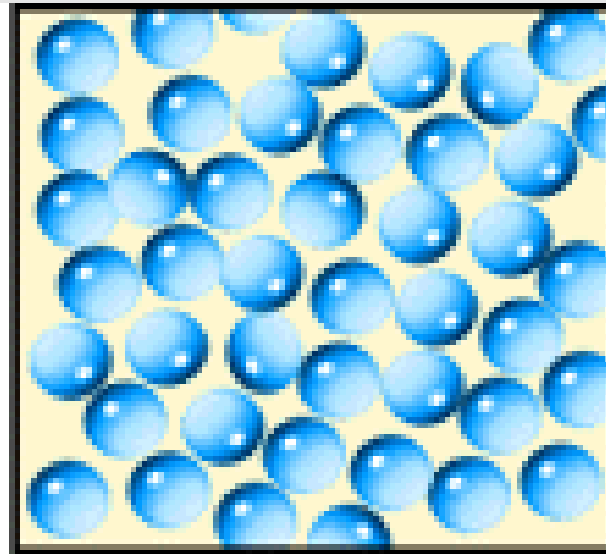
Wang et al. Phys. Rev. Lett. 89 (2002) 334

# 相転移 — 多様な世界と 普遍的な法則の典型

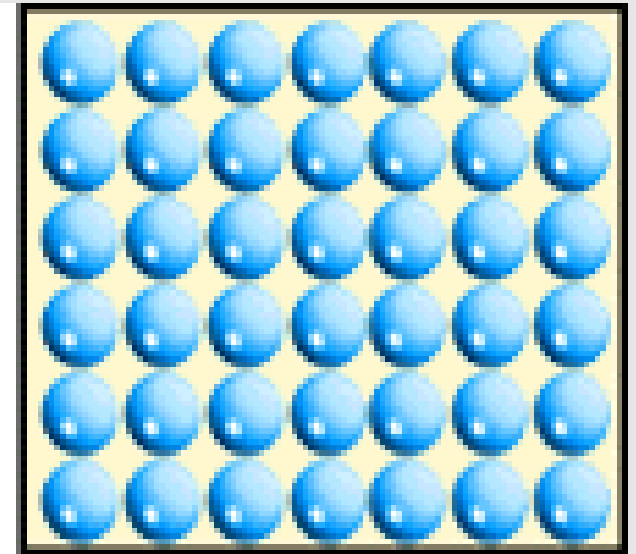
# 物質の三態



気体



液体



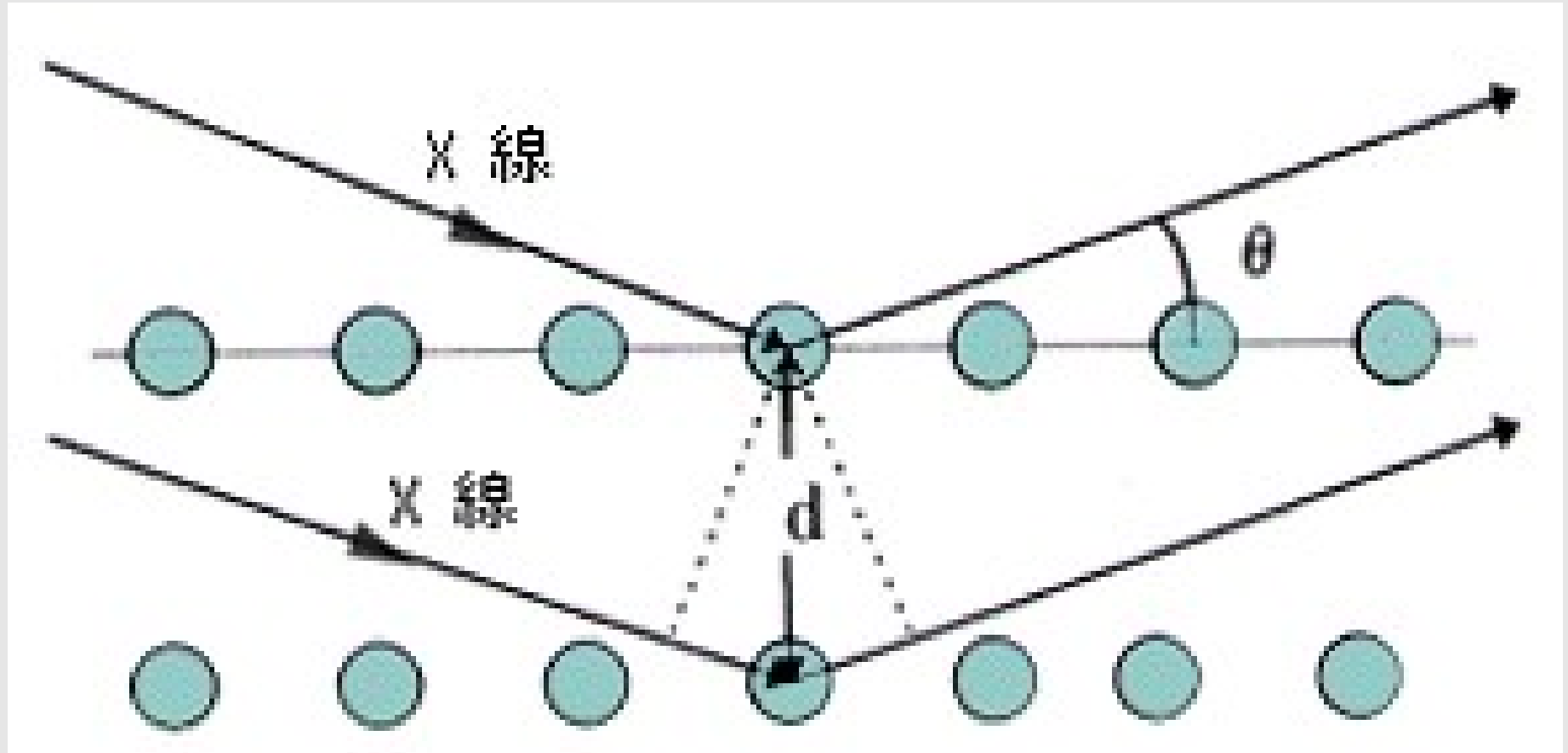
固体・結晶

液体と結晶の違いは？

原子位置の周期性



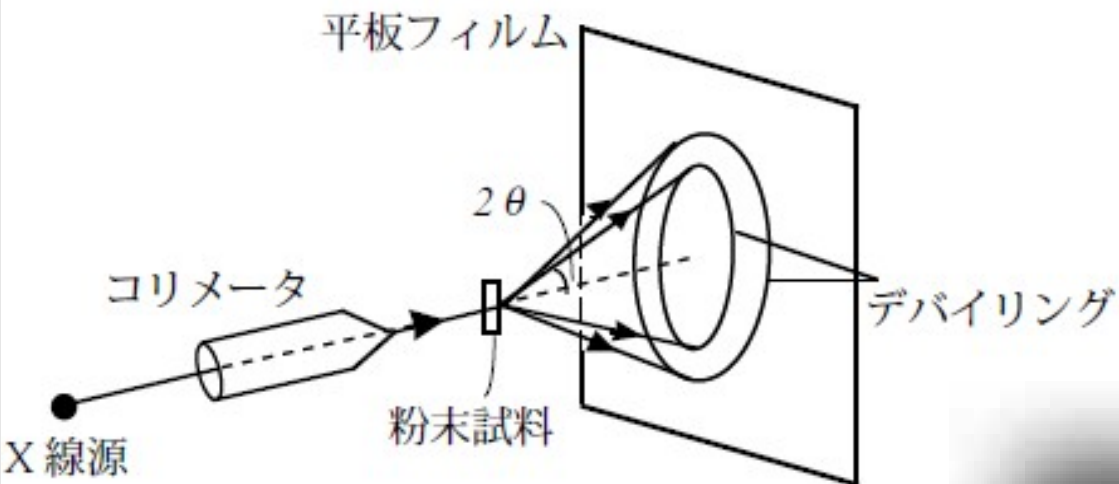
# X線・粒子線回折 — 周期性のプローブ



[http://www.kek.jp/kids/class/trans/x\\_rays.html](http://www.kek.jp/kids/class/trans/x_rays.html)



# 粉末試料の X 線回折の測定方法

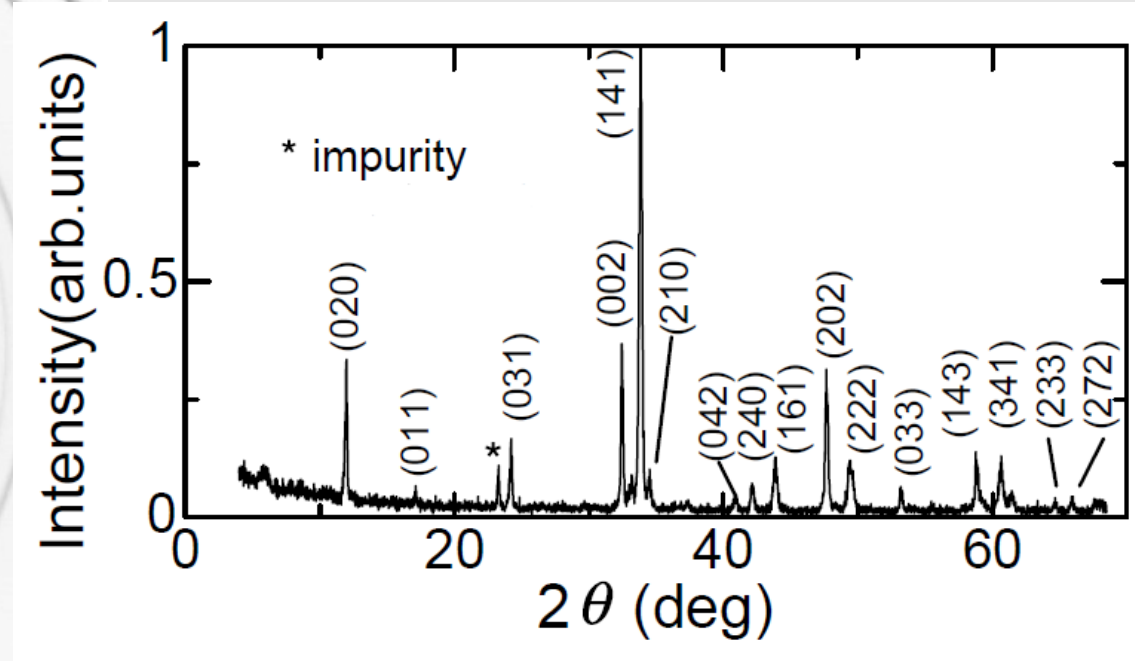
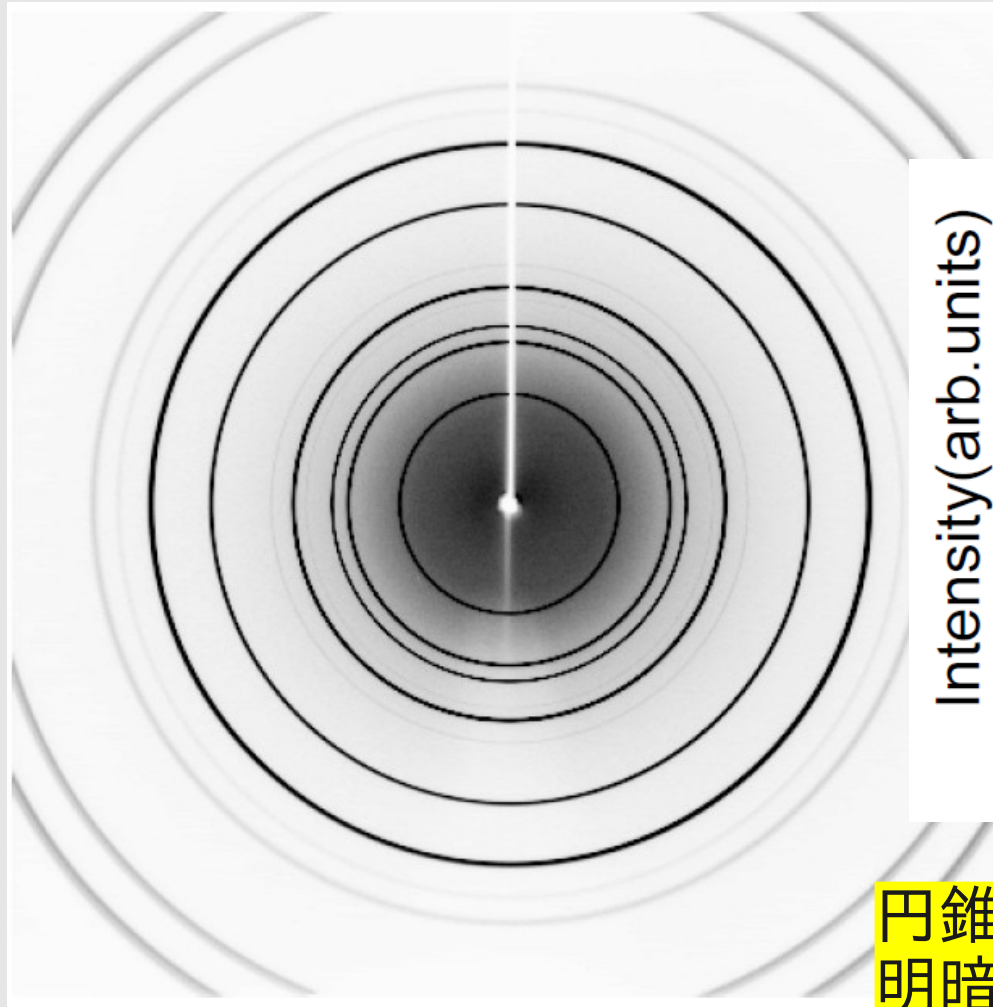


