

2013年度 仁科記念賞 受賞者一覧

2013年11月7日

公益財団法人仁科記念財団

受賞者：^{かとり ひでとし}香取 秀俊 氏（東京都出身、49歳）
東京大学大学院工学系研究科教授
理化学研究所主任研究員

受賞業績：光格子時計の発明

受賞者：^{たかはし よしろう}高橋 義朗 氏（京都府出身、49歳）
京都大学大学院理学研究科教授

受賞業績：イッテルビウム超低温量子系の創出

受賞者：^{こんどう たかひ こ}近藤 敬比古 氏（茨城県出身、69歳）
高エネルギー加速器研究機構特別教授

^{こばやし とみお}小林 富雄 氏（千葉県出身、63歳）

東京大学素粒子物理国際研究センター教授

^{あさい しょうじ}浅井 祥仁 氏（石川県出身、46歳）

東京大学大学院理学系研究科教授

受賞業績：ヒッグス粒子発見に対する貢献

2013年度 仁科記念賞 授賞理由

受賞者：香取 秀俊 氏 Hidetoshi Katori

東京大学大学院工学系研究科教授

理化学研究所主任研究員

受賞業績：光格子時計の発明

Invention of optical lattice clocks

業績要旨：

香取秀俊氏は光格子時計、すなわち、多数の中性のストロンチウム原子を特定の「魔法波長」の光定在波でトラップすることによって、一次のシュタルク効果を相殺すると同時にドップラー効果の無い光の無反射吸収・放出を実現し、高精度の時間標準を作る方法を 2001 年に提案した。その後、2003 年に手法を実証し、2011 年には超高安定度動作を実現するなど、その実証においても世界をリードしてきた。現在、SI 単位系の「秒」はセシウム原子のマイクロ波遷移で定義されているが、原子の光学遷移を利用すれば格段に高精度の秒の定義が可能であると期待されており、18 桁の精度実現を目指した研究が進められている。数年前までは振動電場中にトラップした単一イオンの光学遷移がその有力候補であったが、香取氏が発明した光格子時計は、多数の原子を用いることで量子雑音を制御でき、より高精度の時間標準を作れる可能性があり、時間標準研究および付随した物理研究に新たな潮流を作り出した。精密な

時間標準は、GPS による測位計測などに重要な基幹技術であるが、同時に将来期待されるわずか 1 cm の高低差にともなう一般相対論的な時間のずれの検出とか微細構造定数などの物理定数の経時変化の可能性のテストなどの基礎科学にとっても基本的である。

授賞理由：

国際単位系 (SI) の「秒」は物理基本量の中で最も精密に定義されている量である。古くは地球の自転周期をもとに決められていたが、1956 年に地球の公転周期が基準となり、1967 年にはセシウム原子のマイクロ波遷移周波数によって再定義された。セシウム原子時計を用いた国際原子時の精度は現在約 15 桁であるが、原子のマイクロ波遷移の代わりに周波数が高い光学遷移を利用すれば、より高精度な原子時計—光原子時計—を構成し、秒を再々定義することができると期待される。

精度の高い光原子時計を目指す研究は 1980 年頃より始まり、数年前までは、ポールトラップ（高周波電場を用いて荷電粒子を捕獲する装置）に捕獲した一個のイオンの光学遷移を用いる「単一イオン光時計」が圧倒的な性能を誇っていた。ポールトラップの中心点では電場が零であり、イオンの光学遷移周波数に対する摂動が極めて小さい。しかし、一個のイオンを測定することに伴う量子雑音が分光精度を制限するという困難も指摘されていた。

香取氏が 2001 年に提案し、2003 年にストロンチウム原子を用いて実証した「光格子時計」は、「単一イオン光時計」とは全く異なる発想の原子時計である。中性原子を光の定在波（光格子）でトラップすると、一般的にはトラップに用いる光の振動電場によって、原子の電子状態のエネルギーが変化（シュタルクシフト）する。しかし、

ある特定の波長（魔法波長）で原子をトラップすると、基底状態と励起状態のシュタルクシフトが一致するため、光の摂動を受けない原子と同じ時計遷移周波数が測定できる。

図 1a に示すように、光格子時計では、およそ 100 万個の原子をレーザー冷却して光の定在波で作られたポテンシャル井戸に一個ずつ閉じ込め、原子の熱運動に起因するドップラー・シフトと、原子間相互作用を低減して、多数原子の同時観測を実現する。この際、図 1b に示すように、魔法波長 λ_L を用いた光格子では、基底状態 ($1S_0$) と励起状態 ($3P_0$) のシュタルクシフトが一致し、時計として用いる遷移周波数（赤矢印）は、光格子のレーザー光強度に影響されないのである。

