

レーザー爆縮で生成したミニ・コンパクト星による X 線天文学



高部 英明・藤岡 慎介

〈大阪大学レーザーエネルギー学研究中心 〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-6〉

高部

藤岡

e-mail: takabe@ile.osaka-u.ac.jp

核融合研究のために開発された大型・高強度レーザーを用いた「実験室宇宙物理」のプロジェクトを阪大で推進している。実験成果が出始めてきたので、その一例を紹介する。直径 30 cm の 12 本のレーザーを、直径 0.5 mm のプラスチック球殻の表面に集光すると、表面で数十万気圧の圧力が発生し、球殻内部は衝撃波で球の中心に加速される。速度は 300 km/s 程度で、中心で衝突し、温度が 1 keV 程度、柱密度が 0.1 g/cm² のコアができる。コアが X 線に対しても光学的に厚いため、keV 領域の熱輻射源となる。これを X 線連星のコンパクト星と見なし、伴星表面の光電離プラズマの模擬実験を行った。実験では 0.5 keV のプランク分布が得られ、これを、1.2 mm 離れて置いたケイ素平板に照射した。ケイ素平板に弱いレーザーを照射し、密度が 10²⁰ cm⁻³、温度が 30 eV の希薄プラズマにしておくと、X 線光電離で He-like ケイ素の共鳴線などが強く発光することを実験で確認。これを Chandra が観測した CYGNUS X-3、VELA X-1 からのスペクトルと比較し、良い一致を見た。しかし、共鳴線の低周波側にできる「コブ」状の輝線については、Chandra の解析で言われている禁制線ではなく、3 本の衛星線のブレンドしたコブであることが理論的に判明した。

1. はじめに

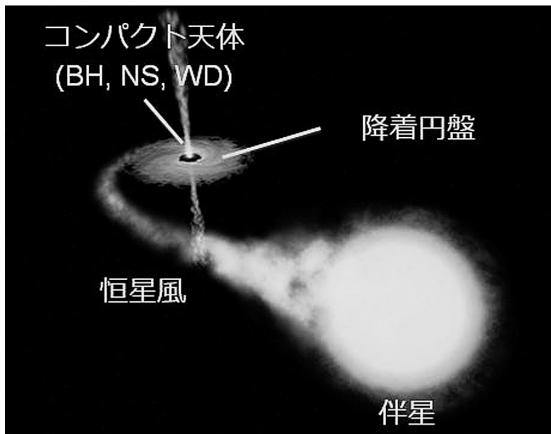
天文学の某先輩から久しぶりに高部にメールがきたので、折り返し電話した。大学を定年退職し、現在、大きな団地の管理組合理事長を仰せつかり、2年目に突入したと。そして社会勉強を通して「高部さん、話せばわかる、と言うのは全くの嘘ですね。この1年、つくづく実感させられました」と、嘆いていた。「某さん、貴方は幸せな人生を送ってきたのですね。私など10年頃前から、話せばわかるなんて全くの嘘、40歳程度を過ぎた人間同士、自分の価値観が根っこにあるから、2時間3時間と話し合っ、理解し合えたと感激しても、2週間経って同じ議論をしたら、オール・リセットで最初から同じ議論。センターの研究方針でそんな経験を痛いほどした私には、貴方は恵ま

れた温室で過ごせたらやましい方としか思えない」と話した。

そもそも学術分野というのは保守的で新しいものを拒絶してきた歴史がある。かのプランク先生も古典物理学を集大成したが、「心ならずも量子力学の幕開けをすることになった」と歴史の皮肉としてよく語られる。このような書き出しにしたのは、学生時代から天文学一筋という読者の方に本記事を今の価値観にとらわれず、頭を空っぽにして読んで欲しいからであり、読後感を頭の隅に少しでもいいから残して欲しいからなのです。

X 線連星系などで観測されている光電離非平衡プラズマの実験室模擬実験を行ったので紹介したい。Cyg X-1 に代表されるような、ブラックホールと伴星からなる二重連星の場合、ブラックホールの周りには伴星表面の物質が降着してい

連星系模式図



実験室内模式図



図1 X線連星のイメージ図(左)と、その実験室模擬実験のイメージ図(右)。大型レーザーで爆縮し、放射温度が0.5 keVのプランク分布を160 psの間、実験室内に生成できた。

る。降着物質が得る重力エネルギーは、異常粘性により熱エネルギーに変換され、温度が 10^7 K (keV) 領域のプラズマがブラックホールを取り巻くことになる(図1左)。そのエネルギーの一部はブラックホールに吸い込まれるが、同時に熱放射温度(T_r)がkeV領域の放射を宇宙空間に放つ¹⁾。これが宇宙の明るいX線源として歴史上初めてロッシらにより観測されたX線天体である[参考文献2の第6章]。

