

## 研究室だより

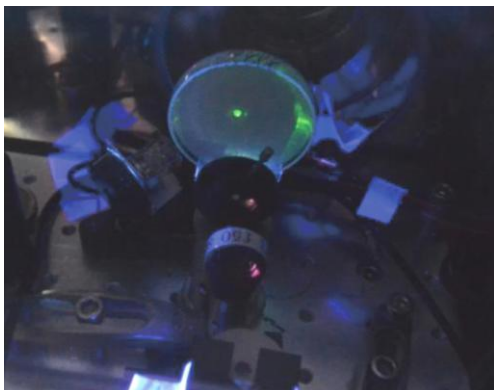
### 小林研究室

東京大学物性研究所附属極限コヒーレント光科学研究センター 小林 洋平

2008年9月に物性研に着任して5年あまりが経ちました。物性研だよりを執筆する機会をいただいたので、短い期間ではありますが研究室を振り返ってみようと思います。私は1998年に六本木を卒業してから産総研で10年半ほどレーザーの開発および制御に関する研究を行ってきました。その後物性研にまたお世話になることになったわけですが、六本木とつくばとの劇的な違いからすると、つくばと柏の葉の住環境は似ておりスムーズに移行できたと記憶しています。転職はそれまでの研究を見つめなおし新たな展開を図る良い機会です。また、組織に加わるからには仕事の方向性もある程度コヒーレンスが求められます。私は与えられた責務と自分のやりたいこととの整合性を模索した結果、よくわからないのでとりあえず求められたことを全て(勿論できる範囲ですが)やってみることにしました。それはレーザー開発一辺倒では見えない世界を垣間見てみたいとの気持ちもあったからです。世界中でレーザーは実に多くの研究者が利用していますが、ほとんどの人は購入したレーザーで出来ることを考えて研究を組み立てます。しかしながら、売っているレーザーでは飽き足らずにもっと違う性能を求める人も少なからずいます。このような発想からレーザー開発をしたくなる研究には必ず大きな夢が伴っています。出来る範囲で何が出来るかではなく、こんなことを実現したいのでこんな装置が欲しい、という考えです。物性研着任を契機に、異なる分野の研究者から大きな夢を聞いてそれに答えるべくレーザーを作るというスタイルは、自分の世界を新たに構築していく礎としてはなかなか良いと思ったのです。勿論自分の屋台骨である新奇レーザー開発の軸は保っておきます。必然的に研究テーマが発散していくわけですが、どのようになるのかを楽しもうということにしました。研究テーマを増やしていけるかどうかは人次第です。ここではこの5年間にどのように私の研究室のテーマが人とともに広がっていったのかという観点で書いてみることにします。一番最初の立ち上げは芝浦工大の修士学生の谷修一さんに手伝ってもらいました。わずか半年でYbファイバーレーザーシステムと外部共振器の雛形まで作るという、豪腕を見せてもらいました。

