

超低速ミュオン生成のための Lyman- α レーザーの開発

大石 裕

高エネルギー加速器研究機構

第7回 レーザー学会「ユビキタス・パワーレーザー」専門委員会
第7回 科学技術交流財団「マイクロ固体フォトニクス」研究会

2019年12月19日 於：高エネルギー加速器研究機構

目次

背景及び目的

ミュオンとは
超低速ミュオンの発生とライマン α 光源の必要性

ライマン α 光発生原理

ガス中の共鳴四波混合
従来の光源と目標とするレーザー概要

ライマン α レーザーの構築

システム概要
レーザー媒質の選定及び評価
波長変換および装置
ライマン α 光発生

まとめ

光源の展望
謝辞

ミュオンとは

レプトン	電荷	電子ニュートリノ	ミューニュートリノ	タウニュートリノ
		ν_e	ν_μ	ν_τ
		電子	ミュオン	タウオン
	-1	e	μ	τ

1935年：湯川秀樹博士が π 中間子の存在を提唱

1937年：理化学研究所の仁科芳雄博士が霧箱により宇宙線ミュオンを観測



宇宙線ミュオン写真



ミュオンの特徴

- 質量：電子の207倍、陽子の1/9倍
- 寿命：2.2 μ 秒
- 電荷：約1で正と負のミュオンが存在する
- 崩壊：正 \rightarrow 陽電子とニュートリノ
負 \rightarrow 電子とニュートリノ

正・負ミュオンの物質中での特徴

- 正ミュオン：原子間にとどまり、局所的な磁場によりスピン方向が変化する。電子と結合すると水素原子のような振る舞いをする。
- 負ミュオン：電子の振る舞いをして原子核に束縛され、物質内の非破壊元素分析に利用される。

素粒子物理定数の超精密測定

異常磁気能率 (g-2) の超精密測定

磁場の向き

$$\vec{\mu} = g \frac{e}{2m_\mu} \vec{S}$$

m ミュオンの質量
e 素電荷
S ミュオンのスピン
 μ ミュオンの磁気モーメント

ミュオン異常磁気能率: g

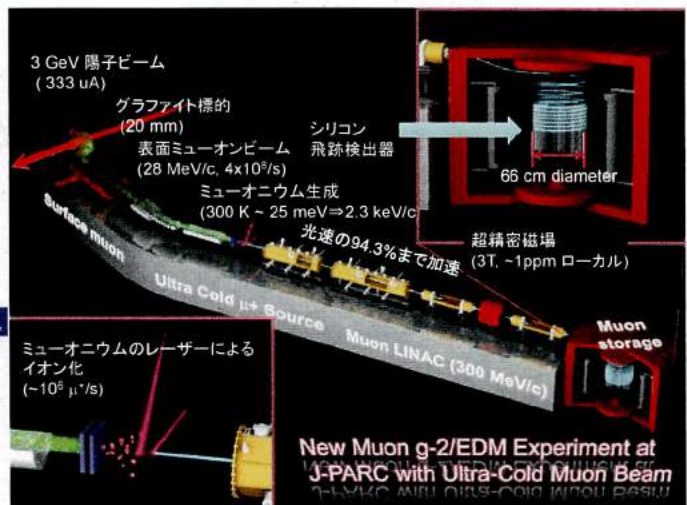
実験値	2.0023318414(12)
理論値	2.0023318366(10)

有意なずれ

標準理論

- 電磁気力
- 強い相互作用
- 弱い相互作用

標準理論を超えた物理?



測定原理

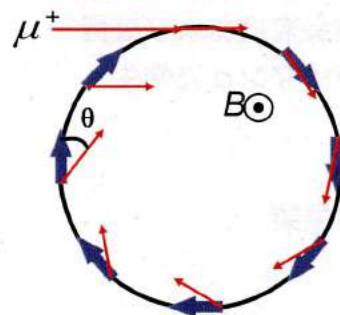
- 偏極した Muon ビームを Storage Ring に入射
- スピン歳差運動(ω_s)と運動量方向(ω_c)のずれの周期

$\omega_a \propto (g-2)$ を測定

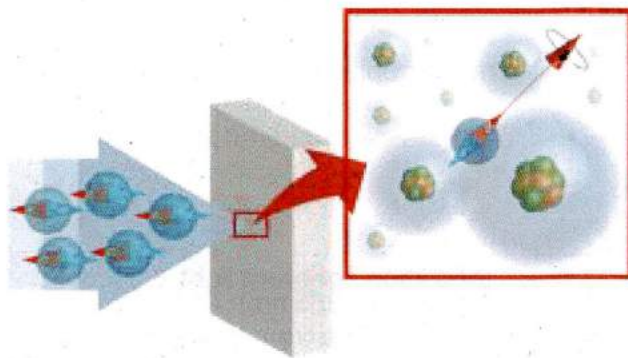
$$\omega_s = \left[1 + \gamma \left(\frac{g-2}{2} \right) \right] \frac{eB}{mc\gamma}, \quad \omega_c = \frac{eB}{mc\gamma}$$

$$\Rightarrow \vec{\omega}_a = \frac{e}{mc} \left[a_\mu \vec{B} - \left(a_\mu - \frac{1}{\gamma^2 - 1} \right) \vec{\beta} \times \vec{E} \right]$$

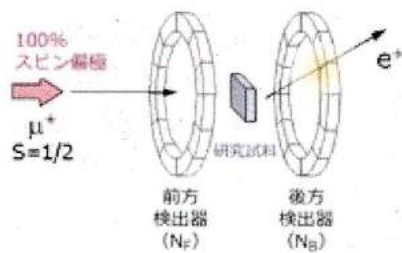
- 磁場の精密測定
- Muon の崩壊時の Parity の破れ
- “Magic Momentum”



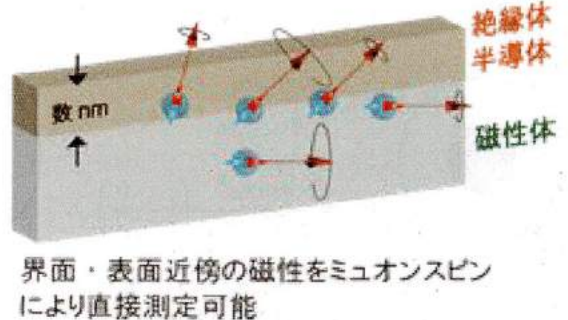
磁場顕微鏡 (ミュオンスピン緩和法)



