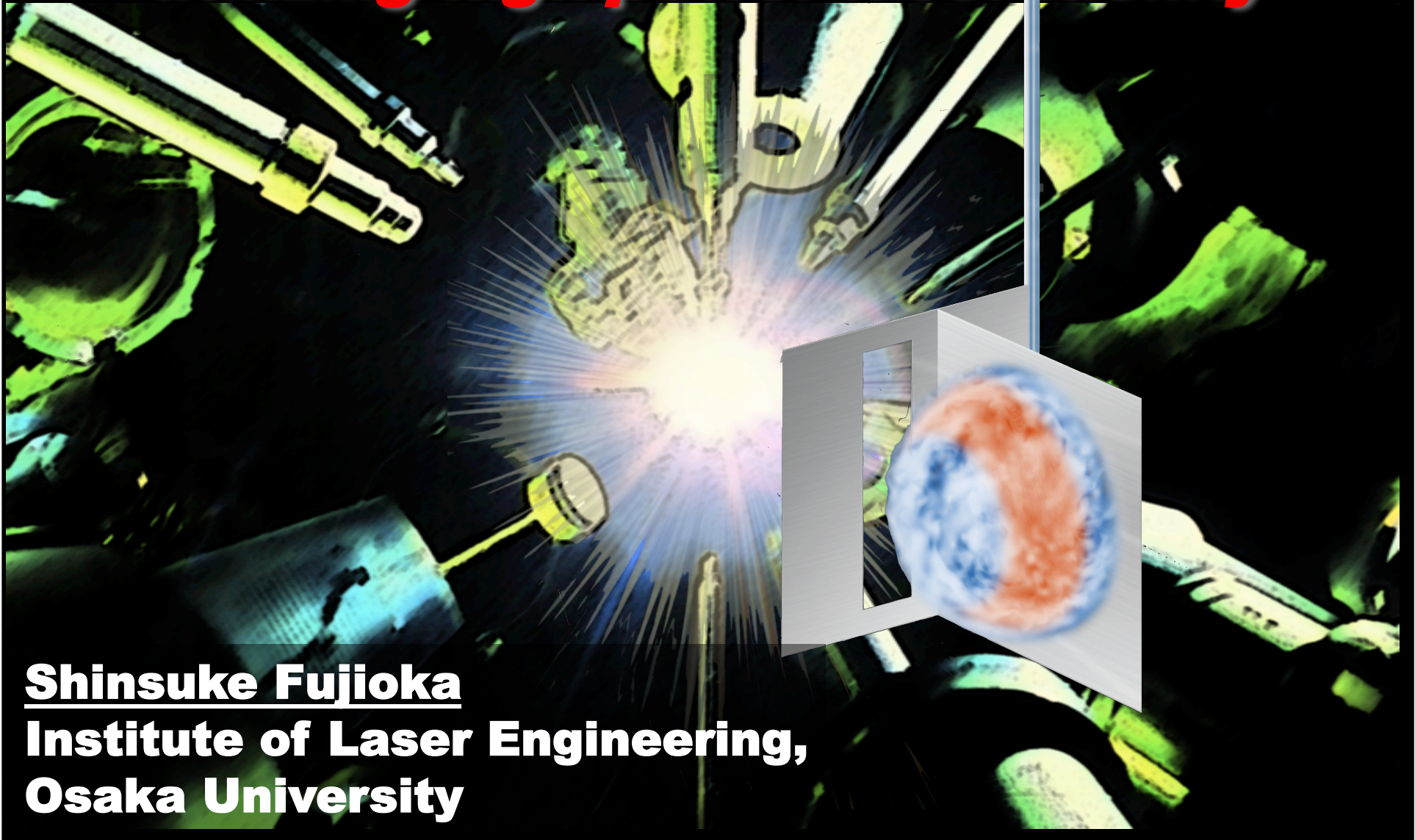


***Laboratory experiment of
astronomical photoionized plasma by
utilizing high-power laser facility***



**Shinsuke Fujioka
Institute of Laser Engineering,
Osaka University**

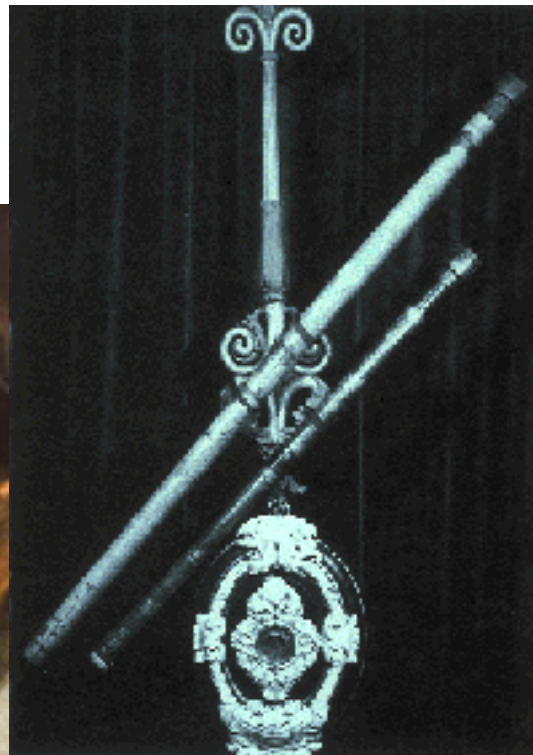
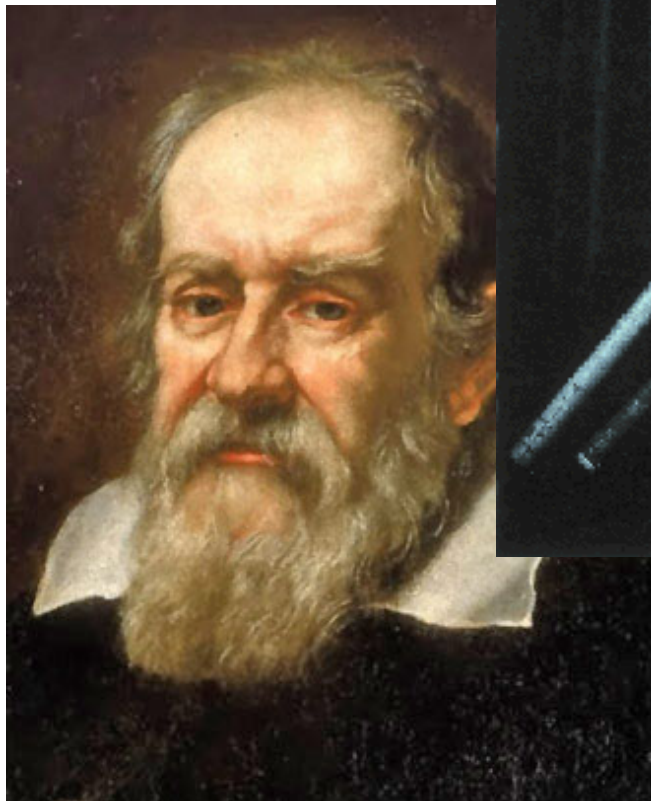
天文学とは夜空を見上げながら、
星の一生を科学的に想像する学問



ILE, Osaka
S. Fujioka

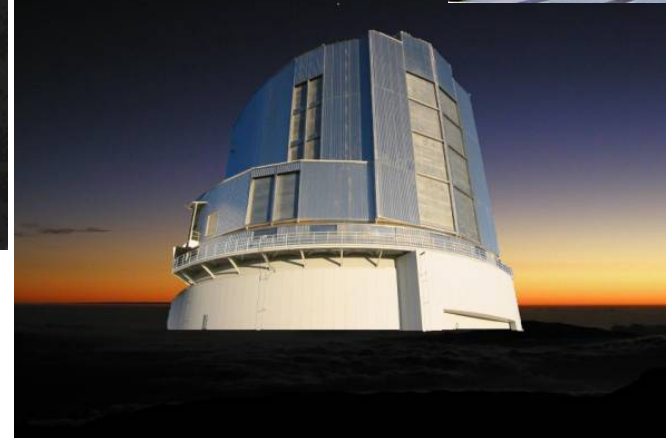
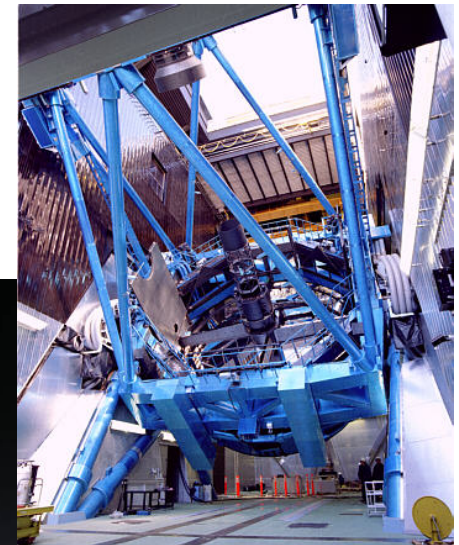
ガリレオ・ガリレイ

望遠鏡をいち早く天体観測に導入し、
月面の構造物や木星の衛星を発見



すばる望遠鏡

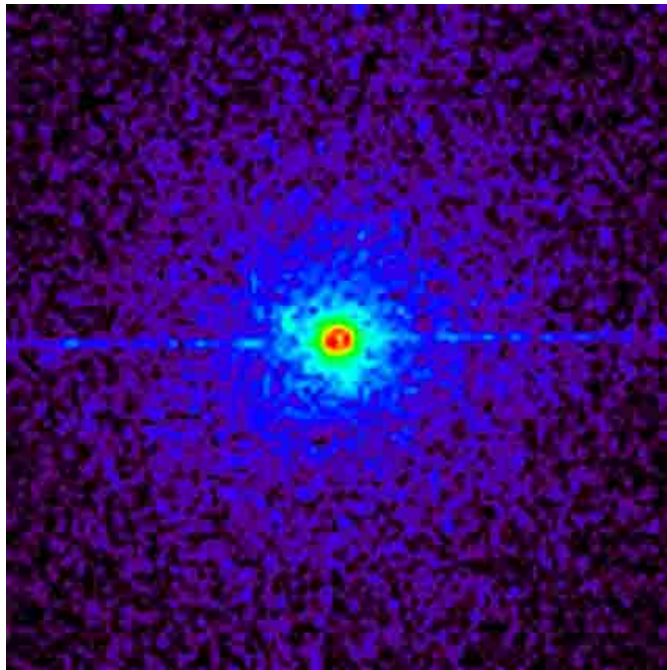
ハワイにある大型赤外線望遠鏡



天文学研究者には科学洞察力とともに
極めて**豊富な想像力**が要求される

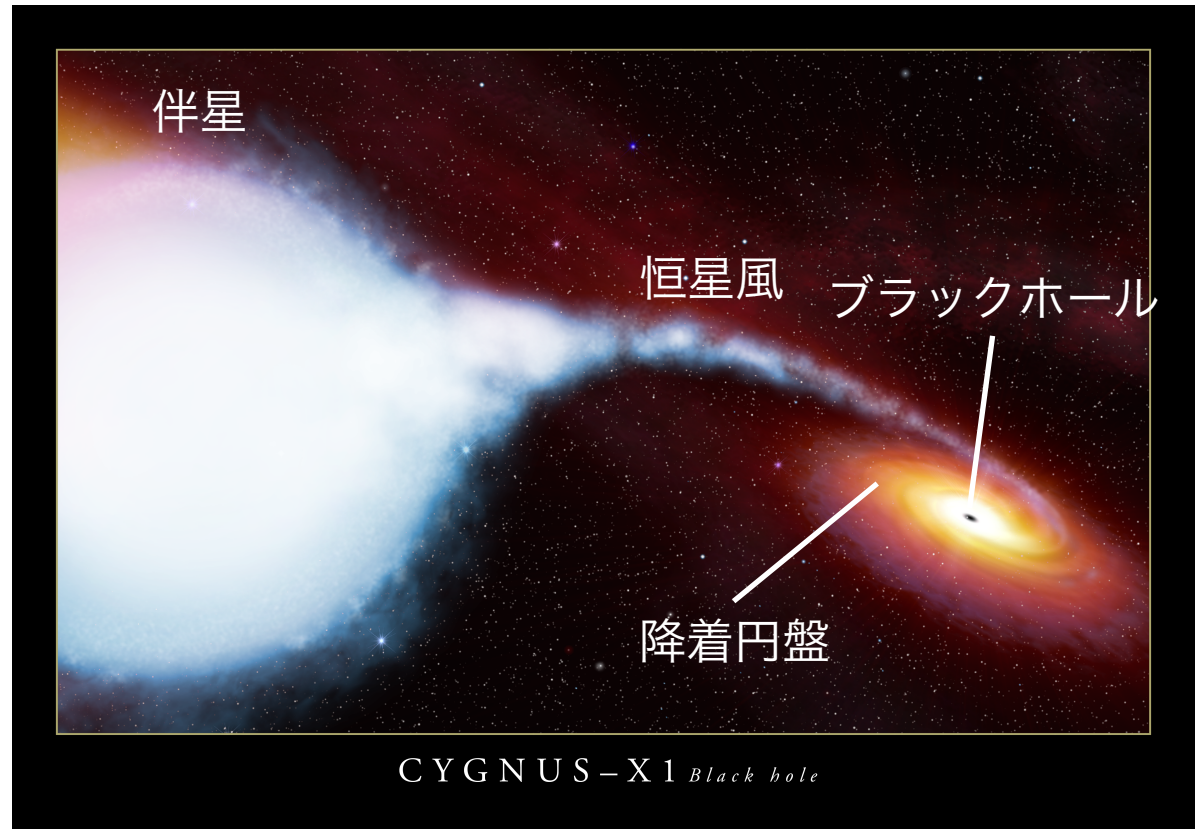
観測された天体画像

人工観測衛星チャンドラ
で観測された白鳥座X-1
のX線画像



天体の想像図

各種の観測結果から想像された
白鳥座X-1の構造



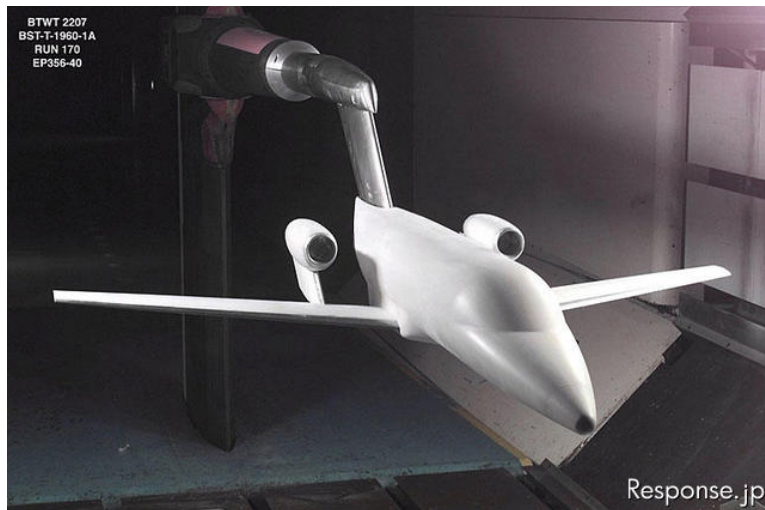
http://www.spacetelescope.org/goodies/posters/html/cygnus_x1.html

その想像って本当に正しいの???