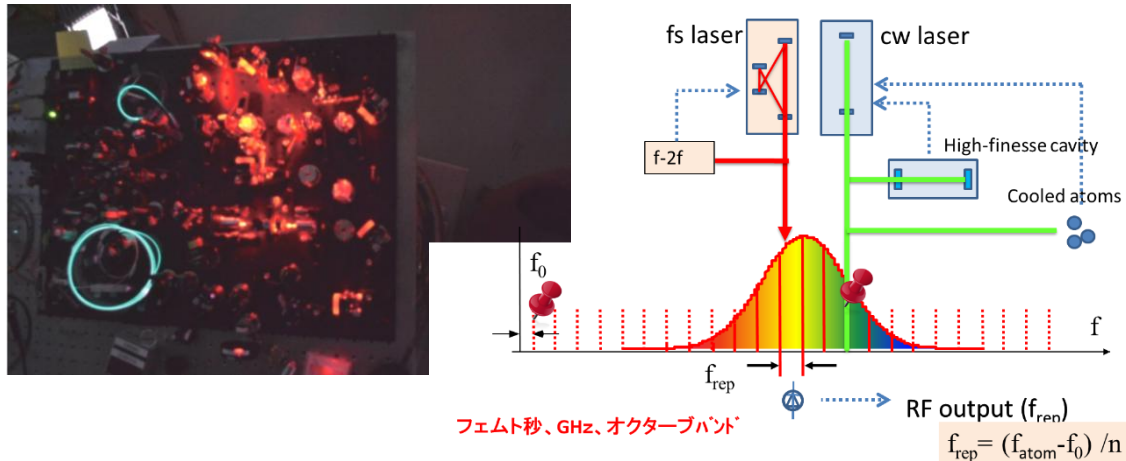
#### 高分解能光電子分光用 8eV レーザー

最初は辛所員から提案のあった光電子分光用 8 eV レーザーの開発でした。研究室立ち上げ当時は、渡部元所員と辛所員とのレーザー光電子分光が軌道に乗り始めた頃でした。そのときは7 eV レーザーでしたがそれを8 eV にグレードアップしたいというものです。辛型レーザーですね。初めは外部共振器による高次高調波で達成可能と考えていたのですが、光電子分光業界の分解能に対する要求は厳しく難航していました。そのときに渡部先生のKBBF結晶が使えることとなり、ファイバーレーザーベースで高繰り返しの8 eV 光を発生させることに方針転換を行いました。ポスドクの野村雄高さんと辛研の学生の伊藤孔明さんとで出るか出ないかわからないVUV光発生にチャレンジしました。その結果、Ybファイバーレーザーの7倍高調波を発生させることに成功しました。波長にして153 nmで、これは結晶からの和周波発生としては最短波長記録です。発生当初は平均パワーが10 pW程度でしたが、最適化により1 nW程度まで増強し発表しました[1]。



記録としては最短波長で良いのですが、使おうとするとパワーが足りないということでその後は全ての設計を見直してパワーの増強を2年くらいかけて行いました。特に東日本大震災後の大幅な改造によって大きくパワーが増大しました。技術職員の伊藤功さんと辛研の学生の山本遇哲さんの努力により大幅な増強が実現し、光電子分光に使えるほどになりました。レーザーから光電子分光装置までのアライメントができないという問題は山本さんの根性で解決し、ついには8eVレーザーは写真のように目に見えるようになり、光電子分光が出来るようになりました。これは研究室が立ち上がってちょうど5年半のプロジェクトであり2014年3月で終了しますが、これから実用ですので成果が出てくるのが楽しみです。

### 光原子時計用光周波数コム

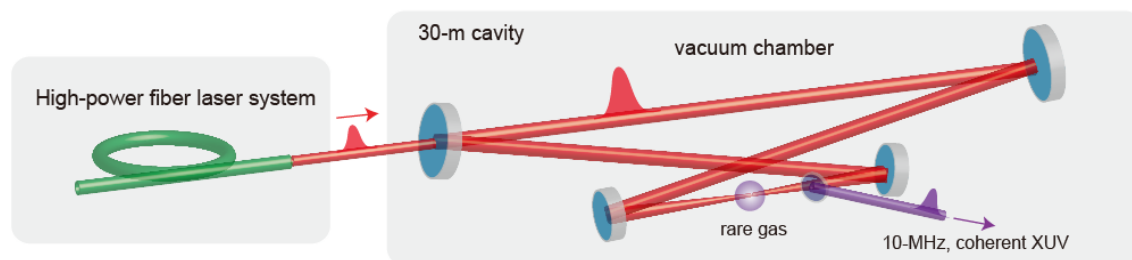
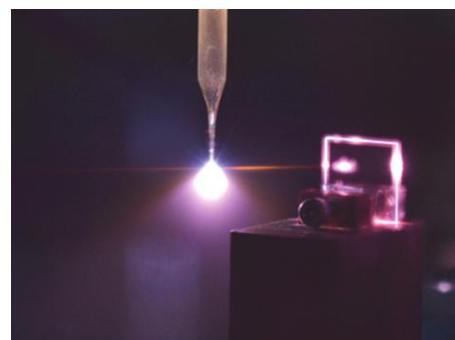


