

仁科記念講演

仁科記念賞で見る 物質科学の進歩

伊達 宗行

大阪大学名誉教授
仁科記念財団選考委員長

2005年12月

仁科記念財団は2005年に創立50周年を迎え、これを記念する特別講演会が仁科博士の誕生日である12月6日に開かれた。

仁科記念財団創立50周年記念 仁科記念講演会

仁科芳雄博士 ～現代物理学のあけぼのと展開～

日時：2005年12月6日(火)15:00～17:00

場所：日本大学理工学部1号館CSTホール

講師：伊達宗行（仁科記念財団選考委員長）

「仁科記念賞で見る物質科学の進歩」

西島和彦（仁科記念財団前理事長）

「仁科芳雄と日本における素粒子物理学の原点」

この仁科記念財団冊子NKZ-43は第一部の伊達宗行博士の講演録である。第二部の西島和彦博士の講演録(NKZ-44)とともにお読みいただければ幸いである。また、記念事業の一つとして、仁科芳雄博士の生誕地である岡山県において、楊振寧博士(1957年ノーベル物理学賞受賞者)の記念講演も行われた。その記録はNKZ-45として出版される。

仁科記念財団

仁科記念財団創立50周年記念講演

仁科記念賞で見る物質科学の進歩

2005年12月6日 日本大学理工学部1号館CSTホールにて

© 2006 Nisihina Memorial Foundation



● 仁科記念賞の時代

仁科記念賞	世界
芳田康(磁気異方性56)	久保亮五(久保理論57)
江崎邦太郎(ダイオード59)	吉森昭夫(極限スピンの60)
松原武生(量子統計61)	佐々木宣(半導体62)
瀬谷正男(紫外分光64)	豊沢忠(超伝導理論66)
近藤淳(近藤効果66)	森達(非平衡統計68)
川崎基治(量子統計72)	真木和美(超伝導72)
大塚謙三(CR共鳴74)	花村栄一(多運動電子75)
塩谷繁雄(高密度励起子77)	守谷亨(凝縮強磁性79)
伊達宗行(強磁場80)	安藤恒也(二次元電子82)
外村彰(電子ホログラフィー82)	石川義和(中性子84)
川路紳治(量子ホール効果84)	田中豊一(ゲル相転移85)
飯島澄夫(電子顕微鏡85)	鈴木増雄(量子多体系86)
高柳邦夫(表面87)	青藤軍治(非線形超伝導88)
十倉好紀(量子超伝導90)	大貫・長谷川(重電子92)
勝又謙一(磁気相転移93)	川柳有輝(メゾ系伝導94)
佐藤武郎(He相分離95)	川上・漆(共形場95)
中村修二(青色ダイオード96)	坂谷達悟(SPM96)
安岡弘志(スピニング97)	秋光純(格子超伝導98)
中村幸信(超伝導素子99)	天谷・清水(超高温01)
	BCS, 江崎, 久保-Landauer(57)
	アブリコソフ(57), メス/パウアー(58)
	アンダーソン励起(58), レーザー(61)
	Type II (61), ジョセフソン効果(61)
	近藤効果(64), 超伝導素子(61)
	2D超伝導(71) MR(73)
	有機, 重イ超伝導(共に79)
	STM(80), 量子ホール効果(80)
	分数量子ホール効果(82)
	準結晶(84), フラウンレン(85)
	高温超伝導(86), AFM(86)
	AB効果(86), ナノ伝導素子(88)
	カーボンナノチューブ(91)
	134K超伝導(93)レーザー冷却(95)
	D-波超伝導(96) MgB2超伝導(01)
	博志清悟(人工原子02) 北岡良雄(NMR03)
	藤光申(遷移04) 永長直人(ホール効果05)

'05 12 6

仁科記念賞で見る 物質科学の進歩

伊達 宗行

大阪大学名誉教授
仁科記念財団選考委員長

1. 緒言—それまでの50年—

本日は仁科記念財団創立50周年という記念すべき時にあたり、このようなテーマでお話をする機会を得たことを大変光栄なことと思っております。仁科記念賞の対象は、広義の原子物理学とその応用を中心とする研究分野、となっており、物理学全般を視野に置くものでありますが、ここでは私の近辺、すなわち物性物理学を中心とした研究分野に的を絞らせていただきます。したがって、これから引用する受賞者リストなども、全体の中から私の独断で抜き出したものであります。あらかじめご了承くださいと思います。