飛行機設計には小型模型を用いた模擬実験が利用される 天文学の研究にも宇宙模型を用いた実験が役立つはず

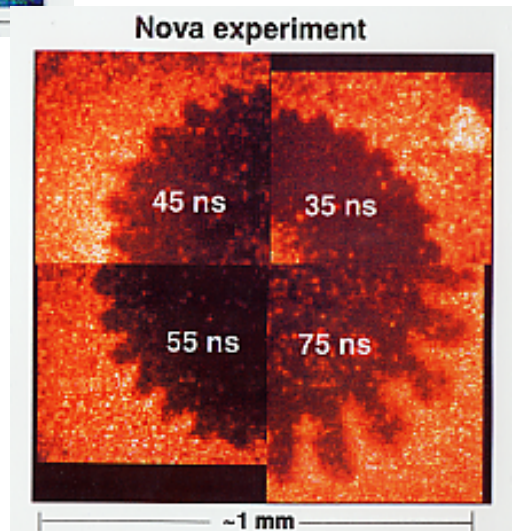
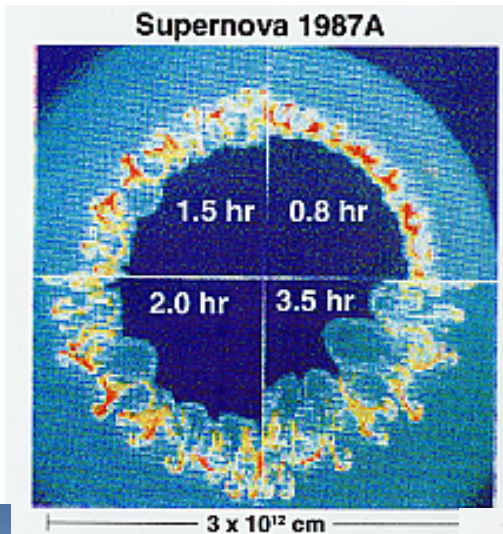
模型を用いた飛行機開発

飛行機や車を設計する際には、
1/100スケールの模型を使って、
実機製作前に問題点を洗い出す



レーザーを使う宇宙模擬実験

超新星爆発に伴う超高速な流れ現象
を再現した有名な実験



分光学(Spectroscopy)は天文学の発展を支える技術 宇宙空間を漂う物体の元素、密度、速度の同定に利用

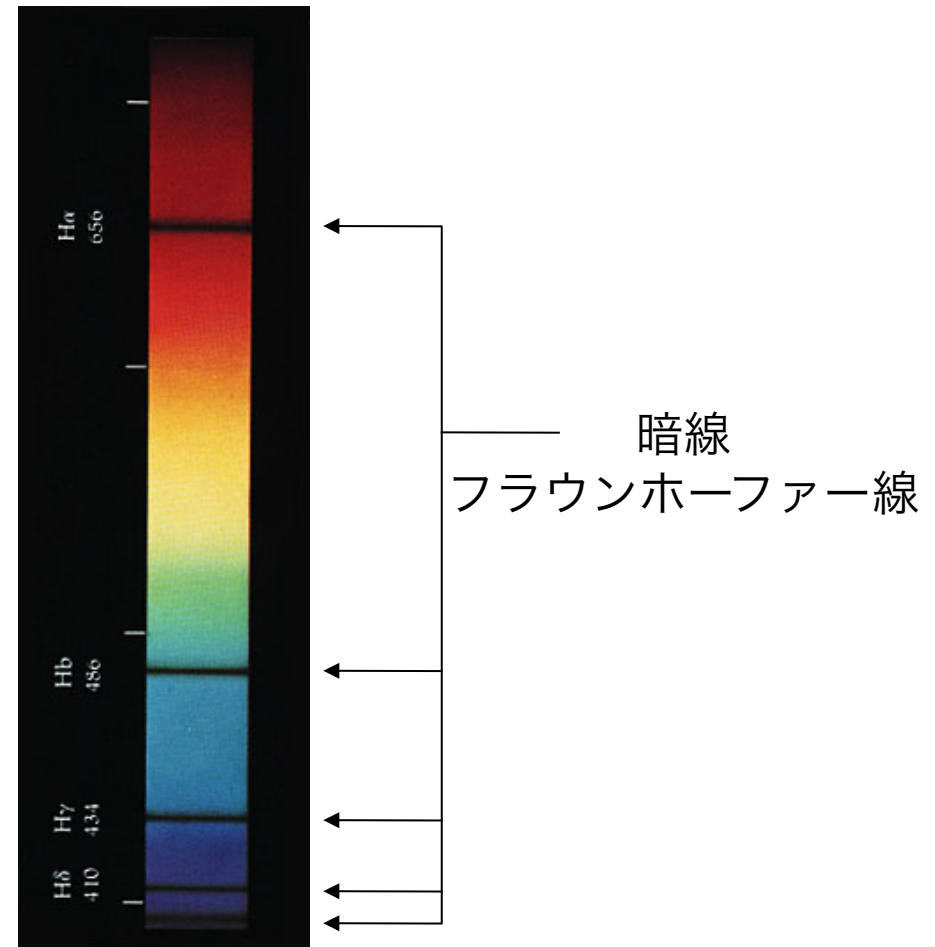
プリズムを用いた分光

色に対するガラスの屈折率の変化
を利用し、白色光を虹色に分割



太陽光の分光

虹の中に暗線が発見され、太陽に大気があることが判明。ヘリウムは地球上より先に太陽で見つかった。



高温な物質はX線を強く放射

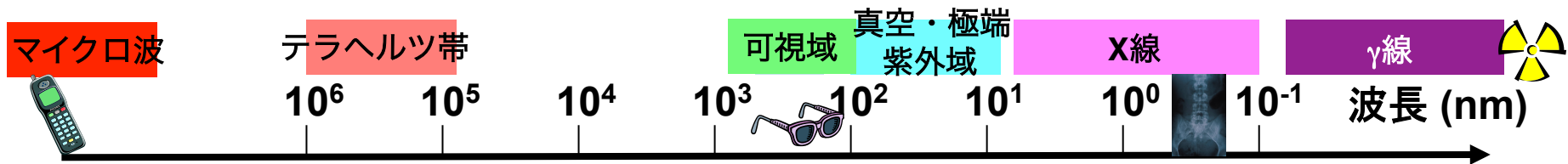
ブラックホールなど熱い星の研究にはX線観測が必須



ILE, Osaka
S. Fujioka

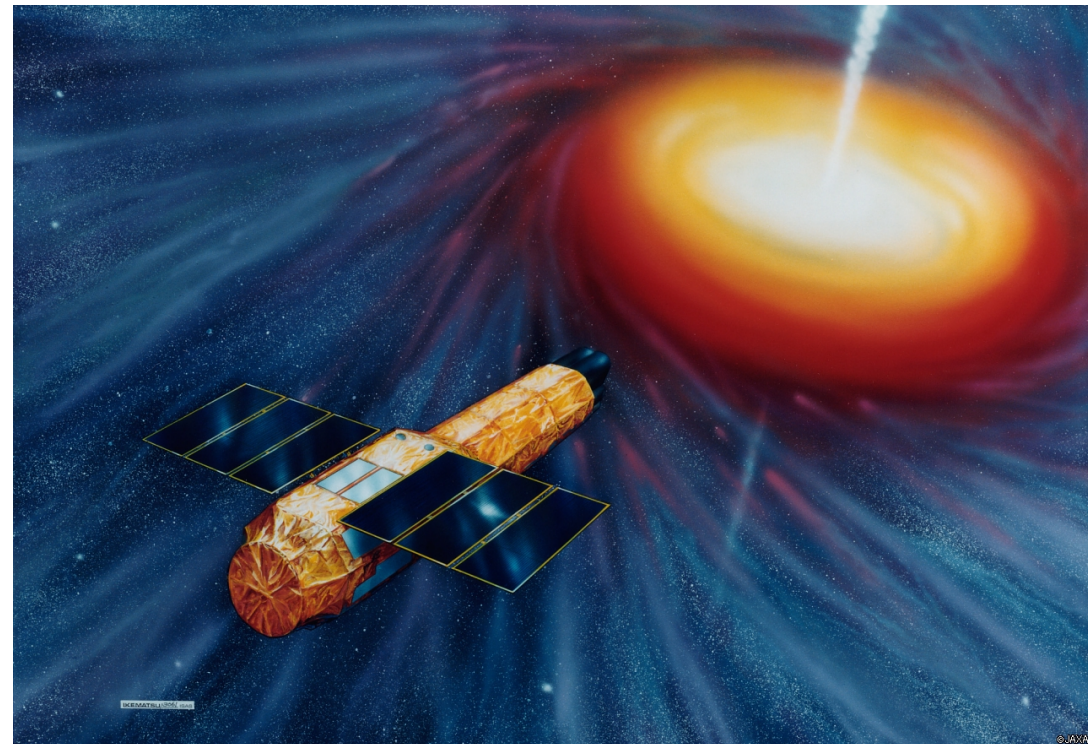
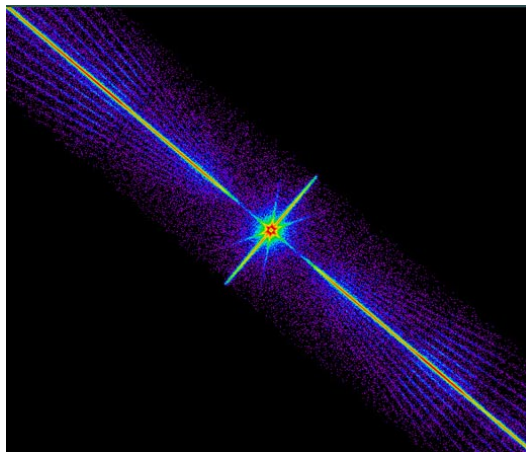
波長と光の呼び名

可視光（目に見える光 380 – 750 nm）よりも短い光をX線と呼ぶ



X線観測衛星

熱い星は非常に強いX線を放射するが、地球大気がX線を吸収するので宇宙で観測



X線分光の天文学への貢献

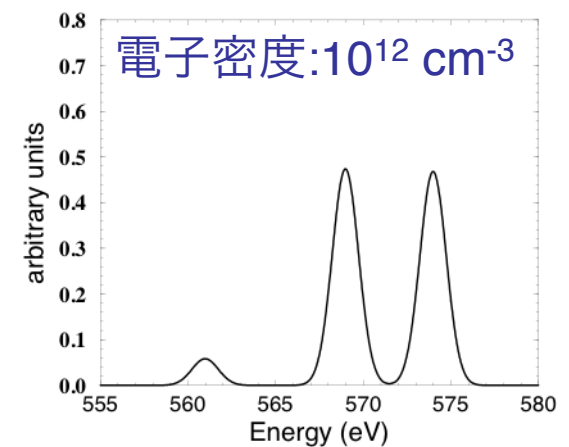
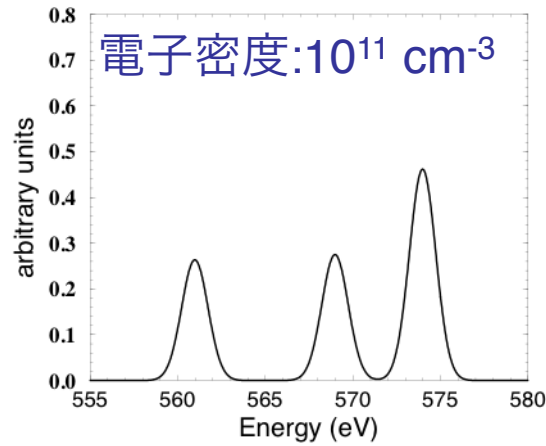
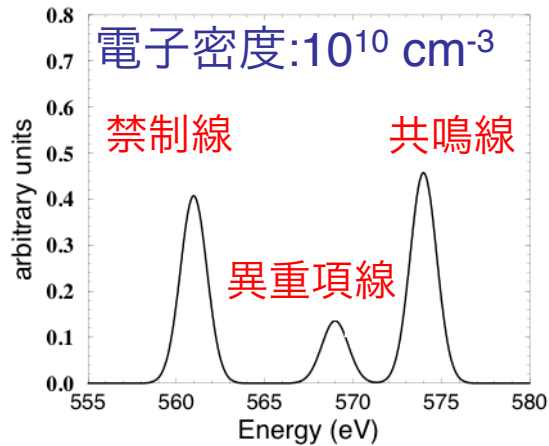
スペクトル形状は天体の元素、温度、密度に依存



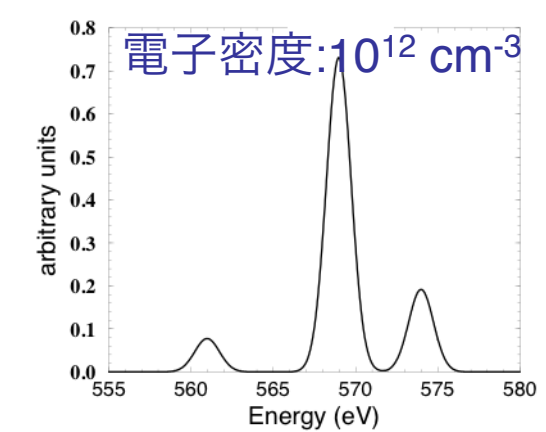
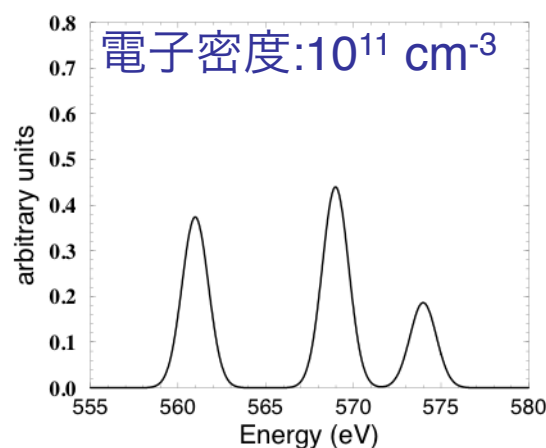
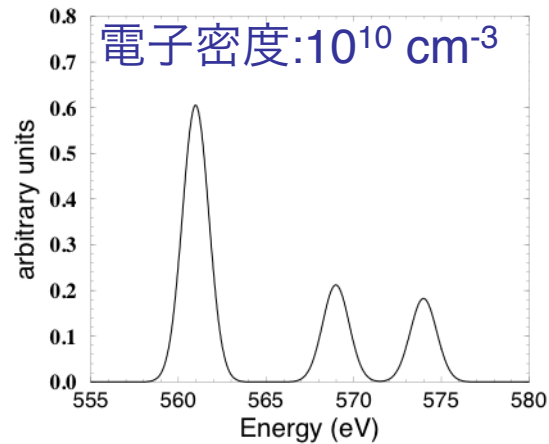
ILE, Osaka
S. Fujioka

天体の温度と密度に対するスペクトル形状の変化
天体を構成している元素、温度、密度が推定出来る

電子温度:150万度



電子温度:10万度



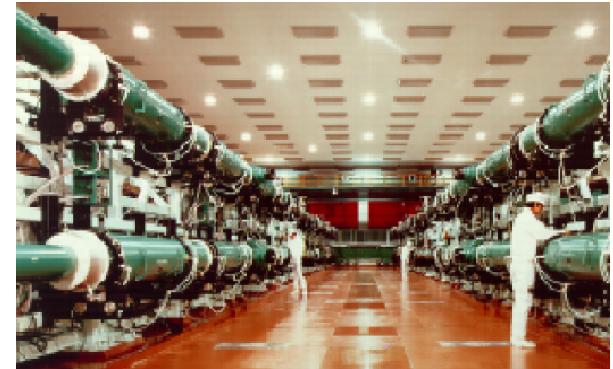
*D. Porquet *et al.*, A & A Suppl., Vol. 143, p. 495 (2000).