次にお話があったのは原子時計を飛躍的に高精度化するためのレーザー作りです。周波数標準業界の探求は非常に奥が深く、いくらでも精度を要求します。その先には以下のような実にさまざまな夢があります。例えば良い時計が出来ればGPSをはじめとする測地の精度が上がり地震予知につながるかもしれません。重力変化で時間の流れも変わるため時計の真下の地殻構造変化も検知できるでしょう。原子の遷移周波数が今日と明日とで変化するかどうか調べるといふ、所謂物理定数の恒常性テストも興味深いですし、はたまた量子電磁気学の計算結果よりも高精度に遷移周波数を測定したいなど、枚挙に暇がありません。現在の時間周波数標準はCe原子の電子準位における遷移周波数のうち、RF周波数帯にある9.2GHzを用いています。このRF周波数を9.2G回カウントしたら1秒と定義しているわけです。これをたとえば300THzの光周波数に置き換えると、同じ1秒の間にRFに比べると30000倍多くカウントすることになり、即ち、1秒の精度がそれだけ良くなります。ただし光電場サイクルをカウントするカウンターは秋葉原には売っていません。この光周波数をカウントできる装置が光周波数コムです。これはRF周波数と光周波数とのギアとして働きます。光原子時計の中でも東大工学部の香取先生が発案した光格子時計が有望視されています。原子が振り子でコムがギアの光格子時計を超高精度で作ろうという香取プロジェクトが立ち上がり、我々はYbファイバーレーザーで光周波数コムを作るというのが担当となりました。Ybファイバーレーザーでコムを作るのは当時長期留学生として五神研究室から来ていた久世直也さんが始めました。彼はその後物性研の博士課程に進学し自作したコムを2台使ったデュアルコム分光の開拓を精力的に行い2013年に博士を取得しました[2]。このレーザーの写真は2014年1月号の物理学会誌の表紙を飾っています[3]。平行して修士学生の中村卓磨さんがコムの性能そのものを上げる研究をしました。最初は嫌いだった電子回路作りについてか没頭する毎日を過ごし、現在はポストクのAlissa Silvaさんに研究が引き継がれています。今はまだ彼女は回路嫌いの段階です。技術専門職員の伊藤功さんには現在高精度コムを評価するための高安定cwレーザー作りを担当してもらっています。当研究室では原子トラップまでは出来ないのですが、超高安定のcwレーザーがあれば、それをご本尊として色々なチェックが出来ます。伊藤さんには線幅としてHzのレーザーを目標としてもらっています。1秒で14桁程度の安定度です。この安定度の光周波数をいつでも必要な人に配るシステムを実現するのがひとつの夢です。SGの光版です。

### 30 m 共振器

連続レーザーを共振器に共鳴するように入射すると共振器内パワーは増強します。このとき共振器モードと一致した光周波数である必要がありますが、共振器長はレーザー波長の半分の整数倍であればいくつでも良いです。パルスレーザーでは状況異なります。パルス列のスペクトルは縦モードが等間隔に並んだ櫛であり、このコム構造のスペクトルが共振器モードと一致するためには縦モードの間隔(繰り返し周波数)と縦モードの位置(オフセット周波数)ともに制御されている必要があるのです。つまり、連続レーザーとは異なりパルス列を共振器に共鳴させるためには自由度のひとつ多いコントロールが要求されます。また、共振器長はレーザー共振器の長さに一致する必要があります。このようにレーザーパルス列を共振器中に閉じ込めると平均パワーが増強し、共振器内で非常に強い尖塔強度を高繰り返しで得ることが出来ます。