原子時計の量子雑音は原子数 N の増加とともに $1/\sqrt{N}$ で低減されるため、多数の原子を同時に観測できる光格子時計の精度は劇的に向上し、理論的には 1 秒の測定で 18 桁の遷移周波数計測が可能になると期待される。

現実の原子時計では、量子雑音に加え、レーザー光の周波数雑音も考慮する必要がある。特に光格子時計では、量子雑音が $1/\sqrt{N}$ に低減されるため、レーザー光の周波数雑音が時計精度を決める主要因となる。

香取氏らは 2011 年に、同一のレーザー光で 2 台のストロンチウム光格子時計の原子を同時に励起してレーザー光の周波数雑音の影響を取り除く手法を開発し、17 桁の周波数比較に成功した（図 2）。これにより、光格子時計では、量子雑音を $1/\sqrt{N}$ に低減し、高い安定性を実現できることが初めて実証された。

現在、世界で 20 近くの主要標準研究機関・大学で光格子時計の熾烈な開発競争が行われている。特に、ストロンチウム光格子時計は、2005-2006 年頃からアメリカとフランスの標準研究所で追試実験が行われ、その結果を受けて、国際度量衡委員会は

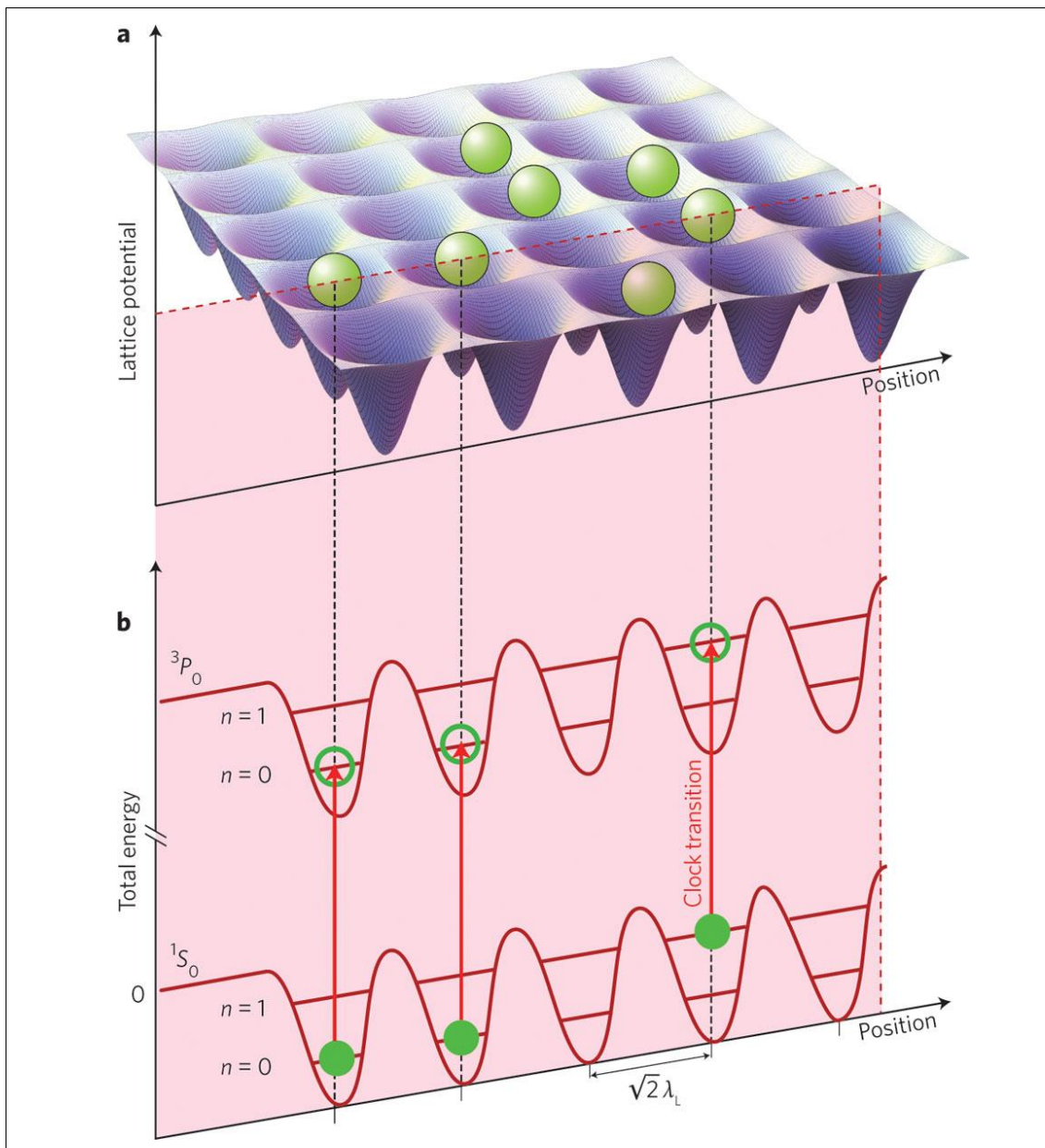


図1 光格子時計の概念図 (参考文献2より)

(a) 光の定在波による「格子」を作り、光格子ポテンシャル井戸に原子を1個ずつ捕獲する。(b) 光格子の波長を「魔法波長」に選ぶと、基底状態 1S_0 と励起状態 3P_0 のシュタルクシフトが一致するため、光電場の摂動は時計遷移周波数 (赤の矢印) を変化させない。

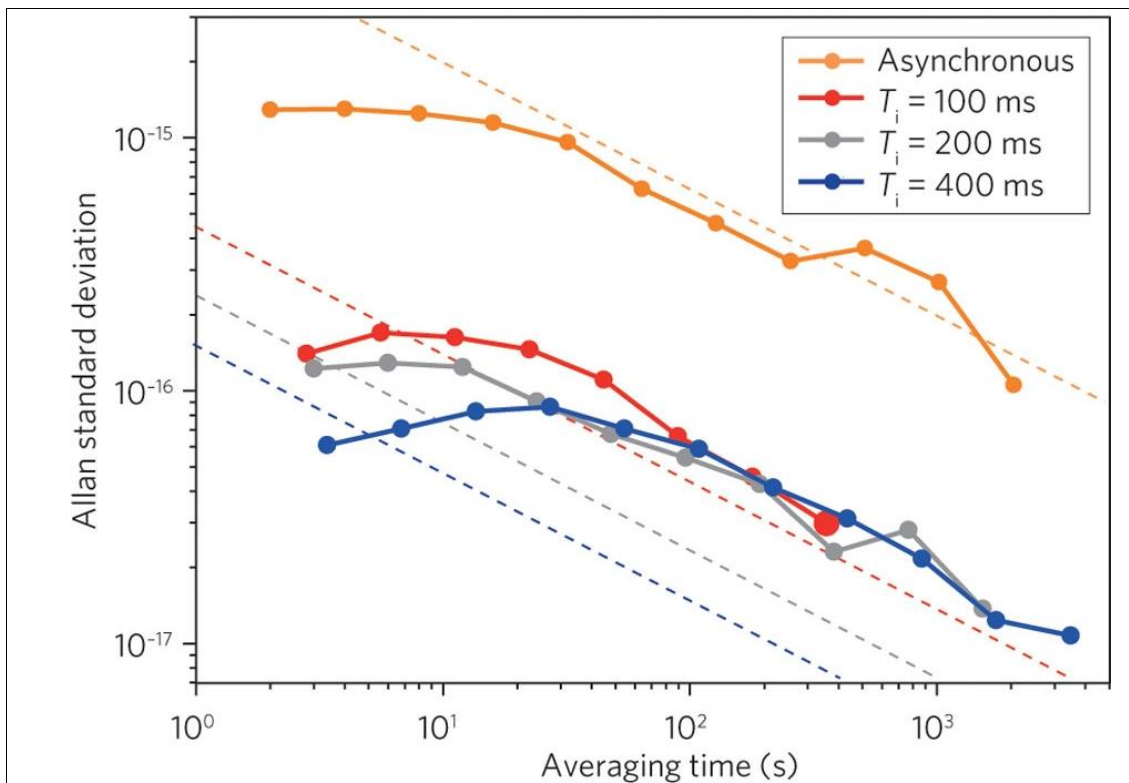


図2 光格子時計の安定性 (参考論文2より)

2台の光格子時計 (^{87}Sr と ^{88}Sr) を同一のレーザーで励起し、レーザー光の周波数雑音の影響を取り除いた結果、光格子時計がおよそ30分の平均時間で17桁の安定性を持つことが実証された (原子数 $N \sim 1000$ 個に相当)。

