

# 電流が溶かす電子の氷 多くなると何かが変わる

名古屋大学理学部物理学科  
寺崎一郎

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; supermassive 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
- 硬い柔らかい、電気を流す流さない、磁石になるならない、は何で決まるのか

# 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  
ーマツハー氏が  
唱えたところ、環境保護に  
関心を持つ人の間で「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  
イア・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  
したものであった▼数が増  
えると変わるのは、物質  
に限ったことではなかる  
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)

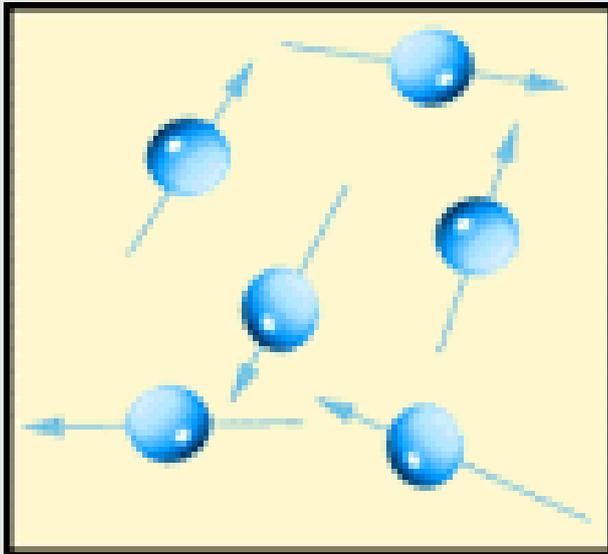
## ▶ 私たちは, 物質の機能のすべてを予言できていない。

- 物質の物理学には至る所に知のフロンティアがある

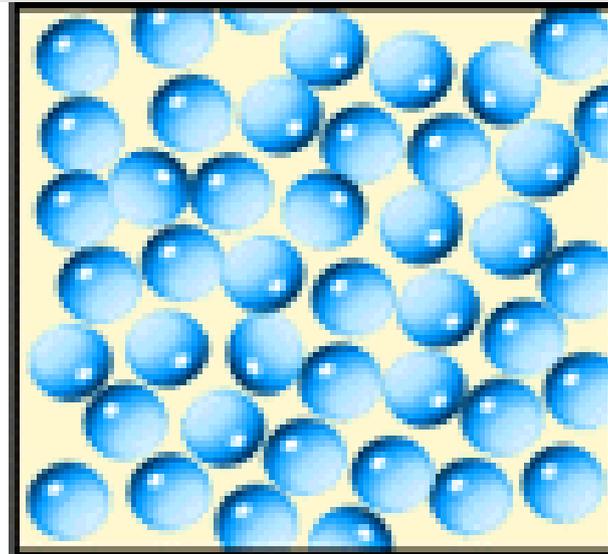
# 過去 25 年のノーベル物理学賞

- ▶ 1985 量子ホール効果
  - ▶ 1986 電子顕微鏡と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
  - ▶ 2000 半導体 LSI
  - ▶ 2001 原子ガスのボーズ-アインシュタイン凝縮
  - ▶ 2003 超伝導の理論
  - ▶ 2005 量子光学
  - ▶ 2007 巨大磁気抵抗
  - ▶ 2009 光通信
- これ以外に化学賞をも  
らった物理学者もいる

