

超伝導のふしぎ

～マクロな量子現象～

川上則雄

京都大学理学部 物理学第一教室

GCOE-市民講座
2009年10月31日



普遍性と**創発性**から紡ぐ次世代物理学 —フロンティア開拓のための自立的人材養成—

京都大学

理学研究科 物理学・宇宙物理学専攻



グローバルCOE
プログラム
(2008年度より5年間)

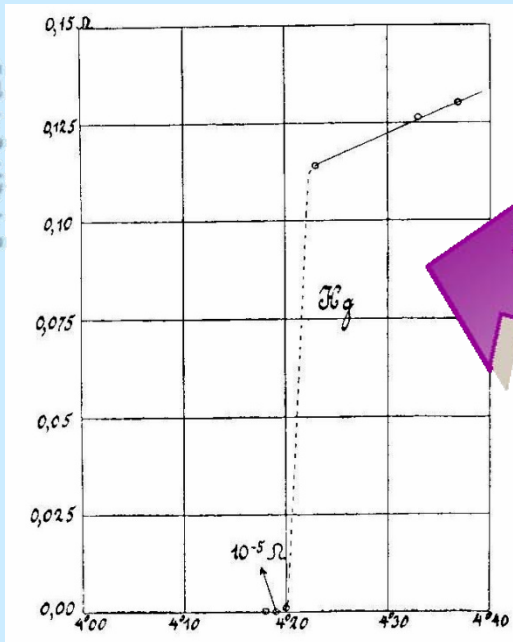


創発

基本法則からは容易に推測できない
新しい現象の発現

超伝導現象

電気抵抗

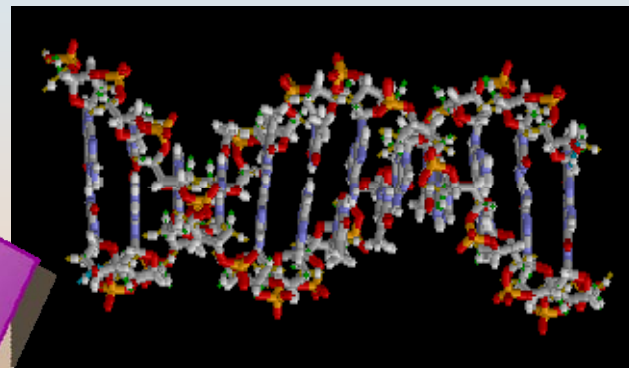


絶対温度

超伝導発見のデータ
(1911年)

予言可能？
実験により
はじめて認識

DNAの二重螺旋構造



Wikipediaより

基礎方程式

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} |\Psi\rangle = \mathcal{H} |\Psi\rangle$$

where

$$\mathcal{H} = - \sum_j^{N_e} \frac{\hbar^2}{2m} \nabla_j^2 - \sum_\alpha^{N_i} \frac{\hbar^2}{2M_\alpha} \nabla_\alpha^2 - \sum_j^{N_e} \sum_\alpha^{N_i} \frac{Z_\alpha e^2}{|\vec{r}_j - \vec{R}_\alpha|} + \sum_{j \ll k}^{N_e} \frac{e^2}{|\vec{r}_j - \vec{r}_k|} + \sum_{\alpha \ll \beta}^{N_i} \frac{Z_\alpha Z_\beta e^2}{|\vec{R}_\alpha - \vec{R}_\beta|}$$

Congratulations !!

Nobel Prize 2008



Nambu

対称性の自発的破れの理論



Kobayashi



Maskawa

6種のクォーク予言

「創発」の父

創発!

量子論を超えて...

マクロな量子現象

超伝導・超流動



物理学

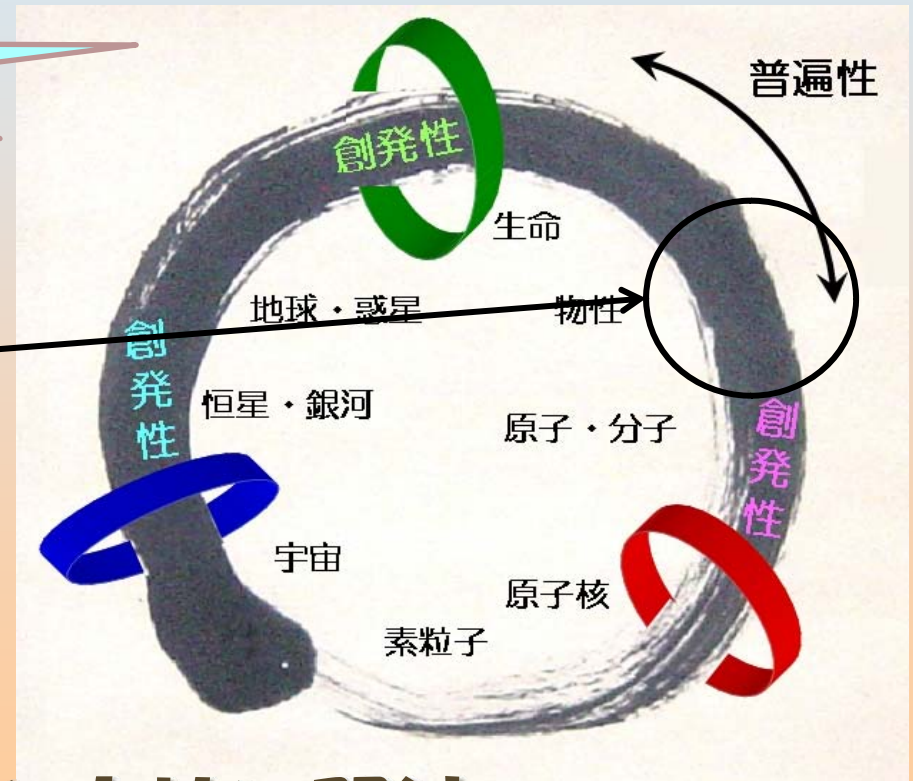
素粒子、原子核、宇宙物理、物性物理。。。。

マクロな量子現象

超伝導 超流動

物性物理

物質の諸性質：
量子力学に基づき解明、予言



素粒子などの他分野と密接に関連

超伝導のふしぎ

～マクロな量子現象～

創発：量子論をこえて

0. 超伝導とは

1. 量子論

2. フェルミ粒子とボース粒子

何ともふしぎな粒子たち

3. 超伝導の理解にチャレンジ

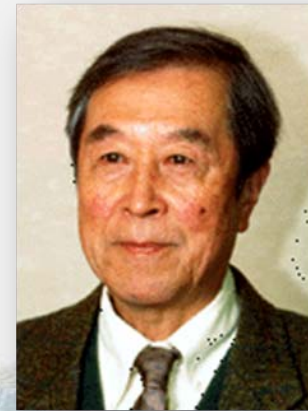
4. レーザー冷却原子：

新たな研究舞台

超伝導

～ 量子現象のスーパースター ～

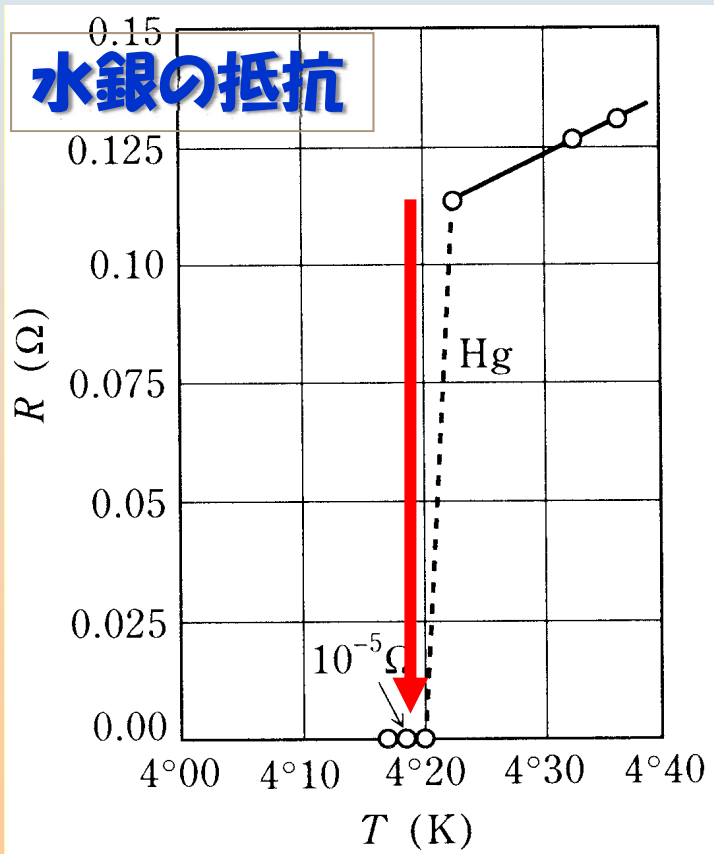
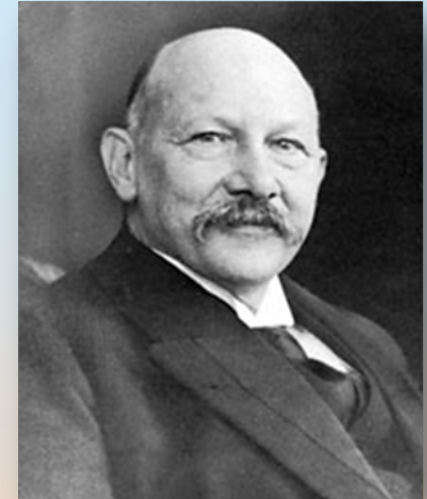
マクロ量子現象の典型例



素粒子論に
使えるかも

超伝導の発見

1911年、オランダのカマリン・オネス
(ノーベル物理学賞)



ゼロ抵抗

永久電流の確認

水銀の電気抵抗の温度変化

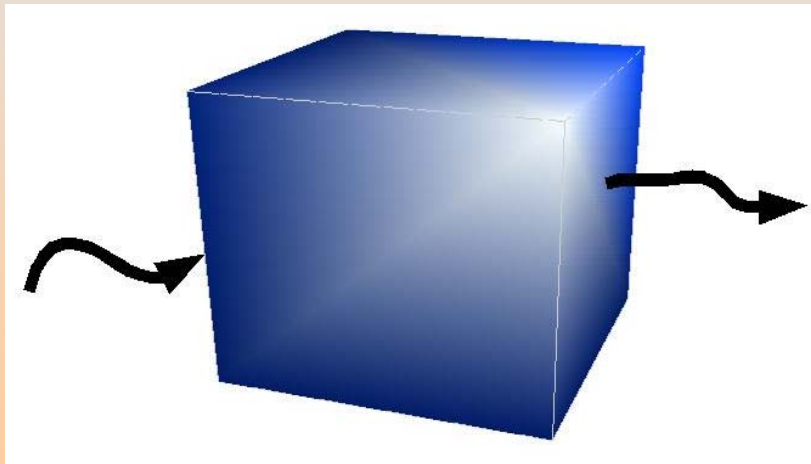
永久に電流は流れ続ける !!!

