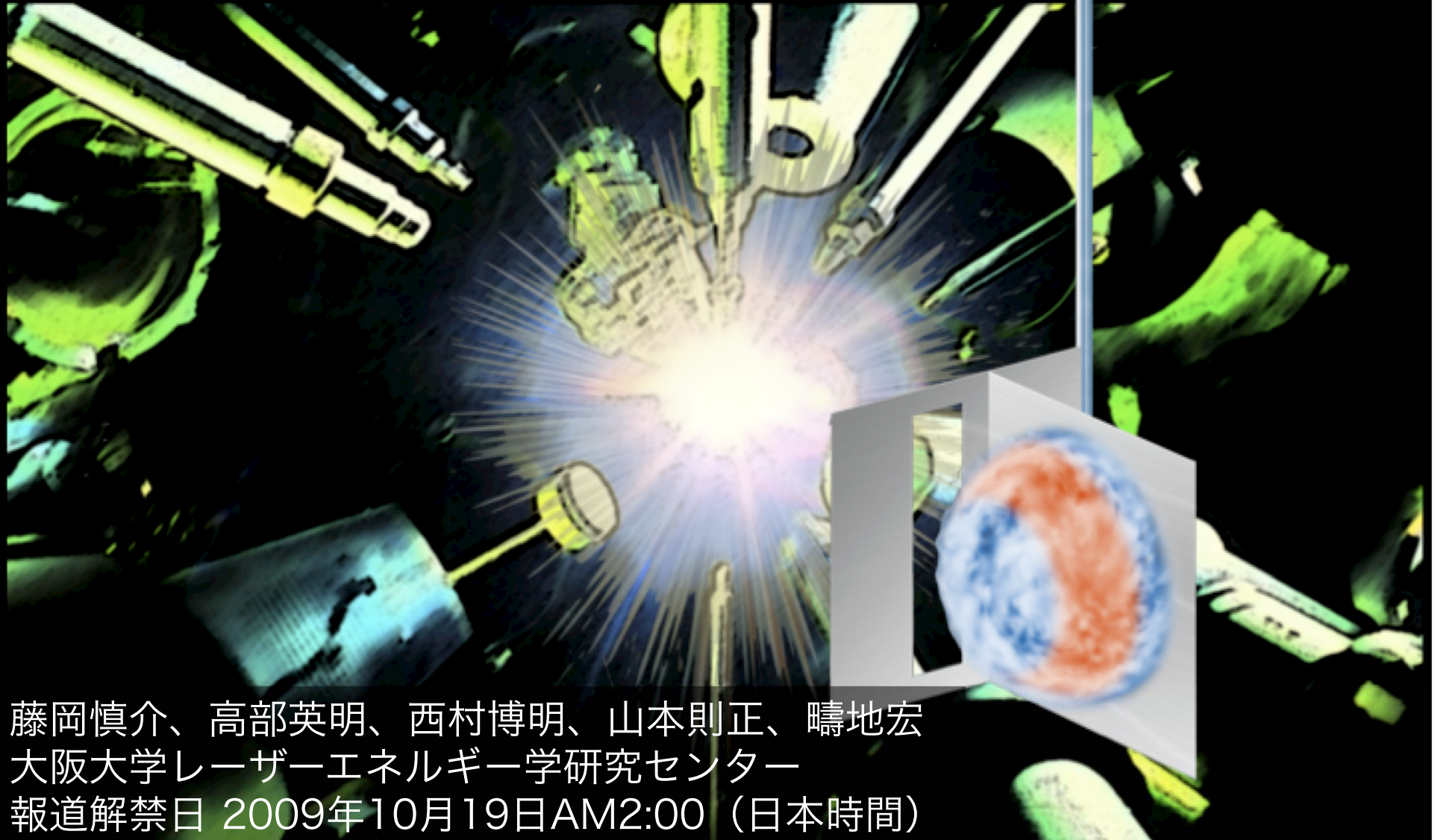


高出力レーザーで生成した模擬ブラックホールを用いた新しいX線天文学  
*“X-ray Astronomy in the Laboratory with a Miniature Compact  
Object Produced by Laser-Driven Implosion”*  
*Nature Physics, advanced online publication, DOI:10.1038/nphys1402*



藤岡慎介、高部英明、西村博明、山本則正、疇地宏  
大阪大学レーザーエネルギー学研究中心  
報道解禁日 2009年10月19日AM2:00 (日本時間)

## 共同研究者一覧

S. Fujioka, H. Takabe, N. Yamamoto, D. Salzmann, M. Tanabe, T. Fujiwara,  
Y. Nakabayashi, H. Nishimura, K. Mima, H. Azechi