2006年にストロンチウム原子光格子時計を、将来の「秒の再定義」の有力候補である「秒の二次表現」の一つとして採択した。その後行われた、日本、アメリカ、フランス、ドイツの4か国、5グループによる周波数計測を受け、2012年10月の国際度量衡委員会で ^{87}Sr 原子の遷移周波数として $f(^{87}\text{Sr}) = 429\,228\,004\,229\,873.4$ Hz が勧告された。次世代の時間標準による秒の再定義は、今後10年以内にも行われると考えられており、光格子時計はその有力候補と目されている。

超高精度な時計の実現は、基礎物理研究にも新たな可能性を拓く。香取氏らが光格

子時計とセシウム原子時計を3年間比較し、微細構造定数などの物理定数の経時変化および重力と結合に強い制限を与えた研究（参考論文3）はその例である。最近行われた2台の光格子時計の遠隔比較実験で、すでに高低差にともなう一般相対論的な時間の遅れが検出されており（参考論文4）、今後、2台の光格子時計の遠隔比較実験で18桁の精度が達成されるようになれば、わずか1 cmの高低差にともなう一般相対論的な時間の遅れも検出可能となり、これを用いた新たな計測技術・研究分野が開かれると期待される。

参考論文：

- 1) Katori H, Takamoto M, Pal'chikov VG, Ovsiannikov VD, “Ultrastable optical clock with neutral atoms in an engineered light shift trap”, Phys. Rev. Lett. 91 (2003) 173005.
- 2) Katori H, “Optical lattice clocks and quantum metrology”, Nature Photonics 5 (2011) 203.
- 3) Blatt S, Ludlow AD, Campbell GK, Thomsen JW, Zelevinsky T, Boyd MM, Ye, J, Baillard X, Fouché M, Le Targat R, Brusch A, Lemonde P, Takamoto M, Hong FL, Kato H, Flambaum VV, “New Limits on Coupling of Fundamental Constants to Gravity Using ^{87}Sr Optical Lattice Clocks”, Phys. Rev. Lett. 100 (2008) 140801.
- 4) Yamaguchi A, Fujieda M, Kumagai M, Hachisu H, Nagano S, Li Y, Ido T, Takano T, Takamoto M, Katori H, “Direct Comparison of Distant Optical Lattice Clocks at the 10^{-16} Uncertainty”, Applied Physics Express 4 (2011) 082203.

受賞者：高橋 義朗 氏 Yoshiro Takahashi

京都大学大学院理学研究科教授

受賞業績：イッテルビウム超低温量子系の創出

Creation of ultracold quantum systems of Yb atoms

業績要旨：

高橋義朗氏はイッテルビウム (Yb) 中性原子気体の冷却・閉じ込め、光格子の導入により、さまざまな新しい量子系を実現し、冷却原子研究の中で世界を先導する役割を果たした。Yb には核スピンの異なる安定な同位体が多数存在するので、それらを組み合わせることにより縮退度の異なるボース粒子やフェルミ粒子からなる多彩な量子系を作り出すことができる。Yb は最外殻軌道に 2 個の電子を持ち (2 電子原子)、全電子スピンの総和がゼロとなって磁気モーメントを持たないため、最外殻電子が 1 個のアルカリ原子の場合とは異なり、通常の磁気トラップによる閉じ込めができない。高橋氏は、全光学的な冷却・閉じ込めの技術開発を行い、ボース・アインシュタイン凝縮やフェルミ縮退を実現し、さらにすべての同位体間の相互作用のパラメーターを決定して、光格子中に量子統計性の異なる粒子からなる多様な量子系を作りだすことに成功した。強い相関により生成される「ボース・フェルミ混合モット状態」や、高いスピンの対称性を保持した「SU(6)フェルミ・モット状態」などの未知の量子状態がその例である。この研究が契機となり、理論研究も盛んになり、Yb や他の 2 電子原子を用いた同様の実験が世界中で行われるようになった。高橋氏は「2 電子原子を用いた量子系の研究」という新しい

研究分野を切り開いた。

授賞理由：

レーザー冷却の手法で、中性原子の気体を超低温に冷却する手法が 1990 年代に開発され、ボース・アインシュタイン凝縮やフェルミ縮退、BCS 相転移など目覚ましい研究が次々に行われた。最近では、この超低温の量子気体に光格子と呼ばれる周期的なポテンシャルを導入した系が新しい強相関係として、実験理論両面から研究され、量子多体系の研究の新たな方向の一つとして進展している。しかし、これまでの冷却原子気体関連の研究は、ほぼすべてアルカリ原子を対象にして欧米の研究者によって行われた。

