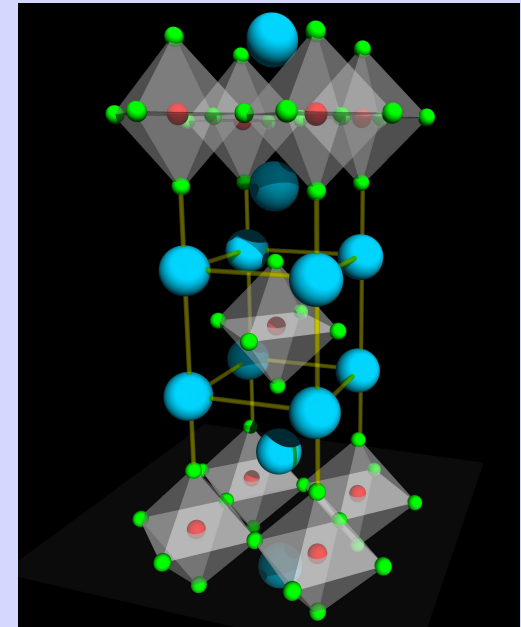


超伝導の不思議

京都大学
国際融合創造センター
・ 理学研究科（物理）

前野 悦輝



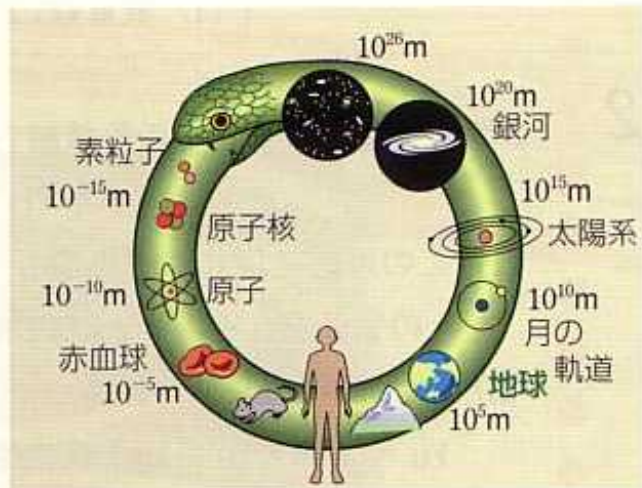
1. 物理学の多様性と普遍性の探求：

「全能の理論」か 「多は異なり」か

2. 超伝導現象の不思議

3. 質的に新しい超伝導状態の探求：**スピン三重項超伝導**

現在の物質観 (素粒子？の表)



④図48 ウロボロスの蛇 さまざまなスケールの事象が、おたがいの関連の中で描かれ、ミクロの世界の研究と銀河や宇宙という大きなスケールの世界の研究がつながっていることを示している。

高等学校教科書
物理II (数研出版)



④図44 自然の階層性

陽子と
中性子

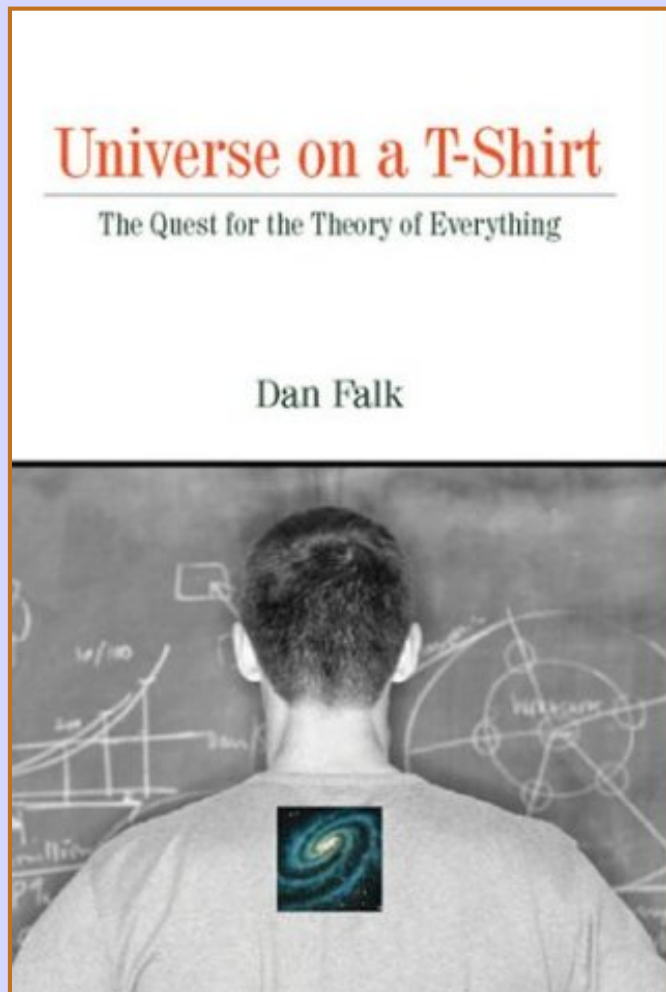
素粒子にきれいな色がついているわけではありません。
素粒子は点として描くか、さもなければ輪ゴムのよう描くべきでしょう。

ハドロン(クォークからなる粒子)

バリオン(重粒子)	中間子	
例: 陽子 uが2つ dが1つ	例: π^+ 中間子 uが1つ \bar{d} が1つ (\bar{d} はdの反粒子)	
 u(アップ)	 c(チャーム)	 t(トップ)
 d(ダウン)	 s(ストレンジ)	 b(ボトム)
クォーク		
 e ⁻ (電子)	 μ^- (ミュー粒子)	 τ^- (タウ粒子)
 ν_e (電子ニュートリノ)	 ν_μ (ミューニュートリノ)	 ν_τ (タウニュートリノ)
レプトン		
 光子 (重粒子)	 W ⁺	 W ⁻
	 Z ⁰	 グルーオン
ゲージ粒子		

クォーク・レプトン・ゲージ粒子は単独で取り出すことはできません。バリオンや中間子の状態で存在する。重力子(グラビトン)は発見されていない。

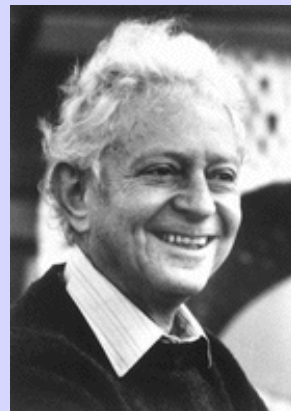
The Theory of Everything 全能の理論



"My ambition is to live to see all of physics **reduced** to a formula so elegant and simple that it will fit easily on the front of a T-shirt."

還元

LEON LEDERMAN



「ニュートリノビーム法、およびミューニュートリノの発見によるレプトンの二重構造の実証」

1988 ノーベル物理学賞

出所 http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1988/lederman-facts.html

More is Different

P.W. Anderson (Princeton University)

1977 ノーベル物理学賞 「磁性体と無秩序系の電子構造の研究」

1953年、29歳のとき京都理論物理学国際会議（久保亮五教授主催）に参加



2002年12月11日

*The theory of everything
or
More is different*

「全能の理論」か
「多は異なり」か

More Is Different

Broken symmetry and the nature of the hierarchical structure of science.

P. W. Anderson

The reductionist hypothesis may still be a topic for controversy among phi-

planation of phenomena in terms of known fundamental laws. As always, distinctions of this kind are not unambiguous

less relevance they seem to have to the very real problems of the rest of science, much less to those of society.

The constructionist hypothesis breaks down when confronted with the twin difficulties of scale and complexity. The behavior of large and complex aggregates of elementary particles, it turns out, is not to be understood in terms of a simple extrapolation of the properties of a few particles. Instead, at each level of complexity entirely new properties appear, and the understanding of the new behaviors requires research which I think is as fundamental in its nature as any other. That is, it seems to me that one may array the sciences roughly linearly in a hierarchy, according to the idea: The elementary entities of science X obey the laws of science Y.

X	Y
solid state or many-body physics	elementary particle physics
chemistry	many-body physics
molecular biology	chemistry
cell biology	molecular biology
⋮	⋮
⋮	⋮
psychology	physiology
social sciences	psychology

P.W. Anderson, Science 177 (1972) 4047.

莫大な数の原子・電子からなる物質の性質を理解するには、個々の構成粒子に対する物理法則とは異なる概念が必要である。それゆえ、科学のそれぞれの階層に知的独立性があるという、30年前のアンダーソン博士の主張。

(1967 UCSD)

科学の階層構造

XはYに還元(reduce)できる。 したがって、
「究極のYが基礎科学として最も高い価値を持つ」 ???

固体物理学・多体
系物理学

化学

分子生物学
細胞生物学

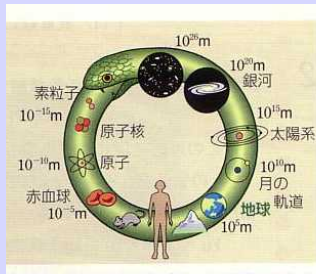
社会科学

X	Y
solid state or many-body physics	elementary particle physics
chemistry	many-body physics
molecular biology	chemistry
cell biology	molecular biology
⋮	⋮
⋮	⋮
⋮	⋮
psychology	physiology
social sciences	psychology

素粒子物理学

しかし、Y を知れば Xが構築できるわけでは決してない。

種々の階層での物理現象・概念の**多様性**、
そしてそれらの支配法則にしばしば見られる**普遍性**の存在は、
要素還元論的に導かれるものでは決してない。



各階層ごとに生まれる不思議な現象・意外な事象の
発現(emergence)を支配する法則・概念の探求にも
本質的な価値がある。

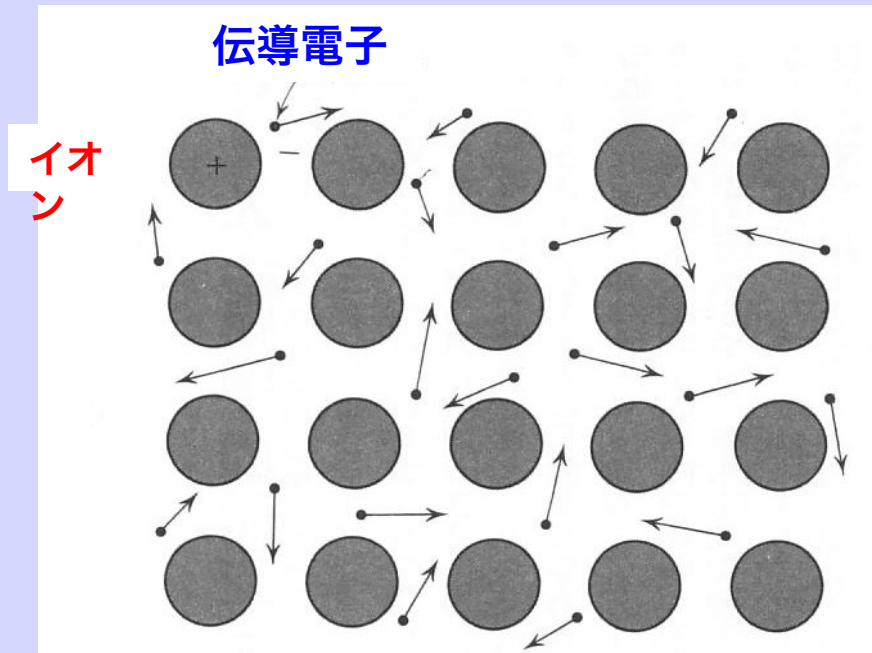
素粒子の究極の素晴らしい方程式が得られても(要素還元論)、それは例えばDNAの2重螺旋構造を導出・理解するのには原理的にも無力でしょう。

各階層での基礎科学研究には知的独立性・価値がある。
どの階層が「より基礎的な科学か」とさえ断定できない。

(※同じ階層内でも二つの方向：**ミクロ理論**も**現象論**も両方重要で価値がある。)