Institute of Laser Engineering, Osaka University, Japan

大阪大学レーザーエネルギー学研究センター

F. Wang, J. Zhong, G. Zhao

National Astronomical Observatories, China

中国 国家天文台

Y. Li, Q. Dong, S. Wang, Y. Zhang, J. Zhang\*

Institute of Physics, China

\*Shanghai Jiao Tong University, China

中国 中国科学院物理研究所

\*中国 上海交通大学

Y-J Rhee, Y-W Lee, J-M. Han, D-H Kwon

Korea Atomic Energy Research Institute, Korea

韓国原子力研究所

本研究は主に下記の研究費補助を得て実施されました。

文部科学省 特別教育研究経費・拠点形成事業（代表 疇地 宏）

日本学術振興会 二国間交流事業・日中共同研究（日本側代表 高部英明）

文部科学省 科学研究費補助金 若手研究(A)（代表 藤岡慎介）

## 本成果の概要

- 天体は遠く離れており、その状態（温度や密度）を直接測定したり、能動的に変化させることは出来ない。天体観測で得られたデータの解釈には理論モデルとシミュレーションを用いた解析が欠かせない。
- 理論モデル、シミュレーションの信頼性は実験データとの比較検証を経て初めて保証される。しかしながら、ブラックホール周囲のような極限的な環境を実験室で再現することは困難であり、その理論モデルの検証は不十分であった。
- ブラックホール周辺からの高輝度X線放射を再現するために、高出力レーザー「激光XII号」を用いた新しい実験法を考案した。
- ブラックホール周囲で観測されている「光電離」と呼ばれる現象を実験室で発生させることに成功し、天体観測データと良く似たX線スペクトルを実験室で生成した光電離プラズマから取得した。
- 実験データの解釈は天文学における従来のものとは異なることが明らかになり、天文学にモデルの再考を促す結果が得られた。
- 既存の研究手法である理論・シミュレーションと観測に加えて、高出力レーザーを用いた模擬実験が新しい天文学の研究手段となることを実証した。
- 本研究成果は2009年10月19日AM02:00（日本時間）で、総合的物理学専門誌であるNature Physics誌の電子版に掲載される。

## 本成果の意義

- X線観測はブラックホール研究の唯一の手段であり、そのために日本、米国、欧州がX線観測衛星を打ち上げている。本研究は、観測データの解析に使われている理論モデルとシミュレーションの検証に役立つ実験データを提供するという、従来とは異なる新しい方面から天文学の発展に貢献する。
- 高出力レーザーを用いた「レーザー宇宙物理」は、本センターの高部教授らが提唱した新しい学問分野である[1, 2]。本成果は実験室X線天文学という新しい学問の可能性を世に示した。
- 大阪大学レーザーエネルギー学研究センターは「高エネルギー密度状態の科学」の開拓を担う我が国唯一の共同利用・共同研究拠点である。大阪大学、中国科学院、中国国家天文台、韓国原子力研究所との密接な国際連携協力によって達成された成果であり、国際的な研究拠点としての本センターの役割が示された。
- 激光XII号は核融合分野において（当時）世界最高温度 [3]、世界最高密度 [4]、新方式レーザー核融合の実証 [5] の歴史的成果を上げてきた。高出力レーザー装置が他分野でも優れた成果を生み出す高い潜在能力を有することが示された。

[1] 高部英明、野本憲一、日本物理学会誌, 53巻, 84頁 (1998).

[2] B. A. Remington, D. Arnett, R. P. Drake, & H. Takabe, “Modeling astrophysical phenomena in the laboratory with intense Lasers”, Science, Vol. 284, p. 1488 (1999).

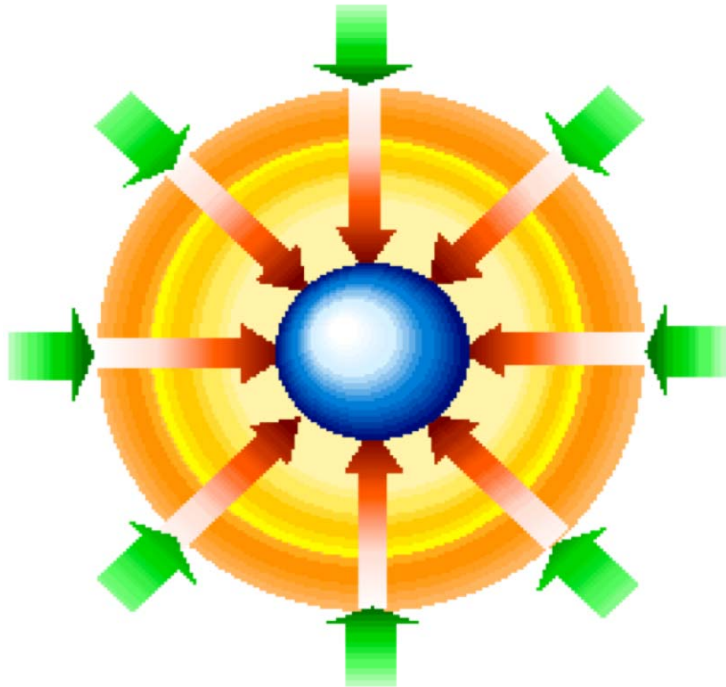
[3] C. Yamanaka, & S. Nakai, “Thermonuclear neutron yield of  $10^{12}$  achieved with Gekko XII green laser”, Nature, Vol. 319, p. 757 (1986).

[4] H. Azechi et al., “High density compression experiments at ILE, Osaka”, Laser Part. Beams, Vol. 9, p. 193 (1991).