高橋義朗氏は世界に先駆けて、イッテルビウム (Yb) 原子に着目して研究を開始した。Yb 原子には核スピンの異なる安定な同位体が存在し、核スピンの大きさにより縮退度の異なるボース粒子 (5 種類)、フェルミ粒子 (2 種類) からなる多彩な量子系を作り出すことができる。さらに、Yb 原子には長寿命の準安定な励起状態が存在し、基底状態とは大きく異なる性質を持った電子軌道状態として利用することができ、この準安定状態と基底状態との間の光学遷移により、さまざまな情報を引き出すことができるなどの優れた特徴を持っている。ただし、Yb 原子には、最外殻 s 軌道に電子が 2 個存在し (そのような原子を 2 電子原子と呼ぶ)、全電子スピンのゼロであって磁気モーメントを持たないため、電子 1 個のアルカリ原子とは異なり、通常の磁気トラップを使うことができない。そこで高橋氏は全光学的に冷却・閉じ込めを実現する技術を独自に開発した。

高橋氏は 2003 年に、Yb 原子で初めてのボース・アインシュタイン凝縮を実現する

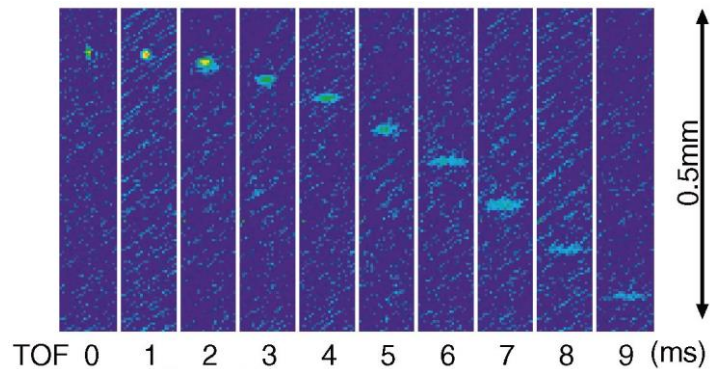


図1. ボース・アインシュタイン凝縮状態に閉じ込められた ^{174}Yb 原子が解放されたときの広がり時間変化。参考論文 1)より

ことに成功し (図 1, 参考論文 1)、2007 年には Yb 原子系初のフェルミ縮退も実現した。超低温の中性原子間の相互作用は、散乱長という量で記述されるが、Yb 原子に対しては理論的にも実験的にも全くその情報がなかった。高橋氏は、2 原子から分子を生成してその束縛エネルギーを精密に決定する実験を多数の同位体に対して系統的に行い、Yb 原子の全ての同位体および異種同位体間の散乱長を高精度に決定した。さらに、光で原子間相互作用を変化させ、それをサブミクロンスケールで空間変調することに成功し、さらに、基底電子状態と励起準安定状態間で、磁場により相互作用を変化させることにも成功した。

その後、Yb 原子のさまざまなボース・フェルミ混合量子気体を実現し、さらにそこに光格子を導入することで強相関係へと変化させ、そのユニークな性質を明らかにしてきた。例えば、斥力相互作用するボース・フェルミ混合系で「ボース・フェルミ混合モット絶縁体状態」を実現した (参考論文 2)。この状態では、各格子点をボソンまたはフェルミオンの一粒子が占有するモット絶縁体を形成している。さらに、6 つのスピ成分を持ち SU(6)対称な Yb 原子を光格子に導入し、「SU(6)モット絶縁体」

