

量子センシングのペースが速まり 利用空間も拡大

アンドレアス・ウィッチ、マルクス・クルツィック、アンドレアス・ソス

暗号化、量子コンピューティングなどの量子技術が最も注目を集めているが、量子センシングが最初に産業化される可能性がある。たとえば、ベルリンのある共同研究は衛星動作のためにレーザー技術の小型化を進めている。ここでは、量子センサがナビゲーションや通信を著しく改善する。

独トルンプ社 (Trumpf) の副会長兼 CTO、ピーター・ライビンガー氏 (Peter Leibinger) は、ミュンヘンで開催された LASER World of PHOTONICS で基調講演を行い、フォトンクスにおいて次なる目玉は量子技術であると強調した。そのトレンドは、政治家にも投資家にもよく知られている。各国政府と、中国、米国、カナダおよびヨーロッパの業界巨大企業は現在、量子技術でリーダーとなるための競争で後れをとらないように資金計画を調整している。

財源は数十億ユーロ

2017年3月、英エコノミスト誌は、量子研究の現状について印象に残る批評を掲載した。同記事には量子技術 (QT) に取り組む人員数が含まれており、2015年、総予算15億ユーロで約7000名がQTに取り組んでいる (マッキンゼーの数字)。欧州連合 (EU) のそれに続く概要は、5年以内にその予算が50億ユーロに増加すると推定している。

2016年、EUは、Future and Emerging Technologies (FET) 量子技術フラグシッププロジェクトを開始した。その10年間、10億ユーロのプロジェクトは、2013年グラフィックで始まり、次はHuman Brain Projectだった。Quantum Technologies Flagshipと量子宣言は、2018年第1四半期に予定の資金提供申請を

提唱している。このプロジェクトは、20を超える国家戦略をとともう。

量子技術では、近年中国が最も進展している。Micius (墨子) プロジェクトで中国は、衛星と地上との量子通信を成功させた。それは、小さなスプートニクショックを世界に与えたが、それは中国の数ある活動の1つの成果にすぎない。

2017年、中国科学アカデミーは、安徽省にInstitute of Quantum Information and Quantum Technology Innovationを開設した。米国ジェイムスタウン財団、中国の活動批評は、中国におけるQTプロジェクトには「実質的に無限の資金」があると主張している。この報告は、10年以上前から行われている量子センシング分野の多くの活動を挙げている。特に、量子レーダーと量子ナビゲーションについてである。

これには中国最大の民間投資家の最近の活動は含まれていない。2017年10月、アリババ (Alibaba) グループは、今後3年で新技術研究に150億ドルを超える投資を行う計画を発表した。これには、人工知能と量子コンピューティングが含まれる。同グループは、中国、米国、ロシア、イスラエルとシンガポールに7研究所を開設する計画である。

長期にわたり、米国がQT研究の最前線にいた。しかし、このリードは、中

国における現在の開発によって非常に疑わしくなっている。2017年夏、米国国家フォトンクスイニシアチブ (U.S. National Photonics Initiative) は、国家量子構想 (National Quantum Initiative) と5億ドルの財政支援を求めるホワイトペーパーを発表した。これは、米国下院の公聴会、10月24日、「量子技術におけるアメリカのリーダーシップ」 (American Leadership in Quantum Technology) に発展した。公聴会には、IBM、米国政府機関、学界の代表も含まれていた。さらなる進展は、今後の課題である。

量子センシングはすでにある

有名なシュレディンガー (Schrödinger) のネコ (同時に生きており、死んでいる = 生死は、それぞれ50%の確率) のような奇妙な量子現象の議論は約100年の歴史があるが、産業的な活用はまだ見られない。そのような第2の量子革命 (量子技術の発見を第1とする) では、いくつかの技術が議論中である。量子暗号や量子コンピューティングが最も関心を集めていることは確かであるが、原理実験の証明成功はあるものの、応用はまだ非常に限られている。

量子的に強化されたイメージングや量子センシングはあまり人気がないが、実用化に最も近いかもしれない。両方とも、基本的限界で最大精度を提供する。量子イメージングは、軍事目的 (ゴーストイメージング)、ナノリソグラフィ、新しい医療診断 (Q-OCT) 目的で研究されている。