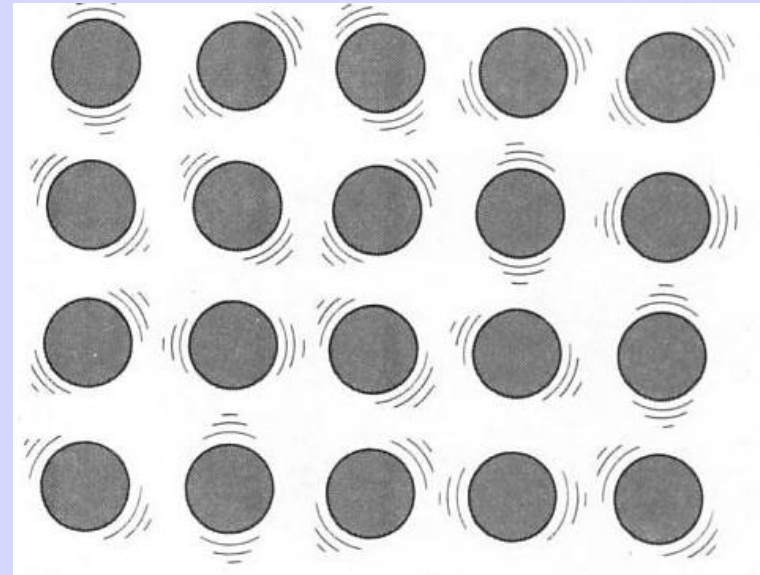
21世紀COE 「物理学の多様性と普遍性の探求拠点」

金属の中の電子



金属：原子から外側の電子が離れ、全体にひろがって運動する（伝導電子）。

残った原子は**正イオン**になっている。

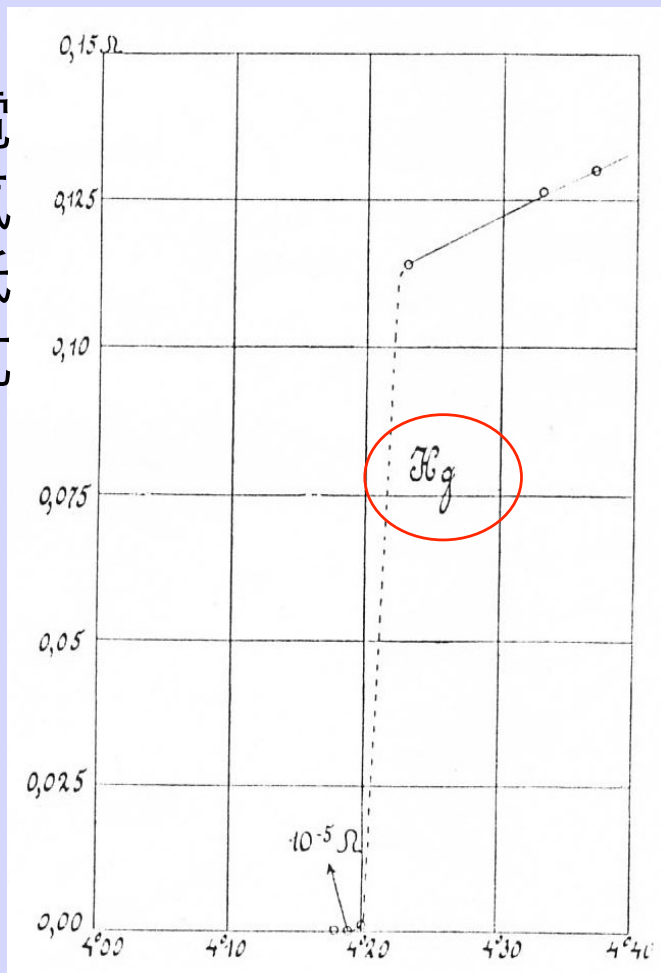


温度が高いほどイオンの**熱振動**は激しく、電子はぴんぱんに衝突する。

金属を冷やすと
電気抵抗はどうなる？

超伝導の発見

電気抵抗



絶対温度(ケルビン)

摂氏温度 0°C は
絶対温度 273 K (ケルビン)

水銀を冷やすと電気抵抗は
だんだん小さくなるが、

ある温度以下で突然
ゼロ抵抗になった！



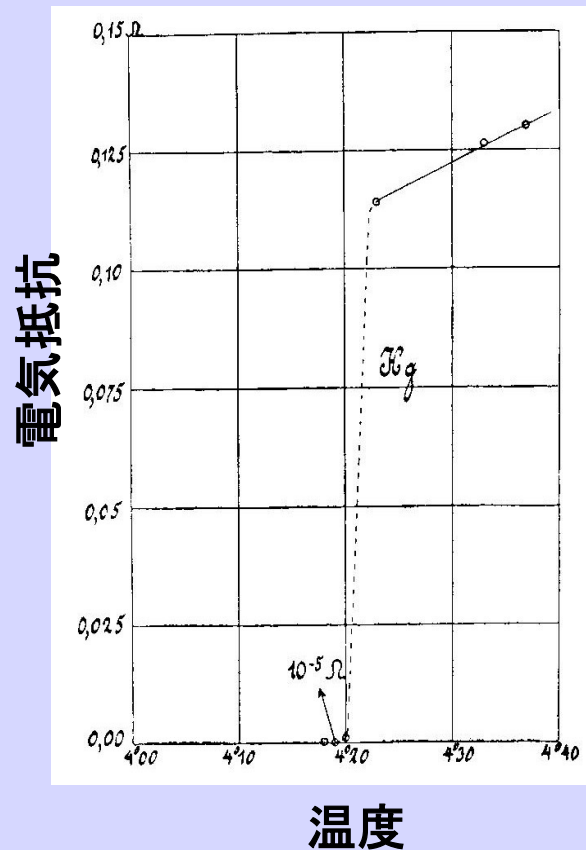
カメリン・オネス

1911年に発見
カメリン・オネス
(オランダ)

1913年に
ノーベル賞

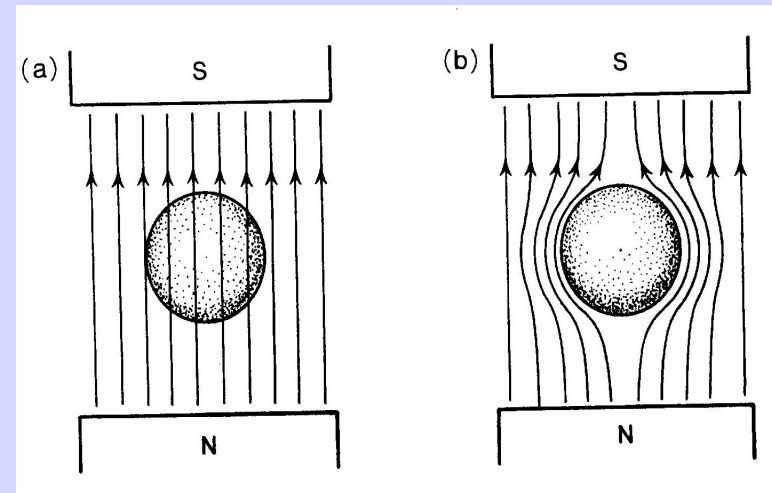
超伝導体の特徴

1. 電気抵抗がゼロ



臨界温度 T_c (転移温度)

2. マイスナー効果



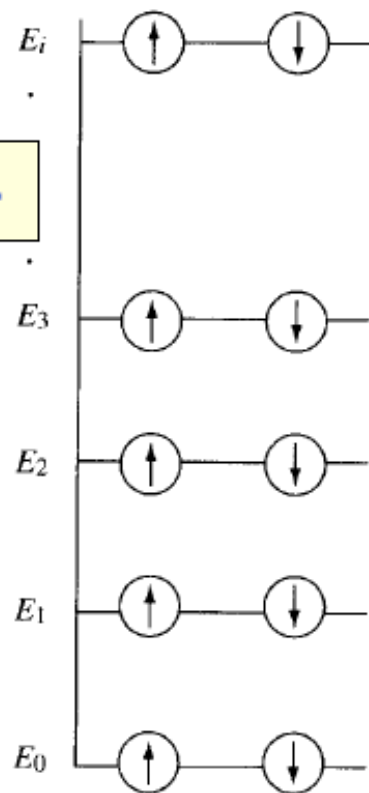
$T > T_c$: 常伝導

$T < T_c$: 超伝導

磁場中の超伝導体は、
磁束をはねのける。

莫大な数の電子集団は、我々の想像をはるかに越えて、
豊富で多彩な振る舞いをなす！！

フェルミ粒子



(a) フェルミ粒子の分布

電子はフェルミ粒子
電子対を作るとボーズ
粒子として振舞う

ボーズ粒子



(b) ボーズ粒子の分布 (ボーズ凝縮)

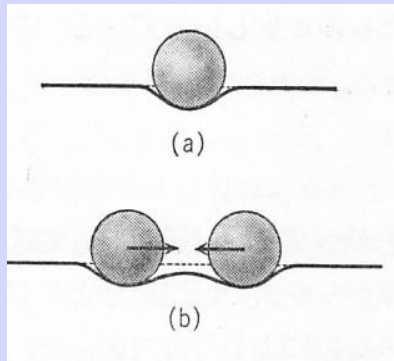
絶対零度で、全く異なる性質をもつ2種類の粒子たち

従来型超伝導の機構 (BCS理論)

1911 超伝導の発見

1957 超伝導を理解する理論：

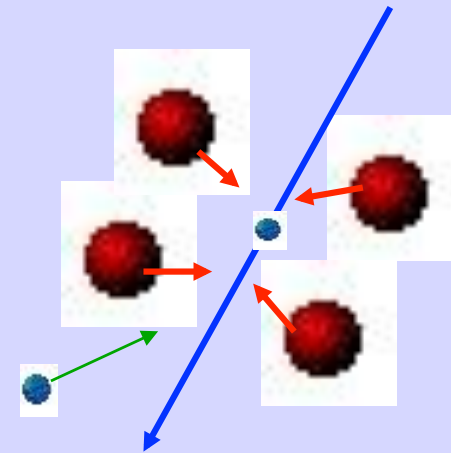
Bardeen, Cooper, Schrieffer (1972 ノーベル賞)



玉 \leftrightarrow 電子

マット \leftrightarrow イオン (原子)

玉をマットの上ののせると、マットが沈んで二つの玉は引き合う。



電子が走り去った後、正イオンが僅かに引かれて、正に帯電した領域ができる。

そこに別の電子 (-) が引き寄せられる。

電子が対 (クーパー対) を作ったとたん、ボーズ・アインシュタイン凝縮が起こって超流動状態になる。

リニア中央新幹線

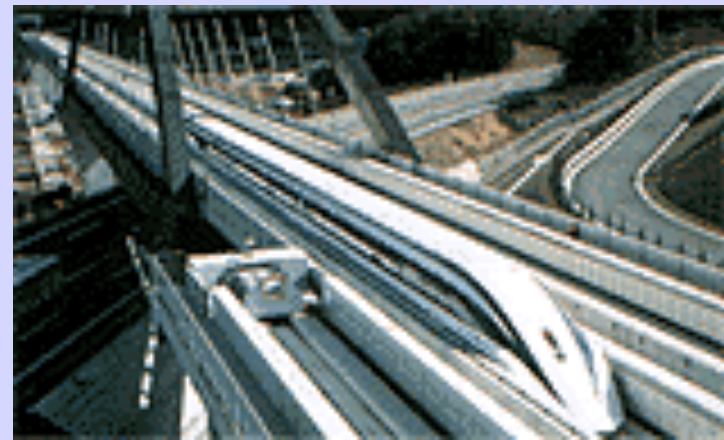
<http://www.linear-chuo-exp-cpf.gr.jp/> より



東京—大崎市を時速500Km
で走行する超伝導磁気浮上
式リニアモーターカーに
よって、約1時間で結ぶ計
画。

- 実験線の累積走行距離40
万キロ突破(2004.10.28)

- リニア時速 **581 km** (有人走行)、
世界最速記録を達成 (2003.12.2)