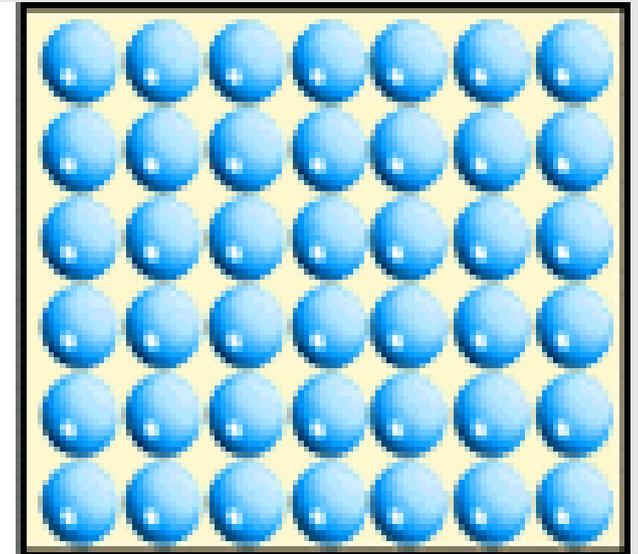
# 物質の三態



気体



液体

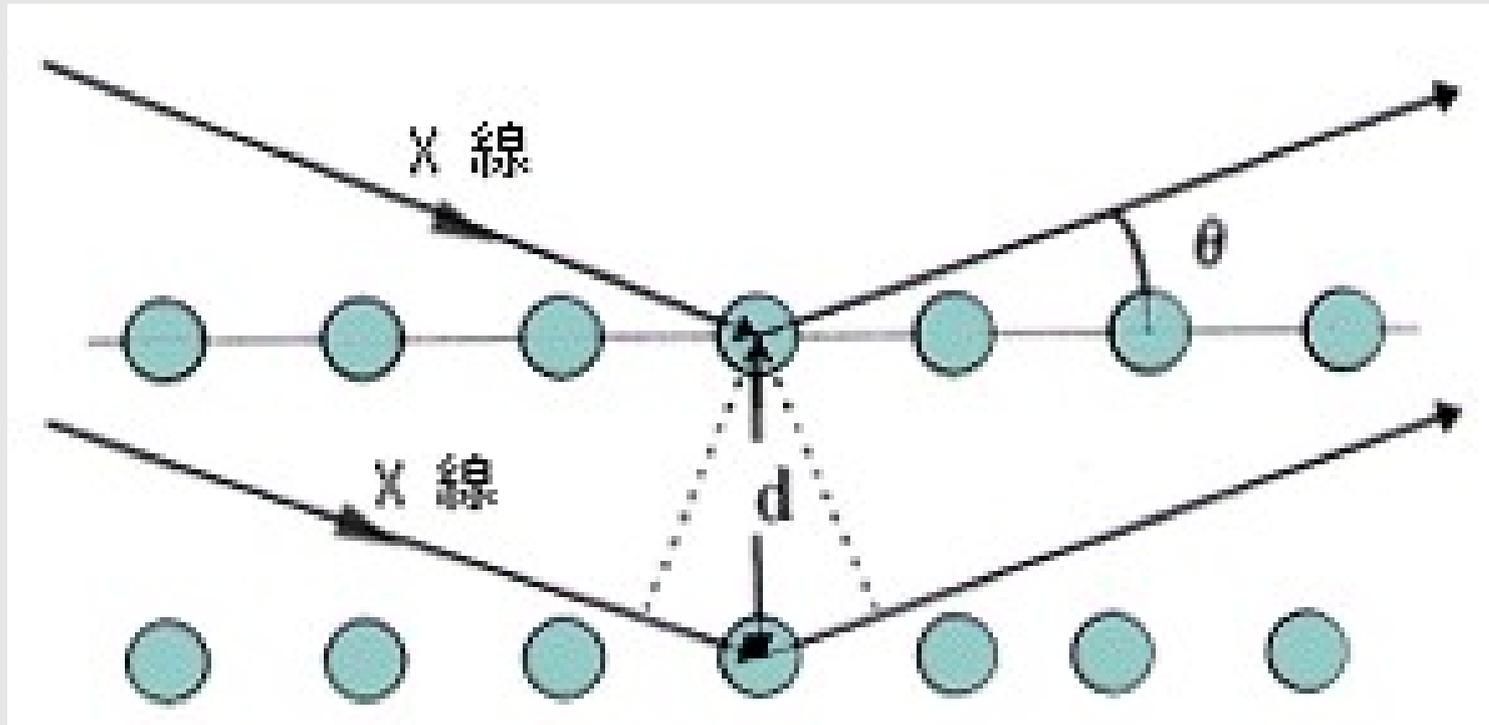


固体・結晶

液体と結晶の違いは？

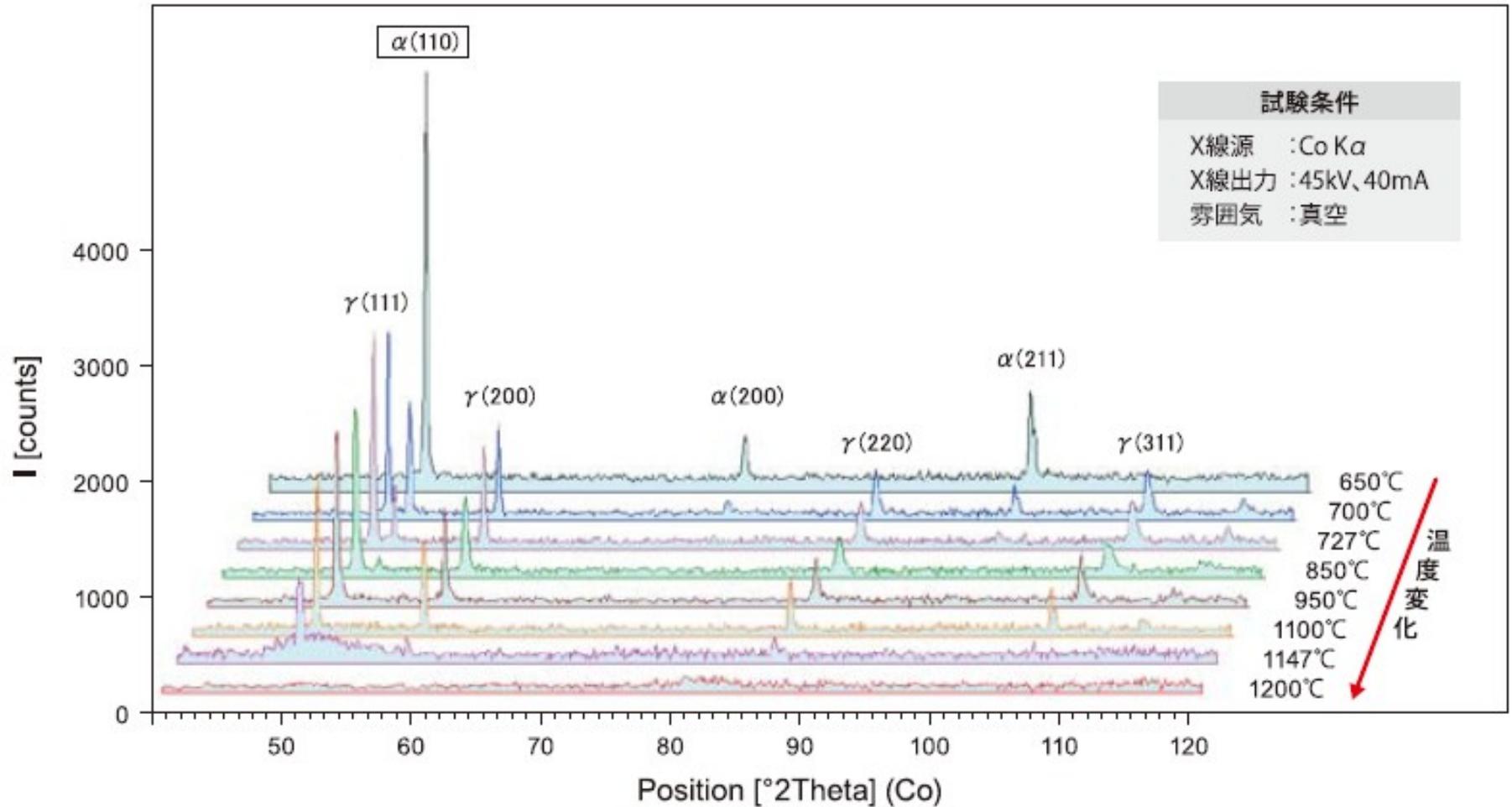
→ 原子が規則正しく並んでいるかどうかの違い

# X線・粒子線回折 — 周期性を探る武器



X線は、原子と原子の間の距離と同じくらいの波長をもった電磁波なので、結晶は回折格子のように振る舞い、特別な角度で回折する

# 液体から固体になると



川崎テクノロジー株式会社 Web サイト

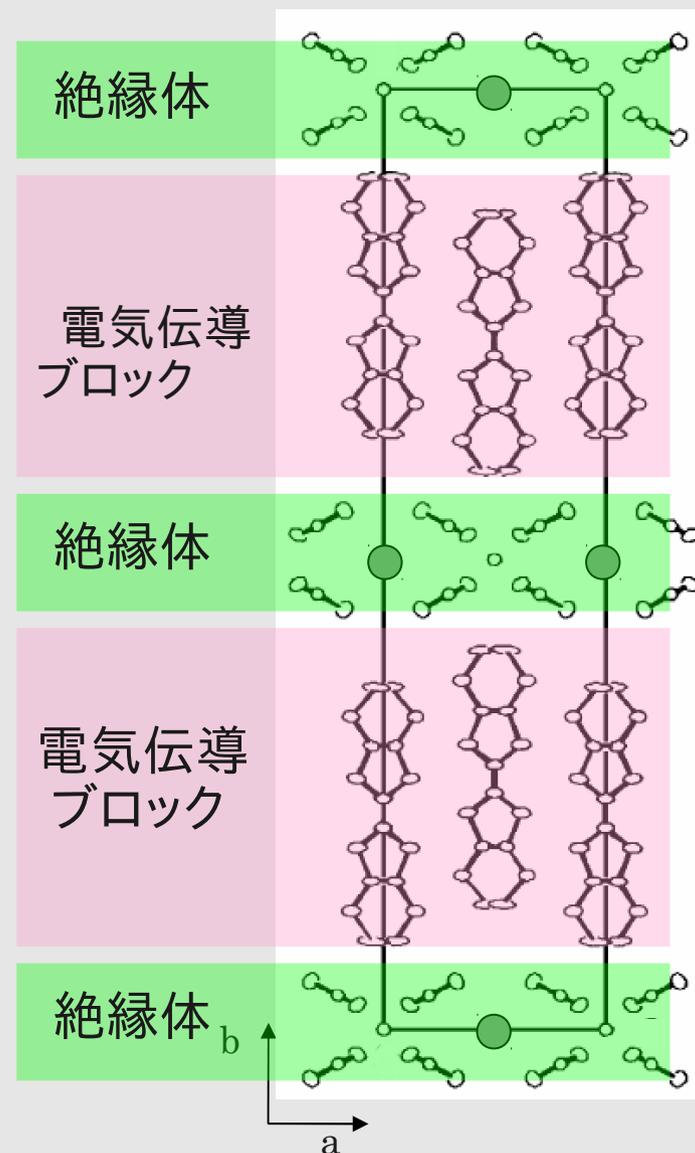
鉄が液体になると、X線回折でピークが消える  
→ ピークのあるなしで液体か固体かが区別できる

# 有機サイリスタ



層状の伝導面を持った有機物質  
有機物の層を電気が流れる

強相関電子系と呼ばれる、電子どうしの相互作用が強い物質



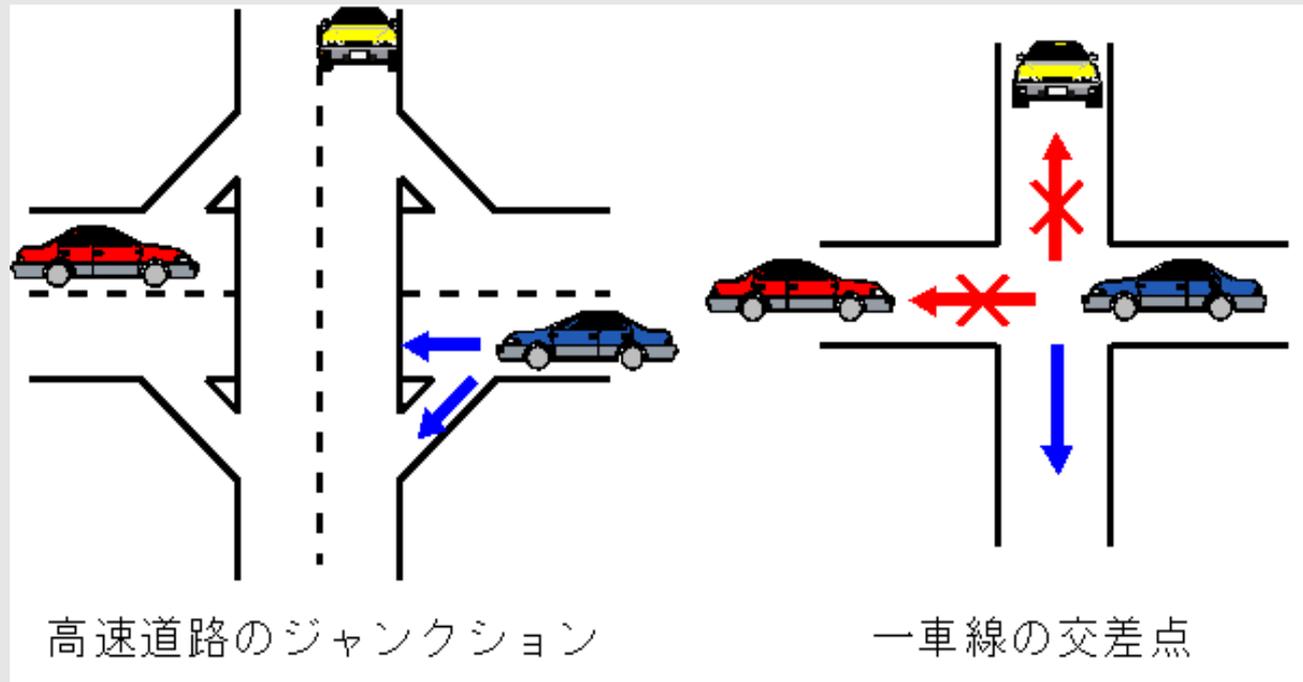
## 車 (= 電子) と交差点 (= 格子点) の問題

高速道路

- 他の車と衝突しない
- 車 1 台の問題

一車線

- 他の車の位置が問題
- 車全部が問題
- 車同士が相関している



## 小さな喫茶店

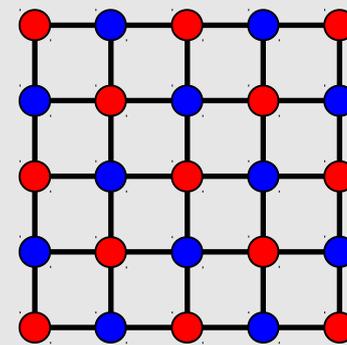
- 2人がけのテーブル 10 セットに，一人ずつの客が 10 人（空席 10 席）
- 11 番目の客は座りにくい
- 相席の斥力

