



仁科記念 講演会

挨拶

仁科記念財団理事長
小林 誠
東北大学理学研究科長
福村裕史

主催

仁科記念財団

共催

東北大学理学研究科

お問い合わせ

東北大学理学研究科(田村)022-795-6451

2011年11月30日(水)
16:30-18:30
東北大学理学研究科
大講義棟

超伝導発見から100年 前野悦輝 京都大学

×

「奇妙」な原子核 橋本 治 東北大学

超伝導発見から100年



1890-1951

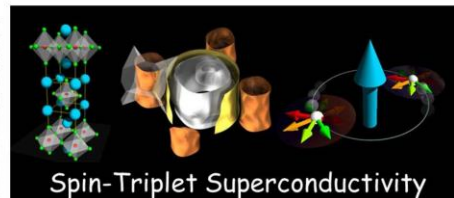


1911

前野悦輝(京都大学)



1986



Spin-Triplet Superconductivity

図 1

前野：どうもご紹介ありがとうございます。皆さん、こんばんは。たくさんの方に来ていただきましてありがとうございます。

先の震災では本当に驚かれたと思います。大変な思いをして復旧にあたっておられると思います。心からお見舞い申し上げます。

先週、近県で研究会がありまして久しぶりに仙台に来させていただきまして、研究室のOBだった人たちともお会いできて、ほっとしました。それから仁科記念財団の皆さんには、この機会を与えていただきましてどうもありがとうございます。実は超伝導について—私はやっぱり研究者がどういうことをしてこられたかというのはいろいろ興味がありまして—自分なりにちょっとネタ話がありまして、それをご披露できる機会を与えていただきまして非常にうれしく思います。

前半は100年前の話をさせていただきます。6割ぐらいなのですが、あと3分の1ぐらい高温超伝導の発見の話もさせていただきたいと思います。それでは始めます。

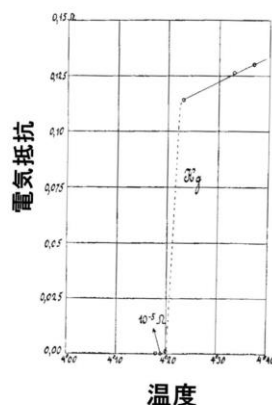
まず、仁科博士は1890年のお生まれですから、100年前、1911年の超伝導の発見のときには21歳でいらっしゃった。そのころの話を前半にさせていただきます。

そして1986年が高温超伝導の発見です。これが私どものしている研究の最初です。まず、いろんな方がおられると思いますので、今日はあまりテクニカルな話はせずに発見にまつ

わる研究者の話というか、どういう形で発見されてきたかというようなお話です。

超伝導体の2大特徴

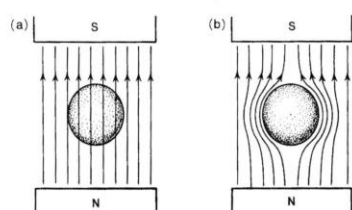
1. 電気抵抗がゼロ



臨界温度 T_c (転移温度)

2. マイスナー効果

(完全反磁性)



$T > T_c$: 常伝導

$T < T_c$: 超伝導



超伝導体は、
磁場をはねのける。

図 2

超伝導には2つの特徴が、一番大きな特徴として2つあります。まず「電気抵抗がゼロ」である。そして電気抵抗ゼロになる温度を転移温度、臨界温度、 T_c と呼んでおります。それからもう1つは「完全反磁性」。マイスナー効果といって、弱い磁場ですと、磁場をはねのける。磁束をはねのける作用があります。それによって、これは超伝導体の上に磁石が浮いている。こういうことが起こります。

今日はこの話（左図）ですね。このデータがいろんな教科書に出てきますけれども、これは水銀、 Hg と書いていますが、このデータが取られたのがちょうど100年前。10月26日です。

*Door Meten
tot Weten*
Knowledge through
Measurement



Former Kamerlingh-Onnes Lab.
in Leiden, the Netherlands



1853-1926

カメリン・オネス(オランダ)

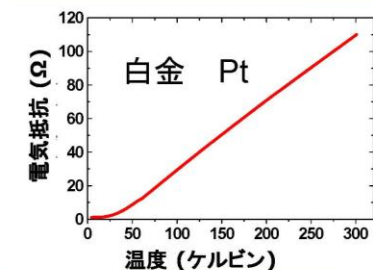
図 3

そして前半部分の主人公は、このカメリン・オネスさんです。“Door Meten tot Weten”という言葉を自分のモットーとして残しておられます。“Knowledge through Measurement”「計測から知識へ」という、そういう言葉です。これについてちょっと後でまたお話しします。

そしてこれが超伝導発見のときの実験室のあった建物でして、カメリン・オネス研究所、現在はカメリン・オネス・ビルディングといいまして、文化系の学部が、ライデン大学の文系の学部が使っております。これは今年の4月に撮影、写真を撮ったものです。ここの建物の前に、ここに像があるのは分かりますかね。これの拡大写真がこれです。これがカメリン・オネスさんで、ここで“DOOR METE TOT WETEN”と彼のモットーが刻んである像がここに立っております。

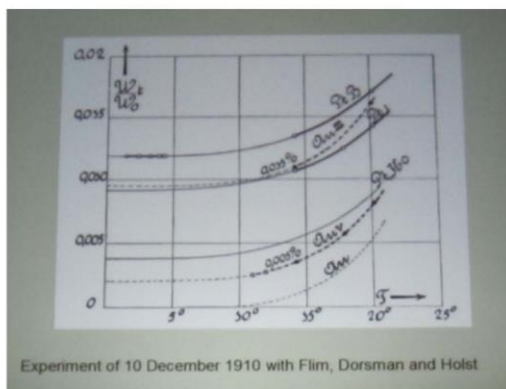
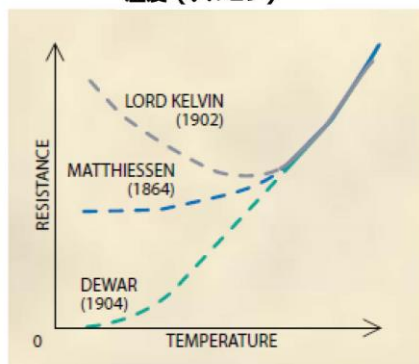
カメリン・オネスさんは1853年生まれ、1926年に亡くなっておりますので、1911年のときには58歳。100年前、わりにご高齢でこういう大発見をされたという人です。

低温での金属の電気抵抗



1900-1910における物理学の重要問題:

$T = 0 \text{ K}$ (絶対零度)で
金属の電気抵抗はどうなるか?



とちょっと下がる。これは白金ですが、金になりますとこうなつて、ここにデータがありまして、これは予想なんでしょうか。もっと純度が高い金だとだんだん、次第にこうゼロになっていくんだらうというのがこのあたりまでで分かったこと。従つてケルビン卿は正しくなかつた。だんだんゼロ。この辺まできても発散はしない。

超伝導はいつ、どのように発見されたのか？

カメリン・オネスの実験ノート： 第56巻(-1910), 第57巻(1911, 10月-)

超伝導の発見は 1911年4月頃のはず。肝心の実験ノートは紛失？

Peter Kes教授(ライデン大学 オネス研究所 前所長)：

2009年定年後、すぐにオネスの実験ノートの解読に着手。

第56巻にマダム・キュリーがライデンに到着との記述。→これは1911年7月とわかっている！

オネスはノートに間違つた年号を書いていた！！

ゼロ抵抗の初めての観測は

1911年4月8日4PMと分かつた。

"Kwik nagenoeg nul"(水銀、ほとんどゼロ)

Kes教授による

経緯紹介のビデオをどうぞ！

約2分間

2011年4月8日：

記念式典(ライデン)で録画

図 5

そして、次に来るのが「超伝導の発見」なのですが、いつ、どのように発見されたのかというのが、実は2年前まで分かつてなかつたんですね、詳しくは。ヘリウムを液化した1908年のことは詳しく実験ノートが残つていまして、いろんな本でもその瞬間とか当時の様子が書いてあります。ところが、超伝導の発見の日に関何があつたかというのは、いろんな逸話が流布していまして、例えばそれはよく通俗本とかにも書いてありますし、『Physics Today』での記事でも書いてあつたことがあるんですけども—それは手伝いをしていた、徒弟みたいな感じの人たちがちょっと居眠りをして、ブルーボールと言われてるんですが、居眠りをしてヘリウムの温度が上がっているのに気が付かなかつた。ちょっとその操作のミスという形、途中で居眠りをしちゃつたんで温度が上がつて、それで水銀の抵抗がぐつと回復するのが分かつた。それによつて、実は温度が上がらないときは急速にゼロ抵抗になつたんだというのが分かつたという話が流布してたんです。

実際そのカメリン・オネスの助手をしていたドースマンという人の息子さんが、この次

に出てきますピーター・ケスさんという教授（カメリン・オネス研究所の所長）のところに、もう 20 年近く前になりますが電話をしてこられて、話をした際にもお父さんからその話を聞いているという話がありました。ですから、カメリン・オネスの助手の息子さんからもそういう話があったので、そういう話だなということになっていました。

ここに書きましたようにカメリン・オネスの当時の実験ノートは第 56 巻、57 巻と、これはライデン市の博物館に保存されているんですけども、56 巻には 1910 年までの日付が書いてあります。57 巻は 1911 年の 10 月から始まっています。超伝導の発見は 1911 年の 4 月ごろのことなので、その肝心のノートが何か紛失しているんじゃないかという話もありました。

ケス教授はライデン大学のカメリン・オネス研究所の所長を務められた元所長なんです。が、2009 年に定年されて、すぐにこのオネスの実験ノートの解読に着手されました。その結果、第 56 巻にマダムキュリーが、キュリー夫人ですね、マリー・キュリーがライデンに到着したとの記述がありました。これは 1911 年の 7 月と分かっています。ですから、この 56 巻の記述は、実は年号が間違っていたということが明らかになりました。それで随分つじつまが合いました。

Leiden, April 8, 1911

4 PM

Kwik nagenoeg nul
(Mercury practically zero)

ゼロ抵抗発見と同じ日の記述に：
「液体ヘリウム4の沸騰の様子が、
1.8Kまで冷える前に変化した」、
とある。これはオネスの実験ノート
に現れる初めての「超流動転移」の
記述。

「超伝導」と「超流動」は同じ日の
同じ実験で観測されていた！

超流動の性質の発見は1937年、
カピッツァによる (1978年ノーベル賞)

Lab notebook by Heike Kamerlingh Onnes

D. Van Delft and P. Kes: *Physics Today* 38-43 (Sep. 2010).

図 6

ゼロ抵抗の初めての観測は1911年4月8日の4時と分かりました。そのノートには“Kwik nagenoeg nul”（水銀、ほとんどゼロ）という具合に書かれております。それが2年前によりやく分かりました。これについては『Physics Today』で2010年ですかね、に出ております。