物質中に入射したミュオンが崩壊
↓
スピンの向きに依存した陽電子を放出
↓
局所的な磁場測定が可能

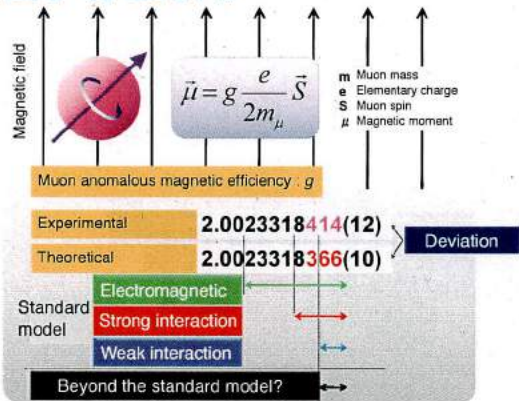


非対称度 = $\frac{[(N_F) - (N_B)]}{[(N_F) + (N_B)]}$
↓
ミュオンスピン緩和
↓
局所場の大きさ・揺らぎ

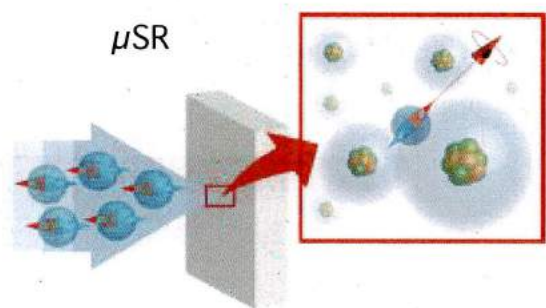


ミュオンビーム応用と課題

素粒子物理応用



物性研究応用



表面ミュオンビーム @ J-PARC

Beam energy : 4.1 MeV
Energy distribution : 15%
Pulse width : ~100 ns

素粒子物理応用

- 低いビーム特性 (M²)
- 繰返し測定における系統誤差

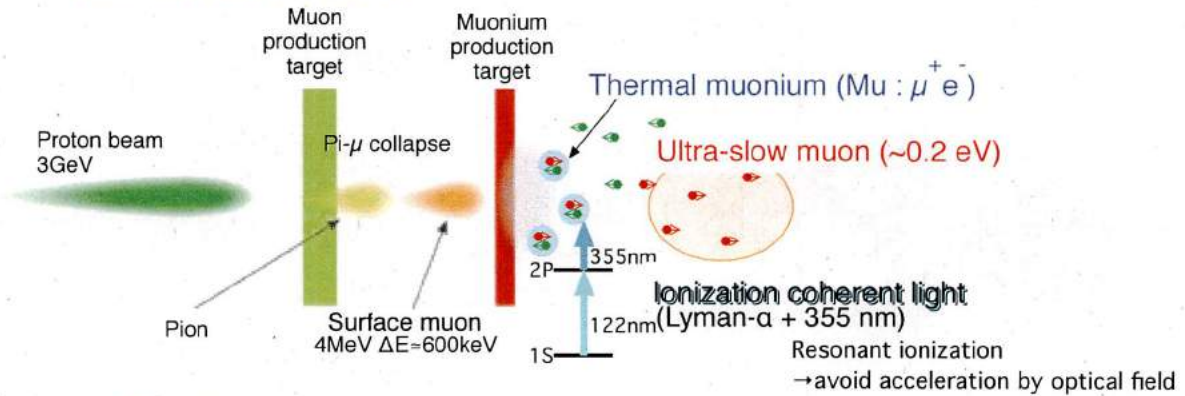
物性研究応用

- 打込み深さ分散による空間分解能低下

エネルギー分散の極めて小さいミュオンビーム発生が課題

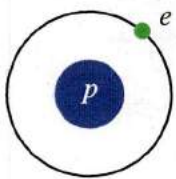
レーザーイオン化による超低速ミュオン発生

ミュオニウムの共鳴イオン化



Lyman- α 波長の決定

水素



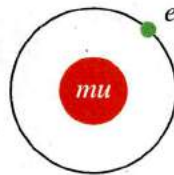
$$r_{m_H} = \frac{m_p m_e}{m_p + m_e}$$

$$E_H = \frac{r_{m_H} e^4}{2(4\pi\epsilon_0 \hbar)^2} \left(1 - \frac{1}{n^2}\right)$$

$$= 10.198716 [\text{eV}]$$

$$= 121.5698 [\text{nm}]$$

ミュオニウム



$$r_{m_{Mu}} = \frac{m_{mu} m_e}{m_{mu} + m_e}$$

$$E_{Mu} = \frac{r_{m_{Mu}} e^4}{2(4\pi\epsilon_0 \hbar)^2} \left(1 - \frac{1}{n^2}\right)$$

$$= 10.155157 [\text{eV}]$$

$$= \underline{122.0913 [\text{nm}]}$$

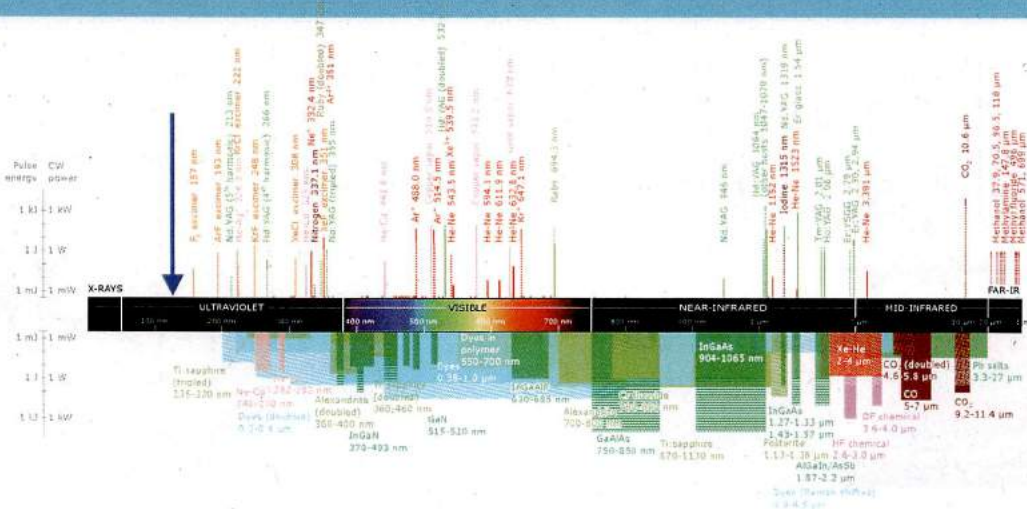
$$m_e = 0.5109989 \text{ MeV}/c^2$$

$$m_p = 938.2720813 \text{ MeV}/c^2$$

$$m_{mu} = 105.65837 \text{ MeV}/c^2$$

2014 CODATA

真空紫外 (ライマン α) の特徴

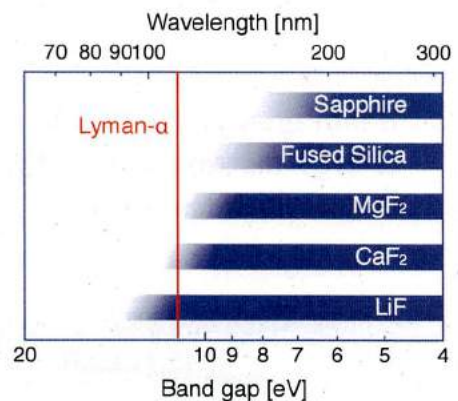


Lyman- α 波長の発生の難しさ

- 直接発振する固体レーザー媒質が無い
- 非線形結晶が無い

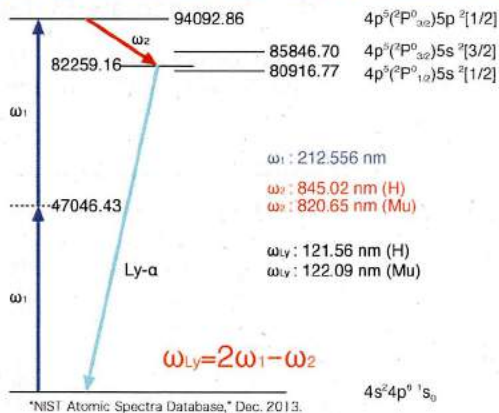


ガス中の非線形波長変換により発生



代表的なライマンα発生手法

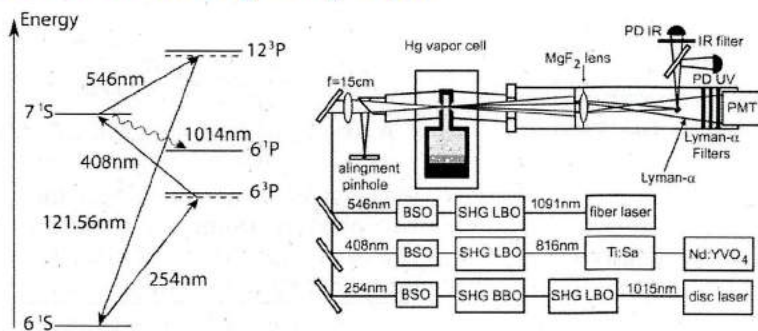
2 photon resonance four-wave-mixing in Kr gas



$$P_{Ly} \propto [\chi^{(3)}]^2 P_1^2 P_2 \frac{\sin^2(\Delta k L / 2)}{(\Delta k L / 2)^2}$$

- P_1 : ω_1 intensity
- P_2 : ω_2 intensity
- Δk : phase matching
- $\chi^{(3)}$: nonlinear susceptibility
- L : interaction length

Four-wave-mixing in Hg vapor



Disadvantages

- 3 wavelength lasers
- complex laser system
- timing jitter
- Handling of Hg vapor
- contamination of optics
- short interaction length

M. Scheid et. al. Opt. Exp. 17, 11274 (2009).

様々な真空紫外光発生

Medium	Two Photon Resonant State	Tuning Range	Conversion Efficiency	Ref.
Kr	$4p-5p [1/2, 0]$	Lyman- α	5×10^{-4}	[1]
Kr	$5p [5/2, 2]$	129-181 nm	$10^{-3} \sim 10^{-4}$	[2]
Kr	$5p [5/2, 2]$	72.5-83.5 nm	1.2×10^{-5}	[3]
		92.1-94.3 nm	$\sim 10^{-5}$	
Xe	$5p-6p [1/2, 0]$	155 nm	2×10^{-3}	[4]
Xe	$6p [3/2, 2]$	162.6 nm	4×10^{-3}	[5]
Xe	$6p [5/2, 2]$	154-223 nm	$\sim 2 \times 10^{-3}$	[6]
Xe	$7p [1/2, 0]$	125.9 nm] $\geq 10^{-4}$	[7]
Xe	$7p [3/2, 0]$	126.1 nm		
Xe	$6p^i [3/2, 2]$	125.4 nm		
Xe	$8p [1/2, 0]$	81.7-86.6 nm	$\sim 10^{-6}$	[8]

[1] J. P. Marangos *et al.*, J. Opt. Soc. Am. B 7, 1254 (1990).

[2] G. Hilber *et al.*, J. Opt. Soc. Am. B 4, 1753 (1987).

[3] K. D. Bonin *et al.*, J. Opt. Soc. Am. B 2, 527 (1985).

[4] H.R. Hutchinson *et al.*, IEEE J. Quantum Electron. 19, 1823 (1983).

[5] J. Hager *et al.*, Chem. Phys. Lett. 90, 472 (1982).

[6] R. Hilbig *et al.*, IEEE J. Quantum Electron. 19, 194 (1983).

[7] Y. -M. Yiu *et al.*, Opt. Lett. 7, 268 (1982).