# 電子の氷： 電荷秩序 / 電荷整列

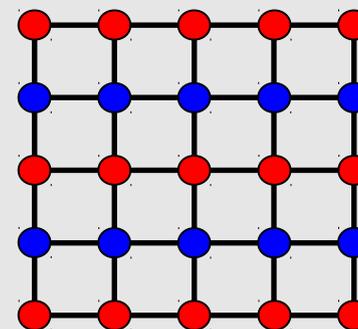
この有機分子の上には、分子 2 個あたり 1 個の電子がいる

この電子は、互いにさけあいながら等間隔にならぼうとして、低温で動けなくなる (凍る)

右の図を結晶の中の分子の位置だと思つと、赤と青で塗り分けるようなパターンで電子が凍る (たとえば、赤は電子がいるところ、青が電子のいないところ)

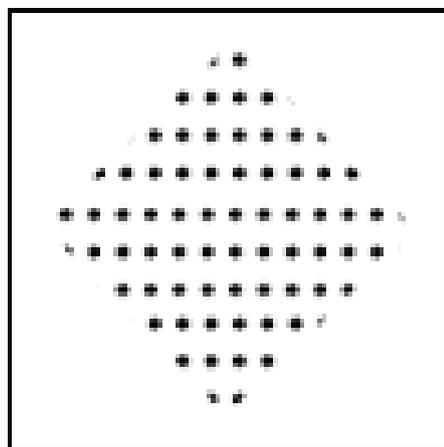
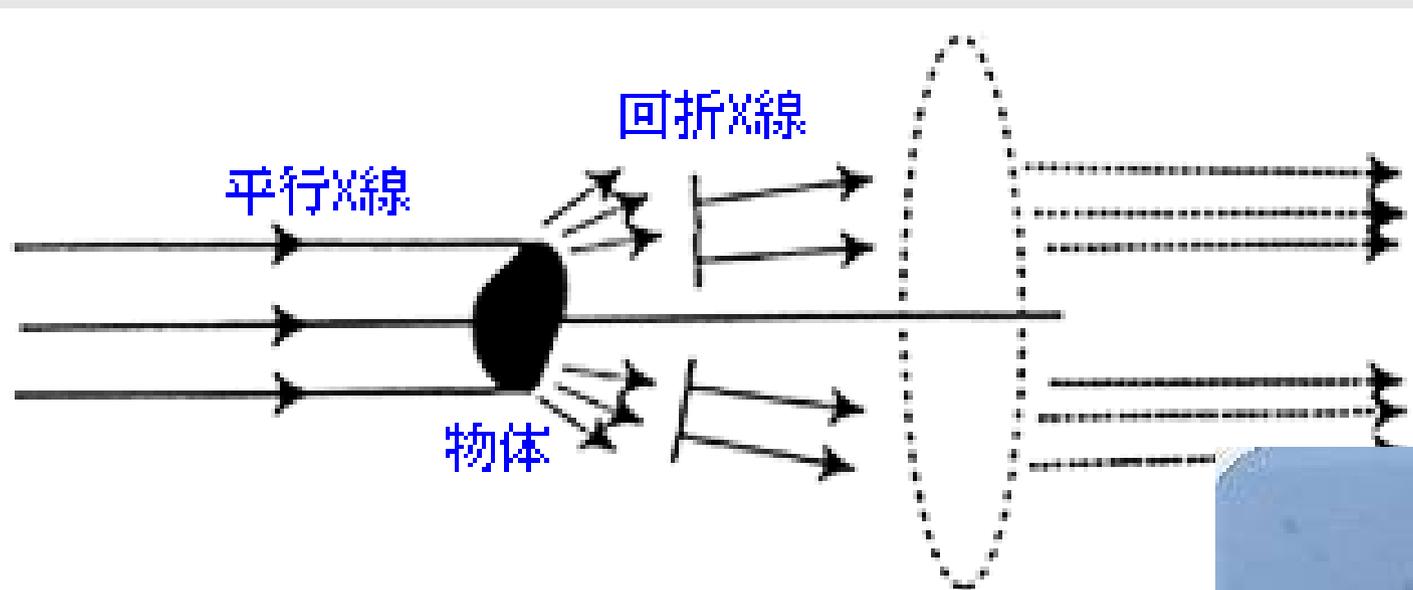