ケス教授によるこの経緯紹介を【ビデオ】をちょっと見ていただこうかなと思います。この後、話をしますが、この4月8日を記念して、ライデンでは2011年の4月8日に記念式典が行われました。先ほどお見せした図4の写真、デジカメ写真を写したような図はその記念式典でピーター・ケス教授が講演されたときの写真を撮ったものです。

ケス教授とはだいぶ前から、もう20年近く前からこの話で結構盛り上がっている仲でございまして、そんなんでいろいろ情報も提供していただいています。今回の日本物理学会誌に、これは日本物理学会誌の7月号です。今年の7月号に私と岩佐さん、鹿野田さん、3名でこの式典に出た3名で記事を書きました。このときにもいろいろ写真等、博物館から許可をもらったり、ケス教授から直接写真を頂いたり、事実関係を確認したり、そういうことをさせていただきました。

この式典でケス教授はフォーマルな講演をされたんですけど、そのときにはこの発見した、実は自分の話はされなかったんです。カメリン・オネスの100年前の話ばかりされたので、午後にほかの人の講演の司会をされたんですけど、その前に皆さんがやっぱりちょっとこの発見、ノートを解説したところの経緯をちょっと皆に紹介してくれと言われたんですね。それで2分間、その話をされました。

マリー・キュリーとかは一ちょっと音が聞こえにくいかもしれませんが、概略を言いますと、そのノートを一生懸命解説した。読みにくいノートを解説した。そしたら、マリー・キュリーがライデンに到着ということが書いてある。超伝導発見のすぐ近くに。それを調べてもらったら、1910年じゃなくて11年だということがこれでもう分かった。そんなお話です。じゃあ、ちょっと聞いていただきます。2分ぐらいで終わります。話はピーター・ケスさんでカメリン・オネス研究所の元所長さんです。

【ビデオ紹介】

そういうことでした。ですから、研究所の所長さんを定年されて、そしてすぐにこれに、解説に取り掛かって、そしてですね、月はこれで4月、5月で符号する。年だけは合わないということで、そうするとそのノートの最後のほうにキュリー夫人がライデンに来たという話があって、これが1911年ということは分かっている。その博物館の館長さんのデルフトさんという人と、それからライデンのカメリン・オネス研究所の前の所長さんである、デュブルイン・オーボータン、仙台で、デュブルイン・オーボータンというのはよくご存じの方おられると思うんですが、その3人でそれを突き止めたという、そういうお話でした。

そしてこのちっちゃいノートというのはこれなんですね。4月8日、ここにオランダ語で4時、発音はよく分かりませんが“Kwik nagenoeg nul”ですか、“Mercury practically zero” near zero という意味らしいですけども、要するに水銀の電気抵抗が実質上ゼロになったという初めての記述があります。これについては博物館の館長さんのデルフトさんとピーター・ケスさん、先ほどの教授が『Physics Today』の9月号、失礼、2010年ですね、1年前に出ています。このアーティクルは自由にダウンロードできるので、どなたでもダウンロードして読んでいただけます。

そこに書いてあることでもう1つ驚くべきことがありまして、ゼロ抵抗を発見したのはこの4月8日の日ですが、同じ日に「液体ヘリウム4の沸騰の様子が1.8Kまで冷える前に変化した」という同じ日の実験です。記述があります。これは、実は液体の話ですね。オネスの実験ノートに現れる初めての「超流動転移」の記述なんです。ヘリウム4の超流動というのは2.2度ぐらいで起こります。水銀の抵抗を調べるために温度を下げたり上げたりしていたわけですが、そのときにヘリウムの沸騰という変なことが起こるということが、初めてノートに、ここに、ケスさんによると初めて、同じ日の同じ実験で「超伝導」と「超流動」と「同時に発見」しちゃったというわけです。

ただし、このヘリウムの異常（超流動性を持つ）というのは1937年まで待たないといけません、それによってカピッツァさんはノーベル賞をもらっております。

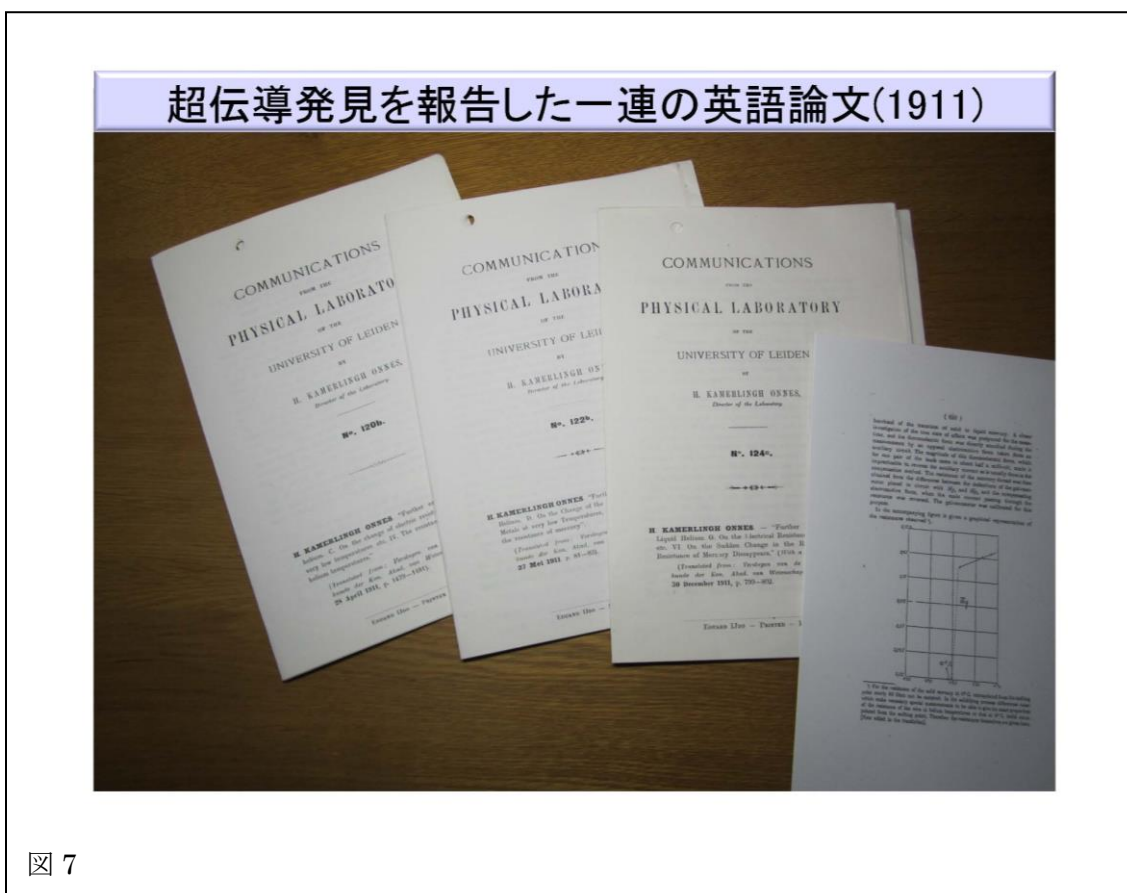
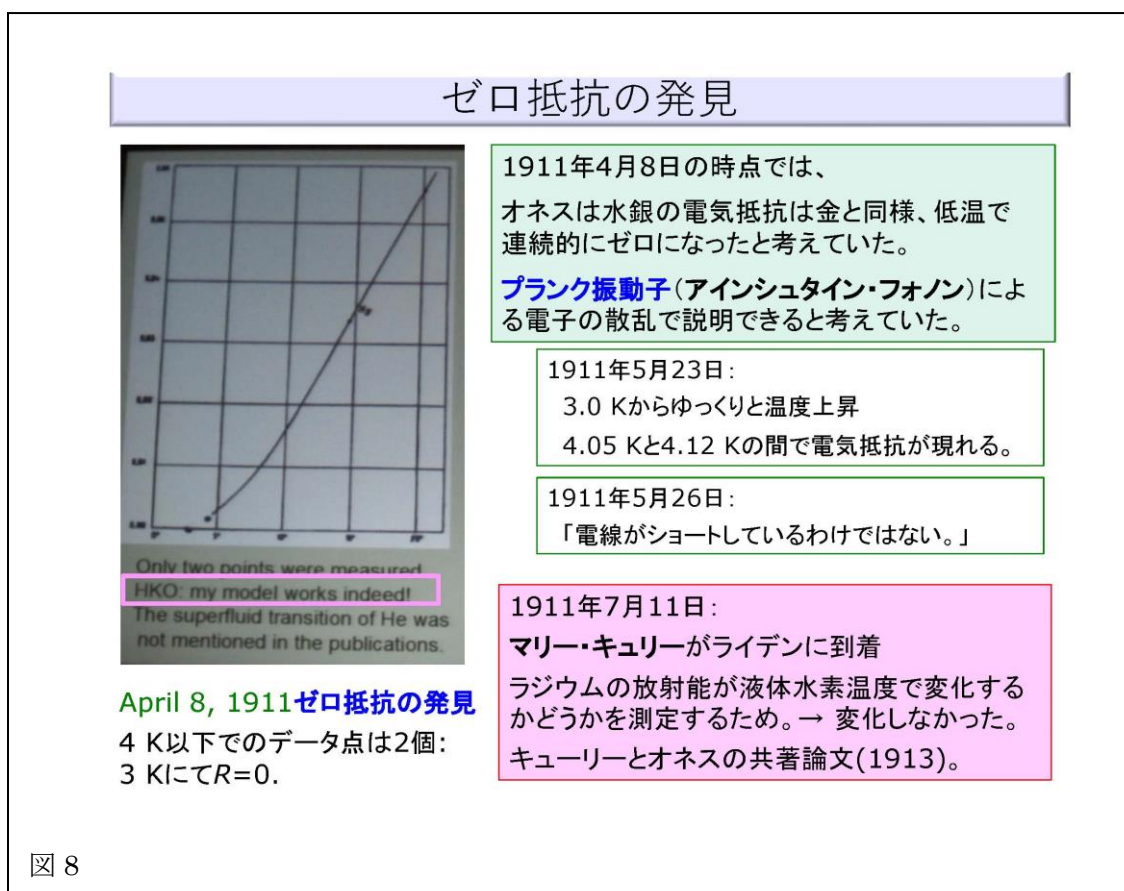