さて、仁科記念賞の50年を振り返るためには、それまでの50年がどんな時代であったかに目を通しておくことがよいと思われまふ。それを表1でご覧ください。偶然ながらその出発点はアインシュタインの3大論文が現れた年で、それから100年目の今年、世界物理年として諸行事が行われていることをご存じでしょう。続いて見ていくとワイスの分子場、これは有効場近似の走りとなる重要な概念の出現でした。やがて量子力学の開花へと時代が移ります。その重要性を噛み締めながら目で追いましょ。それが1930年ころに一段落すると、このあたりから物性物理学の重要な概念が登場します。その少し前に、ハイトラー・ロンドンの水素分子がありますが、これはあとで超伝導の議論に大切なのでご記憶ください。そして1930年以降、固体電子論のバックボーンをなすバンド模型が理解され、半導体の概念が得られます。なお、普通の科学史年表にはあまり出てきませんが、ファン・フレックが1932年に磁性の本を書きました。これは後年非常に影響力を発揮した本です。物性研究者は俗にバンド派とボンド派に分けられる、といわれます。前者は逆格子空間派であり、後者は実空間派なのですが、物性物理学はこの2派の競争、および協力で豊かな世界を拓いてきたのです。そして、ファン・フレックはボンド派の暁将でありました。彼の一番弟子、フィリップ・アンダーソンの出世作、超交換相互作用の成功はこの線上に

表1. それまでの50年

1905	特殊相対論、光量子、ブラウン運動 (アインシュタイン)
1907	分子場模型 (ワイス)
1911	超伝導 (カマリン・オンネス)
1912~14	X線回折、結晶構造解析 (ラウエ、ブラッグ父子)
1913	水素原子模型 (ボーア)
1923	物質波 (ド・ブロイ)
1924	BE統計
1925	行列力学 (ハイゼンベルグ)、スピン (ウーレンベック)、排他律 (パウリ)
1926	シュレジンガー方程式、FD統計、量子確率 (ボルン)
1927	水素分子 (ハイトラー・ロンドン)
1928	相対論的電子論 (デラック)、ラマン散乱
1930~33	バンド模型 (パイエルス、ブリルアン)、半導体 (ウィルソン)、磁性論 (ファン・フレック)
1933~37	マイスナー効果、ロンドン方程式、反強磁性 (ネール)、超流動 (カビッツァ)
1938	電子顕微鏡 (ルスカ)
1946	磁気共鳴 (プロッホ、パーセル)
1948	フェリ磁性 (ネール)、中性子散乱 (シャル)
1950	スピネコー (ハーン)、GL方程式 (ギンツブルグ・ランダウ)
1953	レーザー (タウンズ)

左の数字は西暦年

あるわけです。

先を急ぎましょう。マイスナー効果の発見、ここから超伝導が真の理解に向けて動き出します。そしてロンドンの式が得られます。この話はあとでまた取り上げますのでご記憶ください。電子顕微鏡から磁気共鳴まで約8年あるのは第2次大戦の影響です。そして時代は変わりました。ギンツブルグ・ランダウの超伝導理論は、折から厳しくなった冷戦の陰でその重要性が世界に認識されるのには時間がかかりました。この話もあとでもう一度出てきます。一方、戦時研究から発展した技術が物理を変えていきました。原子炉から中性子散乱が、レーダーから磁気共鳴が生まれ、レーザーがレーザーの黎明を告げるものでした。このような時代背景の中で仁科記念賞が発足したのです。

2. 仁科記念賞の50年

仁科記念賞(以下、仁科賞という)は1955年(昭和30年)に第1回の受賞者として、緒方惟一(大型質量分析器の完成)および西島和彦(素粒子相互変換)の2氏に与えられました。それ以来、2005年(平成17年)まで51回の表彰が行われています。この間、物性物理学に特に深い関係があるのは42件で、表2に示されています。この表は、私の理解で作られたもので独断をお許しください。素粒子、原子核は含まれておりませんし、天文、プラズマ、流体、ソリトン、レーザー科学等も省かれています。また、受賞者の研究課題名

は私の単なるメモで、すべてを1枚の中に納めるための苦肉の策です。正確な課題名および受賞理由の要約は、「仁科記念財団50年のあゆみ」(2005年12月)をごらんください。また、この時代に世界的に注目された研究を右枠に示します。