測定装置

粉末試料では、試料はいろいろな方向を向いているため、X線は円錐状に回折する

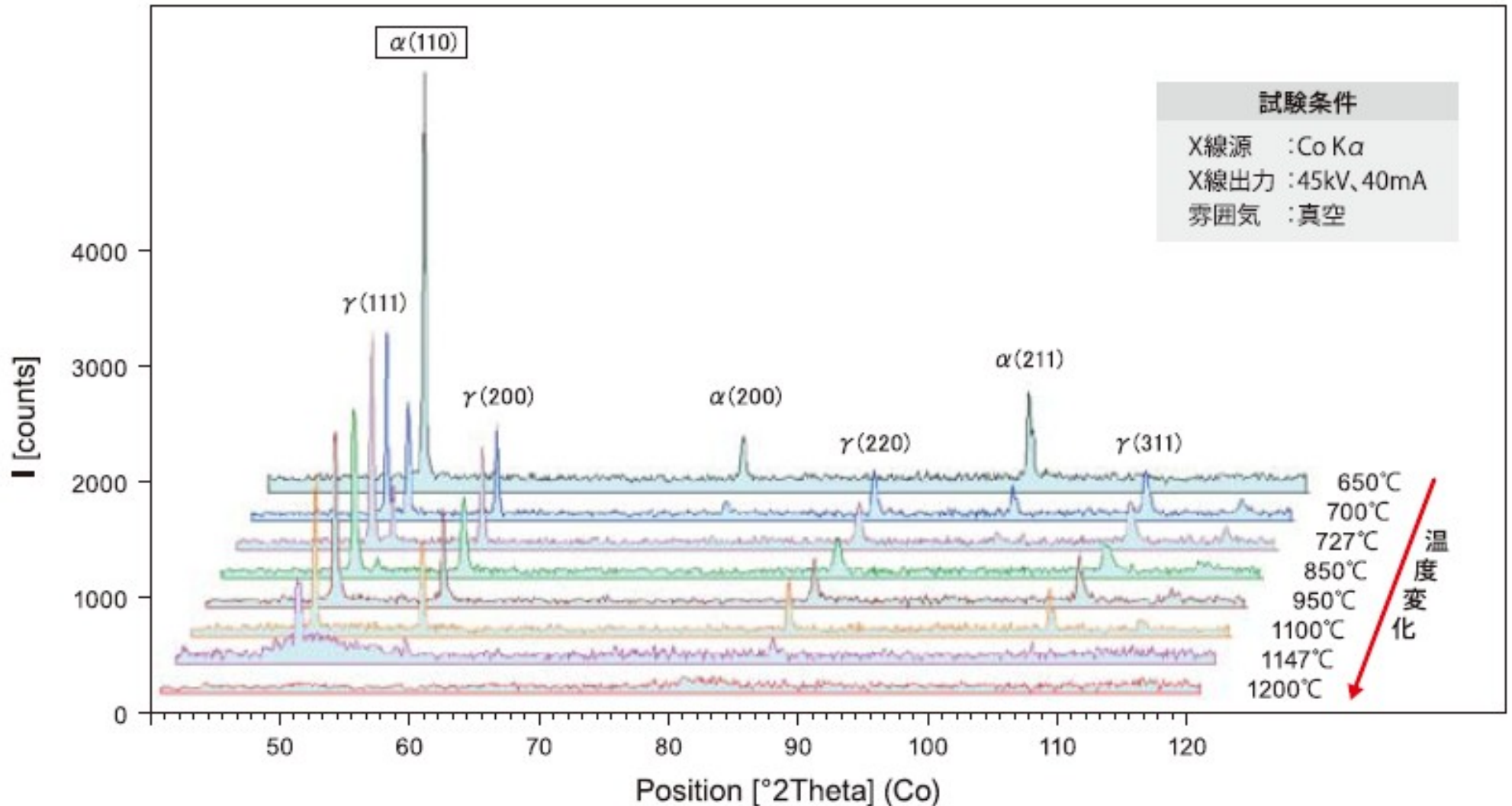


# X線回折の測定と解析の例



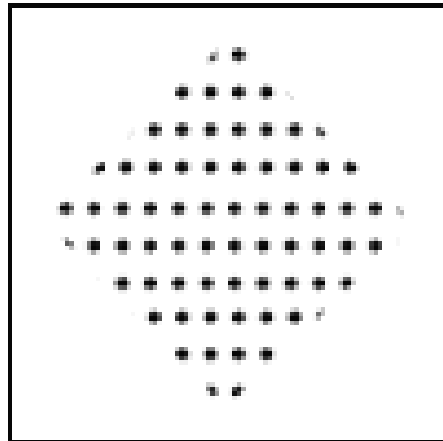
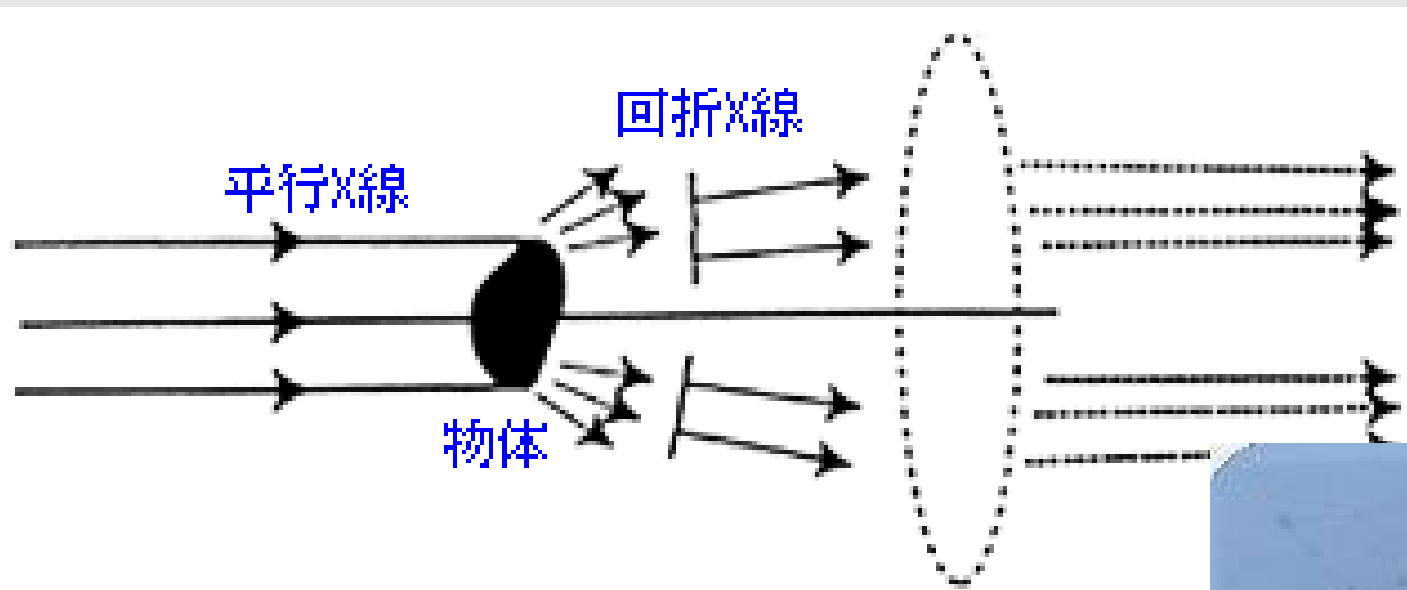
円錐状に回折した X 線はスクリーン状に明暗の縞模様をつくる。これを半径方向に強度分布を計測すると、右の図のような回折パターンが得られる

# 液体から固体になると



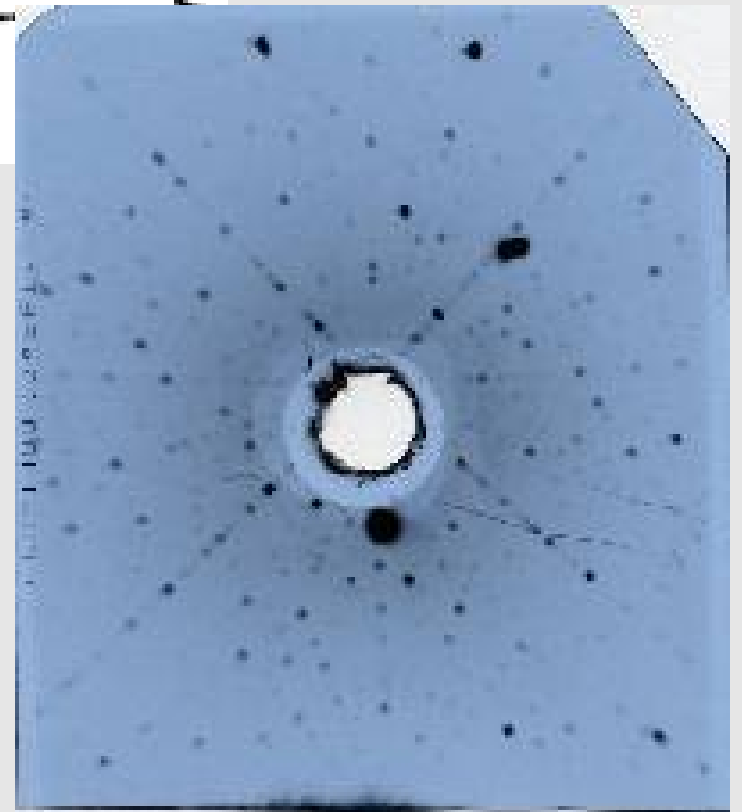
鉄が液体になると、X線回折でピークが消える  
→ ピークのあるなしで液体か固体かが区別できる

