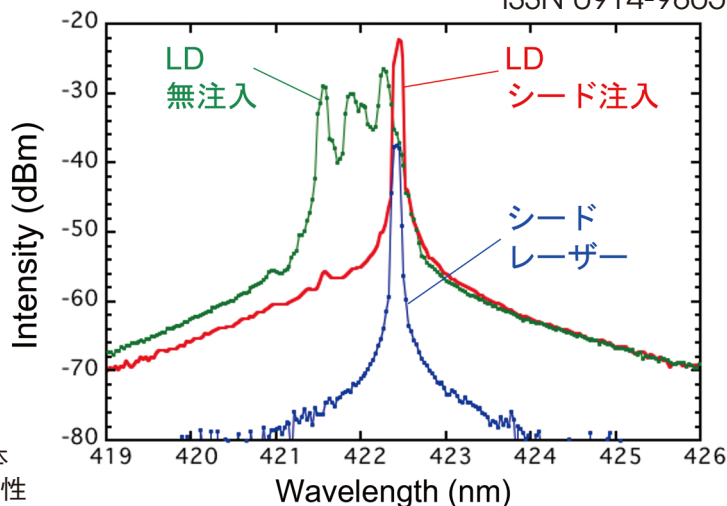


CONTENTS

- 狭線幅・高出力青紫色レーザーの開発  
-  $^{48}\text{Ca}$ の濃縮を目指して -
- レーザー誘起欠陥とレーザー損傷



【表紙図】青紫色半導体レーザーの注入同期特性

## 狭線幅・高出力青紫色レーザーの開発 - $^{48}\text{Ca}$ の濃縮を目指して -

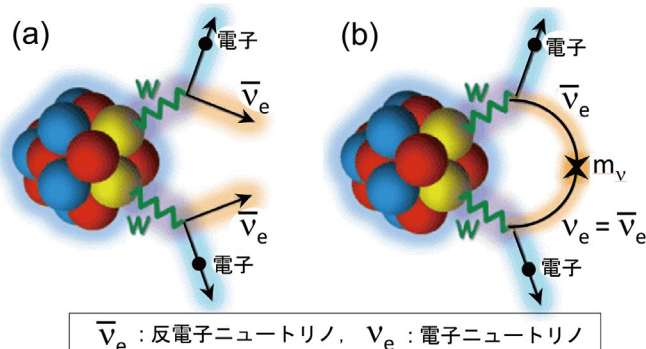
特別研究員 宮永憲明

大阪大学レーザー科学研究所 時田茂樹

### ■宇宙の物質優勢の謎と二重ベータ崩壊

宇宙誕生直後に粒子と反粒子は等しく生成されたと考えられているが、現在の宇宙では粒子が作る物質だけが残っている。これは「宇宙の物質優勢の謎」とよばれ、ニュートリノの性質が謎を解決する鍵と考えられ、二重ベータ崩壊の研究が注目されている<sup>1)</sup>。二重ベータ崩壊とは、図1(a)に示すように、原子核内の中性子2個が陽子2個に変わり、電子(ベータ線)と反電子ニュートリノが2個ずつ放出される現象( $2\nu\beta\beta$ 崩壊)である。ベータ崩壊によって発生するエネルギー(Q値)は反ニュートリノにも振り分けられるために、電子2個の合計エネルギーはQ値よりも低くなり、スペクトル幅が広がる。一方、1つのベータ崩壊で放出された反ニュートリノがニュートリノに転換し(ニュートリノがマヨナラ性を有し)、そのニュートリノが別の中性子に吸収されることで、もう1つのベータ崩壊が起こる可能性がある。これは、ニュートリノを放出しない二重ベータ崩壊( $0\nu\beta\beta$ 崩壊、図1(b))であり、電子2個

の合計エネルギーはQ値に等しくなる。 $0\nu\beta\beta$ 崩壊の観測は、ニュートリノがマヨナラ粒子であるか否かを調べるための唯一現実的な方法と目されており、 $^{48}\text{Ca}$ 、 $^{76}\text{Ge}$ 、 $^{82}\text{Se}$ 、 $^{100}\text{Mo}$ 、 $^{130}\text{Te}$ 、 $^{136}\text{Xe}$ を対象として世界各国で研究が行われている。