激光XII号レーザーのエネルギーは弾丸3発分に相当、
そのエネルギーをわずか数十 μm 、数 ns*に集中

*ns: ナノ秒 = 10億分の1秒

激光XII号の性能

ビーム数	12 本
波長	0.53 μm
エネルギー	350 J/beam, 4.2 kJ (total)
パルス幅	1.2 ns
出力	$(350 \text{ J} \times 12) / 1.2 \text{ ns} = 3.5 \text{ TW}$



エネルギーの目安

ライフル弾丸 (900 m/s, 3.5 g)のエネルギー

1.4 kJ

出力の目安

世界の平均消費電力@2001

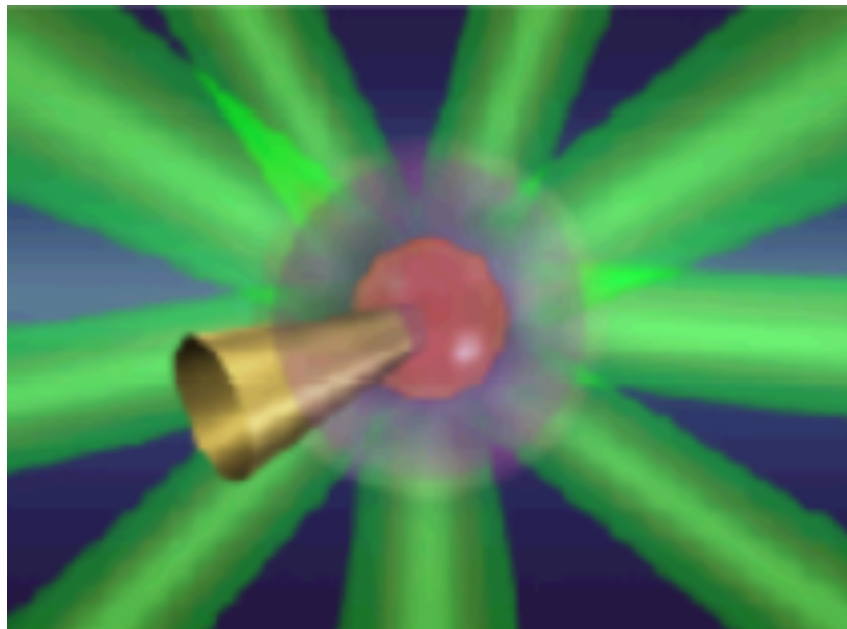
1.7 TW



微小な空間に高出力レーザーを集光することで、
地球上に天然に存在し得ない高密度・高温物質を生成

実験のイメージ図

高エネルギーレーザーを微小ターゲットに四方八方から照射し、高温高密度物質を生成



実際のターゲット写真

小指よりも遙かに小さいが、精密に製作されたターゲットを実験で使用



球殻を高出力レーザーで圧縮する

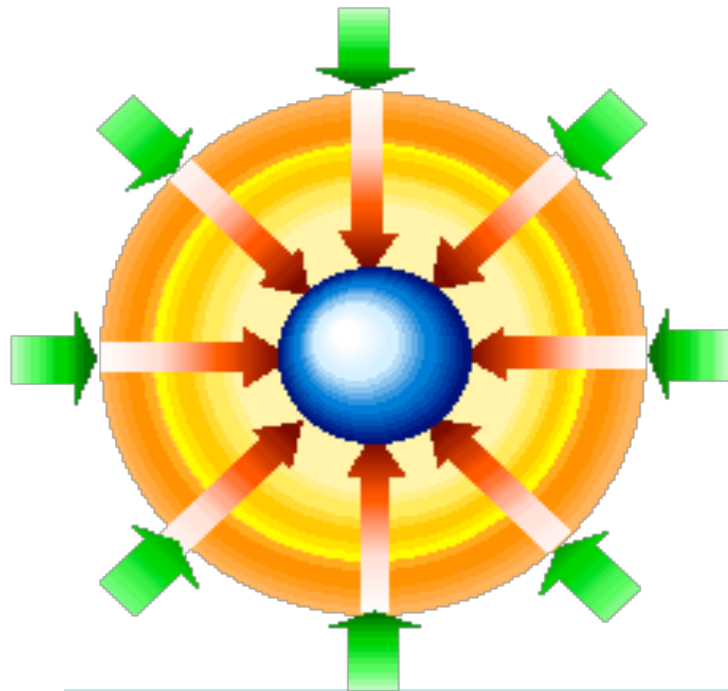
レーザー爆縮は究極の高エネルギー密度プラズマ生成法



ILE, Osaka
S. Fujioka

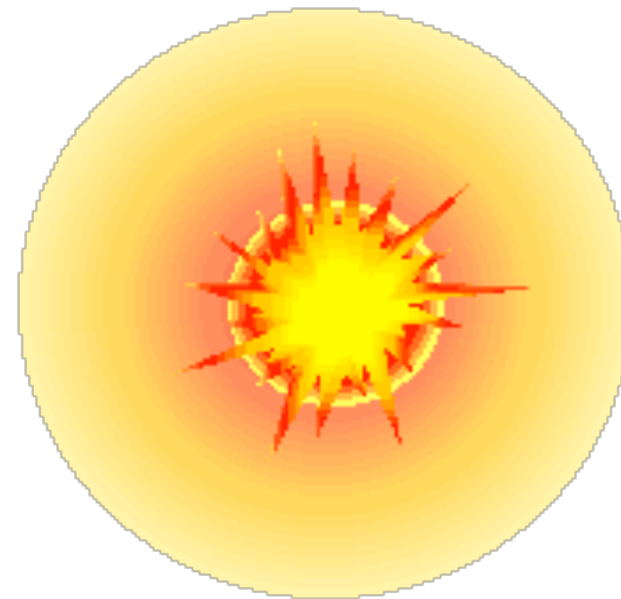
レーザーによる圧縮

レーザー照射で発生する超高圧を用いて球殻を圧縮



高温高密度プラズマ形成

圧縮された球殻が中心部で互いに衝突し、高温高密度プラズマが形成



爆縮プラズマの典型特性値

温度 ~ 1 keV ~ 1千万度

密度 ~ 100 g/cm³ ~ 通常物質の100倍の密度

圧力 > 100 Mbar ~ 1億気圧

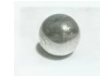
バスケットボールをパチンコ玉サイズに
丸い形状を保ったまま圧縮することに相当

レーザー核融合で要求される圧縮

核融合燃料球を直径にして約30分の1まで圧縮しなければならない



x 1/30

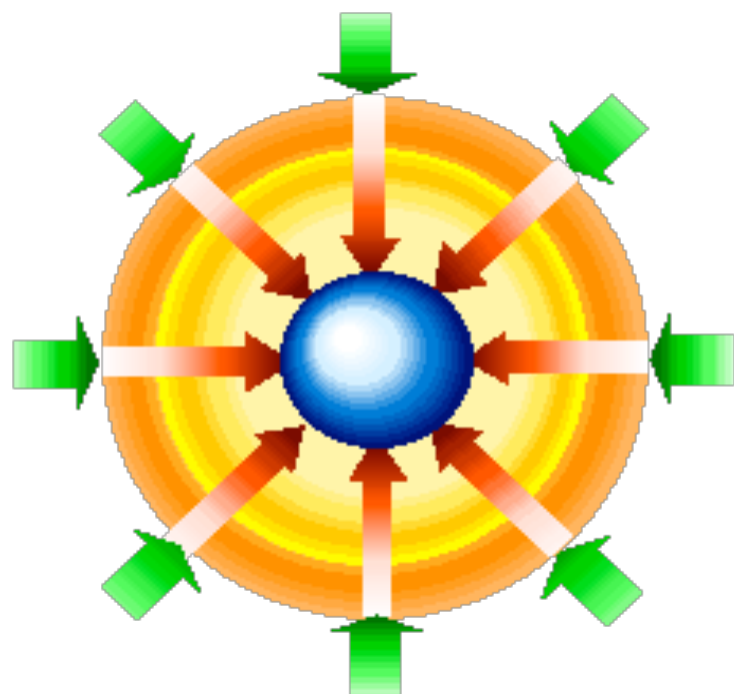


レーザー爆縮は流体力学を用いて、
レーザーエネルギーを空間・時間的に圧縮する技法

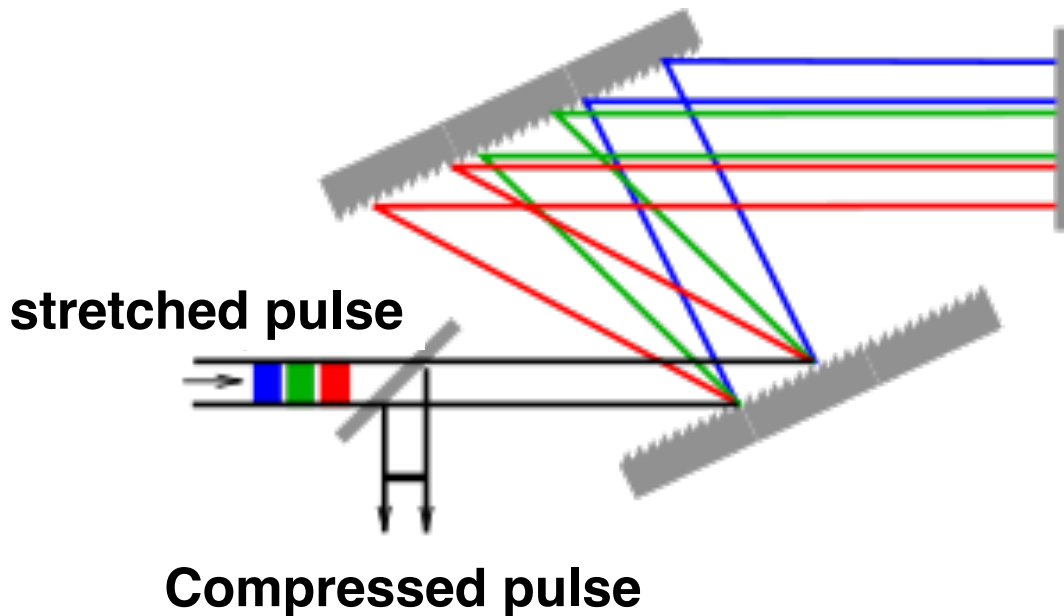


ILE, Osaka
S. Fujioka

レーザー爆縮
- 流体力学による圧縮 -

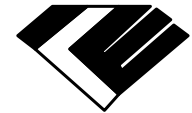


CPAパルス圧縮
- 光学による圧縮 -

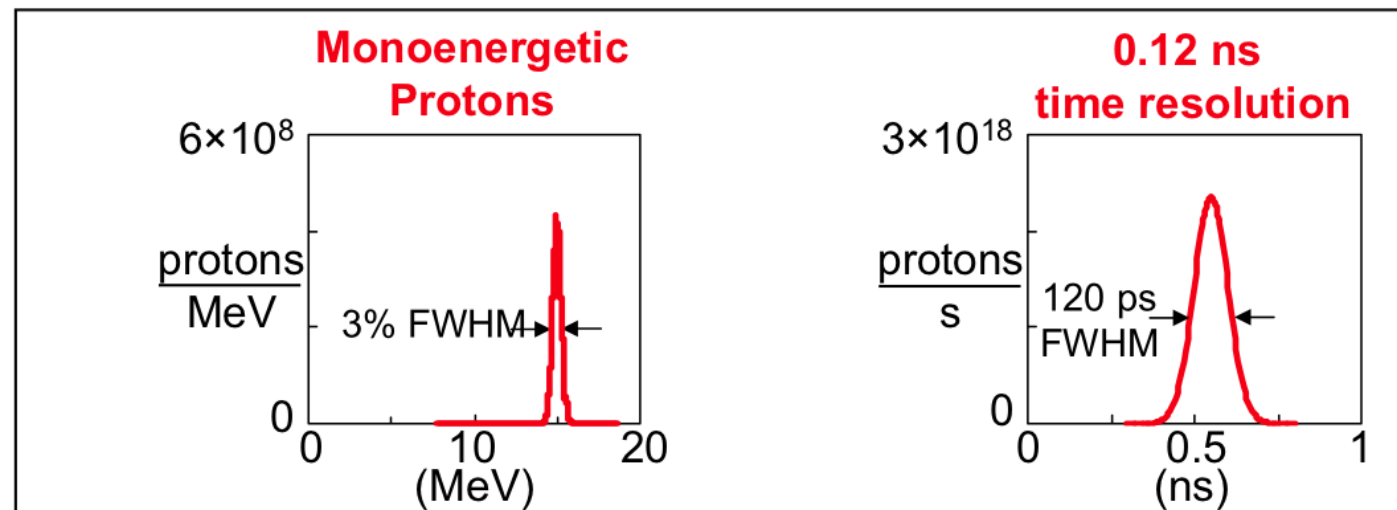
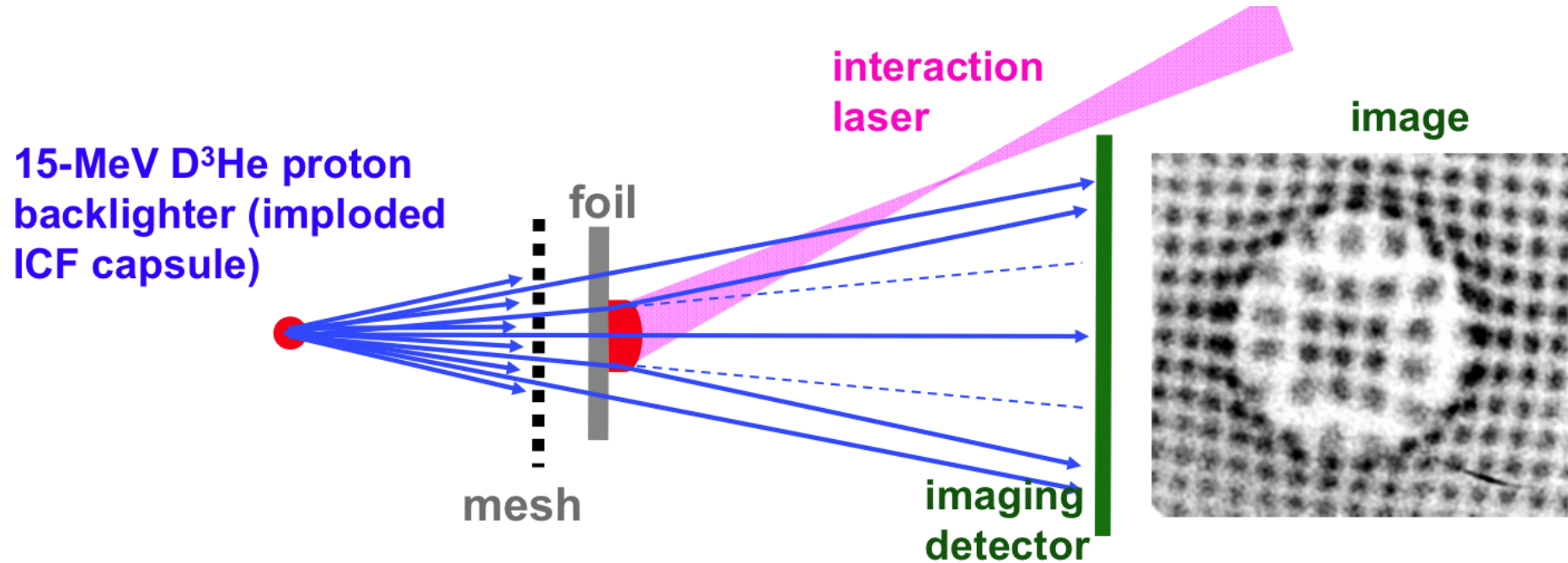


準単色15 MeVプロトン源としての爆縮プラズマの利用

[Ref] J. R. Rygg *et al.*, Science 319, p. 1223 (2008).

