

受賞者:家 正則(いえ まさのり)(国立天文台教授)

受賞者業績: すばる望遠鏡による初期宇宙の探査



生年月日： 昭和 24 年 8 月 13 日

学 歴

1968 年 (昭和 43 年) 3 月 大阪府立北野高等学校卒業
1972 年 (昭和 47 年) 3 月 東京大学理学部卒業
1974 年 (昭和 49 年) 3 月 東京大学大学院理学系研究科天文学専攻修士課程修了
1977 年 (昭和 52 年) 3 月 東京大学大学院理学系研究科天文学専攻博士課程修了
1977 年 (昭和 52 年) 3 月 博士 (理学) (東京大学)

職 歴

昭和 52 年 4 月 - 10 月 日本学術振興会奨励研究員
昭和 52 年 11 月 - 56 年 1 月 東京大学理学部天文学科助手
昭和 56 年 2 月 - 61 年 7 月 東京大学東京天文台助手
昭和 61 年 8 月 - 63 年 6 月 東京大学東京天文台助教授
昭和 63 年 7 月 - 平成 4 年 10 月 国立天文台助教授、(東京大学理学部助教授併任)
平成 4 年 11 月 - 現在 国立天文台教授、(総合研究大学院大学教授併任)、(東京大学理学部教授併任)

業績要旨： ビッグバンで始まった宇宙は、その後の膨張過程においてさまざまな進化の痕跡を残してきた。家正則氏は、すばる望遠鏡での研究グループの中心となって、宇宙を構成する主成分である銀河がいつ誕生し、どう宇宙環境に影響したか、などの研

究を押し進めてきた。研究グループは現在知られている最遠方銀河10個のうち9個までをすばる望遠鏡で発見しているが、中でも家氏が設計・製作した狭帯域フィルターを用いて、約129億光年かなたの最遠銀河を発見するという特筆すべき成果を挙げた。

授賞理由

現在の標準的宇宙論はビッグバン理論であり、宇宙背景放射の存在、そのゆらぎの検出、ヘリウムの遍在など、理論を証明する具体的証拠が蓄積されてきた。ビッグバンで始まって以降、現在に至るまでの宇宙進化の節目となった痕跡がひとつずつ確認され、宇宙の時間表がほぼ確定されるようになったのである。

それによれば、宇宙誕生後約1－3分の間に原子核反応によるヘリウムが形成され、約38万年頃に宇宙背景放射が自由に宇宙全体に広がっていった。（この2つは観測によって確認されている。）その後、宇宙は中性で低温の原子が漂う海となって、一切の輝く天体が存在しない「暗黒時代」を過ごすことになった。ところが、宇宙誕生後137億年を経過した現在の宇宙には銀河が輝き、宇宙空間に分布するガスは高温で完全イオン化されている。当然、宇宙のある時期に銀河が誕生し、その作用によって宇宙空間のガスが加熱されイオン化されるという事件が起こったことは確かである。それはいつ頃のことであったのか、その過程で宇宙の物質はどのような変化をしたのか、それが現在宇宙論の最大の焦点となっている。まさに、宇宙の造型がどのようになされたかの問題である。

その重大な証拠として宇宙背景放射のゆらぎが人工衛星COBE（宇宙背景放射探査機）によって発見され（ビッグバン宇宙の第3の証拠）、それが重力不安定による銀河形成の種となったことが示された。さらに、人工衛星WMAP（ウィルキンソン・マイクロ波非等方探査機）は、ゆらぎの波長分布まで明らかにするとともに、宇宙のパラメーターを驚くほどの精度で決定することに成功した。それによって、初代の銀河の形成はビッグバンから約2億年の頃に始まり、それ以後に宇宙の加熱・イオン化が進んだことが明らかになった。銀河形成の時期や星生成量について、理論は不定性が多すぎて何も言えず、観測的に決定しなければならない。

折しも、すばる望遠鏡が稼働し始め、他の8m級望遠鏡にはない大きな視野を持つ主焦点カメラの特性を活かした研究が開始された。その中で特に重要なテーマは「すばる深宇宙探査（SDF）」で、宇宙の奥深くを見通せるよう、近くの星や銀河が見えない空の一角を選んで望遠鏡を長時間向け、生まれたての若い銀河をハントすることが目的である。この観測を主導して、すばる望遠鏡の威力を最大限に引き出すことに成功した

