

レーザーエネルギー学とは何か

高部英明

大阪大学レーザーエネルギー学研究センター

(11.6.9/12.12.24)

概要

「レーザーエネルギー学」とは何か。外の人から問われるし、内の人間も個々にイメージを持っている。レーザー研の現状と10年先の構造を考えると、高強度レーザー自体の技術・科学研究、それを用いた基礎から応用までの科学研究を体系化していくことが求められていると思う。抽象論をいくらしても前に進まない。私が物理学者として、また、本分野の専門家とし、頭の中にある「レーザーエネルギー学」の具体例を挙げてみた。質問・ご批判ください。

高強度レーザーや超高強度レーザーを用いることにより、複数の新しい学術分野を開拓することができると考えている。私達がこれまで主に核融合研究という目的集中型の研究(purpose-oriented research)で培ってきた学術を、「新しい学術を切り開く」という学術的観点から眺めると、多様な学術の分野との接点を見いだすことができる。それを全国共同利用・研究拠点(user's facility)という利点を十分に生かすことで、外部の研究者と連携した学術体系化を行っていく事ができる。

例えば、物性物理学が凝縮系の多様な物理現象を研究する分野として、日本物理学会では会員2万人の約2/3がこの分野を発展させている。領域は12もある。磁性、超伝導、最近ではソフトマターなど、扱う対象や着目する物理現象の違いで、新たな領域が生まれる。そして、物性物理学の応用は、主に、会員2.2万人を擁する応用物理学会が産業界の研究者と連携しながら、我が国の産業競争力の基盤を形成するまでになっている。

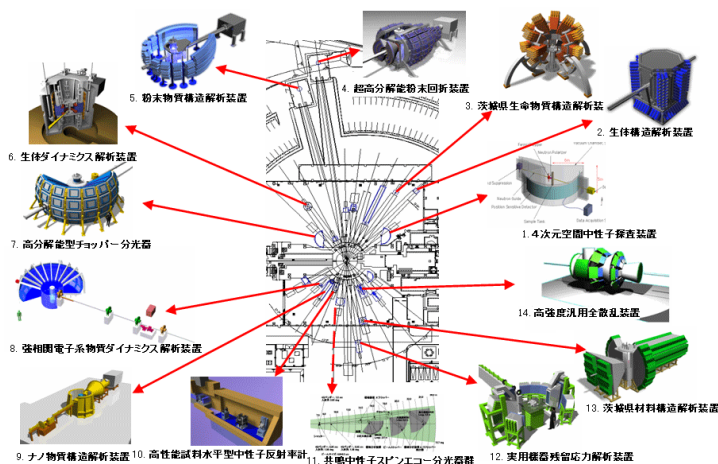


図1 建設中のJ-PARC中性子実験施設の23本のビームラインに建設予定の装置(一部)
[資料提供]J-PARCプロジェクトチーム

「レーザーエネルギー学」とは、高強度レーザー装置の特性を生かす事により切り開かれる学術全般を意味する。高強度光物性という面もあれば、素粒子・

原子核・宇宙という面への新しい学術展開もある。応用では、粒子源、電磁波源、次世代加速器など産業応用へ結びつく研究も行われている。また、高強度レーザーによる高温・超高速プラズマ流の生成は磁化プラズマとは異なる複雑系の物理の研究基盤でもある。レーザーエネルギー学が宇宙物理模擬実験として学術を模索することになったのは必然であった。

私は物理学者である。物理学の範囲で以下に「レーザーエネルギー学」の具体的学術分野を概観してみた。レーザーエネルギー学のほんの一部しか触れていないことをお許し願いたい。これに、皆さんの頭に浮かぶ項目を工学・技術含め加筆して頂きたい。そして、今後の議論で「一番大切」なことは、テーマをあげるだけでなく、顔が見えるように研究者の名前を明記していくことである。貴方は「レーザーエネルギー学」にどう貢献できるのか。下記に見当たらないなら、貴方の考える「レーザーエネルギー学」の定義を私のように書いて、「研究したい」テーマとその概要を私のように書いてみてください。その集合体が「拠点事業」の議論の出発です。こちらにアイデアなくしてコミュニティはできません。その上で、未知の「レーザーエネルギー学」を潜在的コミュニティと議論しながら探っていくのです。:

1. レーザー研の教員のだれが、どのテーマに興味と責任を持ち、学術進化に貢献していくのか。具体的に名前を書くこと。
2. 加えて、そのテーマを外部のだれと共同で学術推進を行っていきたいと考えているか。外部の方の了承は後のこととして、まず、具体的なグループ構成が、外部の研究者を加えてできるか。
3. 課題で、レーザー研に主に研究を行う教員がいないテーマだが、外部の方々と話し合い、研究始動の可能性がある方々の名前。
4. 上記3点を各自が「奪い合い」をすればいい。その上で、テーマ同士の連携を提案する。