磁気共鳴画像化法

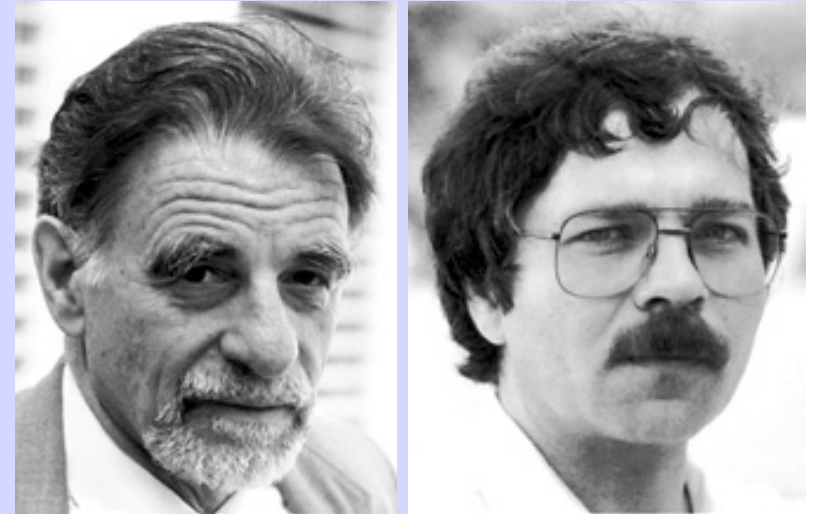
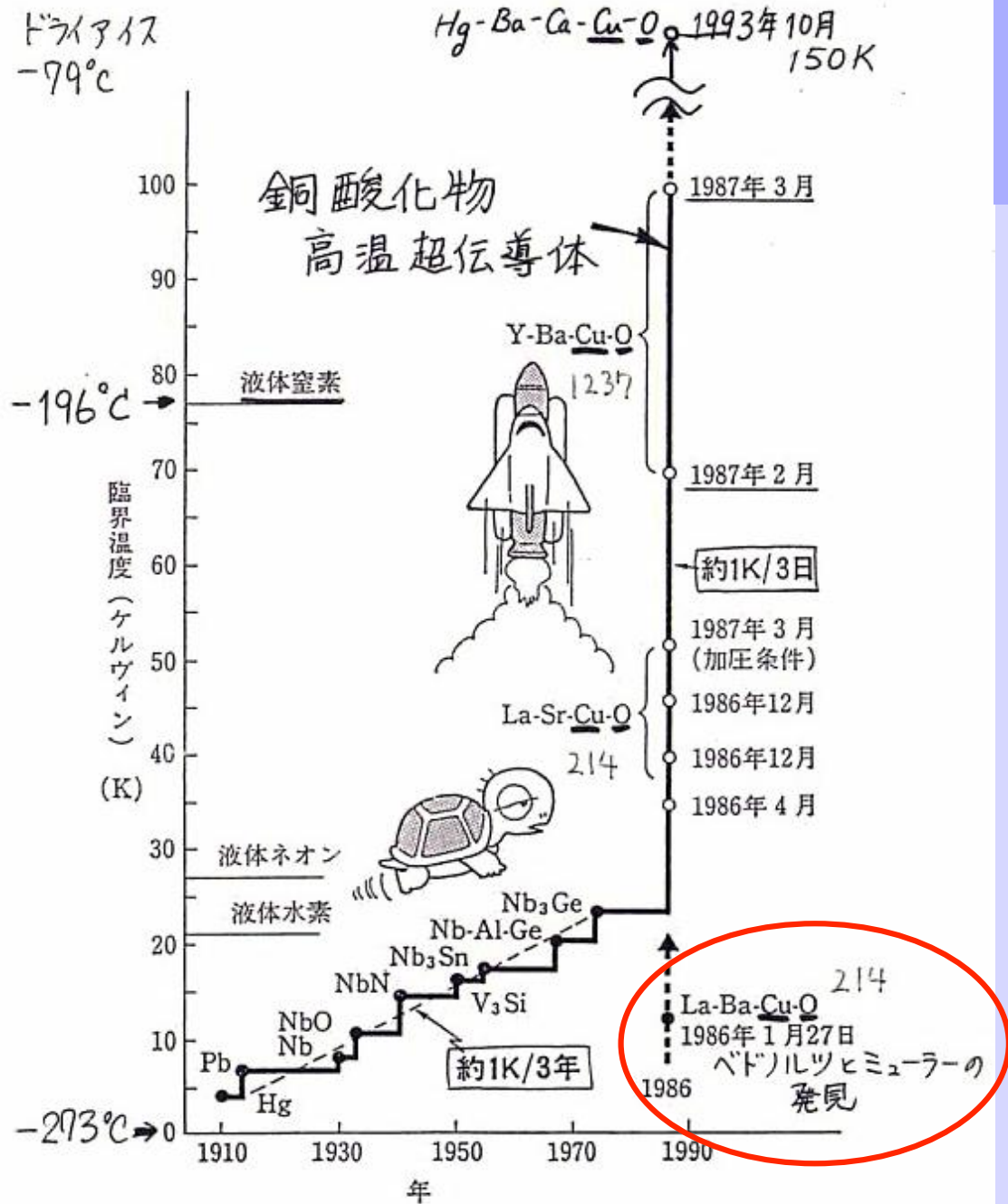
MRI (Magnetic Resonance Imaging)

MRI は大きくて強い磁石（超伝導磁石）を利用した画像診断法です。横になっているだけで、体のいろんな断面図を撮影することが可能です。



東芝の装置(1.5テスラ)

高温超伝導の発見 (1986年)



出所 http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1987/

ミュラーとベドノルツ





1987年にノーベル賞

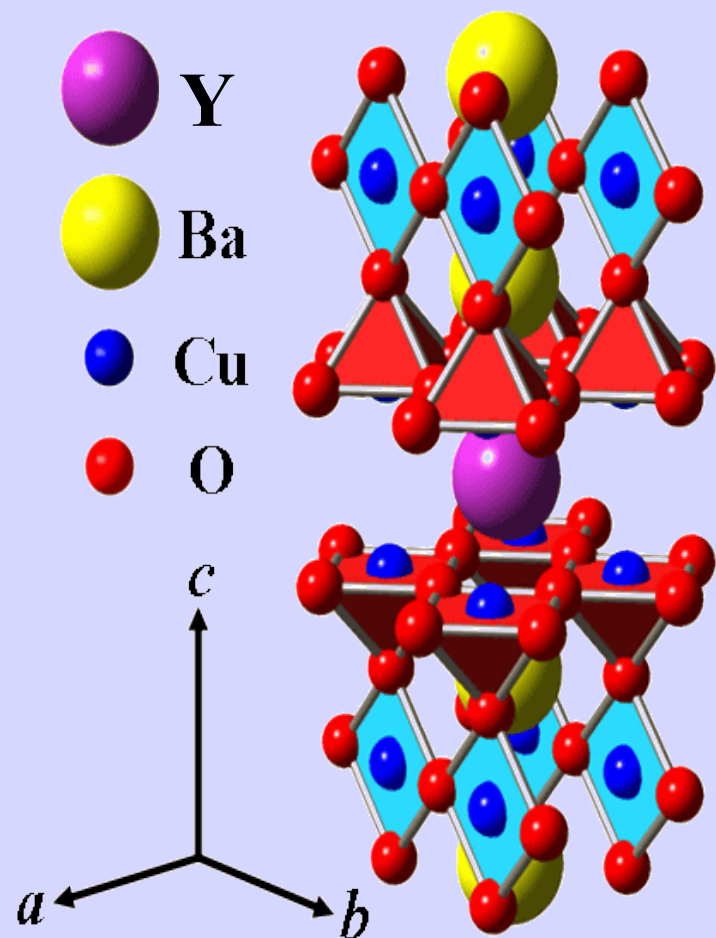
スピナー重項だが、
d波の超伝導

超伝導体の臨界温度の変遷

高温超伝導体の作り方





-  Y
-  Ba
-  Cu
-  O




YBa₂Cu₃O₇


買った原料粉末を計量

イトツム  白 Y₂O₃ × 1/2

バツム  白 BaCO₃ × 2

銅  黒 CuO × 3

↓ 混ぜてかためる

 乳鉢・乳棒

らっぽに入れて


オープン

電気炉に入れて焼く

930°C 24h

$$\frac{1}{2}Y_2O_3 + 2BaCO_3 + 3CuO + \frac{1}{4}O_2 \rightarrow YBa_2Cu_3O_7 + 2CO_2 \uparrow$$

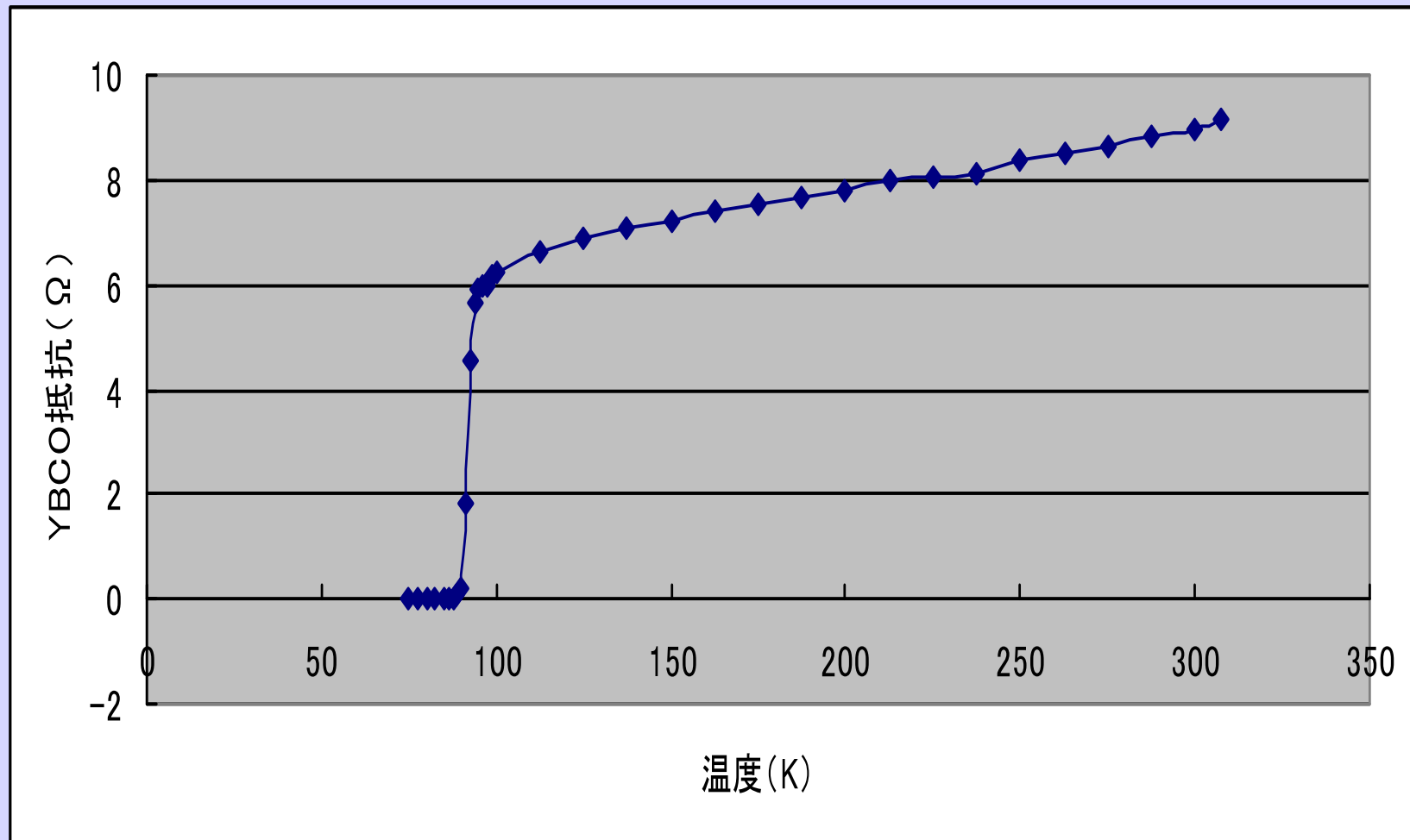
↓

 ハイ!

T_c = 93K 出きあがり.