超伝導とは？

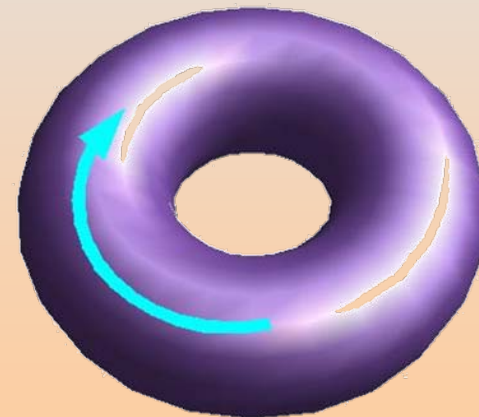
・電流の持続時間

- 1000000000000000...000 年 (ゼロが100以上)

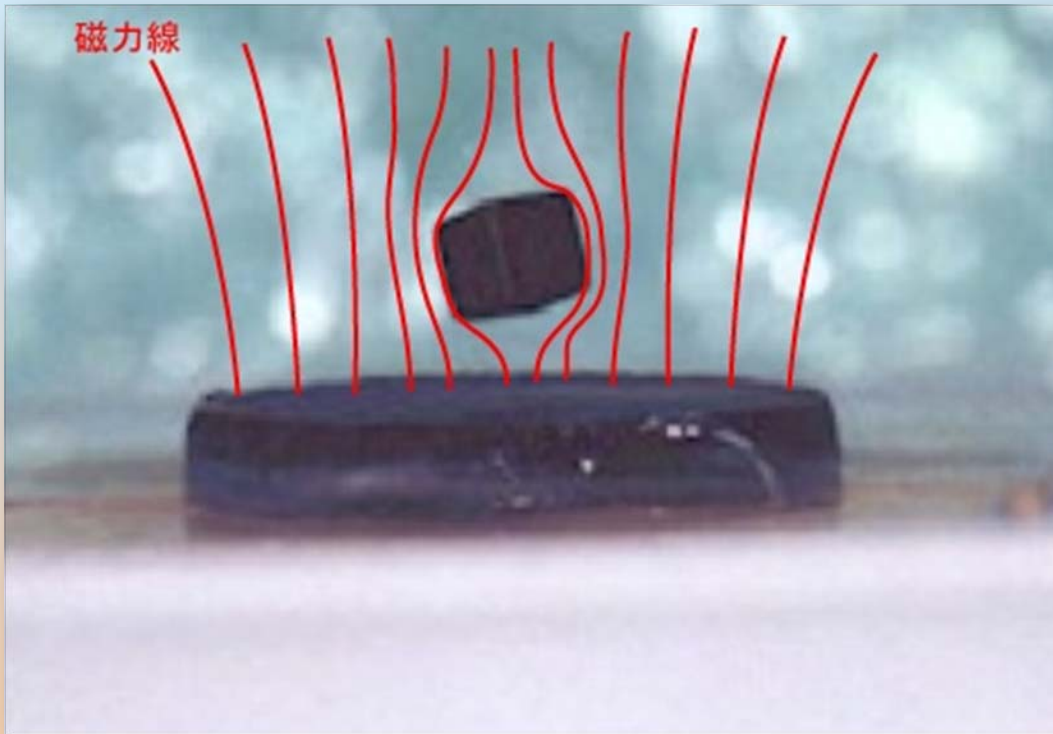
超伝導体



リング



超伝導現象2: 完全反磁性



完全反磁性 = マイスナー効果
→ 超伝導体が空中に浮遊

人が乗っても大丈夫!

リニアモーターカー



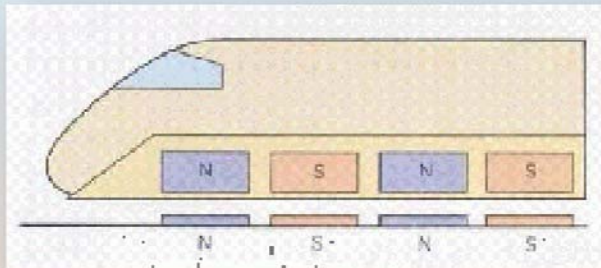
超伝導：幅広い応用



超伝導磁石の応用

磁気浮上列車

• 原理



• 自動車も?



• 列車



リニア
新幹線
JR東海
H.P.より



東京—大阪を最速67分 リニア新幹線 JR東海試算 (2045年 開業めざして)

朝日新聞
2009年10月14日
朝刊 1面

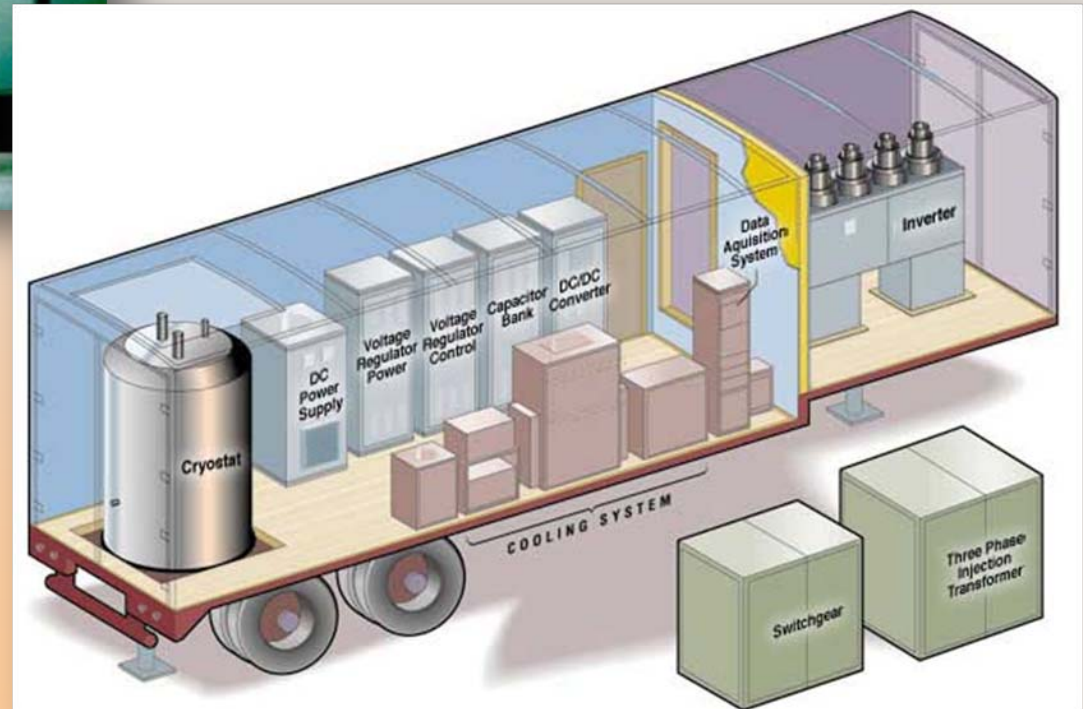
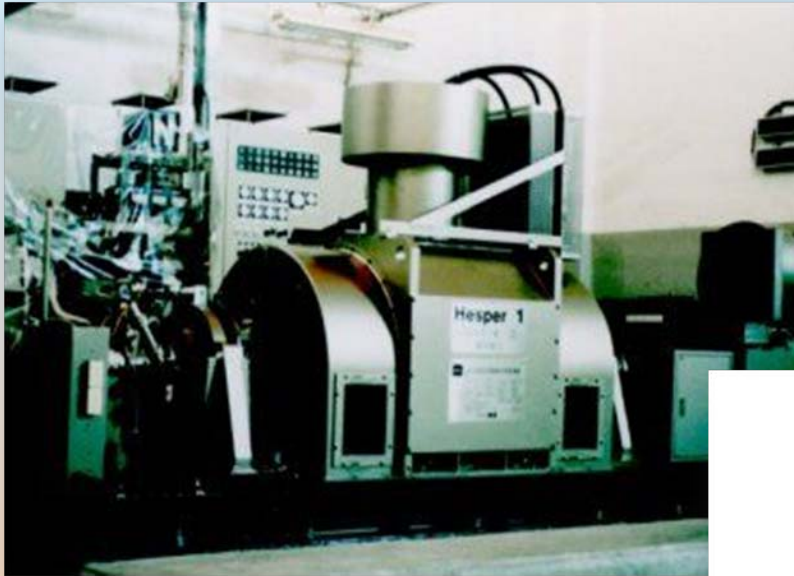


■リニア新幹線・東京～大阪の調査概要

	南アルプス直線ルート	伊那谷ルート
路線の長さ	438* _{km}	498* _{km}
最速所要時間	67分	74分
工事費	8兆4400億円	9兆900億円
輸送需要量	416億人* _年	392億人* _年
年間維持運営費	3080億円	3330億円
設備更新費(50年間)	5兆8100億円	6兆3500億円