表2. 仁科記念賞の時代

仁科記念賞		世界
芳田奎 (磁気異方性56)	久保亮五 (久保理論57)	BCS、江崎、久保-Landauer (共に57)
江崎玲於奈 (ダイオード59)	吉森昭夫 (螺旋スピンの60)	アブリコソフ (57)、メスバウアー (58)
松原武生 (量子統計61)	佐々木亘 (半導体62)	アンダーソン局在 (58)、レーザー (61)
瀬谷正男 (紫外分光64)	豊沢豊 (励起子理論66)	Type II (61)、ジョセフソン効果 (62)
近藤淳 (近藤効果66)	森肇 (非平衡統計68)	近藤効果 (64)、磁束量子化 (61)
川崎恭治 (量子統計72)	真木和美 (超伝導72)	3 He超流動 (71)、MRI (73)
大塚頼三 (CR共鳴74)	花村栄一 (多重励起子75)	有機、重い超伝導 (共に79)
塩谷繁雄 (高密度励起子77)	守谷亨 (遍歴強磁性79)	STM (80)、量子ホール効果 (80)
伊達宗行 (強磁場80)	安藤恒也 (二次元電子82)	分数量子ホール効果 (82)
外村彰 (電子ホログラフィー82)	石川義和 (中性子84)	準結晶 (84)、フラーレン (85)
川路紳治 (量子ホール効果84)	田中豊一 (ゲル相転移85)	高温超伝導 (86)、AFM (86)
飯島澄夫 (電子顕微鏡85)	鈴木増雄 (量子多体系86)	AB効果 (86)、ナノ伝導量子化 (88)
高柳邦夫 (表面87)	斉藤軍治 (有機超伝導88)	カーボンナノチューブ (91)
十倉好紀 (電子超伝導90)	大貫・長谷川 (重電子92)	134K超伝導 (93) レーザー冷却 (95)
勝又紘一 (磁気相転移93)	川畑有郷 (メゾ系伝導94)	p-波超伝導 (96)
佐藤武郎 (He相分離95)	川上・梁 (共形場95)	MgB ₂ 超伝導 (01)
中村修二 (青色ダイオード96)	板谷謹悟 (SPM96)	
安岡弘志 (スピンギャップ97)	秋光純 (梯子超伝導98)	
中村泰信 (超伝導素子99)	天谷・清水 (超高圧01)	
樽茶清悟 (人工原子02)	北岡良雄 (NMR03)	
蔡兆申 (量子通信04)	永長直人 (異常ホール効果05)	

左側括弧内数字は西暦の受賞年 右は公表年

年代順に眺めましょう。物性のトップが芳田さんの反強磁性磁気異方性であることは象徴的です。それまでは現象論的な茅さんの強磁性磁気異方性しか知られていなかったのが、初めて量子論で定量的に計算されたのです。典型的なボンダ派の成功でした。次に控えるのが、久保、江崎の両巨頭です。今さら説明の必要はないでしょう。これらのお仕事は国際的にも極めて高い評価を得られましたが、興味のあることに、現在、ナノ科学で重要なランダウアー理論の出現がちょうどこの頃です。久保理論はより一般的なものですが、電気伝導に絞って互いに相補的な久保-ランダウアーのペアにノーベル賞が出てよかったのでは、と思っています。吉森さんはヘリカルスピンを発見されました。これは結晶に非整合構造が導入された最初でもあります。松原、森、川崎、鈴木さん等、日本の代表的な統計力学の指導者がそれぞれのお仕事で仁科賞を受けられたことは、十分に納得さ

れたものでした。一方では新進気鋭の川上、梁さんによる一次元厳密解の発見もありました。

半導体、光物性の分野における仁科賞の足跡は、日本における物性物理学の歴史を反映しています。佐々木さんのお仕事は、日本での液体ヘリウム実験における最初の仁科賞です。半導体の教科書にあるような基礎的研究です。それが、大塚、塩谷、川路と発展していくと、世界で激しくトップを争うことになりました。理論では励起子の光スペクトルを解明した豊沢さん、その多重励起を論じた花村理論があります。一方、半導体研究の転換は、川路さんたちの量子ホール効果に始まる、といってもよいでしょう。それは単に量子化のみならず、電子の局在問題と絡んでモット、アンダーソン局在以来の基本的課題にかかわってきました。安藤さんの二次元電子系の厳密な扱い、川畑さんの負の磁気抵抗の解明、メゾスコピック系の伝導問題など研究内容はかなり変わりました。

伝統的な磁性研究では、近藤効果の発見が最大です。その世界的インパクトから見ても、そして後にDense Kondo、ナノ構造での近藤効果などの発展を見ても、これにノーベル賞が出ていないのは残念です。一方、遍歴電子強磁性の守谷理論は、当時発見された $ZrZn_2$ 等の弱い強磁性を含む一般論として広く注目されました。石川さんのお仕事は中性子散乱でもありますが、守谷理論の典型物質、MnSiの解明が中心にありました。なお、磁性分野としては勝又さんの相図における四重点の発見があります。スピングラス絡みの相転移問題です。相転移といえば、田中さんのゲル相転移の解明は極めてユニークなものでした。当時の久保理事長がいたく感心しておられたのが印象的でした。