高温超伝導体の電気抵抗

(嵯峨野高校 1年生による)

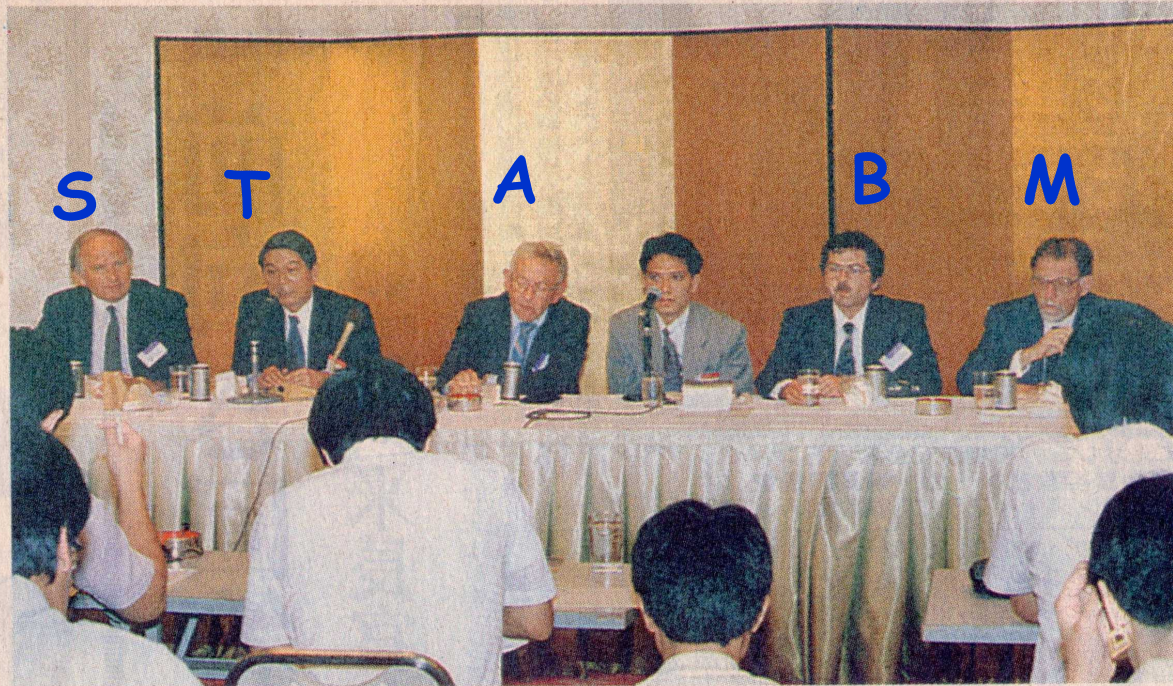


「高温超電導」で激しい応酬

ノーベル賞学者4人そろって会見

メカ解明、困難さ浮き彫り

超電導研究の世界のトップである四人のノーベル物理学賞受賞者が二十三日、金沢市で始まった第二回超電導国際会議の会場で記者会見、同会議のメインテーマである高温超電導メカニズムの研究状況について率直な感想を語った。会見には田中昭二超電導工学研究所長も参加、これだけの権威者が一堂に会見するのは初めて。なかなか進まぬメカニズム解明の困難さが、会見で浮き彫りにされた。



超電導国際会議で記者会見するノーベル賞学者ら。左からシュリーファー教授、田中昭二所長、アンダーソン教授、1人おいてペドノルツ特別研究員、ミュラー特別研究員—金沢市の石川厚生年金会館で

記者会見の通訳が前野です。

会見したのはJ・R・シュリーファー米カリフォルニア大教授、P・W・アンダーソン米プリンストン大教授、IBMチューリッヒ研究所のJ・G・ペドノルツ博士とK・A・ミュラー博士の四氏。

高温超電導酸化物は五年前、ミュラー、ペドノルツの両博士によって発見され、世界中で大フィーバーを巻き起こした。それ以前の低温超電導現象はシュリー

ーファー教授らが提唱したBCS理論で説明され、この高温超電導現象はBCS理論では説明できず、世界中の研究者がメカニズム解明に躍起になっている。

BCS理論とは全く異なるメカニズムを提案しているアンダーソン教授は「私の理論は最終的なもので、他の理論はすべて「くだ」と大胆な発言を

披露した。またペドノ博士は「酸化物になぜような大電流が流れるさえないかかっていない現象は、今回のような会議自身がバズルの一個一個を寄り、組み立てていかなない」と慎重な姿勢を述べた。

ミュラー教授は「論を確立するにはこれにない独自のな実験感必要だ」と実験研究の奮起を促した。

最後に田中所長が「酸化物は物性測定が極めて難しい。メカニズ

最後に田中所長が酸化物は物性測定が極めて難しい。メカニズ

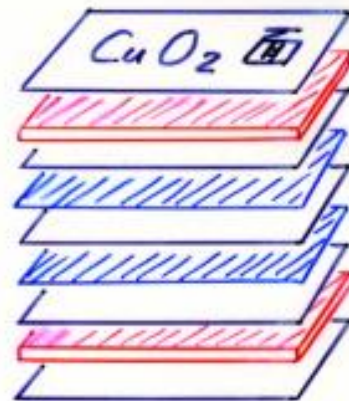
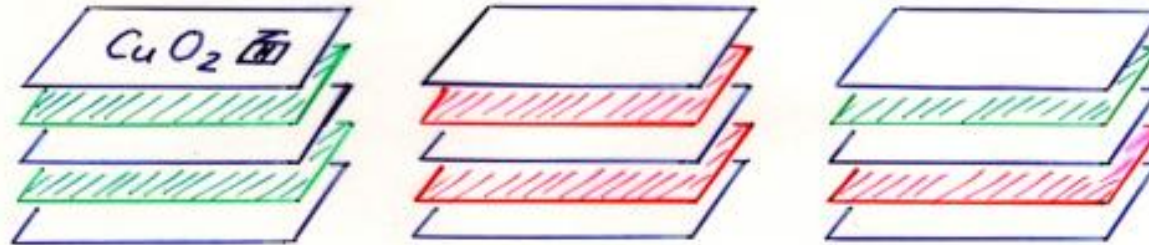
Bednorz and
Müller
(IBM Zurich)

Cu^{2+} , O^{2-} とすると
 $(\text{CuO}_2)^{2-}$ は電気をも
ってしましますが、ブロック層
の正の電荷と中和してやること
で全体として中性の物質が出来
上がります。

高温超伝導体 = CuO_2 面 + ブロック層

(1986~)

層状ペロブスカイト構造



キャリア-ドーピングは"



すべて高温超伝導体となる!

この構造が超伝導にとってそれほど具合が良いなら
「 CuO_2 面」を銅以外の元素でつくったら?

ところがそのような超伝導体はひとつも
見付からなかった。 (~1994)

元素の周期表

1905 ヴェルナーによって改良されたもの



Alfred Werner

1913年ノーベル化学賞

出所 http://nl.wikipedia.org/wiki/Bestand:Alfred_Werner.jpg

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1H																	2He
3Li	4Be											5B	6C	7N	8O	9F	10Ne
11Na	12Mg											13Al	14Si	15P	16S	17Cl	18Ar
19K	20Ca	21Sc	22Ti	23V	24Cr	25Mn	26Fe	27Co	28Ni	29Cu	30Zn	31Ga	32Ge	33As	34Se	35Br	36Kr
37Rb	38Sr	39Y	40Zr	41Nb	42Mo	43Tc	44Ru	45Rh	46Pd	47Ag	48Cd	49In	50Sn	51Sb	52Te	53I	54Xe
55Cs	56Ba	57-71	72Hf	73Ta	74W	75Re	76Os	77Ir	78Pt	79Au	80Hg	81Tl	82Pb	83Bi	84Po	85At	86Rn
87Fr	88Ra	89-103	104Rf	105Db	106Sg	107Bh	108Hs	109Mt	110	111	112						
		57La	58Ce	59Pr	60Nd	61Pm	62Sm	63Eu	64Gd	65Tb	66Dy	67Ho	68Er	69Tm	70Yb	71Lu	
		89Ac	90Th	91Pa	92U	93Np	94Pu	95Am	96Cm	97Bk	98Cf	99Es	100Fm	101Md	102No	103Lr	

なんでこんなに空いているの？

なんでこれらは仲間はずれ？

なんで似てるのに
はなれているの？

新しい立体周期表 エレメンタッチ



エレメント = 元素

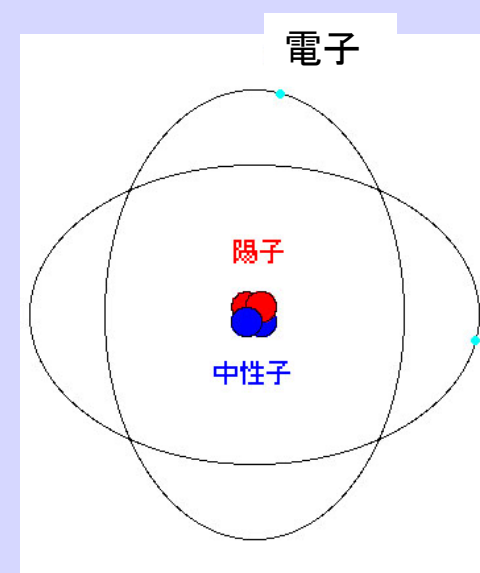
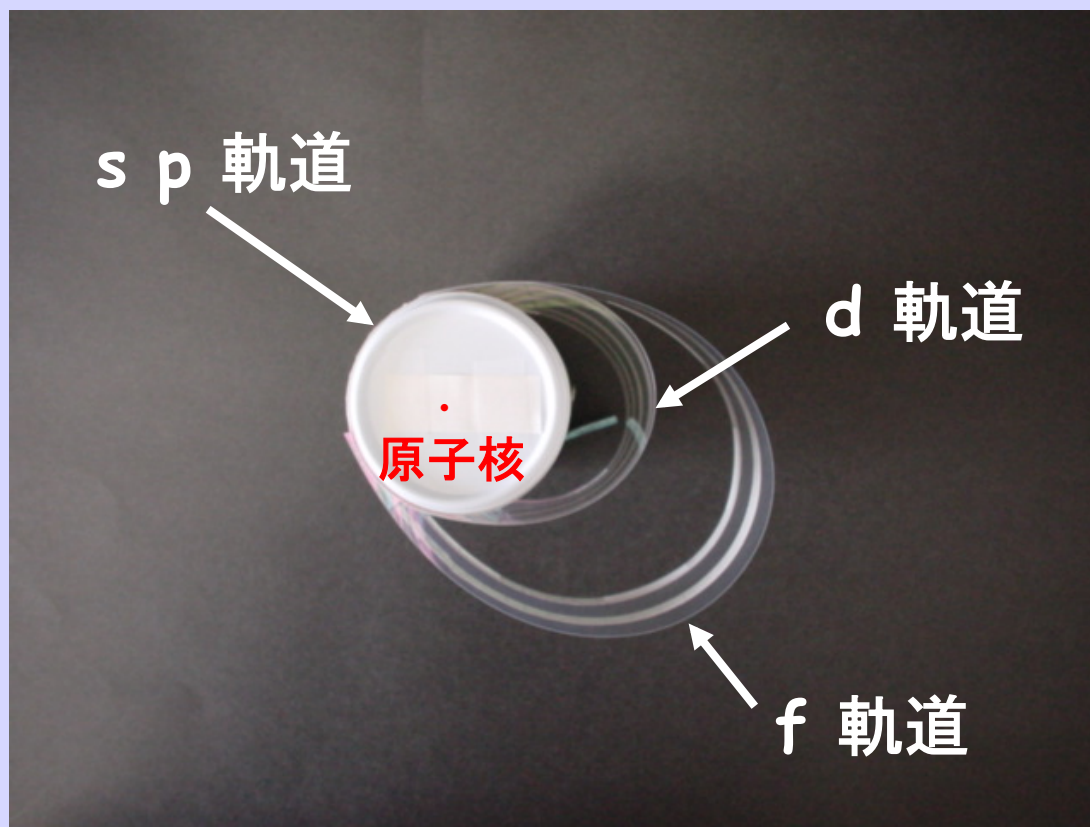
タッチ：

touch、縦、立つ

3重の円筒上にらせん状に巻きつけると、
3つの「問題点」はすべて解消！



エレメンタッチは 電子の軌道も示している



日本物理学会誌

BUTSURI
創刊1915年 第23巻5号
平成14年9月5日発行 毎月5日発行
発行所：東京 165-8555 0193

■ X線による原始星の研究
■ 複合ペロブスカイト酸化物の巨大圧電効果
■ 高次元時空の世界から4次元時空の世界を眺める

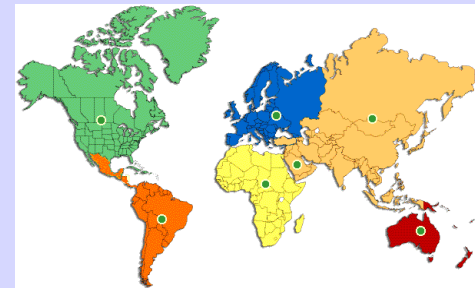
9

2002 vol. 57 no.

