宇宙での量子技術の活用を可能にするレーザシステム

アンドレアス・ソス、アンドレアス・ヴィヒト、ビクトリア・ヘンダーソン、
マルクス・クルツィク

国際宇宙ステーションにおいてさまざまな極低温原子実験の権利を得るためには多くの段階を踏む必要があり、そこでは統合レーザシステムが重要な役割を果たす。

量子技術は現在、科学において最も注目されているトピックの1つであり、とくに原子センサは開発の進展において重要な役割を果たしている。ここでは原子は周波数基準、超高精度原子時計、磁気計、慣性検知及び重力測定用の原子干渉計のような量子センサ及び量子デバイスにおけるコアコンポーネントである。

原子干渉計は、応用用途だけでなく、自由落下の一般性の測定（ガリレオのピサの斜塔実験の量子バージョンの実行）といった基礎物理学を探求する物理学者にとっては特に興味深いものである。原子または物質波の干渉計は、おなじみの光をベースとした干渉計の原子版である。波動・粒子二重性は、原子の波動性を光パルスによって制御、指示できるといった具合に利用される。

干渉計では単色光源を使用することが重要である。つまり、光干渉計であればレーザ、原子干渉計であればボース＝アインシュタイン凝縮（Bose-Einstein Condensate：BEC）を用いるということである。BECは原子、より具体的にいうとボソンがnKのオーダーの臨界温度未満にまで冷却されたときに発生するエキゾチックな物質の状態であり、原子はその状態において波動関数が単一の量子状態に「凝縮」する。それは言い換えれば、同じ（ドブロイ）波長、または「色」を持っているということである。

BECを生成することは困難だが、世界中の物理学の研究室ではほぼ一般的となっている。ただし、それらを実験室からフィールドに持ち出すことは別の問題だ。BECを生成するためには、超高真空、原子源、安定化された単一周波数レーザ、精密な磁場とマイクロ波の生成、高度な制御電子機器、そして最後に重要なこととして、このような複雑なシステムをリアルタイムかつ高精度で制御する信頼性の高いソフトウエアが必要である。

2018年5月24日、米ノースロップ・グラマン社（Northrop Grumman）（旧米オービタルATK社[Orbital ATK]）の「シグナス」宇宙船がISSに到着した。この輸送船の主要な荷物はNASAの低温原子研究所であった。（提供：NASA）

このような原子干渉計の感度は、ビームスプリッタの光パルスの間隔を長くすることで向上する。ただし原子を重力の下で落下させる必要があるため、この時間は制限される可能性がある。これを克服するために、いくつかの実験では高さ10mの「噴水」を使用する例もある。別のアプローチでは、重力を完全に取り除く。微小重力プラットフォームで動作できる設備を構築することにより、これらの測定時間をケタ違いに増やすことができる。ただし、実験室での実験をロケットに持ち込むという単純なものではない。設備は、打ち上げ時の重い機械的負荷に耐えられるように、サイズを小さくして頑丈にする必要がある。

テストプラットフォーム：落下塔、観測ロケット、無重力飛行

低温原子実験を実験室から微小重力

図1　ドイツのブレーメンにあるZARM落下塔。（提供：ESA、CC BY-SA 3.0 IGO）

図2　スウェーデン、キルナのロケット発射場エスレンジ（Esrange）からのVSB-30観測ロケットの発射。（提供：DLR、CC-BY 3.0）

表1　ますます多くの微小重力実験が、ベルリンに拠点を置くFBH及びHUB内で開発されたダイオードレーザシステムを使用している。ここでは、ハノーファー大、ヨハネス・グーテンベルク大マインツ、独ブレーメン大（Universität Bremen）などの他のパートナーが電子機器やその他の光学モジュールを提供した。

フライト年	ミッション	微小重力プラットフォーム
2004年以降	QUANTUS 1及び2、PRIMUS	ZARM落下塔
2015	FOKUS	観測ロケット
2016	KALEXUS	観測ロケット
2017	MAIUS 1	観測ロケット
2018	JOKARUS	観測ロケット
2021	MAIUS 2	観測ロケット
2022	MAIUS 3	観測ロケット
202X	BECCAL	ISS

