

平成 15 年度創造開発研究海外調査報告書

「レーザーを用いた高密度物性研究に関する調査研究」

電気通信大学レーザー新世代研究センター 米田仁紀

派遣期間 平成 16 年 2 月 1 日～8 日

派遣先：米国カリフォルニア大学サンディエゴ校、STEFAN 大学、SLAC など

概要：この研究調査は高密度プラズマ研究で最近着目されている warm dense plasma を対象としたさまざまな物性研究、その応用研究に主眼点をおいて行ったもので、主に米国のアクティビティ、その研究の捉え方を調査したものである。この研究分野は広く全米内に広まっており、また、様々な次元での研究もあることから、調査領域を広げるために、STEFAN 大学で行われていたワークショップにも参加し、そこで多くの研究者と議論を行った。米国では国立研究所を始め、セキュリティ強化のために短時間ではその研究所の訪問許可が得にくい状況であったが、外部でそれら研究者と会うことで、LLNL や NRL、GA といった研究所の動向を調査することが可能になった。また、研究施設としては最近 X 線 FEL という計画が提出されている SLAC を訪ね、そこでの実験研究動向を調査した。

University of California, San Diego, Physics Department 訪問

Thomas M. O'Neil 教授（現在の専門は non-neutral plasma）

大学の研究動向について意見交換を行った。UC San Diego ではバイオが何しろ強く、物理だと biophysics が大きくなっている。学生の数により各部門の強さ、教官数が影響されてしまうので大学として制御が大変だという。プラズマの関係では過去に A&M が大きくなった時があり、それ以来その分野の教官が多く減らせなくて大変であるという。教官としてテーマ代わりをする様子がこの分野ではあまり無いようで、そのことも原因かも。

大学のシステムについて、学生のトレンドなどメディアなどから入る情報を元にしているのではと聞くと、確かにそうだが、すぐには変えられないという返事。アメリカでは比較的入学が簡単なはずで、そのために多くの学生がくれば、また、それを教育するクラスが必要で、その結果、教官数も変動せざる得なくなる。日本の場合は定員制が強いので、このような影響は少ないが、卒業研究の着手などの場合には、実質的に研究室の人気投票のようになっており、同じ質の問題となっていると思う。

バイオ関係は UCSD は強い。この理由は近くのメディカル会社と強い関係があ

り、その意味もあって大きくなっているとのこと。また、現在はカリフォルニア州の経済状況はかなり悪く、それが大学運営に大きく影響していることなどがある。

CLIFFORD M. SURKO 教授（現在の専門は electron-positron plasmas）

我々のところで行っている warm dense plasma の conductivity のモデルで、localization の可能性があることを紹介し、議論をコメントをもらった。彼は低導電率化の理由に、我々が提案している localization もしくは正負プラズマではない可能性を考えて議論してくる。Saha による見積もり、導電率がこれ以外に低く見える可能性はないか、中性粒子とイオン、電子のバランスのずれなど。ただし、結果を否定するという議論ではなく、さまざまな考えをこういった新しい現象理解には必要というポジティブな考えかたであった。彼はもともと laser plasma の研究をやっていた人間で、そのためによく理解している感じではあった。

Stefan大学で行われたlaser-matter-interaction-2004会議参加記録

Stefan大学で2/2～4までlaser matter interaction2004という会議があり、そのV. Stefan教授がこの会議に私を招待講演者として招いてくれた。そこでは、全米中から多くのレーザー相互作用研究者が集まり、非常にインフォーマルな形で議論を行うことが可能であった。以下はその参加者との議論記録である。

米国 NRL 研究所の V.J.Jacobs 博士はレーザーと物質との相互作用記述するものとして Kinetic and Spectro description for laser matter interaction という概念を示している。これは、レーザーの吸収であれば BB, BF, FF, collective などというように様々な機構に分けて取り扱い、また、放射も線形、dielectric, recombination, Ramanなどというように細かく機構別に分類、それらを equation of motion とともにすべてひっくるめて行列要素を作り、解放するという手法である。もちろん原理的には可能であるが、一般には途方も無い大きさになって解を求めることは非効率的である。そこで、要素の優劣、関係の優劣を付けて reduced matrix を作り、解を得るというもの。例えば、コヒーレントなシステムとその環境があった場合、環境側からコヒーレントシステムへはコヒーレントを低減するような作用があるが、逆にコヒーレントシステムから環境側へはコヒーレントを増加させるような作用は無視してかまわない。