チェッカーボード型



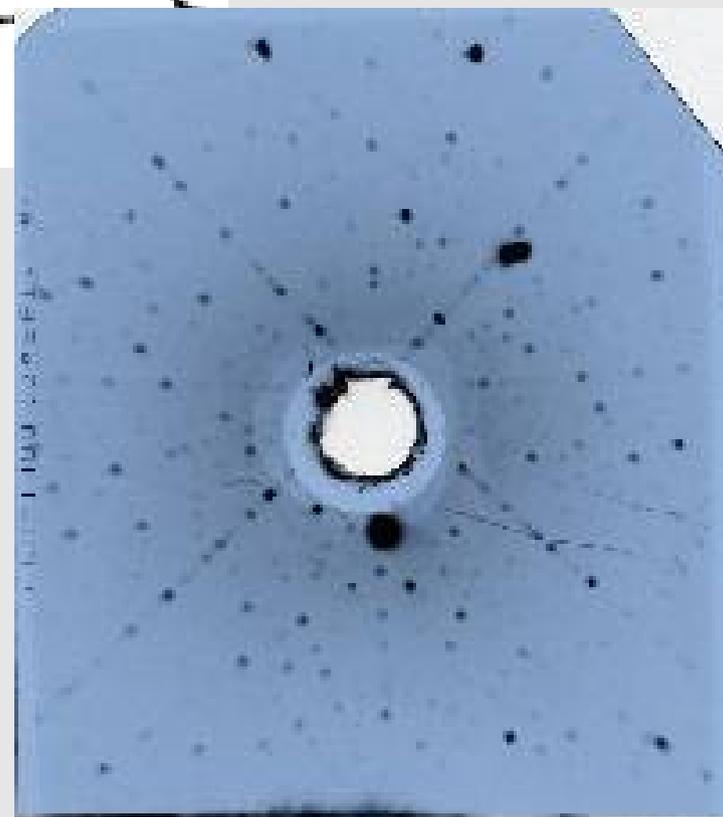
ストライプ型

# 単結晶の X 線回折



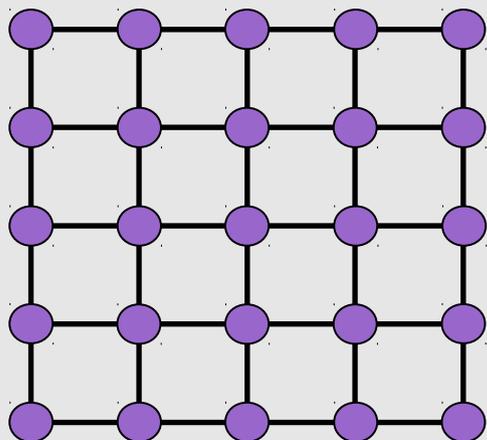
回折像

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

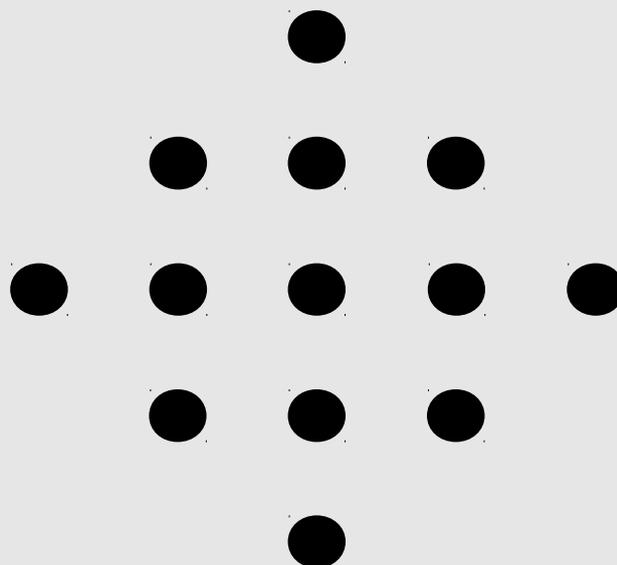


# 電子の氷は X 線ではどう見えるか

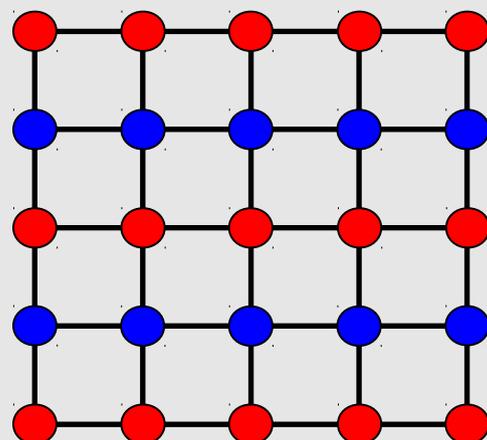
電子の  
液体



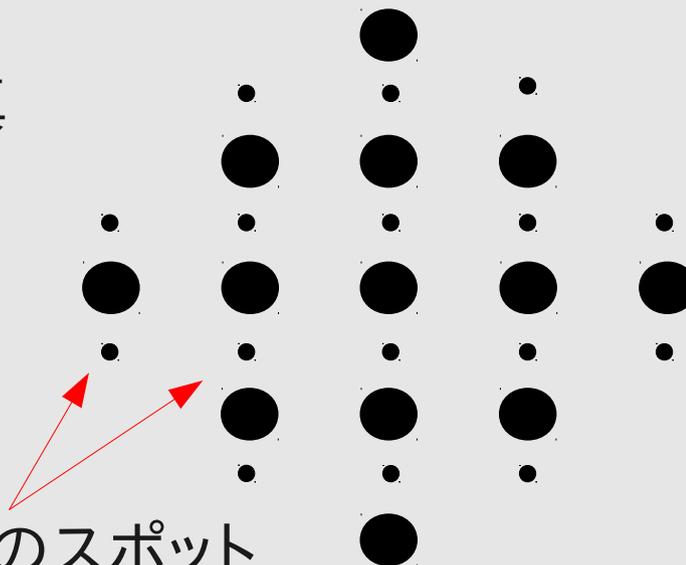
X 線写真



電子の  
氷

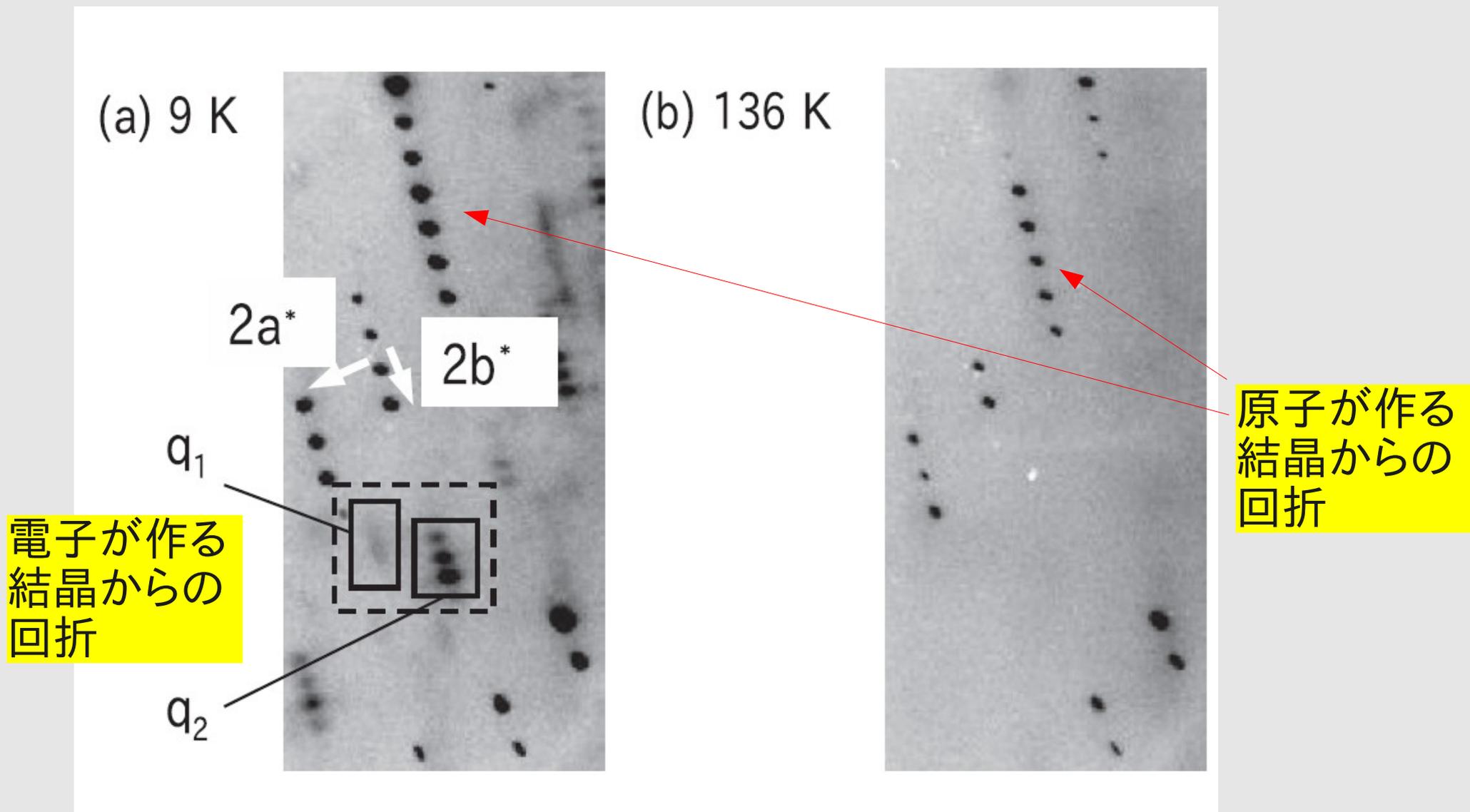


X 線写真