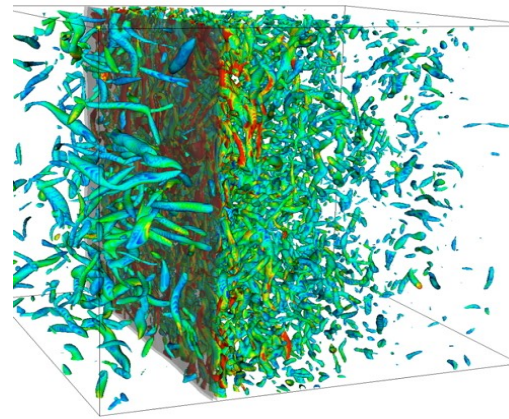
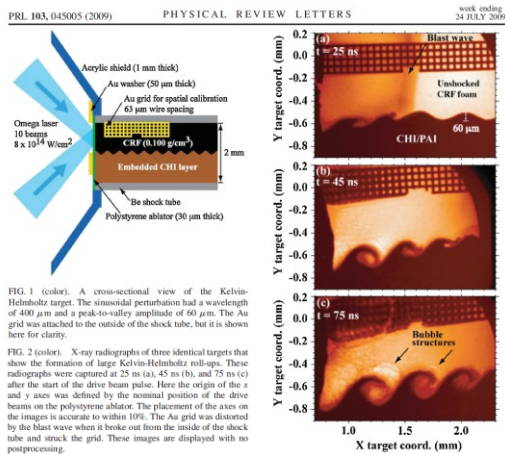
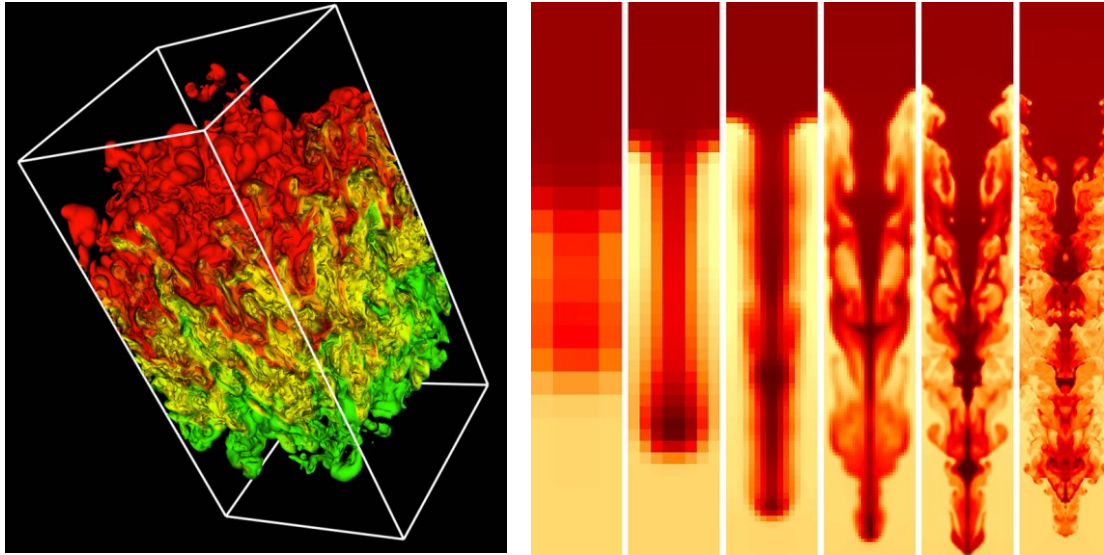
このような具体的研究戦略と組織形成の青写真を文科省に示すことを提案します。大切なことは、教員の一人一人が「何がやりたいか」を明確にすること。個性なくして学術は発展しません。

1. 圧縮性流体乱流の研究

レーザー核融合研究で一番悩まされたのは、球対称に核融合燃料球を爆縮しようとしても、密度の海面で流体不安定性が生じ、圧縮性流体乱流という学問を開拓しないと実験データが解析できなかつたことである。我が国では非圧縮性乱流は多数の研究者が主にスパコンを用いて研究してきた歴史がある。ところが、圧縮性乱流では渦度方程式で $\text{div}(\mathbf{V})$ の項や、Baloclinic な渦の源が入り、複雑になる。実際、レーザー加熱で生じる強い衝撃波と乱流混合領域との相互作用などは、流体力学の新たな物理課題として研究される必要がある。圧縮性と密度の不均一が入ることより、3次元でも流体不安定の乱流への遷移は逆カス

ケードとなり、非圧縮性乱流の場合の 3 次元でのカスケードと全く逆になる。充分発達した圧縮性乱流のスペクトルは小さい渦についてはコロモコゴロフ型のスペクトルに落ち着くのだろうか。ここでは密度不均一界面がフラクタル構造を取るため、かなり特異な乱流になる可能性がある。

衝撃波シンポジウム(2012) <http://dd-plus.net/jssw-h24/index.html>
 International Workshop on the Physics of Compressible Turbulent Mixing (2年ごと; 第13回)
<http://www.iwpctm.org/iwpctm13/index.php>

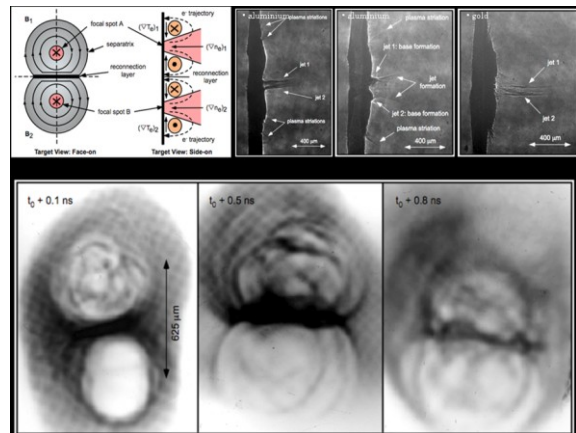
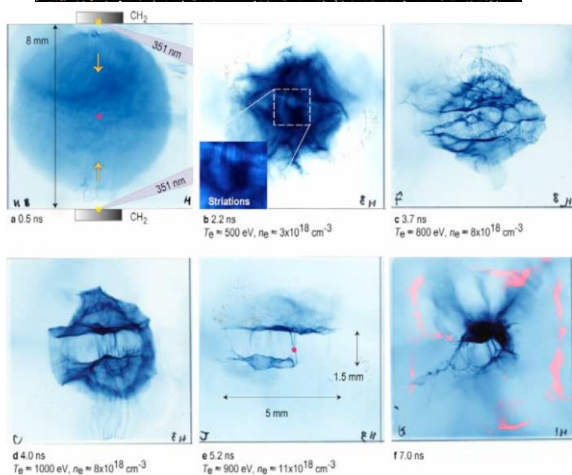
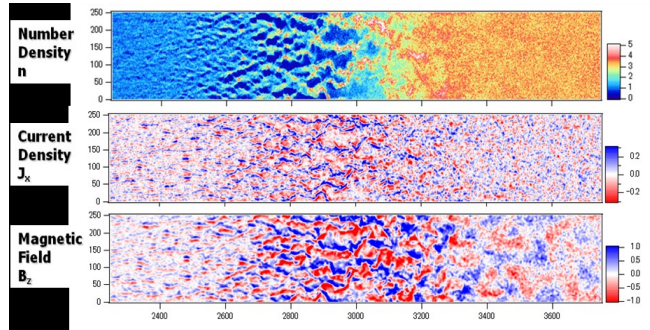