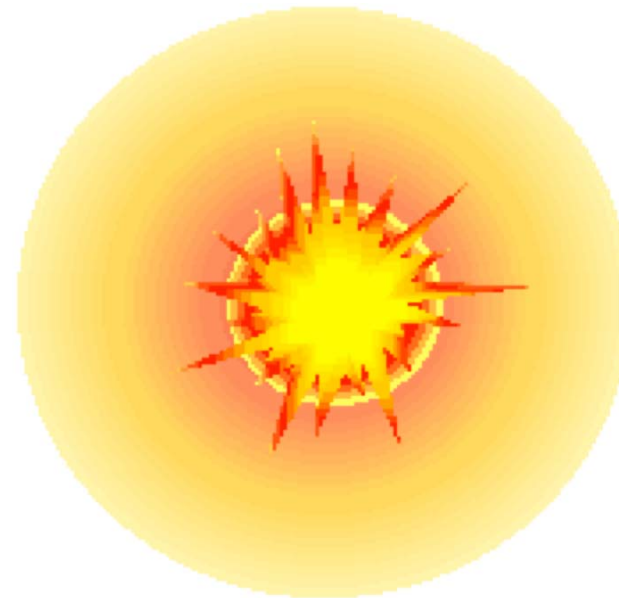
[5] R. Kodama et al., “Fast heating of ultrahigh-density plasma as a step towards laser fusion ignition”, Nature, Vol. 412, p. 798 (2001).