[8] K. Miyazaki *et al.*, Appl. Opt. 28, 699 (1989).

Krガス中の四波混合の特徴

Four-Wave Mixing

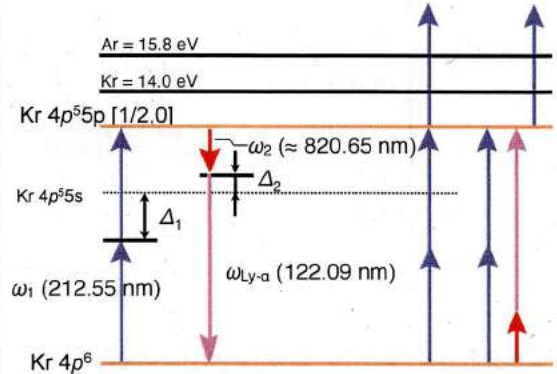
Resonance	Non Resonant	Resonant
Conversion Efficiency	10^{-6}	$10^{-3} \sim 10^{-4}$
Tunability	Much Lower	High

	Two Photon Resonance	Excitation Energy (cm ⁻¹)	Resonance λ (nm)	Relative Intensity
Xe	5p-6p' [3/2, 2]	89162.9	224.3	40
	6p' [1/2, 0]	89860.5	222.6	187
	7p [5/2, 2]	88352.2	226.4	4
	7p [3/2, 2]	88687.0	225.5	9
	7p [1/2, 0]	88842.8	225.1	26
	8p [5/2, 2]	92221.9	216.9	9
	8p [3/2, 2]	92371.4	216.5	5
	8p [1/2, 2]	92555.7	216.1	119
Kr	4p-5p [5/2, 2]	92308.2	216.7	167
	5p [3/2, 2]	93124.1	214.8	56
	5p [1/2, 0]	94093.7	212.6	1000

K. Miyazaki *et al.*, Appl. Opt. **28**, 699 (1989).

+ Intermediate States

... concerned with the 4f, 5f, 6f, and 9p states with $J = 0$ and 2.



$$\eta_{\text{Kr } 5p [1/2, 0]} > 5\eta_{\text{Xe}}$$

Advantage of the use of Kr

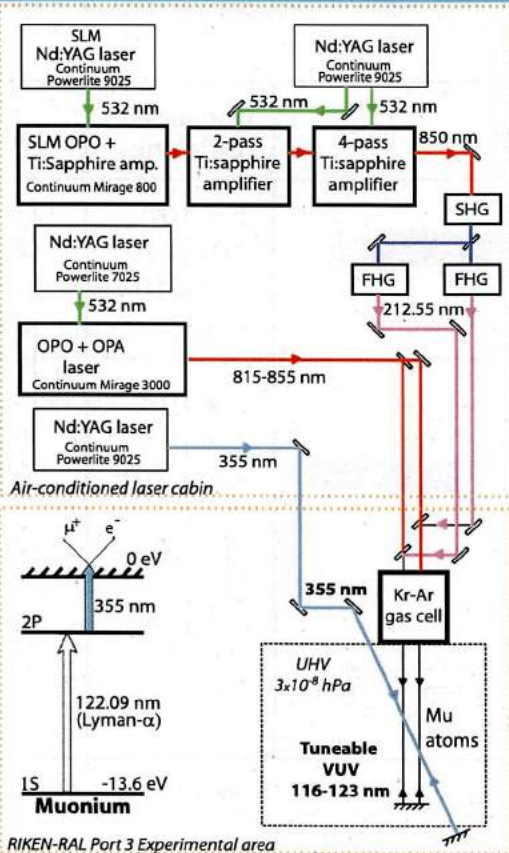
Wallenstein *et al.* found that the two-photon resonance 4p-5p [1/2,0] is much more efficient for resonant four-wave mixing.

J. Opt. Soc. Am. B **4**, 1753 (1987).

課題

- Self-Focusing
- Excited-State Absorption
- Ionization

従来光源の特徴



RIKEN-RAL Port 3 Experimental area

Laser maintenance

- 4 flash lamp base pulse lasers
- 3 Ti:sapphire amplifiers
- 2 optical parametric oscillators

Wavelength conversion

- optical absorption in nonlinear crystal (BBO)

Optical Synchronous

- timing jitter between laser synchronous signal and actual optical pulse outputs



Pulse energy instability

ω_1 : 24 mJ@6 ns

ω_2 : 24 mJ@6 ns

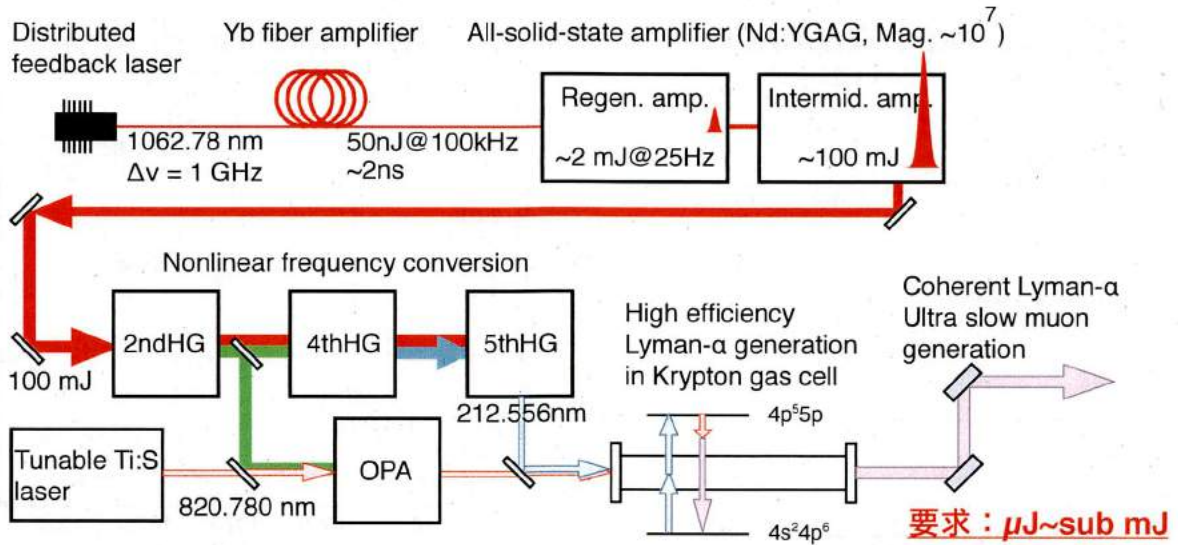


ω_{Ly} : ~1 μJ

conv. eff.: 10^{-5}

P. Bakule *et al.* Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B **266** 335 (2008).

レーザーシステムデザイン



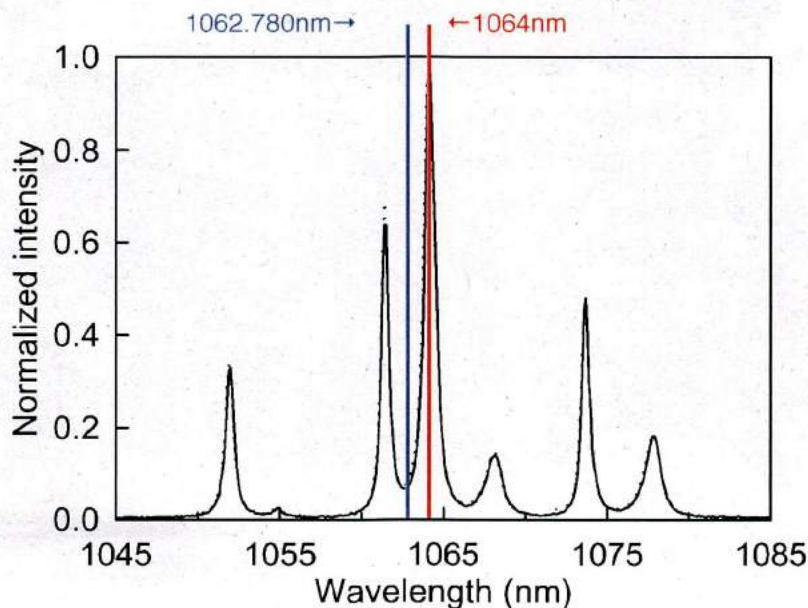
- High stability in frequency and energy → DFB laser + All-solid state laser
- Efficient light amplification of 1062.78 nm → developing a new laser gain media
- All-solid state 212.556 nm light generation → UV proof nonlinear crystals
- Intense Lyman-alpha coherent light generation → optimization of phase match