【図1】ニュートリノ放出を伴う二重ベータ崩壊(a)とニュートリノ放出を伴わない二重ベータ崩壊(b)<sup>2)</sup>

### ■ $^{48}\text{Ca}$ の二重ベータ崩壊観測と $^{48}\text{Ca}$ 濃縮の必要性

$0\nu\beta\beta$ 崩壊の半減期は約 $10^{26}$ 年以上( $2\nu\beta\beta$ 崩壊の $10^4$ 倍

以上)と極めて長い。したがって、その観測には、大量の二重ベータ崩壊核を含み放射性不純物の少ない試料の準備、高感度の検出器、および極めて低雑音の観測環境が重要とされている。

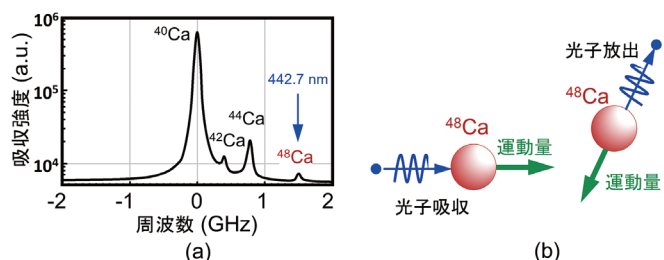
大阪大学核物理研究センターを中心とするチームは、神岡地下実験室(東京大学宇宙線研究所)でCANDLES計画を進めている<sup>2)</sup>。この計画では二重ベータ崩壊核として $^{48}\text{Ca}$ 同位体を選択している。 $^{48}\text{Ca}$ の $2\nu\beta\beta$ 崩壊のQ値は4.27MeV(自然界に存在する二重ベータ崩壊核の中で最大)であり、半減期も比較的短いという利点がある。また、フッ化カルシウム( $\text{CaF}_2$ )結晶をシンチレータとすることで、シンチレータ内部での二重ベータ崩壊を利用する。

カルシウムはアルカリ土類金属の中でも豊富に存在し、放射性核種を含まない高純度のものが比較的得られ易い。また、 $\text{CaF}_2$ 結晶は、紫外～中赤外で透明であり、シンチレータ母材に適している。さらに、熱伝導率が比較的高いことから熱量計にも適している。このように、ベータ線励起のシンチレーション光観測と温度上昇観測を併用することができる。しかしながら、 $^{48}\text{Ca}$ の天然存在比は0.187%と低いために、 $^{48}\text{Ca}$ の濃縮が強く望まれている。

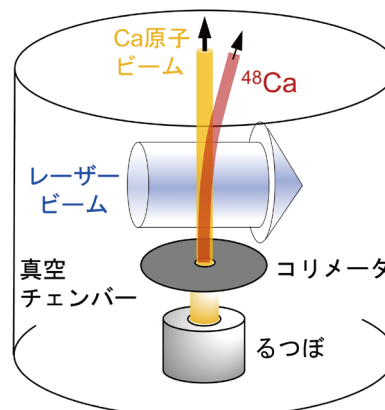
筆者らは $^{48}\text{Ca}$ 同位体をレーザー濃縮するためのレーザー開発を進めている。ここでは開発の現状を紹介する。

### ■輻射圧による原子偏向を利用した $^{48}\text{Ca}$ の濃縮<sup>3)</sup>

本研究では、2波長レーザーを用いたイオン化法による濃縮ではなく、光吸収に伴う輻射圧(運動量付与)による原子ビームの偏向を利用する。 $\text{Ca}$ 原子の基底状態 $4s^2\ ^1\text{S}_0$ は、青紫色の光(波長:422.7nm)を効率よく吸収して励起状態 $4s4p\ ^1\text{P}_1$ に遷移する。図2(a)に示すように、この遷移の同位体シフトを利用することで、 $^{48}\text{Ca}$ の選択励起が可能となる。励起状態の $^{48}\text{Ca}$ は蛍光を放出して基底状態に戻る。このとき、光吸収に伴う運動量ベクトルがレーザー光軸方向を向いているのに