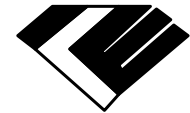


ILE, Osaka
S. Fujioka

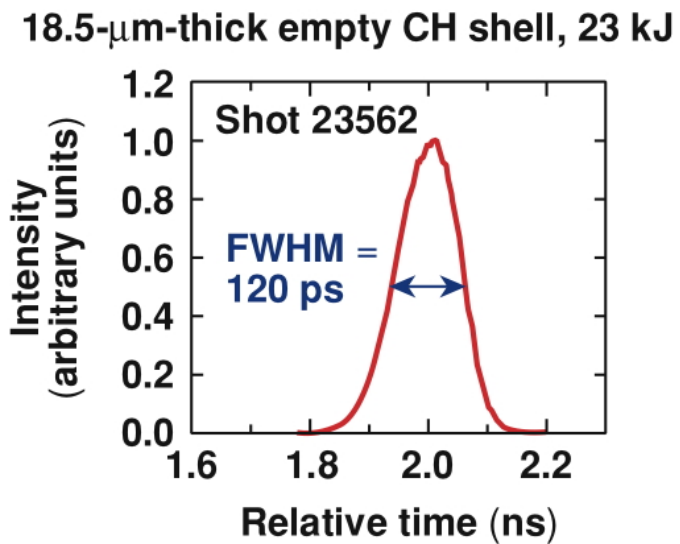
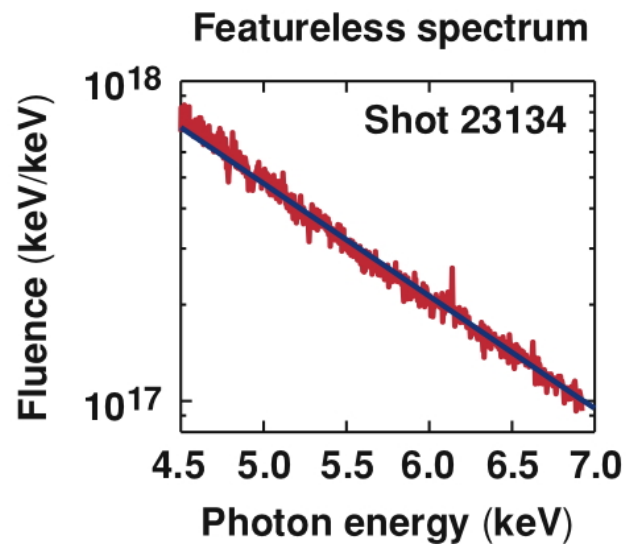
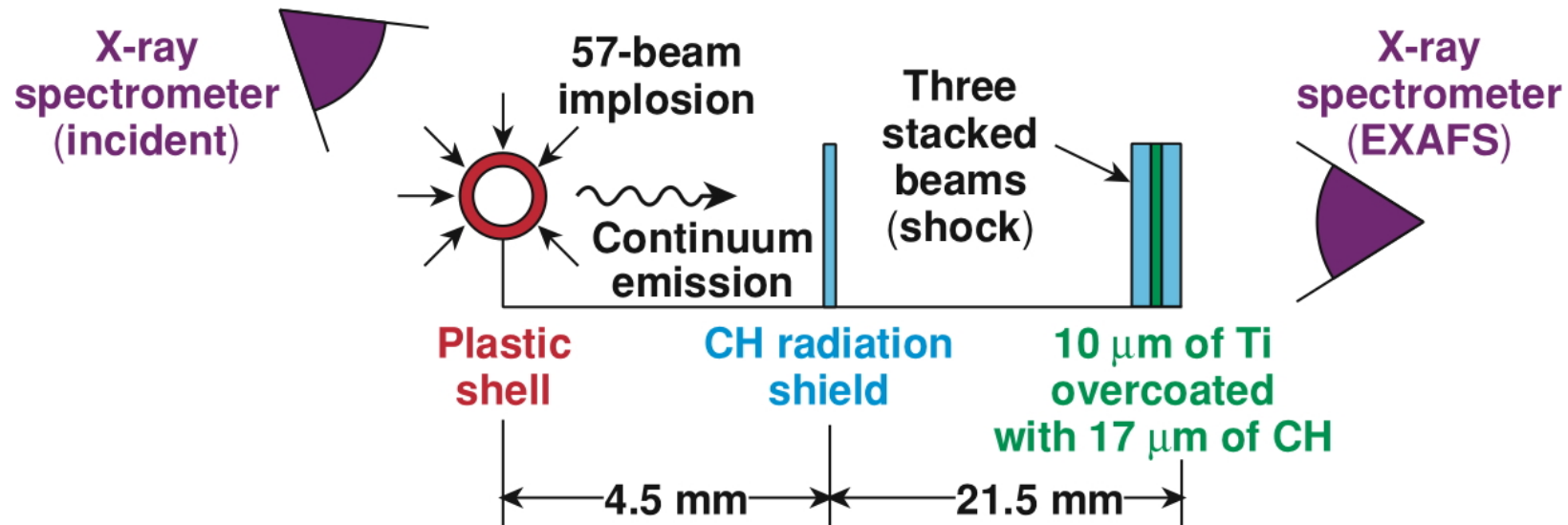


連続X線源としての爆縮プラズマの利用

[Ref] B. Yaakobi et al., Phys. Rev. Lett. 92, 095504 (2004).