3. 「時代」を映す仁科賞

50年の仁科賞史を眺めると、いろいろな発見があります。それを追ってみましょう。表2を見ると、その受賞者はほとんどが単独受賞で、連名の受賞は3件にすぎません。これは約7%です。一方、素粒子・原子核分野では約半分、50%が複数受賞で、最大4名というのがあります。これらの分野が近年特に大規模研究化していることの反映でもあります。こうして見ると物性は今日でも個人の発想、行動が基本となって展開されている学問分野であることがわかります。

仁科賞では、先進的な実験技術が大事にされてきた、ということが読み取れます。古くは瀬谷さんの真空紫外分光器、これは今日の放射光利用時代にはなんでもないことですが、この時代、瀬谷・波岡分光器は世界をリードしていました。私の強磁場も同様な線上にあります。外村、飯島両氏の電子顕微鏡は、共に仁科賞受賞後に大きく発展されたのが注目されるどころです。外村さんの受賞は1982年、アハラノフ・ボーム効果の最終的検証は1986年、飯島さんの受賞は1985年、そしてカーボン・ナノチューブの発見が1991年です。この時期の選考委員会の見識に脱帽です。高い実験技術は引き続き評価されており、

高柳さんの表面研究、板谷さんの水溶液でも使えるSPMの開発、樽茶さんの人工原子、分子実現の見事な成果も、背景にある高い技術に対する評価があつての受賞でした。少し遠いですが、佐藤さんのHe混合液も極低温技術の発展と見られますし、後述の天谷・清水氏の新超伝導発見も優れた超高压技術あつての成功でした。

時代を感じさせる一つのポイントは、理論と実験の比率です。1980年を境に見ると、前半は理論11、実験5であるのに、後半は理論5、実験21と大きく変化しています。これは学問の内容もさることながら、社会的要因が大きいようです。戦争の影響もあつて仁科賞の発足時、実験物理学の環境は貧しいものでした。科学研究費も今日に比べると甚だ貧弱なものでした。学園紛争を大阪万博あたりで抜け出し、オイルショックを乗り切った70年代後半、実験条件が整ってきたといえるでしょう。仁科賞にもそれが反映されています。

仁科賞が時代を先取りした典型的な例が、中村修二さんの青色発光ダイオードです。このお仕事がイギリスの国際会議で賞賛を受けたとのことで推薦があり、仁科賞が決まりました。世間が注目するはるかに前のことです。ご本人が仁科賞とは何かご存じなかった、というエピソードもありました。

物性研究がどのように変わってきたかについても、仁科賞は答えを示しています。一言で言えば前半は分科的、後半は総合的と言えます。例えば佐々木さん、大塚さんの研究は典型的な半導体研究です。しかし川路さん、安藤さんにとっては二次元電子系を作るための半導体です。そして樽茶さんになると、ナノ科学のための半導体です。半導体は目的から手段、材料となっています。

ところで、実は仁科賞の時代、最も劇的に進歩した、そして特徴的な研究をまだお話ししていません。それは超伝導です。それを次にまとめて述べましょう。

4. 「発展」を示す仁科賞—超伝導を例として—

表3をご覧ください。左半分は超伝導にかかわる仁科賞、右には超伝導研究史の主要項目が示されています。仁科賞が超伝導関連研究に出されるようになったのは、前半はほとんどなく、後半、特にここ15年ほどのことなのです。

研究全体の流れを追いましょう。カマリーン・オンネスによる最初の発見は1911年ですが、それから約20年、大きな進歩はありませんでした。マイスナー効果が発見され、これを取り入れてロンドンの超伝導電磁気学ができたのが1933年です。そしてその量子論は現象論のギンツブルグ・ランダウ (GL)、本質論のBCSと出揃ったのが仁科賞の発足とほぼ期を一にしています。次いで1961~62年、4つの重要発見、超伝導ギャップ、Type-II、量子磁束、ジョセフソン効果が現れ、超伝導の基本的性格は大体出揃いました。残念ながらこの段階まで日本からの貢献はありませんでした。仁科賞の最初は真木さん、この方は計算の達者な人で、GL-方程式、Type-II 関連分野で活躍されました。実験の最初は斉藤

表3. 超伝導と仁科賞

	仁科記念賞	世界
55年		ロンドン (33)、マイスナー (33) GL方程式 (50) BCS (57) Type II (61)、ギャップ (61) ジョセフソン (62)、量子磁束(61)
70年	真木和美 (Type II 72) 齋藤軍治 (有機88)	重い電子 (79)、有機超伝導 (79) 高温超伝導 (86)
90年	十倉好紀 (電子型90)、大貫・長谷川 (重電子92) 安岡弘志 (スピンギャップ97)、秋光純 (梯子98) 中村泰信 (超伝導素子99)、天谷・清水 (高圧01) 北岡良雄 (NMR03)、蔡兆申 (量子通信04)	134K超伝導 (93) p型超伝導 (96) MgB ₂ 超伝導 (01)