<http://www.soc.nii.ac.jp/jps/>

2002年9月号に解説

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
1 H																	2 He	
3 Li	4 Be											10 B	11 C	12 N	13 O	14 F	15 Ne	
19 Na	20 Mg											31 Al	32 Si	33 P	34 S	35 Cl	36 Ar	
39 K	40 Ca	41 Sc	42 Ti	43 V	44 Cr	45 Mn	46 Fe	47 Co	48 Ni	49 Cu	50 Zn	51 Ga	52 Ge	53 As	54 Se	55 Br	56 Kr	
57 Rb	58 Sr	59 Y	60 Zr	61 Nb	62 Mo	63 Tc	64 Ru	65 Rh	66 Pd	67 Ag	68 Cd	69 In	70 Sn	71 Sb	72 Te	73 I	74 Xe	
87 Fr	88 Ra	89-103	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110	111	112							
89 La	90 Ce	91 Pr	92 Nd	93 Pm	94 Sm	95 Eu	96 Gd	97 Tb	98 Dy	99 Ho	100 Er	101 Tm	102 Yb	103 Lu				
101 Ac	102 Th	103 Pa	104 U	105 Np	106 Pu	107 Am	108 Cm	109 Bk	110 Cf	111 Es	112 Fm	113 Md	114 No	115 Lr				



元素の周期表は世界地図のようなもの



エレメンタッチは元素の地球儀！



1 H	2 He	3 Li	4 Be	5 B	6 C
7 N	8 O	9 F	10 Ne	11 Na	12 Mg
13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr
25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn
31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo
43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd
49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd
61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy
67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu	72 Hf
73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt
79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po
85 At	86 Rn	87 Fr	88 Ra	89 Ac	90 Th
91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm
97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No
103 Lr	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs
109 Mt	110 Ds	111	112		

Kyoto University



元素の新しい世界地図はどんなもの？

Elementouch on a T-Shirt

Elementouch T-shirt

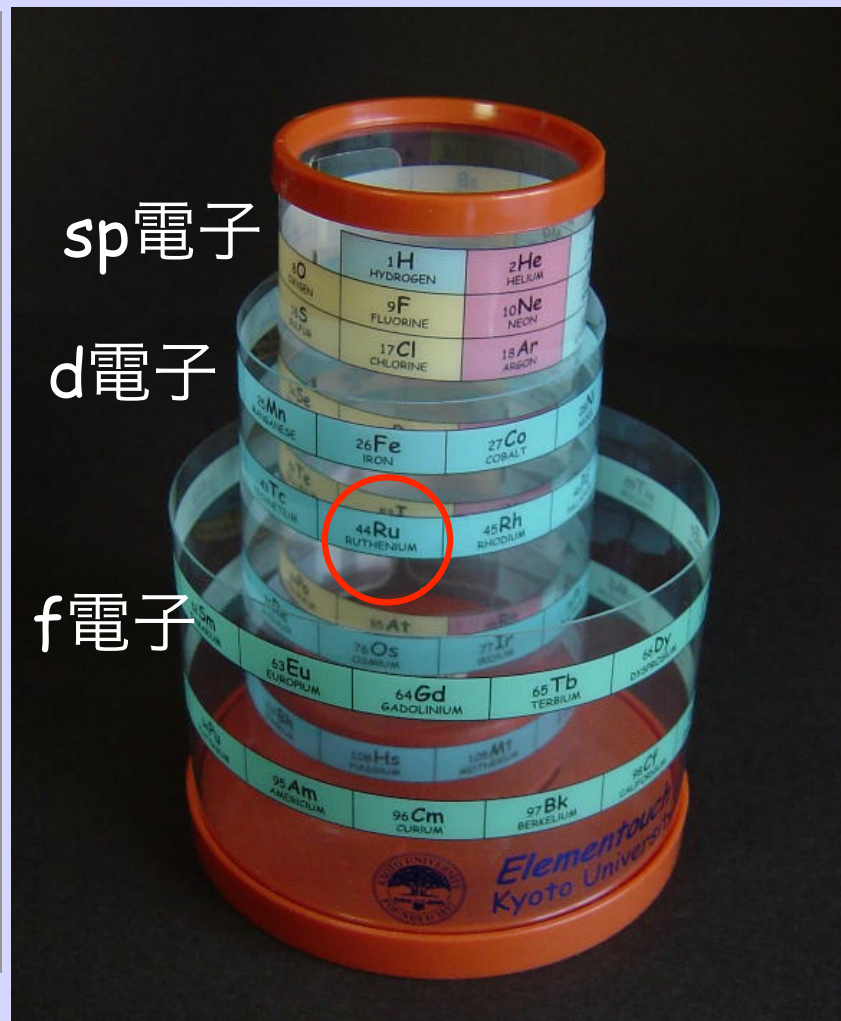
1 H	2 He	3 Li	4 Be	5 B	6 C								
7 N	8 O	9 F	10 Ne	11 Na	12 Mg	13 Al	14 Si						
15 P	16 S	17 Cl	18 Ar	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti						
23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge				
33 As	34 Se	35 Br	36 Kr	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr						
41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn				
51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe	55 Cs	56 Ba	57 La	58 Ce						
59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu	72 Hf
73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb				
83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn	87 Fr	88 Ra	89 Ac	90 Th						
91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr	104 Rf
105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111	112	Kyoto University					

"a new world map" ?

銅以外にどんな元素が有力か？

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
1H																		2He
3Li	4Be											5B	6C	7N	8O	9F	10Ne	
11Na	12Mg											13Al	14Si	15P	16S	17Cl	18Ar	
19K	20Ca	21Sc	22Ti	23V	24Cr	25Mn	26Fe	27Co	28Ni	29Cu	30Zn	31Ga	32Ge	33As	34Se	35Br	36Kr	
37Rb	38Sr	39Y	40Zr	41Nb	42Mo	43Tc	44Ru	45Rh	46Pd	47Ag	48Cd	49In	50Sn	51Sb	52Te	53I	54Xe	
55Cs	56Ba	57-71	72Hf	73Ta	74W	75Re	76Os	77Ir	78Pt	79Au	80Hg	81Tl	82Pb	83Bi	84Po	85At	86Rn	
87Fr	88Ra	89-103	104Rf	105Db	106Sg	107Bh	108Hs	109Mt	110	111	112							

57La	58Ce	59Pr	60Nd	61Pm	62Sm	63Eu	64Gd	65Tb	66Dy	67Ho	68Er	69Tm	70Yb	71Lu
89Ac	90Th	91Pa	92U	93Np	94Pu	95Am	96Cm	97Bk	98Cf	99Es	100Fm	101Md	102No	103Lr



sp電子

d電子

f電子

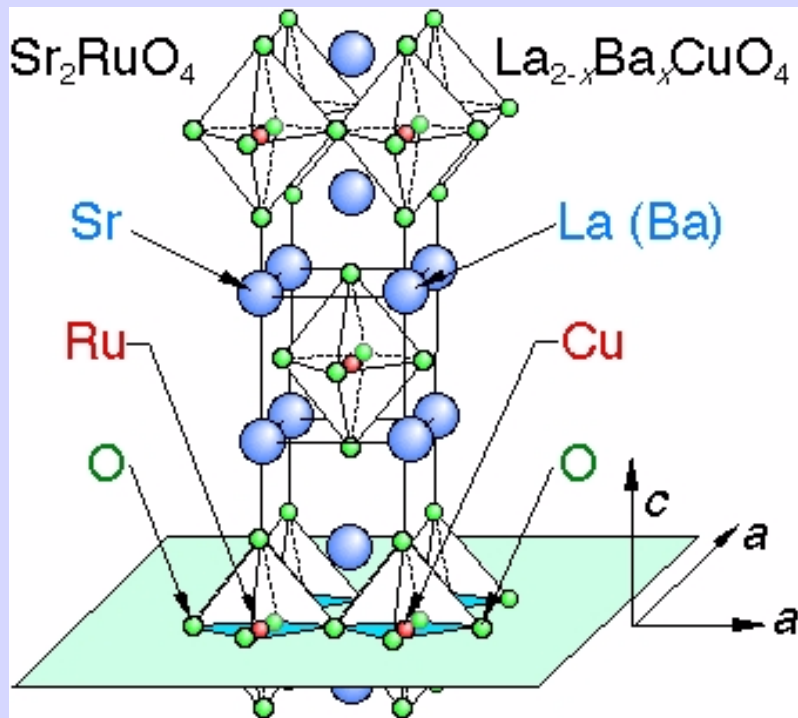
Ruの酸化物で超伝導を発見した！

実はスピン三重項だった!!

層状ルテニウム酸化物 Sr_2RuO_4

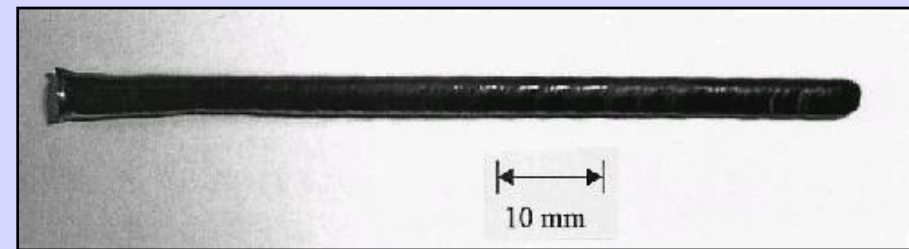
超伝導転移温度

$$T_c = 1.5 \text{ K}$$



純良単結晶の育成に成功

フローティング・ゾーン法



NishiZaki, Mao, Kikugawa, Ikeda, Maeno *et al.* (Kyoto)

銅を含まない層状ペロブスカイト超伝導の発見

Superconductivity in a layered perovskite without copper

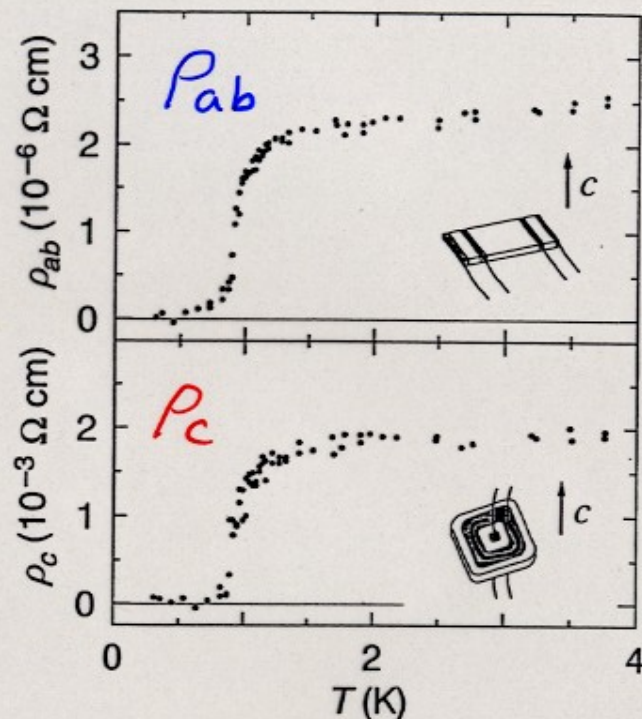
Y. Maeno*, H. Hashimoto*, K. Yoshida*,
S. Nishizaki*, T. Fujita*, J. G. Bednorz†
& F. Lichtenberg†† *Hiroshima - IBM Zürich*

* Department of Physics, Hiroshima University,
Higashi-Hiroshima 724, Japan

† IBM Research Division, Zürich Research Laboratory,
8803 Rüschlikon, Switzerland

†† Present address: VARTA Batterie AG, R and D Centre, 65779 Kelkheim, Germany.