ブラックホールだけでなく、中性子星、白色矮星などのコンパクト星を伴う連星系で同じようなX線源が多数観測されている。その中で、Cyg X-3はブラックホール候補天体が伴星を伴うと考えられており、ASCAやChandraなどのX線観測衛星から得られたX線スペクトルには図2のようにコンパクト星からの連続的なX線と、そのX線で部分電離したケイ素、硫黄、アルゴンなどのkeV領域の輝線が同時に観測されている。これらの輝線は温度が10 eV程度の伴星表面の原子がX線で電離し、H-likeやHe-likeになったケイ素などから放出されていると解釈されている³⁾。

中性子星のX線連星VELA X-1についてもChandra衛星が観測したX線スペクトルの詳細

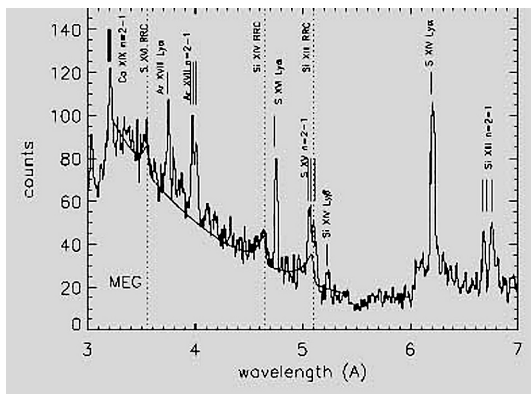


図2 X線観測衛星ChandraがとらえたCyg X-3から放射されるX線スペクトル。Co, S, Ar, Siなどの輝線はコンパクト星からの連続X線で光り電離した伴星表面から放射されている³⁾。

な解析が渡辺氏らによりなされている⁴⁾。この論文ではKallmanらが開発してきたX-STARコードというたいへん複雑な光電離を含む原子過程コードを用いて観測と計算結果の比較を行っている。VELA X-1のスペクトルについてはたとえばSiXIII (He-like ケイ素) からの6.6-6.8 Å (1.80-1.88 keV) 近辺の二つの輝線について共鳴線と禁制線が同じ程度の強度で放出されていると結論されている⁵⁾。

天文分野では、観測データと複雑なコードの結果が一致すれば、物理的解釈を添えて論文が書ける。すばらしい(うらやましい)と思う。しかし、実験室プラズマの場合、必ず「そのコードの計算が正しいか、どのように正しいと確認されているのか」と質問される。Post らの「岐路に立つ計算科学」という記事⁶⁾は極めて啓示的で、19, 20 世紀の 200 年にわたる「吊り橋」の土木工学発展の歴史を例に挙げ、技術の進歩を 4 段階に分類して比較しながら、計算科学とはどうあるべきかを分析している。シミュレーション研究者・利用者には是非、一読して考えていただきたい。

計算科学が生き残るかどうかはその「予言性」の保証にある。彼らは米国の核兵器研究所 (Livermore, Los Alamos, Sandia) で競争しながら独立に開発されてきた六つの核爆発物理統合型大規模コード開発の組織、投資、管理など多角的な分析を行い、失敗したプロジェクトの原因などを研究している。シミュレーション科学で一番大切なこととして彼らは

1. 検証 (Verification)
2. 確認 (Validation)

の 2 要素が不可欠であると述べている。「検証」とは、シミュレーションすべき数理モデルが正しくプログラムされているかという当然の作業である。そして、「確認」は物理現象の模擬実験などのデータをコードが再現できるかである。シミュレーションがごく簡単な場合、数理モデルに解析解が複数あるなら、それらが再現できるかという作業で置き換えることができるであろう。ところが、宇宙の極限状態の複雑な物理など解析解もなければ模擬実験のデータもない。信頼できる実験データを再現できるか「確認」がされていないコードの結果に説得力があるだろうか。

極限状態として、Post らの記事には核弾頭の性能維持管理を地下核実験なしで行うという米国の「物理を基礎とした核兵器の維持管理」(略称 SBSS) の具体例が紹介されている。1996 年の

CTBT (包括的核実験禁止条約) 批准で、一切の核実験ができなくなった。しかし、米国は核兵器の性能と信頼性を維持し続けたい。そこで、4,000 億円かけて NIF (National Ignition Facility)⁷⁾ という巨大レーザーをリバモア研究所に建設した。実験室内でのミニ水爆実験で、核兵器のコードの信頼性を確保し予言性(設計性能)を維持する計画である。詳しくはわが国の科学政策のあり方の中で説明している高部の記事⁸⁾を読んでいただきたい。

しかし、同時に、核兵器研究所であるリバモア研究所は、冷戦の終結、核兵器の政治的役割の低下など、ソ連崩壊後の 21 世紀にいかに残るか模索している。08 年 4 月の米国物理学会年会 (at St. Louis) の招待講演で NIF の総責任者の Ed Moses は「挑戦的であることは覚悟のうえで、LHC をもつ CERN のように、リバモア研を、巨大レーザー NIF を共同利用する基礎科学の国際拠点にしていきたい。そのための良い出発点が実験室宇宙物理である」と語った。