さんで、有機超伝導分野で世界のレベルに並びました。この分野は1970年代終わり頃から開けましたが、この時代、希土類、ウラン化合物で「重い電子」が発見され、それがまた超伝導になることが注目されるようになりました。

しかし、なんといっても1986年の酸化物高温超伝導の発見ほど、世間を騒がせたものはありませんでした。そしてこれを契機として、日本の超伝導研究も活気づきました。これまで低温研究者に限られていた超伝導研究が、磁性、半導体等の研究者をも巻き込むようになったからです。この超伝導はCuO面の磁気と電気伝導が微妙に絡み、いまだに解けぬ謎を提供していることが魅力の中心です。このような中から優れた研究が出てきました。十倉さんは、それまで信じられていたホール伝導のみでなく、電子伝導もあることを証明されました。大貫さんと長谷川さんは重い電子系を理論、実験両面から系統的に調べ、超伝導を含む物性を明らかにされました。安岡さんはスピンギャップの存在をNMRで示し、北岡さんはそのNMRで超伝導電子対の新型を発見されました。そして秋光さんは一、二次元の間にくる梯子型物質で超伝導を発見し仁科賞を得ましたが、彼はむしろそのあとで39Kで超伝導を示すMgB₂を発見したことで有名です。前にもちょっと述べましたが、天谷・清水さんは超高圧技術を発展させ、酸素、鉄などが低温、高圧下で超伝導になるという発見をされています。

このような研究の中から、注目すべき新しい傾向が現れました。それは超伝導を素材とし、ナノテクノロジーを導入して物質波を制御し、量子通信への道を拓こうというものです。中村泰信さん、そして昨年の受賞者蔡さんたちのねらいがここにあります。これは将来の社会的重要なテーマとなる可能性を秘めています。

以上で超伝導と仁科賞のレビューを終わりますが、いささか急ぎ過ぎの感があり、ご理解いただけなかった点もかなりあるかと思えます。そこでこれらの成果の背景となる超伝導の科学についての補足説明をいたしたいと存じます。

5. 超伝導と位相

超伝導にはいろいろな問題がありますが、ここでは位相について考えましょう。図1に問題の出発点を示します。マイスナー効果が発見されて超伝導の本質が見えてきた時、ロンドン兄弟はその電磁気学を作りました。そこで超伝導電流 I_s は図のように表されます。これまでのオームの法則による式を参考までに書きましたが、かなり違います。常伝導では電流は電圧に比例するのに、超伝導ではベクトルポテンシャル A に比例します。ところが古典電磁気学では、 A はそのまま観測量になることはありません。必ずその微分型で出ます。だから微分して消えるものは A の中になんでも押し込める（ゲージの自由度）のですが、 I_s という観測量にそんなあいまいさがあるては困ります。

1935年 超伝導の電磁気学 (ロンドン兄弟)