FOLLOWING the discovery of superconductivity at ~ 30 K in $\text{La}_{2-x}\text{Ba}_x\text{CuO}_4$ (ref. 1), a large number of related compounds have been found that are superconducting at relatively high temperatures. The feature common to all of these materials is a layered crystal structure based on a perovskite template and containing planar networks of copper and oxygen. This raises the question of whether superconductivity can occur in layered perovskites that do not contain copper. To the best of our knowledge, no such material has been found to date, despite nearly a decade of searching. We describe here the discovery of superconductivity in Sr_2RuO_4 , a layered perovskite isostructural with $\text{La}_{2-x}\text{Ba}_x\text{CuO}_4$ (Fig. 1). Our results demonstrate that the presence of copper is not a prerequisite for the existence of superconductivity in a layered perovskite. But the low value of the superconducting transition temperature ($T_c = 0.93$ K) points towards a special role for copper in the high-temperature superconductors.



Nature 372 (1994) 532.

“p-wave” proposed by Rice & Sigrist

J. Phys.: Condens. Matter 7 (1995) L643.

スピン三重項超伝導とは

超伝導： 電子の対形成による

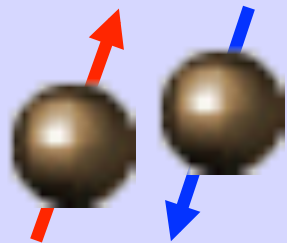
一種のボーズ・アインシュタイン凝縮状態

電子対(クーパー対)の大きさ： 1~100ナノメートル

電子は**スピン** (\uparrow, \downarrow) をもつ：

クーパー対の合成スピンとして**2種類**が可能

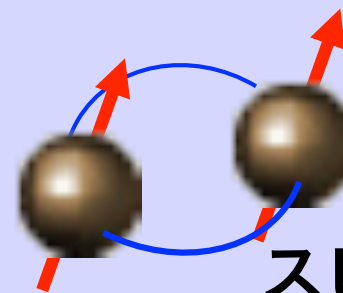
スピン一重項 (singlet)



$S = 0$

従来のすべての超伝導
(高温超伝導も)

スピン三重項 (triplet)



$S = 1$

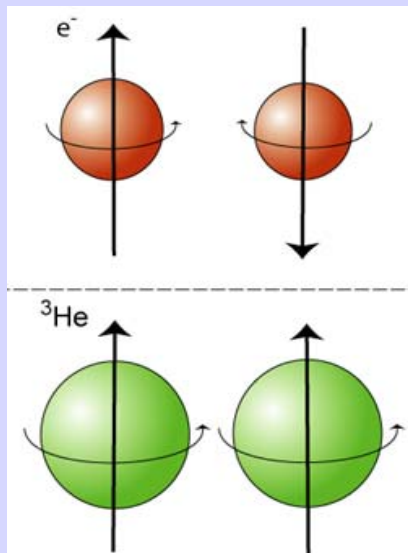
スピンも超流動状態

新奇現象期待できる

スピン三重項超流動体：ヘリウム3

「超流動ヘリウム3で起こる対形成は超伝導体での電子対（クーパー対）の形成とは異なる。」（2003ノーベル財団HP）

スピン三重項超伝導の存在は未だ完全には認知されていません。



超伝導

スピン一重項
(シングレット)

^3He の超流動

スピン三重項
(トリプレット)

粒子対の全スピンの成分として+1, 0, -1の3種類があるので、トリプレット（3つ子）とよびます



Douglas Osheroff

実験：1996年
ノーベル物理学賞
(Lee, Richardson
と共に)

2004.11. 22
(月)
京大講演会
(一般向け)

出所 http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1996/osheroff-bio.html



Anthony Leggett

理論：2003年
ノーベル物理学賞

2004.11.
23 (火)
京大 (基
研) 講演会
(専門家向)

出所 Bill Wiegand

超伝導対称性

Cooper対の状態ベクトル $|\Psi(1,2)\rangle = -|\Psi(2,1)\rangle$: 反対称 (フェルミ粒子)

状態ベクトル
軌道 $|\psi\rangle = \varphi|\chi\rangle$

スピン状態

$|\chi(\sigma_1, \sigma_2)\rangle$

$\varphi(r_1, r_2)$

Spin singlet
(一重項)

$S_z = 0$

$\frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\downarrow\rangle - |\downarrow\uparrow\rangle)$

$\ell = 0, 2, \dots$

$S = 0$

反対称

s波, d波
対称 (偶パリティ)

Spin triplet
(三重項)

$S_z = +1$

$|\uparrow\uparrow\rangle$

$\ell = 1, 3, \dots$

$S = 1$

$S_z = 0$

$\frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\downarrow\rangle + |\downarrow\uparrow\rangle)$

p波, f波

$S_z = -1$

$|\downarrow\downarrow\rangle$

対称

反対称 (奇パリティ)

「2電子分子」のような電子対の全スピンの成分として +1, 0, -1 の3種類があるので、トリプレット (3つ子) とよびます

非従来型（非s波）超伝導性の起源

電子間クーロン斥力の重要な系（強相関電子系）：

電子間距離ゼロに波動関数の振幅を持つs波は不利

Cu酸化物：反強磁性揺らぎ \Rightarrow 反平行スピン対

\Rightarrow スピン一重項d波超伝導

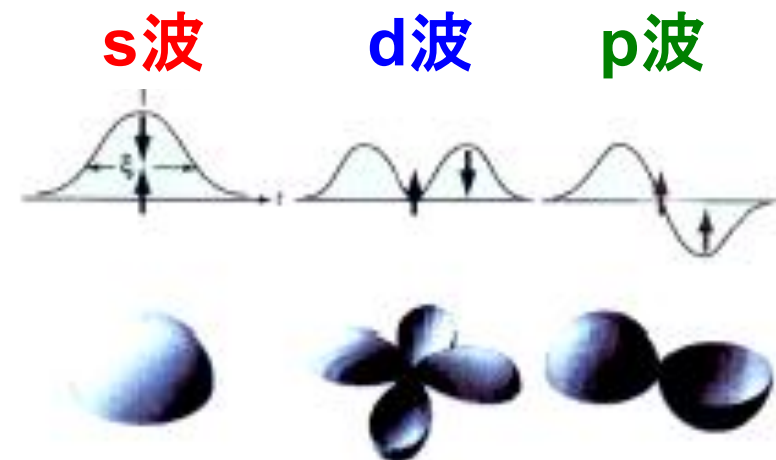
Ru酸化物：

強磁性揺らぎは
それほど強くない

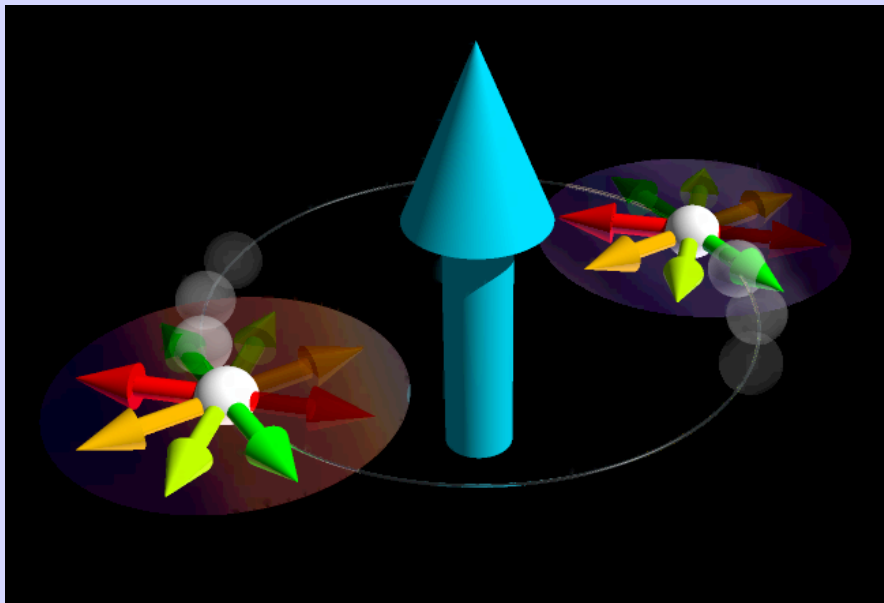
\Rightarrow 電子相関によって
スピン三重項

電子・格子相互作用ではなく、
電子間のクーロン斥力が
対形成をうむ

クーパーペアの空間的広がりとスピンの構造



Sr₂RuO₄の超伝導状態



小矢印: 平行スピ対 ($S_z = 0$)
大矢印: 軌道角運動量 ($L_z = 1$)

スピン状態

- ・ NMR ナイトシフト
- ・ 偏極中性子回折

⇒ スピン三重項を検証

軌道状態

- ・ ミューオンスピン回転
- ・ 量子化磁束格子

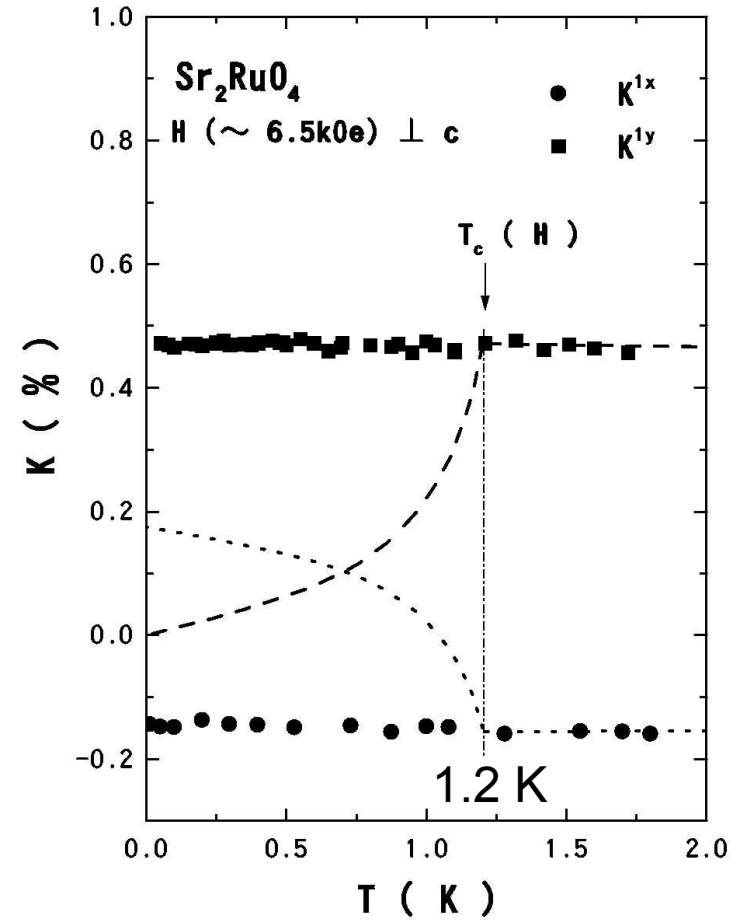
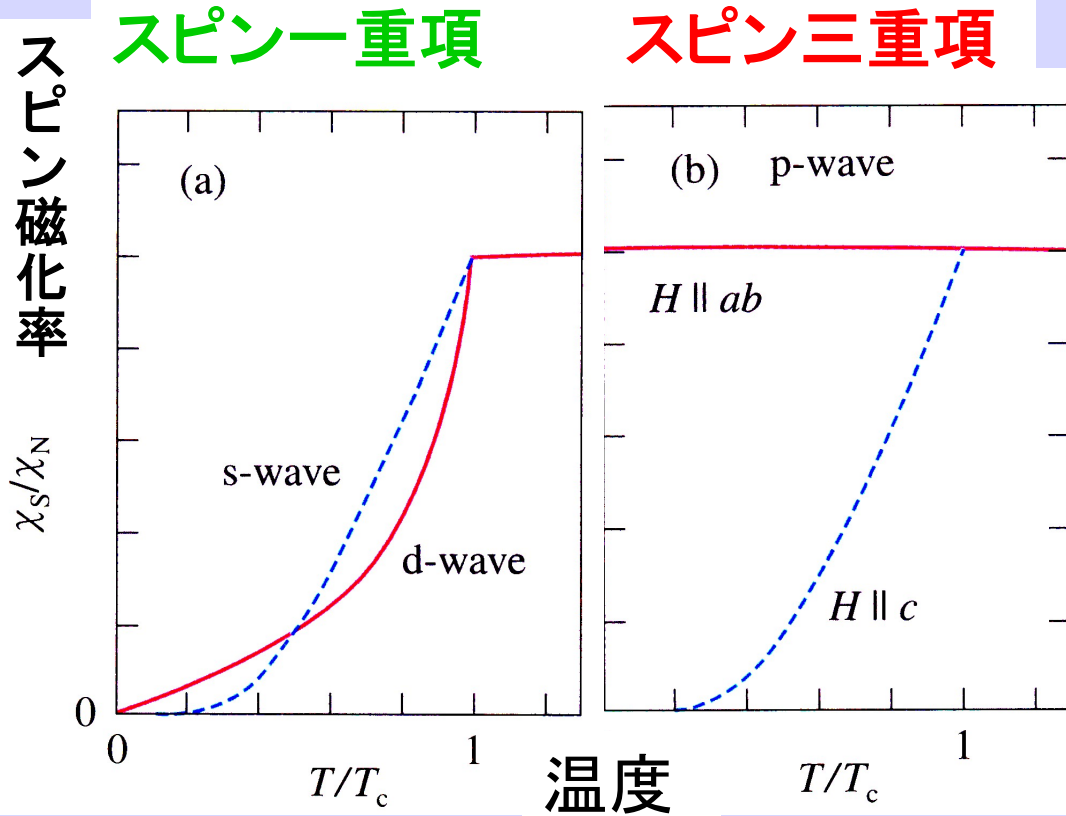
⇒ 時間反転対称性の破れ
を検証 (スピン三重項の強い傍証)