さて、話を戻そう。私たちはこのような keV からサブ keV 領域の熱放射に近い放射源で電離された低温度 (30 eV 程度) の希薄プラズマではどのような電離状態になっているかを研究するため、以下に説明するような X 線連星系の実験室模擬実験を行った。放射温度が keV 領域の熱放射を実験室で生成するなど不可能であると考えられてきたので、これが初めての実験である。X-STAR コードなどで研究する域を出ず、全く手つかずの非平衡プラズマの実験が可能になった。レーザー核融合研究の中心物理である「爆縮」を利用すれば、短時間ではあるがプランク分布に極めて近い keV 領域の放射源を実験室に生成できる。象徴的に言うなら「実験室にミニ・コンパクト星が出現」である。

本書では、第 2 節に高強度大型レーザーを用いた熱放射 X 線源の生成方法を紹介、第 3 節ではミニ・コンパクト星による低温ケイ素プラズマの

光電離実験とその結果を説明し、Cyg X-3, VELA X-1 の観測スペクトルとの比較、理論解析の結果を紹介する。第4節で大型高強度レーザーを用いた「実験室宇宙物理」の現状と今後の展望を紹介する。なお、天文分野では短い空間・時間の単位に不慣れと思う。以下、 $ns=10^{-9}$ s, $ps=10^{-12}$ s, $\mu m=10^{-4}$ cm である。

2. 輻射温度が keV 領域に至る実験室での X 線源

普仏戦争(1870-71)に勝利したプロシアは、製鉄など重工業を盛んにし、富国強兵を図った。ところが、溶鉱炉の内部の温度の制御のため、溶鉱炉内からの輻射で温度を測ろうとして、熱平衡にある物質はどのようなスペクトルの光を出すかという問題に直面した。ウイーンは有名な「ウイーンの壺」を提案し、壺の中で光は熱平衡となり、今日で言う「プランク分布」が観測されると提案した。しかし、ウイーンもレイリー卿も理論的に説明できず、プランクの学生が「先生、極限で両方の式になるように分母に1を足すと実験に合います」と提案した。プランク先生は驚くとともに、なぜ、「1」が必要かその物理を考えた。その結果、意に反し、古典物理を否定する「光量子」という概念に行き着いた。これが1900年の12月、物理怒濤の20世紀の幕開けの前夜であった。

レーザーの発明で高温のウイーンの壺を作ることができるようになった。それが「フォーラム」と呼ばれる図3の構造である。NIF実験では、図3の上下の小さい穴から96本ずつ、金でできた壺の内壁にレーザーを当てる。すると、レーザーは内壁面でほぼ完全に吸収され、金の内壁がプラズマ化し、数百 eV の温度になる。金は X 線に対しても光学的に厚いので金の壺の内部は輻射温度が 100 eV の桁の熱輻射で満たされる。この熱輻射で中心の核燃料表面を加熱し、その圧力で燃料球を爆縮し、中心で核融合反応を瞬時に起こす。

フォーラムの横に小さな穴を開けておくと、そ

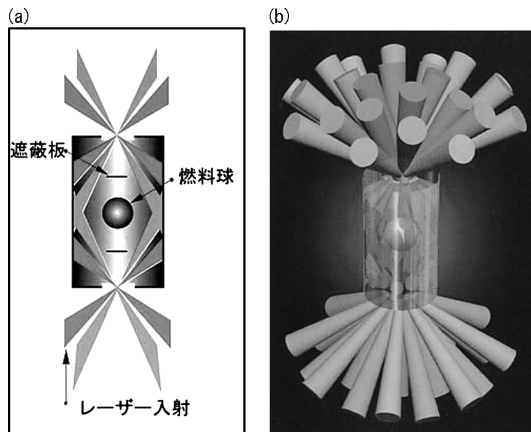


図3 入射レーザー・エネルギーが金の筒の中で熱 X 線に変換され、プランク分布に近い X 線で筒の内部が満たされる。このような構造を「フォーラム」と呼んでいる。中央に核融合燃料球を置くと、筒の内部を満たす X 線による爆縮でミニ核爆発を引き起こすことができる。右は、NIF 装置で上下から 96 本ずつ、レーザーを照射するイメージ図。

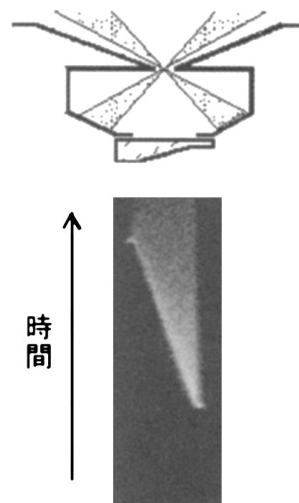


図4 図の上の黒い太線が「フォーラム」。レーザー入射口の反対側に、裏面が斜で、厚さが空間的に変わる物質を置く。裏面に衝撃波が到着した時間に加熱され光り始める現象を時間・空間分解すると、下図のようなストリーク像が得られる。これで、固体中の衝撃波速度などがわかる。高密度物質の状態方程式研究などに利用される。