2. 高速気流の無衝突プラズマの非線形物理

密度が高いときは中性流体として上記のような振る舞いをするレーザー生成プラズマも、レーザー照射面から真空中へ膨張するプラズマは高温 (1keV 程度) であるが、比較的低密度 (10^{20} cm^{-3} 程度) で、かつ、高速流 (10^8 cm/s 程度) である。流れのあるプラズマの物理は比較的新しい課題で、特に、このような

高速流の対交流による、磁気不安定性の発生から、その非線形な逆カスケード状態、最終的に、乱流的磁場構造の特徴的サイズがイオンのラーモア半径程度になると、衝撃波構造が現れる。これは無衝突衝撃波と呼ばれ、非線形プラズマ物理の代表的な研究課題である。同時に、宇宙空間で起こっている衝撃波はほとんどが高マッハ数の無衝突衝撃波である。しかし、高マッハ数の実験は難しく、レーザーを用いた実験が唯一可能である。この研究はプラズマの自己構造形成という話題につながるにとどまらず、宇宙物理学で宇宙線の研究が始まって 100 年経ても結論を得ない、荷電粒子の加速機構と密接につながった、極めて挑戦的な課題である。

HED Laboratory Astrophysics (9th) <http://www.hedla2012.org/>
 Laboratory Astrophysics Division, AAS: <http://lad.aas.org/>
 Experimental Laboratory Astrophysics; <http://www.chem.hawaii.edu/>



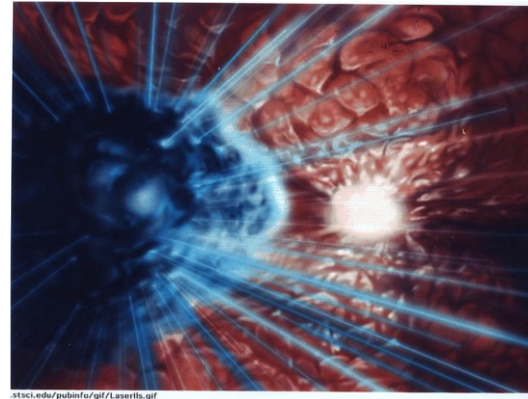
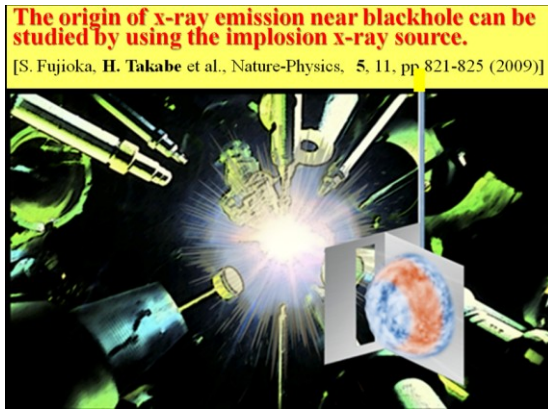
3. 非平衡原子過程の物理学

大出力の複数ビームのレーザーで球対称爆縮を行うと、輻射温度にして 1keV を越える熱輻射源を実験室に生成することができる。このような超高温の熱輻射源は宇宙ではブラックホールの周辺などしか見られない。このような輻射の下で宇宙に普遍的に存在する鉄原子が X 線により電離する様子などは、原子物理学の中で全く新しい実験である。理論的にも確立したモデルが存在しない。強輻射場の中での多電子原子物理は原子物理学、原子過程に新しい研究の芽を

花開かせることが期待できる。同時に、宇宙の神秘的な世界を実験的に再現するという、挑戦的な実験施設となる。そこでは、このような極限状態でなくては発現しないような、X線レーザー現象が隠されているかもしれない。本当は宇宙の果てからコヒーレントなX線が地球をめがけて太古の昔から放射され続けているのかもしれない。

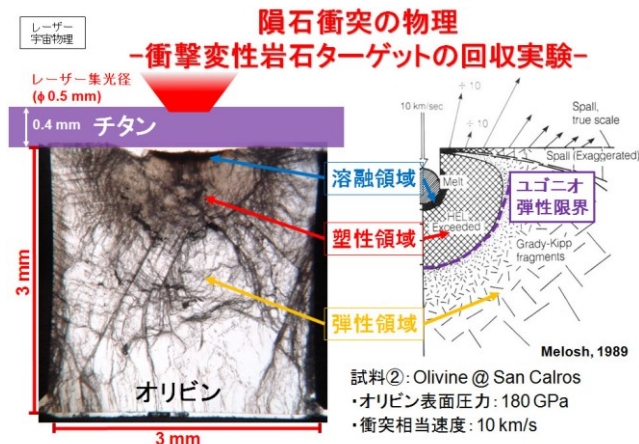
Radiative Properties of Hot Dense matter (15th)