プラスチック球殻を高出力レーザーで圧縮する  
レーザー爆縮は究極の高エネルギー密度プラズマ生成法

レーザーによる圧縮



高温・高密度プラズマ形成



爆縮プラズマの典型特性値

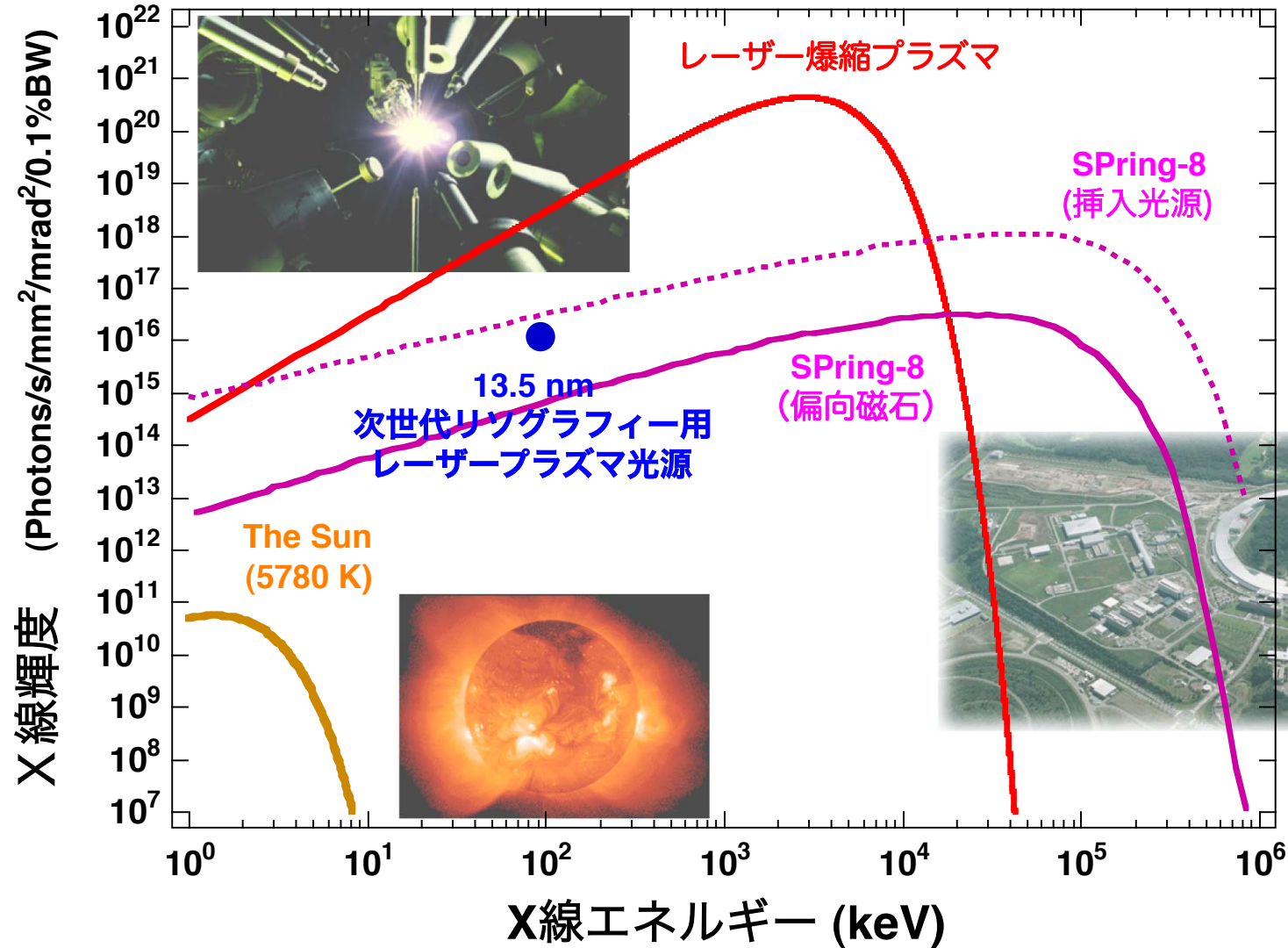
温度 ~ 1 keV ~ 1千万度

密度 ~ 100 g/cm<sup>3</sup> ~ 通常物質の100倍の密度

圧力 > 100 Mbar ~ 1億気圧

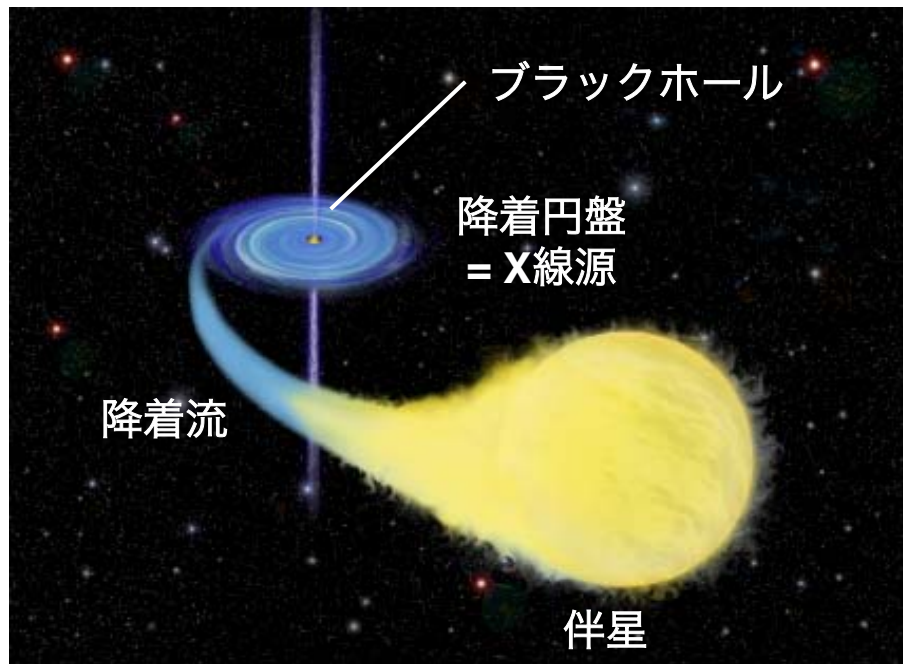
爆縮プラズマは地上で最も明るいX線源の一つ  
その輝度はブラックホール周辺と同等