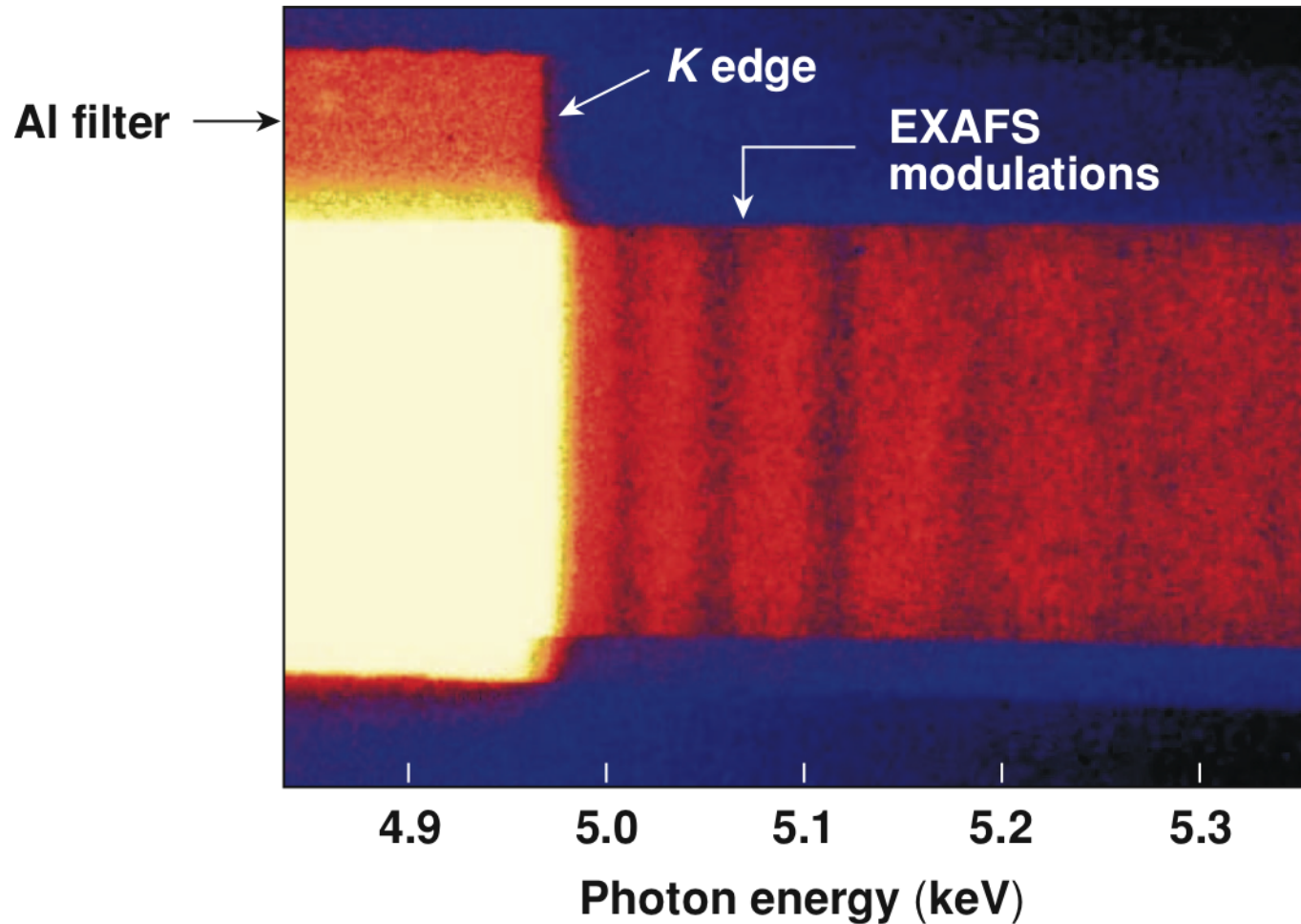


ILE, Osaka
S. Fujioka



滑らかな連続X線源（爆縮プラズマ）を用い、
K吸収端付近での広域微細構造(EXAFS)を観測

K吸収端近傍でのチタンの吸収分光データ

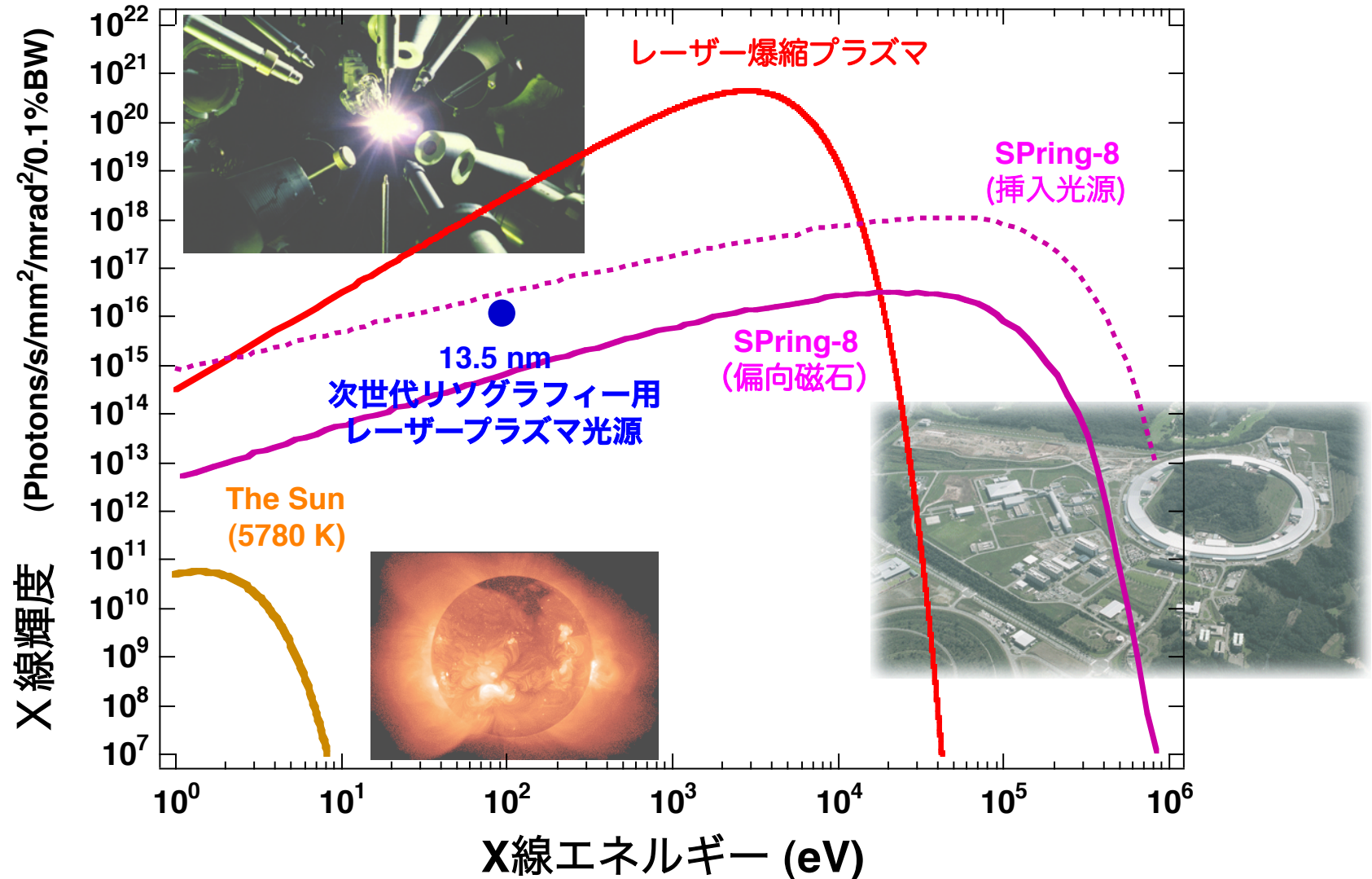


B. Yaakobi *et al.*, Phys. Plasma, Vol. 11, p. 2688 (2004).

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

光源の明るさの比較

高強度レーザーで生成したX線源の明るさは、巨大X線源を瞬間的に上回る

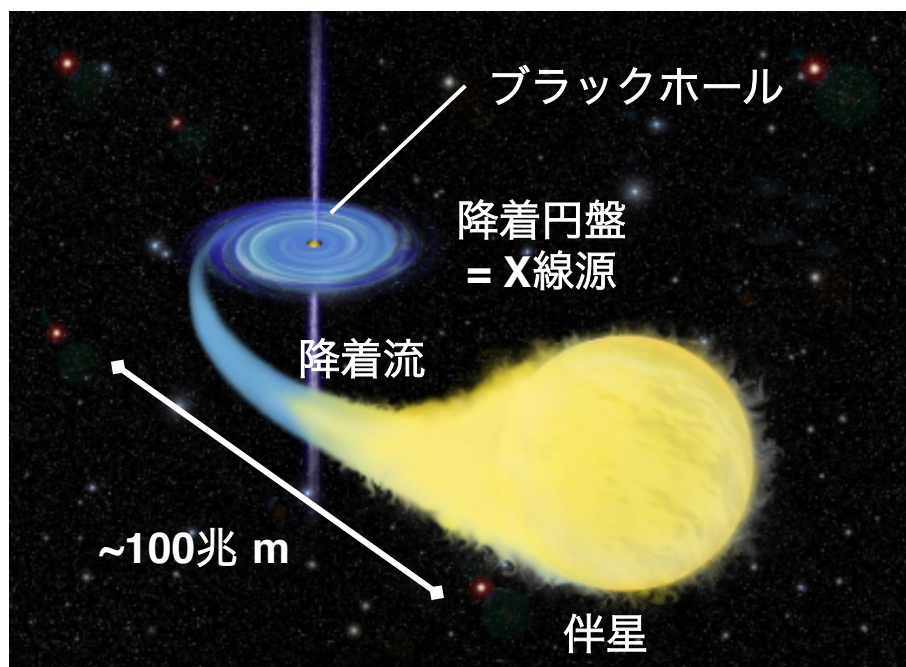


数ミリ・サイズの模擬宇宙を作り、ブラックホール周囲のX線発生機構を実験室で調べるのが可能に

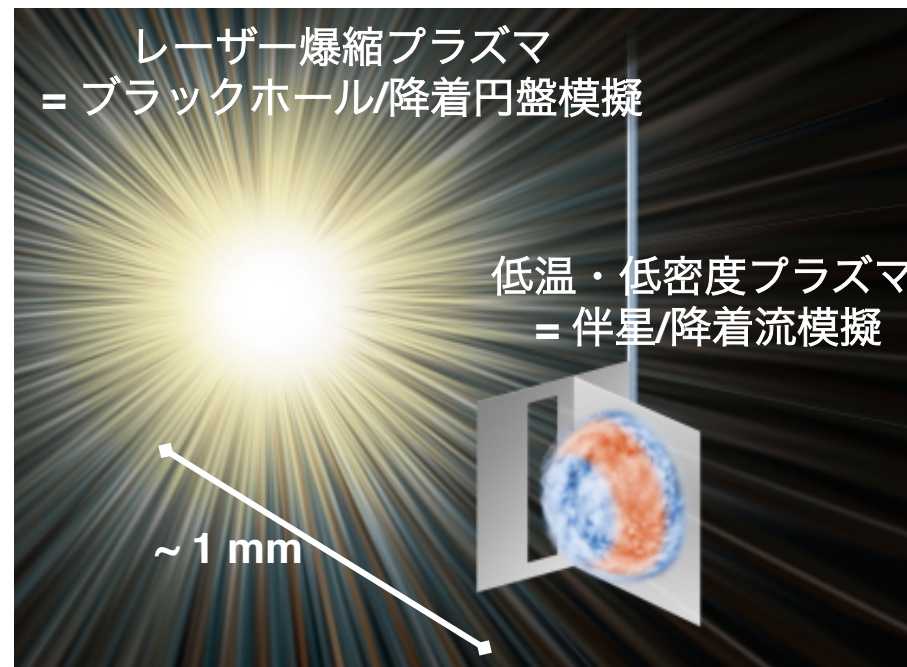


ILE, Osaka
S. Fujioka

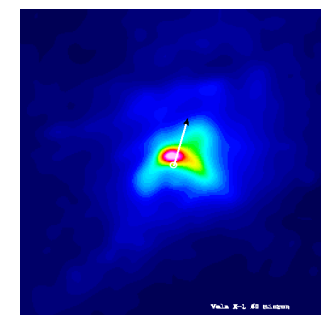
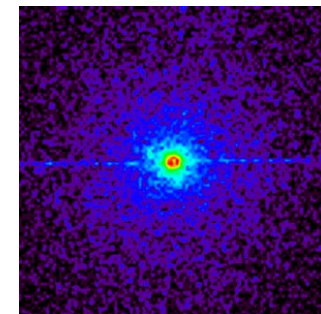
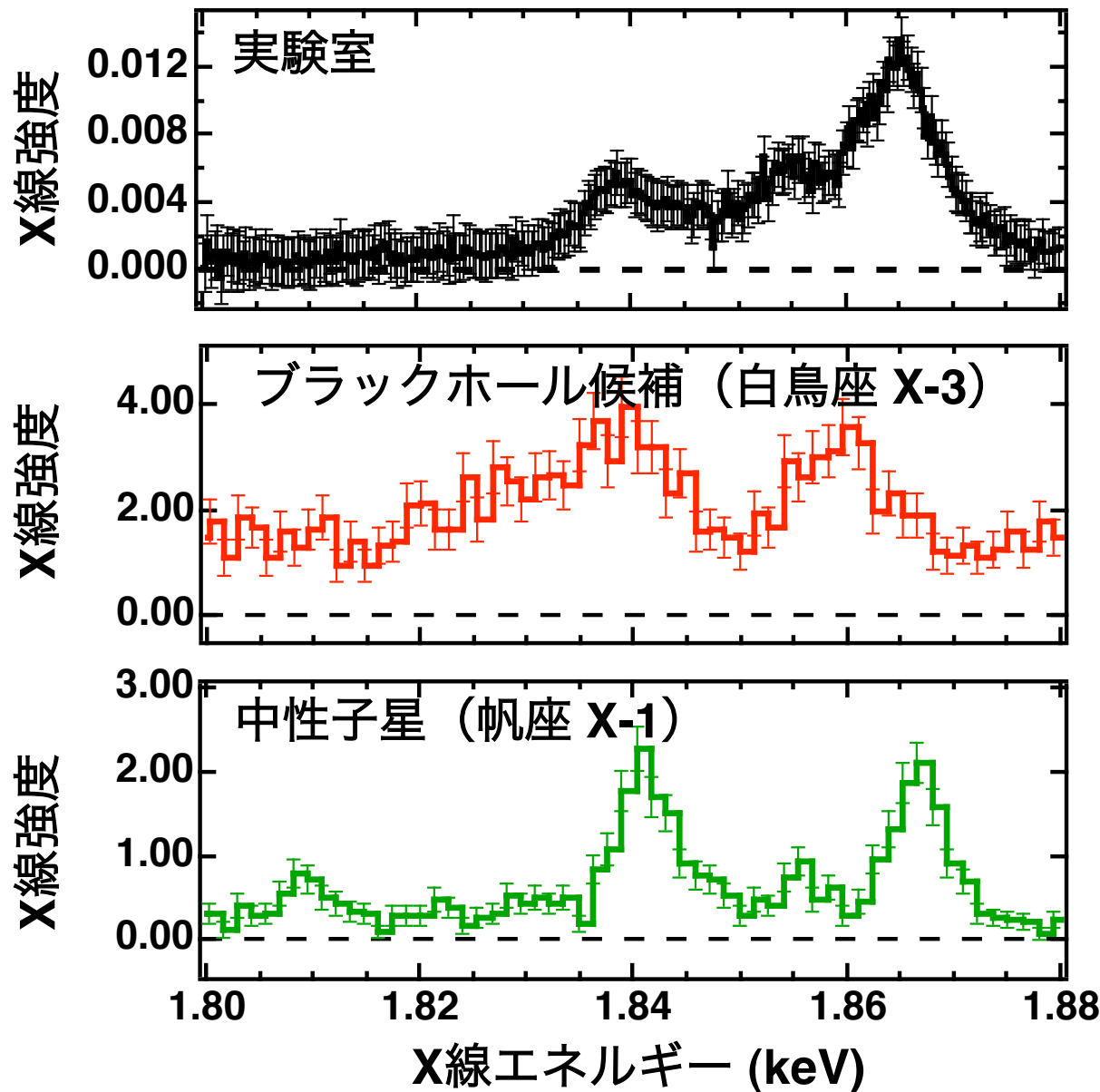
ブラックホールを中心に
持つ連星系の模式図