確かに、理論上は可能なようであるし、warm dense matter の場合には、特にこれまでのレーザー相互作用のように逆制動輻射のみを考えるなどではいけないことも多々ある。しかし、本当にこのような理想的なものが構築できるのかど

うかが問題であろう。

GA(General Atomic 社)の Mike Campbell はレーザー核融合における Fast Ignitor の可能性、位置づけを述べた。LLNL の NIF の計画は 2006 年から 48beam によるテストを開始し、実験を進めながらレーザー増強を進める。10 年くらいで ignition を実現し、Omega での cryo target 実験、Z マシンによる plasma 実験を併用させて進める。ターゲットデザインとしては、Pd を含んだレイヤーを付加することにより R-T 不安定性に安定なターゲットデザインをとる。このごろの議論点は、果たしてこれまでの ignition 路線は NIF のマイナーチェンジでどこまでパフォーマンスをあげられるかというもの。その一つとしてはドライバーの波長があり、NIF の選択では当然 $1\mu\text{m}$ の 3 倍波が使用されているが、そのために、変換効率、最終光学系の光学ダメージの問題から出力エネルギーが制限されている。これを 2 にして本当にどこまでターゲット相互作用が代わるかを真剣に議論すべきであるという主張。特にこれまでの 2 を否定した理由はホーラムの入り口部での非線形散乱によるカップリングの低下であったが、エネルギーが増すにつれ、その部分での無理な集光は小さくなり、ほぼ平行ビームでターゲットに入射されることから、問題はかなり低減されているはずであると述べている。Fast igniter に関しては少ないエネルギーで大きなゲインを期待できる点などという教科書的な内容であった。これに対して、レーザーからターゲットへのカップリングの不明な点、定量的な予測の難しい点もありながら、なぜ、そのような安易な結論を導くのか？中心点火の厳しい定量予測の値と本当に fast igniter の予測値は比較に値するほどあるのか？という問いをかけたが、それは確かにそうで、いずれにせよ困難な挑戦であることには違いが無いという答えであった。

同じく GA の Kilkeny も同じようにレーザー核融合の新しい発展について述べている。しかし、疑問はすでに LLNL から離れたこの 2 人が、なぜまだ LLNL の NIF 中心であるアメリカの ICF プログラムについて、当然のように述べているのかがわからない。

彼の話は Campbell と同じでいかにパフォーマンスをあげるかということ。話は ICF のトレンドで、テーマは Indirect と Direct でそれぞれの欠点（効率、ハイドロインスタ）をどう改善するか、クライオターゲットの技術的困難をどう克服するアイデアを出すか？NIF でのもっと違う可能性について、であった。具体的には、Au-Cu といった傾斜材料による衝撃波インピーダンスをアプレータと燃料部でマッチさせる方法（具体的には Be に Cu を混ぜてドーピング濃度を変化させるもの）、ピケットヘンスパルスによる Adiabatic の若干増加による局所的にお

おきな Adiabatic を避ける方法。NIF による Polar 照射での direct の可能性（現状の計算ではゲイン 10）。現在考えているクライオターゲットはホーラム内の対流を利用して浮遊させることを含め考えているが、これではかなり複雑になる。それを Double-Shell 構造にして direct なように扱う方法である。

これまですべて 3 で設計されてきたがこれを 2 で行えば少なくともエネルギーは増強できる。それは 2 つの理由で 1) 変換効率、2) 最終光学系のダメージの問題であるという。光学系のダメージの問題でフルエンスをあげられるのであれば、もっと質の高い、さらに表面あらさの小さな研磨材料でシステムを作れば現状のままでいいのでは？という問いには、ターゲットチャンバーは理想的な条件にはほど遠い。従って、それも含めた設計評価が必要で、その意味では 2 化も含めた対処が必要であるという答えであった。

しかし、同じ GA でありながらなぜ一言も Fast Ignitor にコメントしないのかは不思議。

University of Illinois の G.H.Miley は Phonon 励起による X 線レーザーの可能性について述べた。ロシアの放電の結果出てきた X 線と思われる信号の追実験を行っているのであるが、どうも結果は信用できそうも無い。実験の概要は Pd を陽極とし、Pt を陰極とした 2kV、10-200mA の放電で 400 μs 程度の放電の後、休止している 200 μs の間で鋭いピークが観測されるというもの。これだけでレーザーと言い切るのもすごいが、これを phonon ドライブであるとするモデルを構築している。可能性は否定はできない（コヒーレントフォノンによる励起など超短パルスレーザーなどでフォノンモードにエネルギーを移行させ、エネルギー集中を何らかの形で行えば、可能性はあるかも）が、このままでは信用できるものではなかった。