こから熱輻射が出てくる。これを利用して、熱輻射による衝撃波伝播を観測すると図4のように「Shock Break-Out」実験ができる（高密度物質の状態方程式研究に使う）。また、内部に鉄など薄片を置き、輻射で加熱し、中心球のない図3の左右に穴を開けて、他のレーザーで発生したX線を透過させることで高密度、高温度の物質の吸収スペクトルが得られる。このような“Opacity Experiment”⁹⁾は1980年代から行われており、その結果と比較することで改良されてきたOPALコードは一躍、宇宙物理の世界でも名声を博するに至った。

NIFのような巨大なレーザーを用いても、ホーラムで実験的に達成できる輻射温度は300 eV程度までである。阪大のレーザーでは $T_r=100$ eVが限界¹⁰⁾。ところが、 $T_r=1$ keVとなると図3では無理。加熱に必要なレーザー強度は、ステファンボルツマンの関係式に従って輻射温度の4乗に比例して増大する。したがって、ホーラムを用いてX線天体の模擬に必要な1 keVのウイーンの壺を作ることは到底現実的ではなく、新しいアイデアが必要である。そこで、藤岡が爆縮プラズマの利用を考えた¹¹⁾。

肉厚6 μm で直径500 μm のプラスチック球殻の表面に12本のレーザーを照射。レーザーのエネルギーは4 kJでパルス幅1.2 ns。プラスチックの内壁部分は速度が $V=250 \mu\text{m}/1.2 \text{ ns}=200 \text{ km/s}$ 程度で球中心で衝突し、運動エネルギーが熱エネルギーに変わる。すると中心に温度が0.5 keVで柱密度が0.1 g/cm^2 程度のX線に対して光学的に十分厚い球コアができる。コアは1億気圧にも達し、コアが音速で倍程度まで広がる約100 psの間、この温度が保たれる。

この爆縮球の横に図1右のように伴星を模したケイ素平板を置き、その表面を弱いレーザーで同時に加熱することで30 eV程度の希薄（密度は 10^{20} cm^{-3} ）ケイ素プラズマを作る。そこに、爆縮で発生した熱輻射を当てて、ケイ素から出てくる

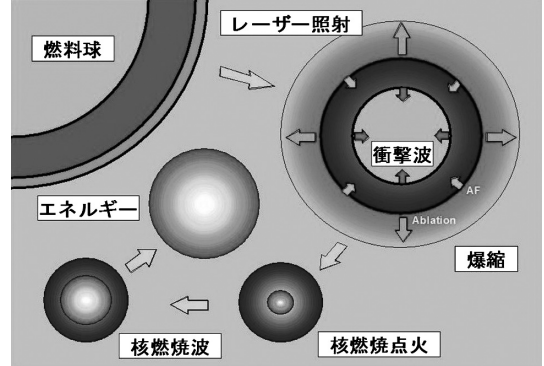


図5 レーザー爆縮の時間変化のイメージ図。核融合発電が可能になるには、燃料球の初期直径は5 mm程度で、プラスチックの球殻に重水素・三重水素の混合燃料を冷却固化し、その表面に、多数のレーザーを照射する必要がある。これを10 Hz程度で繰り返す必要がある。レーザー照射時、球殻表面は数十万気圧となり、その圧力で爆縮が起こる。中心で運動エネルギーを熱エネルギーに変換し、その温度が5千万度以上で、周りに比較的温度は低いが密度の高い、主燃料コアが形成されると、中心で核反応が爆発的に起こる。発生するアルファ粒子が周りの燃料を加熱し、核燃焼が急激に起こる。

X線を観測した。100 psとは短すぎる、と思われるかもしれないが重要な原子過程の特性時間を評価すると、どれもpsのオーダーであり問題はない。

3. 観測データと実験データの比較、理論解析

直径1.4 mの真空容器の中央にプラスチック球殻を、一番細い釣り糸で支え、その横に図1右のように熱輻射が照射されるケイ素の球を配置する。その球同士の間隔は1.2 mm。真空容器の12個の窓から直径30 cmのレーザーが12本、レンズで集光され、プラスチック球表面を覆うように照射される。その平均強度は $10^{15} \text{ W}/\text{cm}^2$ ($=10^{22} \text{ erg}/\text{cm}^2 \text{ s}$)である。レーザーの波長は0.53 μm 。す