# 単結晶の X 線回折



回折像

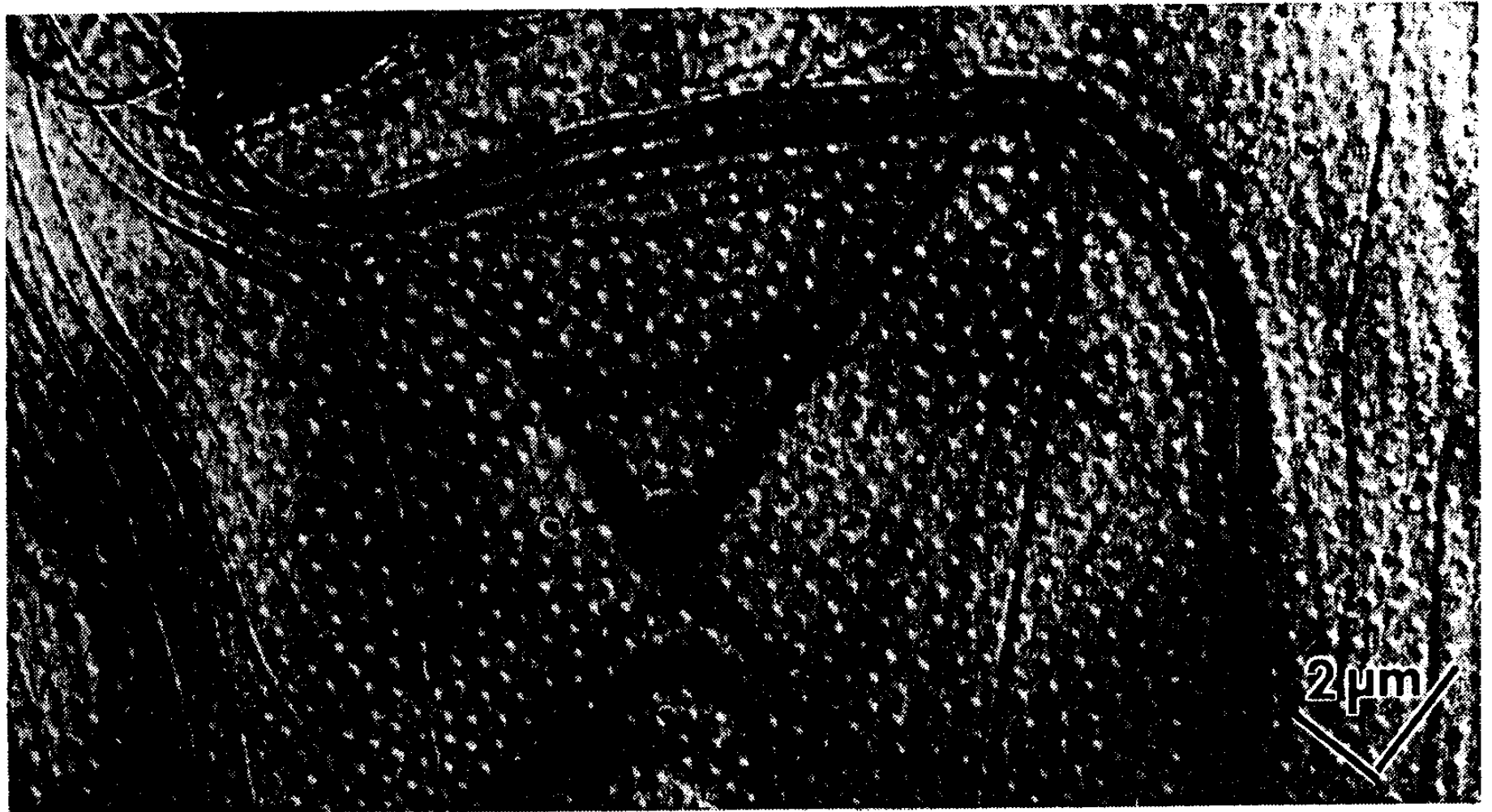
単結晶の向きは固定されているので、リングではなく、点々で回折点が現れる



# 磁場で融ける磁束の氷

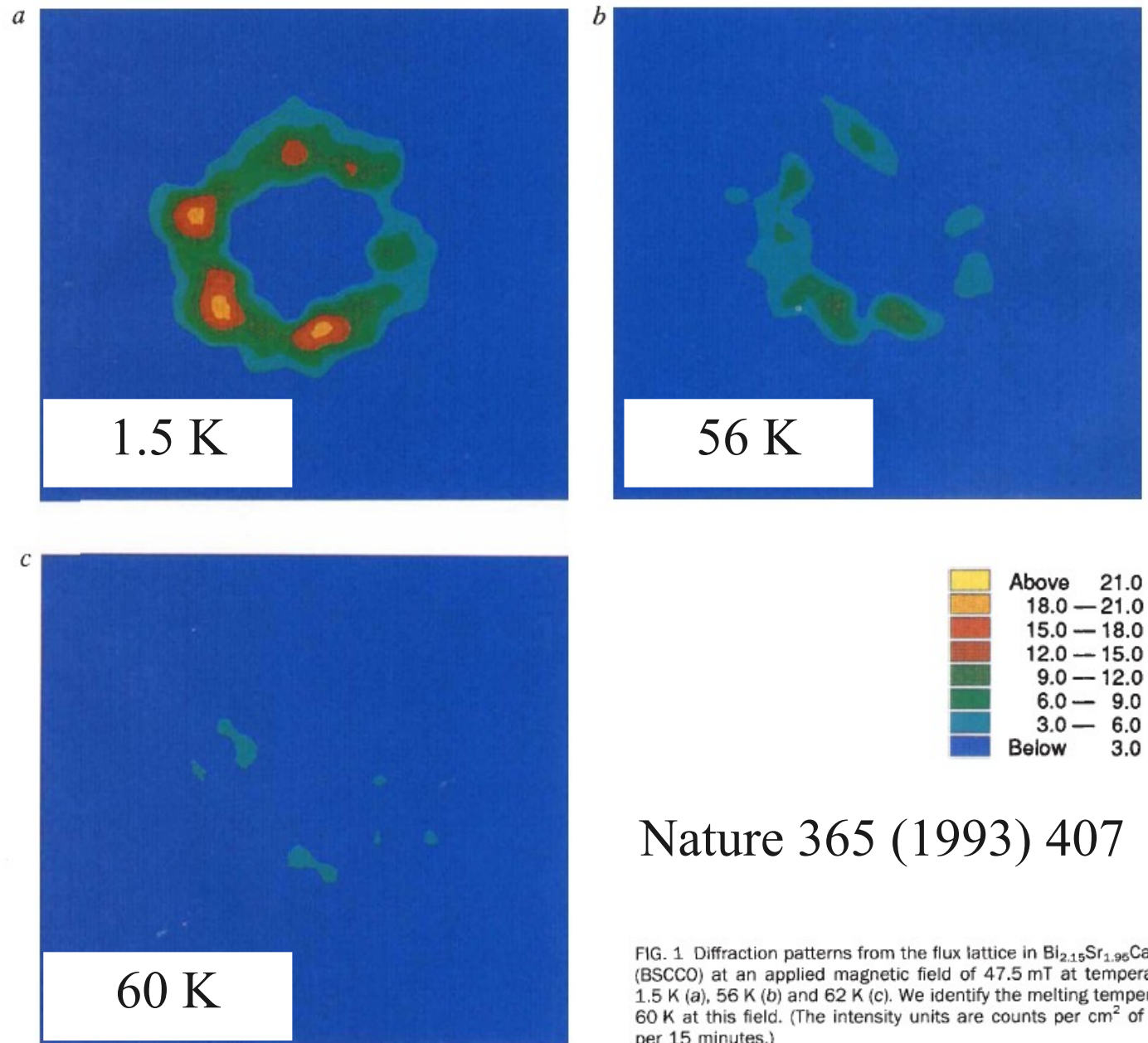
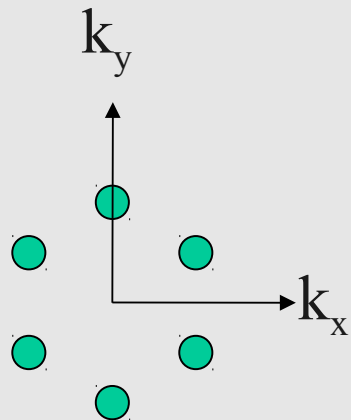
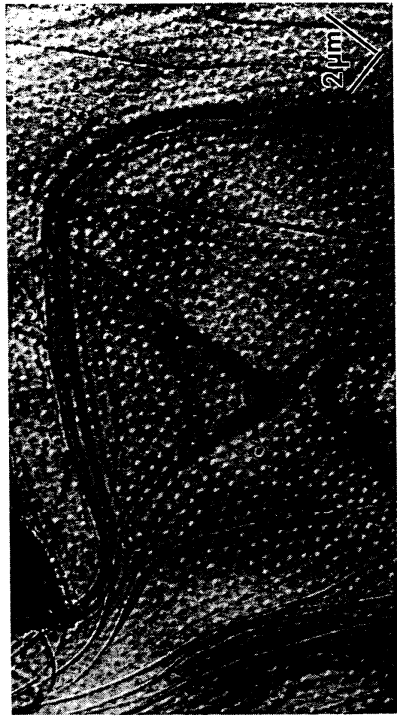
# 超伝導体の中の磁束格子

Nature 360 (1992) 51





# 中性子回折で見る磁束の氷



Nature 365 (1993) 407

FIG. 1 Diffraction patterns from the flux lattice in  $\text{Bi}_{2.15}\text{Sr}_{1.96}\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$  (BSCCO) at an applied magnetic field of 47.5 mT at temperatures of 1.5 K (a), 56 K (b) and 62 K (c). We identify the melting temperature as 60 K at this field. (The intensity units are counts per  $\text{cm}^2$  of detector per 15 minutes.)