### 各種X線光源の輝度比較

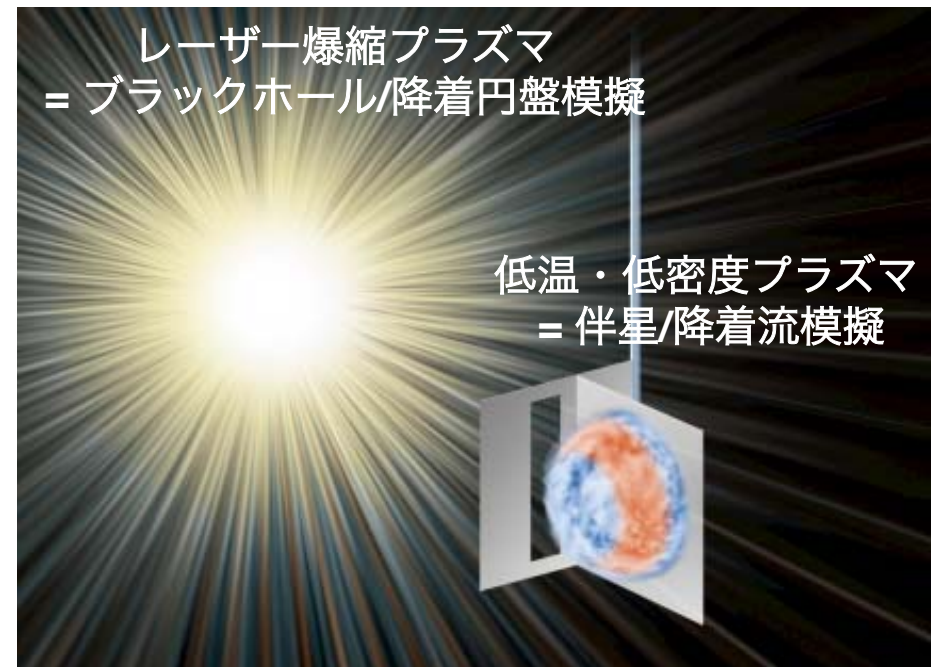


爆縮プラズマを使うことで、ブラックホール周囲のX線発生機構を実験室で調べることが初めて可能に

ブラックホールを中心に  
持つ連星系の模式図

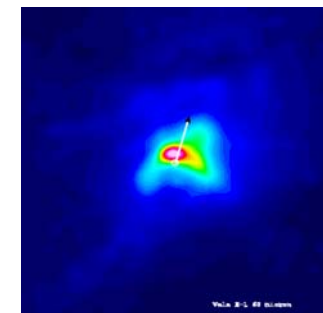
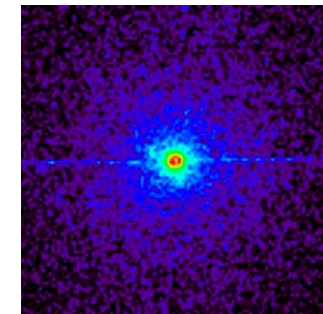
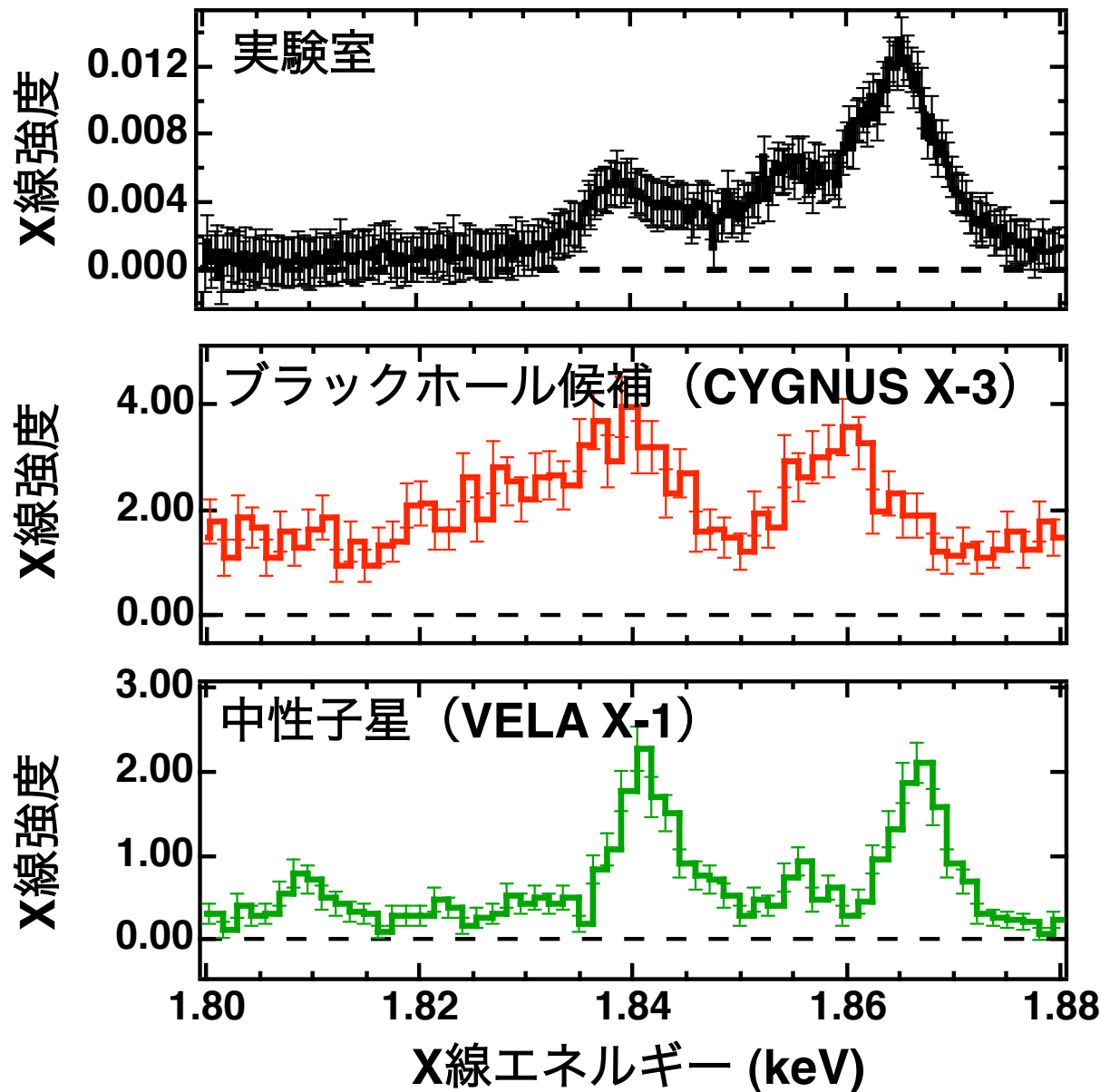