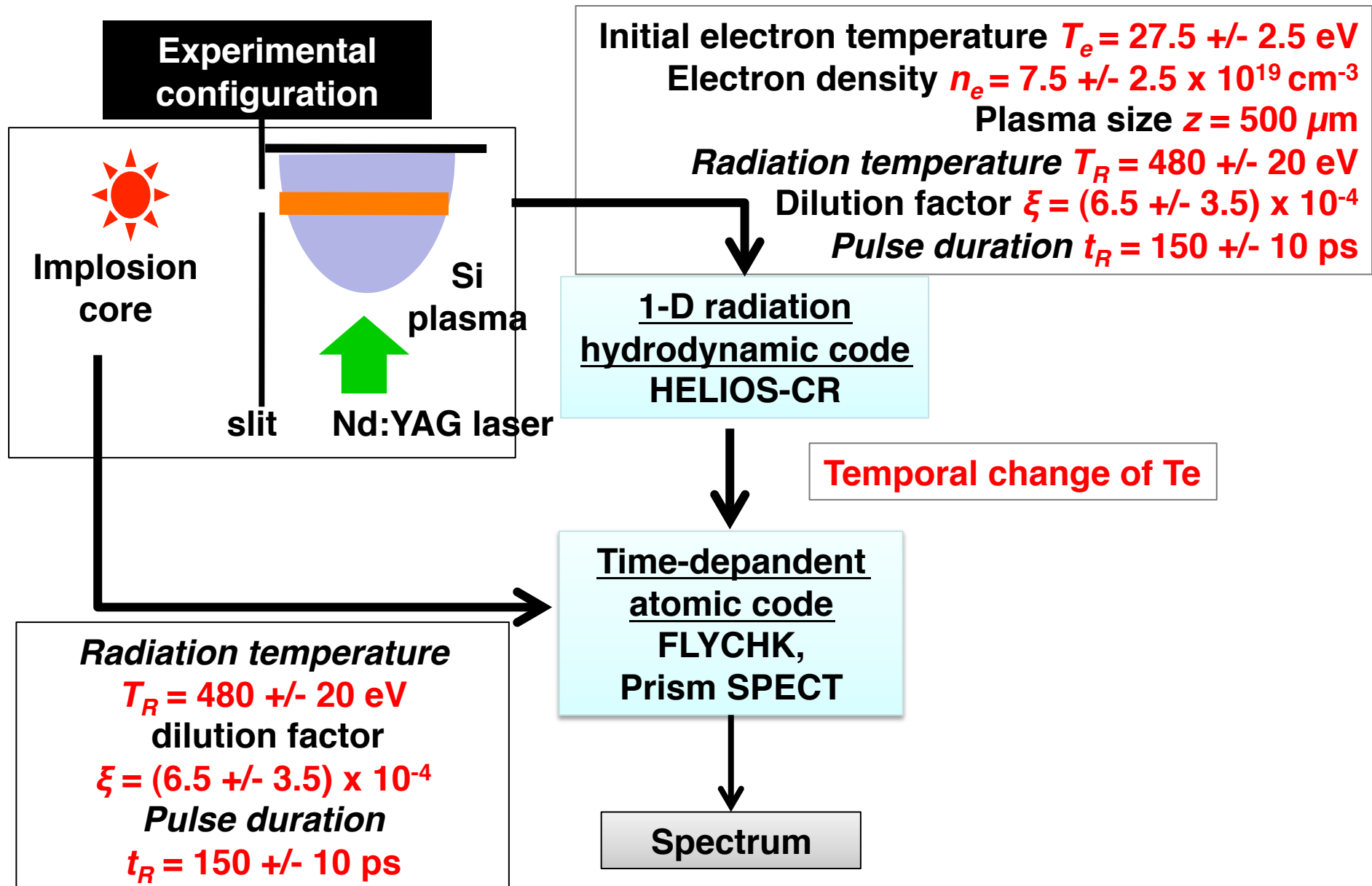
レーザー爆縮プラズマを
用いた模擬実験の配置図



宇宙における極限的なX線放射環境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

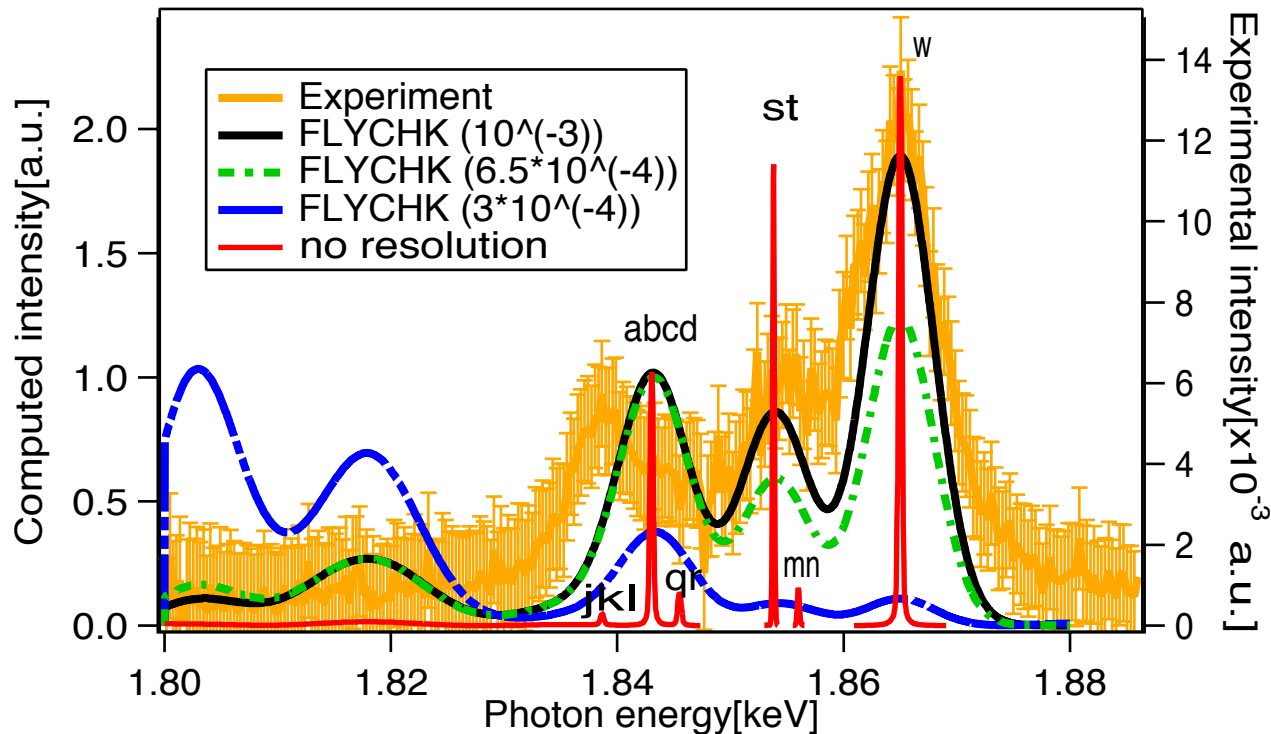


1次元の輻射流体コードと時間依存の原子コードを使い、 実験で得られたX線スペクトルを解析



FLYCHKコードは実験結果を良く再現する
PRISM-SPECTコードは1.855 keVの発光を再現しない

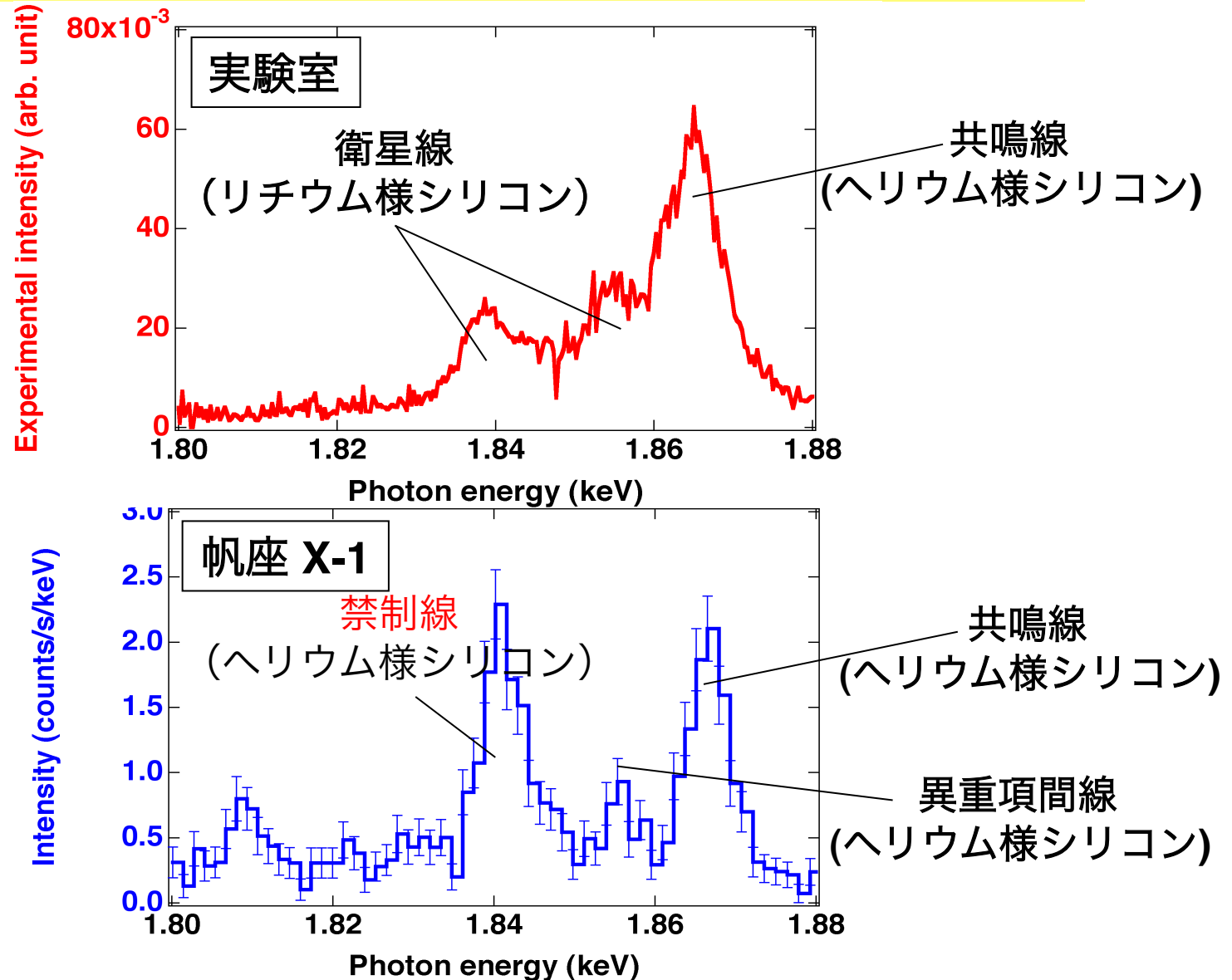
X-ray spectra - Lab. v.s. FLYCHK



input data
 [implosion core]
 T_r : 500eV
 Dilution factor: 1×10^{-3}
 FWHM: 160 ps
 [Si plasma (as peak)]
 T_e : 60eV
 n_e : 10^{20}cm^{-3}

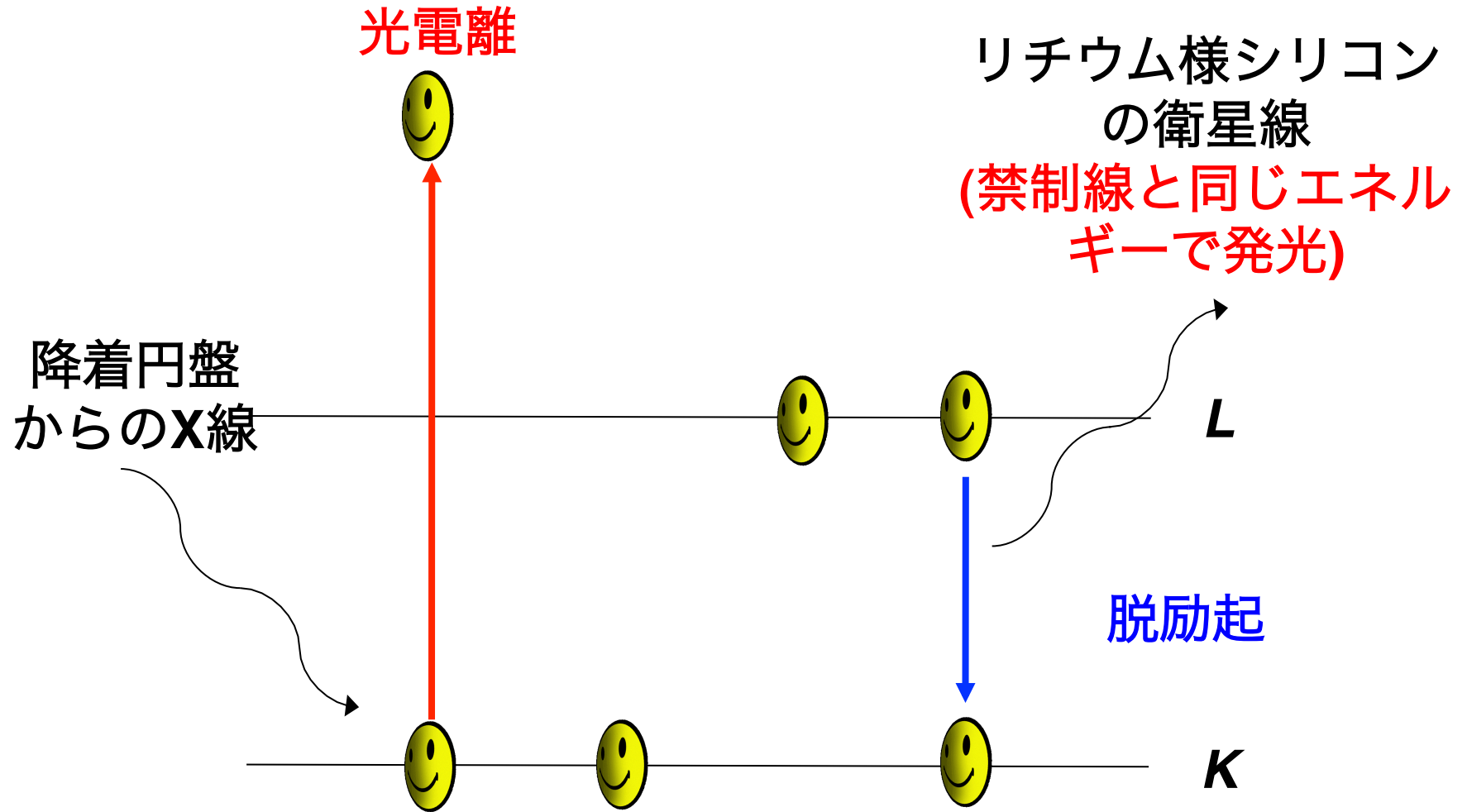
abcd: $1s2p^2 \rightarrow 1s^22p$, st: $1s2s2p \rightarrow 1s^22s$, w: $1s2p \rightarrow 1s^2$

従来の天文学の知識では、
実験室で取得されたスペクトルを説明出来ない！



*N. S. Schulz *et al.*, APJ, Vol. 564, p. L21 (2002).

Be様イオンのK殻電子がX線によって直接電離され、
内殻電離状態のLi様イオンが形成



天文学で考慮されていない過程でX線が放射されており、
ブラックホール周辺の温度、密度の推定値に大きく影響

今後のテーマは、光電離・励起が支配的なプラズマのX線吸収率及び光電離鉄プラズマの分光診断

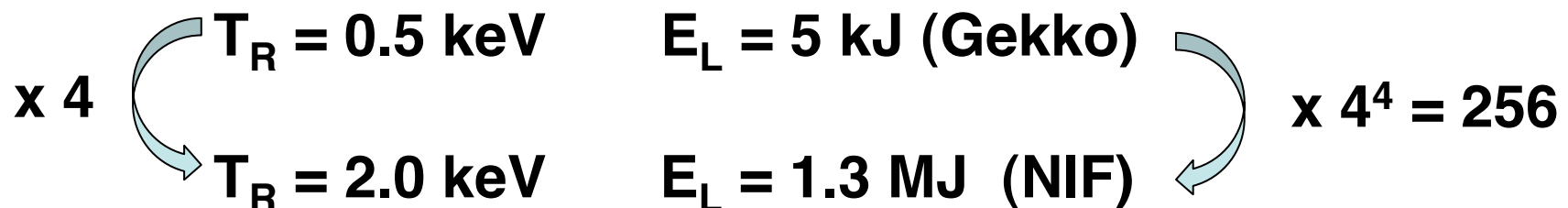
Intensity dependence of opacity of non-LTE photoionized plasma.

For intense external radiation, population of excited ions depends not only on T_e and n_e but also on intensity of radiation I_ν .

$$\mu(n_e, T_e, \nu, I_\nu)$$

K-shell spectroscopy of photoionized Fe plasma in laboratory.

H- & He-like Fe ions can be produced with 2 keV blackbody radiator. NIF is the unique facility to produced photoionized Fe plasma.