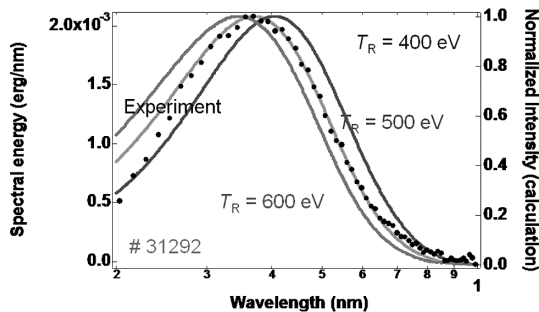


図6 図中、黒丸が実験で得られた爆縮プラズマからのX線スペクトル。同時に輻射温度が400, 500, 600 eVのプランク分布を示す。

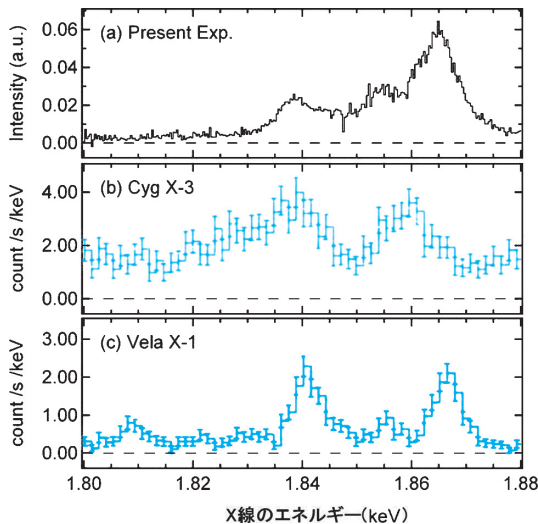


図7 (a)はレーザー実験で得られたケイ素のHe-like イオンからの放射スペクトル。 $h\nu = 1.865$ keVは共鳴線であり、その左に二つコブがある。1.855 keVにピークをもつのは異重項間遷移によるもの。そのさらに左1.84 keV近傍の山は、主に3本の衛星線の重なりによることが解析で判明した。(b)はCyg X-3からの放射。何らかの理由で赤方偏移している。(c)はVELA X-1の場合。実験のスペクトルとよく似ている。

ると、図5のイメージ図¹²⁾にあるように、レーザーが表面で吸収され、その圧力(数十万気圧)で生成プラズマがロケット噴射し、その反作用で球殻の固体は衝撃波で電離、内方に加速される。

このようなダイナミクスを爆縮(implosion)といい、超新星などの爆発(explosion)の逆過程。超新星で流体混合が起こると同様、爆縮でも流体混合が起こる。これが、高部の宇宙物理参画の原点であった¹³⁾。また、X線天文学の創始者ロッシ先生の原点でもある[参考文献2の第4章]。したがって、実験では爆縮されたコアは図5のような二重構造にならず、なべて均一な密度温度のコアになる。このコアからの放射スペクトルが図6である。 $T_r = 500$ eVのプランク分布に実験データはよく一致する。このような放射が160 ps続くことが計測でわかった。爆縮コアの半径が50 μm で、温度が500 eVのプランク分布をコア中心から950 μm 離れたケイ素プラズマに照射すると、「光電離パラメーター」 ξ は $\xi = L / (nR^2) \approx 10$ [erg cm/s]となり、光電離が十分起こることがわかる¹⁴⁾。もし、 $T_r = 1$ keVが実現できれば、 $\xi = 320$ となり、宇宙での最大値にも近づく。

この放射を固体のケイ素平板に照射してもkeV領域の放射は計測されない。これは固体ケイ素の熱容量が大きすぎるためである。また、爆縮からの熱放射なしで、ケイ素球に弱いレーザーを照射

して30 eV程度のプラズマを生成しても、keV領域のX線は観測されない。爆縮と低密度ケイ素プラズマが組み合わさると、500 eVの熱放射による光電離プラズマからのkeV領域の放射が観測される。プランク分布のピーク値は $h\nu = 2.822 T_r$ (=1.4 keV)であり、Li-like, He-likeの電離エネルギーはそれぞれ523 eV, 2.44 keVであることから、十分He-likeの輝線が測定されても良い。

Cyg X-3とVELA X-1のChandraのスペクトル観測データのうち、He-like Siからの共鳴線と、その横の輝線らしき構造に注目した。実験で得られたスペクトルと両観測の結果を図7に並べた。Cyg X-3では何らかの理由で赤方偏移している点に注意。実験結果が観測データをよく再現していることがわかる。ここで、 $h\nu = 1.863$ keVはHe-like ケイ素イオンの1s2p \rightarrow 1s²の共鳴遷移によ

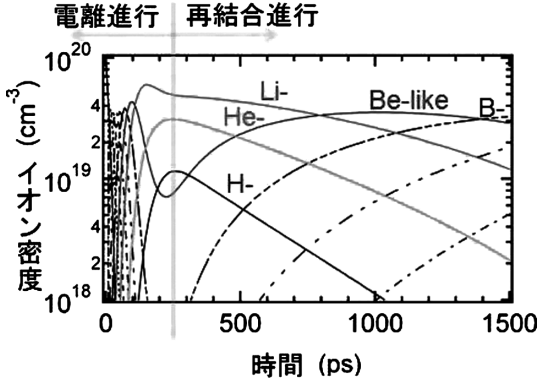


図8 500 eV の放射温度の X 線を初期温度 30 eV のケイ素に照射したときの電離状態の時間変化の数値計算結果. 放射のピークは $t=150$ ps にあり, その半値幅は 160 ps.