量子センサは、物質の量子性質を利用して、周波数、加速度、回転率、磁場、あるいは温度などの物理量を最高の相対正確さ、絶対正確さで計測する。これらの計測により、自然定数、つまり基礎定数に直接関係する局所的な、再現性のあるキャリブレーションが可能になる。

これは、時間あるいは重力の基本計測に、最高精度で関係している。1番目は、ナビゲーションシステムに必要であり、2番目は慣性航法を可能にする。ここでは精密な加速度計算を使って位置データを手に入れることができる。あるいは、石油、水などの隠れた自然資源の詳細なマッピングを含む、地質学的アプリケーションをサポートする

こともある。

前例のない精度で時間を計測することは、量子技術の最初に広く普及したアプリケーションの1つであった。今ではそれは、地球の軌道に進んでいき、ここでは大きな経済的利益が見込まれている。新しい世代のナビゲーション、あるいは通信衛星は、原子時計から積極的に利益を引き出す。

量子効果測定に必要なものは何か

量子センサは、その核心部では、原子またはイオンの量子力学的振る舞いを利用している。レーザは、個別の試料の特殊量子状態を準備するための一般的なツールである。通常、連続波

(CW)レーザを利用して原子を冷却し、量子特性が熱効果に対して優位に立つようにする。次に、レーザパルスは、試料の分光学的特性をテストするために利用できる。

原子干渉計では、たとえば、冷却原子の波動関数は、光スリット実験からわかるように、光波とまったく同じに干渉することが可能である。フォトンと違い、原子は有限質量であり、従ってその干渉縞は重力に依存する。それゆえ、干渉縞は超精密重力測定に利用することができる。

物理的観点から、そのようなセンサはシンプルであり、再現性がある結果を出す。普通、それにはキャリブレーションは必要なく、ドリフトもない。周

光産業技術マンスリーセミナー



Optoelectronics Industry and Technology Development Association

プログラム (6-7月)

No. / 開催日	講演テーマ / 講師
第421回 6月19日(火) 15:30-17:30	「ナノカーボン材料を用いたチップ上光電子デバイス開発」 講師： 牧 英之氏 (慶應義塾大学)
第422回 7月17日(火) 15:30-17:30	「有機ELディスプレイ・照明の技術開発動向と将来展望」 講師： 菰田 卓哉氏 (山形大学)

- 場所
- 定員
- 参加費

一般財団法人光産業技術振興協会
各60名
光協会賛助会員：1,500円(税込み) / 一般参加：3,000円(税込み)
※支払いは、当日受付にて現金でお願いします。

- 申込方法
- 申込締切

オンライン申込フォーム >>> http://www.oitda.or.jp/main/monthly/monthly_postmail.html
定員になり次第締め切ります。なお、締め切った場合にはWeb上にその旨を掲載します。

問い合わせ先

一般財団法人光産業技術振興協会マンスリーセミナー担当 石森、間瀬
〒112-0014 東京都文京区関口1-20-10 住友江戸川橋駅前ビル7F TEL:03-5225-6431 FAX: 03-5225-6435
E-mail: mly@oitda.or.jp URL: <http://www.oitda.or.jp/>