<http://www-conf.slac.stanford.edu/rphdm/2012/purpose.html>



4. 隕石衝突の物理

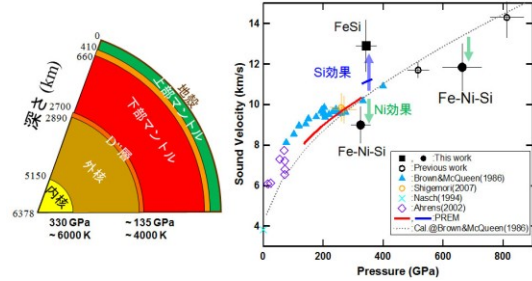
地球大気がまだ十分でなかった頃、巨大な隕石が地球に到来しては地表に衝突し、砂塵を巻き上げ、諸々の複雑な化学反応が起こった。その化学反応で生じた原子や分子が広い領域に舞い上がり、さらに化学反応を起こし、今日の生命の起源につながったとも考えられている。では、隕石はどの程度の速度で衝突するか。地球の脱出速度の数倍と言われており、20–30km/s で衝突した。実験的には伝統的にガス銃で模擬隕石を加速し実験を行ってきたが、速度が足りない。そこで、高強度レーザーの登場となった。レーザー加熱でロケット状に模擬隕石を加速することで上記の速度を再現できる。そして、巻き上げる砂塵を回収することで、太古にどのような元素が合成され、それが、生命の起源や恐竜の絶滅などとどうつながるか、壮大な地球の進化のシナリオが実験室にパノラマのように展開される。



5. 地球内部物理

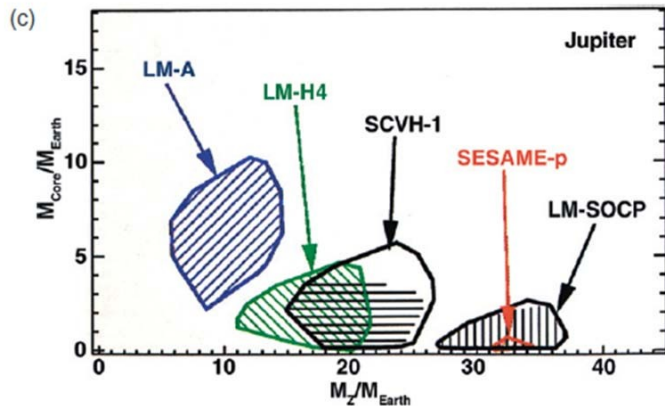
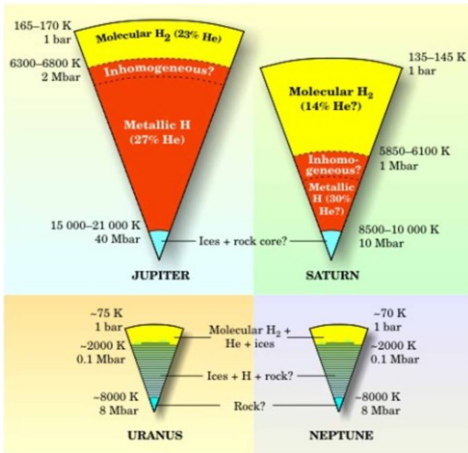
宇宙開拓が進んでも身近なところで謎に包まれているのは深海の世界と地球の内部である。地球が薄っぺらいな地表とマントル、対流層、鉄を主体とする

コアからなっていることは地震波の解析や理論的に予測されている。しかし、地球中心の圧力は1千万気圧にも達すると考えられており、そのような超高压下で、鉄の状態方程式や物性がどの様になっているかは理論の域をでない。強結合状態の鉄の物理は量子シミュレーションなど異なる手法で研究されているが、相転移図が複雑で、研究途上にある。大型のレーザーを超高压発生装置として利用することで実験的研究が可能となる。現状では技術的に、衝撃波を利用することから、地球内部のような比較的「低温」の圧縮に課題が残る。これはレーザー波形の精密制御により克服できることは予測されるが、技術的進歩とイノベーションを必要とする。技術的にもチャレンジングな課題を含む。



6. 巨大惑星内部の物理

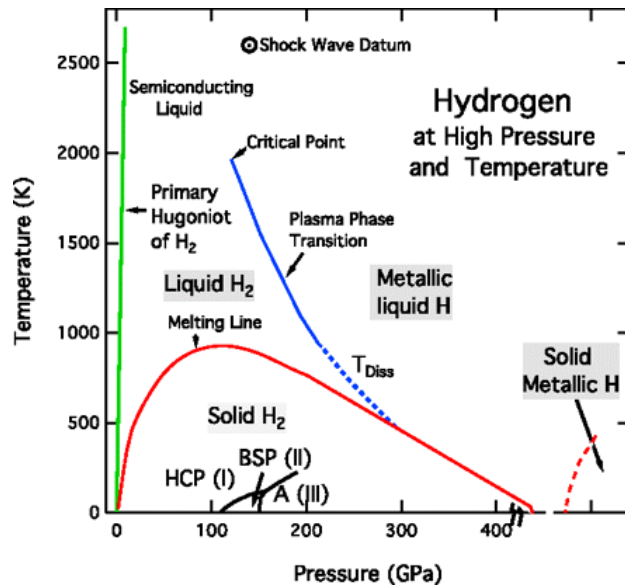
木星に代表される巨大惑星（太陽質量の 1/10 以下）。太陽のように中心で核融合反応が起こるには重力が弱すぎるが、宇宙のバリオンの質量比として無視できない巨大惑星。その内部構造は理論的域を出ない。幸い、人工衛星による土星の質量や球からの変形度など詳細な観測データは得られているが、それらを説明できる理論が存在しない。当然、実験的に6千万気圧程度で2万度程度の中心温度に匹敵する状態をレーザーで実現できれば、研究は飛躍的に進展する。これは木星の物理という範疇を超えて、近年、天文学の最もホットな話題である「太陽系外惑星」の物理、さらには、太陽系誕生のミステリーに科学的な根拠を提供する重要なテーマである。地球内部の物理と同様、衝撃波圧縮ではなく弱い衝撃波を何段にも生成しながら低エントロピー圧縮を実現する必要があり、技術陣と物理研究者の連携が求められる。