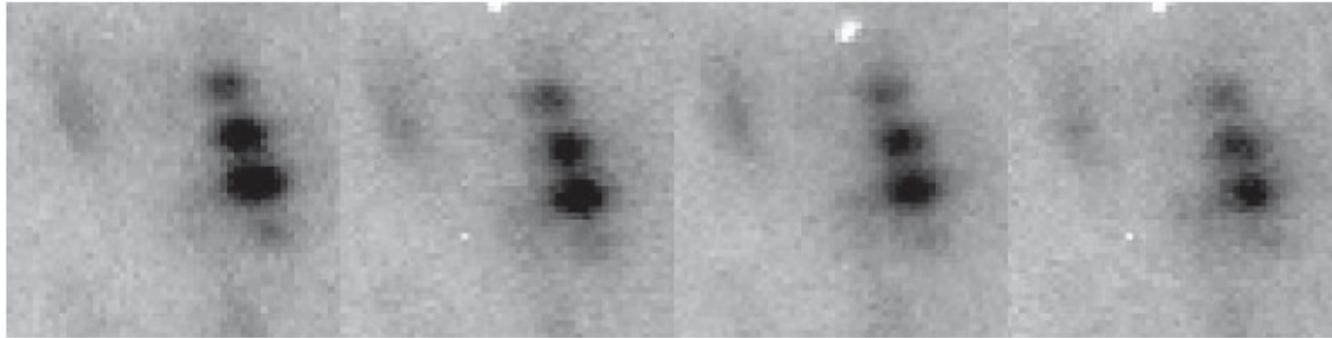
電子の氷のスポット

# 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

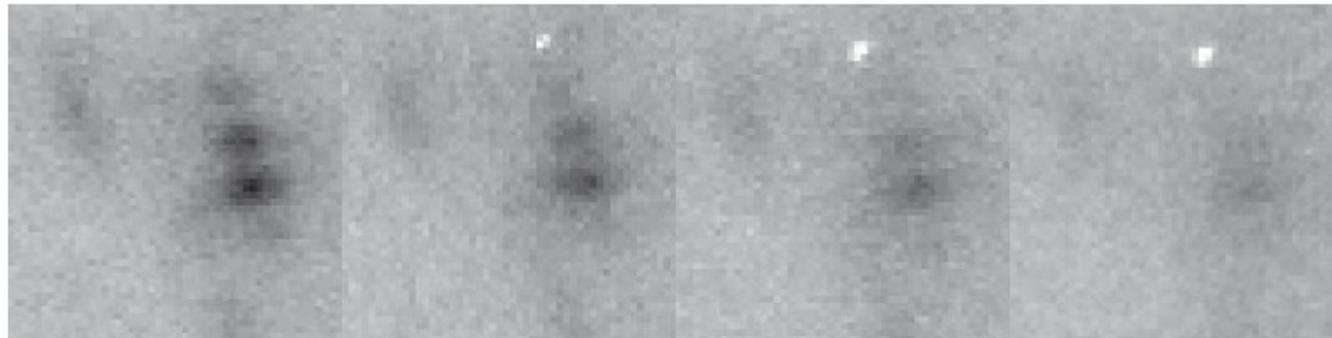


9K

13K

17K

22K



32K

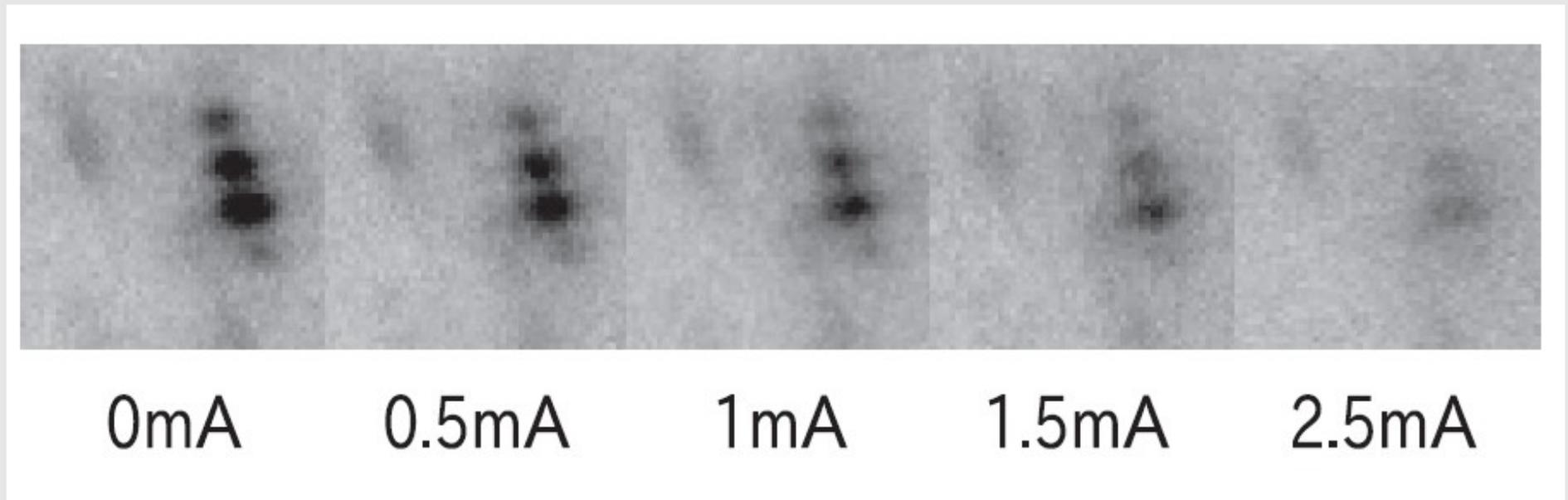
42K

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...



# 電流で溶ける電子の氷は役に立つ

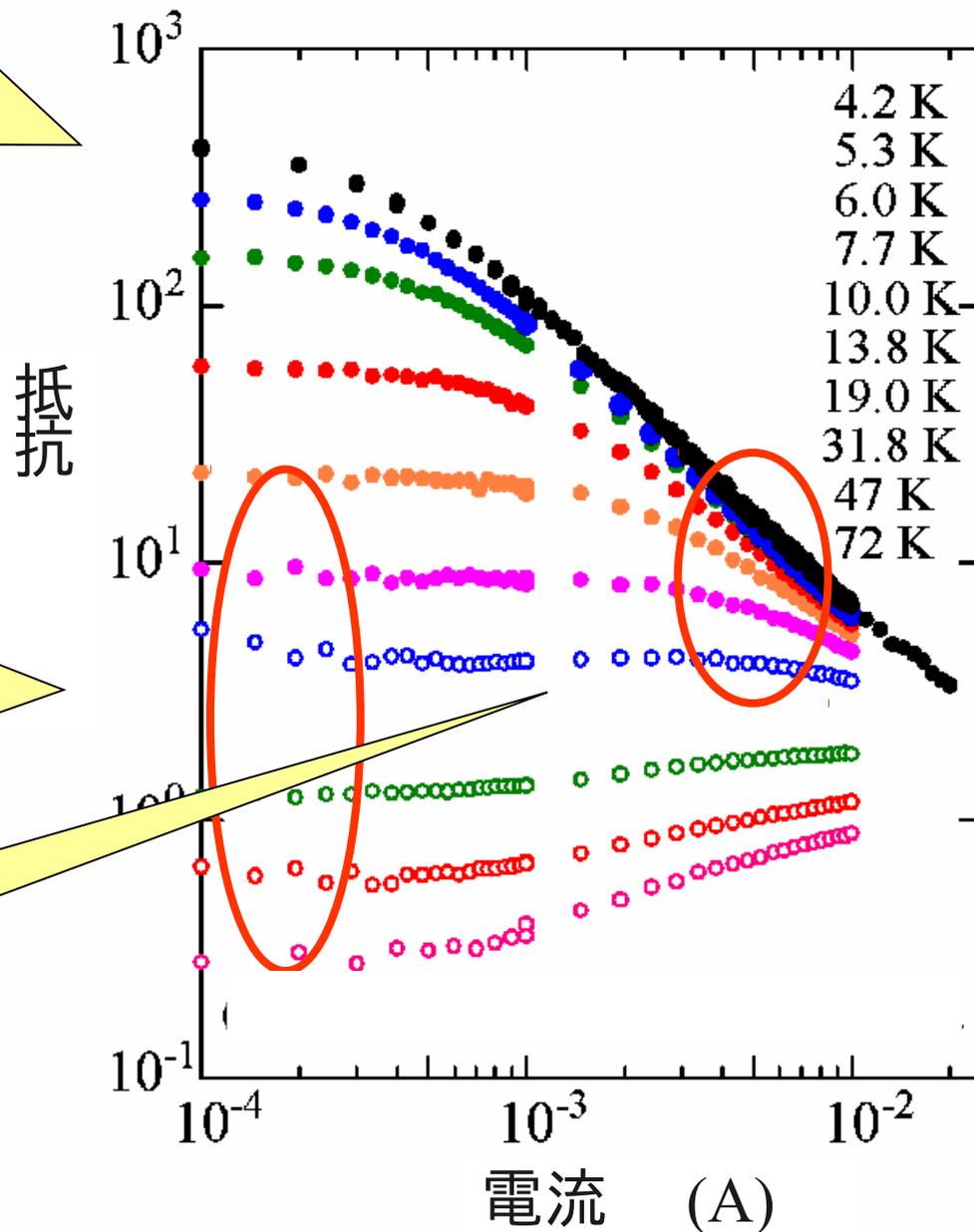
抵抗が高い状態

- 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!