高次の非線形現象を 100 MHz の繰り返しで調べることが可能となります。そのひとつに高次高調波発生があります。高強度レーザーを希ガスに集光すると多光子を吸収して一光子を放出することにより VUV・XUV のコヒーレント光が発生します。この光は例えば光電子分光に応用することが可能です。我々のところでも 100 MHz 程度の繰り返し周波数のパルス共振器に共鳴させる実験からスタートしました。共振器長は 3m 程度ですので、手の届く範囲の大きさであり実現もさほど困難ではありません。平均パワーで 20 W 程度のフェムト秒パルス列を Yb ファイバーレーザーで構築し、共振器ないパワーを 3 kW 程度にまで引き上げます。共振器内で集光強度にして  $10^{13} \text{ W/cm}^2$  以上を達成し高次高調波を発生させました。高次高調波も 100 MHz の繰り返しであるため光周波数コムになっているはずですが、すると、コムの 1 本を使えば VUV で超精密分光が可能となります。cw レーザーの出来ない波長領域でも超精密分光ができるのです。助教の小澤陽さんが Xe の基底状態から第一励起状態の遷移(VUV)の精密分光に取り組みました。高調波は変換効率が低く、さらにコムの 1 本しか使えないのできわめてパワーの低い大変な分光でしたが何とかやり遂げました。1 秒間に光子が 20 個しか来ない分光ですが、VUV 領域で GPS 標準とリンクした遷移周波数の決定が出来ることを示しました[4]。高次高調波を強くするためにはどうすればよいでしょうか。共振器内パワーは光学素子の損傷で制限されていたため繰り返しを下げるというのがひとつのアイデアでした。平均パワーを保ったまま繰り返しを一桁下げれば強度は一桁上がり、高次の非線形効果は飛躍的に強くなります。では 10 MHz にしようとの短絡的な考えを阻止するのは共振器長です。10 MHz は 30 m に相当するからです。30 m の光共振器が可能かどうかは 30 m の剛体が存在するかという問いに近いのです。そんな思索の中、五神先生のプロジェクトで光リングというのが立ち上がりました。リング共振器がピッタリだったわけです。強烈な後押しにより、はたして 30 m 共振器は実現しました。世界唯一の水冷定盤のおかげで伸び縮みのほとんどない共振器が出来、また、キヤノン特製の大型回折格子と修士課程の平山望さんのおかげで 10 MHz ファイバーレーザーも完成しました。高次高調波も 100 MHz システムに比べ数段強くなり、今後応用を展開していく予定です。この実験には助教の小澤陽さんとポスドクの趙智剛さんが奮闘しました。

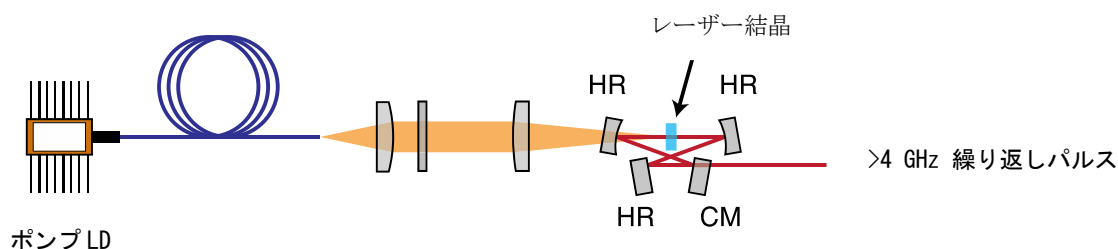


## 産業用レーザー

ギガフォトン株式会社と次世代リソグラフィ用の光源開発を始めました。これは DUV 領域の ArF エキシマレーザーのシード光をファイバーレーザーなどの固体レーザーに置き換えるという経産省のプロジェクトです。現在は発振器および増幅器両方ともエキシマレーザーの構成となっていますが、発振器側を固体レーザーに置き換えることにより省エネを実現するとともに、光の質も向上させるという目標です。会社から伊藤紳二さんと五十嵐裕紀さんが参加し物性研にて装置を組み立てています。原子の遷移周波数を測定するのはと違って実社会にダイレクトに貢献する研究開発はスピード感もスリルも一味違います。半導体リソはととても大きな産業で日本の得意分野です(でした?)。高精細化をこれからさらに進めるにはどうしたらよいか、そのためにはどのような技術が重要かなどを考えて研究を実行することは非常に重要であることを学ばせていただいています。このプロジェクトにはポスドクの玄洪文さんと趙智剛さんが参加して楽しくやっています。折角「使える DUV」を作っているわけですから、どのように展開させていくべきかを考えることが大切です。産業応用といっても根底にあるのは物質と光との相互作用であり、研究対象は沢山ありそうです。