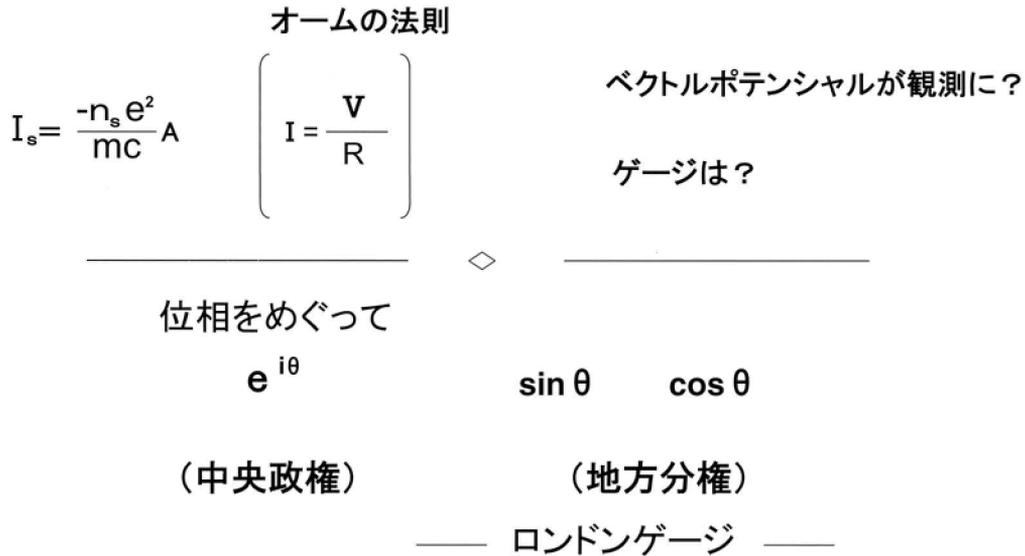


図1. 超伝導と位相

ロンドンは次のように考えました。ゲージの自由度とは中央政府が決めた基本法のようなものである。そこでは原則が決められている。しかし、それが具体的にどのように実施されるかは、地方の実情に合わせてそれぞれに工夫されるべきものである。たとえていえば指数関数を使えば中央で決めても、サイン、コサインは地方の境界条件で決めればよいということです。そしてロンドンゲージが採用されました。

しかし、話はそれでは済みませんでした。図2に示すような経緯を経て超伝導の量子論ができてみると、ゲージの自由度は位相の自由度に対応し、時間的に変動する物質波の位

相が新しい超伝導の顔を覗かせたのです。超伝導体では、系全体が単一化された物質波の位相を持つという巨大量子化が起こります。その象徴的なものがジョセフソン効果です。図の下端左を見てください。2つの超伝導物体が絶縁層（アミカケ部）で繋がっているとしましょう。巨大量子化によってそれぞれの超伝導体は位相1、2を持っていますが、お互いの位相のズレは任意です。だからその2つが結合されても右の2式のような理想的な固有状態にはすぐにはなれません。そのように位相を揃えるためには絶縁層を通して電流を流して調節されるのです。これがジョセフソン電流です。そしてこのことは水素分子の作り方にお手本があります。図3をご覧ください。教科書に必ず出てくる水素分子の話は、歯切れのよいところだけに止まっていますが、原子間の位相がズレている時には、分子ができるまでにはいろいろな絡み合いがあるのです。これをエンタングルメントといいます。最近の仁科賞で、中村さん、蔡さんのお仕事は超伝導体でナノ構造を作り、まさにこのような世界に入り込んでいるのです。そしてこの先にはさらに野心的な世界が待っています。それはナノサイズで物質波を制御し、電磁通信から物質波通信へ、と目を向けることです。

超伝導の位相には、もう1つ重要な話があります。図4に電子対モデルが示されています。上はよく知られたクーパー対です。これに対して高温超伝導は少し違った形をしています。ところが最近、大貫さん、北岡さんなどの発見によるウラン化合物のp波は対称性が違います。そしてスピンも違います。詳細は省きますが、図3と比べてみてください。

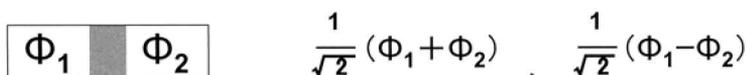
1950年 超伝導の波動力学 (GL)

$$\Psi_s, \quad |\Psi_s|^2 = n_s, \quad \text{量子渦}$$

1958年 BCS 理論
クーパー対、BE凝縮

1961年 磁束量子化
 $h/2e$

1962年 ジョセフソン効果



$$\Phi_1 \quad \Phi_2 \quad \frac{1}{\sqrt{2}} (\Phi_1 + \Phi_2), \quad \frac{1}{\sqrt{2}} (\Phi_1 - \Phi_2)$$