1062.78 nm光の増幅媒質

広く普及している Nd:YAG では十分な利得が期待出来ない

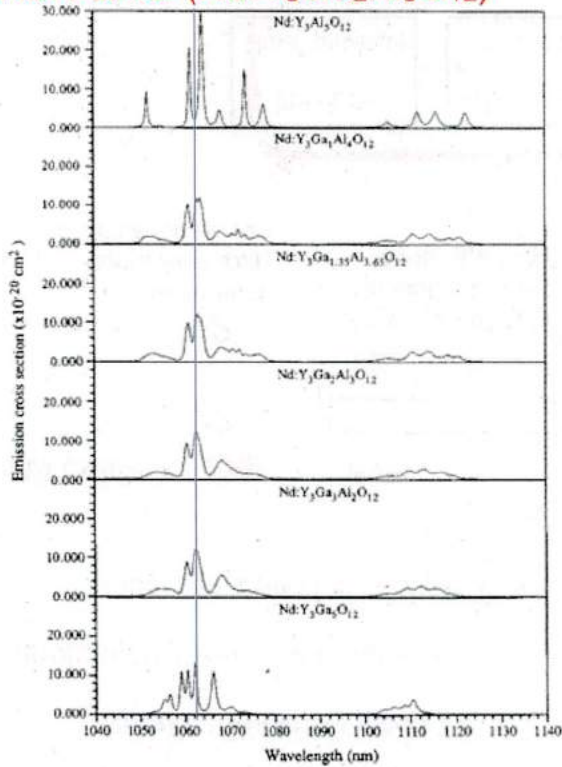
$$1064 \text{ nm} / 5 = 212.8 \text{ nm} \leftarrow \text{off resonance of Kr}$$

$$1062.78 \text{ nm} / 5 = 212.556 \text{ nm} \leftarrow \text{on resonance of Kr}$$



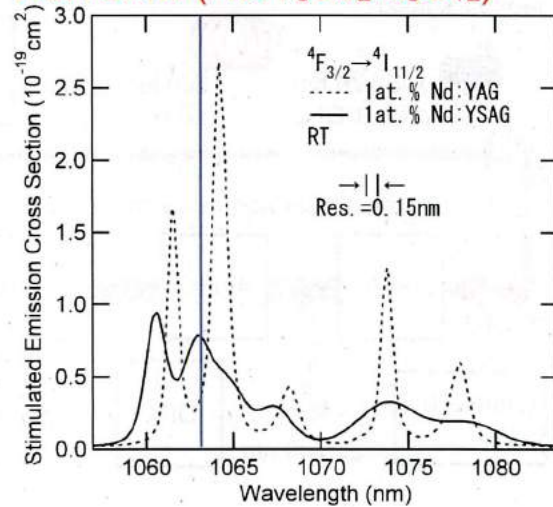
1062.78 nm光増幅媒質の候補

Nd:YGAG (Nd:Y₃Ga₂Al₃O₁₂)



B. Walsh et al. IOSA B. 15. 2794 (1998).

Nd:YSAG (Nd:Y₃Sc₂Al₃O₁₂)

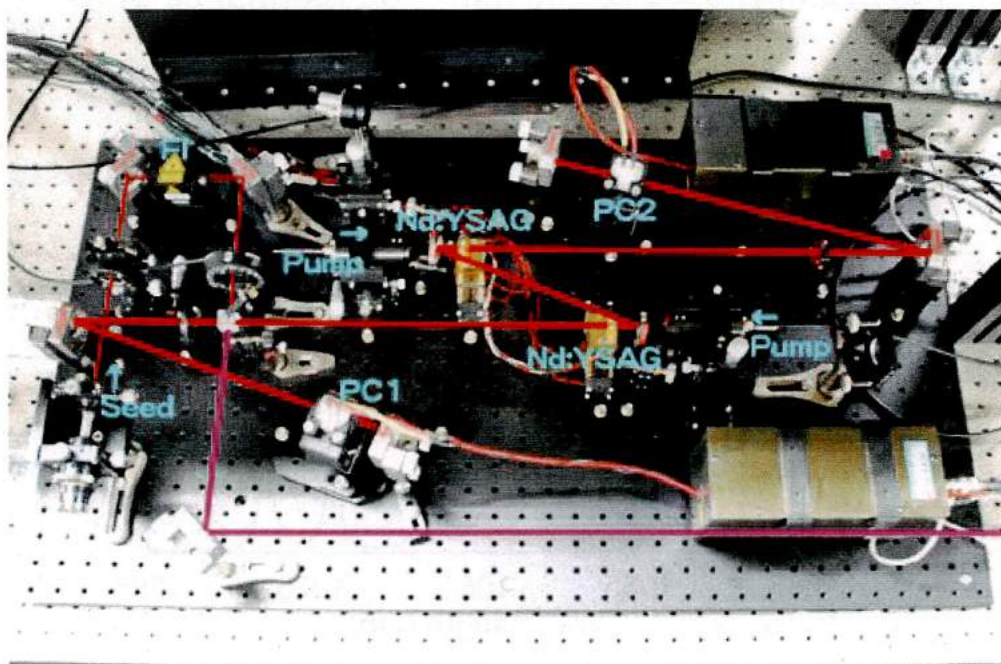


Y. Sato et al. Opt. Mat. 29. 1277 (2007).

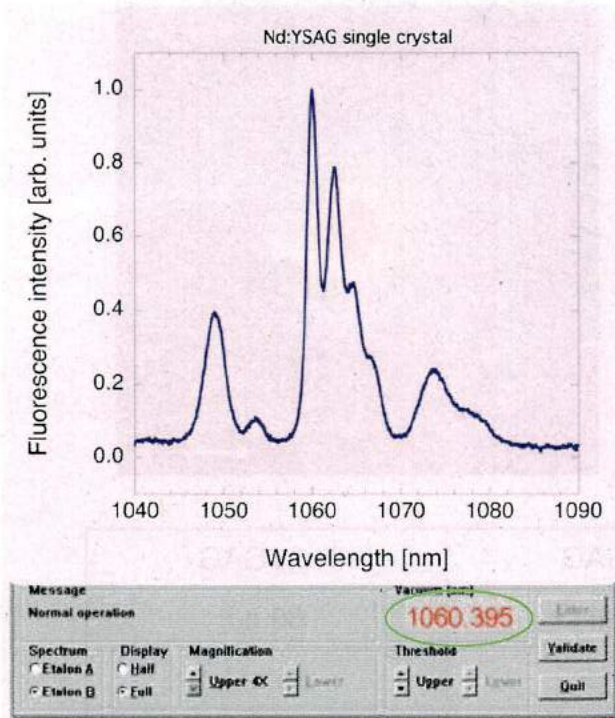
	Emission Cross section @1062.78 nm [10 ⁻¹⁹ cm ²]
Nd:YAG	0.3
Nd:YSAG	0.8
Nd:YGAG	1.1

1062.78 nm光再生増幅器

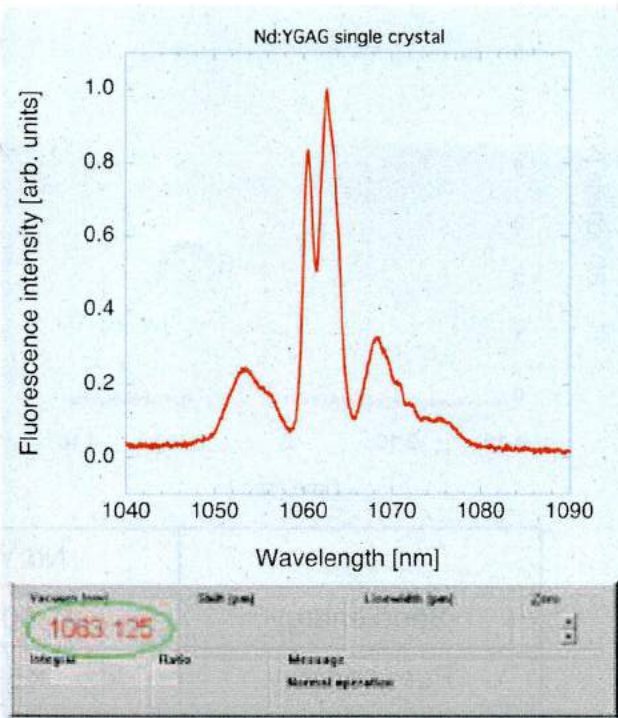
- Nd dope : 1.0 at%
- Crystal size : 4x4 10t (YSAG and YGAG)
- Cavity length : 220 cm
- End mirror : ROC=1500 mm
- Pump LD : Fiber delivered 808 nm qcw 25Hz 200μsec



YSAGとYGAGの結晶比較 (キャビティダンブ)