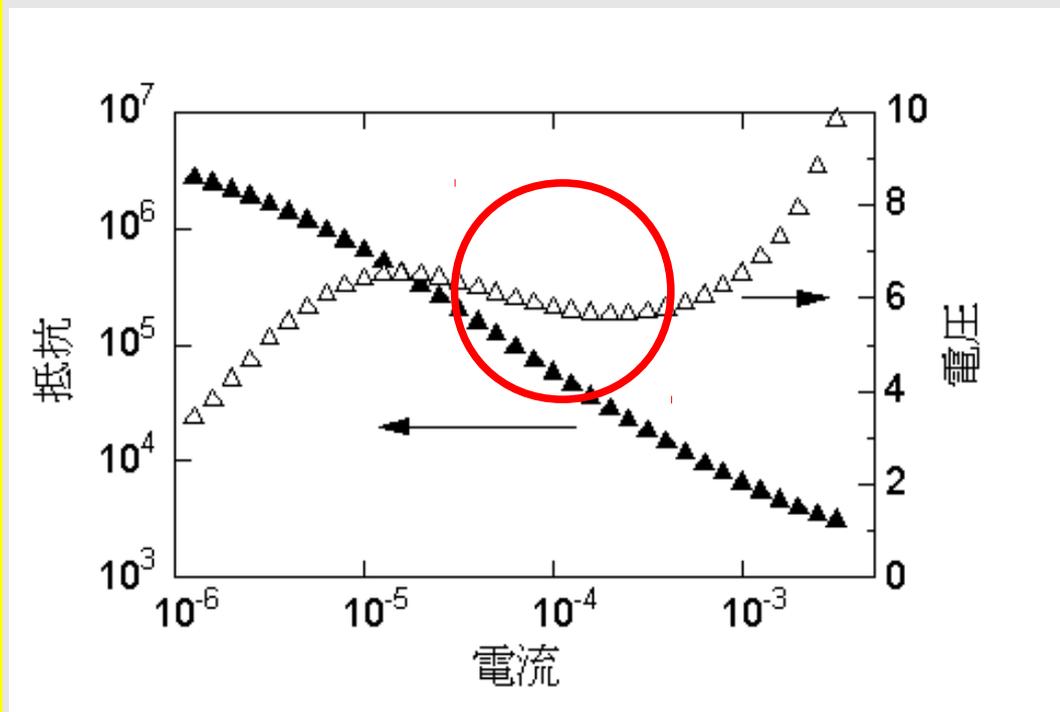
# オームの法則に従わない抵抗

電圧 = 抵抗 × 電流

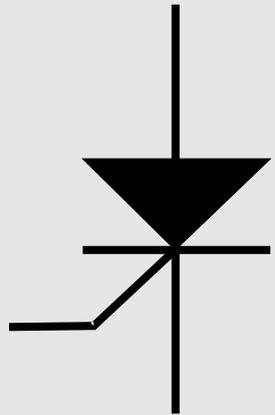
$$V = R I$$

いま、 $R$  が  $I$  の関数で、 $I$  とともに急速に下がるで、 $V$  は  $I$  と比例しない。

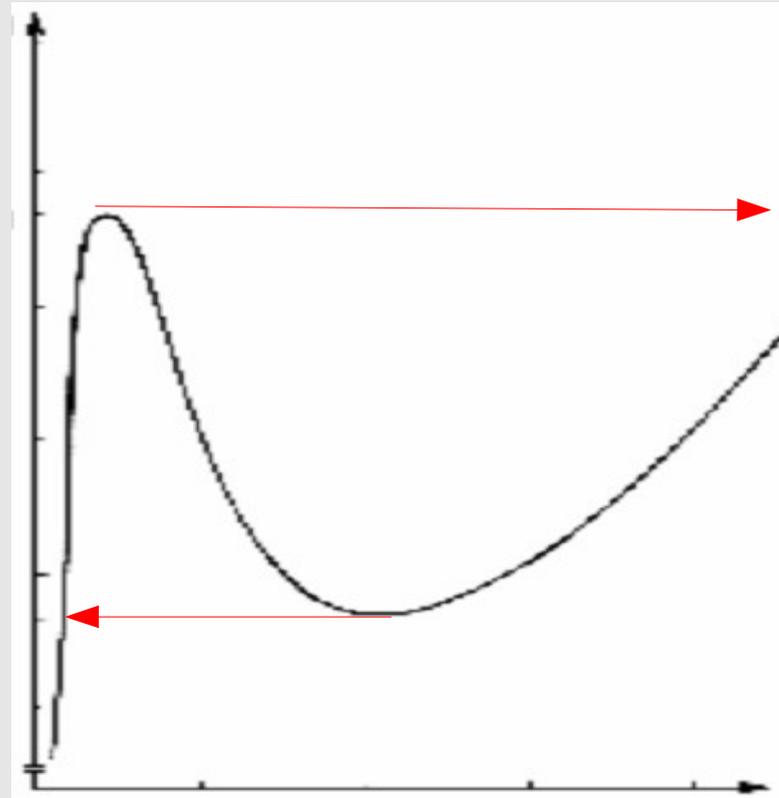
抵抗が電流とともに小さくなるのが激しいと、電流を増やしても電圧は下がる。



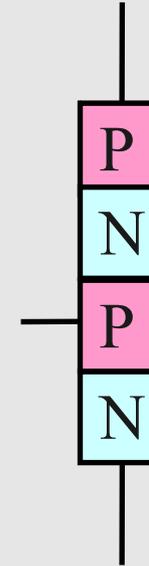
# 電流－電圧特性はサイリスタと同じ



電圧



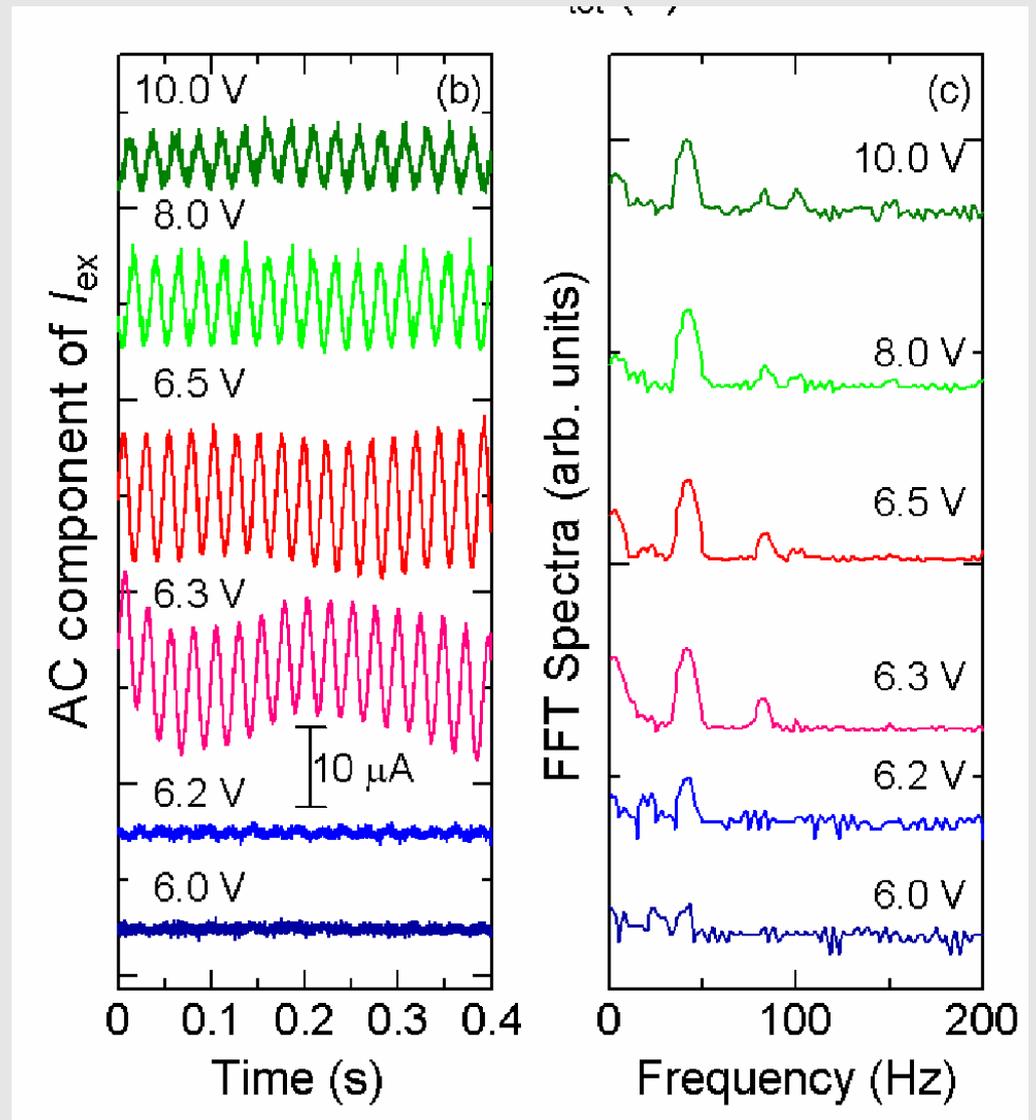
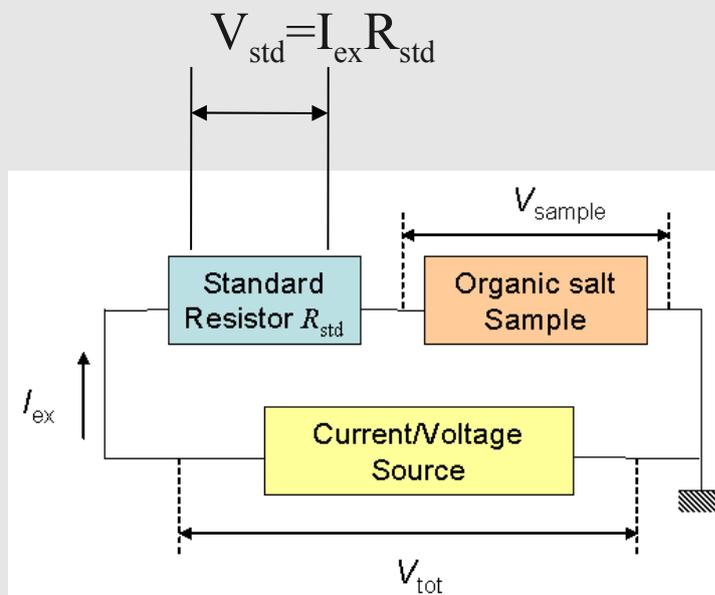
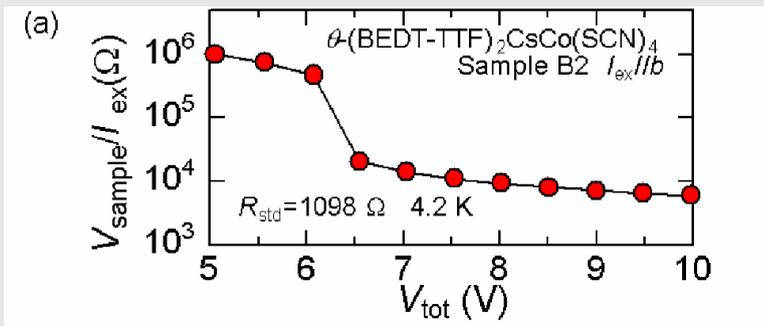
電流