【図2】Ca原子の吸収スペクトル(a)と光子の吸収・放出に伴う運動量変化の模式図(b)<sup>3)</sup>



【図3】原子偏向を利用した $^{48}\text{Ca}$ 濃縮の実験配置図

対して、自然放出の光子出射方向はランダムであるため、系全体としては光軸方向に加速を受ける。また、励起状態の蛍光遷移確率が $2.2 \times 10^8/\text{s}$ と高いために、Caビームがレーザービーム断面を横切る間に数100回程度の光子吸収・放出が可能であり、 $^{48}\text{Ca}$ を効率的に選択偏向させることができる。 $^1\text{S}_0 \rightarrow ^1\text{P}_1$ 遷移の自然幅は34MHzであり、輻射圧による偏向ビームのドップラー広がりを含む吸収幅は60MHz程度である。

前述のCANDLES実験装置のIV期では、約20kgの $^{48}\text{Ca}$ の利用が想定されている。この量の $^{48}\text{Ca}$ を1年間で濃縮するのに必要なレーザーパワーを仁木氏等の評価<sup>3)</sup>に基づいて概算すると、約4kWとなる。

### ■狭線幅・青紫色レーザーの高出力化の方策

レーザー開発のポイントは、①「ドップラーシフトを考慮した $^{48}\text{Ca}$ の吸収スペクトルに同調した波長制御性」と②「高出力への拡張性と低コスト化」である。表1の方式比較を基に、上記の条件を満足できるレーザーとして、狭線幅レーザー光注入同期型の青紫色半導体レーザー(LD)の多ビームアレイ方式を採用した。

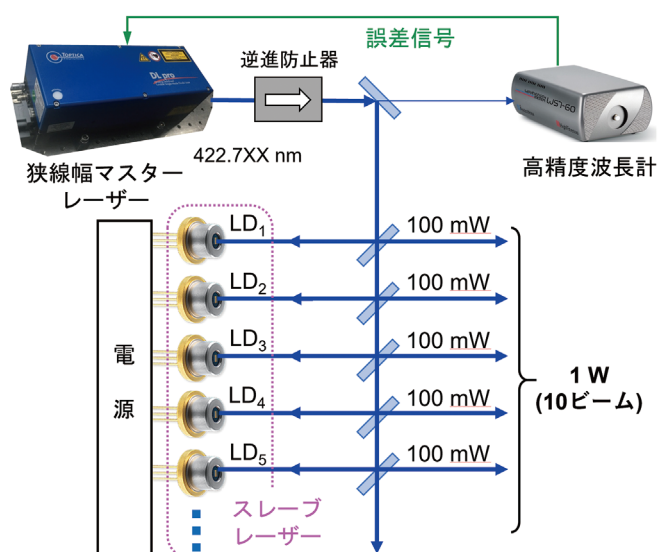
【表1】レーザー方式の比較

|                               | 紫色半導体レーザー | 赤外半導体レーザーの2倍波 | Ti:サファイアレーザーの2倍波 |
|-------------------------------|-----------|---------------|------------------|
| ビームあたりのパワー (W)                | 0.1       | 0.5~1         | 2                |
| 1ワット単価 (万円/W)                 | 500~600   | 500~1,000     | 1,000            |
| 低コスト化の可能性                     | 高い        | 低い            | とても低い            |
| 長期安定性                         | 高い        | 波長変換の調整が必要    | 定期的調整が必要         |
| 電気・光変換効率 (%)                  | 20        | 5~15          | 1                |
| 装置のフットプリント (cm <sup>2</sup> ) | 30x30     | 50x40         | 80x80            |

### ■1W級レーザーモジュール

マスターレーザー・スレーブレーザーモジュールの装置構成を図4に示す。マスターレーザーは、波長可変狭帯域半導体レーザー(Toptica Photonics, DL Pro,

最大70mW, スペクトル幅150kHz)であり、波長計からの信号に基づいて、0.002pm(3MHz相当)の安定性で発振波長の精密制御を行った。スレーブレザーは、ファブリ・ペロー共振器型青紫色LD(日亜化学, NDV4A16, 約100mW)のアレイであり、個々のLDに約2mWを注入した。1個のスレーブLDに対する注入同期の結果を表紙図に示す。無注入時のスレーブLDは縦多モード発振しているが、シード光の注入によって正確に波長同調されることが分かる。