各国で次世代レーザー装置の建設が完了/進行中/計画中 国際連携を利用してアイディアの花を咲かす

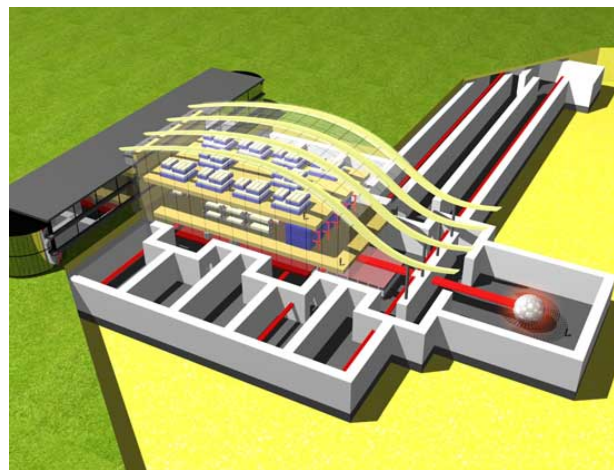


ILE, Osaka
S. Fujioka

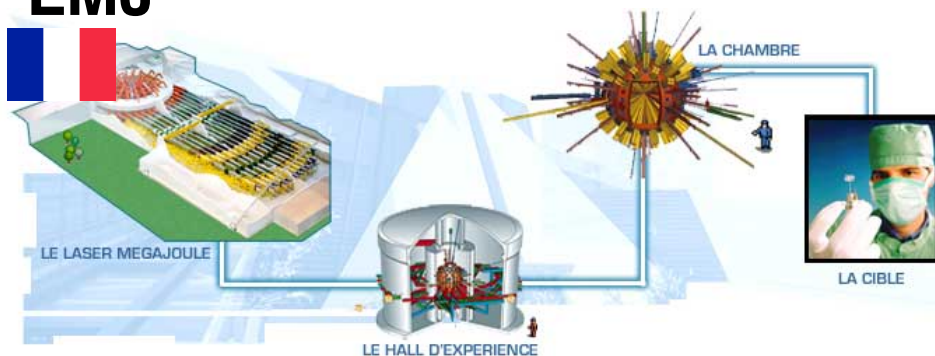
NIF



ELI



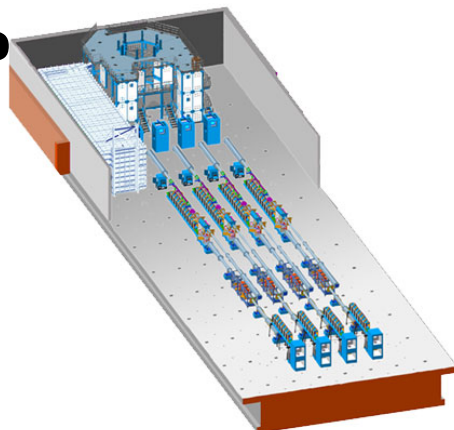
LMJ



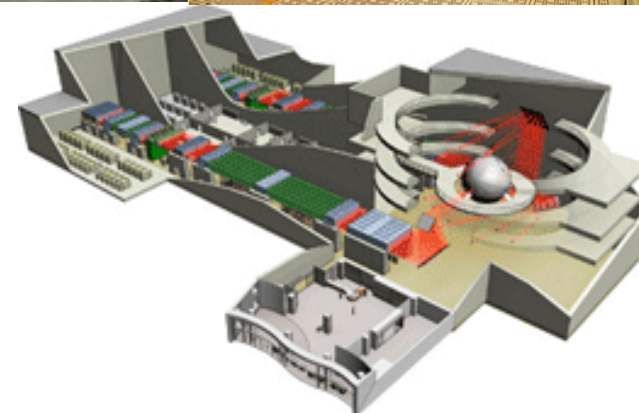
Shengguang III



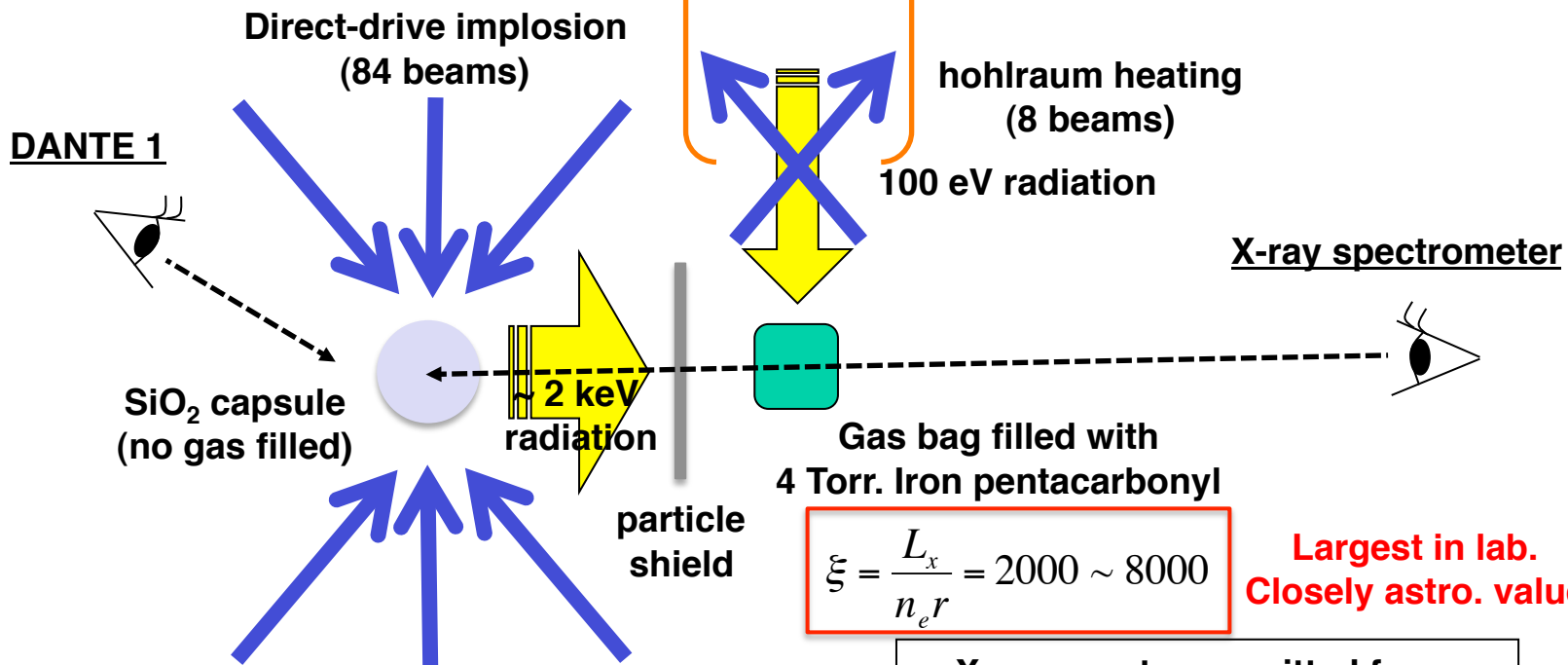
OMEGA-EP



HiPER



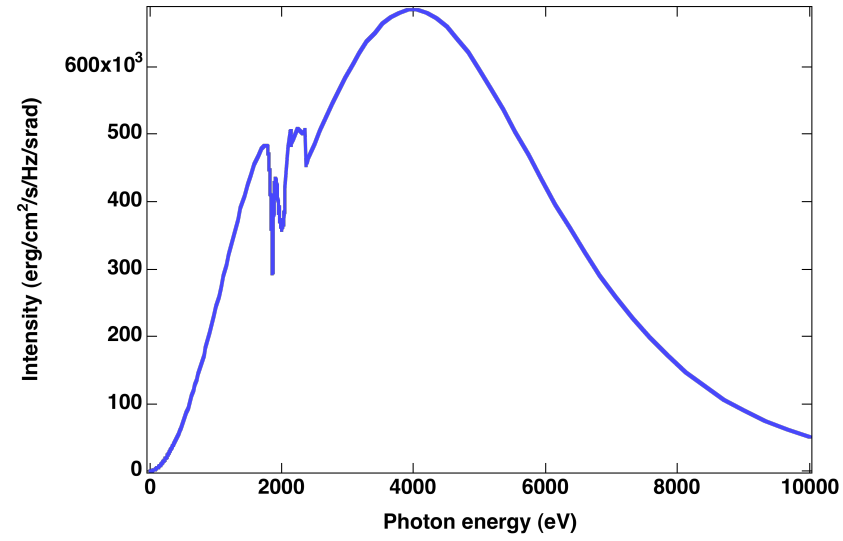
Side-view (emission & opacity measurement)



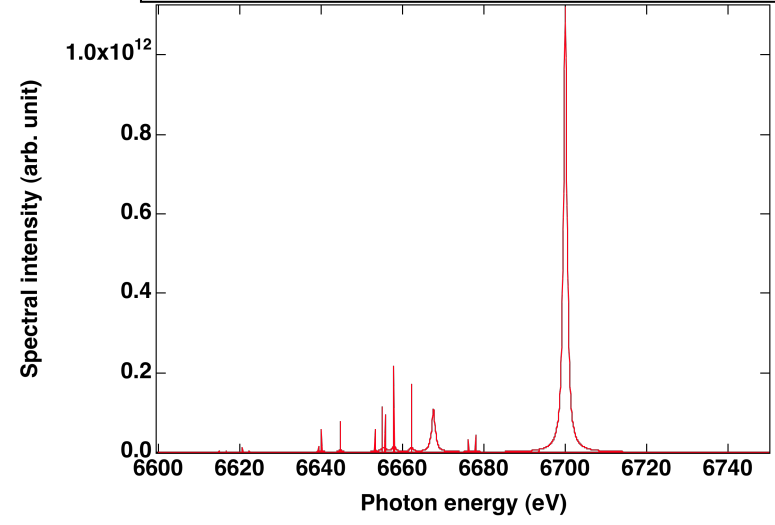
$$\xi = \frac{L_x}{n_e r} = 2000 \sim 8000$$

Largest in lab. Closely astro. value

X-ray spectrum emitted from the glass core (Calculation)



X-ray spectrum emitted from a photoionized Fe plasma (calculation)

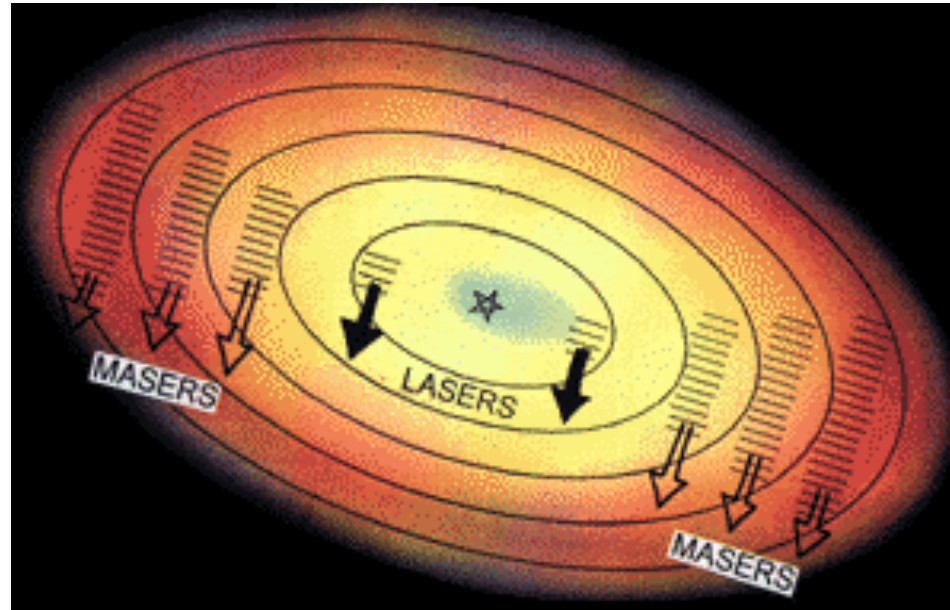


レーザーと赤外レーザー天体は観測*されている。
X線レーザー天体が存在している可能性はあるのか？



ILE, Osaka
S. Fujioka

*Strel'nitski et al., *Astronomy and Astrophysics*, Vol. 300, p. 843 (1995).



“Soft x-ray amplification by **Li-like** Al^{10+} and **Si¹¹⁺** ions in **recombining plasmas**”, Z. Xu et al., *Appl. Phys. B*, Vol. 50, p. 147 (1990).

Si XII 5f-3d, Si XII 5d-3pのレーザー発振@9 nm

光電離で生成されたヘリウム様シリコンが再結合する途中でレーザー発振している可能性があるかも。
→ 実験室でX線励起のX線レーザー発振を検証

=若手研究者が考える20年で核融合 炉を実現する方法= レーザー型原型炉の場合

藤岡 慎介

大阪大学レーザーエネルギー学研

究センター

要求されるスペック (実績@場所)

ターゲット利得年70回 (30@LLNL)

2010年8月11日

圧縮レーザー 1.1 MJ (1.8 MJ@LLNL)

加熱レーザー 100 kJ (10 kJ@阪大)

繰り返し 16 Hz (23J/10Hz@阪大, 65J/10Hz@LLNL)

レーザー効率 12% (6%/10 Hz@阪大)

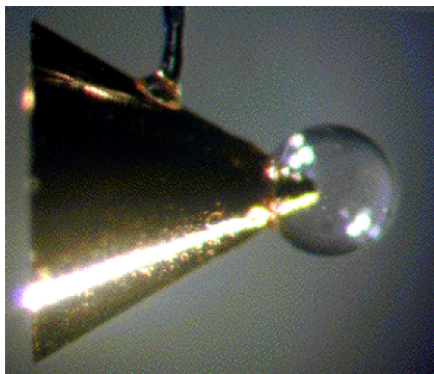
ターゲット供給 100 m/s (100 m/s@広島大)

ターゲット位置精度 30 $\mu\text{m}/5\text{ m}$ (150 $\mu\text{m}/5\text{ m}$ @岐阜大)

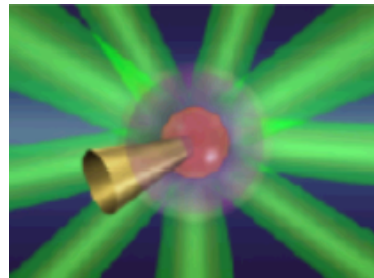
ターゲット製作 16 Hz@工場 (3個/day@Rochester)

レーザーで生成した高温・高密度水素中で 核融合反応を起こしてエネルギーを取り出す

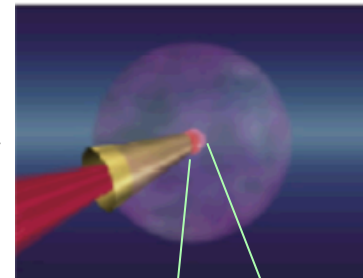
ガイドコーン付き
核融合燃料球



多ビームによる
高密度圧縮



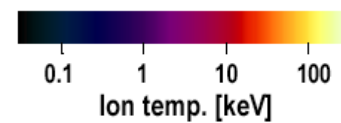
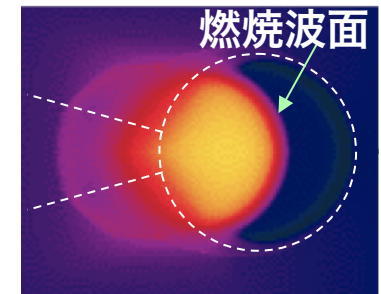
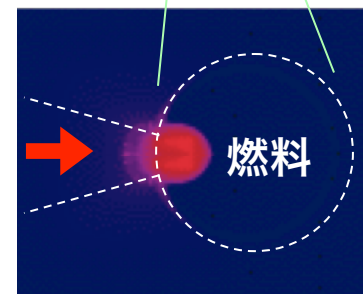
短パルスレーザー
による加熱



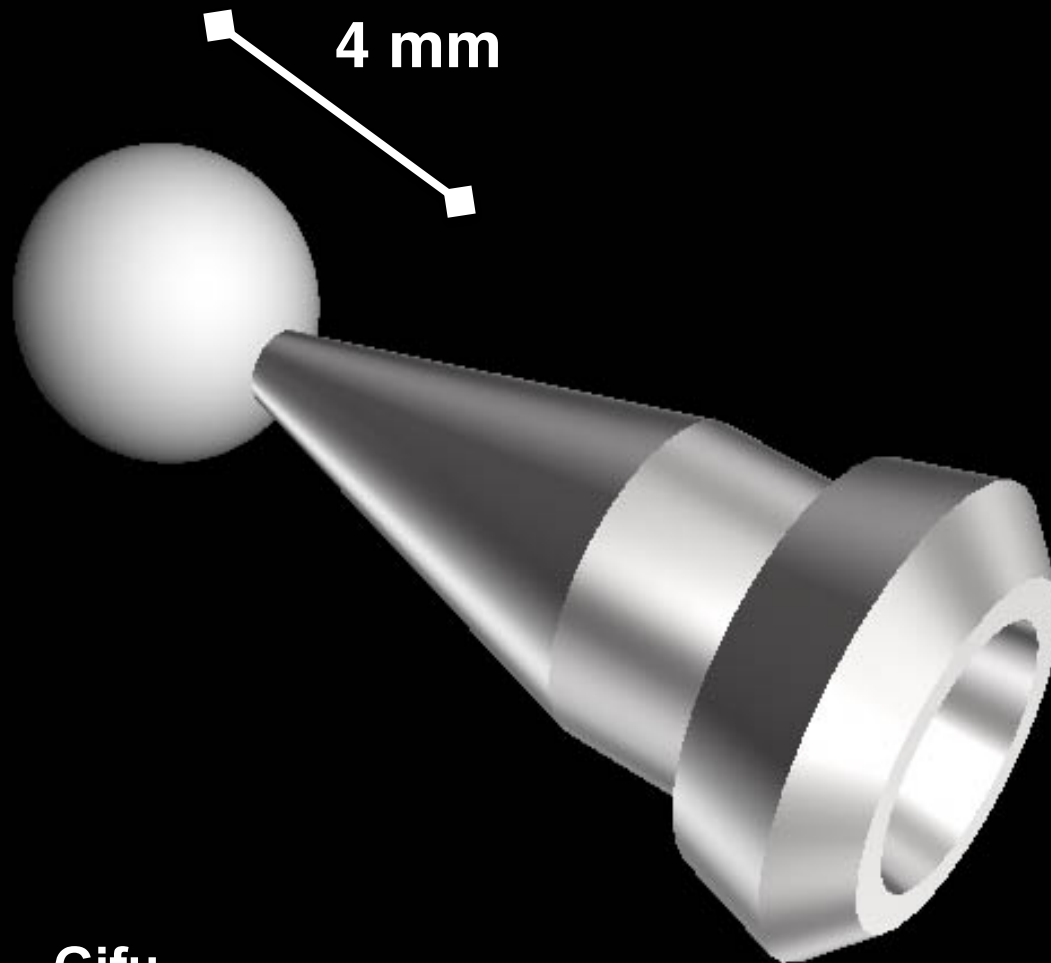
点火と燃焼



加熱レーザー



レーザー核融合発電炉はパルス運転
固体の核融合燃料を16 Hzで連続供給し、
1.2 MJ (圧縮1.1 MJ + 加熱0.1 MJ) のレーザーを16 Hzで照射