図 7

これがその超伝導発見を報告した一連の英語論文です。これが4月、これが5月、これが10月。そしてこの10月の論文にはいろんな教科書で引用されている水銀の電気抵抗ゼロの図が載っております。これは英語で書かれているから英語の翻訳になるんでしょうかね。コミュニケーション・フィジカル・ラボラトリー・オブ・ライデンユニバーシティという、ユニバーシティ・オブ・ライデン、大学の季報みたいなものですね。そしてこれはカメリン・オネスの単著です。そういう論文に書かれております。これも英語で平易に書かれていまして、100年前の英語といっても非常に読みやすい。ちょっと図のスタイルが花文字みたいなのがいっぱい出てきますけれども、文章自身は平易な英語で書かれております。



そしてこのゼロ抵抗の中身についてちょっとお話ししますと、これが4月8日です。ゼロ抵抗の発見(左図)。データ点が2点しかないということなんですね。4 K以下では。水銀の超伝導転移はこのあたりなんです。ただ、こことここしかないのでカメリン・オネスはゼロ抵抗になったと書きながら、同時に“My model works indeed” —私のモデルのとおりうまくいっていると言っています。このモデルは何かと言いますと、プランク振動子のモデルと言っています。これは要するにアインシュタイン・フォノンですね。単一の周波数、振動周波数を持つフォノンによる散乱。そのフォノンの振動を考えると電気抵抗は下がっていくという。ですから、連続的に下がっていくというモデルに合うと。ですから超伝導転移とは考えてなかったんですね、この時点では。ゼロ抵抗だけでも、急速にゼロ抵

抗になっていくという、そういう考えをカメリン・オネスはこの時点ではしていたことがこのノートブックから分かります。

その後、この実験をするたびに新しい装置を作るんですね。この後、これ本当にゼロかというのを試すために、この5月とかの装置は水銀は液体ですけども冷やすと固体になります。そこからリード線、電気抵抗を測るためのリード線を持ち出してくるんですけども、そこの熱起電力みたいなものを心配しまして、室温まで全部水銀で持ってこようと。水銀を測るんだけどリード線も全部水銀。そんなのを作ったんですね。これは、実は失敗だったらしいんですね。というのは、水銀は途中で固体から液体に変わるじゃないですか。そこの電圧が意外に大きくて、これは結局は目的を果たさなかったんです。ただし3ケルビンからゆっくりと温度上昇したところ、4.05と4.12、当時の温度スケールでその間で電気抵抗が現れ始めるということも分かりました。電線のショートではない。そういうことを確認しました。

そしてここですね。5月、このあたりに何があったかという、7月にマリー・キュリーがライデンに到着です。その目的は、ラジウムの放射能が液体水素温度で変化するかどうかを測定するために来ました。私もこの震災といいますか、原発で反応が終わった後、まだどうしても自然崩壊する熱が著しい。そこを何か抑えられる、何か物理学者としてアイデアがあればいいかなと思ったんですが、例えばその反応が終わったものは液体窒素につければもう放射能は出ないとかそんなことになればいいんですけど、そんなことにはならない、それは。しかし、彼らはそれを実験したわけです。キュリーとオネスの2人の共著論文が1913年に出ております。この話題に関して。

超伝導転移の発見 (1911(明治44)年10月26日)

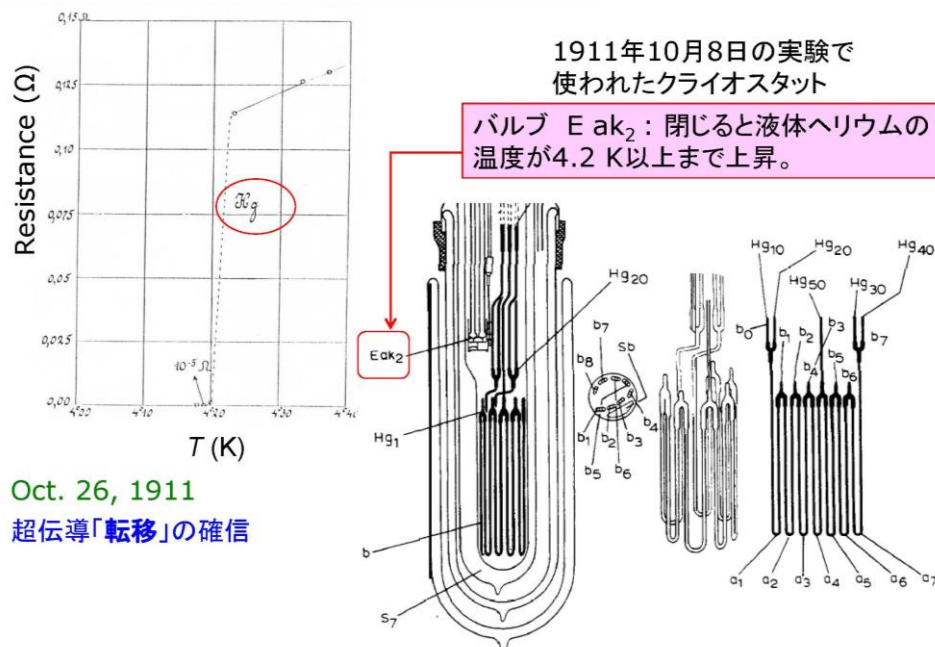


図 9

超伝導転移の発見なんです、今は7月で、そして次10月に新しい装置がまた作られます。この装置で発見したのはこれ(左図)です。これはだんだんとプランク振動子データ、アインシュタイン・フォノンによってだんだんと電気抵抗は変わるのではなく、ここで突然電気抵抗は変わるという、「超伝導の転移を発見」したのがこの日です。10月26日。100年前。今日は11月30日ですから100年と1カ月前ということになります。

このクライオスタットなんです、改良した点があります。ここです。ここにバルブがあります。Eak₂と。何でEak₂というのか知りませんが、このバルブを閉じるとここに液体ヘリウムが沸騰しているのに閉じるもんですから圧力が上がります。そしてこの温度が上がります。それによってこの辺のデータ点が取れたんです。実は、ここのデータ点を取るのには難しい。液体ヘリウム 4.2K、ちょうど水銀の超伝導温度と、転移温度と液体ヘリウムの沸騰温度がほとんど等しいので、実はこれは非常に難しい物質を選んじゃったんですね。ここのデータ点を取るには1気圧以上にしないといけない。これ、ヘリウムというのは当時非常に貴重な物質で、しかもガラスの中に入れますから、ここ1気圧以上の圧力に上げるというのはちょっと勇気がいるところですね。ぴきっと割れてヘリウムが逃げたら大変なことになるので。それを工夫してそういうことができるような装置を作ったということです。

それが最初に言いました流布していた逸話みたいな話ですね。バルブを開け忘れて、そ

れで温度が上がっちゃって1気圧以上になっちゃって、そのおかげでこの転移が見られたんだというようなお話が出てたんですが、実験ノートを見るとそんなことはなくてきっちりと実験をしています。居眠りしたのではなく、こういうのを設計してちゃんとしております。

第1回ソルベー会議 で発表 (1911年11月2日) The theory of radiation and quanta

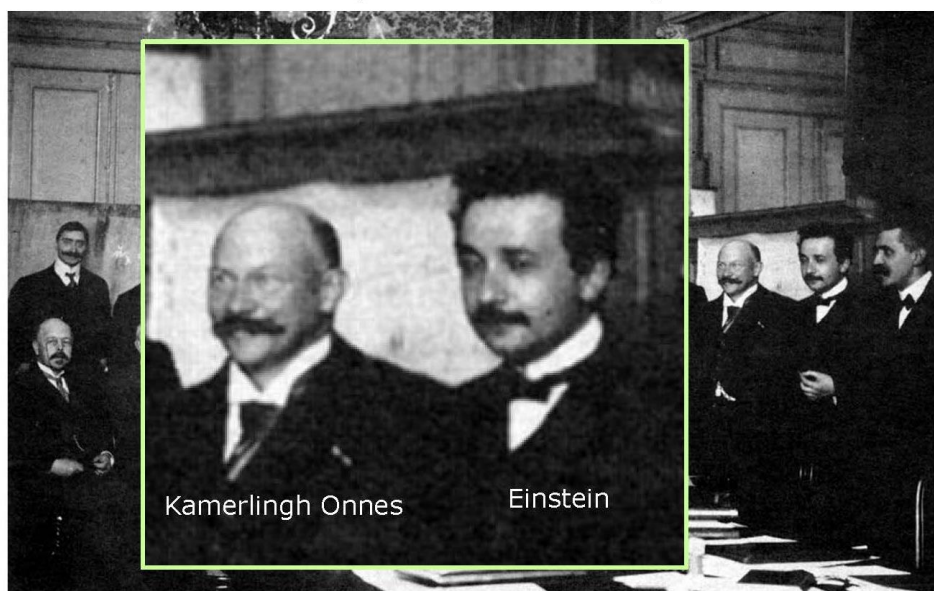
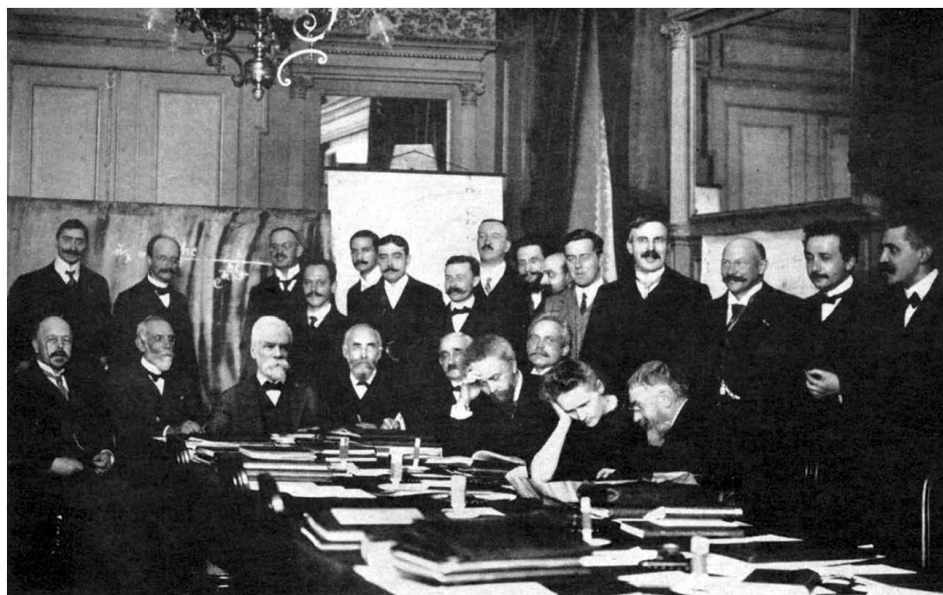