【図4】注入同期青紫色半導体レーザーアレイの構成図

スレーブLDの縦モード間隔は56.3GHz(0.0335nmに相当)であることから、 $^{48}\text{Ca}$ の吸収線幅以下の誤差で全てのLDを同一波長に同調するには共振器長制御が必要であり、約1℃の温度調整スパンとその1/1,000程度の安定度が必要と考えられる。そのために、個々のLDに対してペルチェ素子による温度制御と高精度電流制御を併用する計画である。

#### 謝辞

本研究は、科学研究費補助金 新学術領域「地下から解き明かす宇宙の歴史と物質の進化(領域代表者：井上邦雄)」A02班「 $^{48}\text{Ca}$ を用いたニュートリノマヨラナ性の研究と次世代高感度化技術(代表者：梅原さおり)」における分担課題である。また、図2、3の転載を許可して下さった仁木氏に謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) 日本物理学会誌, “物質優勢宇宙の誕生の謎に迫る” 72(7), 480 (2017).
- 2) <https://www.rcnp.osaka-u.ac.jp/candles/index.html>; <https://www.km.phys.sci.osaka-u.ac.jp/research/r01.html>
- 3) 仁木秀明, 他, “二重ベータ崩壊実験用Ca同位体のレーザー濃縮”「宇宙の歴史をひもとく地下素粒子原子核研究」2015年領域研究会, 2015年5月15-17日.

## レーザー誘起欠陥とレーザー損傷

レーザー装置には、レンズやミラーなど多くの光学素子を使用されている。高出力レーザー装置においては、使用する光学素子がレーザー光により破壊(レーザー損傷)するため、高耐力化が重要な課題になっている。その一方で、レーザー損傷が発生しない低いエネルギーで長時間使用した場合に、透過特性が低下する現象が生じる。特に、紫外レーザーのような高い光子エネルギーをもつ光を使用する場合に顕著である。この原因は、光子エネルギーにより光学素子母材中の原子間の化学結合(例えば、Si-O結合)が切断され、欠陥(レーザー誘起欠陥)が生成されるためである。これを抑制し長寿命化を図ることは、高耐力化とともに必要である。

レーザー総研では、繰返しパルス動作時の光学素子の損傷しきい値低下の要因を明らかにするために、石

### レーザー技術開発室 本越伸二

英ガラス材料のレーザー損傷耐力を評価している。本誌No.347で紹介したように、ArFエキシマレーザー(波長193nm)を石英ガラス材料内部に集光し、1パルス照射と、2パルス照射の場合の損傷しきい値を比較した。結果、2パルスの時間間隔を1,000 msから短くするに従い、損傷しきい値が低下することを示した。これは先に照射したレーザーパルスの影響が、次パルスに及ぶことを示しており、「レーザー誘起欠陥」が損傷しきい値低下の原因であると考えられる。その関係を確認するために、金属不純物含有量が異なる2種類の石英ガラス材料について、長時間繰返し照射による透過率の変化と、2パルス照射のレーザー損傷しきい値を比較した結果を紹介する。

#### ■繰返しパルス照射による透過率低下

測定試料には、金属不純物含有量が10ppb以下の試

料Aと、100ppb以下の試料Bを用意した(含有量は製造メーカーカタログ値)。パルスArFエキシマレーザー光を長焦点レンズ( $f=500\text{mm}$ )で試料内に集光し、照射エネルギー密度 $0.4\text{J}/\text{cm}^2$ になるように調整した。試料への入射および出射エネルギーをそれぞれエネルギーメーターで計測し、透過率変化を求めた。図1は最大10,000パルス照射したときの透過率の変化を示す。図1(a)と(b)は、それぞれ試料A、Bの結果である。透過率はレーザー照射開始時の値で規格化した。不純物含有量の多い試料Bの方が透過率低下の割合が大きいことが分かる。また試料種類にかかわらず、レーザーパルスの繰返し周波数が10Hzから100Hzへ高くなるほど透過率低下が大きくなることも分かった。このことは、透過率低下の原因であるレーザー誘起欠陥が時間とともに修復することを示している。また、図内の破線は、欠陥の生成-修復モデルを立て、照射パルス数に依存した透過率の式を導き、修復時定数をパラメータにしてフィッティングしたものである。詳細は別稿に譲るが、試料Aおよび試料Bの修復時定数は、それぞれ0.67秒、3.7秒と得られた。