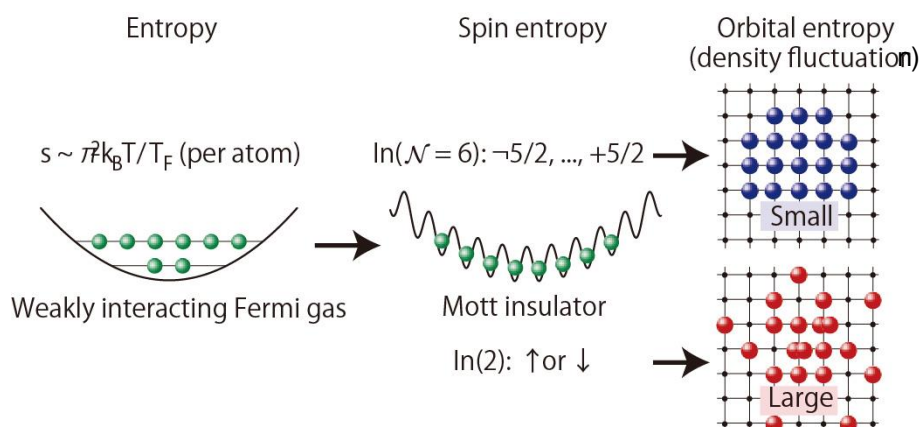


図 2. 核スピンで 6 重に縮退した場合と通常の電子スピンのように 2 重縮退したフェルミ粒子を光格子に閉じ込めたときの密度分布。2 重縮重の場合には有効温度が大きく上昇する。参考論文 3)より

を実現することに成功した (図 2, 参考論文 3)。このような Yb 原子を用いた高橋氏のさまざまな研究は世界中の多くの実験・理論研究者の注目を集め、Yb 原子や他の 2 電子原子を用いたボース・アインシュタイン凝縮、フェルミ縮退や光格子の研究がその後世界中で行われるようになった。このように、高橋義朗氏は「2 電子原子を用いた量子系の研究」という新しい研究分野を切り開いた。

参考論文

- 1) Y. Takasu, K. Maki, K. Komori, T. Takano, K. Honda, M. Kumakura, T. Yabuzaki, and Y. Takahashi, [Phys. Rev. Lett. 91, 040404 \(2003\)](#).
- 2) S. Sugawa, K. Inaba, S. Taie, R. Yamazaki, M. Yamashita, and Y. Takahashi, [Nat. Phys. 7, 642 \(2011\)](#).
- 3) S. Taie, S. Sugawa, R. Yamazaki, and Y. Takahashi, [Nat. Phys. 8, 825 \(2012\)](#).

受賞者：近藤 敬比古 氏 Takahiko Kondo

高エネルギー加速器研究機構特別教授

小林 富雄 氏 Tomio Kobayashi

東京大学素粒子物理国際研究センター教授

浅井 祥仁 氏 Shoji Asai

東京大学大学院理学系研究科教授

受賞業績：ヒッグス粒子発見に対する貢献

Contribution to the discovery of the Higgs boson

業績要旨：

素粒子の標準模型に現れるすべてのクォーク、レプトンおよびゲージ粒子は発見されていたが、ヒッグス機構を担うヒッグス粒子の発見は大きな課題として残されていた。2008年に完成したジュネーブ近郊にあるLHC (Large Hadron Collider) は重心系のエネルギー8 TeV (テラ電子ボルト) までの陽子ビーム衝突を用いて素粒子の研究を行ってきたが、2012年7月に二つの国際共同実験グループ、すなわち ATLAS および CMS、は質量 $126 \text{ GeV}/c^2$ の新粒子を発見し、それがヒッグス粒子と矛盾しない特性を有すると発表した。両グループはさらに解析事例数を増やした結果、本年3月にそれがヒッグス粒子であると宣言した。未知のエネルギー領域のこの実験研究は世界の研究者の知恵と技術を結集して行われており、ATLAS 実験の場合には現在約 3800 人の研究者が実験に参加している。日本からは約 150 名の研究者(大学院生も含む)が ATLAS

実験に参加し、ATLAS 検出器の鍵となる超伝導ソレノイド、シリコン飛跡検出器、ミューオン検出器などの重要部分の建設を行い、データ解析に精力的に取り組んで、今回のヒッグス粒子発見に大きな貢献をした。とくに、小林富雄、近藤敬比古両氏は日本チームのリーダーとして建設当初から参加し、ATLAS 検出器の立案と建設および運転を国際チームの重要メンバーとしてやり遂げた。一方、浅井祥仁氏は観測データの解析で日本チームはもとより国際チームの中で指導的役割を果たし、ヒッグス粒子発見に大きな貢献をした。

