23pPS2
(特別講演)

レーザー物理学の今後への期待
Expectation of Further Progress in Laser Physics

宅間 宏 (日本原子力研究所・関西研究所)

Hiroshi Takuma, JAERI Kansai Research Establishment

1. レーザーの性能の向上とレーザー物理学

ルビールーザーが初めて発振した1960年以来、レーザーの性能は絶えず向上しましたそれに伴って次々に新しい領域が拡大されつつ今日に至っている。以来36年を経過した現在でも、レーザーの種類と性能はさらに進歩し続けている。このような果てしないレーザー技術の発展が今後も引き続き活発に行われるならば、その周辺に常に新しい領域が生まれ発展し続けることが期待される。したがって、このような発展を正確に予測するためには、具体的にレーザーのどのような性能がどの程度向上する可能性があり、またその結果新技術がどれほどの向上を示すのか、定量的な検討が行われなければならない。

このようなレーザー性能の新領域への発展は、新しい性能の発展が広義の物質と光の相互作用においてどのような新局面が展開され得るかを、広い視野で理論的に考えることにより予測することができる。この際、新しい領域が必ずしも従来の路線の延長上に在るとは限らないという認識が重要である。

また一方において、技術の動向を見極めることが基礎科学の将来を推し量る上で極めて重要である。事実、レーザーは「基礎と応用は相互に強く影響し合いながら発展する」という古典的な教訓をもっとも端的に証明したものの一つと思われる。技術のニーズによって開拓された技術が新しい学術的な発展の可能性を与えることも、将来を見極める上で極めて重要な要素である。以下にレーザー性能に関して今後の向上の可能性があり得るか、それに伴ってどのような新領域が展開され得るかを偏見の入ることをあえて恐れずに概観してみよう。

2. レーザーのピーク出力の増大

現在新分野を開拓しつつあるレーザー技術の新展開の一つは、極短パルス化と超高出力化である。従来の進歩の中で、レーザー出力の増大は、その都度新しい領域の発展を促してきた。しかし、現在の進展は、過去において考えられなかったほどの高照射密度を可能とするので、原子に含まれる電子を急速に次々と電離してついには原子核をほとんど裸にしてしまうなど、新しい物理現象が関与し始める。しかも、極短パルス化することによって、ピーク出力は高くてもパルスの出力エネルギーは比較的小さいので、比較的小さいレーザーシステムによってそれが達成されることが素晴らしい。実際に高品質のビームとして、10 TW以上の出力を得ることができる。このような超高出力光を集光することによって 10^{19} TW/cm²を超える超高光電磁場発生することが可能となった。

今後の展開は、100 TW から 1 PW を目標に展開されるが、すでに 1 PW を超えて EW に向かう新しいコンセプトによる研究も始まっている。

このような超強光電場によって、電界電離による多価イオンの生成や、ボンデラモーティブ力によるプラズマ密度分布形成による自己収束効果など、新しい物理現象が観測されている。またこれらの新現象を利用することにより、際結合型のX線レーザーなどが試みられ、

興味ある成果が得られている。さらに最近では、20 TW を超える超高出力光を集光することによって 10^{19} TW/cm² を超える超高光電磁場が作られ、電子の相対論的效果が顕著になり、相対論的效果による自己収束などの新しい現象が観測されはじめている。

さらに、電子ビームと超高出力光との逆コンプトン散乱によって波長可変ガンマ線の発生、さらにそのようにして発生したガンマ線と超高出力パルス光との衝突による光子-光子散乱の研究が行われ、ポジトロンの発生が確認されている。

このような波長可変ガンマ線は原子核の分光的研究の新しい手段を提供するが、ピーク出力の更なる向上によって、原子核に直接光子が作用する非線型光学的な新現象の観測なども期待される。

このような超強光電場の影響の他に、超短時間のエネルギー集中によって、超短パルスと物質との相互作用はピコ秒以上の場合に比べると極めて単純化され、殆ど電子の加熱だけが行われる。それ故に物質との相互作用は優れた再現性を持ち、たとえば生態の切り口も鋭くきれいになることが知られていている。このような特徴は、電子のみをマニピュレートするのに便利と思われる。たとえばレーザー加速において、単に超強光電場で巨大な加速度が発生できるだけでなく、特定の電子だけを取り出す工夫などにこの特徴をうまく利用することも可能であろう。