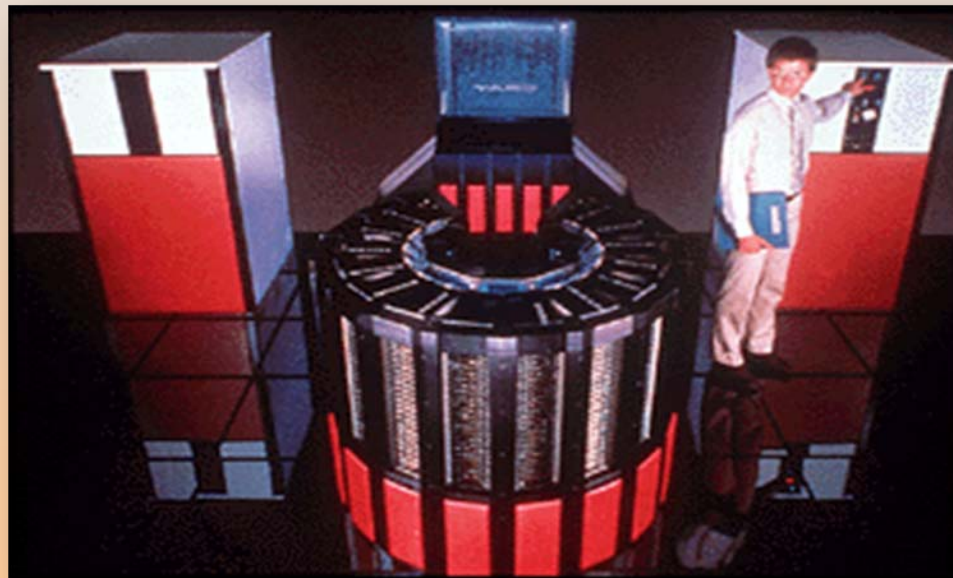
大間線J
阪。のR
開輸長東
業送さ海
初需はの
年要品資
度量川料
のは|か
人東新ら
数京大。
|阪路

超伝導発電機、 超伝導磁石エネルギー貯蔵 (SMES)



スーパーコンピュータへの応用

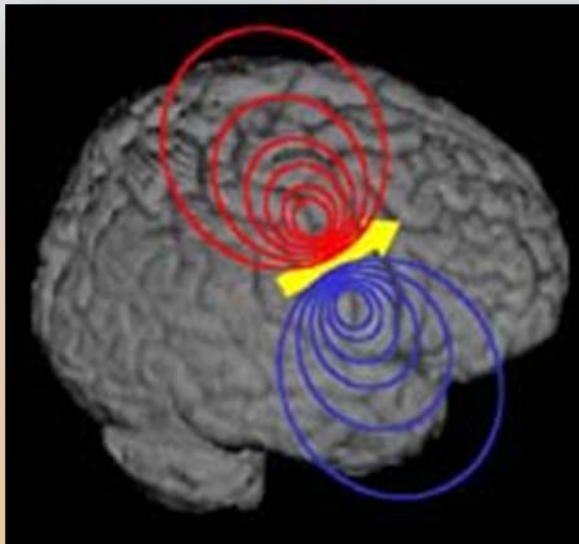
- 超伝導体なしだと
多量の熱、大電力
- 超伝導体を使うと
熱なし、低電力



脳磁計

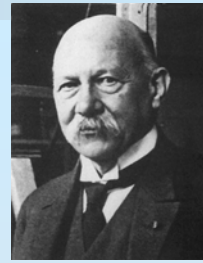
超伝導デバイス (SQUID)

微弱な磁場を測定することにより、
脳の活動を調べることができる。



～超伝導小史～

1911
超伝導発見

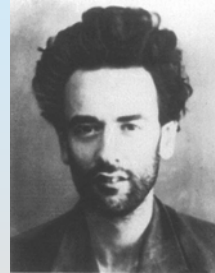


Onnes



全員ノーベル賞

1950
秩序化した波動



Landau

1957
BCS理論



1962
ジョセフソン効果



Josephson

1986
高温超伝導
の発見



Müller and Bednorz



Alexei A. Abrikosov



Vitaly L. Ginzburg



Anthony J. Leggett

超伝導・超流動の基礎理論
(Nobel prize, 2003)

量子論

～ 現代物理学の基礎 ～

粒子と波動



量子論

現代物理学の基礎

素粒子、原子核、物性物理、化学、宇宙論

大ききのスケール

すべての階層で量子力学は重要

量子論 誕生

量子力学誕生前夜(19世紀の終わり)

・ニュートン力学 ・電磁気学 ・熱力学

日常スケールの現象は、ほぼ説明された

ミクロな世界の現象

→ 古典力学で説明されない？

→ 量子論

量子論のパイオニア

まずは4人の巨匠にインタビュー

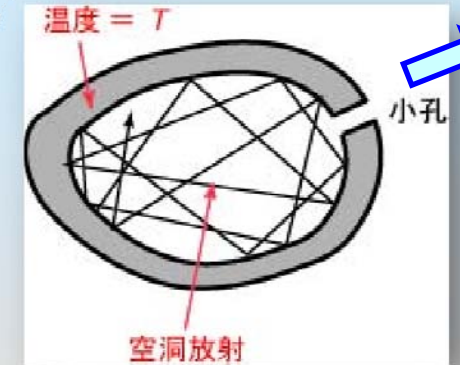


インタビュー1

1. フランクの量子仮説

エネルギーの量子化

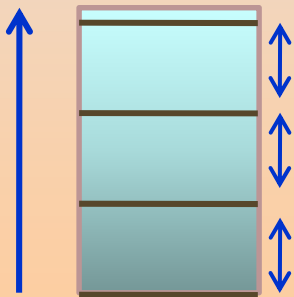
光のというエネルギーは
とびとびである。



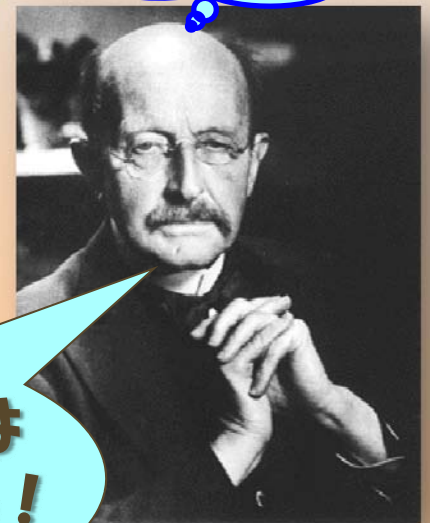
空洞輻射のなぞ

とびとび

エネルギー



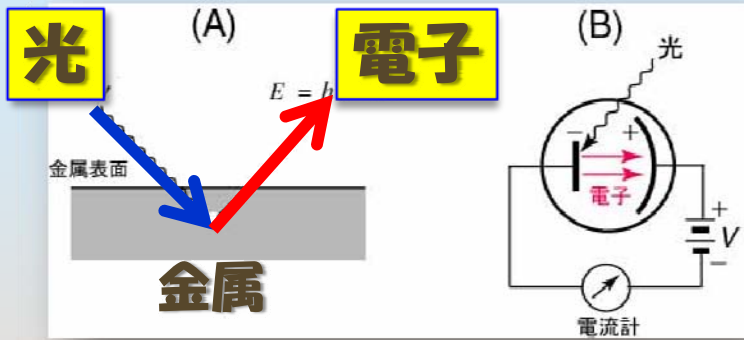
とびとび
の値



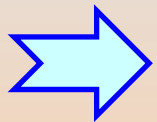
光のエネルギーは
量子化されている！

2. アインシュタインの光量子仮説

インタビュー2



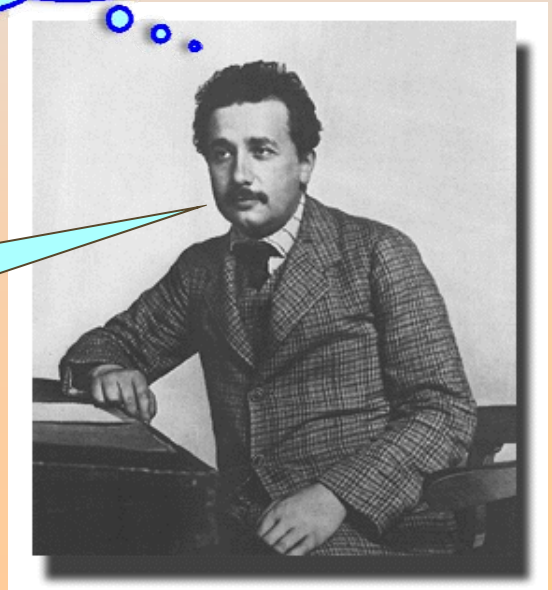
光電効果(ノーベル賞)



光の粒子性

つぶつぶ

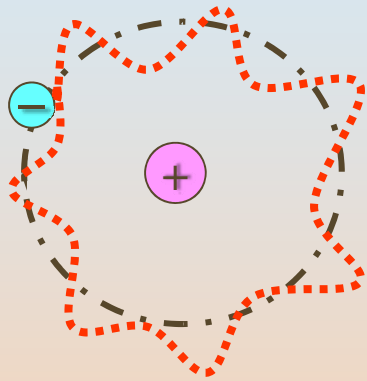
波である光は粒子としての性質も持つ!



3. ボーアの原子構造理論

インタビュー3

「**プランク**の仮説」
+ 「**アインシュタイン**の仮説」



原子が光を放出・吸収する
実験を説明

電子は量子化された安定な軌道に
存在する: **軌道の量子化**



電子は波である!

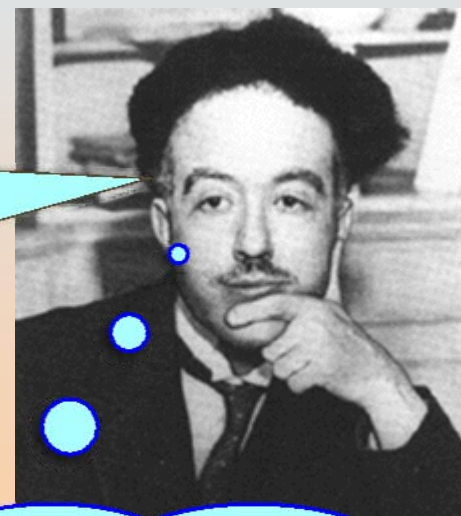
つぶつぶ
じゃないの?