技術成熟度 (TRL) 評価について

- ・ 技術成熟度 (TRL; Technology Readiness Levels) 評価法は、多様なプロジェクトを進めるNASAにおいて、個々の技術の成熟度評価や異なる技術の成熟度の比較をサポートするための系統的な評価法である。
- ・ 新技術開発プロセスを補助し、技術者と管理者を繋げるツールとして、科学・技術の進展度の共通理解のためのツールとして用いられる (リスクマネジメントの指標としても有用である)。
 - 米国原型炉設計チーム (ARIESチーム) によって、核融合炉開発のTRL評価が限定的ではあるが、着手されている。
 - わが国では、トカマク炉型式における技術開発の到達度評価結果の概略が示されているが、多種多様な技術を含めたTRLに基づく評価例は見られない。

Risk	High						Low		
TRL	1	2	3	4	5	6	7	8	9
段階	研究段階			開発段階			実用段階		
技術A	completed						in progress		
技術B	completed					in progress			
技術C	completed			in progress					
技術D	completed		in progress						

completed
 In progress

レーザー型原型炉に必要な技術の9段階のTRL (Technical Readiness Level) 評価を独断で実施(プロジェクト)

- National Ignition Facilityの点火・燃焼によってレーザー核融合の基本物理は検証される。
- 高速点火方式固有の物理の検証については、阪大FIREXプロジェクトの結果を待つ必要がある。

• レーザー

- 必要なレーザー技術の大半は実現出来ると予測
- レーザー媒質及びレーザーダイオードの低温冷却運転、大型光学素子の寿命など、炉固有の要求に関する研究・開発が必要

• 核融合燃料供給

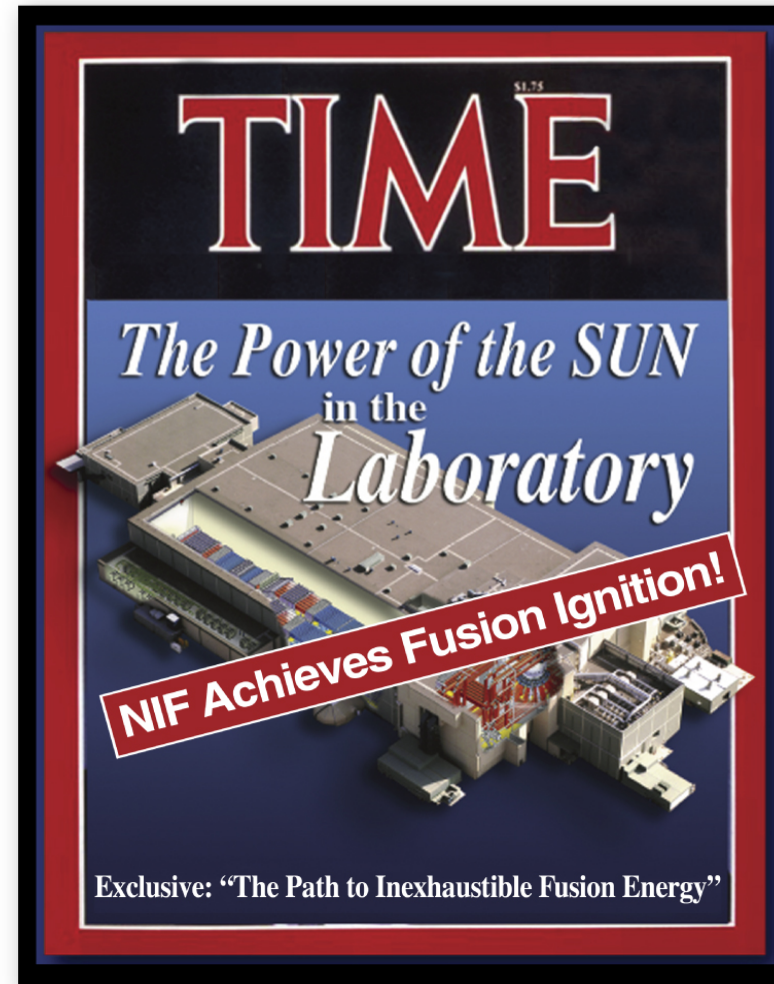
- 核融合燃料の連続供給はレーザー炉固有の研究課題

人類初の制御核融合の点火は目前に迫っている

A glimpse into the future



The National Ignition Facility



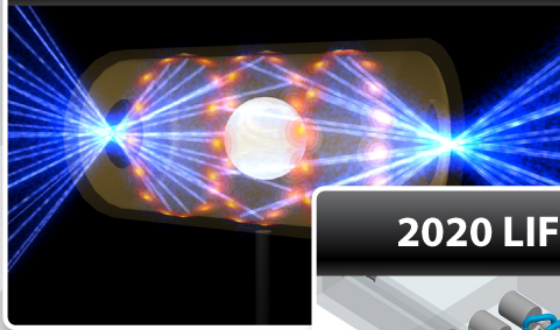
NIF-1106-12932r1
02EIM/sb

シングルショットNIFと16 Hz発電炉の間には技術ギャップが存在

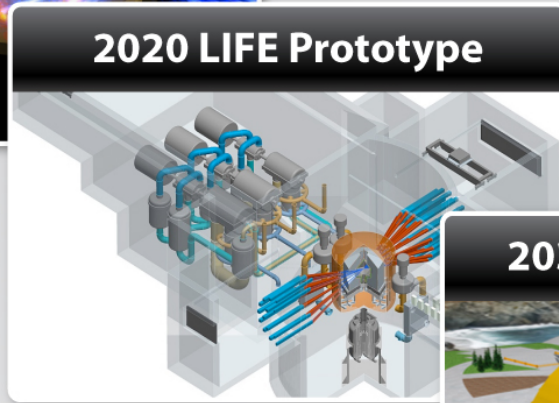
点火・燃焼実証に対する自信と 高繰り返し高効率レーザーの発明が原動力

LIFE Roadmap

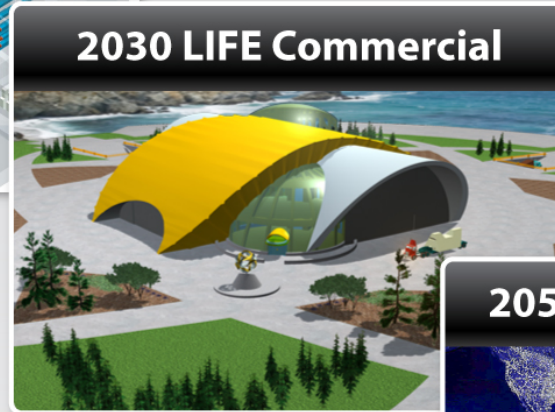
2010 NIF Ignition



2020 LIFE Prototype



2030 LIFE Commercial

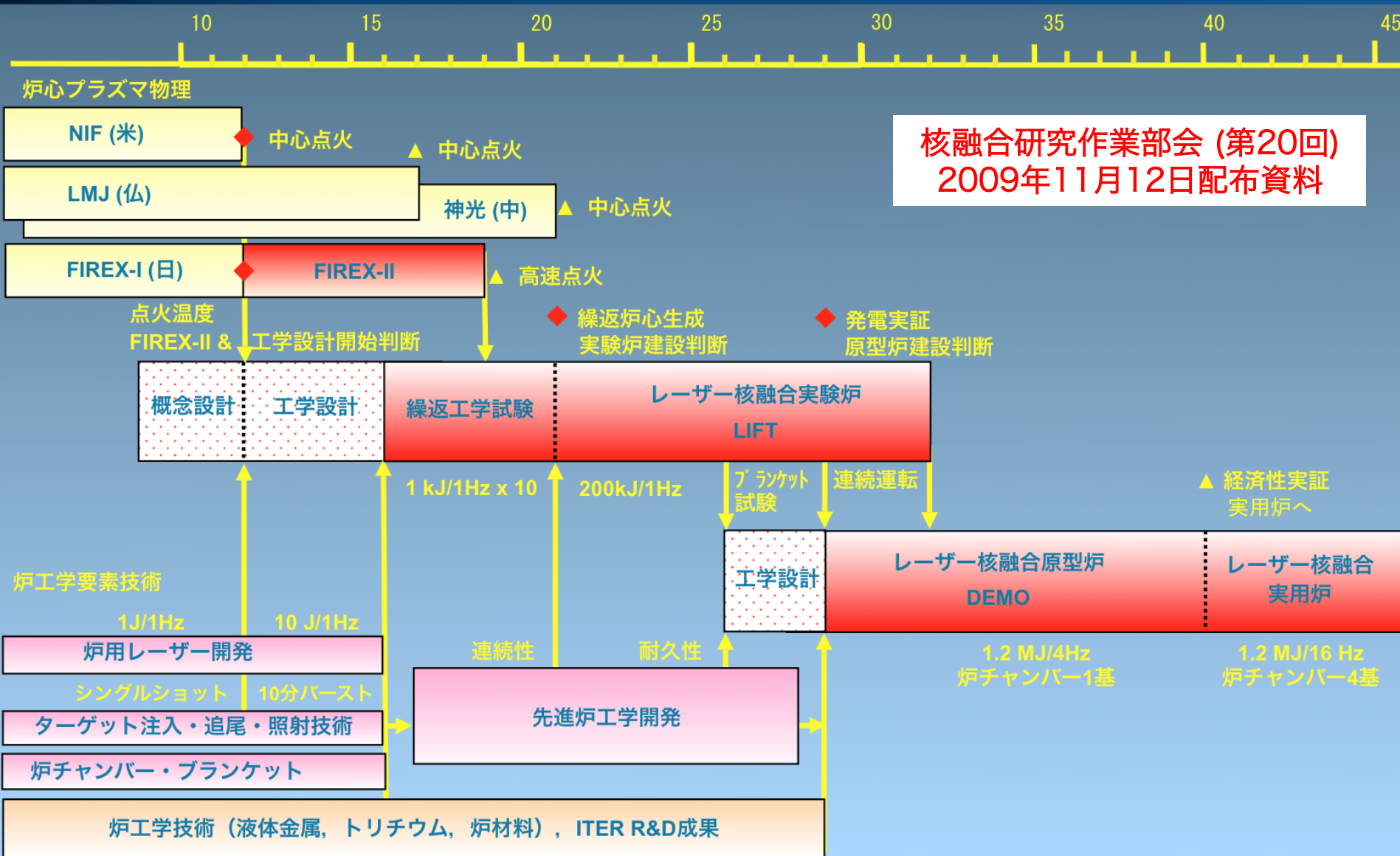


2050 Fleet Incorporated



TRL評価を通じて、
欠けているものを洗い出す

レーザー核融合実験炉構想 LIFT は物理・工学研究を統合し、2030年頃に発電実証



レーザー核融合実験炉LIFTはレーザー版の早期実現計画である。09/11/7

炉心プラズマについては、実燃料での加熱実証実験と炉心設計に使えるシミュレーション開発が必要

		現状	目標	TRL: 評価の根拠
プラズマ物理	高密度圧縮	x600 (模擬燃料)	x2000	6: 核融合燃料の衝撃波パラメーターを除いて、圧縮に関わる物理は理解されている。
	追加熱効率	5 - 20%	20%	4: 加熱効率の目標値は達成しているが、加熱効率を左右する物理の完全理解に至っていない。
	燃焼率		> 30%	3: 理論的・数値的検証は進んでいるが、NIFの点火燃焼実験が必要
炉心プラズマ	高密度圧縮シミュレーション・モデル			3: 加熱コーン付き爆縮におけるベンチマークが不十分
	追加熱シミュレーション・モデル			2: マルチスケールの非線形現象を扱うため、実験データベースに基づいた経験的な取扱が重要
	燃焼シミュレーション・モデル			2: NIF実験での検証が必要

炉固有の課題（低温運転・大型素子の高レーザー耐力・耐中性子）に集中した研究が必要

	細目	現状	目標	TRL・評価の根拠
励起用LD開発	電気-光効率	50%	70%	5: チャンピオンデータでは70%の実績あり、産業界からも効率向上の要望は大きい
	寿命	2 yr.	20 yr.	1: 原理的に冷却による長寿命化するが、常温運転を指向する産業界と逆行する開発要
	コスト	¥1K/W	¥10/W	1: 切り札は市場規模の拡大。レーザー核融合により市場規模は現在の100倍に成長
レーザー材料	光-光変換	11 % (HALNA)	30 %	6: 飽和増幅や冷却型Yb:YAGによる高効率化など現状技術の延長で達成可能
	大型化	10 cm	10 cm	6: セラミクス技術によるチャンピオンデータ
	繰り返し	10 Hz	16 Hz	7: HALNA, Mercuryプロジェクトの実績
光学素子	耐力	N/A	2 yr.	2: 大型素子はシングルショットの経験のみ、マイクロスケールのダメージ成長の理解が鍵
	中性子対策	N/A	2 yr.	2: 寿命評価の初期研究が始まった段階

シングルショットに使ったターゲット

TRL-3/3 燃料供給

ト技術は完成

大量製造、連続供給を実現するプ

	細目	現状	目標	TRL: 評価の根拠
製造技術	真球性・一様性	91%	99%	7: NIF点火成功はターゲット技術の完成を意味
	低密度化	40 mg/cc	10 mg/cc	5: 低密度材料そのものは存在。球殻製造に適した材料の探索が必要
大量生産技術	製造速度	N/A	16 Hz @工場	1: テンプレートは1 Hzで製造可能済み。クライオDT燃料の連続充填は未経験。
	搬送	N/A	1	1: 方式概念の提示有り
	低価格化	N/A	¥10/個	1: 製造自動化と表裏一体
連続供給	速度	100 m/s	100 m/s	7: システム化を待つ段階
	位置精度	150 μ m	30 μ m	2: システム全体の精度向上が必要
	姿勢制御			2: 長尺飛行後の姿勢確認が必要
トラッキング技術	検出精度	0.2 μ m	30 μ m	5: 技術的には十分可能だが、中性子遮蔽への配慮を検討することが必要
	レーザーへのフィードバック			1: fail-safe以外の能動的制御を検証している例は見あたらない。

が必要

- レーザー核融合による点火・燃焼はまさに目前だが、シングルショットのNIFと炉の間には技術ギャップが存在
- 炉壁材料、炉計装については先行する磁場プラズマ研究との連携が重要
- **死の谷**の有無を確認するには、以下の課題に対するプロジェクトの立ち上げが必要
 - ◆炉心プラズマ設計用のシミュレーション
 - ◆炉用レーザーの低温技術、大型素子の高耐力化
 - ◆核融合燃料の連続製造、連続供給技術開発
- 原型炉が出来た時に、日本発の技術が幾つ利用されるかが本当の勝負である。レーザー、ターゲット技術開発を先取りしたプロジェクトの立ち上げは、原型炉の早期実現を後押しする。

2030年代は本当に大変な次期だと予測されます 不安な未来の為に何が出来るのか？

Wikipediaが語る2030年代

核融合エネルギーの実現が、地球を救う一助になれると信じています



中国の人口がピークの16億人！
日本の厚生年金が破綻！
アメリカの社会保障信託基金の残高ゼロ！

し、

トリチウム製造炉としての利用は

トリチウム貯蔵量の予測

検証の価値有り?

by M. Abdou, Workshop on CTF