7. 超高压物性研究

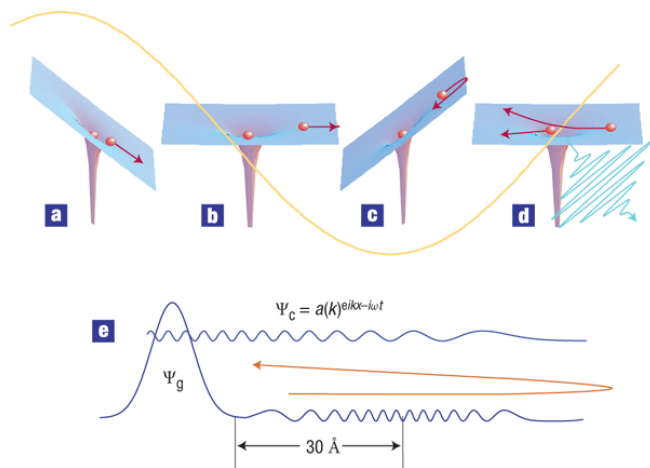
高強度レーザーが超高压発生装置であると位置づければ、これを道具に、ダイヤモンドアンビルなど従来の方法では到達できなかった圧力状態の凝縮系の

物理に迫ることが出来る。現在、強磁性や高温超伝導などの物性研究では、温度だけでなく圧力による相転移が重要な課題となっている。実際、木星内部は超高压高密度の水素状態にあると考えられているが、これが金属水素であるかどうかは理論があまりにもたくさんあり、判定不能である。2003年のノーベル物理学賞受賞者の Ginzburg 博士は 87 才にして国際会議において「私は自分の目の黒い内に水素が金属に転移するか実験結果を見たい」と、我々に迫った。高強度レーザーは、近い将来、物性研究者が目指したい高压領域の実験に希望を照らす装置です。同時に、工学的観点からは隕石衝突の超高压によるダイヤモンド生成からイメージされるように、未知の新材料開発を牽引する可能性を秘めています。多角的な視点から超高压利用を今後、学際的に議論していく必要がある。いや、議論を待っている状態なのです。



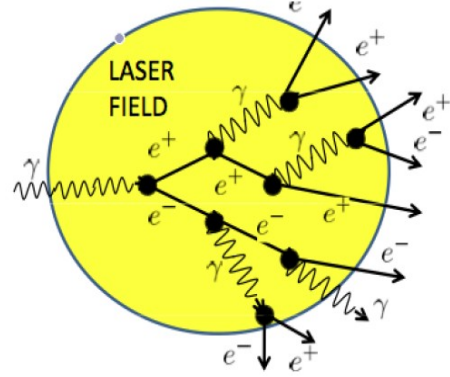
8. 超強度場の下での非摂動原子物理学

上に触れた「高強度」はエネルギー流速にして 10^{14} W/cm^2 程度で、レーザー電場も 10 V/\AA 程度で原子にとっても電子の核との結合力に比べればまだ摂動の範囲に収まる解析が可能であった。そして、生成されるプラズマもどちらかというと「プラズマ物理」というより「流体力学」的な方程式で記述できる世界であった。ところが、90年代に登場した CPA 技術はレーザーの強度を4桁近く向上させ、電場の強さは 1000 V/\AA にまで達しました。このような超強度場の下での原子物理はレーザー場の中での電子の振る舞いが0次の現象で、原子核による力は摂動として扱う必要がある。20世紀を支配してきた原子物理学のパラダイムを根底から覆す物理研究を科学者に突きつけたのです。いやむしろ、この挑戦的な課題が現れたことで欲求不満であった優秀な原子物理学者は活力を取り戻したと云うことが出来ます。新しい量子力学のモデル、解析手法が求められています。近い将来、量子力学の教科書の摂動論の章は書き直されるでしょう。