のが家氏たちのグループであった。

その戦略は、主焦点カメラに狭帯域フィルターをかけて遠方銀河の候補 4 1 5 3 3 天体をピックアップし、そこからフィルター間での明るさを比較して遠方銀河候補天体を絞り込み、分光観測で特徴的な輝線を写し出して距離（つまり、宇宙の時刻）を決定するというものである。遠方の銀河は宇宙膨張のために大きな速度で後退しており、銀河の光はドップラー効果によって赤い方へずれる。その中で、良い指標となるのは静止した水素原子が放つ 121.6 nm のライマン・アルファ輝線で、距離が 1 2 4 億光年以上彼方の銀河では波長が 720 nm 以上にまで赤方偏移している。それを撮影することができれば、宇宙の物質の主成分である水素が強く発光していることになるので、銀河であると考えて良い。しかし、この波長領域では地球大気中に含まれている OH 分子の発光スペクトルが強いという問題がある。幸いなことに OH のスペクトルはバンド状になっており、ところどころにギャップ（発光しない部分）が存在する。ちょうどそのギャップのところにライマン・アルファ輝線が放出されていれば、そこに狭帯域フィルターをかけると輝線を検出することができることになる。

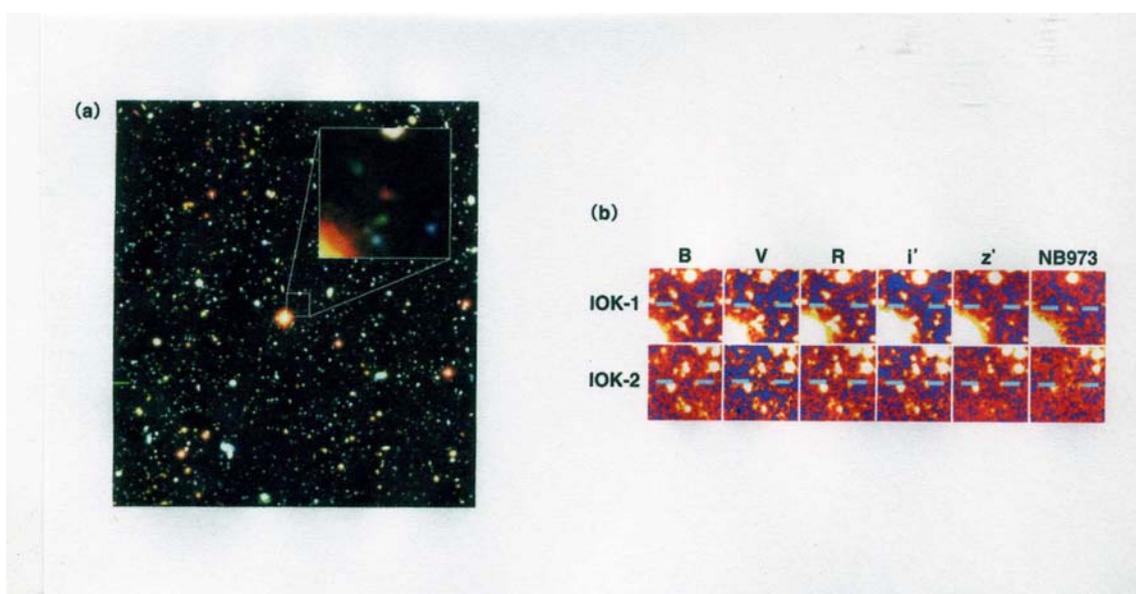
まず、この方法によって、家氏たちは遠方に多くの LAE（ライマン・アルファ放出天体）を発見できることを示した。宇宙の暗黒時代を探る有力な手法を開発したのである。極めつけは、赤方偏移が 6.964 で（ライマン・アルファ輝線が静止系から 7.964 倍の 968 nm まで遷移している）、私たちからおよそ 1 2 9 億光年離れた最遠方の銀河を発見したことだ（発見者の三人の名前、家・大田・柏川のイニシャルをとって IOK-1 天体と呼んでいる）。ビッグバン後、わずか 8 億年しか経っていない、ごく若い銀河である。現在、最遠方（距離が 1 2 8 億光年より遠くにある）銀河 1 0 個のうち 9 個までがすばる望遠鏡の成果であり、この方法がいかに有力であるかがわかる。