図 10

それでこれは 10 月 26 日で、この 1 週間後ですか、11 月 2 日。第 1 回ソルベー会議があります。ここで、この第 1 回ソルベー会議の話題は“The theory of radiation and quanta”、「輻射の理論と量子」というのがメインテーマだったんですが、ここにその 1 週間前のデータを持ち込んだのがカメリン・オネスです。どこにいるか分かりますか。これはキュリー夫人ですね。カメリン・オネスさん。分かりますか。58 歳。ここです。この人。アインシュタインの隣りにいるのがカメリン・オネス。

ここで発表したんですが、理論家に受けはめっちゃ悪かったらしいです。4.2K で多分何か水銀に構造転移があって、それで何かちょっと電気抵抗がぐっと飛ぶんじゃないのというような質問が実は出たらしい。そういうことでなかなか理論家には認めてもらえなかった。信じてもらえなかった。

それでもノーベル賞を 2 年後にカメリン・オネスさん受賞します。しかしそのクォーターションは物質の低温での性質を研究したこと。そしてヘリウムを 1908 年に液化したことというのが受賞理由です。超伝導の発見に対してのノーベル賞ではありませんでした。このときはまだ信じる人も信じない人もいるという感じでした。

ただし、発見してすぐに何人かから非常に好意的なコメントをもらった。そして実はそこに長岡半太郎さんが出てきておりまして、その懐疑的な雰囲気の中、東京帝国大学の長岡半太郎はいち早く 1911 年の 9 月に、9 月ということはその 4 月の電気抵抗ゼロになったというのを聞いてすぐに、10 月の実験より前に手紙を送って、水銀の電気抵抗に関するめざましい発見に称賛を送っております。そういう記録も残っています。そういうやり取りもあったということです。

ノーベル賞 (1913)、理論家も納得 (1914)

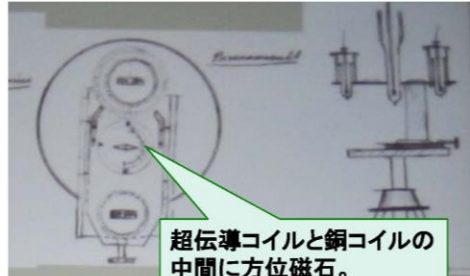


Heike Kamerlingh Onnes

"Investigations into the properties of substances at low temperatures, which have led, amongst other things, to the **preparation of liquid helium**"

物質の低温での性質、ヘリウムの液化

Nobel Lecture, December 11, 1913



超伝導コイルと銅コイルの
中間に方位磁石。
銅コイルの電流を計測。

**鉛のリングを用いた「永久電流」
の実験 (1914)**

エーレンフェストが実験に立ち会い、ローレンツに手紙で報告。

→ 理論家も含めて「超伝導」が
広く認知されるようになった。

図 11

そして理論家が認めてくれたのは 1914 年です。これは、その実験、これ上から見ていますけど、ここに超伝導のコイルで永久電流が流れています。ここは外側から銅のコイルでちょうどこの真ん中に置いた方位磁石が、針がちょうど横を向くようにここに電流を流すんです。そうすると、ここにどんだけ電流が流れているか分かるじゃないですか。それが減衰しないということを実験する。これに理論家のエーレンフェストが実際、実験に立ち会って非常に感激してくれて、ローレンツに手紙によって報告した。こういう当時の理論の大御所が認めたということで、広く認知されるようになった。ノーベル賞の後ということです。

2011年4月8日にライデンで記念式典



参加者に配られた**ニオブ**の記念メダル

直径: 39 mm, 厚み: 2.9 mm

(注)この電気抵抗の実験結果は
4月8日ではなく、10月26日のもの

図 12

これが 2011 年 4 月 8 日に行われた記念講演で、これがデルフト教授。それからケス教授。そしてこの参加者にメダルが贈られまして、これがこんなメダルです。これはニオブからできている直径 39 ミリ、厚み 3 ミリです。こういうメダルが配られて、ちょっと物理をやられている人はすぐけちをつけたくなるかもしれませんが、この電気抵抗は、これには 4 月 8 日超伝導の発見と書いてあるんですけども、この電気抵抗の図は 10 月なので 4 月ではありませんね。

ライデン(オランダ)での記念式典にて
April 8, 2011



図 13

この記念式典で、私でピーター・ケスさんですが、この方たちは、この方はカメリン・オネスのお孫さんの奥さんらしいです。この娘さん。助手のドースマン、ホルスト、それからカメリン・オネス夫人、このゆかりの方たちもこの記念式典に招かれて、非常に和やかとエキサイティングの両方の会議でした。4月8日でした。

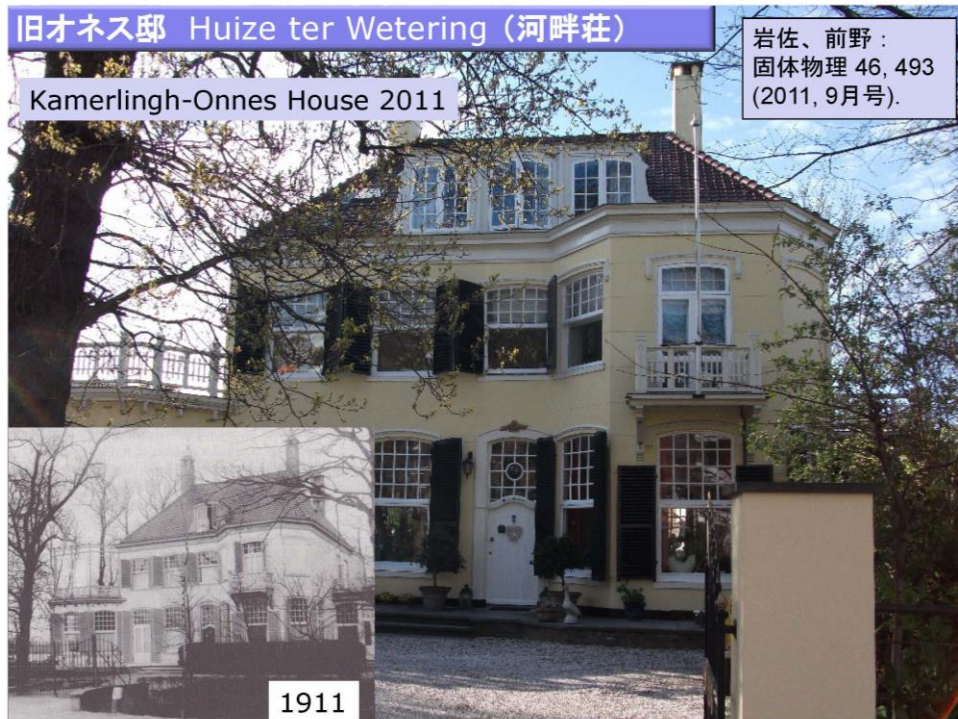


図 14

そして物性関係の方は『固体物理』という雑誌をご存じだと思いますけれども、その9月号にちょっと岩佐さんと一緒にこういう随筆みたいなのを、エッセイを書かせていただきました。これはカメリン・オネスの邸宅で、1911年の写真が左下です。ちょっと行ってみましょうみたいなことになりまして、それでカメリン・オネス研究所を引退した研究者の方の助けを借りて探索に行きました。そしてみつけました。非常に、ここに住んでおられる方も愛想のいいというか、われわれを迎えていただきまして、このように非常によくメンテナンスされています。ここは窓が1つなのに3つ、こういう改造はよくするらしいんですね。

カメリン・オネスは実験の後、よくこちら側のテラスで、このすぐ裏に川が流れているんです。ここでよくのんびりするのが好きだったということです。当時は、ここちょっと人目に触れないようにですかね、ちょっとカーテンみたいなものがありますね。反対側が川で、川風が非常に心地がいいらしいです。

日本物理学会誌の記事とご指摘

日本物理学会誌 2011年7月号 553-556.



“Door meten tot weten”―超伝導発見 100 周年―

前野悦輝 〈京都大学大学院理学研究科 606-8502 京都市左京区北白川追分町 e-mail: maeno@scphys.kyoto-u.ac.jp〉

岩佐義宏 〈東京大学大学院工学系研究科 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1 e-mail: iwasa@ap.t.u-tokyo.ac.jp〉

鹿野田一司 〈東京大学大学院工学系研究科 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1 e-mail: kanoda@ap.t.u-tokyo.ac.jp〉

表題の言葉“Door meten tot weten”

(Knowledge through measurement: 知識は**実験**から)は、現代物理学を切り開く偉大な発見を成し遂げた大実験家の有名なモットーである。

それは、1882年オネスが若干29歳でライデン大学の教授に就任した際、その就任講演で述べたものである。

オネスにとって低温物理学の探求の集大成といえる超伝導の発見は、それからまたちょうど29年後の出来事であった。

図 15

そしてそれで日本物理学会誌に書かせていただいたんですが、ちょっといろいろご指摘もありまして、これ 2011 年の 7 月号に前野、岩佐、鹿野田でこのような話を書かせていただきました。この最後のほうの文章なんですが、表題に使いました “Door meten tot weten” というのは、“Knowledge through measurement” 「知識は実験から」は、現代物理学を切り開く偉大な発見を成し遂げた大実験家カメリン・オネスの有名なモットーである。これはカメリン・オネスが 29 歳でライデン大学の教授になったときに、その就任講演で定量的な実験がいかに重要か、私はこの “Door meten tot weten” というのを物理学の実験のすべての実験室にこれを掲げてほしいというような話をしているんです。それをずっと、これをモットーに生きられたという、そしてオネスが超伝導を発見したのはちょうどこの 29 年後の 58 歳のときだったんです、という話です。

【編集子註】

前野悦輝：2010 年（第 56 回）仁科記念賞「スピン三重項超伝導体ルテニウム酸化物の発見」

岩佐義宏：2019 年（第 65 回）仁科記念賞「電界誘起 2 次元超伝導の発見」

鹿野田一司：2020 年（第 66 回）仁科記念賞「有機伝導体における強相関量子液体の研究」

日本物理学会誌の記事とご指摘

日本人は「オネス」と呼ぶが、必ず「カメリン・オネス」と呼ぶべき。??



研究所の元所長も「オネス」と呼んでいる。

1. “Knowledge though measurement”

「その英訳は何かを参考になさったのだらうと推測するが、...違和感を覚えた。」

英語直訳なら “Through measurement to knowledge”.



11. ‘Door meten tot weten’:

knowledge through measurement

D. van Delft: “Freezing Physics
HKO and the quest for cold” (2007).



2. 「知識は実験から」

「計測から知識へ」が本来意図された意味。

(オネス29歳のときの教授就任講演)

オネスは定量的研究を強調。

58歳のオネスは超伝導という定性的大発見を成し遂げた。

助手Holstとの確執?