る輝線である. ところが, 惑星状星雲のような光電離ガスから禁制線が多数観測されていることもあり, 図7では横の山は $h\nu=1.840$ keV の禁制遷移であると結論している⁵⁾. 本実験の数値モデルを計算機で解いて得られた各電離状態のケイ素イオンの密度時間変化を図8に示す. この計算では放射のピークは $t=150$ ps にある. 電離は $t=300$ ps まで起こるが, 再結合はゆっくりと進行していることがわかる. また, He-like イオンまで電離されていることがわかる.

高精度原子コード HULLAC で He-like ケイ素の詳細なエネルギー順位と遷移時間を調べてみると, 共鳴遷移の遷移時間が 0.08 ps であるのに対し, 禁制遷移は 10^8 倍長い. つまり, $1s2s$ 状態にあるイオンが $1s2p$ 状態にあるイオンより 1 億倍多く存在しなければ実験のように同程度の強度で計測されない. これは宇宙の場合も同じ. ところが, この強い放射場での L 殻 ($n=2$) からの光電離時間は 50 ps である. このことから, $1s2s$ 状態のイオンは $1s2p$ に比べ 8 桁も多く存在できないことは明白. 禁制線は観測されないと考えるべきである. 同時に, 禁制線が支配的ならこの部分の X 線は発光の時間依存性を計測するとグラグラと長時間にわたり発光し続けるはずである. ところが,

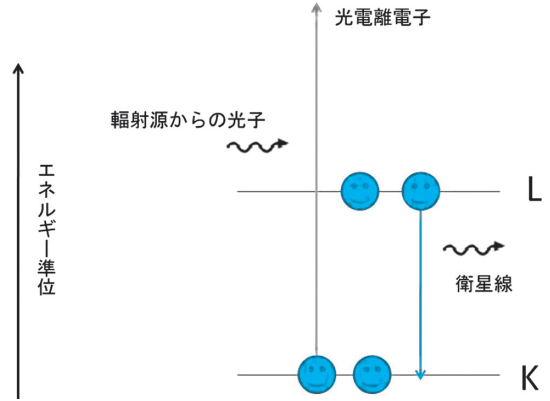


図9 衛星線の発生機構. まず, ケイ素の Be-like イオンがあり, ここに K 殻の電子が外部からの X 線で電離すると, L 殻の電子が K 殻に速やかに遷移する. その際, もう 1 個の L 殻の電子の電荷遮蔽により, 遷移エネルギーは L 殻に衛星電子がない場合より低くなる.

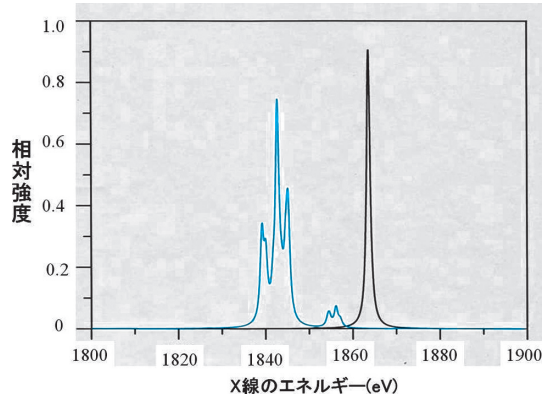


図10 実験条件を用いた理論的な X 線スペクトル. ラインの構造を見やすいようにするため, ラインの幅を人工的に狭くして描いている. すると, 右の一番強い放射は共鳴線で, 左に 3 本の衛星線が見える. 真ん中に異重項間遷移による低い山も見える.

発光時間は共鳴線と同程度の時間であることが実験的に判明した. 原子物理が苦手の方は, 共同研究者の David Salzmänn の教科書で勉強して欲しい¹⁵⁾. He-like イオンに関する説明は第6章に詳しい.

では、この 1.84 keV 近辺の「コブ」は何だろうか？ ここが物理の面白いところだ。図 8 からわかるように Be-like のイオンはたくさん存在する。それが、図 9 のように K 殻の電子が内殻電離し、その空席に、L 殻からの電子が遷移する。ところが L 殻にはもう一つの電子（「衛星電子」という）があるので、その遷移エネルギーは共鳴線からずれる。衛星電子は原子核のクーロン場を部分的に遮蔽するので、遷移エネルギーは共鳴線より低くなる。また、衛星電子の量子状態はスピンも含め多数あるので、スピン軌道相互作用などで、エネルギー順位は多数に分離する。そのため、解像度が悪いと幅の広い輝線のように見える。実際の計算結果は図 10 のように 3 本の強い衛星線からなる。計測器の分解能が $\Delta h\nu = 7 \text{ eV}$ と悪いためにブレンドし、一つのコブとして計測されている。