4. ド・ブロイの物質波

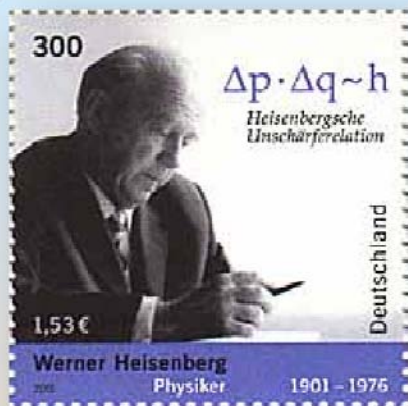
光は**粒子性**と**波動性**を持つ： **二重性**

電子(物質)も
粒子性と**波動性**を持つ



なるほど！
つぶつぶで**波**なんだ！

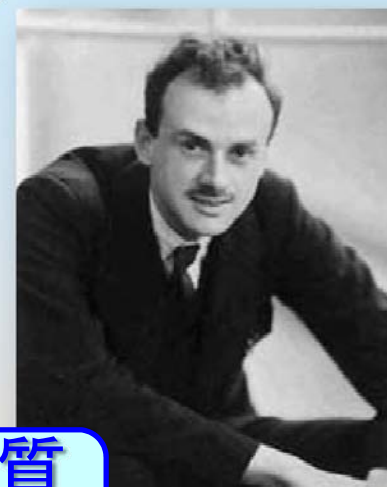
量子力学の確立



Heisenberg



Schrödinger



Dirac

超伝導の本質
but ...??

粒子性と波動性

美しく精緻な理論

多くの実験を説明

マクロな量子現象？

創発！

$$\mathcal{H} = - \sum_j^{N_e} \frac{\hbar^2}{2m} \nabla_j^2 - \sum_{\alpha}^{N_e} \sum_{i}^{N_i} \frac{Z_{\alpha} e^2}{|\vec{r}_i - \vec{R}_{\alpha}|} + \sum_{j \ll k}^{N_e} \frac{e^2}{|\vec{r}_j - \vec{r}_k|}$$

何ともふしぎな粒子たち

フェルミ粒子 & ボース粒子

たくさんの粒子が
集まると??

創発!



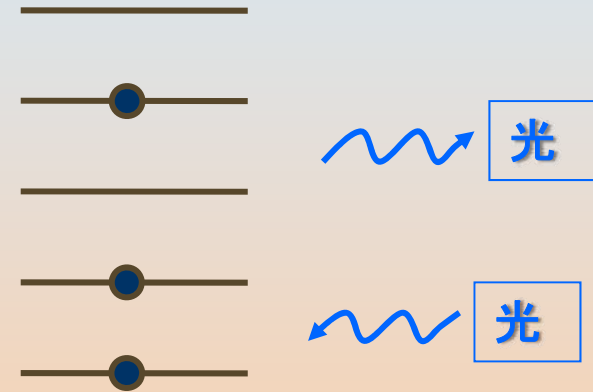
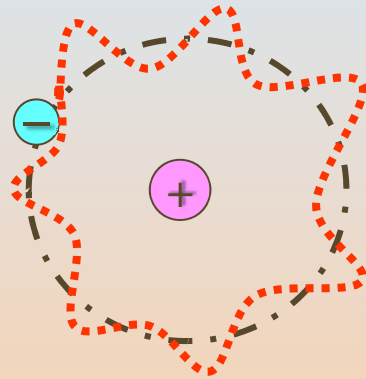
量子力学

粒子性と波動性



量子化：とびとび

水素原子



水素原子の
エネルギー準位

電子は**波**である

→ エネルギー**とびとび**

これは**1個**の粒子（電子）の性質

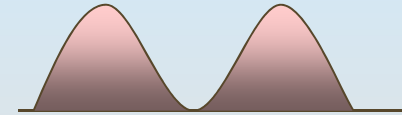
ギモン：多くの粒子が集まると???

量子論に現れる粒子

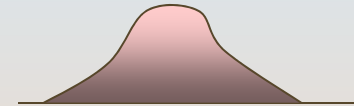
フェルミ粒子 & ボース粒子

フェルミ統計性
ボース統計性

◇ フェルミ粒子 避けあう



◇ ボース粒子 引きあう



フェルミ粒子

電子、陽子、中性子、 ^3He など

ボース粒子

フォトン、 ^4He 、電子のペア など

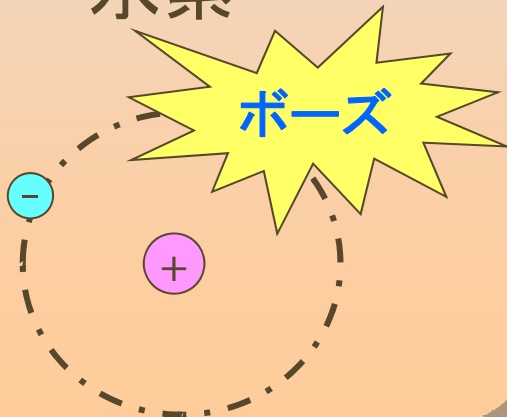
ボースとフェルミの合成則



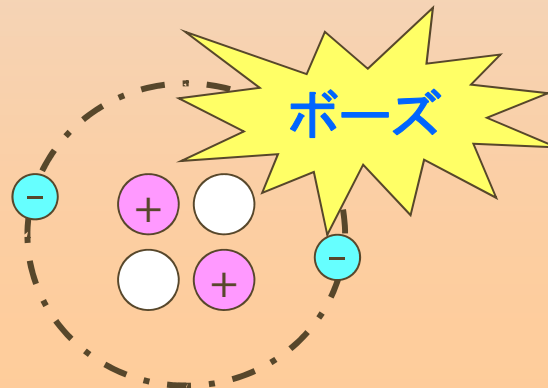
フェルミ粒子: **奇数** (odd) とげとげ

ボース粒子: **偶数** (even) まるっこい

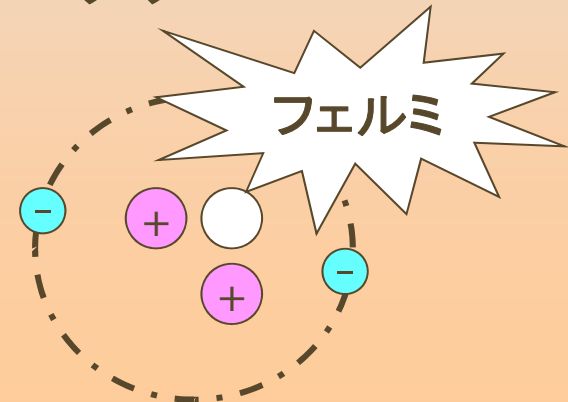
水素



ヘリウム ^4He



ヘリウム ^3He

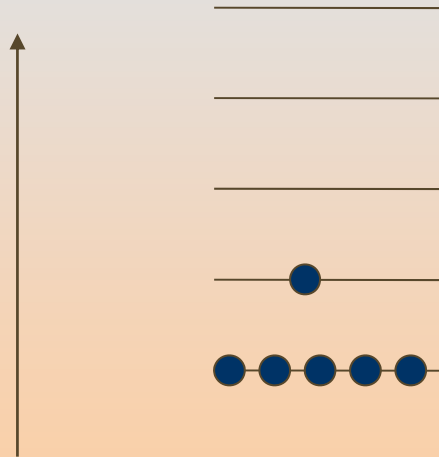


◇ ボース粒子

丸っこい

引き合う

1準位にいくらかでも詰まる

 E 

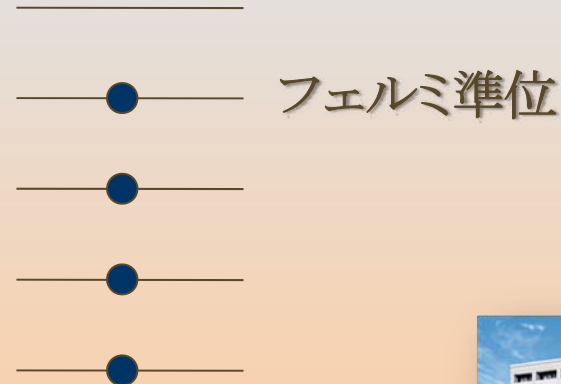
ボース粒子

◇ フェルミ粒子

とげとげ

避けあう

1つの準位に1個まで



フェルミ粒子

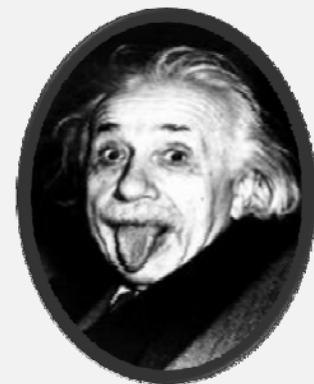
本質的な違い！



ふしぎ粒子 その1

ボース粒子

互いにひきあうと。。。



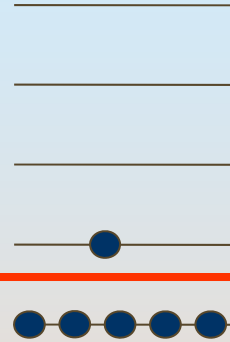
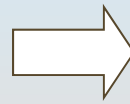
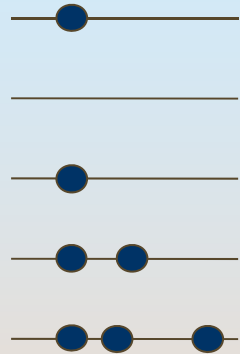
ボースアインシュタイン凝縮