Harteman (Lawrence Livermore National Laboratory: LLNL) は 100keV あたりのコンプトン散乱を利用した X 線ソースの話を行った。LLNL にある Falcone レーザーの話で数 ps のパルス発生を行い、すでにいくつかの波長コントロール実験も行っている。電子ビームもバンチにより 300 fs まで短縮化されたものが実現されており、将来は単パルス化を行っていく。この超短パルス電子ビームの測定は表面のチェレンコフ放射みたいな測定であり、この機構により出てきた光を干渉計を利用したオートコリレータで測定している。散乱ビーム内では角度により発生 X 線のエネルギーが違っており、うまい比較実験が K 端などで行われていた。

NIF(核融合研)の R.M.More の話では A の制御は B の制御となりその結果 MHD

までもを制御できるという点が今後考慮すべき新たな視野であろう。これは通常のレーザープラズマではできないが対抗する磁場のスキンドープをコントロールしてリコネクション応用への可能性はかなりあると思う。また、warm dense plasma 内の conductivity に対する localization の話では、今後の焦点のひとつはその phase transition を検出することであるという見解。高密度側のどこかにこのトビがあるはずでそれを検出する必要がある。ここに新たな実験のアイデアが必要になり、今後議論してトライしてみたい。

LLNL の S. Libby 博士は V-division の Theory の head である。彼は固体物理での輸送現象モデルをプラズマに発展させて、localization を議論した場合にどうなるかをレクチャーしてくれた。固体中での Anderson 転移や Mott 転移と比較しながら理論を立てている。Kubo の式から Drude までの一連を説明。その中で Localization に至るまでの時間のスケールリングを出している。Plasma と solid-states の解析の差異はランダムな状態下での wave packet の広がりを固体物理の手法を改良することで対応可能であるかどうか?にかかっている。まだまだ最終的な答えは得られた訳ではないが、このような議論をすることにより、warm dense plasma と solid state physics が真に同じ領域で物理を共有することになると思う。彼の説明の中で、なぜ、今 localization かという問いには、プラズマでは初めてという答え。プラズマ中の Localization を考えることの発端は我々の PRL の実験論文と Desjais の MD シミュレーションの論文というがきっかけとなっていると説明された。

GA の A. Forman はレーザー加工でステンレスにアスペクトの高い穴をあけるアプリケーションを行っている。アイデアはダブルパルスで加工性能をあげる。M. Perry の所にいながら超短パルスではなく ns のパルスを使い加工を最適化しようとしているあたりが、本当の現場に入った場合には、付加価値より加工レート (photon cost) が効いている印象を受けた。波長も $1\mu\text{m}$ で 7~100ns の間隔をあけて二つのパルスを当てている。100ns 程度話しても Blackbody 温度が 1つめと 2つ目で同じ程度まで上昇するが、プラズマの大きさは大きくなり、発光位置も初期固体部分から時間とともに離れていく。6mJ/cm² 程度で実験が行われ、単一パルスでのアブレーション速度より 1桁以上大きくなっているが、中の物理の理解は希薄で、しかも、無理矢理それを説明だけしようとして、計算機シミュレーションをしている感じ。しかし、彼との話では、少なくとも要求はステンレスに穴をあけることであり、それをいかに達成できるかが上から押し付けられていることで、物理の理解まで行きそうも無いという答えであった。(彼自身は以前は大学にいて、そのような研究を行ってきた。)これは、今

のレーザー加工の分野が抱える大きな問題で、装置パラメータで動かせるものの中で最適な解を探すという風潮そのままであり、そういう意味で warm dense matter のデータの特異性が加工を主導していく流れを生まない限り、真に新しいものは出てこない感じを強く受けた。

New Mexico 大学の P.G.Eliseev 博士は Laser induced Damage and Laser processing of semiconductor というタイトルの話をした。彼はもとはロシアの GPI にいて、CO₂ レーザーを用いた加工も経験がある。基本となるアイデアは紫外光を使って wide band gap 半導体を加工するというもの。エキシマを用いた話が中心で、それに過去の CO₂ と最近のフェムト秒の倍波の話が混在している。驚かされるのは CO₂ で 200~20 μs の 9 μもしくは 5 μの波長での加工データがあり、60~600 J/cm² 程度のフルエンスで穴あけ加工をした写真などがあつた。エキシマでの加工フルエンスが 0.5 J/cm²、400 nm のフェムト秒レーザーの場合が 5 J/cm² であることを考えるととてつもない大きなエネルギーをつぎ込んでいることになるが、加工痕はそれほど汚くはない。精度や効率はともかく、エネルギー付与というソースには十分奥まで（すなわち吸収が少ないので）運べる利点はあるかもしれない。