環境に持ち出すには、レーザ、光学系、電子機器などのコンポーネントをできる限り小さくして、打ち上げ環境の困難さに耐えられるような相当な開発が必要である。このプロセスの進捗状況は、技術成熟度（Technology Readiness Level：TRL）として評価される[1]。NASAは1970年代に技術の成熟度を評価するためにTRLを考案した。TRL 1の技術は「基礎理論の着想段階」であることを意味し、TRL 9は「ミッション運用の成功を通じて証明された、実際のシステム飛行」に与えられる。

打ち上げ荷重に耐えられるシステムを構築するという技術的課題に加えて、実験と予算の両面からTRLに適合する微小重力プラットフォームを選択する必要がある。

永続する微小重力が理想的だが、最も高いTRLレベルが要求されるため、残念ながら達成するのは最も困難である。幸い、国際宇宙ステーション（International Space Station：ISS）への設置や人工衛星への統合よりもアクセスが容易なプラットフォームがいくつかある。落下塔、放物線飛行、観測ロケットなどのプラットフォームは、何十年にもわたって実験の機会を提供してきた。

ドイツのZARM落下塔は、長年にわたって低温原子実験を実施してきた（**図1**）。この高さ146mのタワーは、4.74秒の間、微小重力または自由落下環境を維持できる。その間、ペイロードは塔内の110mの真空チューブを通って落下する。ペイロードが落下する前に上向きに投げられるカタパルト構成では、この時間は約9秒に延長できる。それでもなお、ペイロードが装填される時に塔内を真空にするのに時間がかかるため、1日あたりの落下塔の発射数には制限がある。

2つめの微小重力テストの方法は、さらに長い落下時間を提供する。「VSB-30」のような観測ロケットは、地上約250kmに到達し、約6分で落

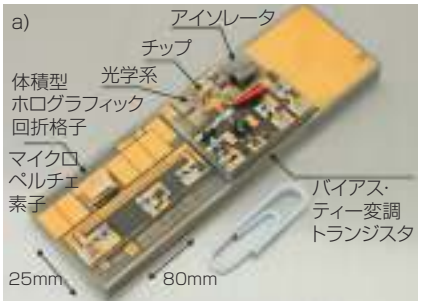

図3　（a）ECDLモジュール。（b）複数のECDL及びMOPAを備えた統合レーザモジュール。（版権：FBH）

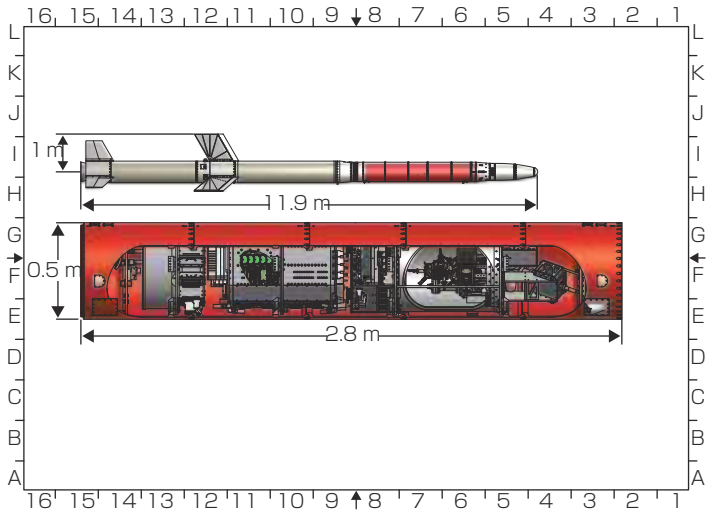

図4　MAIUSミッションのロケット（上）とペイロード（下）の図。（提供：イェンス・グロッセ[Jens Grosse]/ MAIUS）

下する（**図2**）。ブラジルのVSB-30は、ドイツ航空宇宙センター（DLR）と欧州宇宙機関（ESA）のミッションに使用される。2017年1月、そのようなミッションの1つであるMAIUS 1実験は、宇宙で初めてBECを生成した[2]。この飛行を完了して、実験システムは観測ロケットでのTRL 9に到達した。