図 16

この記事には、カメリン・オネスに非常に興味、関心のある人から、いろいろコメントを頂きました。なかなかこれも正確に書くのは難しいので、まず最初に、頂いたコメントは、ファーストネームなんですね。ラストネームは、ファミリーネームはカメリン・オネスなんです。オランダではそのカメリン・オネスというのはそういう大きな2つのカメリン・オネス、こういう名字は非常に少ないです。それを日本人はすぐオネス、オネスと呼んでいるけども、いつもカメリン・オネスといわないかんのじゃないかというご指摘を受けました。オランダの人はそう言っている。

ところが、調べてみますと、デュブルイン・オーボータン、ケスさんより前に所長さんだったこの方が『Physics Today』に書かれた記事を読みますと、彼はオネス、オネスと書いているんです。ですからオランダの方もオネスでもよいと。それをお話ししたらそのオランダ人物理学者も納得されたということです。ですから、日本人はオネスとだけ呼んでけしからんというのは、それはないだろうと。

ピーター・ケスさんは、ヘイケ・カメリン・オネスということで HKO という具合に呼んでいるようです。

もう1つ、これは10月号で会員の声という物理学会誌がありまして、これはちょうど仙台の低温研究の大御所の方からコメントを頂きました。“Door meten tot weten”の英訳と和訳についてちょっと、こういうタイトルです。“Knowledge through measurement”というの

はちょっと、もう少し素直に翻訳したほうがいいんじゃないか。つまり、“Through measurement through knowledge”、こう素直に訳したほうがいいんじゃないか。“Knowledge through measurement”というのは何かを参考にしたんだろうと推測しますと、正しいご推察です。これは、このデルフトさん、ライデンの博物館の館長さん、この方は 650 ページに及ぶカメリン・オネス研究の本を 2007 年に出されています。この方の第 11 章、この本の 11 章に “Door meten tot weten” というチャプターがあるんですが、その副題が “Knowledge through measurement” になっています。われわれはこれをそのまま使わせてもらったということです。これがなければ私も “Through measurement through knowledge” とあるいは書いていたと思うんですけども、そういう事情があります。

もう 1 つ。「知識は実験から」。これはちょっとないんじゃないか。これは Meten というのは measurement なので計測なんです。これはもっと大事な意味があって、実験と計測が、ここは非常に大事なんです。ここはちょっと間違ってもらっちゃ困る。つまりカメリン・オネスは非常に定量的な計測を行うことによって、それが新しい物理学の改革につながる。それがモットーだった。29 歳のカメリン・オネスのモットーはそれです。ちょっとへりくつになるんですけども、58 歳あるいは超伝導発見に関してどういうモットーなのかというのをちょっと考えてみます。

結論から言いますと、この記事では私は「計測から知識へ」という訳のほうが、あるいは「知識は計測から」というほうが正しい訳です。「実験から」というのは、われわれはこれいいなと 3 人が納得してこれにさせていただいたんですけど、それは超伝導がなかなか理論に認めてもらえなかったという動きもあるのと、もう 1 つ、超伝導というのは、実は超伝導が見つかった後、不純物をちょっと入れてみたりするんですね。だけどゼロはゼロのままです。そういう具合に定量的な計測を越えた、もう全然へりくつですみません、58 歳のオネスにとっては超伝導という定性的大発見を成し遂げた。これは、実はカメリン・オネスご自身のモットーともちょっと反することで、つまりカメリン・オネスを越えちゃったんですね、これは。それで実際、こうなるとこの若者、ホルスト。この人がどんどんいろんなアイデアを、次こういう実験しましょう、こういう実験しましょうというアイデアを出すんですね。こういう事情があるんです。

ホルストとの確執に対しては、先ほどのデルフトさんの 650 ページの本にも結構いろいろ書いてあります。共著論文がなかったとか推薦状の文章とかも残っておりまして、やはり非常に優秀な助手、ある意味自分を越えているところがある助手との関係というのは、私もこの年になりますといろいろ。ということで、これが正しいです。しかし、そこが崩れたのも超伝導の発見ではなかったかと思えます。

それでは、これが前半、前半というかもうだいぶ時間、メインの話がここまでですが、超伝導の話を。どのぐらいの時間？ 10 分ぐらいですか？ はい。

超伝導の歴史

100 Years since the discovery by Onnes (1911),
54 Years since the BCS Theory (1957),
25 Years since High- T_c **Copper** Oxides (1986)

過去30年間の重要テーマ:

"Unconventional Superconductivity"
(非従来型超伝導、異方的超伝導)

電子間相互作用の強い物質での
非BCS (非電子格子相互作用)機構超伝導

1. **重い電子系** 1978 -
2. **有機物** 1980 -
3. **銅酸化物** 1986 -
4. **ルテニウム酸化物など** 1994 -
5. **鉄ニクタイト** 2008 -

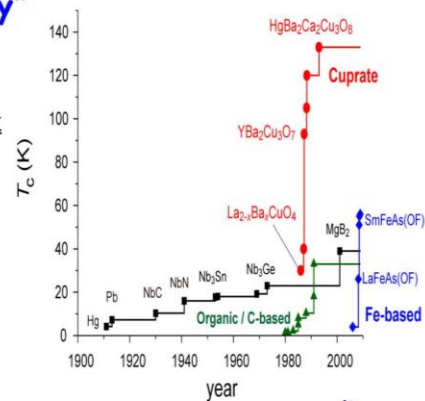
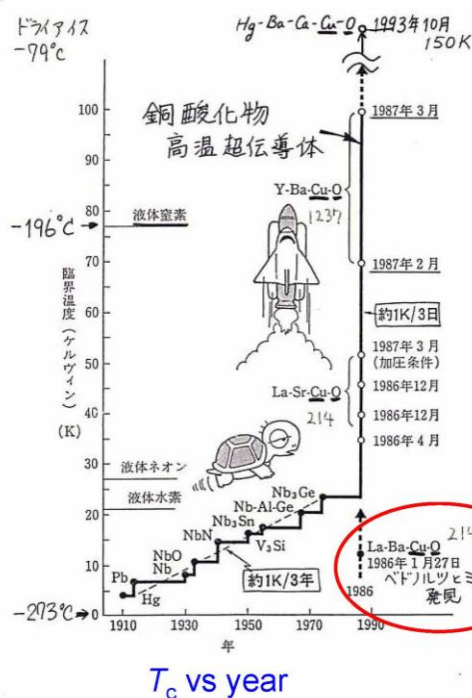
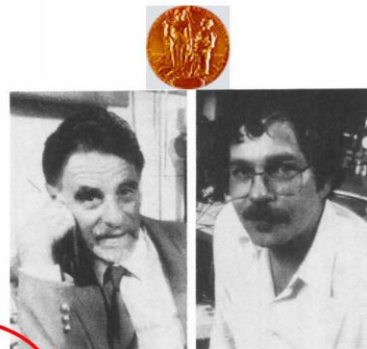


図 17

それでは次、高温超伝導の発見がありまして、その歴史を見ますと今年は25年になるんですね。高温超伝導が発見されたのは86年ですから、ちょうど25年。その間、いろいろな重要な超伝導界のテーマというのはあります。この高温超伝導を発見したのはベッドノーズさんとミュラーさんで1986年に発見、1987年にノーベル賞という、こういうすごいことがありました。



高温超伝導の発見 (1986)



Müller and Bednorz
(Switzerland)

Nobel prize in 1987

図 18

2011年：銅酸化物高温超伝導体の 発見から25周年

Z. Phys. B – Condensed Matter 64, 189–193 (1986)

Possible High T_c Superconductivity in the Ba–La–Cu–O System

J.G. Bednorz and K.A. Müller

IBM Zürich Research Laboratory

Received April 17, 1986

1. Introduction

「超伝導研究の最前線にあるのは
経験則に基づく新物質の探索である。」

“At the extreme forefront of research in superconductivity is the empirical search for new materials.”

[1]

References

1. Tinkham, M., Beasley, M.R., Larbalestier, D.C., Clark, A.F., Finnemore, D.K.: Workshop on Problems in Superconductivity, Copper Mountain, Colorado, August 1983, p. 12

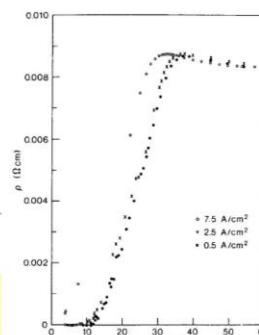


Fig. 3. Low-temperature resistivity of a sample with $x(\text{Ba})=0.73$, recorded for different current densities

図 19

この発見の論文の最初の言葉、これが1986年の発見論文です。4ページぐらいの論文ですかね。これがその銅酸化物での超伝導転移の図です。イントロダクションが、最初の文がすごく気に入っているんですね。“At the extreme forefront of research in superconductivity is the empirical search for new materials”「超伝導研究の最前線にあるのは経験則に基づく新物質の探索である」というのが最初の文です。明らかにミュラーさんは、これは歴史的な論文になるということをすごく意識して、こんなカッコいい言葉から論文を始めているんです。これは引用なんですね。この引用としてティンカム、ビーズリー、ラーベスティヤーさん、フィネモアさん、クラークさん、これがカップーマウンテンというところで行われた、アメリカのコロラド州ですね、1983年の超伝導の未来を考えるみたいな会議の議事録なんです。1983年、これが発見されたのは1986年、1983年にどんな物質、どういう元素を使ったら超伝導に、温度で超伝導になるかと一生懸命議論した。選んだ場所がカップーマウンテンです。答えは銅パー。

誰の言葉か？ Müller教授への問い合わせ

Bednorz + Müller Z. Phys. '86

"At the extreme forefront in the research of Superconductivity is the empirical search for new materials"

↑ from Proceedings Copper Mountains USA (1983)