レーザー爆縮プラズマを用いた模擬実験の配置図



ブラックホールの詳細や進化を調べる上でX線観測は不可欠な研究手段であるが、X線発生機構の研究は不十分

宇宙における極限的なX線輻射場を実験室内で再現し、  
天体観測と類似したX線スペクトルを実験室で取得



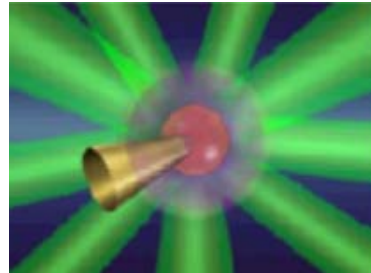


今回生成した環境は多様な宇宙現象のほんの一部  
**レーザーの高出力化と新しいアイデアの組み合わせ**によって更に広範な天体現象の研究が可能に

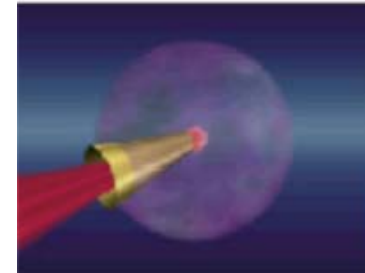
電離パラメータ  $\sim 10$   
 @ 激光XII号



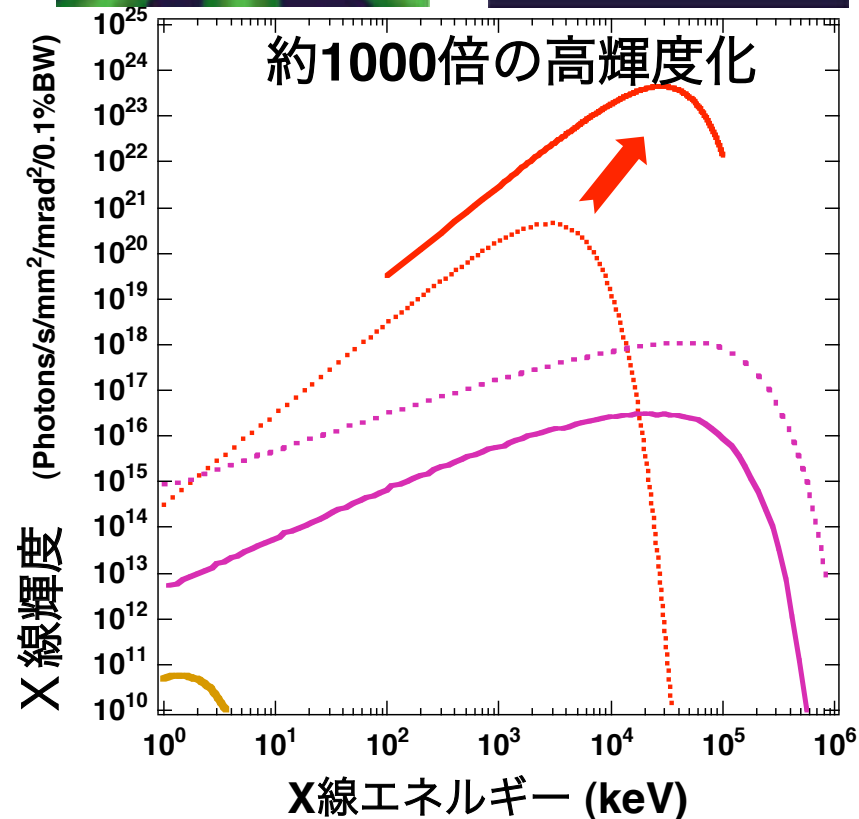
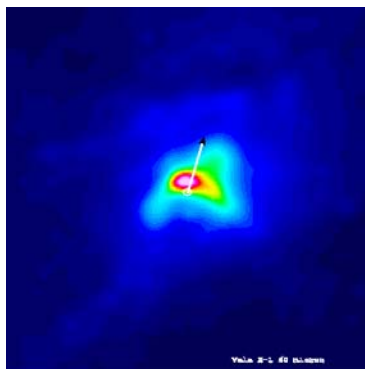
多ビームによる  
 高密度圧縮