奇パリティの直接証明は未だ

スピン状態の決定

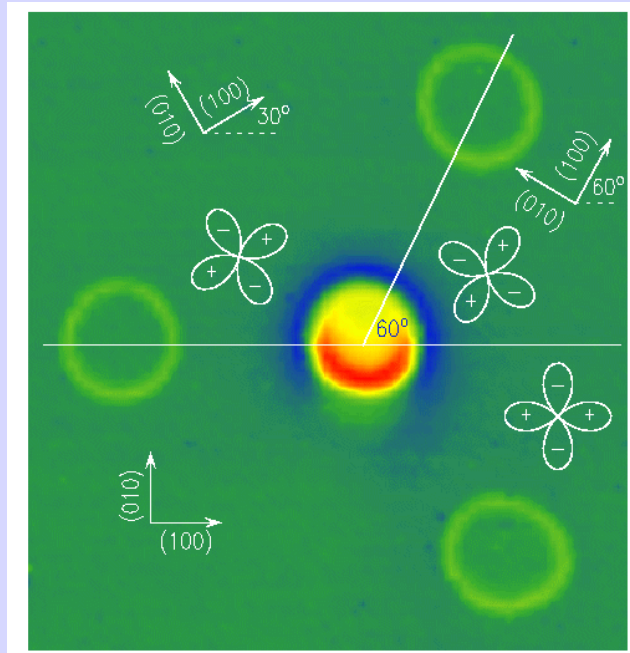
超伝導体の
電子スピンの磁化率

酸素17 のNMR (阪大・京大)
Ishida *et al.*
Nature **396** (1998) 658.



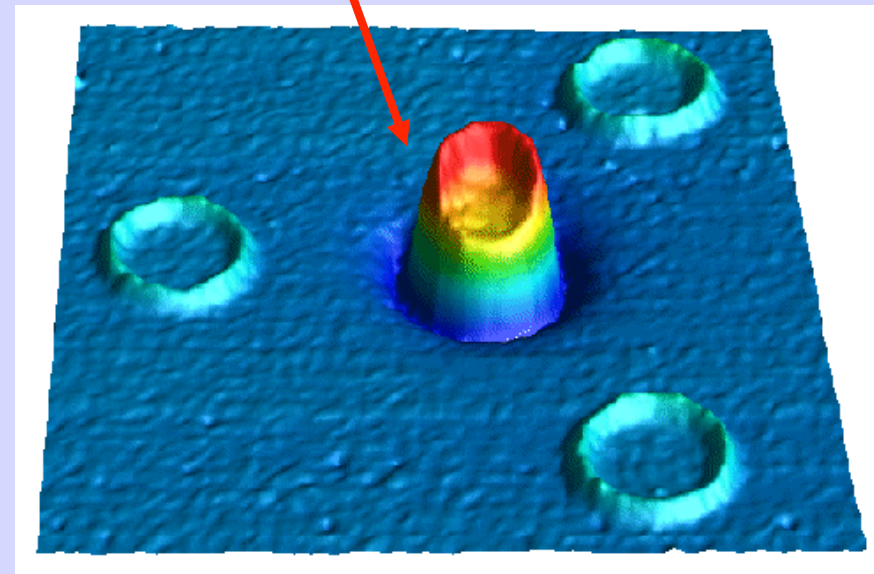
超伝導位相（空間対称性）の決定

高温超伝導が（スピン三重項）
d波であることを証明した実験



C.C. Tsuei, J.R. Kirtley et al.,
"Pairing Symmetry and Flux Quantization
in a Tricrystal Superconducting Ring
of $YBa_2Cu_3O_{7-d}$ ",
Phys. Rev. Lett. **73**, 593(1994).

量子化磁束 $\Phi_0 = h/2e$ の
ちょうど半分の磁束



共同研究者J.R. Kirtley博士 (IBM)のHPより

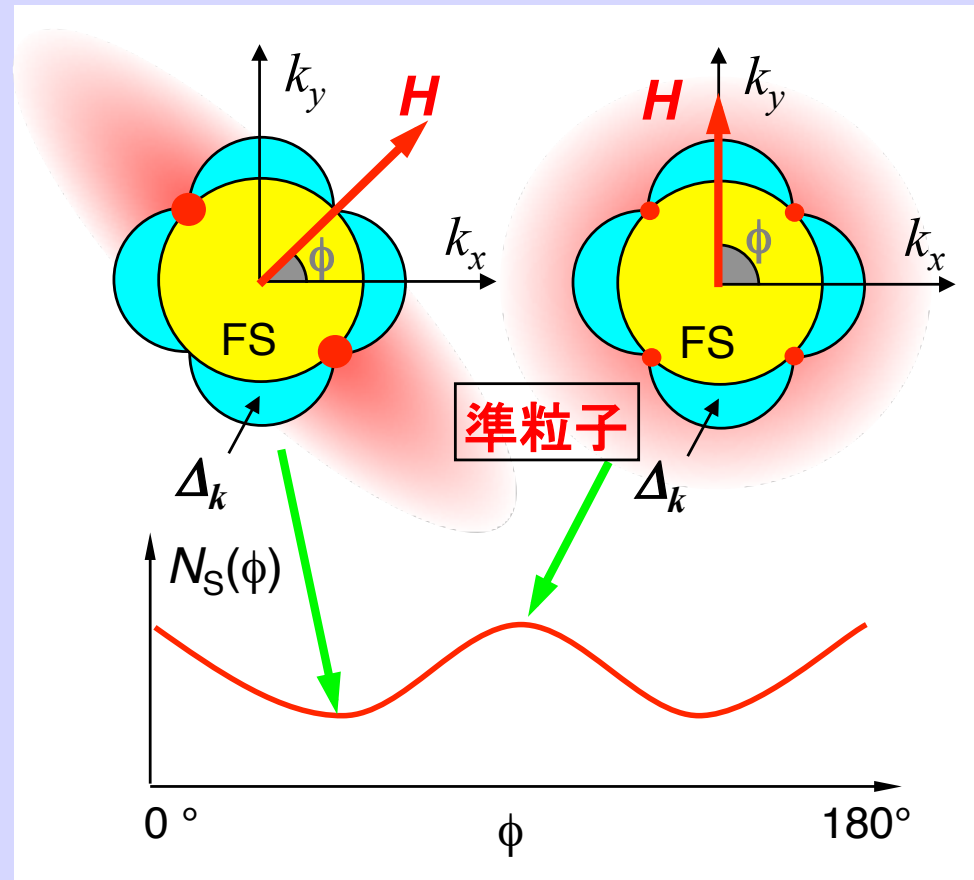
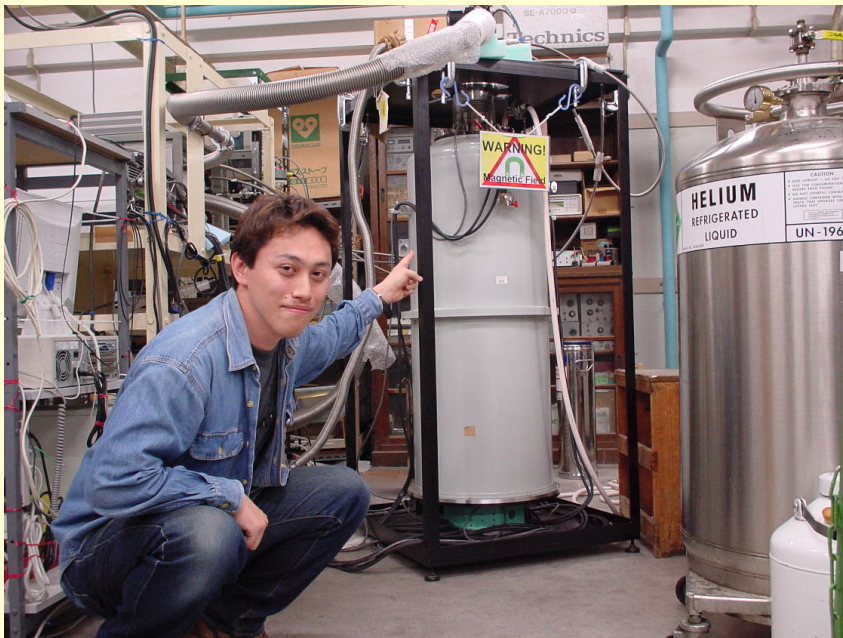
スピン三重項超伝導体に
対する、このような実験
の報告例はまだない。

比熱測定による熱力学的状態の決定

$$C_P = T \left(\frac{\partial S}{\partial T} \right)_P : S = \int_0^T \frac{C_P}{T} dT$$