図2. GLからジョセフソンまで

水素分子の作り方

—ハイトラー・ロンドン—

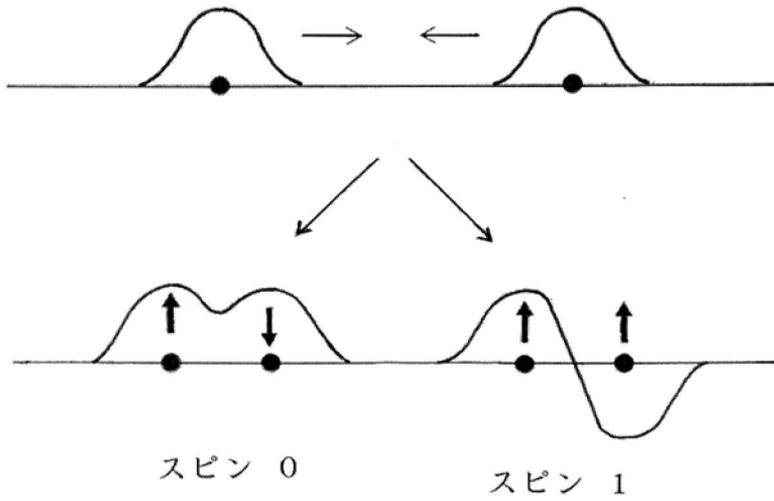


図3. 水素原子から分子へ

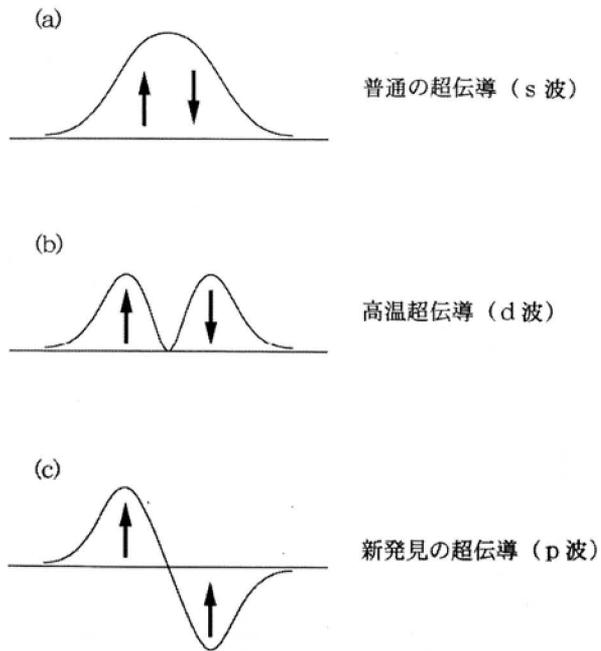


図4. 超伝導の電子対モデル (矢印はスピン)

その物理は同じものであることがわかりでしょう。

実は超伝導の位相に端を発して解かれた問題が、今年の仁科賞に決まった永長さんの強磁性異常ホール効果なのです。ここにも物性物理学が総合的となってきた例があります。

6. 金はなぜ黄金色？

1992年に仁科賞を受賞された大貫・長谷川さんは、前述のように重い電子系の謎を実験、理論の両面から系統的に解明されたわけですが、理論面を担当された長谷川さんの成功は、ウラン等の重元素における電子のバンド構造の計算にデラックの相対論的電子論を本格的に導入したことがポイントになっています。物性にも相対論が要るのか、と思われる方もおられるかもしれませんが、その理由を図5で示しましょう。左側の水素原子をこのサイズで書くとウラン原子は右図のようになります。特徴的なことは、92もある電子の中でラドン構造と呼ばれる内殻と、その外側に6個のかなり自由な電子があることです。それは5f、6d、7s軌道をミックスして動き、厳格な原子軌道を取らないため、多様な物性が出現します。そして、内殻軌道半径が水素に比べて非常に小さいのに注目してください。

このような電子軌道のバンド計算をするには相対論が欠かせません。ド・ブローイ波長が非常に短く、運動速度が速いため、電子の質量が重くなっており、軌道半径が小さくなっているからです。これを取り込んで初めて外殻電子の軌道、エネルギー等が正確に求まります。