短パルスレーザーによる加熱



電離パラメータ  $\sim 300$   
 @ VELA X-1

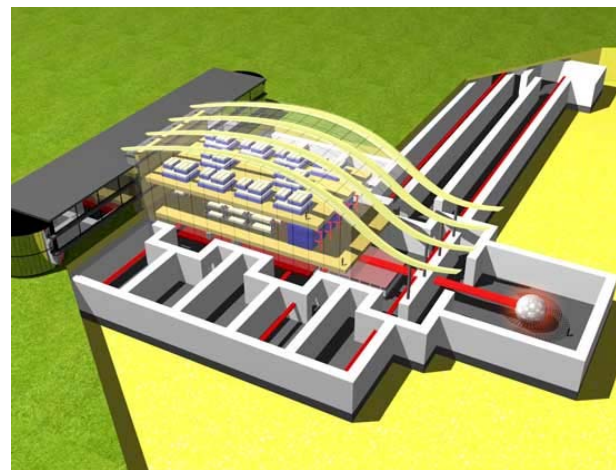


エネルギー開発、安全保証、未踏科学の推進のために、  
各国で次世代レーザー装置の建設が完了/進行中/計画中

NIF



ELI



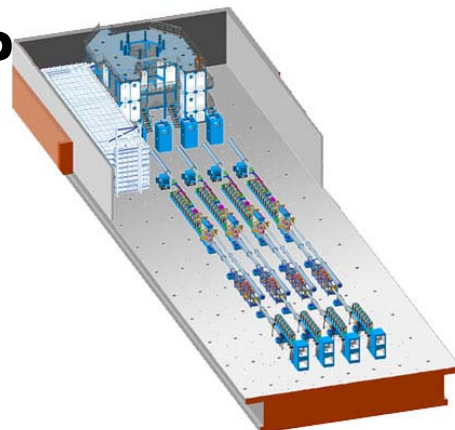
LMJ



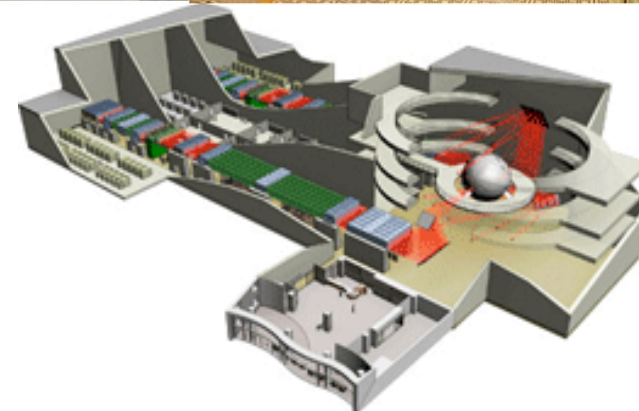
Shengguang III



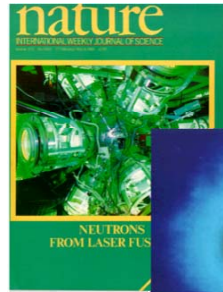
OMEGA-EP



HiPER



# 大阪大学における高エネルギー密度科学/レーザー核融合の主要成果



1986年

**核融合点火に必要な温度達成**  
(核融合反応中性子発生数世界記録：1億度)  
C. Yamanaka *et al.*, Nature

レーザー核融合  
研究の幕開け



1991年

**核融合点火に必要な超高密度達成**  
(世界最高の密度達成：固体の600倍)  
H. Azechi *et al.*, Laser and Particle Beams

レーザー核融合  
点火施設の建設  
(米国)

1998年

**レーザー宇宙物理の提唱**  
高部英明、野本憲一, 日本物理学会誌  
B. Remington *et al.*, H. Takabe, Science

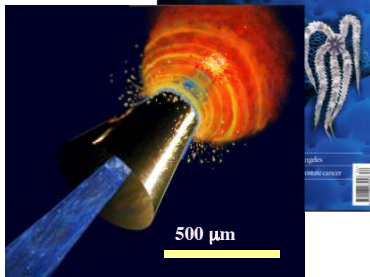
高出力レーザー  
利用研究分野の拡大

nature

2001年

**高速点火による効率的な加熱に成功**  
R. Kodama *et al.*, Nature

世界最高出力のPW  
レーザーの建設(日本)



2002年

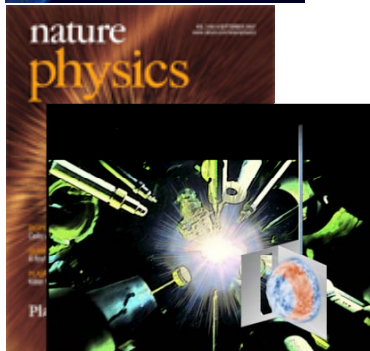
**点火温度へのスケーリングを実証**  
R. Kodama *et al.*, Nature

FIREXプロジェクト  
の開始(日本)

2004年

**高エネルギー密度プラズマの制御法の開拓**  
R. Kodama *et al.*, Nature

高エネルギー密度プラ  
ズマ利用研究の拡大



2009年

**実験室X線天文学の開拓**  
S. Fujioka *et al.*, Nature Physics

レーザーエネルギー学と  
異分野との交流の促進

## [Nature Publishing Groupから配布された本成果に関する解説文](#)

高エネルギー密度科学の第一人者であるPaul Drake教授（米国・ミシガン大学）の解説記事付きで、今週のハイライトとして紹介されています。

### **Physics: Laser recreates conditions near a black hole**

**DOI: 10.1038/nphys1402**

Lasers can be used to generate extreme states of matter similar to those produced in the vicinity of a black hole, reports a study published online this week in Nature Physics. The ability to recreate these states in the laboratory makes it much easier to study the processes that occur near black holes and other similarly massive astrophysical objects, as well as to better interpret the astronomical measurements of these objects.

Most plasmas, including those that occur in the Sun, are composed of gas atoms that have been ionized — or electrically charged — by collisions with electrons and hot gas atoms. The ionization of plasmas surrounding a black hole, however, is driven by the immense flux of photons generated as matter is sucked into the black hole. These ‘photoionized’ plasmas produce a characteristic X-ray spectrum that can be detected by satellites orbiting the Earth. But photoionized plasmas are much more difficult to produce than conventional plasmas.

To produce a photoionized plasma, Shinsuke Fujioka and colleagues use a 3000 gigawatt laser to cause the implosion of a thin plastic pellet. The researchers found that the shape of the X-ray spectrum from the resulting plasma was remarkably similar to those emanating from the binary stars Cygnus X-3, a black-hole candidate, and Vela X-1, a neutron star, as measured by the Chandra X-ray satellite. The results suggest that the commonly held understanding of the origin of certain parts of these spectra might be wrong — a fact that could help astrophysicists improve their models of these and similar astrophysical systems.