3. X線レーザー

エックス線レーザーに関しては、現在いろいろな見方があるのは事実である。現在までに実現されている、多価イオン原子によるエックス線レーザーの方式は、電子衝突励起型と再結合型とに大きく二つに分けることができる。前者の方式については、核融合用の超大型レーザーを用いて実験的な研究が行われ、理論的な解析や関連する原子物理学的なデータもかなり揃ってはいるが、後者についての成功例は未だに少ない。しかしいわゆるTキューブ・レーザーによるX線レーザーとして、特に短波長に向けて水素型やリチウム型の再結合型レーザーは興味があり、今後の活発な研究が期待される。

再結合型のレーザーには、光電界による電離によって原子核を殆ど裸にする過程と、それが周囲の電子と再結合して励起状態の水素型、リチウム型などのイオンを作る再結合過程とが必要で、極めて少ない成功例である緑川ら（理研）の方法で示されたように、再結合がエックス線の放射より急速に行われるためには多価イオンを低温の電子が取り巻く環境を作る工夫が成功の鍵となる。たとえば、原研の永島らは水素とネオン、窒素などの混合気体を用いる効率的な再結合型レーザーを提案した。今後の基礎研究の積み重ねによって、実験条件に合致するモデルの構築と有効なデータの蓄積の結果、最適化条件を整えて効率の向上が期待されるとともに、この方式でどこまで行けるかが明らかになるう。

その他の方式としては、原理的には内殻励起型のレーザーがあり得る。従来他の方法で発生した短波長のエックス線による励起方式が提案されたが、実験的にはそう簡単ではない。内殻電子が電離すれば、直ちに反転分布となるので、確かに反転分布を作る効率的な方法と言えようが、オージェ過程など、競合する過程に打ち勝って素早くX線光子の放射が起きてしまうことが必要である。したがって、系の選択とエックス線レーザーの設計が鍵となる。

4. Tキューブ・レーザーと原子核物理学

原子核を構成する要素は、中性子と陽子なので、電磁場との相互作用の影響は極めて小さい。原子核のサイズが原子に比べて著しく小さい。相互作用もそれに比例して（高次の相互作用はその冪上に比例して）小さい上に、陽子は質量が大きいからである。それでも照射強度が十分高くなれば、高次の相互作用によってレーザーによる原子核の直接の可能性がある。加速された電子とTキューブ・レーザー出力との逆コンプトン散乱によって、ガンマ線を発生することができる。このような γ 線は波長可変であって、高分解能の核分光が可能となる。その結果、原子核の構造がより詳しく理解され、将来原子核の変換などに応用する可能性も出てくるものと考えられる。

5. 超高時間分解能

現在もっとも短い時間の発生はいわゆるフェムト秒レーザーによって達成されている。化学反応の制御の可能性も長期にわたって世界記録であった6 fsの記録は最近になってやっと破られたが、現在波一つの光の発生、すなわち1 fs程度の短時間に一方向のみを向く超短パルスの発生とその影響が真剣に議論されはじめている。このような光は、単に短い時間作用するだけでなく、一方向のみ作用する点でも特別な意味を持ち、交流では打ち消される効果もあらわになることになるので、その応用についての夢は尽きない。

6. 単色性、周波数安定性

レーザー性能のもう一つの重要な条件は単色性と周波数安定性である。超高分解能分光学は既に完済された領域と言えるかも知れないが、その応用によって新しい領域が開拓されている。その一つが原子のレーザー冷却であり、その結果を応用した原子光学とボーズ・アインシュタイン凝縮気体の発生である。まず1995年夏にJILAでルビジウムによる成功が伝えられ、続いてMITでナトリウム、ライス大学でリチウムについての成功が伝えられた。MITでは、レーザーでBECを二つに分ける手法を活かして、BECの衝突実験に成功し、応用研究が一步前進した感がある。今後BECがどのような応用上の意義を持つかはBEC理想気体とは何かを十分に考えれば自ずから明らかになるだろう。

レーザー分光学などの基礎が確立された現在、その応用によってどのような可能性があるかが、物理学的な研究の発展についても考慮されなければならない。分光学の基礎物理学への応用の一つとして、対称性の破れに関する実験的検証が一例として上げられる。さらに、基礎物理学とレーザーとの関係として、原子光学は、量子力学の最も基本的な観測の概念の直接的可視化としても重要な意味を持っている。

7. おわりに

以上は多様な発展を遂げつつあるレーザーの物理学への応用の一面に過ぎない。今後も新しい工夫や新しい物質の発見によってレーザーの性能が新たな飛躍が行われる可能性は大いにあると考えられる。レーザー性能の理論的境界に迫る発展を期待しつつその応用による新しい物理学の可能性を今後も検討し続けて行くことが必要であろう。