## 次世代レーザー

この項目は私のやりたいことを主体的に進めている研究です。光周波数コムは出現したときから夢のような光源と考えられてきました。それは、超短パルスのスペクトルの中には櫛状の縦モードが規則正しくなり、それぞれのスペクトル幅は非常に狭いため、一台フェムト秒レーザーを用意すれば 10 万台の cw レーザーを並べたのと同じであるというものです。もう cw レーザーは要らないのではないかと思えるほどです。ところがその説明には大きなトリックがあります。縦モード 1 本を実際に取り出せないのです。何故ならば縦モード間隔は繰り返し周波数なので通常は 100 MHz 程度、波長の間隔に直すと 0.3 pm、エネルギー間隔では 0.4 ueV に相当します。これほど狭い間隔のモードを分光器で一本だけ取り出すのはほぼ不可能です。この単純な理由により光周波数コムの利用はマニアックなものに限られているのです。と、するならば、繰り返しを上げれば良い、または、もっと良い分光器を作れば良い、ということになります。これに取り組んでいるのが現在博士課程の遠藤護さんです。モード同期レーザーにおいては「繰り返しが高い」＝「共振器が小さい」が成り立ちます。つまり、小さいレーザーを作れば良いのです。遠藤さんは何でもマニアの本領を発揮して小さいレーザーをガンガン作り続けています。通常 100 MHz (共振器長 3m) のところ、現在までに 6 GHz (同 5cm) を達成しています [5, 6] (下図参照)。先ほどの 30m 共振器と相似形で 3 桁程度小さいわけです。これくらい繰り返しがあがると市販の分光器でも縦モードが分解できてきます。ちなみに通常の市販品の最高分解能はおよそ 4 GHz です。しかしながら、分解能ぎりぎりなため、縦モードがようやく見えるといった程度です。そこで、市販品よりも分解能の良い分光器も作ってしまうことにしました。再びキヤノンの回折格子を使い新たな構造を考案することにより超高分解能分光器を製作することが出来ました。これにより私自身 10 年やってきた光周波数コムの縦モードを初めてこの目で見る事が出来、本当にコムってあるんだなあ実感したのです。分解できるということは 1 本取り出すこともでき、どのようにでも使えるということです。このようなコム分解は天文分野で使われることが期待されています。突拍子も無いように聞こえるかもしれませんが、太陽系外惑星の探索に使えるのです。恒星のドップラーシフトを注意深く観察すると、周りの惑星に引っ張られる様子が見えてくるため暗くて望遠鏡で見る事が出来ない地球型惑星を間接的に見つけることができるという方法です。レーザーと組み合わせたこの方法はここ数年盛んに研究されています。通常はハワイやチリにある大型望遠鏡と何トンもある高級分光器と、複雑なレーザーとの組み合わせで行う研究ですが、我々は小さいレーザーと 1 m ほどの手作り分光器とで似たような、あるいはそれを上回る分解能を実現できるという提案をしようと考えています。国内の天文学会も行ったことはありませんが、思い切って国際会議に行くことにしてみました。また、修士学生の久保弘樹さんは光周波数コムの波長領域を中赤外に拡張するという目標で GHz 繰り返しのレーザーシステムの構築を始めました。今後の新しい方向性です。中赤外は分子振動の吸収があるため環境や医療応用に非常に重要ですが、光源がほとんど整備されていません。今後中赤外精密分光がうまくいくと研究分野の拡張がさらに加速しそうです。