## ■2パルス照射レーザー損傷しきい値

上述の2種類の石英ガラス試料に対して2パルス照射時のレーザー損傷しきい値を評価した。2パルス照射では、長時間照射による熱の蓄積や透過率低下などの影響を抑えることができる。ArFエキシマレーザー装置から出射したレーザーパルスは、焦点距離100mmのレンズで試料内部(深さ8mmの位置)に集光した。試験は、照射箇所を固定し、集光エネルギー密度を徐々に増加させ、損傷が発生したときの値を損傷しきい値と定義した。通常、1パルス照射ごとに損傷有無の確認を行うが、本研究では同じエネルギーの連続2パルスを照射後、損傷の確認を行い、次の2パルスを照射

する。これを損傷が発生するまで徐々にエネルギーを増加し繰返す。損傷の確認は、同軸に入射したHe-Neレーザーの散乱光により行った。

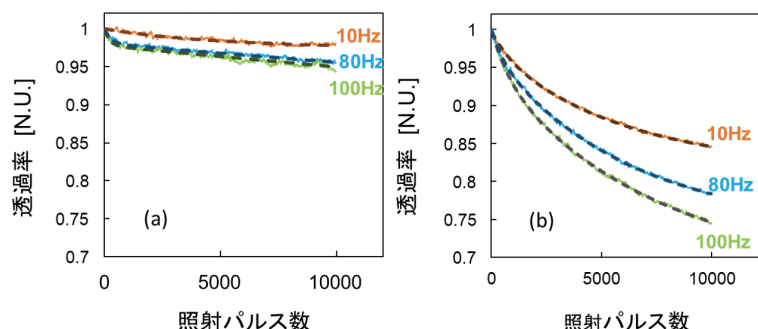
図2に2パルスの時間間隔に対する損傷しきい値の結果を示す。パルス時間間隔はレーザー装置の繰返し周波数(1~100Hz)で調整した。また縦軸は予め測定した1パルスの損傷しきい値で規格化した。以前の結果と同様に、パルス間隔が短くなるに従いレーザー損傷しきい値は低下した。しかし、低下の割合は試料の種類により異なった。試料Aが間隔100ms以下でしきい値低下が現れるのに対して、不純物含有量の多い試料Bでは1,000ms以下からしきい値が低下し始めると推定される。この結果は上述したレーザー誘起欠陥の修復時定数で説明できる。パルスの時間間隔が短い場合には、第1パルス照射時に生成された欠陥が十分に修復されないため、損傷しきい値の低下を引き起こすと考えられる。

## ■まとめと今後の研究

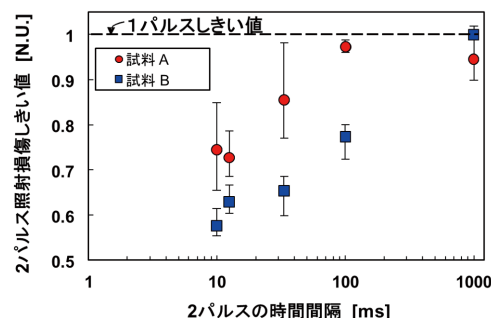
繰返しパルス動作時の光学素子のレーザー損傷しきい値低下の要因を明らかにするために、石英ガラス材料の透過率低下、2パルスによる損傷しきい値を評価した。結果、レーザー誘起欠陥が損傷しきい値低下の要因と考えられる。しかしながら、1パルスで生成される欠陥の数およびその吸収係数は小さいため、欠陥と同時に生成される自由電子の増倍、絶縁破壊の過程として検討する必要がある。また欠陥生成を抑制することにより、透過率低下だけでなく、損傷しきい値の低下も抑えることが可能であることを検証していく。

## 謝辞

本研究は、大阪大学レーザー科学研究所および近畿大学理工学部との共同研究により実施された。



【図1】試料A(a)、試料B(b)の照射パルス数に対する石英ガラス透過率の変化(照射エネルギー密度 $0.4\text{J}/\text{cm}^2$ )



【図2】2パルス照射による石英ガラス内部損傷しきい値