Output wavelength : 1060.395 nm
Maximum energy : 1.35 mJ

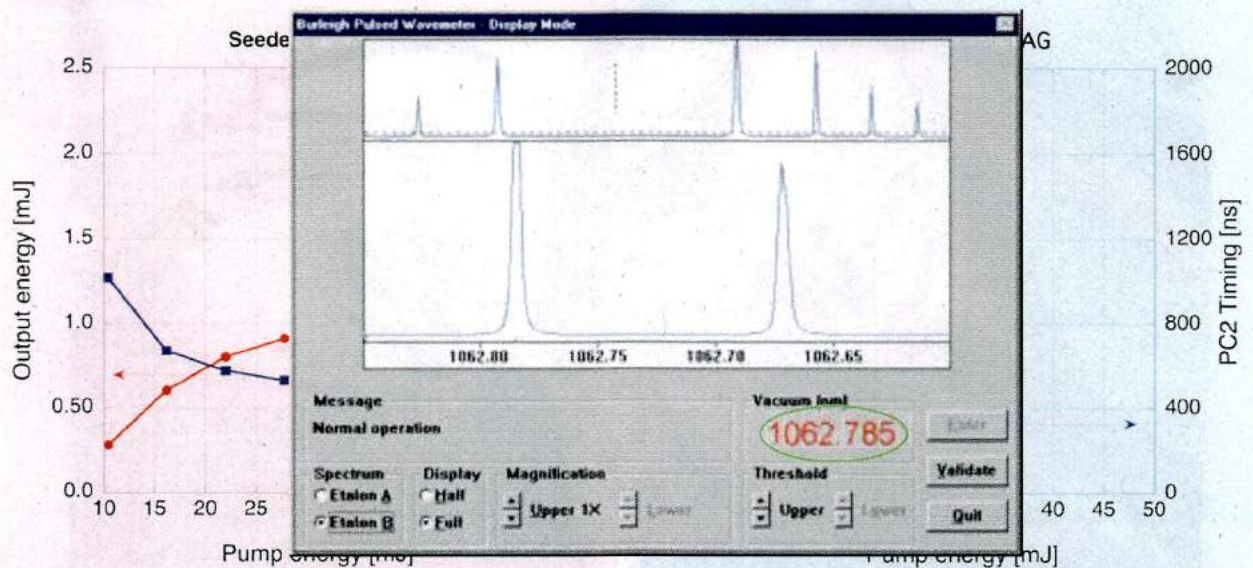


Output wavelength : 1063.125 nm
Maximum energy : 2.4 mJ

YSAGとYGAGの結晶比較 (再生増幅)

Nd:YSAG

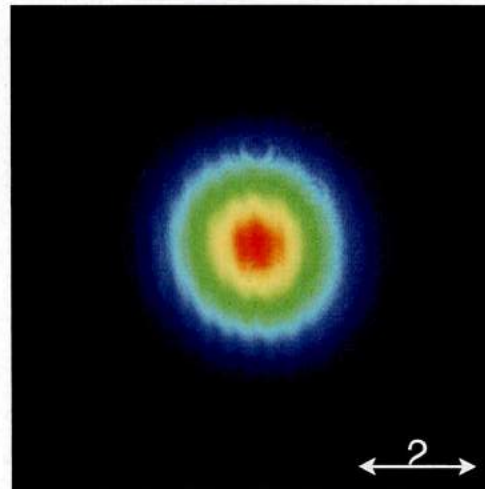
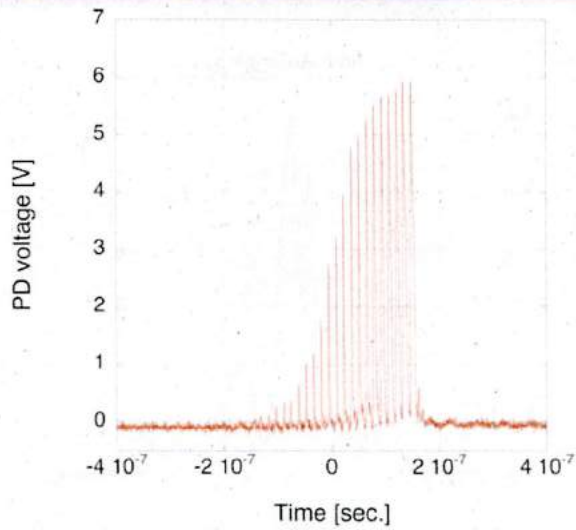
Nd:YGAG



Output wavelength : 1062.78 nm
Maximum energy : 1.1 mJ@45 mJ pump

Output wavelength : 1062.78 nm
Maximum energy : 2.4 mJ@25 mJ pump
(limited by parasitic osc.)

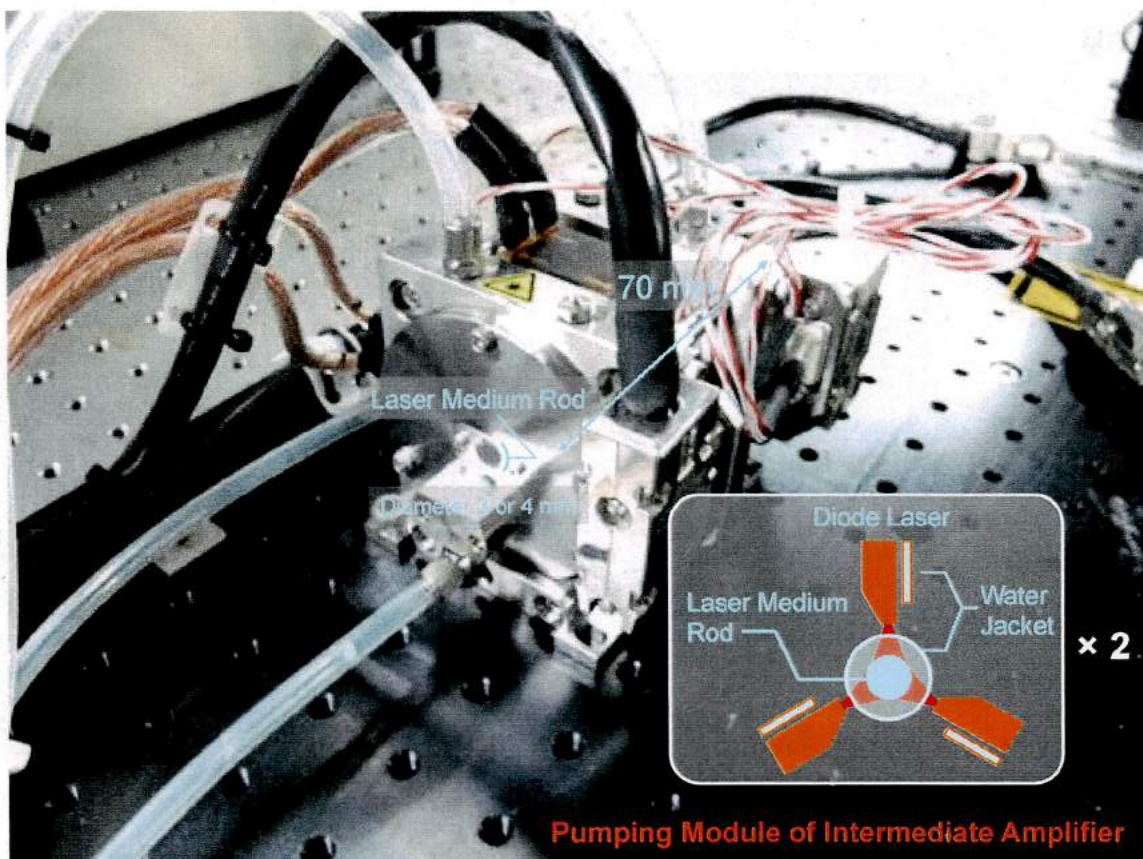
YSAGとYGAGの結晶評価まとめ



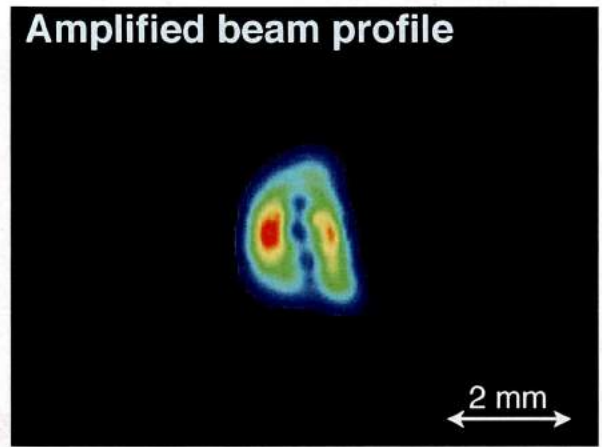
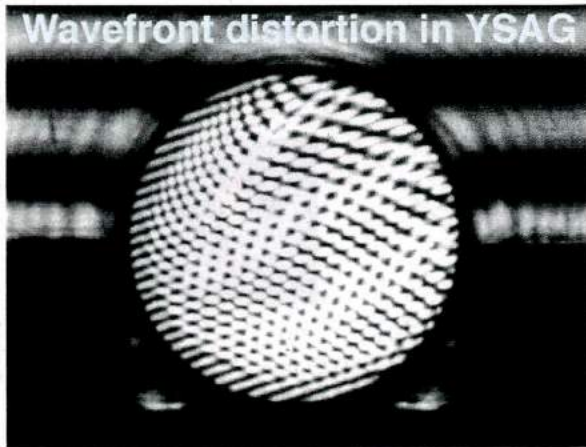
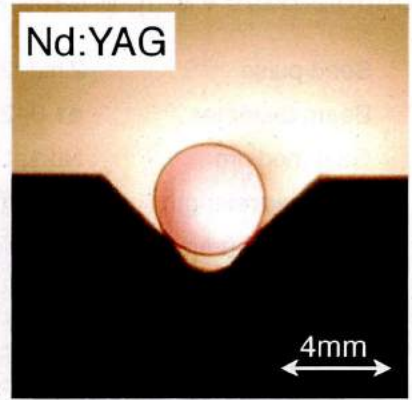
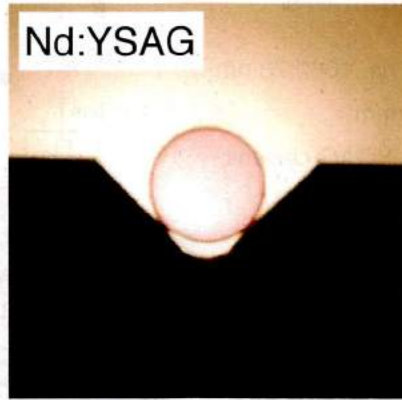
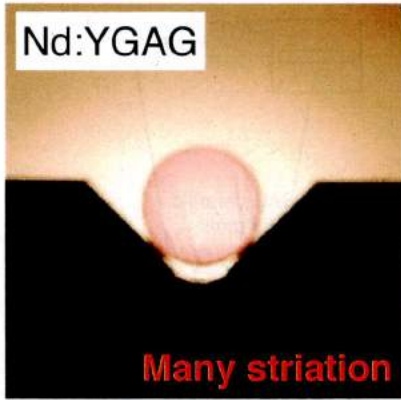
	Nd:YSAG	Nd:YGAG
Seed energy	50 nJ	50 nJ
Pump energy	45 mJ	25 mJ
Round trip time	450 nsec. (32 rt)	280 nsec. (20 rt)
Maximum output	1.1 mJ	2.4 mJ