4. ま と め

誇大広告をすれば「実験室にミニ・ブラックホールが出現」となるだろう。このミニ・ブラックホールを用いれば、宇宙の極限でしか起こらないような物理現象をその物理の本質を保持したまま実験的に研究することができる。このような宇宙物理の模擬実験による研究を「実験室宇宙物理 (Laboratory Astrophysics)」¹⁶⁾ とか「レーザー宇宙物理」(Laser Astrophysics) と私たちは呼んでいる。いずれにせよ省略記号は「LA」である。

本稿で紹介したようにレーザー爆縮という手段で $T_r = 0.5 \text{ keV}$ の熱輻射源を実験室に作る事ができた。現在、この値を 1 keV に上げる挑戦もしている。この輻射によるケイ素プラズマの光電離で放射される He-like の輝線スペクトルは Chandra がとらえた X 線連星系の 2 例のスペクトルをほぼ再現した。そして実験結果の理論解析より、共鳴線のすぐ横の低エネルギー側に見られるコブ状の構造は、天文観測の結果から推定されたような禁制遷移による輝線ではなく、主に 3 本の衛星線がブレンドして形成されていることが明

らかとなった。

観測データの精度が向上し、解析のための物理が複雑になるに従い、どうしても他人が作成したコードと比較して物理を解釈しようとする傾向が強くなる。ところが、コードの中身が複雑になるほどに、どのような物理現象が数値計算の結果を支配しているかわからなくなる。基本的にはコードの中身の物理をすべて理解したうえで、支配的な物理過程を複数個取り出して、簡便な数値モデルでも観測結果を再現するか確認しなければ観測データから新しい物理過程を発見したとは言えない。この辺りは「宇宙物理学」の「物理学とは何か」という研究論になると思う。が、これ以上は議論しない。

3 本の衛星線が強いことがわかった。私たちが実験をし、解析をしているのは、もちろん、光電離を含む複雑な非平衡原子過程のコードの標準的な実験データを提供し、コード開発をしている方々に、「確認」のためのデータとして使っていたきたいことがある。同時に、このような研究を通して未知の「X 線レーザー天体」の存在の可能性を探ろうとしている¹⁷⁾。宇宙にはレーザー天体が多数存在することは電波天文学で明らかにされた。これには、中井、海部氏といった日本人研究者が大きく貢献している。最近ではイータ・カリナで宇宙レーザー現象が起こっているとの報告もされている¹⁸⁾。宇宙とは偉大で、人類がレーザー、レーザーを「発明」するずっと以前の太古の昔からレーザー、レーザーを宇宙空間に放ち続けてきた。

一般に X 線領域の放射を放つ上準位の寿命が波長の 2 乗に比例して短くなるため X 線レーザーの「反転分布」を人工的に作りにくい。ところが、自然界はそのような寿命にも打ち勝つような強力な励起光源をもっているはず。ある条件下で光電離、励起が勝って、特定の X 線領域の量子遷移が誘導放射で強くなっている可能性がある。そのような条件が見つかれば、模擬実験で証明

し、宇宙の X 線レーザー候補天体を見つけようと考えている。そして、その天体を超高分解でスペクトル観測する小型 X 線衛星を H2A ロケットの片隅に設置して打ち上げていただく。そして、予言どおり反転分布が期待された波長のところに、自然幅よりずっと細くて極端に明るい X 線輝線を観測すれば、「X 線領域で line narrowing が観測された。X 線レーザー天体だ」と報告できるだろう。

X 線連星系の光電離プラズマ模擬実験を説明してきた。これは、レーザー宇宙物理という「宇宙物理学」の新しい研究分野の一例である。私たちはこれ以外にも阪大では、「自己組織化による高マッハ数無衝突衝撃波の形成と粒子加速」の実験¹⁹⁾と、巨大惑星内部や地球内部など超高压物質の状態方程式の実験^{20), 21)}、隕石衝突の模擬実験²²⁾をプロジェクトで推進している。実験室宇宙物理を推進することで目指していることは、

1. 宇宙物理関連シミュレーション・コードの「検証と確認」の「確認」に使えるような実験データを提供していく
2. 宇宙模擬実験を通して、当初、考えてもいなかった新しい物理を「発見」する
3. さらには、宇宙における未発見の物理現象を「予言」する
4. 活動を通して、実験室と宇宙のプラズマの「プラズマ物理学」としての学術の深化を図る

である。読者の皆さん、「こんな実験はできないか？ もしできたら、宇宙物理にこんな大インパクトを与えることができる」という提案をどしどし、お寄せください。私たちなりに内容を理解し、どうすれば実験可能か検討します。