Who made this remark? ← But persons

Yoshi Maeno maeno@ss.scphys.kyoto-u.ac.jp

@ 10th Anniversary
Aug. 1996
Delphi, Greece

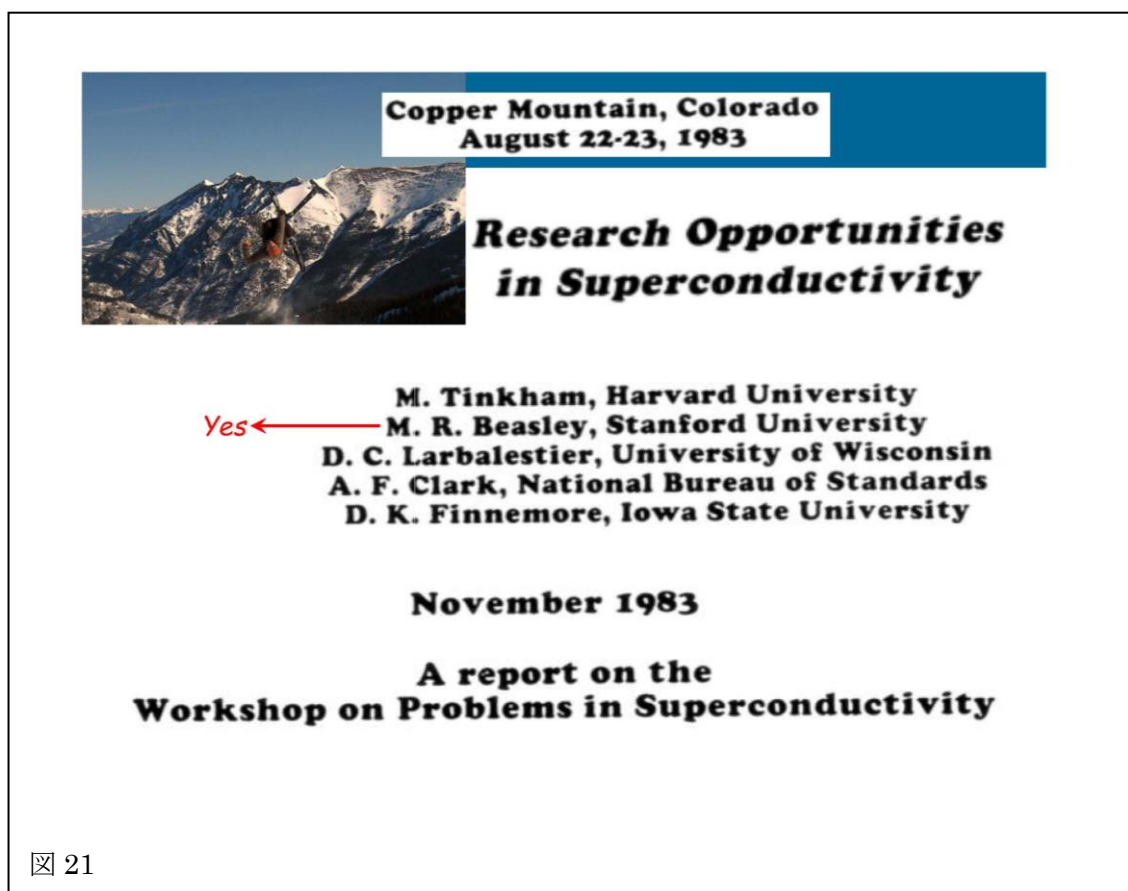
I have copied the first 13 pages for your information. Happy new year! K. Alex Müller

January 1998

図 20

それで私は、これを書いたのは、カッコいいこんなのを書いたのはこの5人のうち、5人が書いたわけではない。誰か1人が書いた。これを調べようと思ひまして、それでさかのぼること96年、15年ぐらい前でしょうか。高温超伝導発見10周年記念会議でミュラーさんにこういうメモを渡して、むちゃくちゃあつかましいと思ひれますが、これ1988年、89年にこのベッドノールズさんとミュラーさんの助手として1年間スイスで研究させて

もらいましたので、その関係でこれをお渡ししたんです。この論文の最初にこんなことが書いてあるけれども、“Who made this remark?”、誰がこんな書いたんですかと言ったら、2年ぐらいしてからミュラーさんがオフィスを引っ越しするときにどうもこのメモを持っててくれはりまして、メモと一緒にコピーが送られてきました。“I have copied the first 13 pages for you information. Happy new year!” 1998 年ということで、これカール・アレックス・ミュラーと書いてあります。これでミュラーさんが使われた、引用したカッパーマウンテンの議事録をコピーして送ってくださったんです。それをお見せします。



まず、これがカッパーマウンテンです。スキーリゾートです。1983 年に行われて、こう
いうことで、そして文章を書いたのはビーズリーさんでした。

これは、私がちょっと趣味的に会議でお会いするために、ティンカムさんにお会いした
ら、あなたですか、書いたのは、とか聞いて、ついにビーズリーさんであるということが
分かりました。

**Copper Mountain, Colorado
August 22-23, 1983**

At the extreme forefront of research in superconductivity is the empirical search for new superconductors, which is part of the more general search for new materials with novel physical properties via the systematic synthesis of new classes of materials. Such searches are an essential investment in the future. This point can perhaps be best il-

Bednorz and Müllerが引用した表現は微妙に異なる:

“At the extreme forefront of research in superconductivity is the empirical search for new materials”

the exotic superconductors mentioned above. Modern superconductivity science and technology would not be as we know it without them. Nevertheless, this type of research is often viewed suspiciously. This situation appears to follow more from differences of style and personality than scientific substance. When carried out systematically by creative materials researchers as part of the exploitation of new synthesis approaches, it is an essential part of superconductivity research and should be supported. The introduction of a radically superior superconducting material to a dramatically higher T_c super-

図 22

これがそれです。このアンダーラインはミュラーさんがこの論文を書いておられるときに自分で引かれたアンダーラインです。ここには “At the extreme forefront of research in superconductivity is the empirical search for new superconductors, which is part of the more general search for new materials” つまり、超伝導研究が最前線にあるのは、経験則に基づく新超伝導体の探索である。それがもうちょっと広い新物質の探索の一部になる。そういう文章です。ミュラーさんは、これはちょっと変えてはるんですね。これ大違いなんですけど、実は。新超伝導体、これも分かっている物質の新超伝導状態をみつけるというのは私のレベルでもトライはするんです。ところが、新物質から、物質から新たに作ってそれを超伝導にしようというのは、これはなかなか私のクラスを随分超えた話で、それを書いてはるんです。ちょっとここが微妙に異なります。

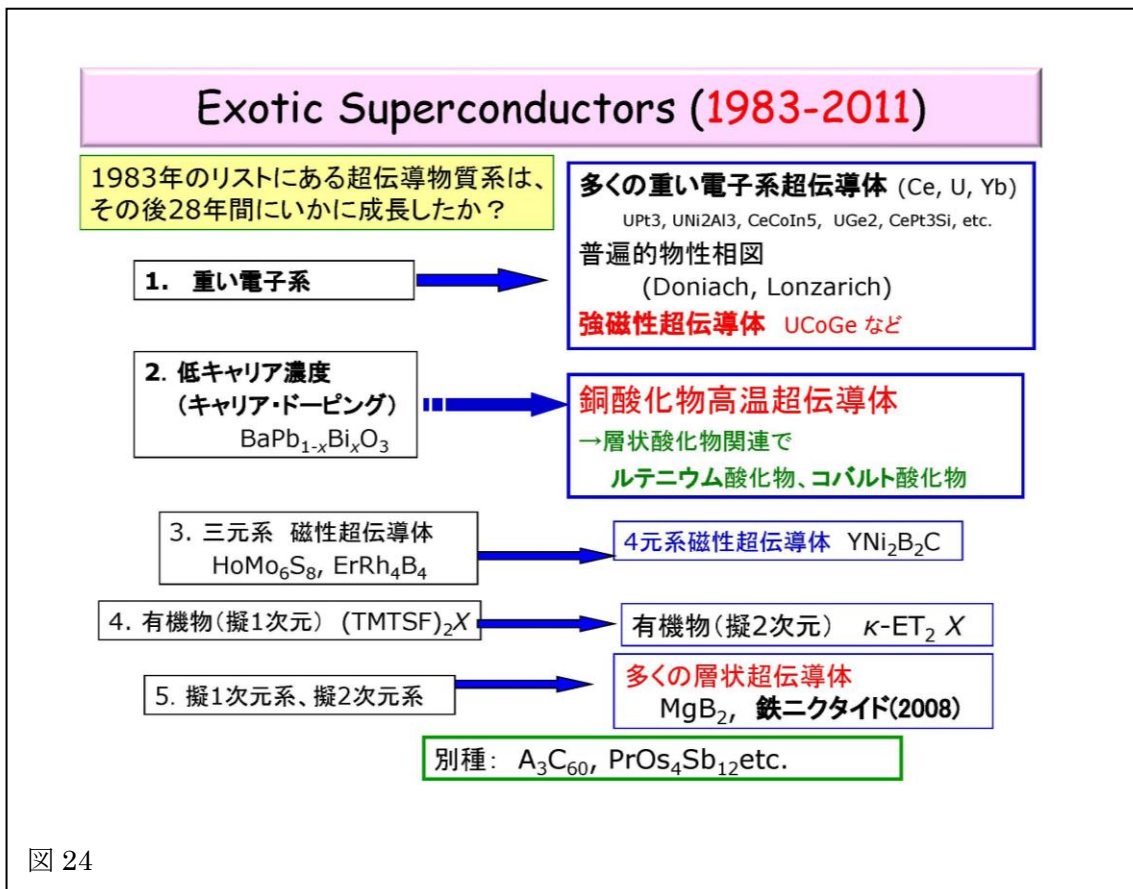
Copper Mountain Report (1983) 当時のエキゾチック超伝導体 重要テーマ

3. Exotic Superconductors and the Empirical Search for New Superconductors

Currently, important examples of exotic superconductors include heavy fermion superconductors (e.g., CeCu_2Si_2 and UBi_3), extremely low electron density superconductors (e.g., $\text{BaPb}_{1-x}\text{Bi}_x\text{O}_3$), ternary superconductors (e.g., the Chevrel phases and the rare earth borides), organic superconductors [e.g., TMTSF_2X], and the quasi one- and two-dimensional superconductors (e.g., NbSe_3 and NbSe_2). Future possibilities

図 23

この文章はすごくて、この文章のちょっと上に何が書いてあるかというのを見ますと、この第3節、エキゾチックスーパーコンダクターとエンピリカルサーチ、経験則に基づく新しい超伝導の探索というチャプターで、ビーズリーさんが書かれているんですが、その当時、1983 年当時の重要なエキゾチック、理論でなかなか理解できない超伝導体としてリストを書いているんです。



この次、ちょっとリストを書きますがこんなんですね。1983 年の時点で彼ら 5 人が相談されたことは、「重い電子系超伝導」、「低キャリア濃度の超伝導」、それから「三元系磁性超伝導体」、「有機物 1 次元系」、一般に 1 次元、2 次元。これはニオブセレンとかそういうのを考えておられ、そういうのが重要であるという指摘があります。

それに基づいて 2011 年までの 28 年間どう成長したかといいますと、確かに重い電子系というのはいろんな重い電子系超伝導体が見つかりまして、普遍的物性相図、ドーニャク、ロンザリック、専門の方どういう意味か分かりますが、それから強磁性超伝導体、こういうものがどんどん大きな分野に成長してきています。そして低キャリア濃度、キャリア・ドーピング、これは実は銅酸化物、全体にドーピングをして超伝導にする酸化物ということで、これ実はつながっているんですね。そして、その酸化物つながりでわれわれの研究していますルテニウムとかコバルト、こういうものが発生してきます。そして、これには三元系を、上を行くのか分かりませんが 4 元系が見つかったり、有機物では 1 次元、擬 2 次元物質がよく研究されて、ほかの超伝導体、鉄ニクタイトも含めていろいろ成長してきています。

Copper Mountain Report (1983)

エキゾチック超伝導体 将来の有望テーマ

Currently, important examples of exotic superconductors include heavy fermion superconductors (e.g., CeCu_2Si_2 and UB_{13}), extremely low electron density superconductors (e.g., $\text{BaPb}_{1-x}\text{Bi}_x\text{O}_3$), ternary superconductors (e.g., the Chevrel phases and the rare earth borides), organic superconductors [e.g., TMTSF_2X], and the quasi one- and two-dimensional superconductors (e.g., NbSe_3 and NbSe_2). Future possibili-

ties include MOSFET inversion layers and artificial metallic superlattices.