と同時に、多数の LAE を検出できたことにより、その統計をとることによって、暗黒時代終焉の頃の宇宙進化について重要な示唆を与えてくれることになった。LAE の数分布が距離（時間）とともにそう変化していないのに、距離が遠くなる（宇宙時間が若くなる）に従いライマン・アルファ輝線が明るい銀河の数が減っていることがわかってきたのだ。その解釈としては、古いほど銀河の数が減っているのではなく、宇宙が若い頃はまだ中性水素ガスが多いために散乱吸収が激しく、輝線の光度が下がっているとする方が都合がよい。宇宙のガス成分が中性原子から、加熱されイオン化した状態へ移りつつある途中ではないか、というわけである。まだ、例数が少ないので最終結論ではないが、今後の重要課題を提起したことになる。

以上の研究結果は、SDF グループによる 1 0 編以上の論文として発表されているが、その中で家正則氏が中心となって研究を押し進めてきたことは確かである。特に、ライ

マン・アルファ輝線検出の決定的な役割を果たした狭帯域フィルターを設計・製作してLAE探査を開始し、最遠銀河を発見した功績は家氏の貢献抜きでは語れない。現在、CCD素子の観測波長限界に達しつつあるとはいえ、より遠方の銀河ハントの競争は続くだろう。また、宇宙空間のガスが加熱・イオン化された宇宙の暗黒時代の終焉時期をきちんと確定するという仕事も残されている。家氏の今後の活躍が期待されるところである。

さらに、この研究成果は建設後十年弱経ったすばる望遠鏡の能力を最大限に引き出したものであり、すばる望遠鏡の建設期から携わり、補償光学法を開発・装備してきた家氏の寄与は高く評価できる。その点も授賞の背景にあることを付け加えておきたい。



(a) 最遠銀河（赤方偏移6.964）の画像。

SDFによって撮られた画像において、右上にクローズアップしたように赤くぼんやりと見える天体が最遠方銀河IOK-1である。非常に遠いので光度は低く、宇宙膨張のために赤くなっている。

(b) 2つの銀河の5色フィルターと狭帯域フィルター画像の比較。

最遠方銀河IOK-1ともう一つの候補天体IOK-2の、5色フィルター図と狭帯域フィルター（NB973）をかけたときの比較図。青い2本の棒の間に映っているのが銀河像である。5色のフィルターにおける光の強度分布から遠方銀河の候補を絞り込み、分光器でライマン α 輝線の波長を測定して赤方偏移を決定することができる。IOK-2は、その後の分光観測の結果、ライマン α 輝線が確認できず、遠方の銀河ではないと結論された。

(「パリテイ」 2008年11月号、家正則による。)

主要論文

- 1) Kashikawa, N. *et al.* *The Subaru Deep Field: The Optical Imaging Data*, *Publ. Astron.Soc.Japan*, **56**, 1011-1023 (2004).
- 2) Taniguchi, Y., *et al.* *The SUBARU Deep Field Project: Lyman- α Emitters at a Redshift of 6.6*, *Publ. Astron. Soc. Japan*, **57**, 165-182 (2005).
- 3) Shimasaku, K. *et al.* *Emitters at $z = 5.7$ in the Subaru Deep Field*. *Publ. Astron.Soc. Japan*, **58**, 313-334 (2006).
- 4) Kashikawa, N. *et al.* *The End of the Reionization Epoch Probed by Ly α Emitters at $z = 6.5$ in the Subaru Deep Field*. *Astrophys.Journ.* **648**, 7-22 (2006).
- 5) Iye, M., *et al.* *A galaxy at a redshift $z = 6.96$* . *Nature*, **443**, 186-188 (2006).