また、機構上面面白かったのは lift off でサファイア基板の上に GaN を生成し、その上にさらに Semi の GaAs などを積んで、その後にサファイア側からレーザーを照射させ、GaN の表面を改質して 400 °C まで温度を上げて剥離させるという手法。この手法の最適性（波長、パルス幅、フルエンス）などをこれから考える必要があるだろう。

彼はもう一つ量子ドットの shell model について述べたが、こちらは実験がサイズの様々なドットの平均としてしか観測されていないものからの発光に不均一幅としてその要因を fix させて解析を行っているなど、モデル精度という意味ではまだまだ。球対称、円筒対称などで高次のモードになるにつれエネルギー準位が逆転し、その発光強度が変化する傾向が2つの対称性で異なるという説明であつた。

SLAC 超短パルス X 線発生施設の訪問

SLAC(Stanford Linear Accelerator)の Aaron Lindenberg 博士のところに超短パルス X 線発生の研究施設の見学に行く。SLAC は 3km にもおよぶ直線加速器で、高エネルギー物理研究のために作られたビームラインで、終端にループ上の衝突ラインを設けてある装置である。彼らの研究はその直線加速終端部で 1/10 の間隔でビームをキックさせてもらい、研究用ビームラインを構成し実験を行っている。そのため、実験は主側の実験に左右される時もあるが、ラインのメンテ

ナンスはすべて任せることができるので、レーザー相互作用実験部のみをケアすれば済むようになっている。この研究は LBNL の ALS で行ってきた研究を、そのフルエンスをあげるために行われているもので、さらに、将来の X 線 FEL の基礎実験としても位置づけられている。具体的な方法はピコ秒の電子ビームに正面方向から（約 45 度）TW のレーザーを当て、電子ビームのエネルギーをモジュレーションさせる。その後、偏向マグネットによりシンクロトロン放射を起こさせ、そのモジュレーとした成分のみを取り出す。実験は去年の 5 月から始まり、ようやく X 線が観測されるようになってきて、今、まさに盛り上がっている時期であった。見学に行った日もまさにいいデータが出ていると、喜んでいるところで、活気があった。モニターしているのは X 線による斜入射のミラーの蛍光を冷却型 CCD カメラでとっている。ここは斜入射であるために X 線のビーム断面が横方向の空間に広がった形で現れており、そこにレーザーによりキックされた痕跡が写し出されるようになっている。レーザーと LINAC のビームのシンクロは、レーザーの繰り返し周波数を共振器内のミラーを移動させて行っているが、その調整は実験を行うパルスの直前で行い、またフリーに発振させる方式をとっている。80Mhz の定倍の周波数のレーザー発振器側から出させ、それと加速管の RF の周波数のビートをとってシンクロを行っている。レーザーは Kaptan-Murrane の製品で、ミラー移動部も含め用意されているらしい。

出力されている X 線は数～サブ ps であり、フォトン数は 10^6 程度。集光は Be もしくは Si のミラーをベンドさせ行っており、数 μm に集光可能。そのため総集光強度は $10^{13}\text{W}/\text{cm}^2$ を X 線で期待できる。ここまで来れば X 線の非線形光学が可能になるが、その計画はすでにあって、彼は理由はわからないが Se を使うものらしい。

X 線 FEL 計画についてはどう考えているかという質問には、いずれにせよすごい光源となりうる。中でも単一分子の回折パターンがとれることは非常に驚きであろう、という少し優等生的なコメントであった。

蛇足ではあるが、SLAC の実験室で Jogan に会うことになった。彼は 95 年に私が UCB に行ったときに PosDoc としていた人間で、その後スエーデンに帰り大学に職を見つけている。今回はたまたま共同研究で滞在中で、会えることになった。この研究では、Web 上の研究ノートがあって、実験結果が出るとすぐさまコメント付きで web で共同研究者が見られるシステムになっている。データを瞬時に共有できるなど加速器を利用した研究分野ならではのシステムであるが、面白いのでそのうち作ってみたいと思った。

SLAC のセキュリティは以前と比べると高くなっているようであるが、LBNL と比べパスポートなどのチェックは無く、さらに表から入る場合には 2 重の守

衛所を通るが、夕方になり、2つ目のゲートが閉じてしまうと、勝手に裏口から出れるようになっている。(もちろん、そこにも守衛はいるが。)中でもエスコートは必要ないらしく、帰る時は自分で帰ってくれという感じであった。