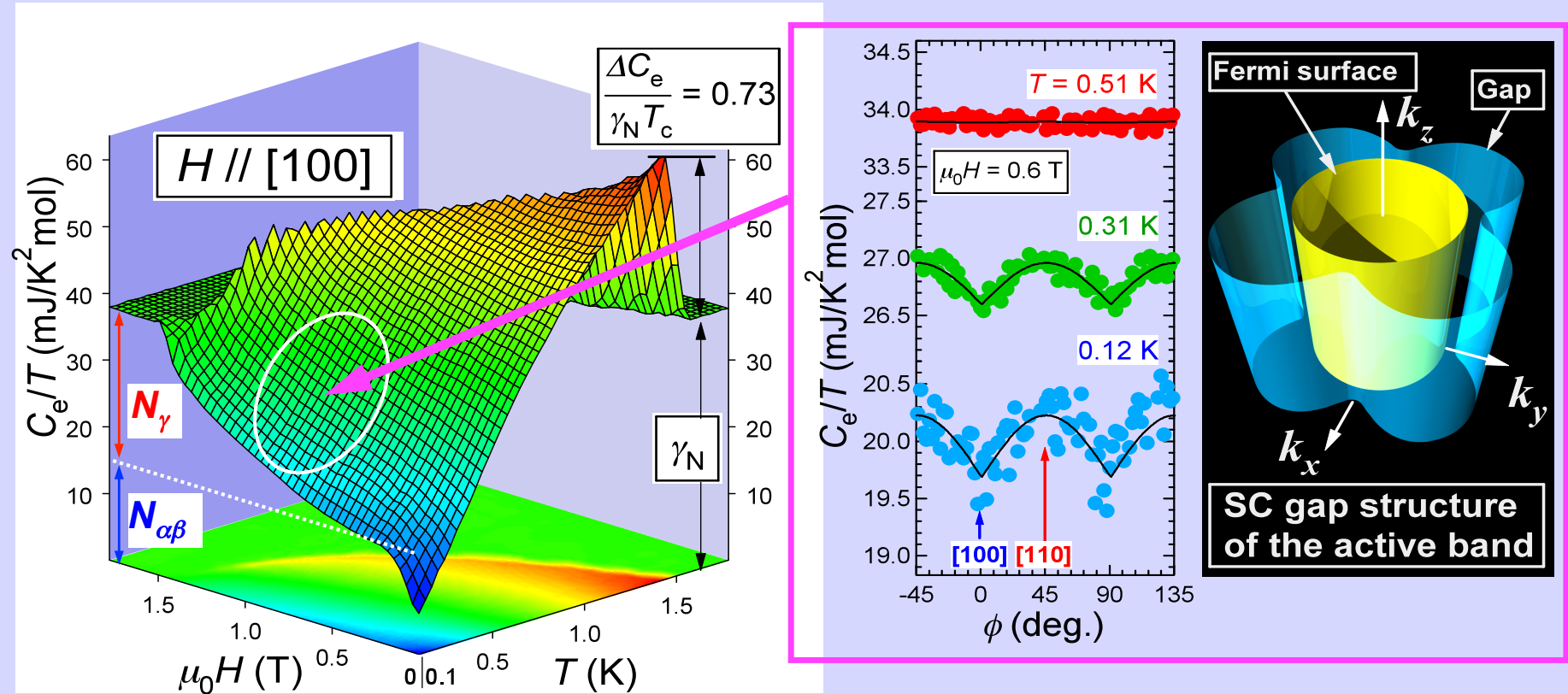
比熱測定からエントロピーが
“直接”わかる！

ベクトル超伝導マグネット付き
比熱装置 by 出口和彦 (COE-PDF)



磁場中準粒子励起を検出

比熱による超伝導エネルギーギャップの 大きさの方向依存性決定



K. Deguchi *et al*, PRL 92,
047002 (2004).

スピン三重項超伝導に対する
予想と一致

スピン三重項の可能性が指摘される超流体

$S = 1$ Cooper pairing

(0) 原子の超流動体 ^3He p-wave

(1) 重い電子系超伝導体 UPt_3
 UNi_2Al_3 : UPd_2Al_3 は明らかに一重項

(2) ルテニウム酸化物超伝導体 Sr_2RuO_4

(3) 強磁性と共存する超伝導体 $\text{UGe}_2, \text{URhGe}, \text{ZrZn}_2?$

(4) 有機超伝導体 $(\text{TMTSF})_2\text{PF}_6??$

(5) その他 $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}?, \text{etc.}$

スピン三重項超伝導の存在が、実際の物質で詳細にわたって確立できたのは、 Sr_2RuO_4 がはじめて！

スピン三重項超伝導の物理

- Sr_2RuO_4 : スピン三重項超伝導を遂に実現!
 - 超伝導対称性・対形成メカニズムの詳細を定量化できうる初めての例 (c.f. UPt_3)
 - 強い電子相関の効果が三重項を安定化
 - 非従来型超伝導メカニズムの統一理論構築に重要なヒント
(京大 物理: 山田耕作教授の理論グループなど)

- スピン三重項特有の超伝導現象・効果の開拓
 - 複数の超伝導転移
 - カイラル現象
(ゼロ磁場ホール効果、デバイス応用など)
 - クーパー対の集団励起運動 (collective modes)

超伝導 基礎研究の将来

(1) 高温超伝導メカニズムの解明

BCS理論よりも包括的な超伝導理論の構築

(2) より高い T_c の実現

室温超伝導体の発見

T_c の最高値は150 K程度にとどまっていますが、原理的に室温超伝導を禁じる制約はありません。

(3) 新奇な超伝導体、超伝導状態の発見

電子-格子以外のメカニズム、非s波超伝導など

(4) 新超伝導現象の発見

マイスナー効果やジョゼフソン効果に比肩する「新効果」

END

BCS理論のあらまし

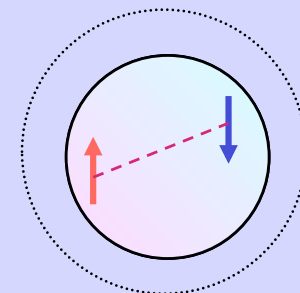
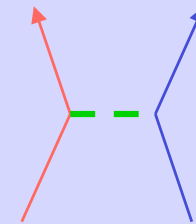
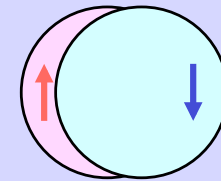
Bardeen, Cooper, Schrieffer (1957)

電子-格子相互作用を媒介とした
電子間引力によって、
合成運動量 $P = 0$, 合成スピン $S = 0$
の電子対が形成される

Fermi凝縮状態は不安定化し、
BCS状態(超伝導)になる。
電子対の“ボーズ・アインシュタイン凝縮”
電子対(クーパー対)の大きさ: $1 \sim 100 \text{ nm}$

準粒子励起スペクトルにはエネルギー
ギャップ Δ が生じる。

金属中の電子：
フェルミ凝縮状態



“BCS基底状態”

強相関電子系：なぜ非s波が実現するのか？

Unconventional Superconductivity

Definition: $\sum_k \Delta(k) = 0$

The reason why unconventional sc is realized in *strongly-correlated electron systems*

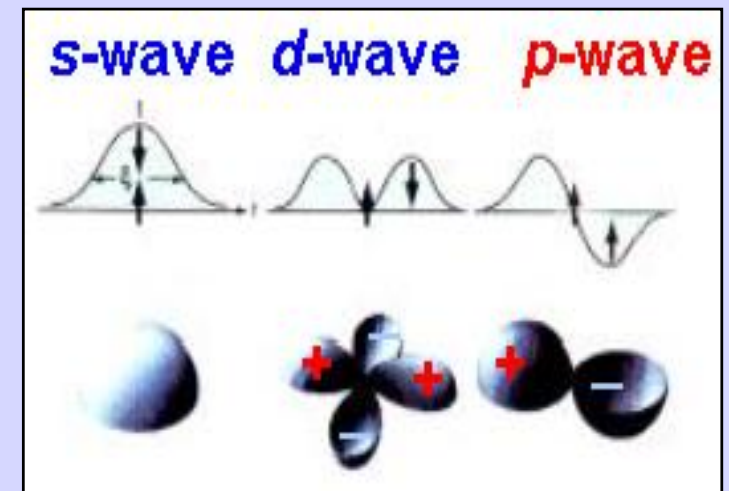
(heavy fermions, transition-metal oxides, some organic compounds, materials near a Mott insulator, etc.)

gap equation
$$\Delta(k) = \sum_{k'} -V_{kk'} \frac{\Delta(k')}{2E_{k'}} (1 - 2n(k'))$$

For $V_{kk'} > 0$ by **Coulomb repulsion**, the **sign** of $\Delta(k)$ has to change with k in order to have a solution for non-zero $\Delta(k)$.

Example: HTC cuprates

$$\Delta(k) = \Delta_d (\hat{k}_x^2 - \hat{k}_y^2)$$



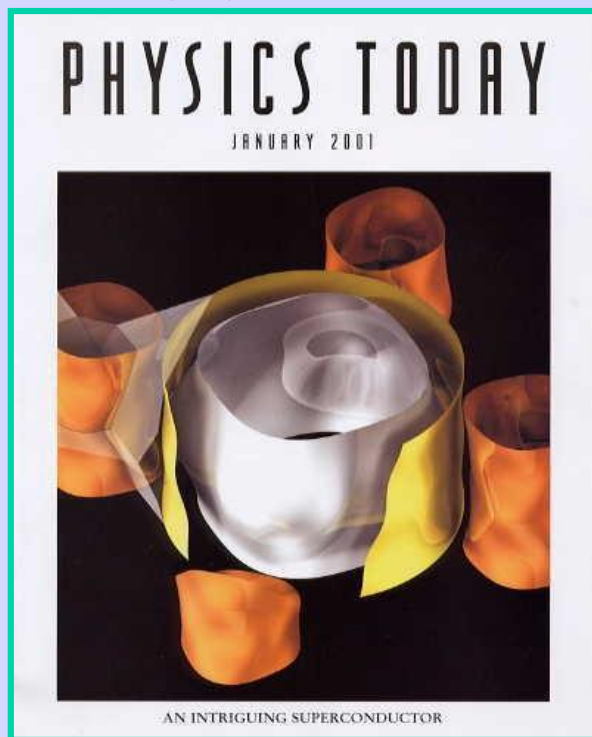
$$n(k) = \frac{1}{e^{\xi_k / k_B T} + 1}$$

$$\xi_k = \frac{\hbar^2 k^2}{2m} - \mu$$

$$E_k = \sqrt{\xi_k^2 + |\Delta_s|^2}$$

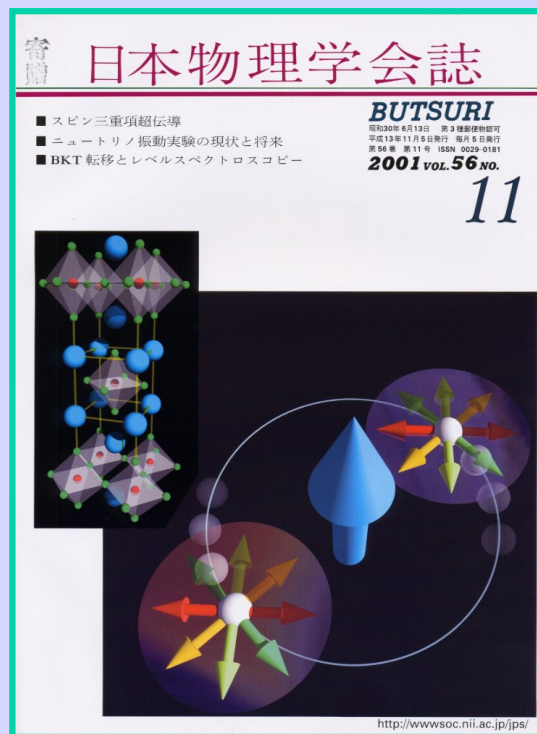
さらに詳しい解説

米国物理学会誌
2001年1月号



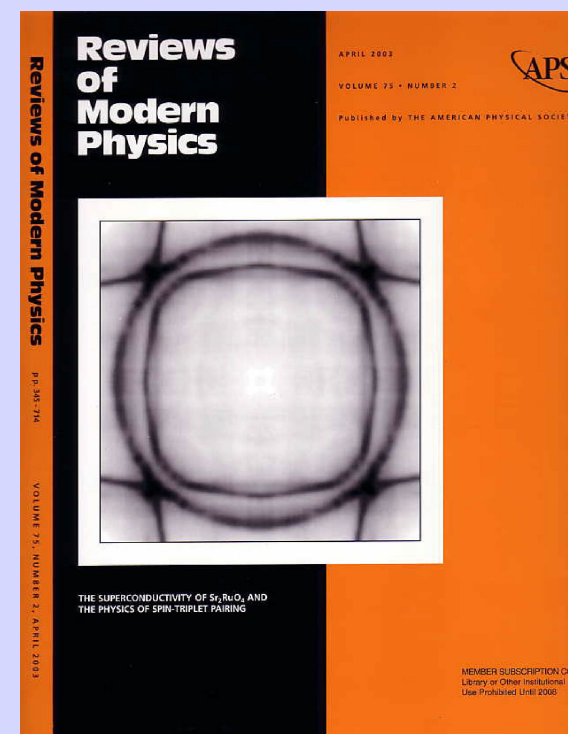
超伝導発見の論文:
被引用800件以上
YM *et al.*:
Nature 372 (1994)
532.

2001年11月号



前野・出口:
日本物理学会誌
56 (2001) 817.

Rev. Mod. Phys.
2003年4月号



Mackenzie and Maeno:
Rev. Mod. Phys.:
75 (2003) 657.