超流動！

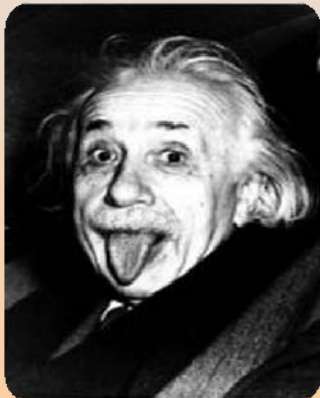


1. ボース粒子とボース・アインシュタイン凝縮

高温



低温



マクロな波動



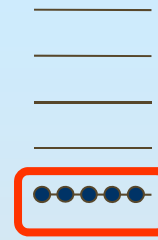
超流動

マクロな量子現象

ヘリウム ^4He

2Kで粘性ない流体

ボースアインシュタイン凝縮



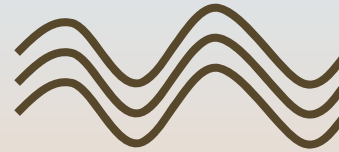
高温



ボース粒子:
量子力学的波動

ばらばらに運動

低温



秩序状態

波動が足なみをそろえる

マクロな波動
マクロ量子現象

超流動

相転移

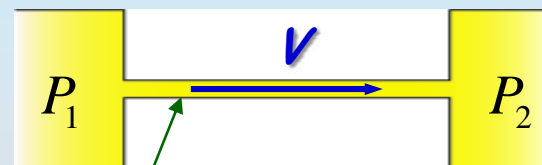


低温の液体—超流動 ^4He

量子統計の威力

1) 超流動性

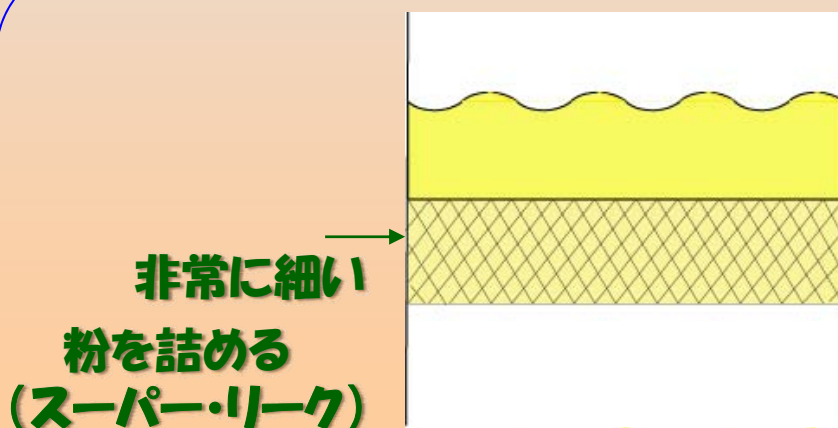
$T < 2.17\text{ K}$
粘性がなくなる



非常に細い配管

$$\Delta P = P_1 - P_2 = 0$$

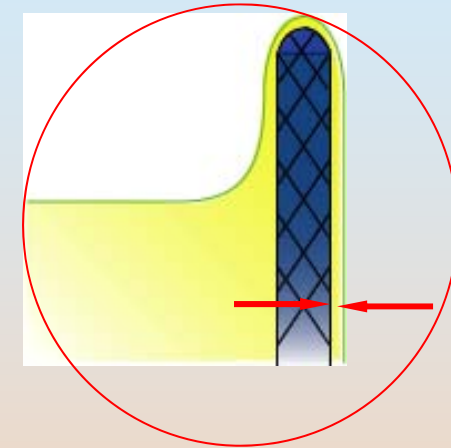
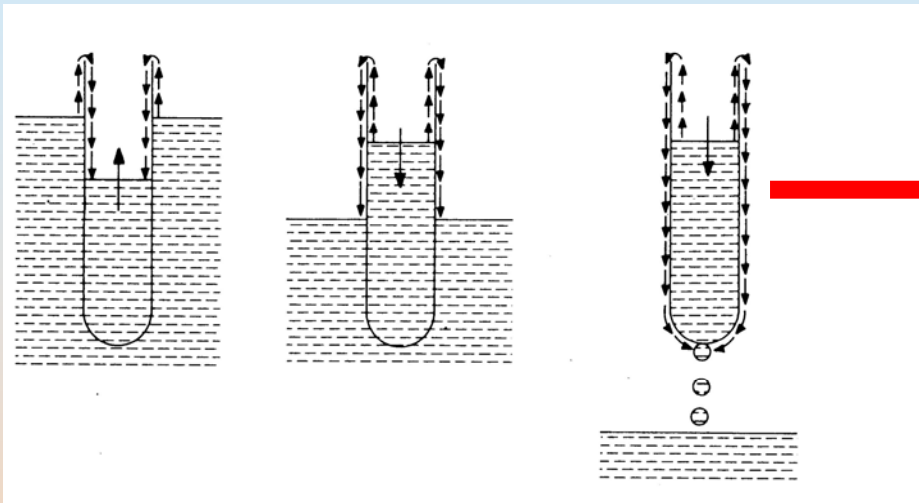
(圧力差なしに流れる)



- $T > 2.17\text{ K}$
まったく流れない
- $T < 2.17\text{ K}$
一気に流れ出る

2) フィルム流の観測

サイフォンの原理



原子100個分
ぐらいの厚さの
薄い膜

**薄い膜を通じて He がビーカーの外に流れ出てしまう。
(粘性がない)**



ふしぎ粒子 その2

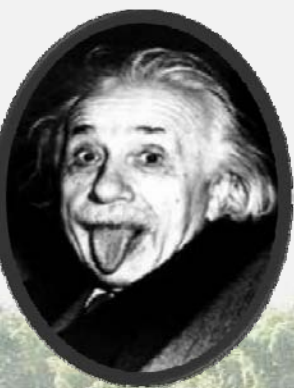
フェルミ粒子



とげとげで反発。。。。

ボースアインシュタイン凝縮

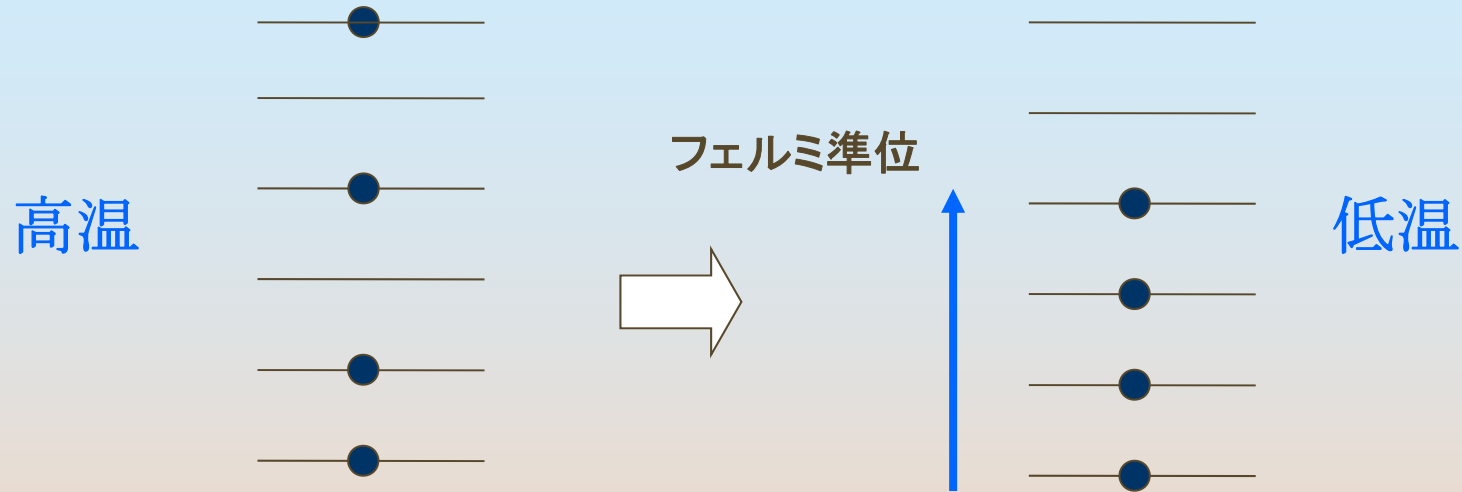
おきますか？



なんと超伝導！



2. フェルミ粒子と凍結状態



ギモン？

ビッシリと詰まった状態
ほとんどの状態が凍結

多様な物性

超伝導 半導体、磁性、誘電体 etc

フェルミ粒子としての電子？！

電子

◇素電荷 e

◇スピン
極微の磁石



上向き、下向き

磁石：結晶中で揃う

フェルミ統計性

同じスピン：反発



異なるスピン：拘束なし



フェルミ統計性

& 多電子の集団運動



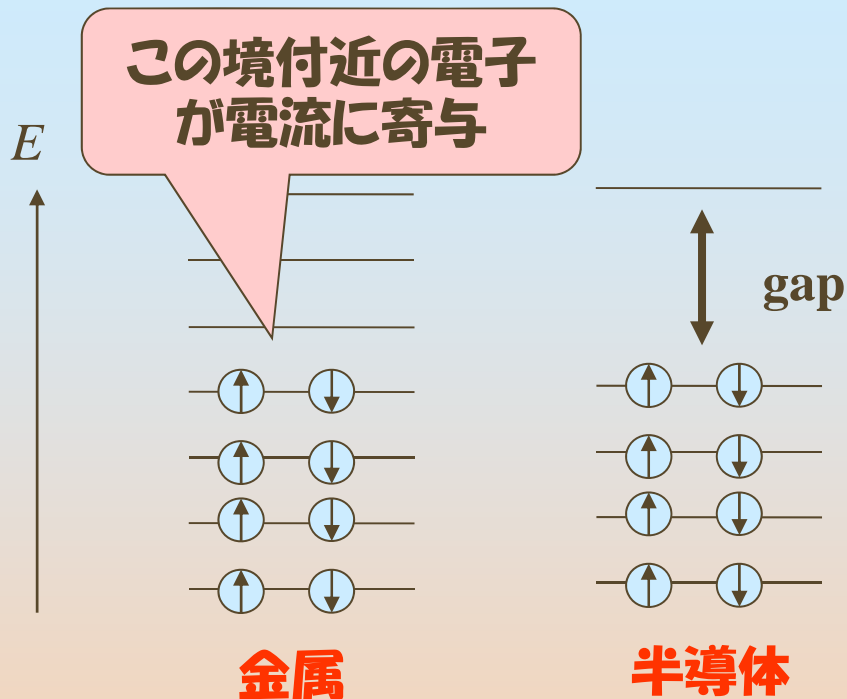
多様な物性

男と女？

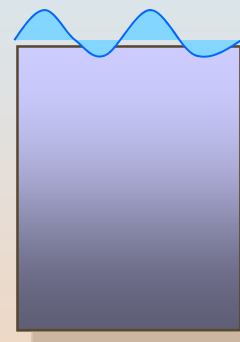
固体中の電子たち

フェルミガス

(自由な電子たち)



フェルミの海



量子化 (とびとび)
フェルミ統計性



金属と半導体の区別

多様な物性?

ギチギチの電子で説明できるか?