MOSFET 反転層での超伝導 人工金属超格子での超伝導

At the extreme forefront of research in superconductivity is the empirical search for new superconductors, which is part of the more general search for new materials with novel physical properties via the systematic synthesis of new classes of materials. Such searches are an essential investment in the future. This point can perhaps be best illustrated in the case of superconductivity by a retrospective look.

図 25

そして、私が一番面白いと思ったのは、先ほど最初に言いました順番、“At the extreme forefront”、これ、ミューラーの論文で引用された言葉、それからこの5つ大事だと。30年先を予言されたような、きちんとやられている。それから彼らはさらに先を読んで Future possibilities ということで、さらに将来の可能性としては MOSFET 反転相での超伝導、それから人工金属超格子、スーパーラティスでの超伝導。こういうのも可能性としては面白いんじゃないかということを指摘しております。28年前。

FET反転層での超伝導： 電場誘起表面超伝導



Ueno, Kawasaki, Iwasa, Nojima

et al. (東北大学),

Nature Materials 7, 855 (Nov.2008).



SrTiO_3 $n_{\text{sheet}} \sim 10^{14} \text{ cm}^{-2}$
 $n_{3D} \sim 10^{19} \text{ cm}^{-3}$
 $T_c = 0.4 \text{ K}$ $\sim 0.1\%$

"電気二重層トランジスター" (EDLT)

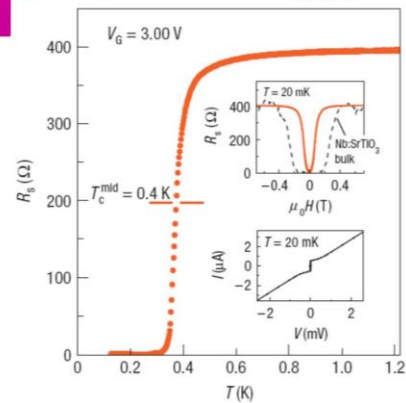
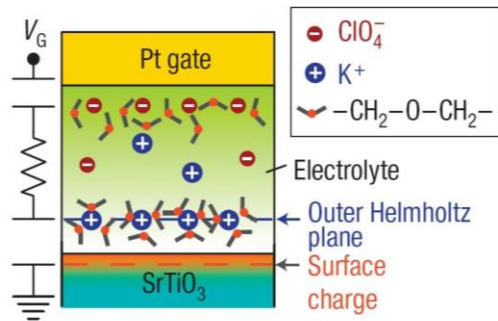
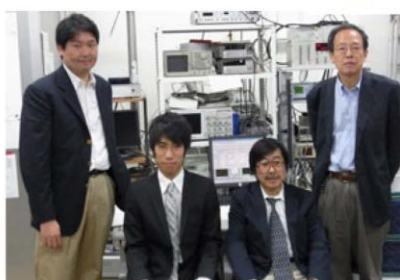
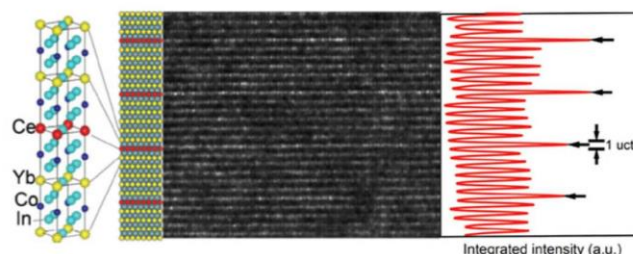


図 26

実は、これはここ数年に実現しました。まず例を挙げますと、それでこの後にすぐあれが、だからこの文章というのはものすごいコンデンスされているところです。FET 反転層での超伝導ということで、これは東北大学で実は発見されております。2008 年、川崎さん、岩佐さんのグループですね。上野さんとか野島さん、そのほか東北大学の皆さんの努力で電気二重層トランジスターというので、チタン酸ストロンチウムが超伝導、電場誘起超伝導というのが実現しました。

人工超格子 「重い電子を2次元に閉じこめる」



京大 松田祐司、寺嶋孝仁ら

CeCoIn5(1層)/YbCoIn5(5層)超格子

2次元性が強いと

$2\Delta/k_B T_c = 12$ まで上昇: 強結合超伝導
(Nature Physics, 2011)

図 27

それから人工超格子ですが、これは京都大学のほうで松田祐司さんと寺嶋さんのグループですが、このように自由に、このセリウムのこの層が重い電子系なんです、それを自在に何層にも積んだり、1層、2層、3層と増やしたりして超伝導性を調べるという研究が実現しております。これは今年のことです。そういうわけでそちらのほうも実現した。

【編集子註】

松田祐司：2014 年（第 60 回）仁科記念賞「重い電子の 2 次元閉じ込めによる新しい電子状態の創出」

Copper Mountain Report には無かった展開の例： スピン三重項超伝導

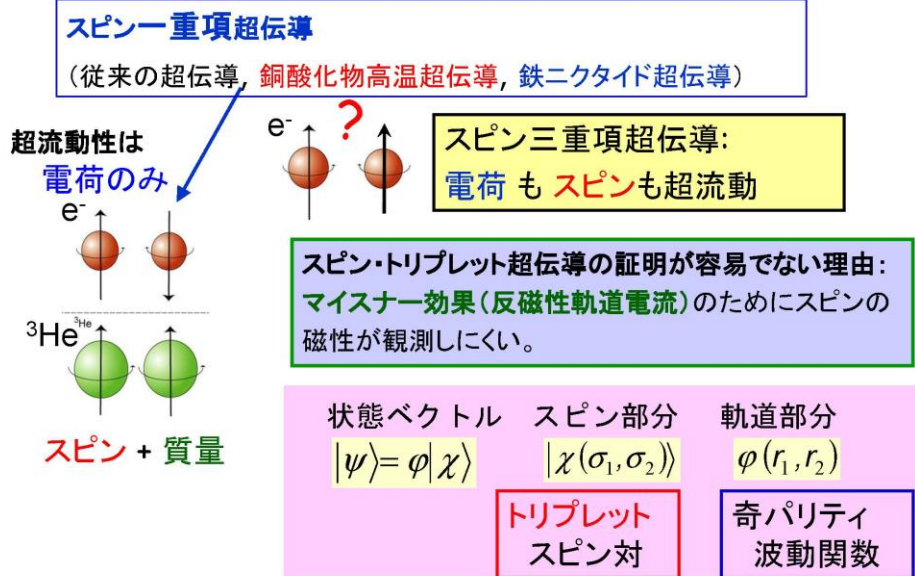
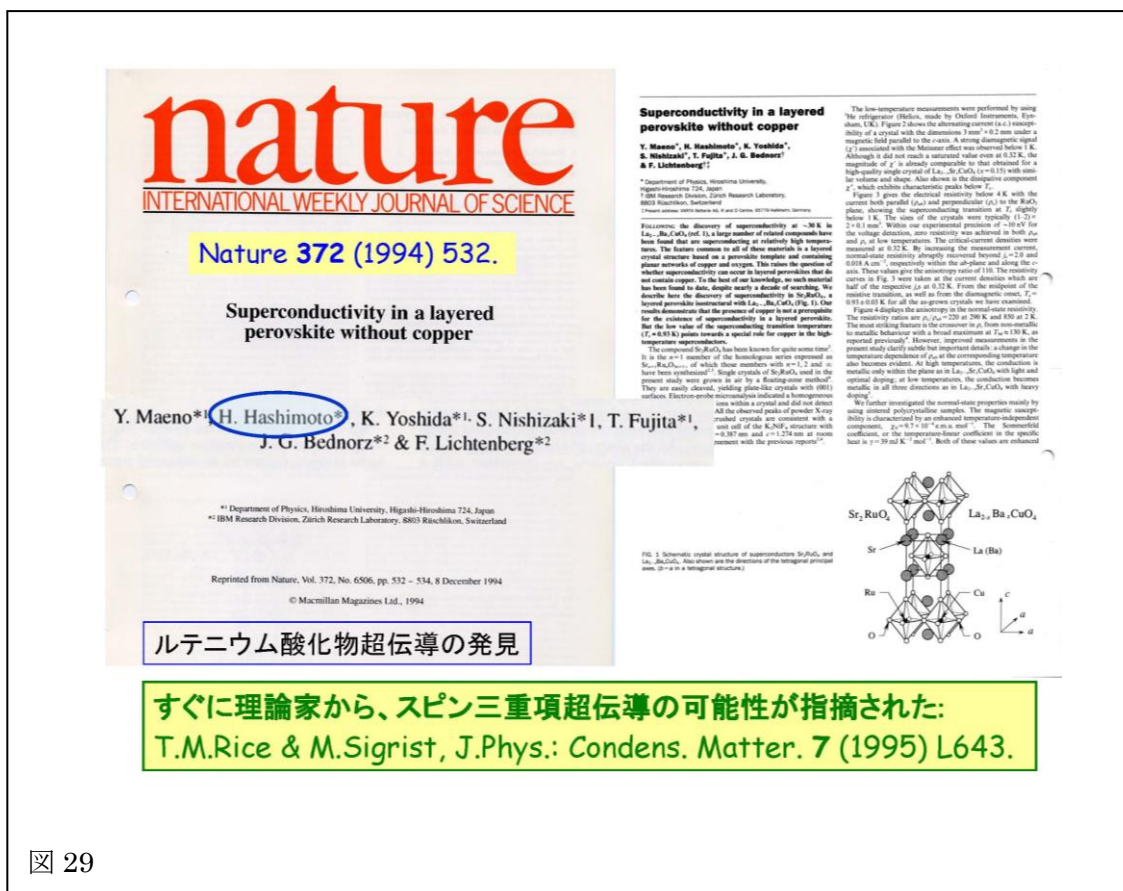


図 28

そして、これで大体時間になりまして、あとカッパーマウンテンレポートにはなかった展開の例として、スピン三重項超伝導というのが挙げられます。それは電子対がシングル、この従来の超伝導、銅酸化物、鉄ニクタイト、こういうの全部スピン一重項なんですが、さらにスピン三重項超伝導というのもチャージ、電気のほうもスピンのほうも超流動状態になるという新しい超伝導状態。これを私ども研究しております。