受賞者：上田 正仁氏（うへだ まさひと）（東京大学大学院理学研究科教授）

受賞者業績： 引力相互作用する原子気体のボース・アインシュタイン
凝縮の理論的研究



生年月日：昭和 38 年 4 月 30 日

学 歴

昭和 61 年 3 月 28 日	東京大学理学部物理学科卒業
昭和 63 年 3 月 29 日	東京大学大学院理学系研究科物理学専攻修士課程 修了
平成 3 年 11 月 25 日	理学博士取得（東京大学）

職 歴

昭和 63 年 4 月 1 日	日本電信電話株式会社基礎研究所 研究員
平成 4 年 10 月 1 日	東京大学物性研究所嘱託研究員（NTTと兼務）
平成 6 年 10 月 1 日	広島大学工学部第二類電子物性大講座助教授
平成 8 年 7 月 1 日	イリノイ大学アーバナ・シャンペン校客員研究員（兼任）
平成 10 年 4 月 1 日	広島大学大学院先端物質科学研究科助教授（兼任）
平成 12 年 4 月 1 日	東京工業大学大学院理工学研究科物性物理学専攻教授
平成 20 年 3 月 1 日	東京大学大学院理学系研究科物理学専攻教授

業績要旨： レーザー冷却された原子系は原子間相互作用、原子密度、温度を外部から制御できる注目すべき量子多粒子系である。上田正仁氏はトラップされた引力相互作用するボース粒子系のボース・アインシュタイン凝縮を理論的に詳しく考察し、引力に

よって崩壊する条件を求め、崩壊の起こる動的過程の研究から、崩壊が間欠的に起こることを初めて明らかにした。その結果は実験の結果をよく説明するだけでなく、崩壊過程の中に粒子間相互作用の詳細が反映されることを示し、この分野の発展に貢献した。

授賞理由

物質を構成する粒子にはフェルミ粒子とボース粒子の2種類があり、低温においては、それぞれ粒子の集団は全く異なる振る舞いをする。ボース統計にしたがうボース粒子系は極低温においてボース・アインシュタイン凝縮という量子力学特有の状態になる。これは1925年にアインシュタインによって理論的に示された。しかし、現実のボース粒子系の実験的研究は、長い間、ヘリウム4 (^4He) のみに限られていた。1995年に磁気トラップの中で原子のレーザー冷却を行い、数ミクロン程度の領域に超低温の原子集団を閉じ込める方法が考案され、状況が一変した。実験的に調べることのできるボース粒子系の種類が飛躍的に増え、温度、粒子間の相互作用の強さ、密度を制御する方法の考案と相まって、ボース・アインシュタイン凝縮という量子力学特有の状態を、理論と実験の協力の下に、詳しく研究することが可能になった。

ボース粒子系の場合、粒子間の相互作用が斥力の場合と引力の場合とで状況が異なる。斥力の場合には、ボース・アインシュタイン凝縮 (BEC) は安定的に実現する。しかし、引力相互作用の場合には、それは粒子を互いに引き寄せ、ボース・アインシュタイン凝縮を壊す傾向がある。引力相互作用するリチウム7原子系でBECが実験的に観測され、多くの研究者の関心を集め、これは不確定性関係に起因する量子的零点圧力と引力とのバランスで起こることが明らかにされた。粒子間相互作用は外部磁場によって制御でき、相互作用を斥力から引力に変えることができるので、この相互作用の影響を実験的に詳しく研究できることが明らかになってきた。

上田正仁氏はこの引力相互作用するボース粒子系を理論的に詳しく研究し、ボース・アインシュタイン凝縮状態が引力相互作用によって崩壊する条件や崩壊の過程を調べた。同時に、実験研究者と情報を交換しつつ、実験結果との比較から、崩壊現象が引力相互作用するボース粒子系のどのような特徴にどう依存するかを調べ、以下の興味ある理論的な結果を、Leggett氏および斎藤弘樹氏らと共同で見いだした。

(1) まず、トラップに閉じ込められた原子気体の不確定性関係から生ずる圧力とそれに対抗する粒子間の引力の競合関係からボース・アインシュタイン凝縮状態が崩壊する条件を求めた。