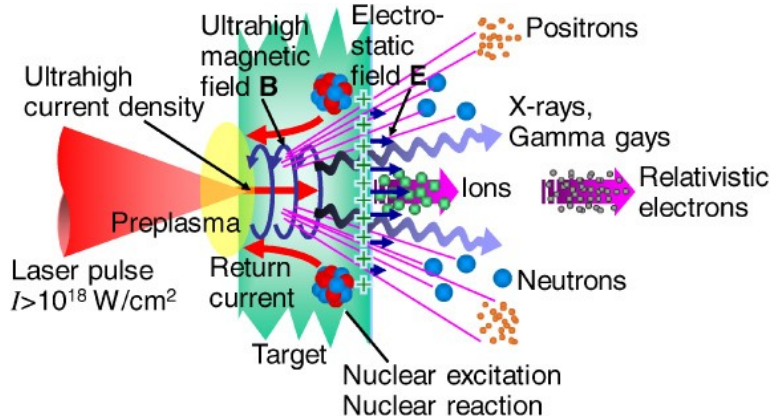
9. 非線形量子電気力学

超高強度レーザーの集光点では光量子密度が極端に高いため、多光子吸収が支配的となる量子電気力学現象が観測される。先行的研究は米国の加速器 SLAC に超高強度レーザーを持ち込んだ U of Rochester のチームが行っている。SLAC にレーザーを照射し、電子・陽電子の真空中での対生成が起こる少し低いエネルギーのガンマ線を発生させる。そこに、超高強度レーザーを集光すると、ガンマ線と、多数のレーザー光子が相互作用し、ポジトロンが生成する。その閾値などははっきりと観測でき、理論的解析もなされている。この研究の当事者と話したが、さらに研究を進めようと申請書を出したが、どういう訳か採択され無かった、とのこと。この研究など、さらに深めていくことがレーザーエネルギー学の役割と考えている。



10. 相対論的プラズマ物理学

超高強度場により原子からはぎ取られ、加速される電子群は、レーザー電場による振動エネルギーだけでも 10MeV を越える。これは、電子の静止エネルギー 0.5MeV を遙かに超える、相対論的電子である。相対論的な電子で満たされるプラズマでは相対論的自己収束など新たな非線形現象が発現。同時に、原子核との相互作用も発生する。レーザーの集光エネルギー流束が極端に高いことから、相対論的電子の輸送現象では非線形プラズマ物理が大きな影響を与え、同時に、ギガ・ガウスを越える超強磁場が生成される。宇宙では高エネルギー天文学の分野で常に相対論的プラズマ物理の理論解析が行われているが、場合により、自己矛盾した理論であろうと、観測が説明できればそれ以上研究を進める人はいなくなり、常に喉に小骨の刺さった状態で研究を進めてきている例がある。レーザーによる相対論的プラズマは、このような理論のベースを模擬実験により解決するデータを提供するなど、多角的に眺めていく必要がある。



11. 超高強度レーザー加速

CERN の LHC に代表される加速器は、導波管を加速装置として何段にも継ぎ足して利用するため、装置の絶縁破壊限界で、生成できる加速電場強度が制限される。それなら、最初から絶縁破壊しているプラズマ中に加速電場を生成

すれば良いではないかという発想が、Tajima&Dawson のレーザー加速の提案である。当初は 2 波長のレーザーのビート波による非線形力を利用して電子プラズマ波を生成しようとしたが、大振幅の波自体が己の非線形生により崩壊するなど、困難にぶつかった。しかし、超高強度かつ長短パルスのレーザーの登場により、wake-field 加速の方法が提案され、現在、LBNL の Leemane 達は 1cm のキャピラリーでプラズマを作り、電子を 1GeV まで加速している。つまり、1GV/cm の電場がプラズマ中に長短パルスレーザーの非線形光力で生成できることを実証した。Higgs 粒子を越えてエネルギーの高い領域を目指そうとすると、TeV を遙かに超える加速器が必要になるが、現状の加速器では困難であることは皆の一致した意見である。そうすると、20 年先、50 年先を展望して、エネルギーを 3 桁程度上げようと思えば、現在可能性があるのはレーザー加速の多段加速しかない。加速の物理自身も興味深い学術であるが、その将来展望はレーザーと加速器の急速な接近を求めている。また、現在のレーザー加速の技術の延長で 1000TeV の線形加速器がどうコンパクトに設計可能かなどは評価に値する。

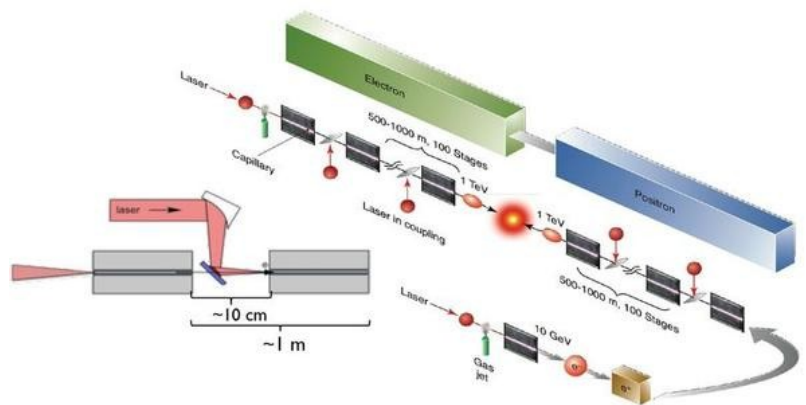
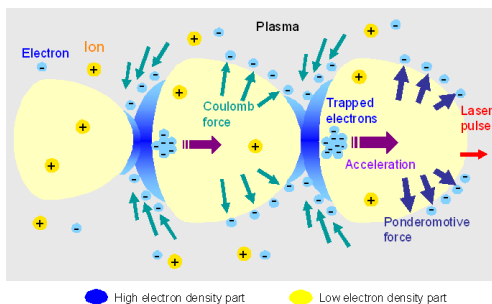
15th Advanced Accelerator Concepts Workshop (AAC 2012):
<http://w3fusion.ph.utexas.edu/ifs/aac2012/>

Laser and Plasma Accelerations Workshop: <http://cfp.ist.utl.pt/lpaw09/>

IUPAP WG1: <http://www.iupap.org/wg/wg1/>

IUPAP WG7: ICUIL:

<http://www.iupap.org/wg/wg7>



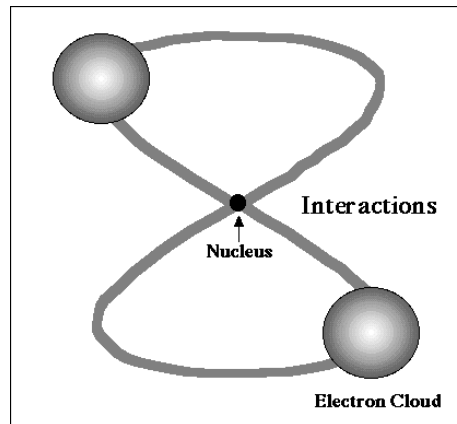
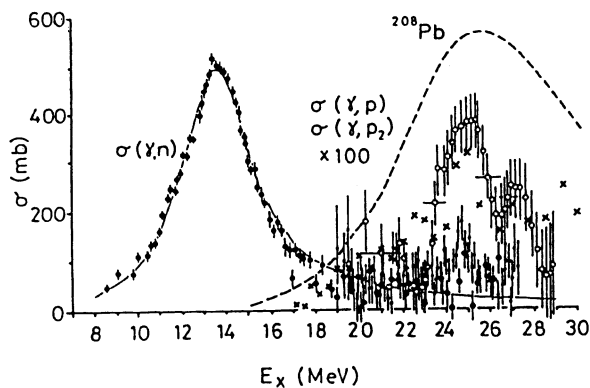
12. 超高強度レーザー核物理

振動エネルギーが 10 MeV にも達するなら、当然、核励起などレーザーで核物理を研究する、という発想が自然と生まれる。理学的研究だけでなく、「レーザーで、原子炉などで生まれる長寿命核廃棄物を処理できないか」という、応用も計算してみたくなる。うまい具合にこのような核は 10 MeV 近辺に Gamov-Teller の巨大共鳴の反応断面積ピークを持つ。超高強度レーザーで 10MeV 近い電子群が効率よく生成されたとして、核と相互作用する過程は二通りある。まず、電子の波動関数が 1fm 程度しかない核と相互作用して、直接、核にエネルギーを与え励起する過程。この際は専門用語で Virtual photon を介した相互作用をします。第 2 の過程は、電子が核の電場と相互作用し、制動輻射を放出する。放出されたガンマ線が核と直接相互作用し、核励起などを引き

起こす。一般に、前者の反応断面積は後者に比べ 2 桁程度低いことが知られている。後者は 2 段階の過程を経るが断面積は大きく、うまく、相対論的電子のエネルギーをガンマ線に変換する方法を見いだせば、電子対生成による電子陽電子プラズマの生成など高エネルギー天文学の模擬実験をすることが出来る。

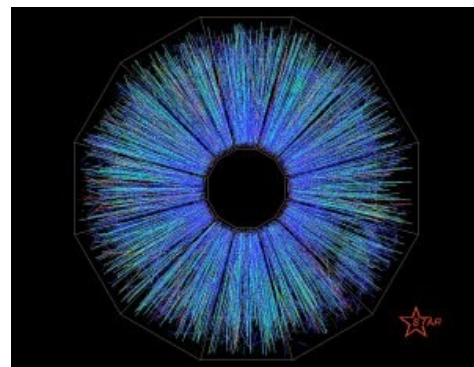
Hadron and Nuclear Physics 09: <http://www.rcnp.osaka-u.ac.jp/~hnp09/>

The 1st Conference on Laser and Accelerator Neutron Sources and Applications: <http://www.ile.osaka-u.ac.jp/lansa/>



13. 超高強度レーザー素粒子物理

超高強度レーザーで、Shwinger limit に達せずとも、真空を崩壊させ、相対論的電子陽電子プラズマの生成やその線形、非線型プラズマ物理学の研究の道が開けつつある。レーザーで可能な世界は Non-linear QED であり、素粒子で現在研究に最先端にある Nonlinear QCD ではない。しかし、前者を実験的に研究し、その数理モデルを確認/検証していくことは、数理モデルでしか研究することのできない後者の世界へのより正確な数理モデルの誕生を助ける。クォーク・グルオン・プラズマの模擬実験がレーザーで、コンパクトな世界で実現する可能性がある。同時に、相対論的反物質プラズマは高エネルギー天文学の長年の課題である。ガンマ線バーストに代表される宇宙最大の爆発現象を実験室に模擬することは新学術分野としてのインパクトは極めて大きい。