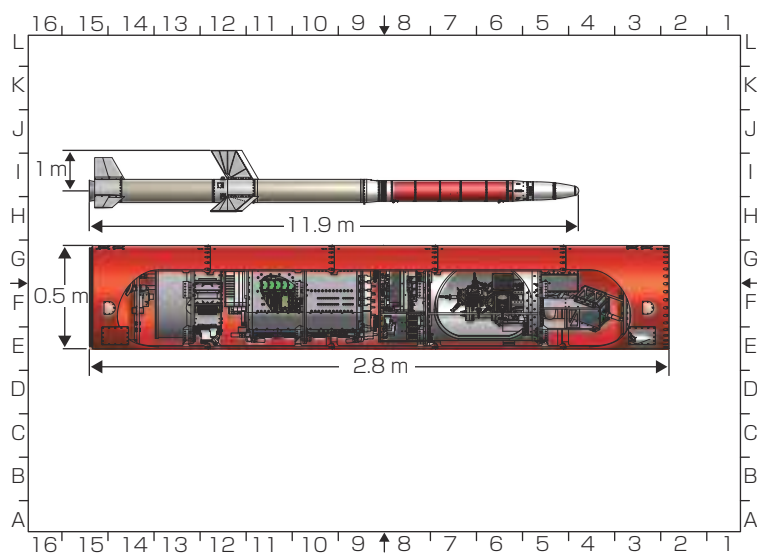


図1 宇宙で初めてボーズ・アインシュタイン凝縮体(BEC)を実証したMAIUSミッションのために、完璧な実験セットアップは、ロケット内部の直径50cm、長さ2.79mの加圧型チャンバに収まっている。

波数をカウントしているだけである。また、周波数の測定は、われわれが知る限り最も精密な計測を可能にする。

そのような計測システムで使用されるレーザは、極めて特殊な基準でなければならない、時には極端な要件をとまうことがある。一般的なレーザ線幅要件は、メガヘルツ(MHz)からサブヘルツレベルである。アプリケーションによっては、スペクトル純度が重要である、すなわち、レーザサイドモード、あるいは(増幅された)自然発光に含まれる光パワーがセンサの性能にとって致命傷になる。

量子センシング 宇宙ミッション用レーザ

ベルリンのフェルディナント・ブラウン研究所(FBH)のチームは、そのようなレーザを多数開発した。特に宇宙ベースセンサ用であるので、難題がなおさら難しくなる。フンボルト大ベルリン(HUB)のパートナーが、レーザシステム組込みを主導した。ベルリンのパートナーの活動は、ハノーバ大が主導するドイツQUANTUSコンソーシアムの一環であり、これは微小重力下で冷却原子効果の研究に専心するプロジェクトである。

図2 MAIUSレーザシステム内部には、4個のレーザモジュールがヒートシンクの底面にマウントされており、スイッチングと周波数安定化用のゼロデュア(Zerodur)ベンチは上面にマウントされている。(資料提供:フンボルト大ベルリン)



当然、宇宙アプリケーション用のレーザシステムは小型かつ長期安定的でなければならない。FBHチームが開発したレーザは、微小集積ダイオードレーザである。一般的なバージョンは、40gのモジュールから、780nmで3W以上の出力である。衝撃テストは、1,500gまで、寿命は十万時間平均故障時間(MTTF)までとなる。

2017年1月、実験セットアップがスウェーデン北部キルナから地球上層大気探査ロケットに乗せて打ち上げられ、宇宙における初のボーズアインシュタイン凝縮体(BEC)を証明した。実験は、レーザ冷却および、極低温ルビジウム原子の原子干渉計に最適化されたダイオードレーザを使用した。たとえば、微小重力(MAIUS)ミッションにおけるこの物質波干渉計用のロケットは、約250kmの遠地点に達し、微小重力での実験時間は約6分である⁽¹⁾。

1995年にBECが初めて実験的に示されたとき、セットアップは光学実験室をいっぱいにした。MAIUSミッションのために、レーザシステムは、容積21リットル、質量27kgに縮小された。バッテリー、エレクトロニクス、レーザ、物理パッケージを含むセットアップ全体は、直径500mm、長さ2.79mのシリンダーに組み込まれた(図1)。このミッションのために、FBHチームは、宇宙でのアプリケーションに適した、ハイブリッドマイクロ集積半導体レーザモジュールを開発した。

システム全体は、4個の主発振器出力増幅器(MOPA)レーザモジュールを使用した。主発振器は、線幅が約1MHzの分布帰還型レーザ(DFB)で、その後に1Wを超える出力を生み出すテーパ状の増幅器(PA)がある。追加のレーザモジュールは、ガスセルに収められたルビジウム原子の適切な遷



図3 JOKARUSミッションに向けたパワーアップ付マイクロ集積拡張キャビティダイオードレーザが示されている。(資料提供:FBH/schurian.com)