(2) 次に、粒子同士の衝突による減衰項を考慮に入れた”グロス・ピタエフスキー方程

式”を数値的に解くことによってその崩壊過程を詳しく調べた。その結果、ボース・アインシュタイン凝縮状態の崩壊は間欠的に、爆発的に起こり、それによってトラップ内の原子数が次第に減少する様子が明らかになった。こうして理論的に得られた原子数の時間変化は実験結果をよく説明する。下図に一例を示す。

図：磁場の強さを変えて相互作用を斥力から引力に変えると、 t_{collapse} 後、突然、スパイク状に爆発が起こり、トラップからボース粒子が逃げてゆく。その様子は超新星の爆発のようである。トラップに残る粒子数が少なくなると爆発が止み、ボース・アインシュタイン凝縮が残ることをしめす。丸は実験値、実線が理論である。[H. Saito and M. Ueda: Phys. Rev. A65, 033624 (2002) から転載]

(3) この研究をさらに発展させて、ボース粒子間の相互作用が異方的である場合には、方向に依存した特徴的な崩壊が起こることをクロム原子 (^{52}Cr) について具体的に示し、実験との比較を通してその描像の正しさを例証し、実験結果の解釈を可能にした。

これらの上田氏の研究は今後の研究に大きい影響を与えると期待される。上田氏は、ここに記した研究以外の問題でも、トラップされた原子系を研究している国内、国外の実験家に新しいアイデアを提供し、研究の発展に貢献している。

主要論文

[1] M. Ueda and A. J. Leggett: Phys. Rev. Lett. **80**, 1576 (1998)

“Macroscopic Quantum Tunneling of a Bose-Einstein Condensate with Attractive Interaction”

- [2] M. Ueda and A. J. Leggett: Phys. Rev. Lett. **83**, 1489 (1999)
“Ground-State Properties of a Rotating Bose-Einstein Condensate with Attractive Interaction”
- [3] H. Saito and M. Ueda: Phys. Rev. Lett. **86**, 1406 (2001)
“Intermittent Implosion and Pattern Formation of Trapped Bose-Einstein Condensates with Attractive Interaction”
- [4] H. Saito and M. Ueda: Phys. Rev. **A65**, 033624 (2002)
“Mean-field Analysis of Collapsing and Exploding Bose-Einstein Condensates”
- [5] T. Lahaye, J. Metz, B. Frohlich, T. Koch, M. Meister, A. Griesmaier, T. Pfau, H. Saito, Y. Kawaguchi and M. Ueda: Phys. Rev. Lett. **101**, 080401 (2008)
“d-Wave Collapse and Explosion of a Dipolar Bose-Einstein Condensate”

用語についての簡単な解説

1. フェルミ粒子とボース粒子

量子力学にしたがう粒子はフェルミ粒子かボース粒子のどちらかである。フェルミ粒子は1つの状態を2つ以上で占めることができない（パウリの禁制率とよばれる規則）。一方、ボース粒子は1つの状態をいくらかでも多くの粒子が占めることができるという特徴をもつ。

2. ボース・アインシュタイン凝縮 (Bose-Einstein Condensation 略して BEC)

ボース粒子は1つの状態をいくらかでも多くの粒子が占めることができるために、温度を下げていくと、ある温度を境にして、最もエネルギーの低い状態を巨視的な数の粒子が占めることになる。これをボース・アインシュタイン凝縮現象という。超流動現象（粘性なしに流れる現象）はボース粒子系の示す BEC によって説明される。

3. トラップされたボース粒子のボース・アインシュタイン凝縮の研究

1995年アメリカの研究者がルビジウム原子、あるいは、ナトリウム原子（共に粒子間相互作用は斥力）でボース・アインシュタイン凝縮を実現し、その業績により2001年にノーベル賞を受賞した。磁氣的にトラップされた原子にレーザーを照射し、原子の運動を鎮めるというレーザー冷却法により、基底状態の超低温原子群が生成された。

受賞者： 早野 龍五 氏 (はやの りゅうご)

(東京大学大学院理学系研究科教授)

受賞者業績： 反陽子ヘリウム原子の研究



生年月日： 1952年1月3日

学 歴

1974年 3月 東京大学理学部物理学科卒業

1979年 3月 東京大学大学院理学系研究科修士理学博士 (物理学)