他にも低温原子実験は、フランス国立宇宙研究センター（CNES）の関連会社である仏ノヴァスペース社（Novespace）が運営する「Zero-G Airbus A310」など、航空機の無重力放物線飛行で実証されている。

小さいことはすばらしい：統合レーザシステム

TRLが増加している開発の一例は、低温原子実験の宇宙ミッションで要求されるレーザシステムの進化である。冷却及びトラッピング用のこのようなレーザは、独フェルディナンド・ブラウン高周波技術研究所（Ferdinand-Braun-Institut, Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik：FBH）で開発され、一連のミッションで使用され、段階的により高いTRLを達成している。彼らのパートナーである独ベルリン・フンボルト大（Humboldt Universität zu Berlin：HUB）は、レーザシステムの統合を主導している。独ハノーファー大（Leibniz Universität Hannover）や独ヨハネス・グーテンベルク大マインツ（Johannes Gutenberg Universität Mainz）などの他のパートナーは、電子機器やその他の光学モジュールを提供した。

マイクロ統合半導体レーザモジュールは、原子をトラップ及び冷却するためのシステムの心臓部にあたる。FBHで開発された典型的な半導体レーザモジュールは、40gのモジュールから780nmで1W以上を供給する。衝撃試験は最大1.500g（gは標準重力）で実施されており、寿命は平均故障時間（Mean-Time-To-Failure：MTTF）で最大10万時間である。それらは－55℃から85℃の間で2K/分のステップの温度変化でテストされた。

これらの半導体レーザモジュールに基づいて、微小重力でのさまざまな実験のために、多くの複雑なレーザシステムが設計及びテストされている[3]。高いスペクトル純度と安定性を実現するために、外部共振器半導体レーザ（External Cavity Diode Laser：ECDL）が開発された[4]（**図3**（a））。このようなECDLは、主発振器出力増幅器（Master Oscillator Power Amplifier：MOPA）レーザモジュールに統合されている（図3（b））。こういったモジュールは他の波長に簡単に対応させることができ、一連のミッションに適用されている（**表1**）。

2017年1月のMAIUS 1ミッションの間、4つの同じモジュールが、初の成功例となった宇宙でのBEC実験において使用された[5]。ペイロードの制約により、レーザシステムには体積が21L以下という制限が掛けられた。観測ロケットの船体には、長さ2790mm、直径500mmの円筒形のペイロードが搭載可能であった。このペイロードには、バッテリーセクション、制御電子機器、レーザシステムを備えた物理パッケージ、及びUHVチャンバを備えた物理セクションが含まれていた（**図4**の左から右）。

光周波数基準ペイロード

それに続くJOKARUSミッションは、レーザベースのヨウ素周波数基準と別の光周波数コムとの比較をターゲットとしていた。**図5**は、観測ロケットのミッション用に開発されたJOKARUSのペイロードである。このシステムは完全に自律的に動作し、周波数が2倍の1064nm ECDLの自動周波数安定化がヨウ素の分子遷移に適合していることを示した。さらに、宇宙飛行中のFOKUS IIミッションでの別の実験である、光周波数コムを使用した周波数比較測定を実行した。

宇宙へ

地球低軌道において長い時間スケー

ルを確保できることは、微小重力実験にとって明らかに有益である。たとえばISSは、微小重力への長期アクセスと居住可能な環境を持ち合わせている。メンテナンスは乗組員でも実行可能だ。さらに、観測ロケットなどのプラットフォームで運用される実験よりも、運用中の加速度の要求は低くなる。ISSの場合、実験は打ち上げの機械的負荷に「単純に」耐え抜く必要があり、実験は、宇宙空間にむき出しの衛星に見られる過酷な放射線や環境条件から大部分が保護される。しかし、そのような実験は計画立案段階が容易に10年を超える可能性があり、ステーションが提供できる限られたスペースとリソースをめぐって競争は非常に激しくなる。