# 磁場で溶ける磁束の氷

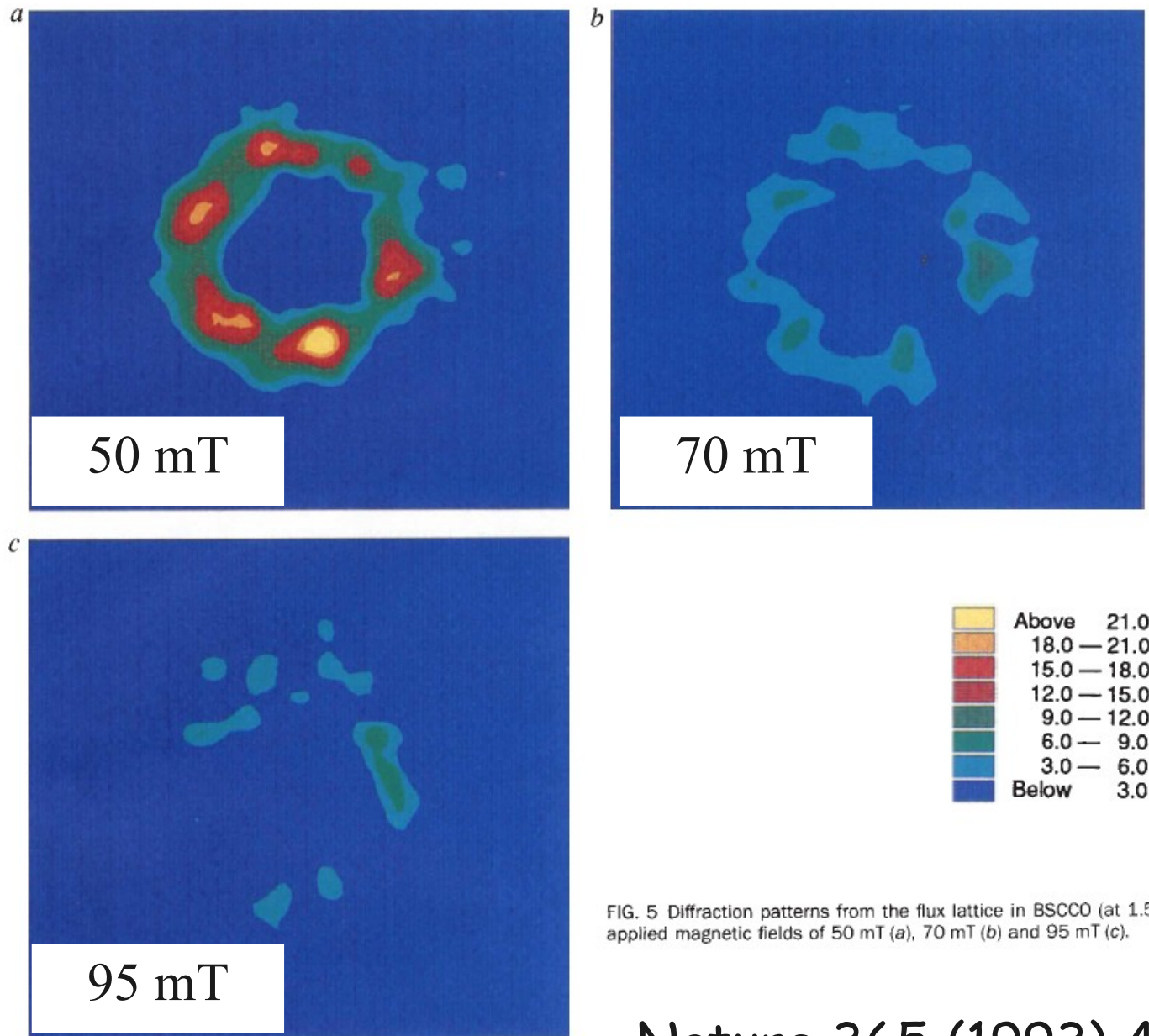
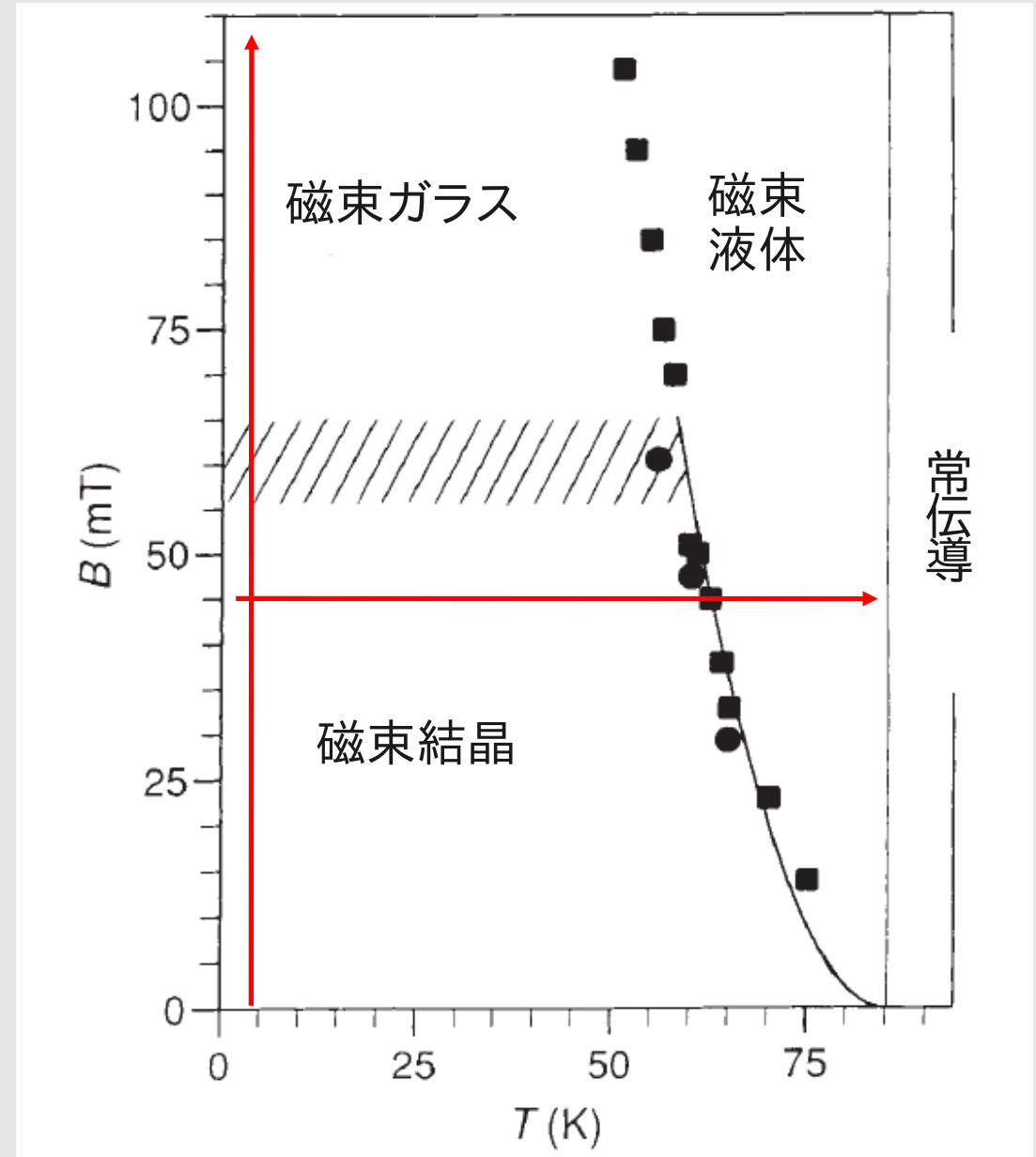
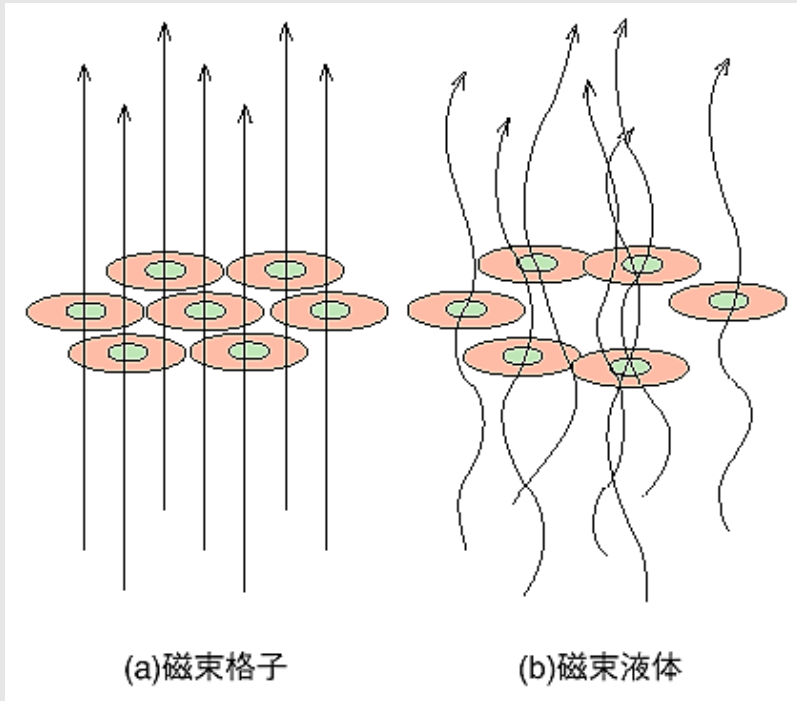


FIG. 5 Diffraction patterns from the flux lattice in BSCCO (at 1.5 K) at applied magnetic fields of 50 mT (a), 70 mT (b) and 95 mT (c).

Nature 365 (1993) 407

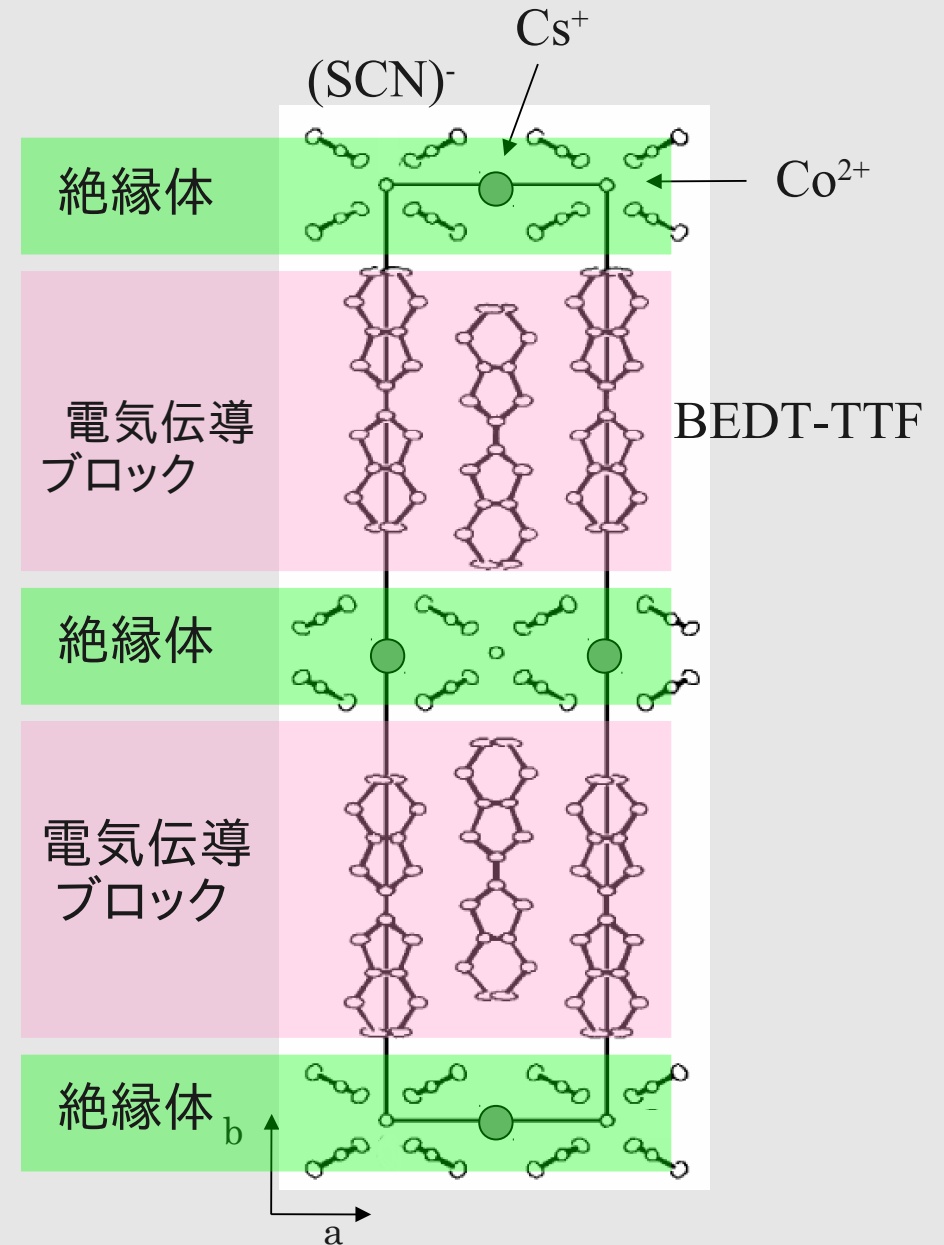
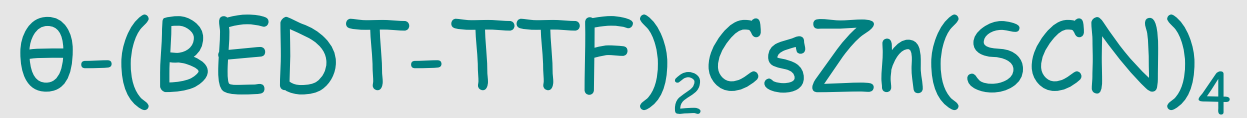
# 磁場—温度相図