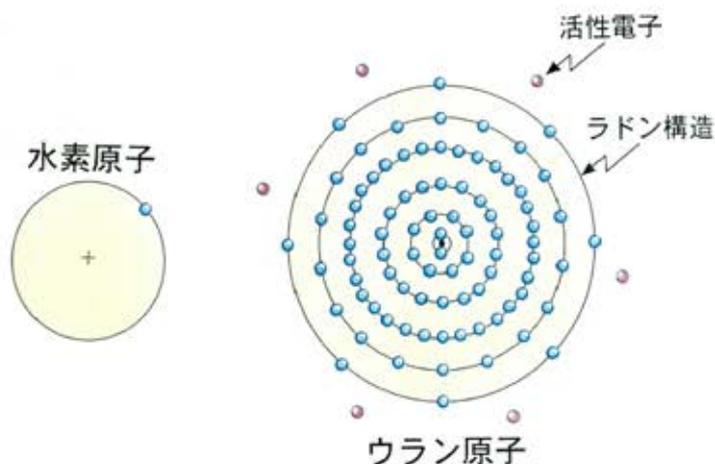


図5. 水素原子とウラン原子の構造

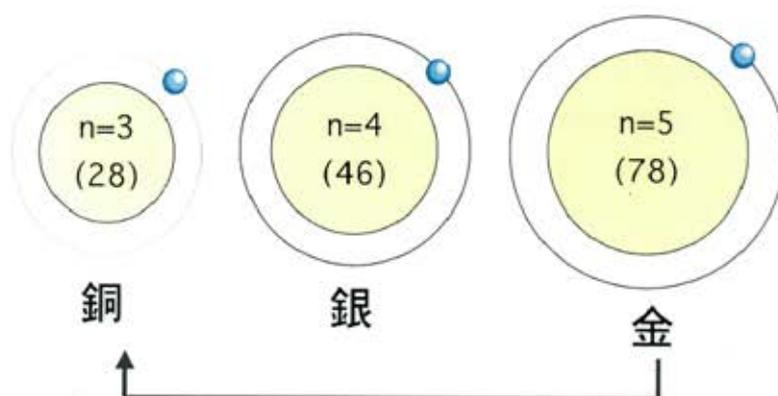


図6. 貴金属原子の構造 金は銅に戻っていく

この研究からおもしろい副産物が生まれました。金はなぜ黄金色に輝くのかということです。図6に銅、銀、金の原子模型を示します。それがあたかもアルカリ金属原子のようなシンプルな構造であることにご注意ください。外殻構造を保ったまま重金属化して、金では電子数が80に近くなっています。すると相対論的效果が大きくなり、電子軌道が縮み、原子全体が銅のそれに似てくるのです。一般に金属は重くなるほど黒っぽい銀色になっていきます。だから銅から銀への移行は自然なのですが、その先の金が銅のサイズと似てくると、その物理的性質、例えば色も銀よりは銅に近くなって、いわゆる黄金色となる、こんなシナリオが見えてきたのです。人々が愛してやまない黄金がアインシュタインの薬籠中にあったということはおもしろいことだと思います。ちょっと脱線しましたが。

7. 21世紀の仁科賞

ここまでの歴史を振り返り、これからの仁科賞がどんな展開をみせるのか想像してみましよう。もちろん、このような予測は当たらないことが多いわけです。意外な発見が予想もしない世界を切り開いていく、これが科学です。それを認めたい話です。

いくつかのキーワードがあると思います。第1はナノ科学です。その発展はすでに大きな流れになっています。すでに仁科賞にもこれが反映されています。外村さんや飯島さん

がその走りといってもよいでしょう。川畑さんのお仕事もナノ科学の流れの中で重要な理論と見られています。そして板谷さんのSPM、樽茶さんの人工原子は典型的なナノ科学です。また中村、蔡さんの研究は、これからのナノ科学を先取りするものです。このような研究がこれからの仁科賞にもより強く反映されていくと思われまます。

次のキーワードはビッグサイエンスです。物性でも大型の装置を利用する研究が増えてきました。原子炉の利用はすでに円熟したものとなっていますが、注目は放射光とパルス中性子です。いずれも加速器を利用するもので、前者では西播磨のSPring-8が代表的なものです。それはX線、真空紫外線源として多目的な科学、技術の発展に貢献しています。仁科賞としての一番乗りがペンタ・クオークの発見という素粒子分野であったのは驚きでしたが、これからは物質科学への貢献がいろいろあることだろうと思います。

もう1つの加速器科学、パルス中性子への期待は中性子散乱研究です。これまでは原子炉を利用した研究が中心で、仁科賞では石川さんのお仕事が高く評価されています。これは原子炉利用の定常的中性子源の利用でしたが、これをパルス化して桁違いの強度とする装置、J-PARCが東海村に建設されつつあります。これができると基礎、応用の両面で多くの成果が期待されます。21世紀にはX線と中性子線が車の両輪のように使われると思われまます。これらの性能が相補的だからです。中性子は小さな原子、水素原子からも大きな散乱があり、水素や水を多く含む生命物質の研究に有用です。また磁気からの散乱もあり、中性子の分散関係が物質内諸励起のそれと近いことから、非弾性（ラマン）散乱も容易に研究できます。あと2年ほどで完成するこの装置に期待がかけられています。

3番目のキーワードは生物物理学です。この分野から仁科賞はまだ出ていませんが、今後大きなインパクトをもたらす成果が出る可能性があります。その研究が生物学的であり、その成果が生物学に貢献するだけならば、それが仁科賞の対象とはなりにくいでしょう。しかし、生命自体が物質の最も華麗な機能であるとすれば、その核心にあるものは最も重要な物理学それ自体であろうと思われまます。このような意味で、われわれはこれからも注意深く見守りたいと思っています。

だいぶ急ぎましたが、これで物質科学から見た仁科賞の50年を終わります。それぞれの時代の最先端をいく物理学のレビューということで、話題の飛躍が多く、十分のご理解を得られなかったのではないかと危惧しております。それぞれの専門的な話につきましては関係文献等でご覧いただくことをお願いし、私の話を閉じさせていただきます。通俗的な入門書として、講談社ブルーバック스에「新しい物性物理」を最近書きましたので、ご参考までに。ご清聴ありがとうございました。なお、原稿の整理には、(財)新世代研究所の高瀬正江さんにご協力いただきました。併せて感謝いたします。