2018年5月、米ジェット推進研究所（Jet Propulsion Laboratory）のチームにより、ISSに向けて低温原子研究所（Cold Atom Laboratory：CAL）が打ち上げられた。CALの目的の1つは、微小重力環境における量子物質の研究である。特に、重力の影響のある地球上では不可能な、新規ジオメトリにおける、BECと極低温原子が関係する。2020年6月にNatureで報告されたように[7]、チームはルビジウム87（87Rb）のBECの生成に成功した。新しい冷却プロセスにより、地球よりも軌道上で大きなBECを作成できるようになり、極低温原子実験における微小重力の利点が実証された。この初期の成功は、より複雑な実験と調査への道を開く。CALは2020年1月にさらにアップグレードされ、原子干渉計の機能が追加された。

図5　JOKARUSのレーザモジュールの高さと直径は、それぞれ400mmと344mm未満である。モジュールの質量は25kg未満と推定される。（著作権：HUB/フランツ・グッチ[Franz Gutsch]）

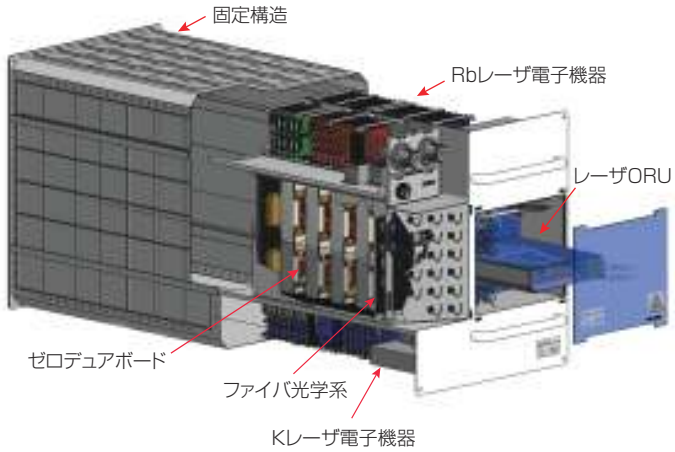

図6　光学ベンチマウントのレンダリング画像。光操作用の8つの光学ベンチは、標準化されたモジュラーシステムにグループ化されている。（提供：ビクトリア・ヘンダーソン / BECCAL）

図7　CubeSatフォームファクターでの低温原子実験用のRb蒸気セルを備えた統合光学参照レーザシステム。（提供：アーロン・ストラングフェルド[Aaron Strangfeld] / FBH）

BECCAL：2国間マルチユーザー施設のための協力

次世代の極低温原子装置はすでに準備中である。ボース＝アインシュタイン凝縮・低温原子研究所（Bose-Einstein Condensate and Cold Atom Laboratory：BECCAL）においては、ドイツとアメリカの科学者がNASAとDLRとの協力により力を合わせる。CALが現在行っているように、BECCALは、ISSに搭載されたマルチユーザー及び多目的の極低温装置につながる。NASAによるISSへの打ち上げに向けて、ドイツ全土の多くの研究機関や大学の科学者が協力して、新しい装置の設計及び構築を進めている。

BECCALは今後、数年以内に打ち上げられる予定である。この装置は、以前のドイツとアメリカによるミッションの経験を生かして、多くの新しい実験の方向性を探求できるようにする。以前の実験と比較して、より大きい原子番号、増加したサイクルレート、

より複雑なトラップ方法、及び改良された原子干渉計機能を提供するように設計されている。87Rb及びカリウム41（41K）のBEC生成、カリウム40（40K）の量子縮退ガス、K及びRb同位体の混合物によって、ユーザーは複雑な量子ガス現象、試験基本物理学を研究し、そして高度な干渉法と量子情報手順のプロトタイプを製造することができるだろう[8]。

ここで論じられたMAIUS、JOKARUS及び他の多くの実験に関しては、BECCALの成功は、堅牢でコンパクトで複雑なレーザシステムの設計と製造に依存している。実際、これは今までで最も野心的なプロジェクトである。16個のレーザ、必要な光学部品、及び非常に複雑な機械の制御電子機器を113L未満に収め、3年以上の寿命を確保する（**図6**）。