謝 辞

本実験は大阪大学レーザーエネルギー学研究センターの特別教育研究経費などで推進している。レーザー宇宙物理プロジェクトは 4 班あり、本実

験は第 2 班の西村博明、山本正則氏らとの共同実験である。実験で使用するターゲットの製作グループ、レーザー運転グループ、プラズマ計測グループの方々に感謝する。また、理論解析は外国人客員教授で滞在した David Salzmann 博士（イスラエル、ワイツマン研究所）、日本学術振興会招聘研究員 Wang, Feilu 准教授（中国国家天文台）の貢献が大きかった。実験は日本学術振興会の日中共同研究（2005-2007 年）で始まり、本実験には中国側代表 Zhang, Jie（上海交通大学学長）以下、中国物理研究所（Li, Yuton ほか）、中国国家天文台（Zhao, Gang ほか）が参加している。また、途中から韓国原子力研究所（KAERI）の Rhee, Yong-Joo 博士のグループも参加している。共同研究者の皆さんに感謝したい。実験室で得られたスペクトルと天文観測との比較に関しては、首都大学東京の政井邦昭教授、宇宙航空開発機構の堂谷忠靖教授およびその共同研究者の方々に議論に加わっていただいた。この場を借りて感謝したい。

参 考 文 献

- 1) 北本俊二 著, 1998, 「X 線でさぐるブラックホールー X 線天文学入門ー」裳華房
- 2) ブルーノ・ロッシ 著, 小田 稔 訳, 1993, 「物理学者ブルーノ・ロッシ自伝」中公新書 1145
- 3) Paerels F., et al., 2000, *Astrophys. J. Lett.* 533, L135; Kitamoto S., et al., 1994, *Publ. Astron. Soc. Jpn.* 46, L105; Kawashima K., Kitamoto S., 1996, *Publ. Astron. Soc. Jpn.* 48, L113
- 4) Watanabe S., et al., 2006, *Astrophys. J.* 651, 421
- 5) Schulz N. S., et al., 2002, *Astrophys. J. Lett.* 564, L21
- 6) Post D., Volta L., 著, 高部 訳, 2006, 「岐路に立つ計算科学」, *パリティ* 21 (No. 7), 22
- 7) <https://lasers.lnl.gov/>
- 8) 高部英明 著, 立花 隆 編, 2008, 「科学者が語る科学最前線=宇宙の核融合・地上の核融合=」, クバプロ出版, 第 7 章「レーザー核融合から新しい宇宙物理学の誕生へ」
- 9) 高部英明, 1998, *天文月報* 91, 63; 91, 108
- 10) Wang F.-L., et al., 2008, *Phys. Plasmas* 15, 073108; Wei H.-G., et al., 2008, *Astrophys. J. Lett.* 683, L77
- 11) Fujioka S., Takabe H., et al., 2009, 投稿中

12) 高部英明, 2004, 「さまざまなプラズマ」岩波書店
 13) 高部英明, 1993, プラズマ核融合学会誌, 69, 1285
 14) Kallman T. R., McCray R., 1982, Astrophys. J. 50 (Suppl.), 263
 15) Salzmann D., 1998, Atomic Physics in Hot Plasmas (Oxford Univ. Press)
 16) 高部英明, 2005, プラズマ核融合学会誌 81 (Suppl.), 150; Remington B., et al., 2006, Rev. Mod. Phys. 78, 755; Takabe H., 2001, Prog. Theor. Phys. 143, 202
 17) 高部, 森田, 2001, プラズマ核融合学会誌 77, 441
 18) Johansson S., Letokhov V S., 2003, Phys. Rev. Lett. 90, 011101
 19) Takabe H., et al., 2008, Plasma Phys. Control Fusion 50, 124057
 20) 生駒大洋, 他, 2008, プラズマ核融合学会誌 84, 93
 21) 重森啓介, 他, 2008, 高圧力の科学と技術 18, 55
 22) 門野敏彦, 他, 2009, 日本惑星科学会誌 「遊星人」 18, 4

X-Ray Astronomy of Binary Star with Mini-Compact Object Created by Laser Driven Implosion

Hideaki TAKABE and Shinsuke FUJIOKA

Institute of Laser Engineering, Osaka University, Yamada-oka 2-6, Suita, Osaka 565-0871, Japan

Abstract: In Osaka University, we are promoting Laboratory Astrophysics Project with large-scale intense lasers originally developed for laser fusion research. Here we introduce one interesting example experimentally demonstrated recently. When twelve beam lasers with 30 cm in diameter are focused on the surface of a spherical shell plastic target with 0.5 mm in diameter, the surface of the target reaches the pressure of several tens Mbar and the inner part of the shell is accelerated toward the center with velocity of about 300 km/s, and the core temperature reaches keV and column density of 0.1 g/cm² is realized just after the material collides at the center. The spherical core is optically thick to X-ray and it becomes a strong X-ray source. Regarding this core as a compact object of X-ray binary, we have carried out a model experiment of the photo-ionization of the surface plasma of the companion star. We obtained clear evidence of the photo-ionization with He-like silicon ion line emission, when the keV thermal X-ray is irradiated on the relatively low density surface plasma of silicon with density 10²⁰ cm⁻³ and temperature of 30 eV produced by week laser irradiation. We have obtained a good agreement of the spectra with those from CYGNUS X-3 and VELA X-1 observed by Chandra X-ray satellite. The hump observed at low energy side of the resonance line, however, is identified theoretically due to three satellite lines emission, although it is reported due to forbidden line contribution in the analysis of Chandra data.