授賞理由：

素粒子の標準模型は知られている素粒子間の全ての相互作用を矛盾なく記述している。これらの相互作用は、電磁相互作用、弱い相互作用および強い相互作用の3つに分類されるがこれらは全てゲージ場（ヤン・ミルズ場）と呼ばれるスピンの1の場で記述される。とくに、ワインバーグとサラムによる弱い相互作用のゲージ理論では、質量が陽子の約100倍のW粒子およびZ粒子と呼ばれる粒子が相互作用を媒介している。ゲージ場は、ゲージ対称性の要求から質量が一般にゼロになるが、南部陽一郎博士が提案した対称性（現在の場合はゲージ対称性）を破る真空という概念を用いると、ゲージ場に自然な形で質量を与えることが可能である。このゲージ場に質量を与える一般的なメカニズムを定式化したのが、ヒッグス (P. Higgs)、アングラール (F. Englert) 博士等であり、Brout-Englert-Higgs メカニズムと呼ばれている。この機構で質量を得た粒子の理論は朝永振一郎博士等が定式化したくり込み理論の枠組みにおさまり、したがって高次の量子効果の信頼できる計算が可能である。この質量を持つゲージ場のくり込み可能性を保証しているのが、今回発見されたヒッグス粒子と呼ば

れるスピンのゼロで真空と同じ量子数を持つスカラー粒子である。またヒッグス粒子は、ワインバーグ・サラムの理論では全てのフェルミ粒子に（ニュートリノのディラック的な質量を含めて）ゲージ対称性を損なわずに質量を与えている。

1980年代における W および Z 粒子の発見および弱電磁相互作用理論の高次の効果を含めた成功は、ヒッグス粒子の存在を強く示唆しており、ヒッグス粒子を発見することが素粒子物理学の最大の課題となった。この実験計画はそのエネルギーの高さ、加速器の規模、測定器の規模の全てにおいてこれまで未経験の領域であり、全世界の高エネルギー実験家数千人を巻き込む巨大なプロジェクトとなった。CERN での LHC (Large Hadron Collider) と呼ばれる陽子・陽子衝突型加速器の建設に合わせて、二つの巨大な測定器の建設が開始された。これらは、ATLAS および CMS と呼ばれており、日本の研究者は ATLAS 実験に参加している。この測定器の建設から実験の開始、そしてデータの解析は文字通り複数の世代にまたがる長期プロジェクトであった。

まず、測定器の立案と建設からデータの取得にいたる段階で日本人研究者を率いて中心的な役割を果たしたのが、小林富雄および近藤敬比古両氏であった。両氏の率いる日本グループは ATLAS 実験グループの発足当初から国際協力の中心メンバーとして活躍し、ATLAS 検出器の立案および検出器の中で重要な役割を果たす超伝導ソレノイド、シリコン飛跡検出器、ミューオン検出器などを国内外の研究者と共に成功裏に建設し、超高エネルギー衝突における超多重発生現象の測定を可能にした。またその運転もきわめてスムーズに遂行している。

2009 年から本格的なデータを取り始めると実験は第 2 段階に入り、超高エネルギー衝突の新たなエネルギー領域における膨大なデータの解析が始まった。この段階で

主導的な役割を果たしたのが浅井祥仁氏を中心とする若い世代の研究者であった。東京大学に設立された ATLAS データ解析センター (TIER2) を基盤として、ヒッグス粒子の二つのガンマ線への崩壊等の物理解析の面でも活躍し、今回のヒッグス粒子発見に大きな貢献をした。

このようにして、2012年7月に CERN の陽子・陽子衝突型加速器 LHC (図1) における二つの実験グループ、すなわち ATLAS 実験 (図2) および CMS 実験は、質量 $126 \text{ GeV}/c^2$ の新粒子を発見したと発表した。(図3)。さらにスピンやパリティなどの解析の結果、この新粒子が過去40年近く多くのエネルギーフロンティア加速器実験で探索されてきたスピンゼロのヒッグス粒子であることが確定した。

日本からは LHC 建設当初から多くの大学・研究機関 (現在は15機関から約150人の研究者及び大学院生) が ATLAS 実験に参加し、世界の38カ国約3800人の研究者とともに国際共同実験を行っている。多くの研究者が参加する研究で、小林富雄、近藤敬比古および浅井祥仁の3氏がそれぞれの実験の段階で指導的役割を果たして、国際共同実験を成功裏に遂行し、超伝導磁石に関して多大な貢献をした山本明氏と共に、ヒッグス粒子発見に導いた功績は特筆すべきものがある。

参考論文

1. "Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC", ATLAS Collaboration, Physics Letters B716 (2012) 1-29.
2. "Evidence for the spin-0 nature of the Higgs boson using ATLAS data", ATLAS Collaboration, Physics Letters B726 (2013) 120.