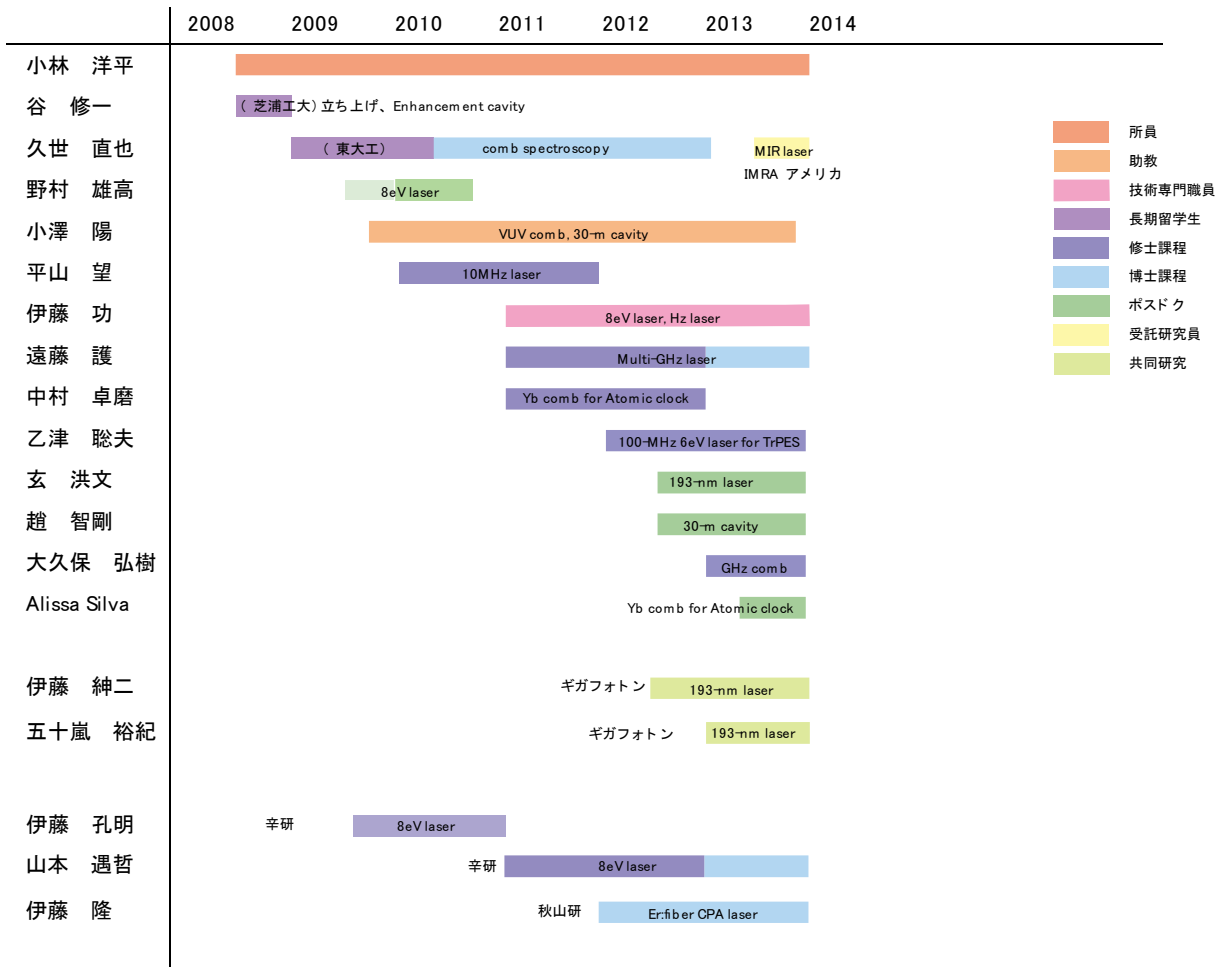
## Er CPA

部門内プロジェクトとして秋山研究室とチタンサファイアレーザーよりもパルスエネルギーの大きな高繰り返し光源の開発を進めています。市販のチタンサファイアレーザーよりも数倍大きなパルスエネルギーで物質を励起してみたいとの思惑です。Er ファイバーレーザーの第二高調波はこれにちょうど良く、私も作ってみたいレーザーでしたので話が進み、秋山研究室博士課程の伊藤隆さんがレーザーを構築しています。そこから派生した研究もあり、なかなか面白くなってきたところです。





年表



参考文献

- [1] "Coherent quasi-cw 153 nm light source at 33 MHz repetition rate," Y. Nomura, Y. Ito, A. Ozawa, X.-Y. Wang, C.-T. Chen, S. Shin, S. Watanabe, and Y. Kobayashi, *Opt. Lett.* 36, pp1758-1760 (2011).
- [2] "Comb-Resolved Dual-Comb Spectroscopy Stabilized by Free-Running Continuous-Wave Lasers," Naoya Kuse, Akira Ozawa Yohei Kobayashi, *Appl. Phys. Exp* 5, 112402 (2012).
- [3] <http://www.ips.or.jp/books/gakkaishi/2014/01/691.html>
- [4] "vuv frequency-comb spectroscopy of atomic xenon," Akira Ozawa and Yohei Kobayashi, *Phys. Rev. A* 87, 022507 (2013).
- [5] "Kerr-lens mode-locked Yb:KYW laser at 4.6-GHz repetition rate," Mamoru Endo, Akira Ozawa, Yohei Kobayashi, *Opt. Exp.* 20, pp12191-12197 (2012).
- [6] "6-GHz, Kerr-lens mode-locked Yb:Lu2O3 ceramic laser for comb-resolved broadband spectroscopy," Mamoru Endo, Akira Ozawa, and Yohei Kobayashi, *Opt. Lett.* 38, 4502-4505 (2013)