職 歴

1979年 4月 東京大学理学部附属中間子科学実験施設助手

1982年11月 高エネルギー物理学研究所助教授

1986年 4月 東京大学理学部助教授

1997年 1月 東京大学大学院理学系研究科教授

業績要旨： 早野龍五氏を中心とする研究グループは、1990年に KEK で発見した異常長寿命反陽子ヘリウム原子のレーザー分光を CERN において展開し、この奇妙な原子の準安定状態群の構造の解明に成功した。さらに、低速反陽子ビームを作り、希薄ヘリウム媒質中での高精度のレーザー分光を開拓し、レーザー遷移周波数から反陽子・電子質量比を精密に決定する手法を確立した。この比は陽子・電子質量比に匹敵する9桁の精度で決定され、最新の基礎物理定数表に反映されている。

授賞理由

早野龍五氏は π 中間子原子、 K 中間子原子、反陽子原子など、自然界には存在しない奇妙な原子を加速器で生成し、その精密分光で新たな物理を切り開いてきた。なかでも顕著な業績は反陽子ヘリウム原子の研究である。反陽子を物質中に止めると普通は瞬時($\sim 10^{-12}$ 秒)に原子核と出会って対消滅してしまうが、氏を中心とする実験グループは、ヘリウム中に限っては反陽子が数マイクロ($\sim 10^{-6}$)秒、常識の100万倍以上も「長生き」することを、高エネルギー物理学研究所(KEK)陽子シンクロトロンを用いた実験で発見した。さらに、氏らはスイスのCERN研究所において研究を発展させ、この異常な現象が反陽子ヘリウム原子(ヘリウム原子核+電子+反陽子)の生成によることを突き止め、その準安定状態群の準位エネルギーをレーザー共鳴の方法で決定することに成功した(図1)。この反陽子ヘリウム原子は、反陽子が物質中で長時間共存できる唯一の奇跡的存在形態であり、この準安定性に助けられて遷移エネルギーを精密に決定することが可能となった。

この実験は、Korobov及び木野らによるこのクーロン三体系の精密な理論計算の発展を促した。観測された遷移エネルギーの精度が年々向上することと平行して、相対論的效果、電磁量子力学的補正などを含む理論計算も高度化し、両者は高い精度で良い一致を見せている。理論値はリュドベリ定数、反陽子・電子質量比を仮定しているのので、遷移周波数を正確に測定すると、逆に反陽子・電子質量比が決定できる。早野氏らは様々な技術革新、特に線形減速器による超低速反陽子ビームの生成と、光周波数コム(注1)によるレーザー共鳴周波数の絶対測定手法の反陽子ヘリウム原子への応用により、反陽子ヘリウム原子のレーザー共鳴周波数の精度を高め、反陽子・電子質量比を $1836.152674(5)$ と決定した。これは陽子・電子質量比に迫る9桁の精度をもち、陽子質量と反陽子質量がこの精度でよく一致することを確かめた。これは、物質・反物質対称性検証として最高精度まで反陽子・電子質量比の決定精度を高めた実験である。

一方、9-10桁という程度では粒子・反粒子の質量の違いが現れることはないという立場に立つならば、早野氏らの測定結果は、基礎物理定数表の陽子質量値、あるいはリュドベリ定数の現在の精度を独立な実験で確認したことになる。事実CODATA(注2)は2006年度版の基礎物理定数推奨値の決定に際し、反陽子ヘリウムの実験結果が寄与していると明記している。今後さらに測定精度が上がれば、粒子・反粒子対称性(CPT対称性)の検証にも道をひらくものである。これら一連の業績は、日本から始まり日本のチームが中心となった国際的共同研究の成果であり、これを主導した早野氏の功績は大きい。