Nature 365 (1993) 407

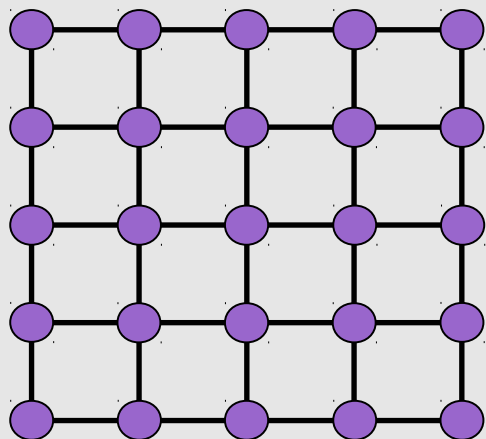
# 電流で融ける電子の氷

# 有機導体

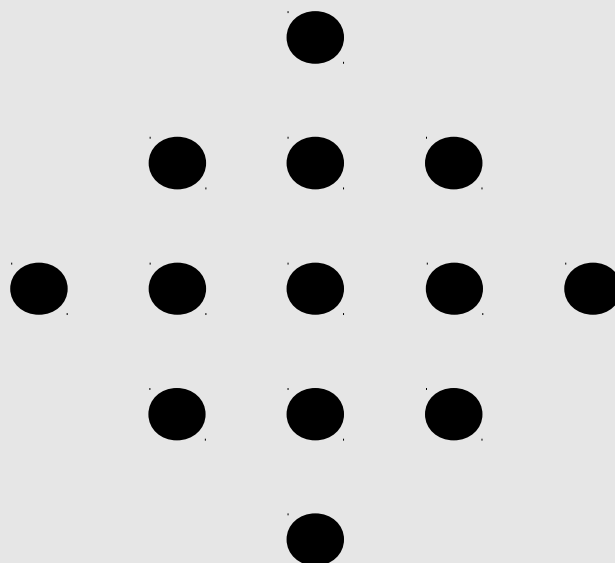


# 電子の氷は X 線ではどう見えるか

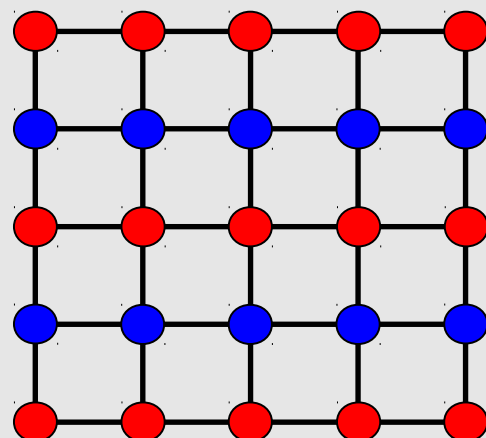
電子の  
液体



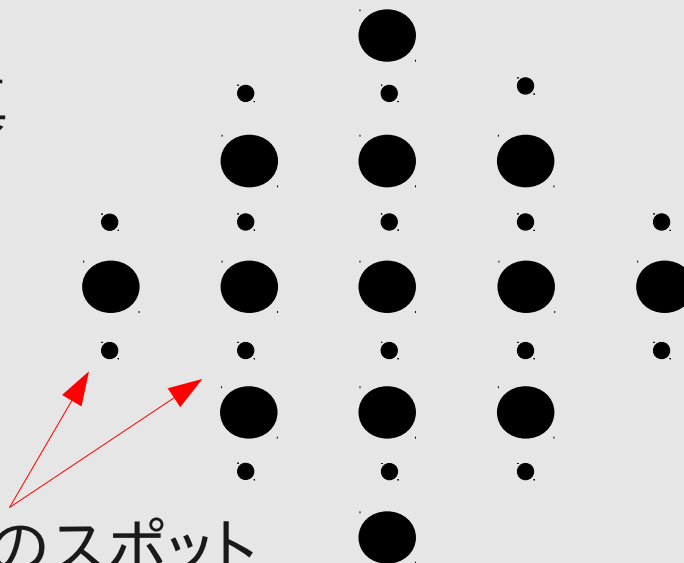
X 線写真



電子の  
氷

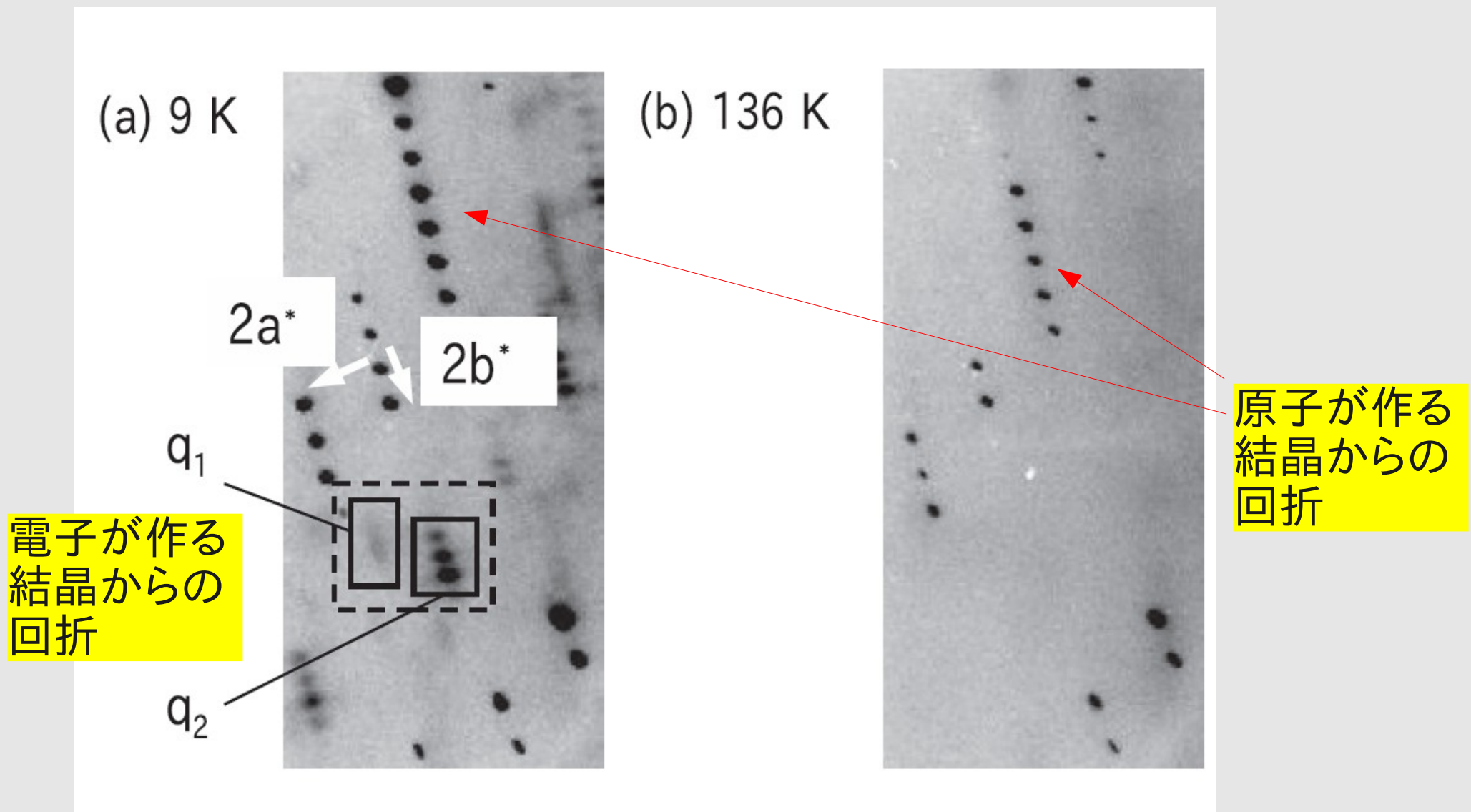


X 線写真



電子の氷のスポット

# X線回折で捉えた電子の氷

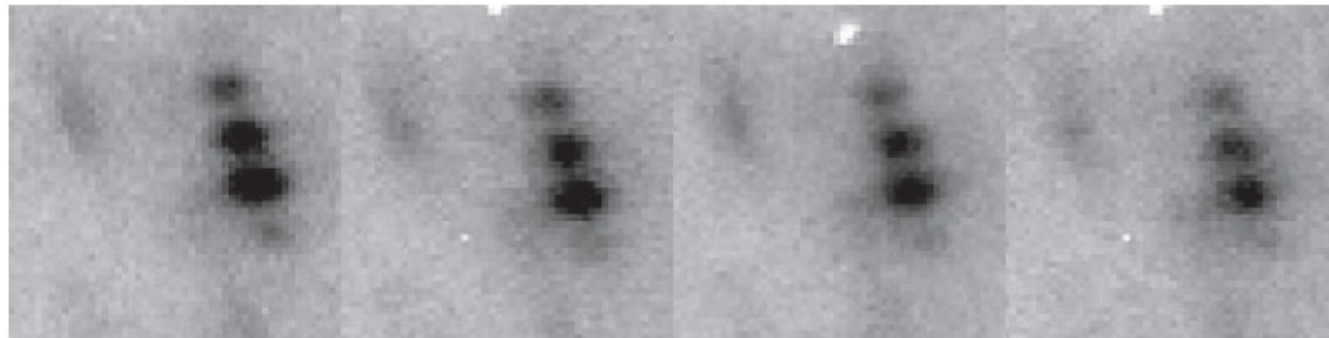


Ito et al., EPL, 84 (2008) 26002





# 温度が上がると溶ける電子の氷

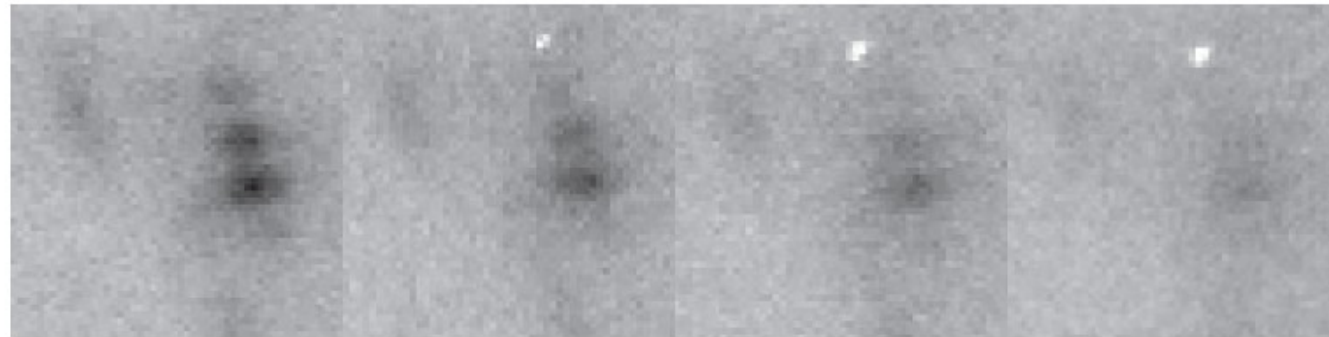


9K

13K

17K

22K



32K

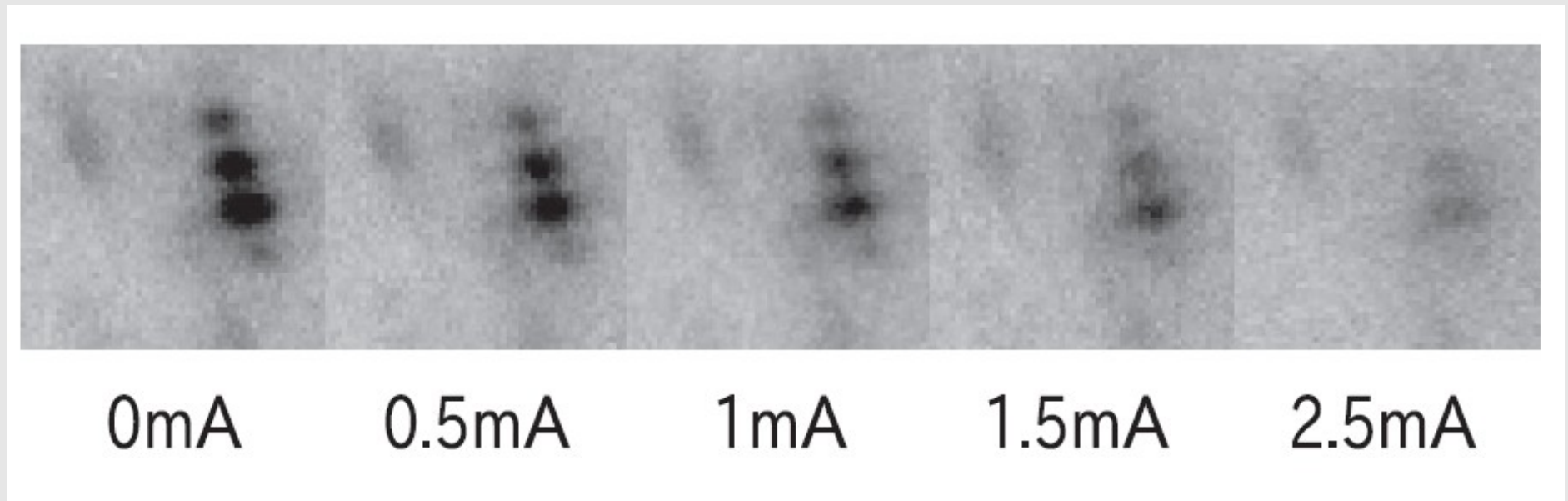
42K

52K

72K

Ito et al., EPL, 84 (2008) 26002

# 電流で溶ける電子の氷



Ito et al., EPL, 84 (2008) 26002



# 流れる川は凍らない



電流は電子の流れ, 電荷整列は電子の氷

流れる電子は凍らない

冬の寒い日に池の水は凍るけど、川の水は凍らず流れる →  
流れる水の融点は低いはず  
だけど...