今後

ISSでの実験はすでに遠隔操作用に設計されているが、単純な図面を使用する場合は、焼けたヒューズを交換する人が常にそこにいる。次の開発ステップでは、完全なリモート運用が必要になる。たとえば、地上約36,000kmの静止軌道にある衛星だ。

別のアプリケーションパスは、小型衛星になる。**図7**は、低温原子実験用のRb蒸気セルを備えた統合光学参照レーザシステムであるiQubeモジュールを示している。このモジュールは、ベルリン大協定の支援を受けて、HUBとシンガポール国立大（National University of Singapore：NUS）の共同プロジェクトで開発された。マイクロインテグレーションはFBHで行われた。光からマイクロ波への分周器として使用できる光周波数コムと組み合わせて、このようなモジュールはコンパクトでシンプルな蒸気セルベースのクロックで使用できる。

単色レーザシステムを含む複雑な技術の統合により、宇宙飛行の低温原子実験の段階的な認定が可能になった。統合はさらに進み、宇宙用の拳サイズのユニットにつながるだろう。このテクノロジーは、近い将来、地上のアプリケーションで使用される可能性もあるだろう。

参考文献

(1) See https://go.nasa.gov/3qJpXp6.
(2) A. Wicht, M. Krutzik, and A. Thoss, "Quantum sensing is gaining (s) pace," Laser Focus World, 54, 1, 83?86 (2018); https://bit.ly/LFW-Thoss-Quantum.
(3) M. Schiemangk et al., Appl. Opt., 54, 17, 5332-5338 (2015).
(4) C. Kürbis et al., Appl. Opt., 59, 2, 253-262 (2020).
(5) B. Barrett et al., Nat. Commun., 7, 13786 (2016); https://doi.org/10.1038/ncomms13786.
(6) V. Schkolnik et al., Appl. Phys. B, 122, 217 (2016); https://doi.org/10.1007/s00340-016-6490-0.
(7) D. C. Aveline et al., Nature, 582, 193-197 (2020); https://doi.org/10.1038/s41586-020-2346-1.
(8) K. Frye et al., arXiv (Dec. 10, 2019); https://arxiv.org/abs/1912.04849.

著者紹介

アンドレアス・ソス（Andreas Thoss）は独ソス・メディア社（THOSS Media）の社長、アンドレアス・ヴィヒト（Andreas Wicht）は（Ferdinand-Braun-Institut, Leibniz Institut für Höchstfrequenztechnik：FBH）の量子光学コンポーネントグループを率いる、ビクトリア・ヘンダーソン（Victoria Henderson）は独ベルリン・フンボルト大（Humboldt Universität zu Berlin：HUB）の光学計測グループの博士研究員、マルクス・クルツィク（Markus Krutzik）はFBHとHUBのジョイントラボ統合量子センサのグループリーダー。

e-mail: th@thoss-media.de　URL: www.fbh-berlin.com、www.qt-berlin.de

LFWJ

Vision Systems DESIGN JAPAN
VISION AND AUTOMATION SOLUTIONS FOR ENGINEERS AND INTEGRATORS WORLDWIDE

Vision Systems Design Japanは
マシンビジョンと画像処理に特化したインテグレーションへの深い洞察記事を無料で提供する雑誌です。

●オンライン登録
http://ex-press.jp/vsdj
登録内容の変更もこちらから可能です。

ご登録の流れ

お申し込み

登録審査
ご登録内容から、お申し込みの方が無料購読対象の方かどうか確認させていただきます。

登録完了/購読開始
登録完了後、約1～2ヶ月後の発行号から無料購読を開始いたします。

ご購読の更新
約1年毎に購読継続の確認をさせていただきます。
＊更新の段階で有料購読に切り替わることはありません。

お問い合わせ:
株式会社イーエクスプレス
Tel: 03-6721-9890
email: vsdj@vsd-japan.jp