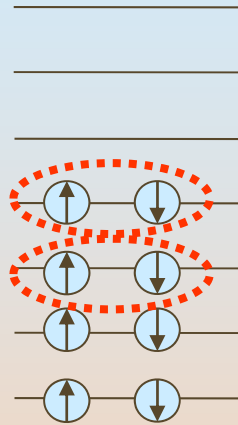
超伝導
磁性
その他

電子間に働く力

相互作用

超伝導

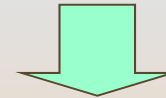
電気抵抗なし



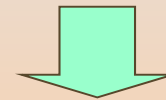
引力相互作用

電子ペア

ボース粒子



ボースアインシュタイン凝縮



超伝導

量子論とフェルミ統計性だけじゃダメ

相互作用の重要性！

多様な物性

創発

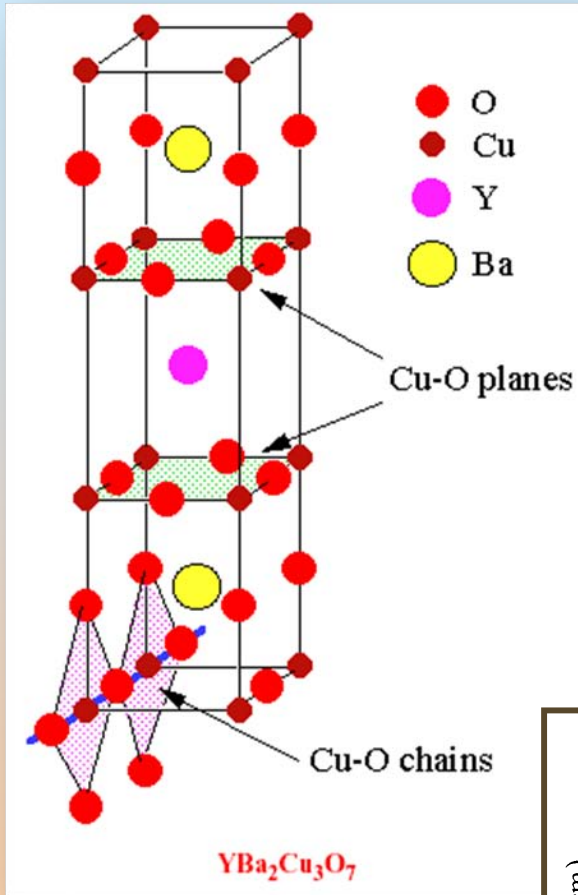
超伝導研究の醍醐味

- ◇ **新しい物質の発見**
- ◇ **新しいメカニズムの予言・検証**
- ◇ **従来にないエキゾチックな現象**
- ◇ **最先端技術への応用**

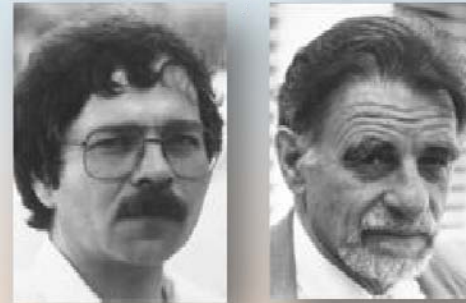


高温超伝導体 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ の発見

1986年



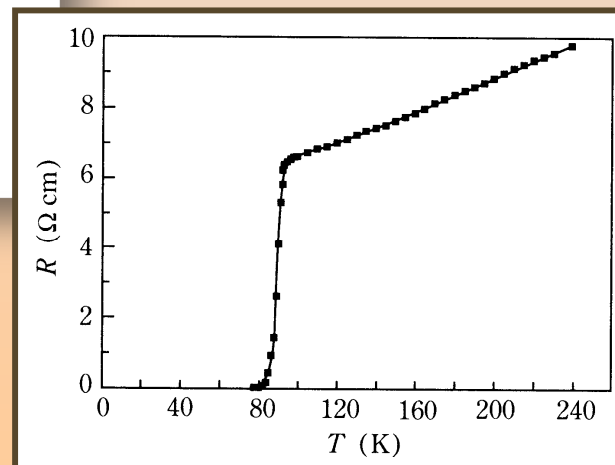
銅酸化物
セラミックスが超伝導に！！



Bednorz & Mueller

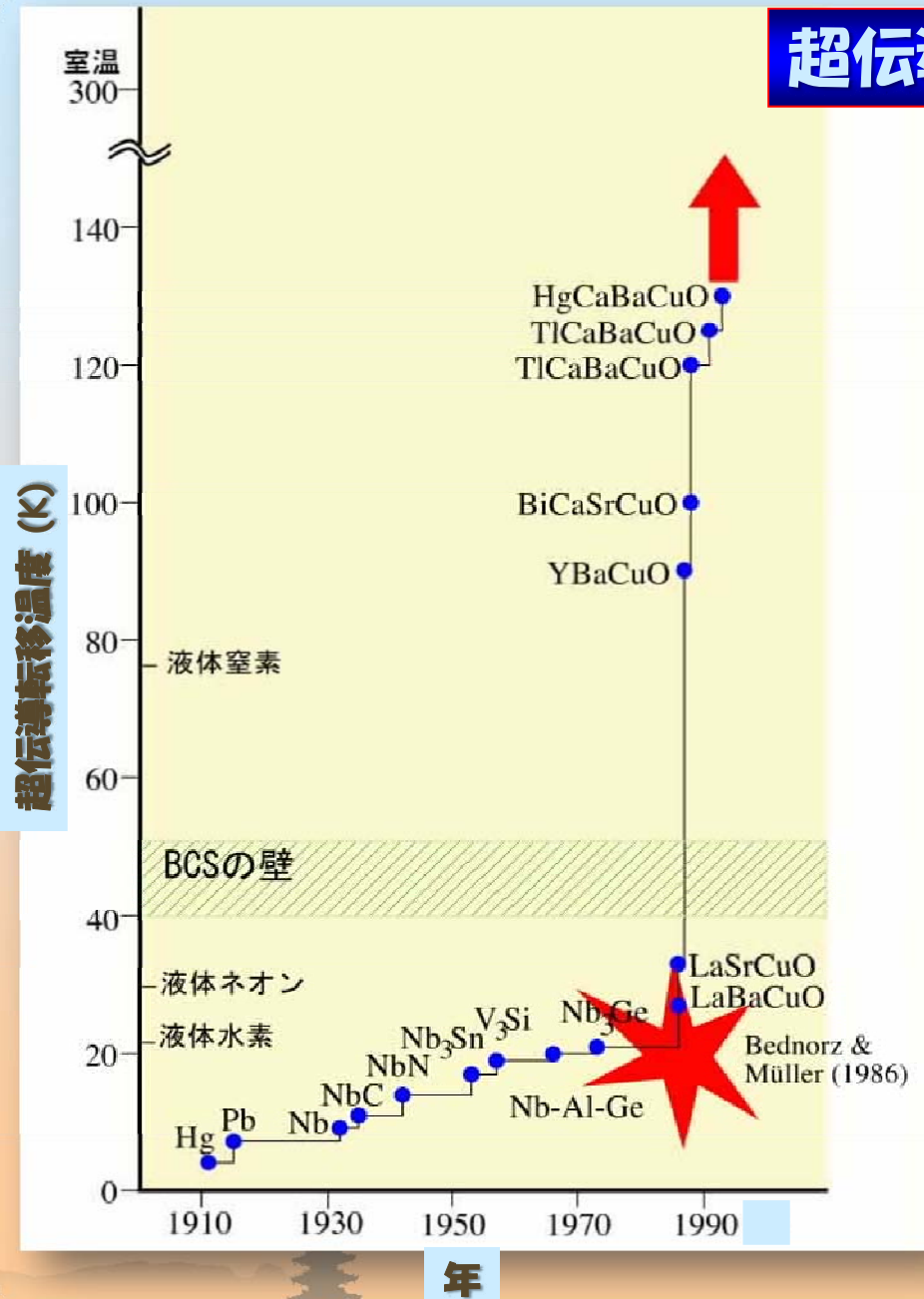


1987年
ノーベル賞



100K 超伝導
なぜ高い？
メカニズム？

超伝導転移温度の変遷



最近の話題： 鉄化合物の超伝導

2008年2月



東工大 細野教授

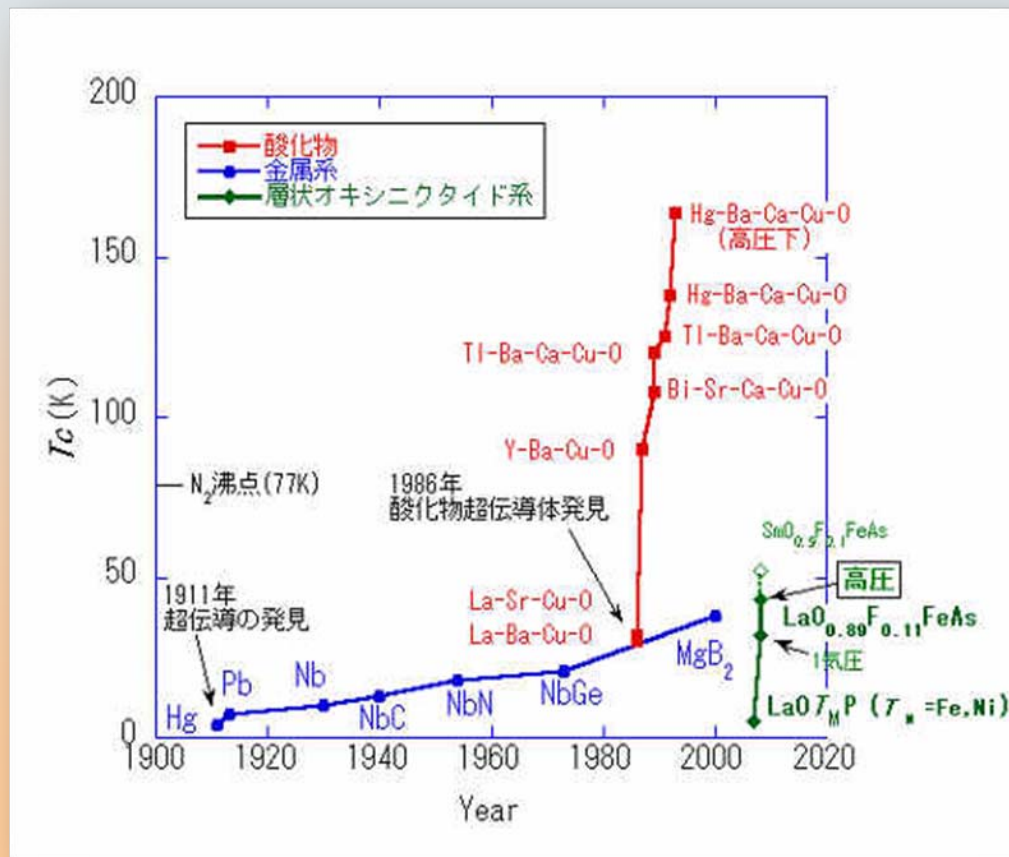


Hot!