# V 研究室

面白くて役に立つ物質の物理学

# 電流で溶ける電子の氷は役に立つ

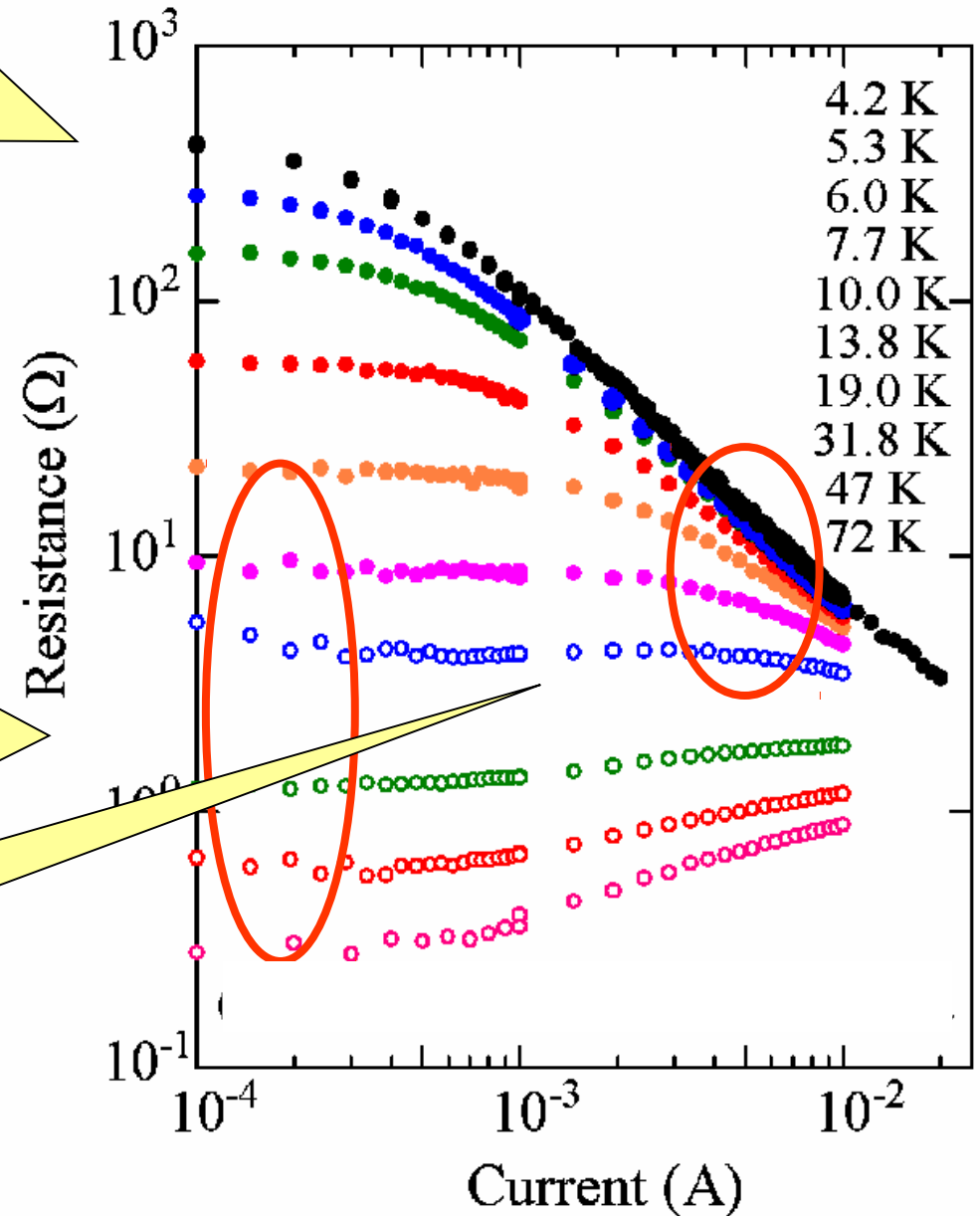
抵抗が高い状態

- 電子は電荷整列状態  
となつて動けない
- 「電子の氷」状態

抵抗が低い状態

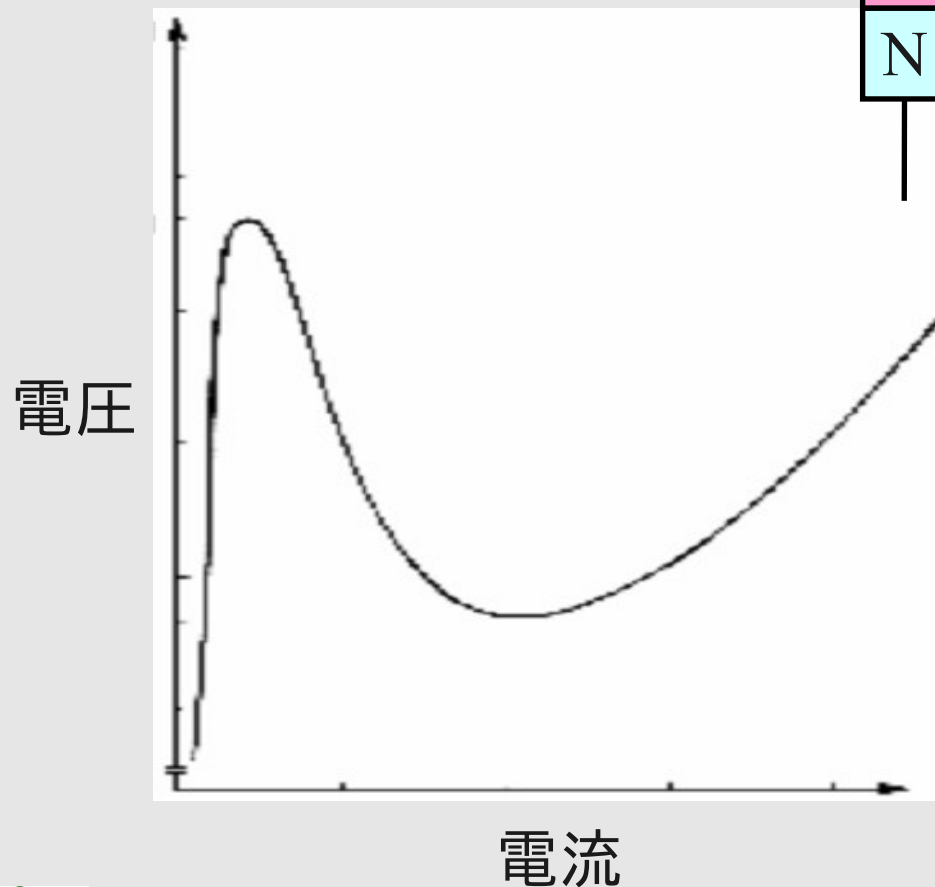
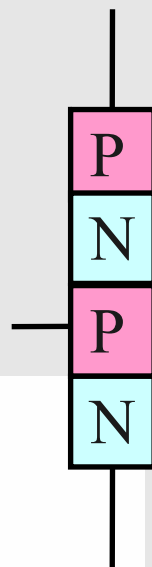
- 「電子の水」状態
- 電子の氷は温度を  
上げると溶ける

電子の氷は電流を流しても溶ける!

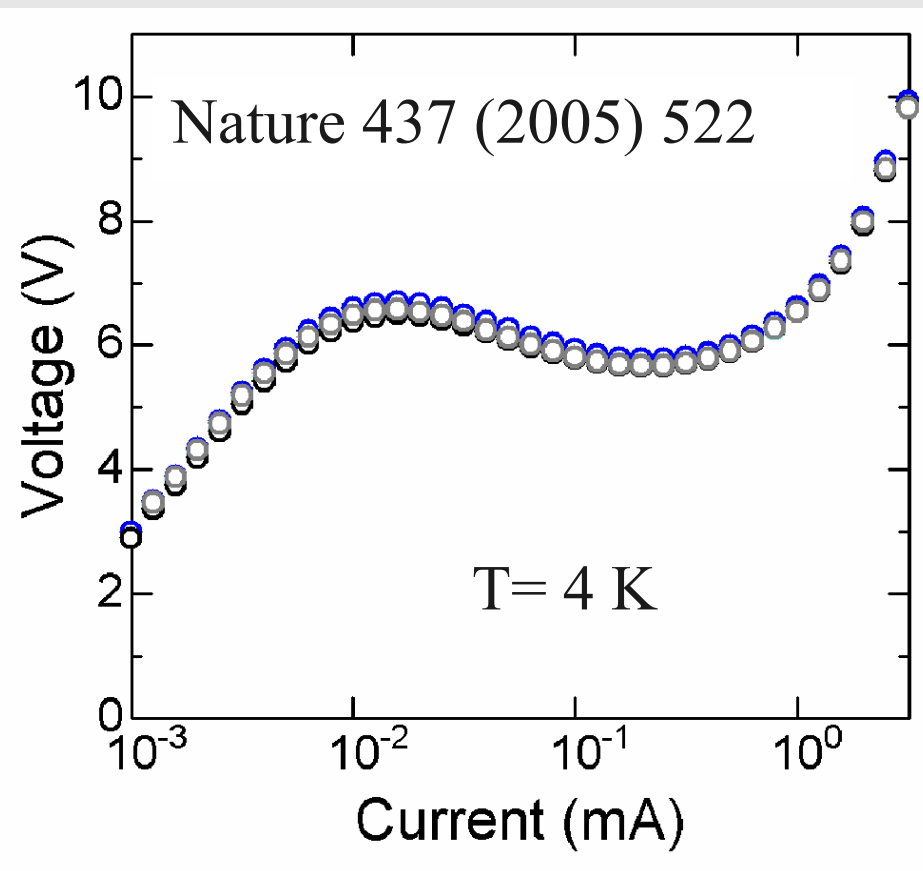


# 有機サイリスタ

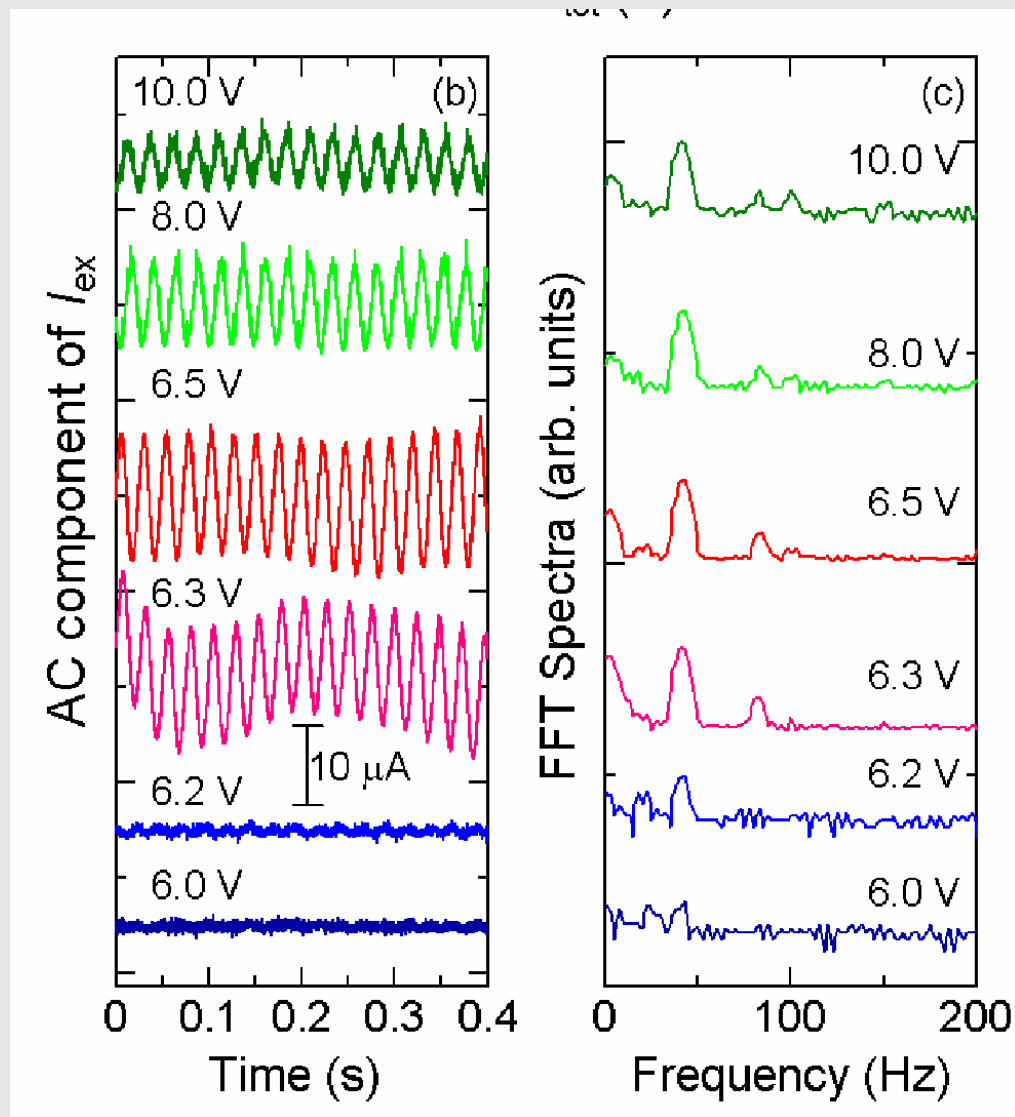
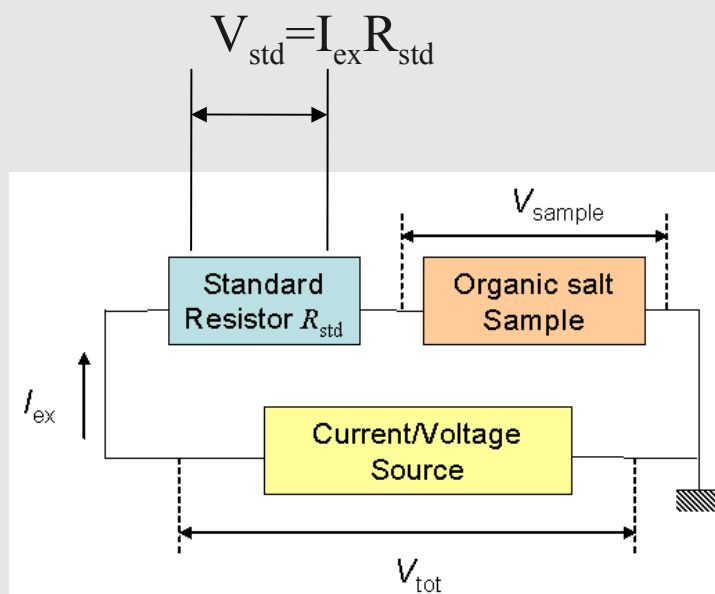
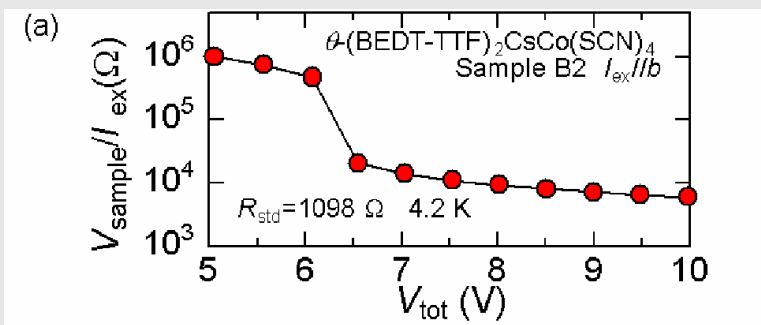
半導体のサイリスタ素子は、PN 接合を利用して非線形特性を実現