High Field Physics: <http://atfweb.kek.jp/pif2010/index.html>

<http://www.izest.polytechnique.edu/jsp/accueil.jsp?LANGUE=1>

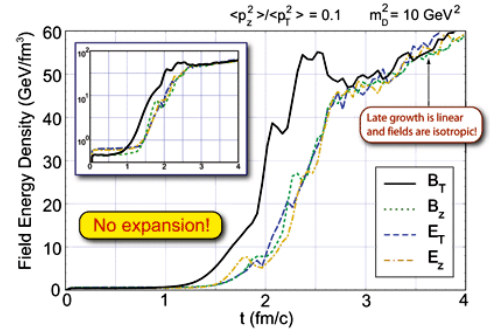
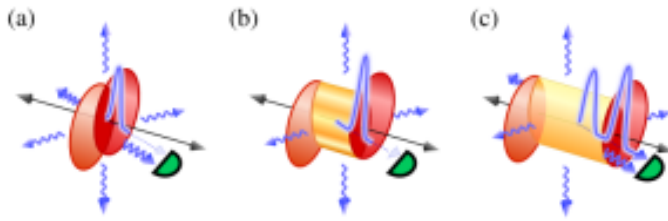
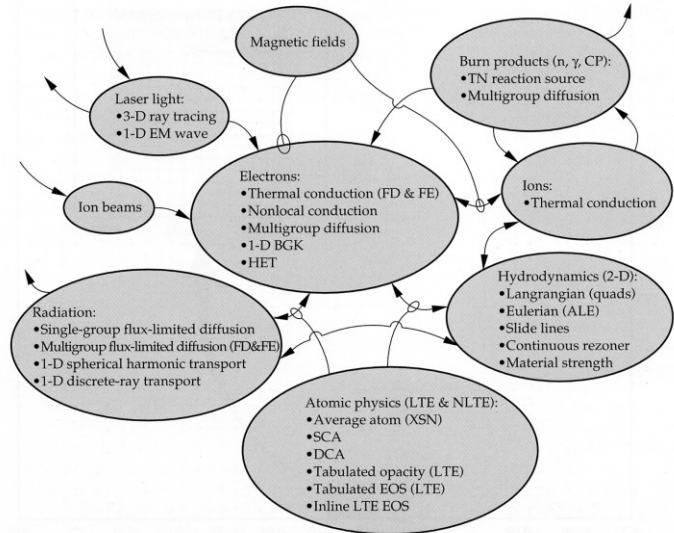
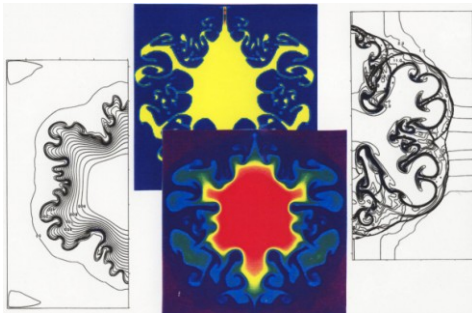
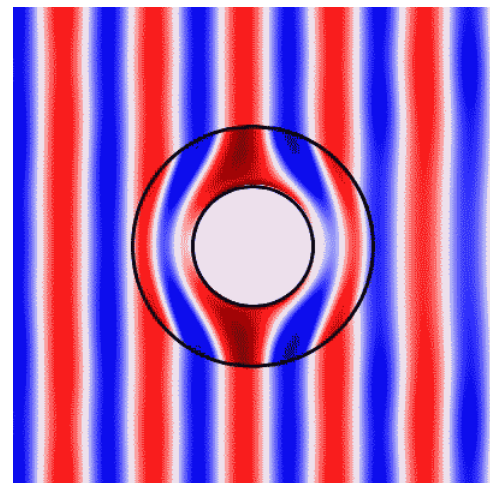
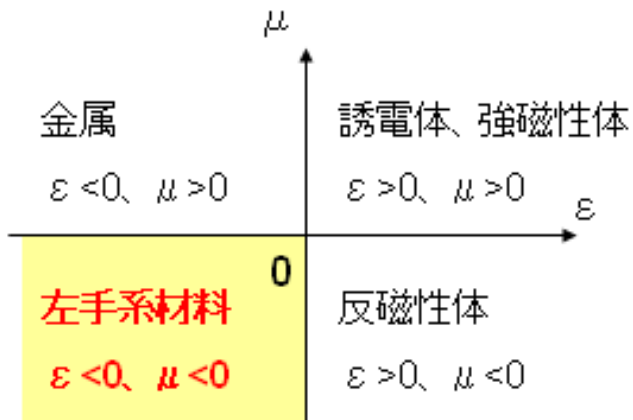


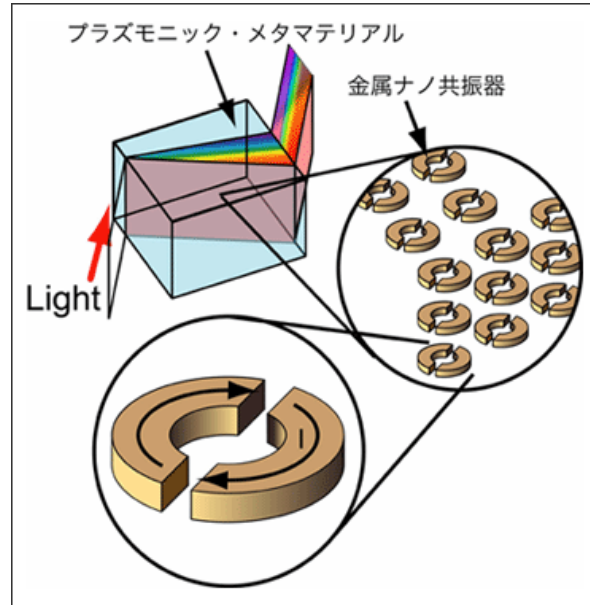
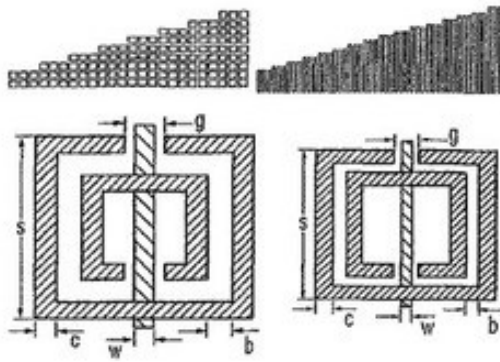
FIG. 2: Plot of typical energy densities observed in non-expanding three-dimensional hard-loop simulation of the soft-fields generated in an anisotropic plasma with $\xi = 10$. Shows transition from exponential growth with preference for transverse magnetic fields to linear isotropic growth. Inset shows same data on logarithmic vertical axis. To obtain physical units we have used $\alpha_s = 0.3$ and $Q_s = 1.5 \text{ GeV}$.

14. レーザーエネルギー学計算物理学



15. メタマテリアル





付録：関連国際会議（総合）

Laser Plasma General Conference:

IFSA
ECLIM

APS

EPS

Anomalous Absorption Conference