Author contact:

Shinsuke Fujioka (Osaka University, Japan)

R. Paul Drake (University of Michigan, Ann Arbor, MI, USA) News & Views author

## Nature Publishing Groupから配布された本成果に関する解説文（和訳）

物理学: ブラックホール近く的环境をレーザーを使い再現  
DOI: 10.1038/nphys1402

今週のネイチャー・フィジックス誌の電子版にて、ブラックホール近傍にある極限的な物質状態をレーザーを使って作り出した成果が報告されます。このような状態を実験室で再現することが出来れば、ブラックホールや大質量天体の近傍で起こっている現象を研究することが容易となり、天体観測データをより正しく理解するための助けとなります。

太陽を含むほとんどのプラズマは高温な気体であり、その内部の原子は電子との激しい衝突により電離された一電気を帯びた一状態です。一方、ブラックホール周囲のプラズマ中では、ブラックホールに吸い込まれた物質が放出する強烈な光によって電離が起っています。地球を周回している観測衛星によって観測された特徴的なX線スペクトルは、この「光電離」プラズマから放射されていることが知られています。（太陽のような）一般的なプラズマを作るのも大変ですが、光電離プラズマを人工的に作り出すことは更に難しいことなのです。

藤岡と同僚達は、3000ギガワットレーザーを使い薄いプラスチック球殻を爆縮して、実験室で光電離プラズマを作り出しました。ブラックホール候補を含む連星である白鳥座X-3と、中性子星を含む連星である帆座X-1から放射され、チャンドラ衛星によって観測されているX線のスペクトル形状と、実験室で作った光電離プラズマから放射されたX線のスペクトル形状が驚くほど良く似ていることを発見しました。これらのX線の発光起源に関して、天文学で一般に受け入れられている理解と異なる解釈を彼らは提示しています。この事実はこれらの天体及び類似天体に関わるモデルの改良を天文学者に促すものです。

著者情報:

藤岡 慎介(大阪大学, 日本)

R. Paul Drake (ミシガン大学, アメリカ合衆国) News & Viewsの著者

## 一般向けに公開されるResearch highlightの原稿

### **A star in a pellet Doi: 10.1038/Nphys1402**

A team of researchers have used high-power lasers to reproduce the x-rays of stars inside a small plastic pellet. Shinsuke Fujioka of Osaka University and his colleagues fire a system of 12 high-power green lasers at the pellet, which compress and heat it. As the pellet shrinks, carbon atoms become superheated and release blackbody x-rays. The x-rays resemble those seen in two distant systems where one star is orbiting another. The authors believe the study could help refine models for such astronomical systems, and they also claim that the pellets might recreate conditions at the edge of a black hole.

### **小球の中に星 Doi: 10.1038/Nphys1402**

高出力レーザーを用いて小さなプラスチック球の内部に星が放射するX線を作り出すことに研究者チームが成功しました。大阪大学の藤岡と彼の同僚達は12本の高出力の緑色レーザーを小球に照射し、小球を圧縮・加熱しました。小球が圧縮され小さくなるにつれて、プラスチックを構成する炭素原子は超高温になり、黒体輻射X線を放射します。実験で観測されたX線は二つの遠く離れた天体、星が他方の大質量星を周回する連星系、で観測されたX線と良く似ていることを発見しました。著者達は本成果が天文学におけるモデルの再構築に役立つと信じており、また圧縮された燃料によってブラックホールの遠端における状態を再現出来たと結論しています。

## 用語集

**激光XII号レーザー装置** 大阪大学レーザーエネルギー学研究センターが管理・運営する共同利用・共同研究施設。1983年に建設された国内唯一の高出力レーザー装置。レーザー核融合、次世代半導体製造用極端紫外光源開発、レーザー宇宙物理、超高压科学などの分野でマイルストーンとなる成果を上げている。

**高エネルギー密度状態の科学** 高出力レーザーにより生成された高温高压状態にある物質を対象とした研究分野で、学際融合的な新しい学術分野。我が国では、日本学術会議から「新分野の創成に資する光科学研究の強化とその方策について」の声明が出され（H17）、同物理学研究連絡委員会より高出力レーザーによる「高エネルギー密度状態の科学を探究する学術研究の推進」の必要性が対外声明として出された。

**レーザー宇宙物理** レーザーの集光性、短パルス性を利用して宇宙プラズマと等価な高エネルギー密度プラズマを実験室で生成し、宇宙プラズマ中での素過程やダイナミックな現象を詳細に解明する物理学。従来の天文学手法である観測、理論・シミュレーションに加わるべき新しい天文学としての発展を目指している。当センターの高部教授らのグループによって提唱されて以降、日欧米に加え新興国でも活発な研究活動が行われ、レーザー宇宙物理を主題とした国際会議が各地で開催される段階にまで発展している。

**光電離プラズマ** 希薄な低温ガスが高輝度X線によってプラズマ化している状態。光電離プラズマは低温を保ちながらプラズマ化しているため、一般的な高温プラズマとは異なる特徴を示す。ブラックホール、中性子星、白色矮星と伴星が対になった連星系で頻繁に光電離プラズマが観測されており、光電離プラズマの物理の詳細を知ることは連星系の進化の解明に直結する。