$\theta$ (BEDT-TTF) 化合物では、電荷整列の融解を利用して同じ非線形が実現



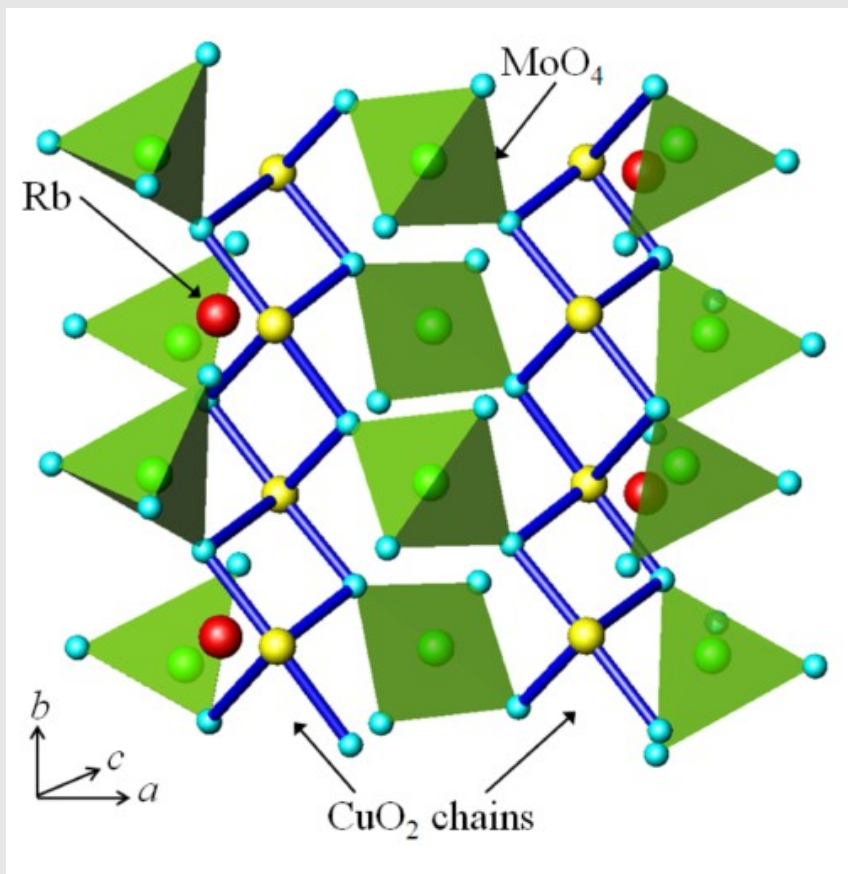
# 有機インバータ



Sawano, Terasaki et al. Nature 437 (2005) 522



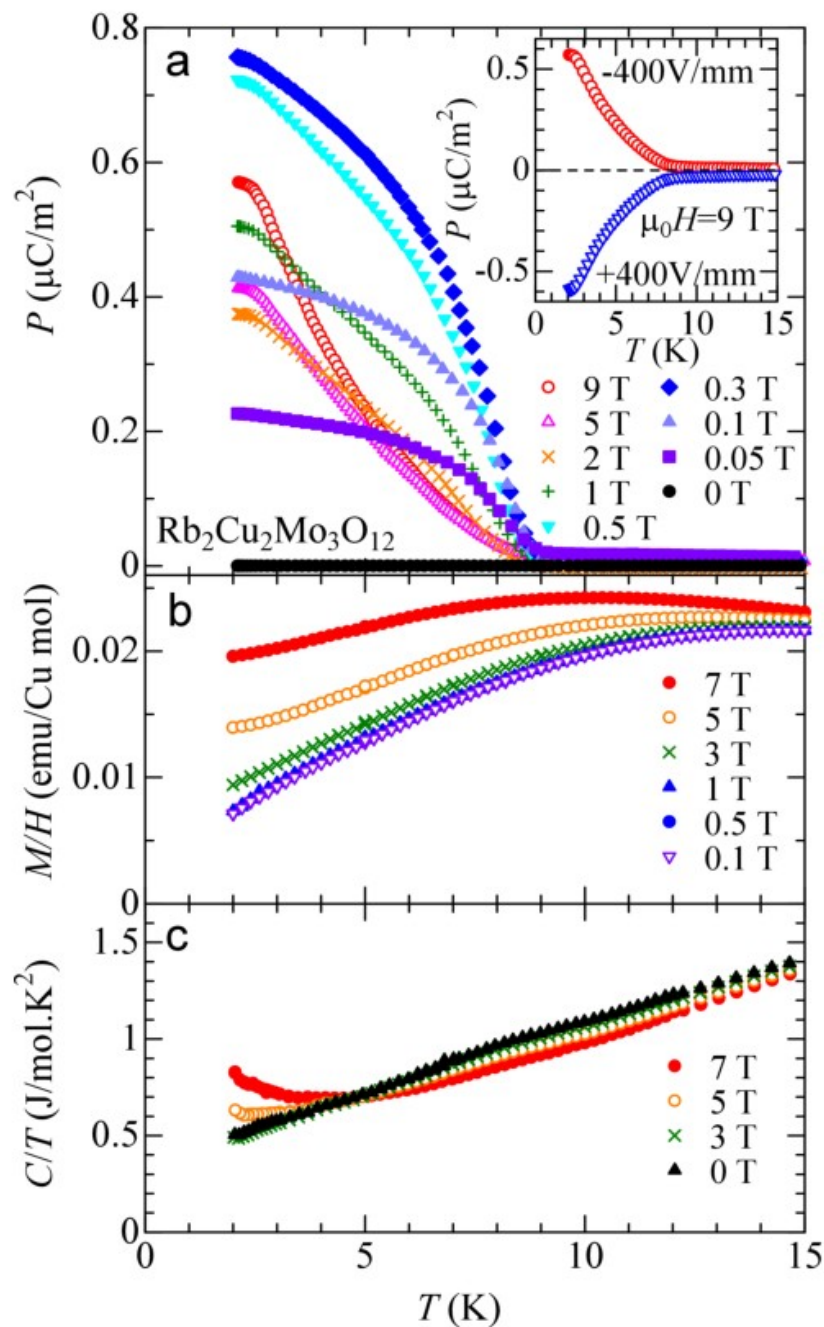
# 磁場で生じる強誘電



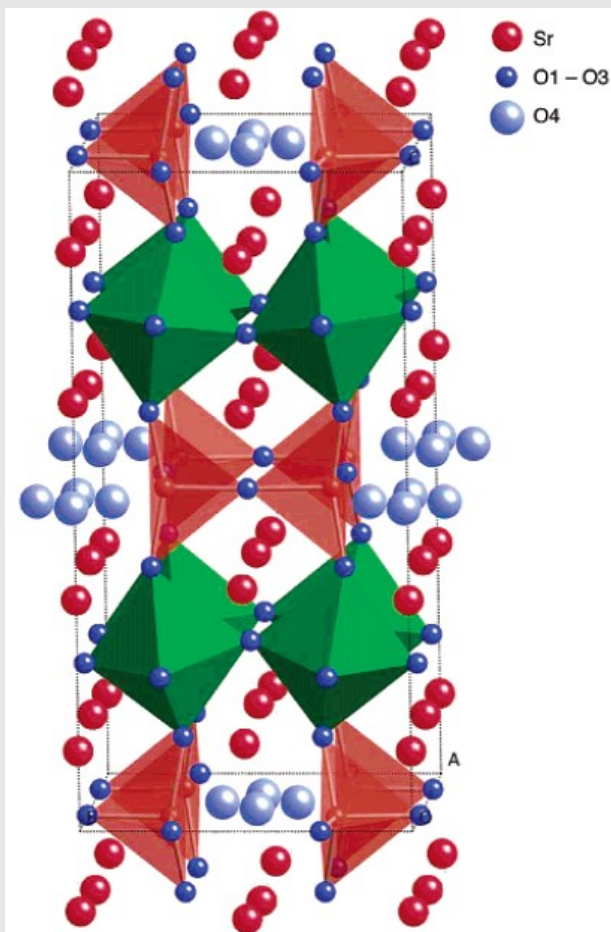
0.05T の磁場で、物質が強誘電性を示す

普通は...