ちょっと時間もあれなのですが、これを発見したのは 1994 年で、これはベッドノーズさんのところで勉強させてもらっているときからの実験が実現したものです。そしてこのときは、もうすぐに理論家からスピン三重項超伝導の可能性があるんじゃないかという指摘がありました。こういう助言は本当にありがたいです。これによって実験が、方向性というのが決まって、それが本当かどうかは分かんないけど、それをきっちり調べようという動機づけが非常に強くありました。

当時の大学院生は今・・・

平成六年度 修士論文

銅を含まない層状酸化物 Sr_2RuO_4 の
超伝導の発見

Master Thesis, Feb. 1995

Discovery of Superconductivity
in Layered Oxide without Copper,
 Sr_2RuO_4

Hiroshima Univ, H. Hashimoto

広島大学大学院 理学研究科 物理学専攻

低温物理学研究室 橋本 博明



Elected to the House of
Representatives
in the national election on
Aug. 30, 2009. (Age: 39)
衆議院議員 当選！

図 30

そしてこの橋本君ですね。広島大学の修士の2年生だったんですけども、橋本君は今どうなっているかと言いますと、橋本君は平成6年に修士論文で「銅を含まない層状酸化物の超伝導の発見」というタイトルの修士論文を書きまして、この人は今何をしているかと言いますと衆議院議員。野田さんのグループらしいですね。それで物理のバックグラウンドを生かしてエネルギー問題とか担当させてもらっているようです。ひょっとして橋本博明という名前が出てくるかもしれません。超伝導を発見した人の名前です。昨年の仁科記念賞の受賞パーティーにも駆けつけてくれました。

物質の新しい分類視点：トポロジカル物質

物質の状態はその波動関数の性質によってトポロジカルに自明/非自明に分類できる。(新しい物質観)

絶縁体:

バンド絶縁体/モット絶縁体 →
自明な絶縁体/ **トポロジカル絶縁体**

超伝導体:

従来型/非従来型 →
自明な超伝導体/**トポロジカル超伝導体**

Ryu et al., NJP 12
(2010) 065005.



Topological Quantum Phenomena in
Condensed Matter with Broken Symmetries

Cartan	次元性		
	1	2	3
<i>Complex case:</i>			
A	0	$\mathbb{Z}$	0
AIII	$\mathbb{Z}$	0	$\mathbb{Z}$
<i>Real case:</i>			
AI	0	0	0
BDI	$\mathbb{Z}$	0	0
D	$\mathbb{Z}_2$	$\mathbb{Z}$	0
DIII	$\mathbb{Z}_2$	$\mathbb{Z}_2$	$\mathbb{Z}$
AII	0	$\mathbb{Z}_2$	$\mathbb{Z}_2$
CII	$2\mathbb{Z}$	0	$\mathbb{Z}_2$
C	0	$2\mathbb{Z}$	0
CI	0	0	$2\mathbb{Z}$

Annotations: IQHE (green box), $p+ip$: chiral- p (Sr_2RuO_4 , $^3\text{He-A}$) (red box), $^3\text{He-B}$ (blue box), $\mathbb{Z}_2$ TI (green box), 反転対称性破れた系での超伝導 Rashba (red box), $d+id$ 超伝導 (red box), QSHE (green box).

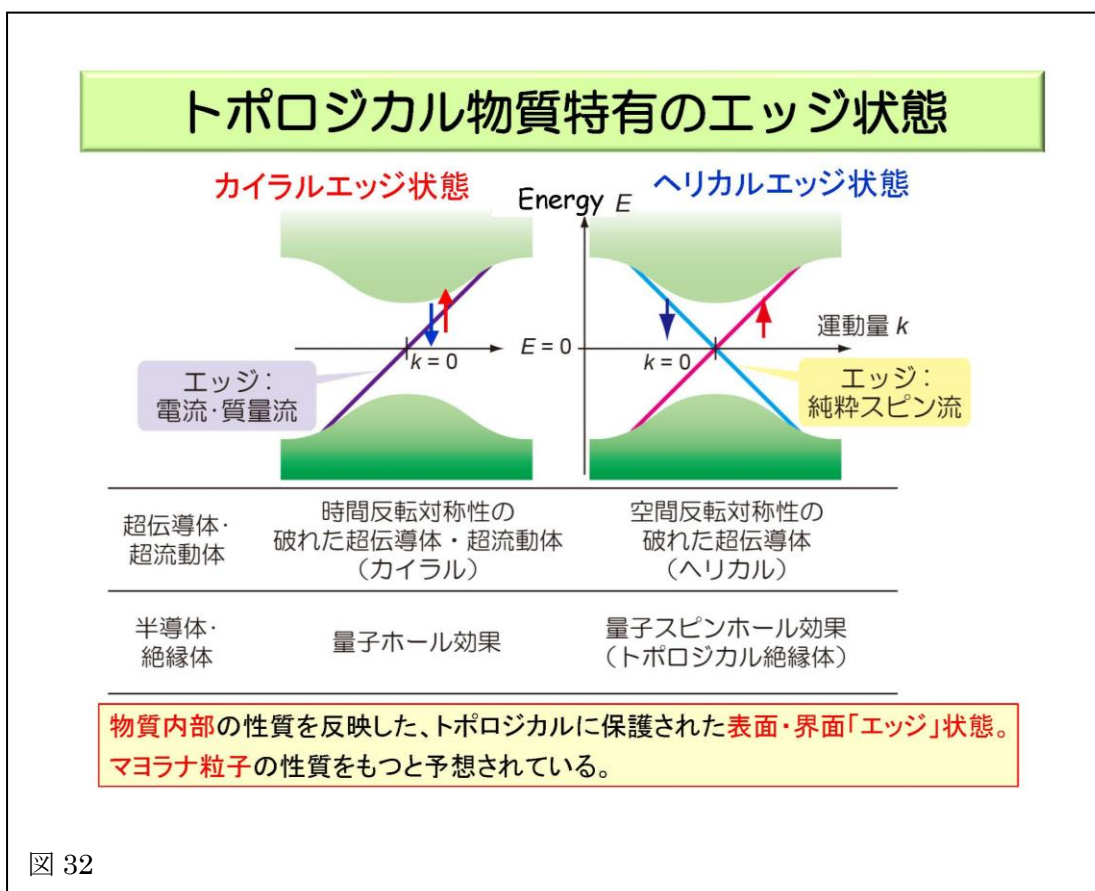
図 31

そして物質の新しい分類法、あと2枚だけさせていただきますが、最近この新領域研究というのでトポロジカルクアンタムフェノミナ、トポロジカル量子現象というので文科省の5年間のナショナルプロジェクト、東北大学にもたくさんの共同研究の方がこのプロジェクトに参画していただいている方がおられます。これはざっくり言いますと、物質の状態がこの波動関数の形、波動関数のトポロジー、そういうものでトポロジカルに自明なもの、非自明なものに分類できるという新しい物質観なんですね。

例えば絶縁体だと、従来はバンド絶縁体とモット絶縁体。表層関係なら普通の絶縁体じゃないよという話があったんですが、自明な絶縁体とトポロジカルな絶縁体。こういう分け方もできるんです。こういう見方をしてみよう。何か出てこないか。こういうアプローチです。

超伝導は従来型、非従来型、S波とS波じゃない超伝導みたいなことでやってきたんですが、もう1つは自明な超伝導とトポロジカルな超伝導という分類も可能です。こういう見方をして何か新しい物質観を作り出そうという努力です。これがその表でして、この表はまだまだ書き換えられつつあるんですけども、この中に $p+ip$ という、これはトポロジカル物質の表なんですけども。グリーンは絶縁体。そして青は超流動。ここを見ますと、 $d+id$ という酸化物で実現していると考えられております超伝導状態というのは、このトポロジカル状態の1つです。反転対称破れの、先ほど電場誘起超伝導ですね、表面超伝導、あれ

で可能性のあるものとしてはこのトポロジカル超伝導になる可能性があります。



こういう絶縁体の超伝導も超流動も一緒にこういう別の分け方といいますか、これで新しい物理を開拓しようという努力をしております。それでそのエッジ状態とか、特にその超伝導、超流動、絶縁体こういうのもいろんな、2つに例えば分類的にはよく知られている状態です。これは超伝導ギャップが空いているんだけど、界面表面にだけは金属状態が出現している。その金属状態が時間反転を破るものとか時間反転を破らないけれどもスピン相互作用の強いものとかで分類ができる。これはトポロジカルにプロテクトされている。表面散乱の影響とかを受けない。そういうもの。永久電流。

そういうことで、しかもこの粒子、ここの表面にいる準粒子というのはマヨラナ粒子の性質を持つと書かれております。これもまた検証していこうという研究努力が進んでおります。

超伝導発見から100年



将来の展望:

1. 室温超伝導

理論的には禁じる制約はない

2. 非従来型超伝導のメカニズム統一理論

非BCS 機構

3. 新奇な超伝導状態、特にトポロジカル超伝導状態の理解

例: スピン三重項超伝導の確立

4. 新奇な超伝導現象現象

マイスナー効果、ジョゼフソン効果のようなもの

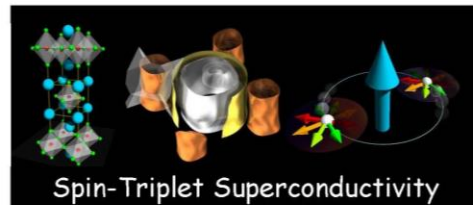
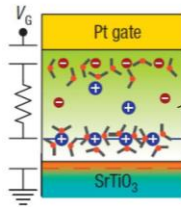
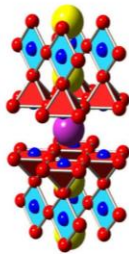


図 33

ということで私の将来の展望としては、発見 100 年ですが、次に「室温超伝導」がいずれ実現するはず。そして統一理論というのも理論家の方は随分進めていただいて、これは非常に現実的なものになっていると思うんです。電子超伝導に関しては。重い電子系、誘起超伝導、ルテニウム酸化物、こういうのも全部 1 つの統一理論で扱う。単なる理論ではない、それを越えた理論です。そして新しい状態。トポロジカル超伝導状態というものの研究を進めたいと思います。スピン三重項超伝導もその中に含まれて。そしてマイスナー効果、ジョゼフソン効果、こういうものがあるんですが、こういうのを通じてまた新しい何とか効果というのをぜひ、特に若い世代の人、私ももう 58 に近付いてきましたので、次の若い世代の人たちがこれを開拓する、非常にチャンスだと考えております。どうもありがとうございました。

司会：前野先生、大変面白いお話、どうもありがとうございました。