Yu Oishi et. al., JPS CP. 2, 010105, (2014)

YSAGとYGAGの結晶評価まとめ

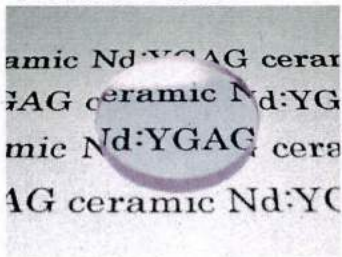


単結晶ロッドの低品質問題

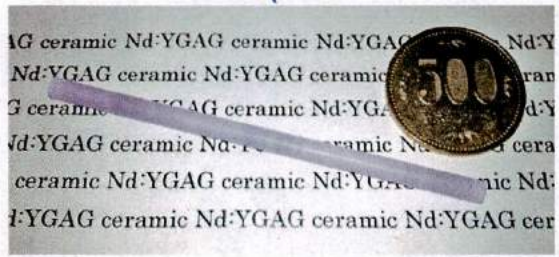


セラミックNd:YAG

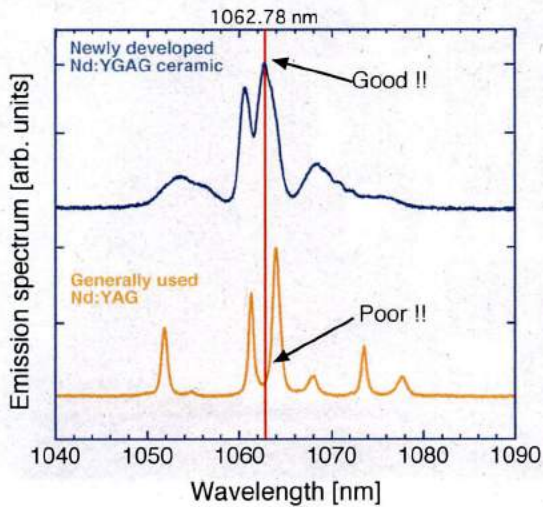
テストサンプル



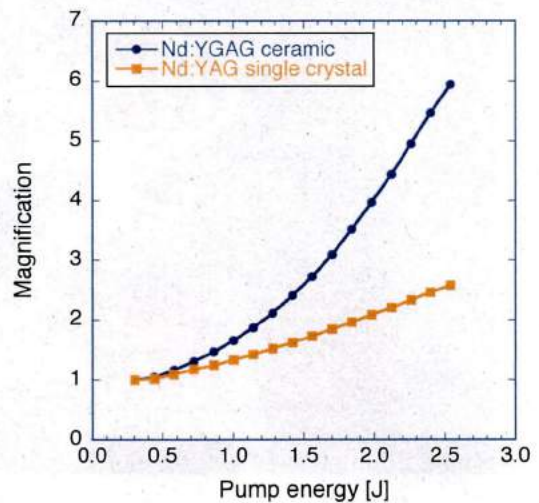
1 at.% Nd:YAG (ø4.0 mm × 80 mmL)



蛍光スペクトル



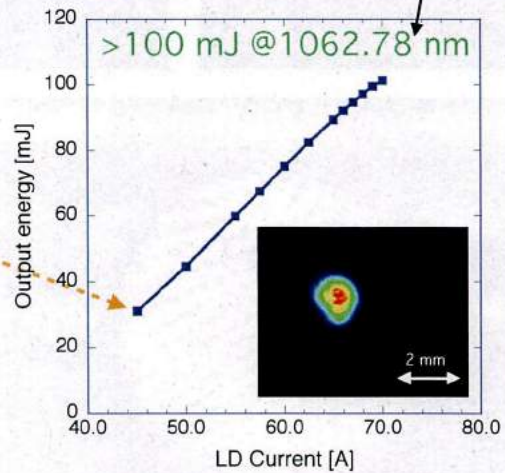
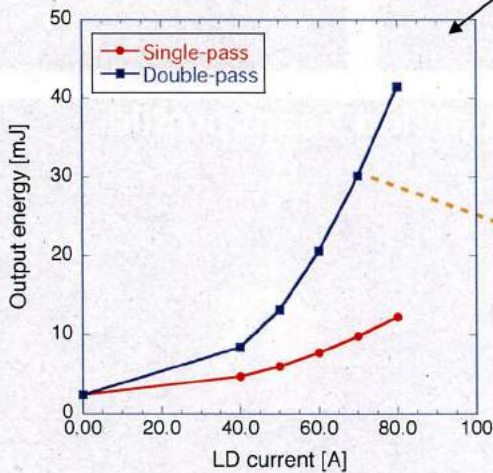
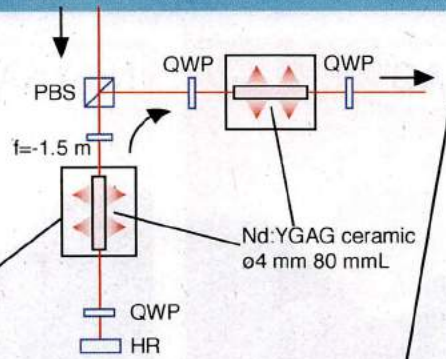
1062.78 nm 光の1パス利得



Nd:YAGセラミックによる増幅

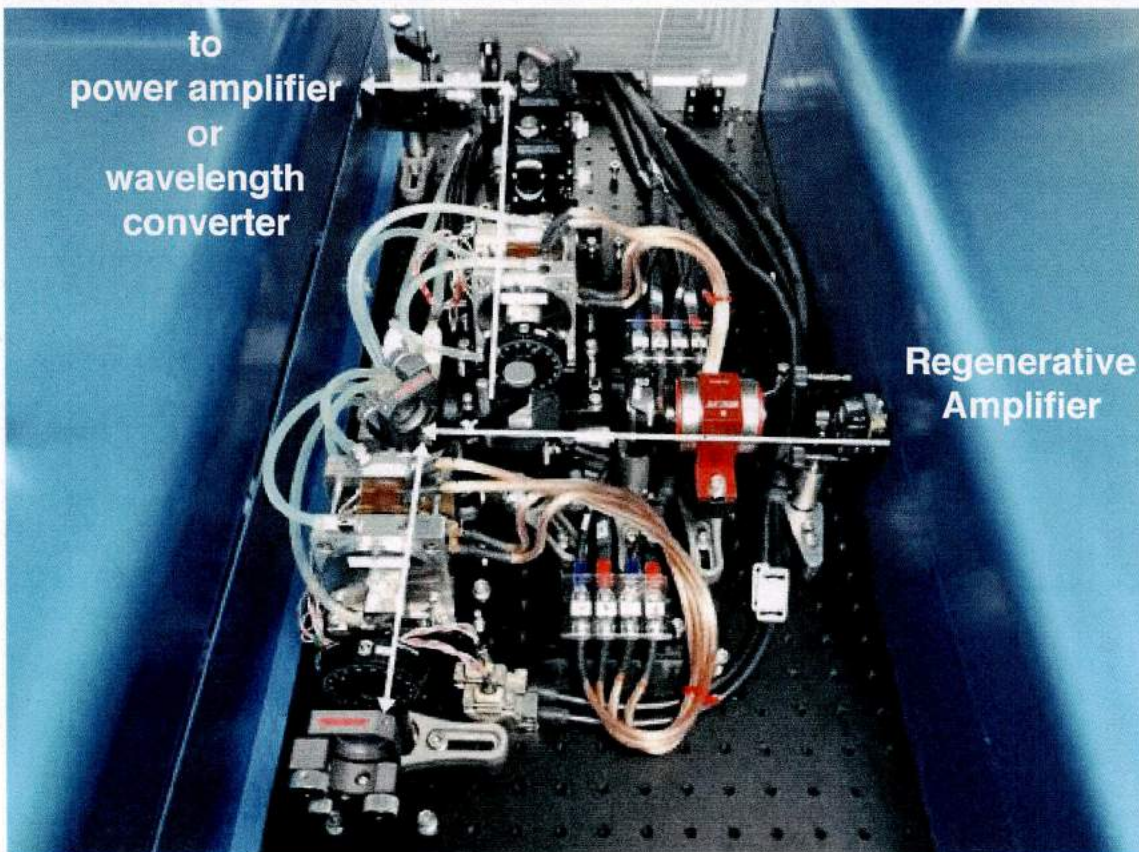
Double-pass + single-pass amplifiers

Seed pulse : 2 mJ, 2.6 ns, 1062.78 nm
 Beam diameter : $\phi 1.8 \sim 2.2$ mm
 Gain medium : Nd 1at.% YGAG ceramic
 Pump wavelength : 808 nm
 Maximum pump power : 2.5J/module