鉄が超伝導？ メカニズム？ もっと高く？

研究の流れは、
鉄化合物へ !!

現在なお、
最高の $T_c \sim 55 \text{ K}$



ダイヤモンド・セメントも超伝導に

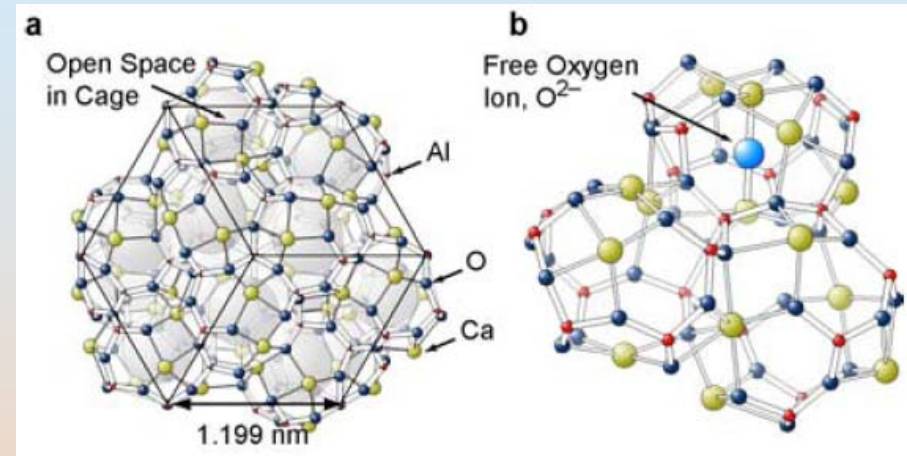
ダイヤモンド



一部のC原子をB原子で
置換すると超伝導に！

$$T_c \sim 6 \text{ K}$$

アルミナセメント

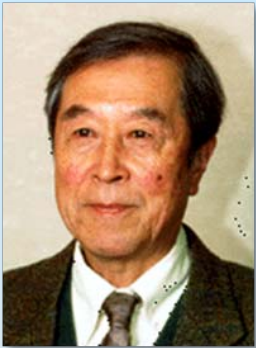


$12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$ の結晶構造
 $T_c \sim 0.4 \text{ K}$



南部先生に いんたびゅー





2008年ノーベル物理学 世界の南部

素粒子物理学と核物理学における
自発的対称性の破れの発見

1957年 超伝導のBCS理論

BCS理論の不備にいらだち、とよこなる

1960年 対称性の破れ
素粒子物理の潮流作り上げる

素粒子とか物性とか
境界ないでしょ。

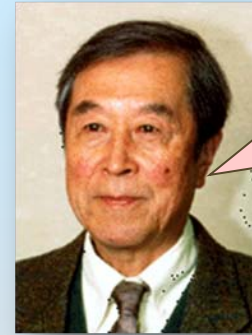
→ 小林 - 益川



はー、
そーですよね。。

対称性の破れと相転移

高温での対称性が破れ
低温で**秩序状態**



素粒子論に
使えるかも



2008

磁石



高温



低温 **秩序状態**

超伝導



対称性の
破れ

超伝導のBCS理論

素粒子物理学と核物理学における
自発的対称性の破れの発見

素粒子物理の 潮流作り上げる



レーザー冷却原子 Cold atoms

～ 量子物理の新たな研究舞台 ～

物性物理、レーザー物理、原子物理
の紡ぐ新たな世界



やっぱり
境界
ないでしょ。



レーザー冷却

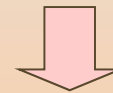
量子力学的効果とドップラー効果

原子気体の温度を下げる

6×10^{-8} K の低温まで到達可能

冷却された原子集団

Rb, Na, Li, H, Yb など



京大

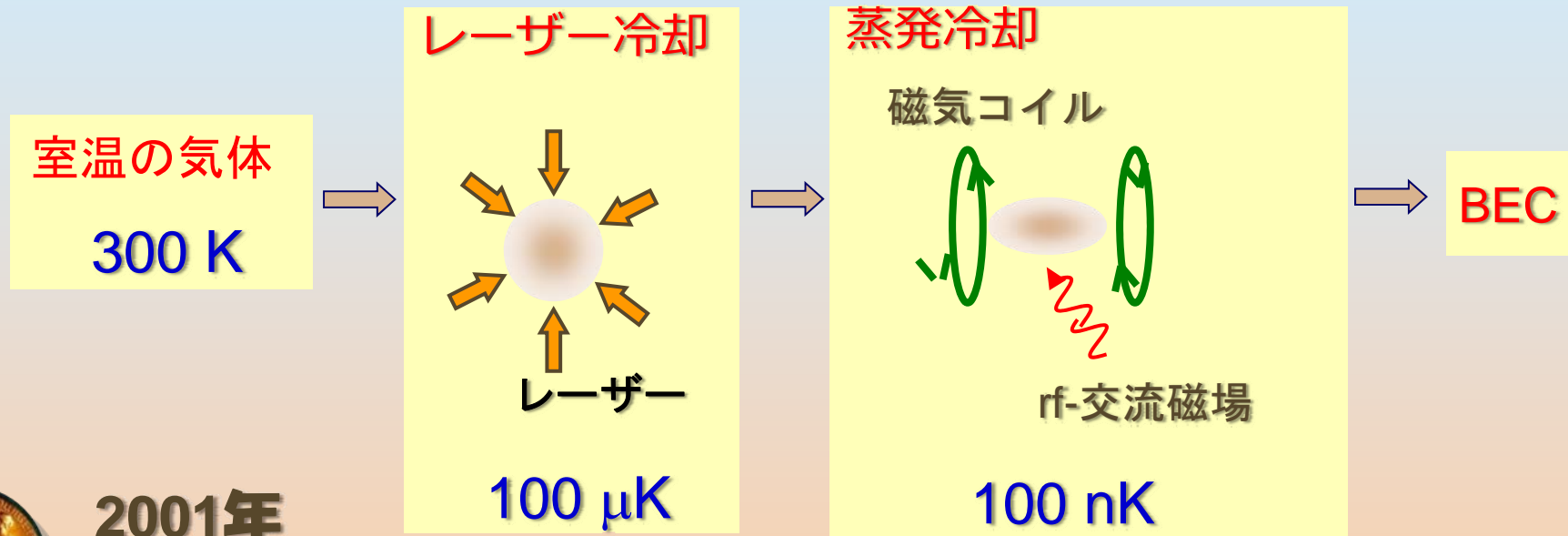
理想的な量子力学系

ボーズ・アインシュタイン凝縮 (BEC)



BECの作成法

中性原子: ^{87}Rb , ^{23}Na , ^7Li , ^1H , He^* , ^{41}K , ^{133}Cs , ^{174}Yb



2001年
ノーベル賞

$$n \cdot \lambda_{dB}^3 \sim 10^{-6}$$

冷却時間=100 ms

$$n \cdot \lambda_{dB}^3 \sim 1$$

冷却時間~10 s



Eric A. Cornell



Wolfgang
Ketterle



Carl E. Wieman

How to observe ?