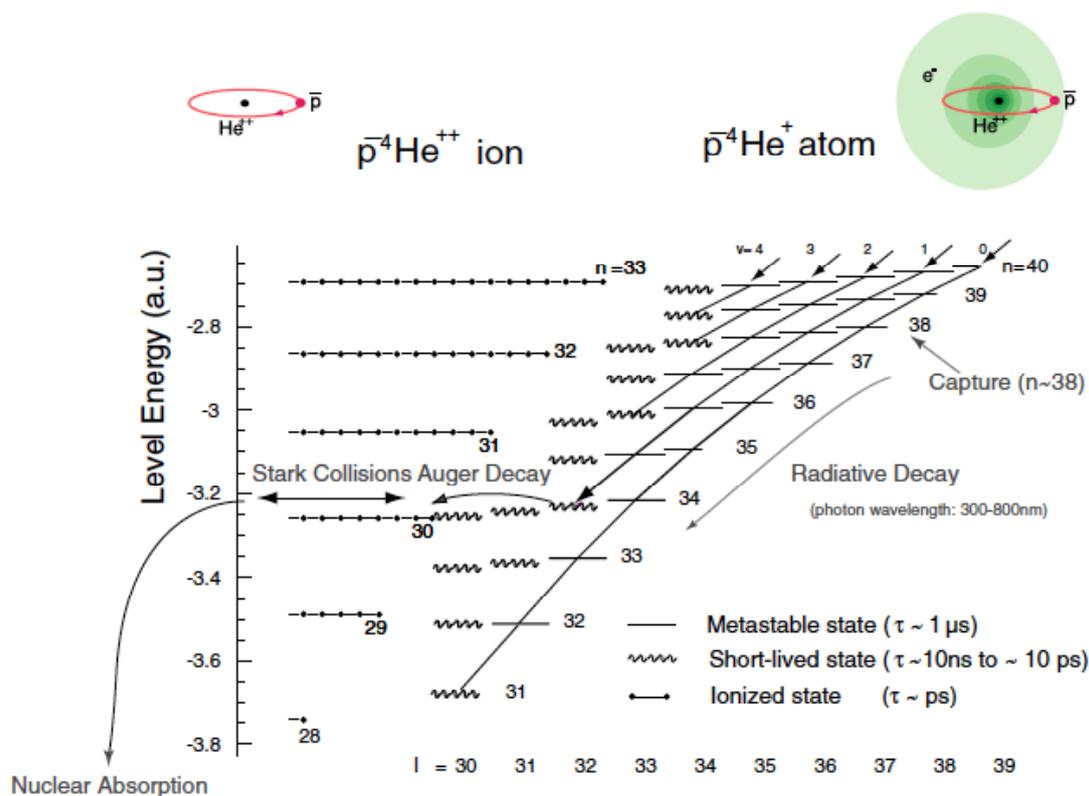


図1 レーザー分光の手法により解明された反陽子ヘリウム原子の構造模図：準定状態は、反陽子が主量子数40近辺で円形軌道に近い状態（軌道角運動量が大）で、Auger遷移による電子放出が抑制され放射遷移が主になるため、寿命が長い。

主要論文

- 1) Iwasaki, M. et al. 1991, *Discovery of Antiproton Trapping by Long-Lived Metastable States in Liquid Helium*, Phys. Rev. Lett. **67**, 1246-1249.
- 2) Hori, M. et al. 2006, *Determination of the Antiproton-to-Electron Mass Ratio by Precision Laser Spectroscopy of antiprotonic He*, Phys. Rev. Lett. **96**, 243401.
- 3) Hayano, R. et al. 2007, *Antiprotonic helium and CPT invariance*, Rep. Prog. Phys. **70**, 1995-2065

注1 光周波数コム(櫛)は、光学周波数領域に櫛の歯のように規則正しい「目盛り」をいれ、光の振動数を原子時計の精度で直読できるようにする画期的な装置、この業績で T. W. Hänschは2005年のノーベル物理学賞を受賞した。

注2 CODATA (Committee on Data for Science and Technology) は、国際科学会議 (ICSU)

によって1966年に設立された学際的な科学委員会。科学・技術に関するあらゆるデータの質、信頼性、管理および利用可能性の向上を行う。また、科学者、技術者が認識の向上と直接的な協力を促進し、新しい知識を得られるように国際データ活動へのアクセスを提供する。1973年、1986年、1998年、2002年、2006年と基礎物理定数の推奨値を更新してきた。