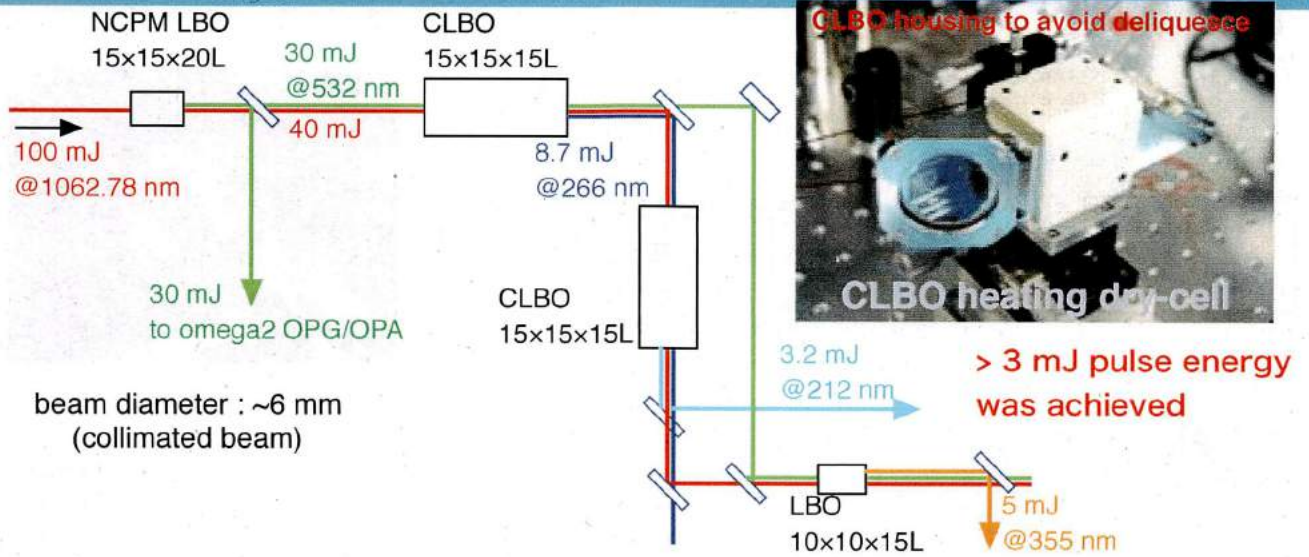


$M^2 < 1.3$ で 100 mJ を超えるパルスを発生

100mJ出力増幅器外観



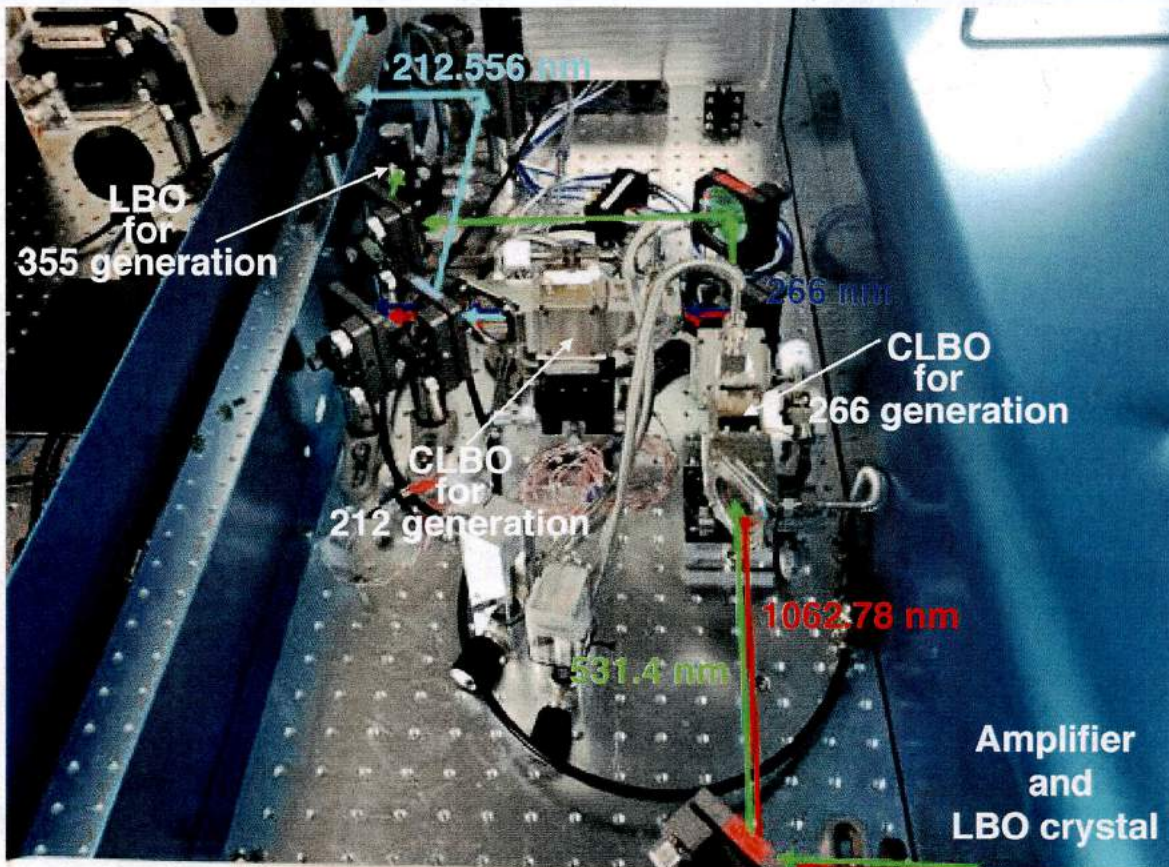
212nm光発生波長変換



	Input	Output	Efficiency
LBO	100 mJ@1062 nm	40 mJ@1062 nm 60 mJ@532 nm	60%
CLBO	40 mJ@1062 nm 30 mJ@532 nm	40 mJ@1062 nm 8.7 mJ@266 nm	29%
CLBO	40 mJ@1062 nm 8.7 mJ@266 nm	3.2 mJ@212 nm	36%