移に対して周波数安定化されている。それは、MOPA レーザモジュールの周波数基準として働き、物理パッケージ内のルビジウム原子をチェックする。すべてのMOPA モジュールのレーザ出力は、特殊ゼロデュア (Zerodur) ベーススイッチングおよび分配モジュールに伝送され、そこで冷却とトラッピング用に異なるレーザビームが形成される。

コンソーシアムのパートナーから提供されたゼロデュアベース光学ベンチとともに、これらのレーザモジュールは、1つの筐体に組み込まれている (図2)。また、科学的パイロードのレーザサブシステムとしてHUBチームが認定している。2017年の飛行成功後、同システムは地球上層大気探査ロケットに向けて究極の技術成熟レベル9に達した。

次のミッションスケジュールは以下のようになっている。JOKARUS (独: Jod Kamm Resonator unter Schwerelosigkeit) ミッションは、地球上層大気探査ロケットでパイロードを打ち上げ、ヨウ素周波数基準をテストする。これは、1064nmで初の絶対光周波数基準となり、地球衛星ナビゲーションシステム (GNSS)、重力検出 (LISA)、あるいは地球重力の測定 (NGGM) との関連で多くの未来のミッションに関係することになる⁽²⁾。

JOKARUS ミッションは、2018年春に予定されている。その周波数基準は、

532nm分子ヨウ素における超微細遷移の変調遷移分光に基づいている。ここでは周波数倍加拡張キャビティダイオードレーザ (ECDL) を利用している。レーザモジュールは、1064nmでシングルモード偏波保持ファイバ (PMF) から570mWを出力し、スペクトル幅はわずか26kHzである (図3)。8g RMSでの衝撃テストは首尾よく完了した。

次は何か

微小化され、堅牢でフィールドにも宇宙にも導入可能な量子センサ向けのオプトメカニカルセットアップの開発は、ベルリンチームの中期目標である。モジュラー構築で、原子干渉計あるいは光時計などの多様な実験機能実現は当然容易である。宇宙機関や通信、あるいはナビゲーション会社から要求や資金が期待できる。

地域活動を発展させるために、フェ

ルディナント・ブラウン研究所とフンボルト大ベルリンは、すでに2008年に協力し、レーザ計測のための共同ラボをFBHに設立した。この共同ラボコンセプトの背後にある考えは、量子物理学者を呼び集めることである。これにより、量子センサやダイオードレーザの専門家のレーザ要件に対する深い洞察力が得られる。これらの専門家は、ダイオードレーザやマイクロ集積の特殊ニーズへの調整の仕方を知っているからである⁽³⁾。

この目標へのロードマップには、材料や組立部品についての、さらなる研究開発が含まれている。これらは集積法、いうまでもなく、さらなるテストを含めた、電気・光技術が特に注目されている。

長期的な展望は、なお一層興味深い。微小化や封止システムは宇宙だけでなく地球上にも適用可能だからである。しかし、ここ地上には、非常に多くのアプリケーションがある。石油、ガスあるいは、水探査は1つであるが、建築のための土地の詳細なマッピングは、一層大きな市場となる。

そのような量子センシングアプリケーションは、量子技術の純粋なITアプリケーションと同様、潜在的に巨大であり、実現は予想よりはるかに早いかもしれない。

参考文献

- (1) V. Schkolnik et al., Appl. Phys. B, 122, 217 (2016); doi:10.1007/s00340-016-6490-0.
- (2) V. Schkolnik et al., EPJ Quantum Technol., 4, 9 (2017), doi:10.1140/epjqt/s40507-017-0063-y.
- (3) A. Wicht et al., "Narrow linewidth diode laser modules for quantum optical sensor applications in the field and in space," Proc. SPIE, 10085, 100850F (2017); doi:10.1117/12.2253655.

著者紹介

アンドレアス・ウィッチは、フェルディナント・ブラウン研究所、高周波技術ライプツヒ研究所で共同ラボレーザ計測を統括している。

マルクス・クルツィックは、フンボルト大ベルリンの光計量グループリーダー。

アンドレアス・ソスは、独THOSS Media社長。e-mail: th@thoss-media.de

URL: www.fbh-berlin.com www.physics.hu-berlin.de/en/qom/research