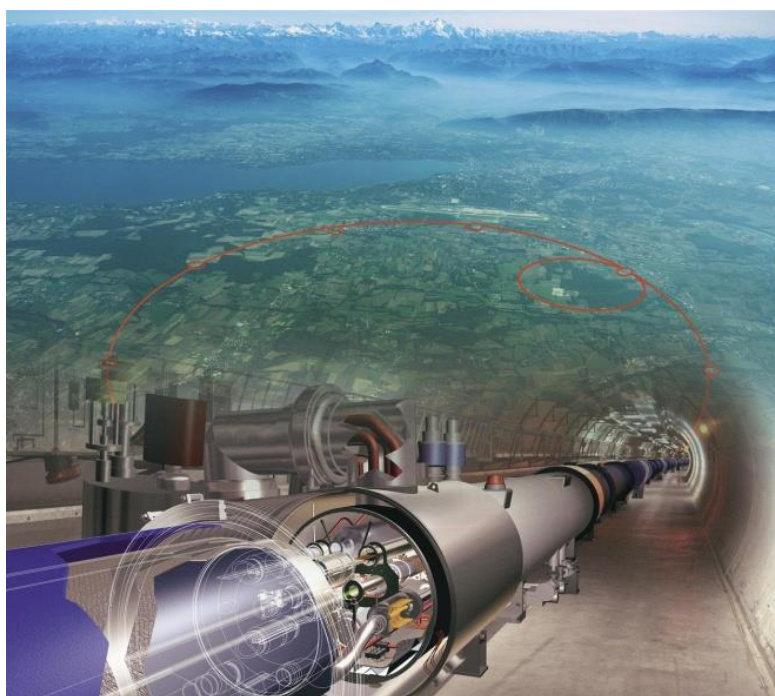


图1 LHC 加速器概念图

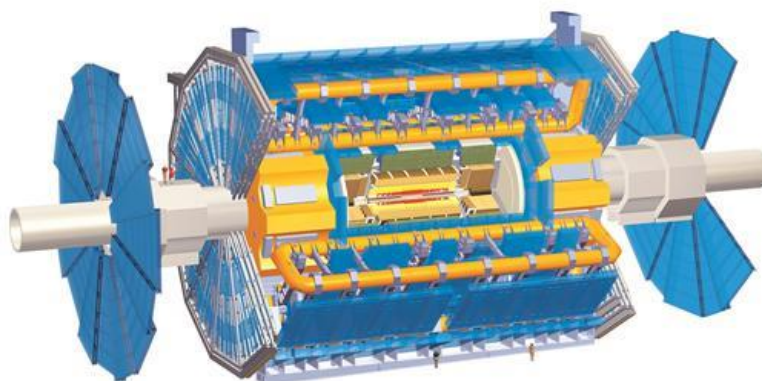


图2 ATLAS 検出器 概念图

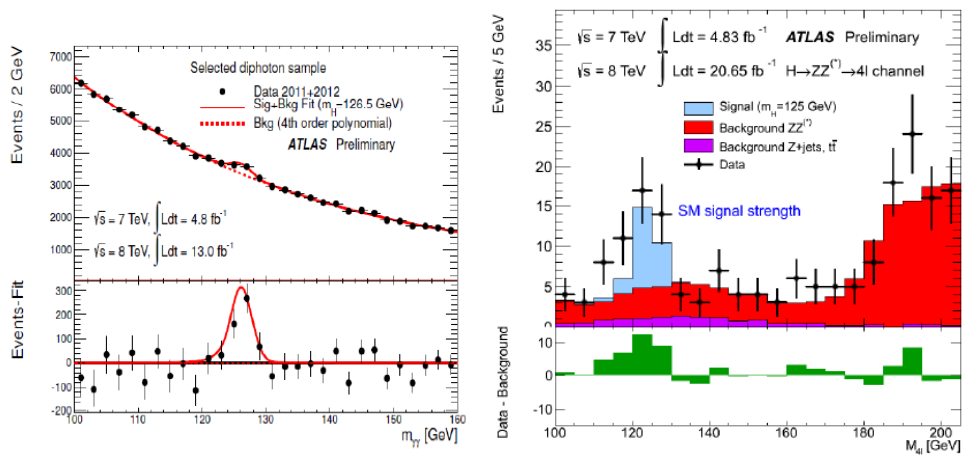


図3 ATLAS 実験で観測されたヒッグス粒子と考えられる粒子の質量分布図。

共におよそ質量 $126 \text{ GeV}/c^2$ 近傍に山が見られる。

左図：2つのガンマー線への崩壊過程。下段はバックグラウンドを引いた図。

右図：4つのレプトンへの崩壊過程。下段はバックグラウンドを引いた図。