2つの安定な電圧値をもっているので、  
スイッチや発振回路に使う半導体素子

半導体を微細加工で作るが、有機サイリスタは、単  
結晶試料が半導体素子のように振る舞う。

# 有機インバータ



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

▶ X線回折の強度分布から、電子の氷のサイズがわかる  
数ナノメートルくらいの大きさ  
自然が自己組織化して見せるナノテク

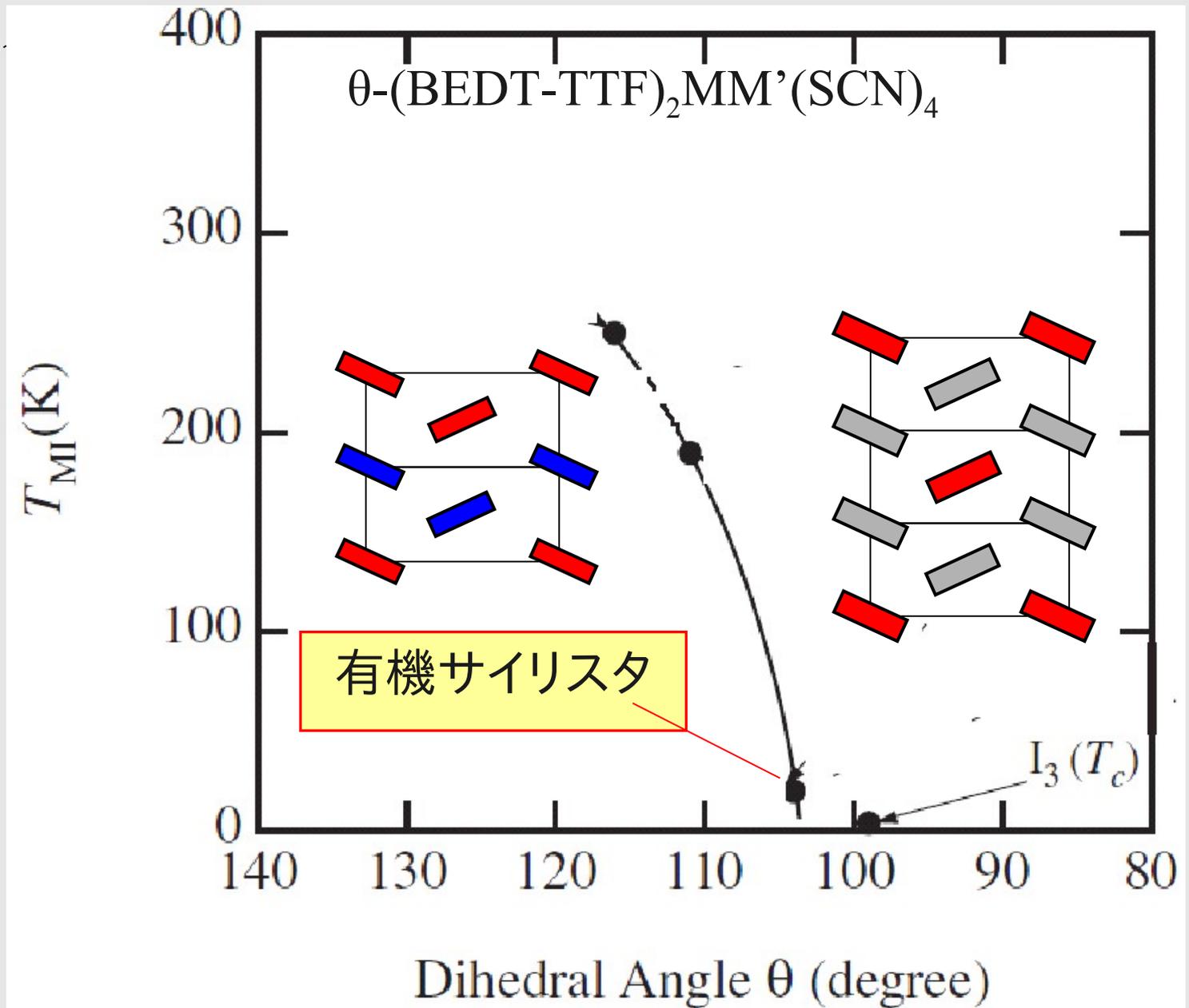
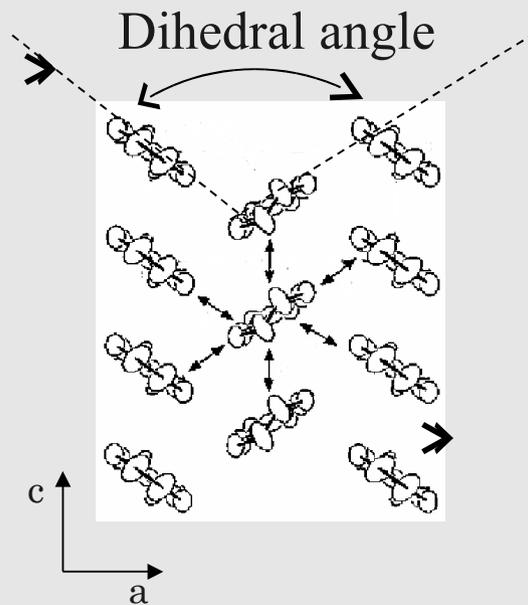
## ▶ 圧倒的に低い動作電圧

- 電流による電荷秩序の融解がポイント  
10 A/cm<sup>2</sup>, 5 V/cm 程度
- 電荷秩序の大きさはナノサイズ (10 nm)  
→ 電圧降下 (動作電圧は)  $5 \times 10^{-6}$  V
- 半導体の動作電圧はどんなに小さくなくても 0.1-1 V

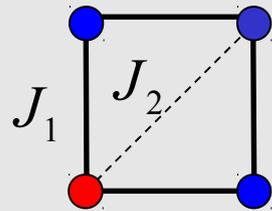
## ▶ 高い集積率

- 微細加工せずにナノサイズが実現

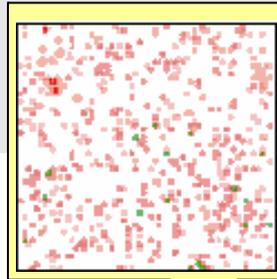
# 有機サイリスタでは 2 種類の電子の氷がある



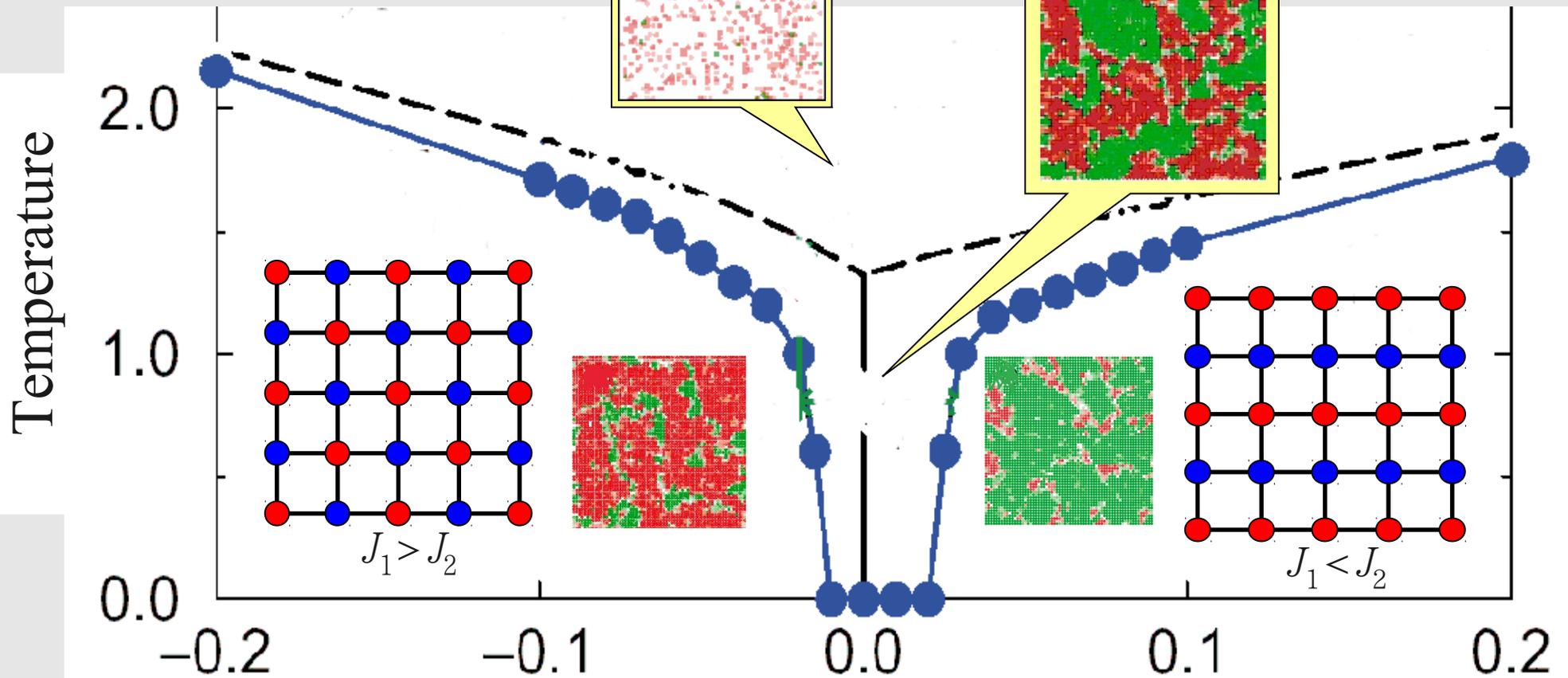
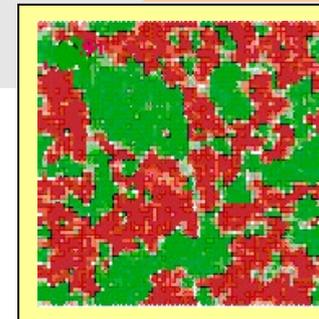
# 共存する2つの氷は、氷でも水でもない