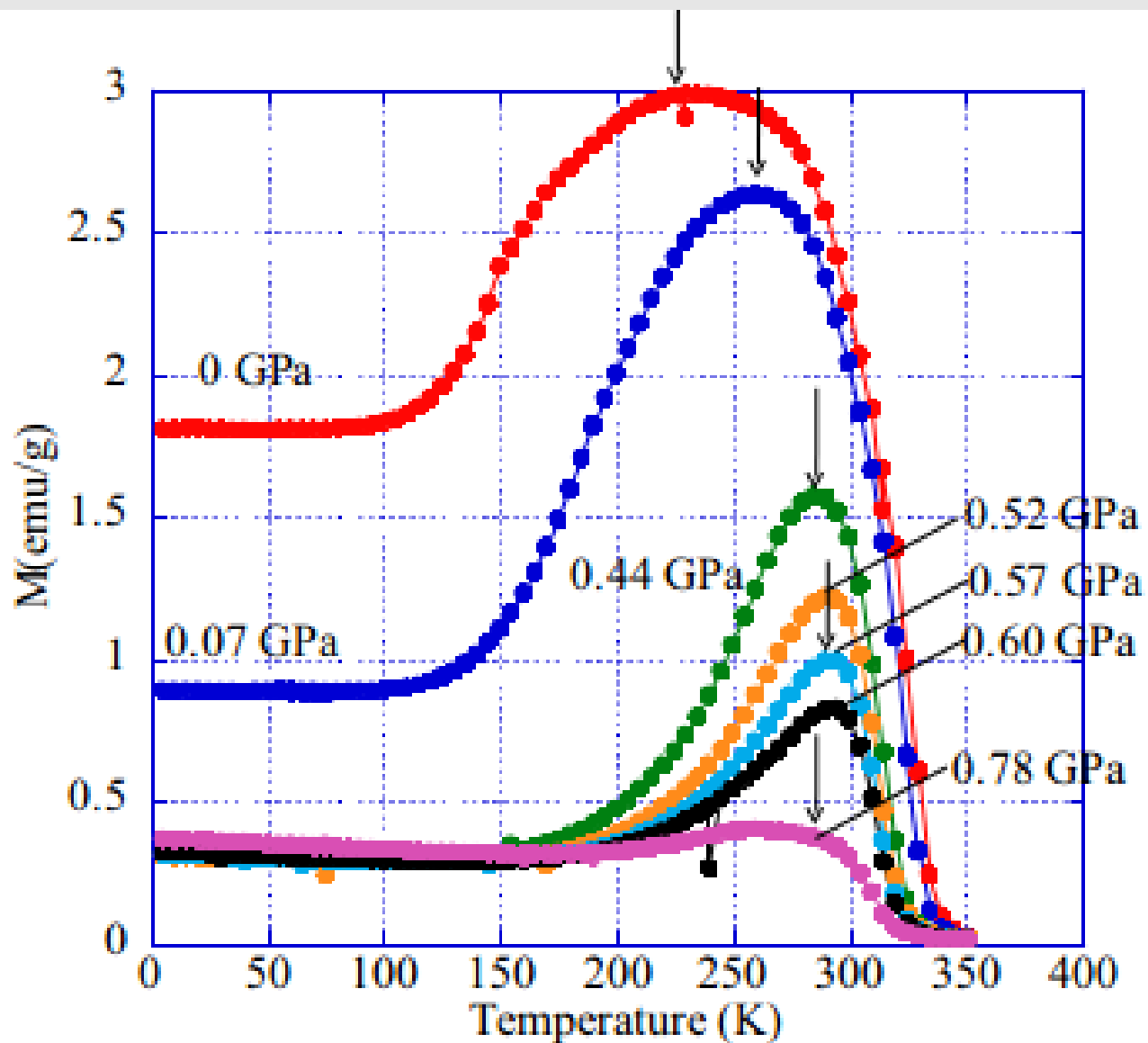
電場 → 分極  
磁場 → 磁化(磁気分極)



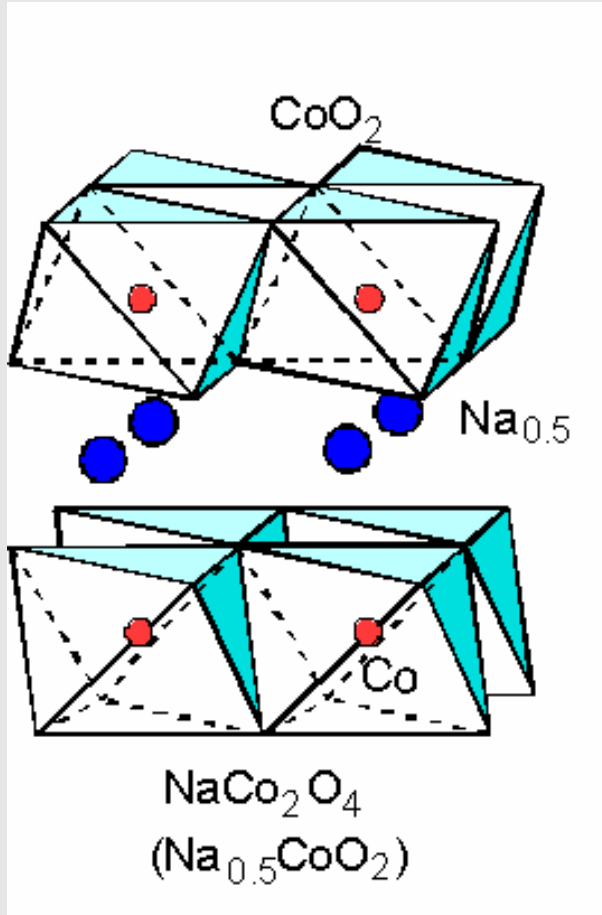
# わずか 0.1% の体積変化で変化する強磁性



固体にとっては 0.1 GPa はゴミのような圧力、でもこの物質の強磁性が壊れる

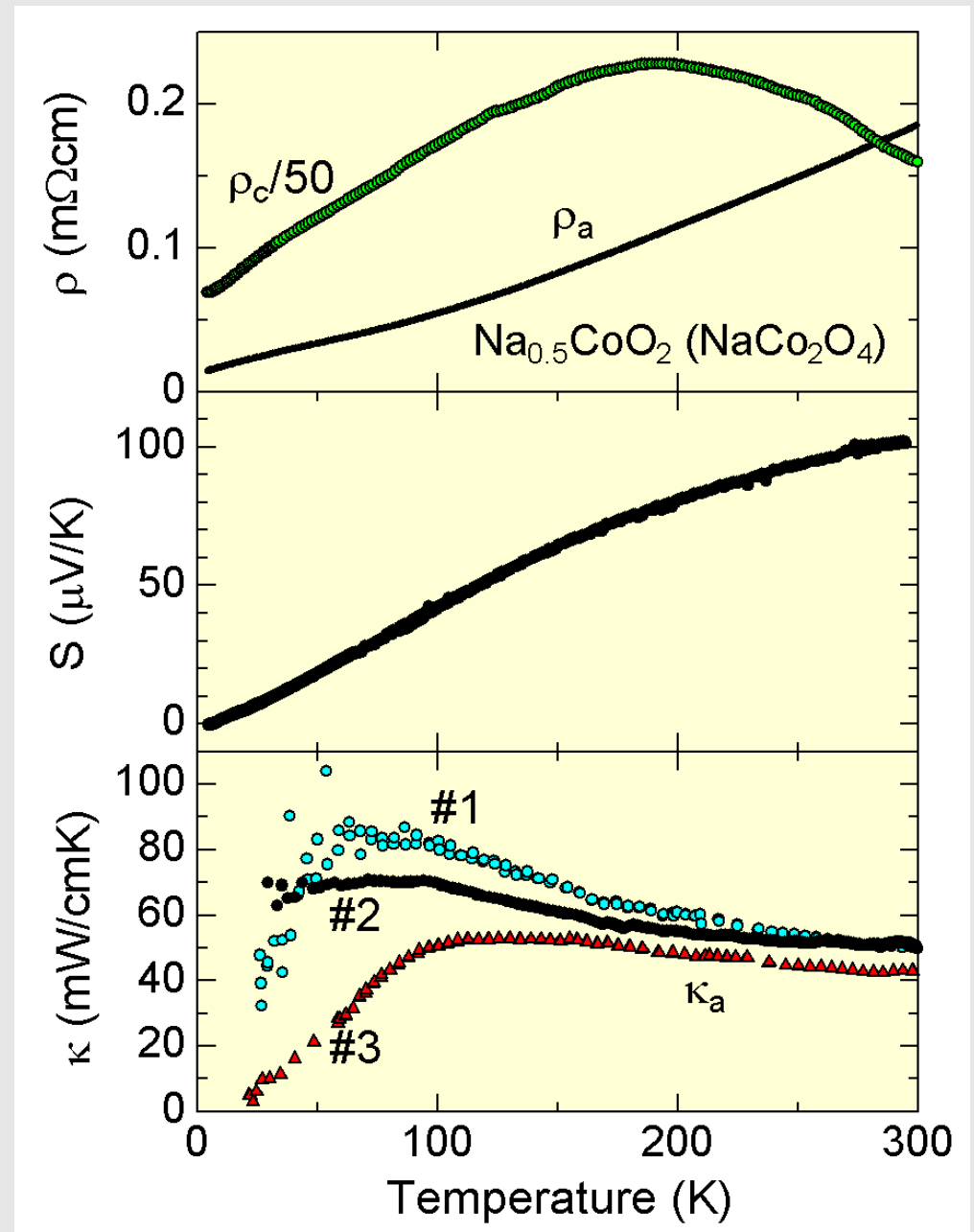


# 熱電酸化物 $\text{Na}_x\text{CoO}_2$



Terasaki et al. : Phys. Rev. B56  
(1997) R12685

Satake et al.: J. Appl. Phys. 96  
(2004) 931





# 2010年 酸化物熱電素子、販売開始!

ベンチャー会社 TES ニューエナジー社 設立

## 発電鍋ヒートチャージャーHC-5

熱を直接、電気に変えます。  
世界初! お湯を沸かしながらUSB充電

### 緊急時の携帯電話充電に



価格

¥9,975円 税込み価格  
(税抜き ¥9,500円)



[http://tes-ne.com/Japanese/01\\_home.html](http://tes-ne.com/Japanese/01_home.html)

## 物質科学の魅力

- 至る所にあるフロンティア
- 多くなると何かが変わる  
→ ミクロとマクロの架け橋
- 他の物理分野と隣接  
物質の中の宇宙論  
ナノ力学と生物
- 多様な世界の普遍性  
流れで溶ける氷  
磁場で溶ける磁束格子  
電流で溶ける電荷秩序
- 面白くて役に立つ  
物質の物理学

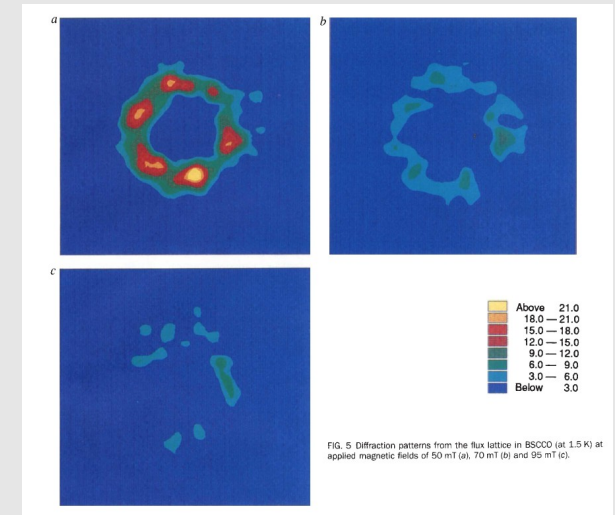
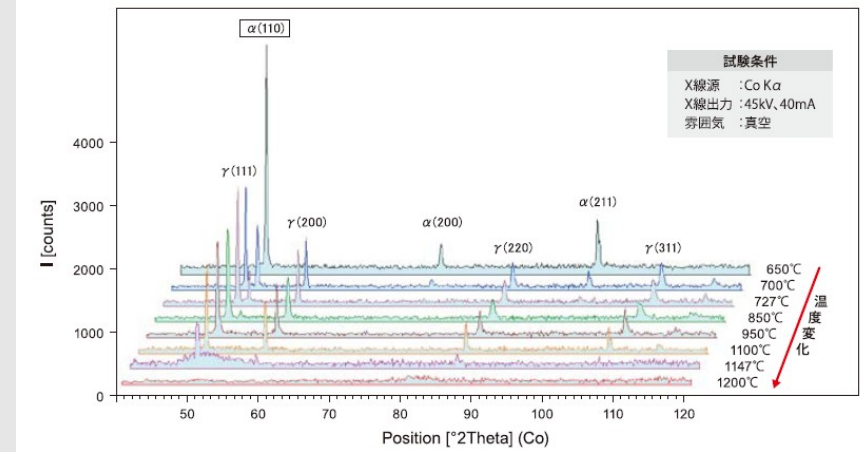
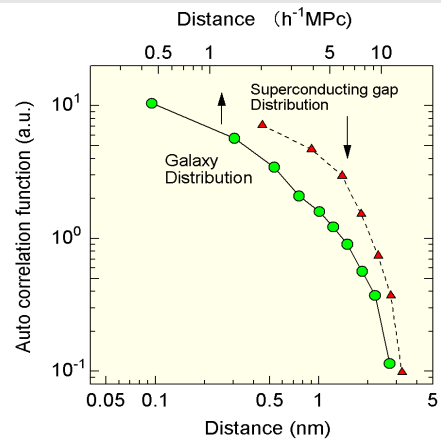


FIG. 5 Diffraction patterns from the flux lattice in BSCCO (at 1.5 K) at applied magnetic fields of 50 mT (a), 70 mT (b) and 95 mT (c).