超流動性？

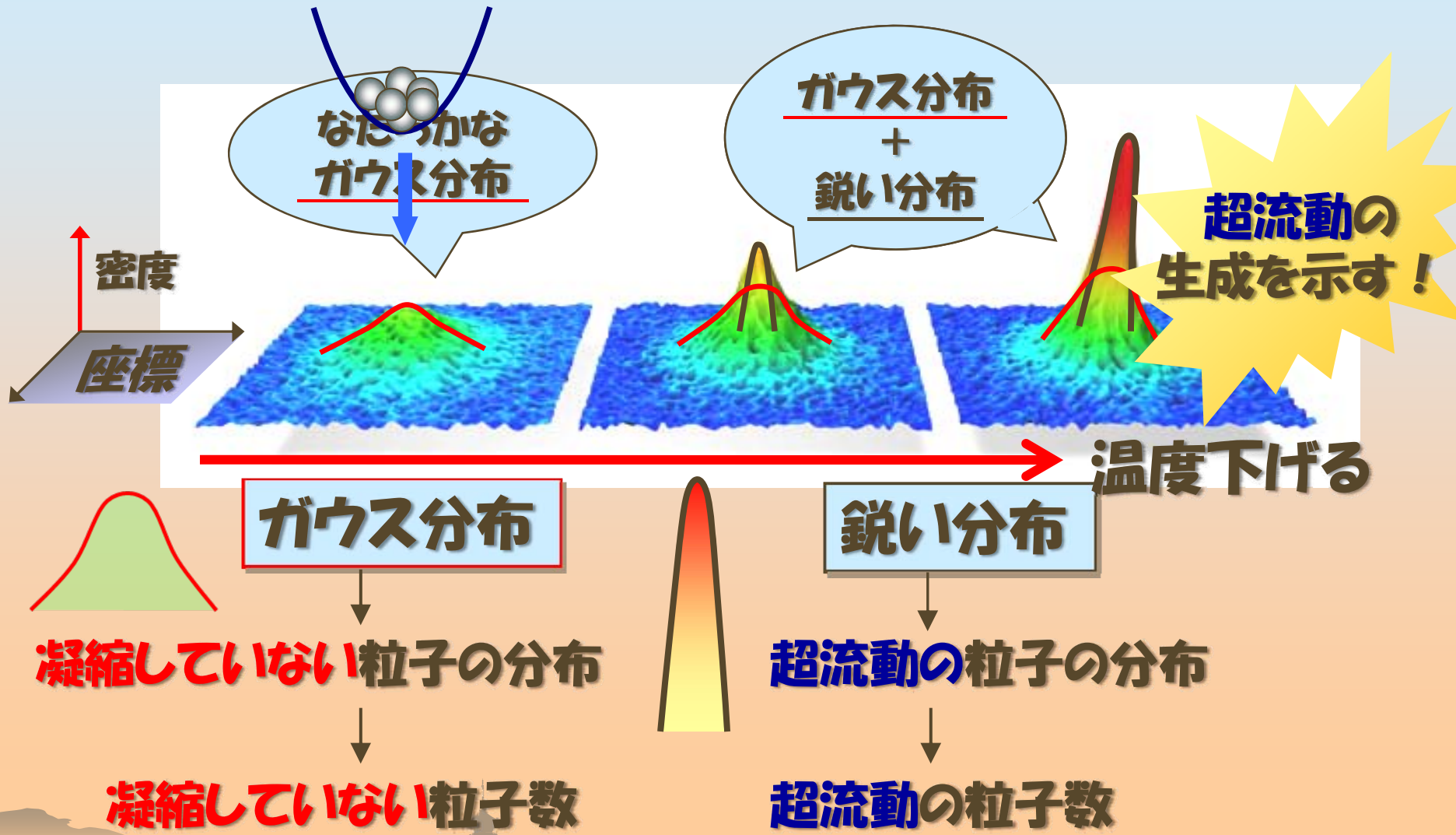
抵抗をはかることはできないし。。



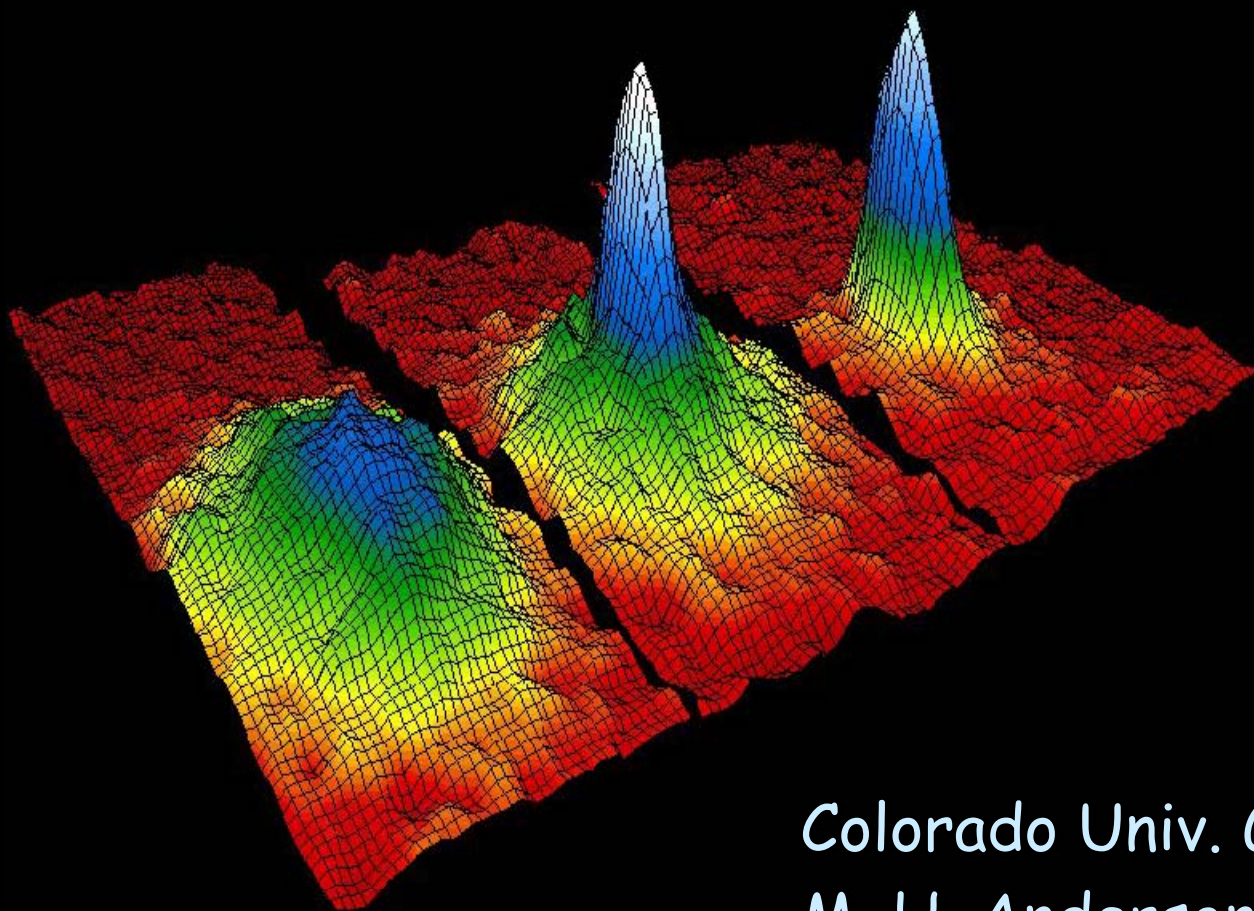
Time-Of-Flight法 (飛行時間法)



超流動の観測

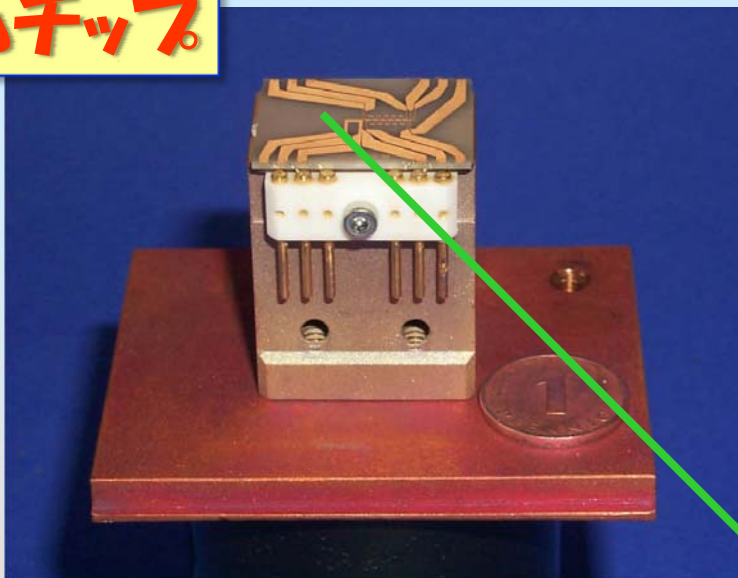


Rb原子のボース・アインシュタイン凝縮 (TOF像)



Colorado Univ. Group
M. H. Anderson *et al.*,
SCIENCE 269, 198 (1995)

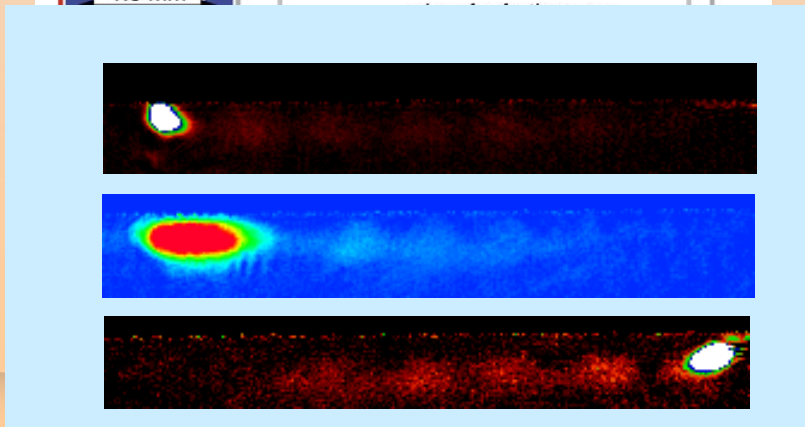
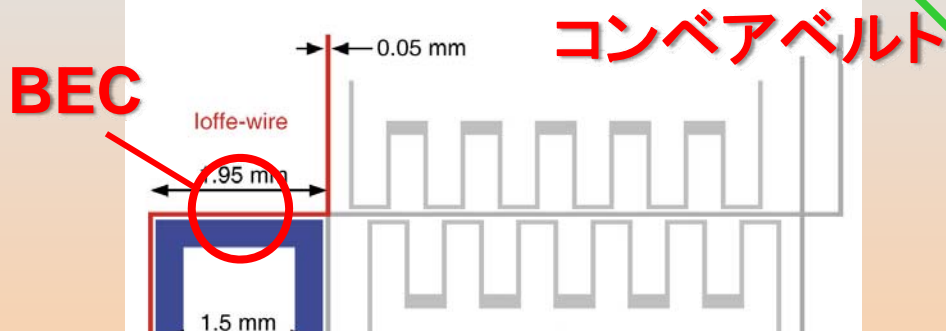
アトムチップ



<http://www.mpg.de/~jar/>
マックスプランク研究所
(ドイツ)



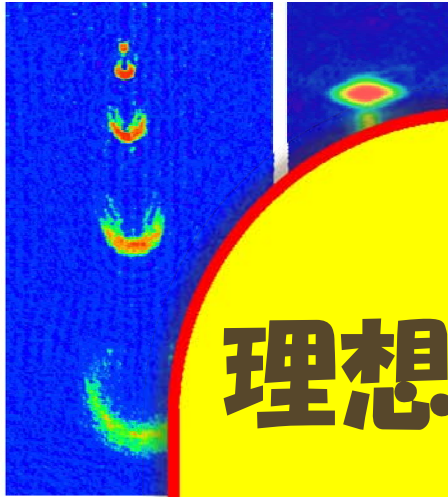
T. W. Hänsch
(Nobel Prize, 2005)



Various Applications of Atomic Quantum Gases

Atom Laser:

コヒーレントな物質波



冷却原子

理想的な *New* 研究舞台

量子物理

Cold atoms are very hot !

まとめ

物理学

著しい現象:

マクロな量子現象: 超伝導・超流動

超伝導理論:



素粒子の質量の起源

普遍性



創発性

最先端物理学

分野の境界を越えて

- ◇ 豊富な実験 新奇な現象の発見
- ◇ 理論の進展

多様性、普遍性、そして創発性

京大物理
キーワード

***Thank you
for your attention !***