ほとんど水



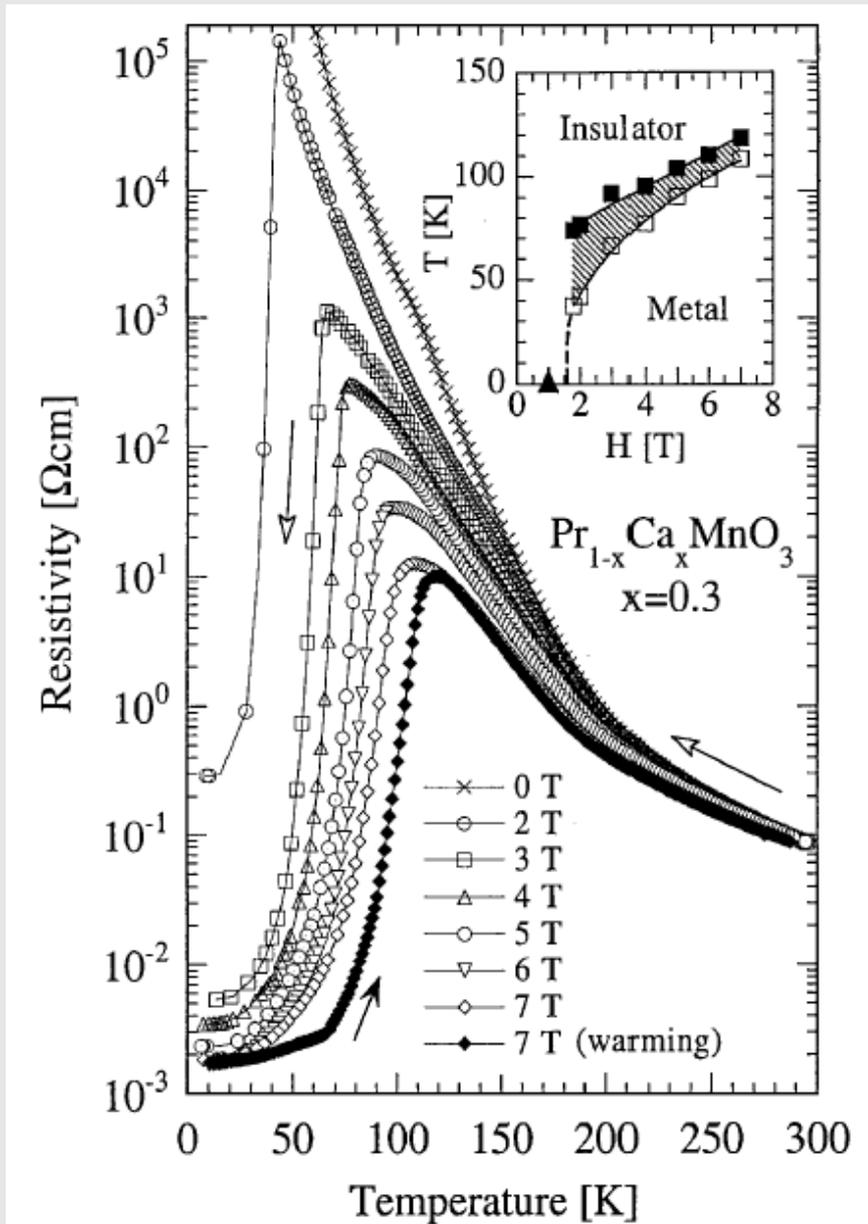
赤い氷と緑の氷  
が半々で凍る



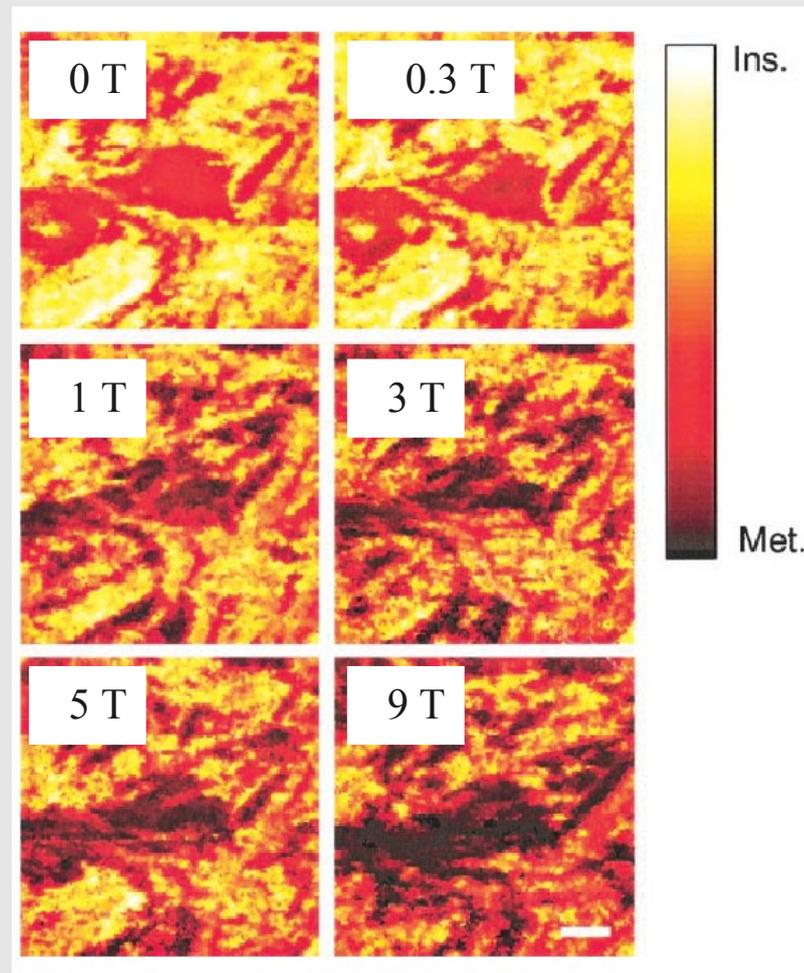
Burgy et al. : PRL87(2001)277202

$$J_2 - J_c$$

# 磁場で抵抗が 1 億倍変わる物質



Phys. Rep. 344 (2001) 1



電気の流れる部分 (Met) と流れない部分 (Ins) が共存し、磁場によって度合いが変わる

# 共存する氷は役に立つ

物質	銅酸化物	Mn 酸化物	Mg/Nb 酸化物
不均一構造	超伝導体 と絶縁体	強磁性金属 と絶縁体	強誘電体 と常誘電体
巨大応答	高温超伝導	巨大磁気抵抗	巨大誘電率
機能の応用	リニアなど	HDD ヘッド	コンデンサ

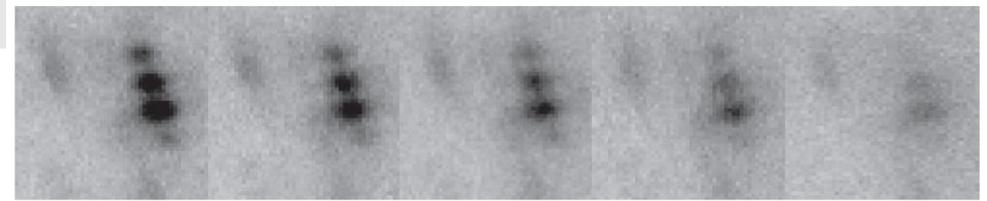
物質	Co 酸化物	<b>有機導体</b>
不均一構造	スピン密度波と電荷秩序	<b>異なる波数の電荷秩序</b>
巨大応答	巨大熱起電力	<b>巨大非線形伝導</b>
機能の応用	熱電発電素子	<b>有機エレクトロニクス?</b>

寺崎：  
応用物理学会誌  
74(2005)3

# まとめ

## 物質科学の魅力

- 多くなると何かが変わる  
→ミクロとマクロの架け橋
- 電流で融ける電子の氷で、流れる水が凍らない理由がわかる(かもしれない)
- 電子の氷を融かすと、試料の抵抗を1000倍変えられる  
→ インバータになる有機物
- 面白くて役に立つ  
物質の物理学を目指して



0mA    0.5mA    1mA    1.5mA    2.5mA