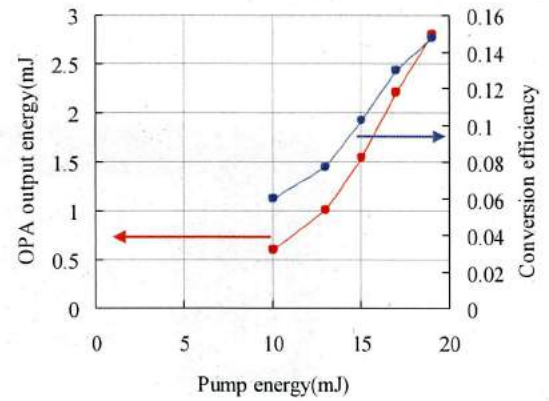
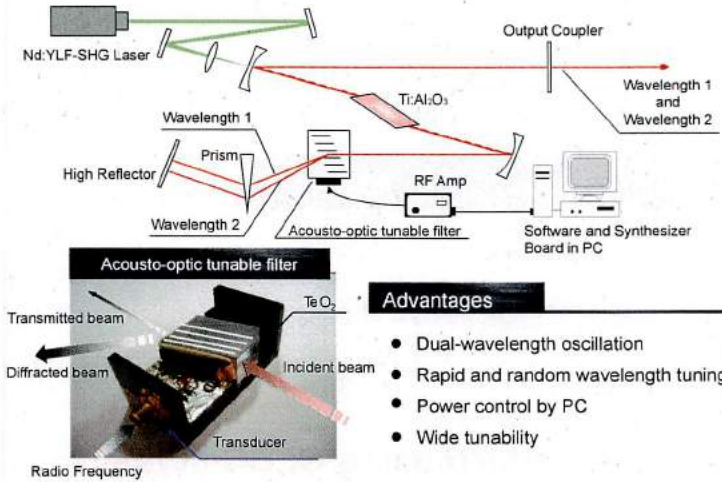
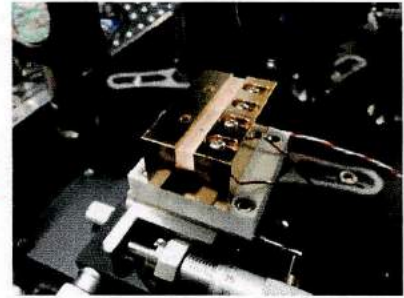
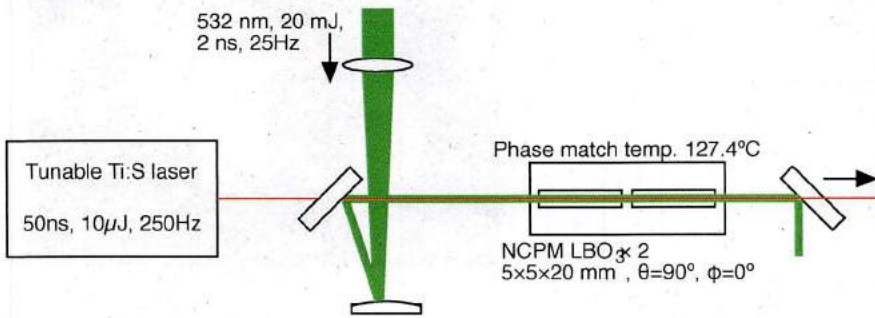
High conversion efficiency was demonstrated using CLBO crystals

212nm光発生波長変換部外観

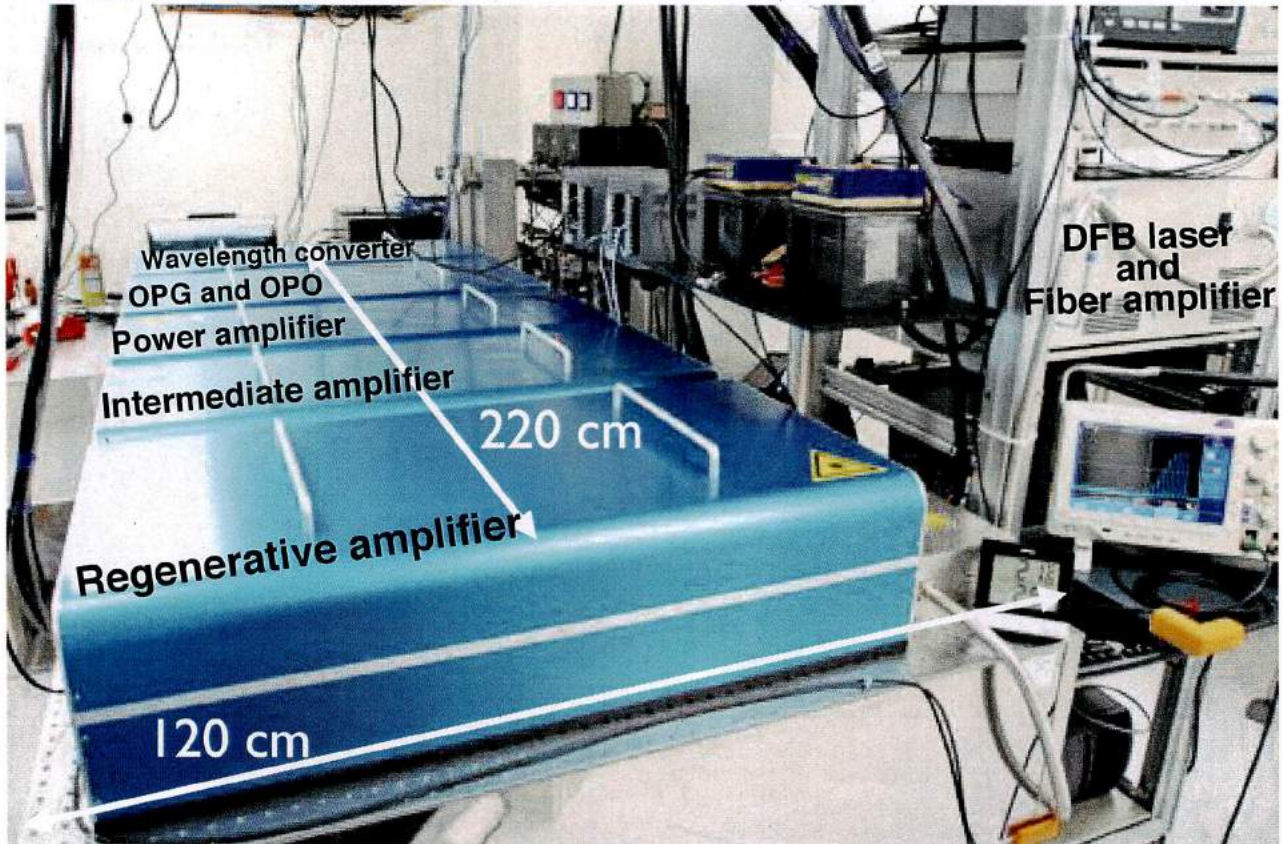


注入波長同期型OPG

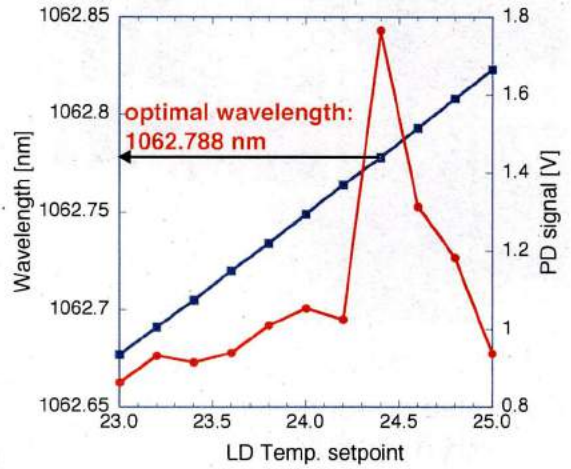
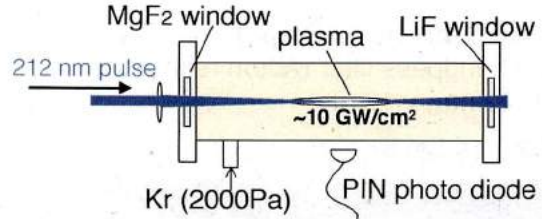
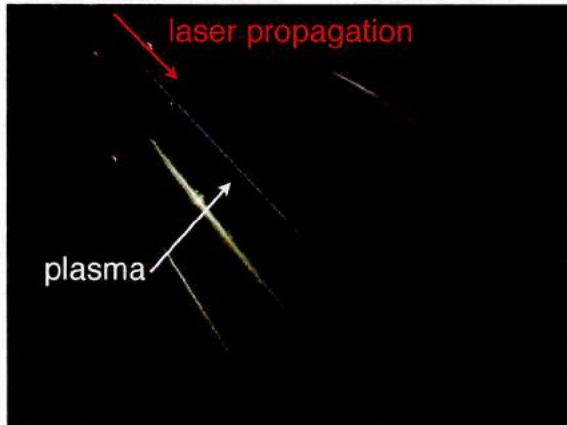
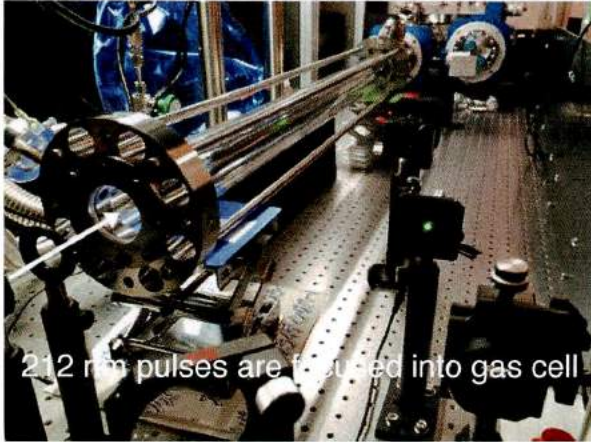
ω_2 波長変換



Appearances of laser system

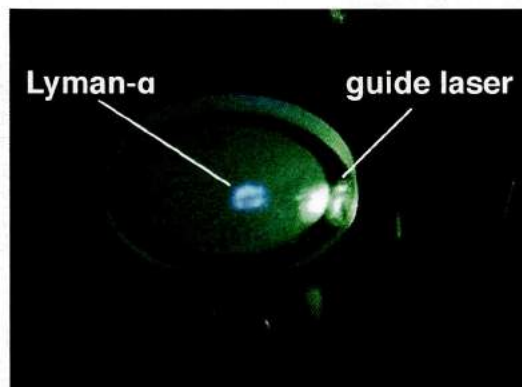
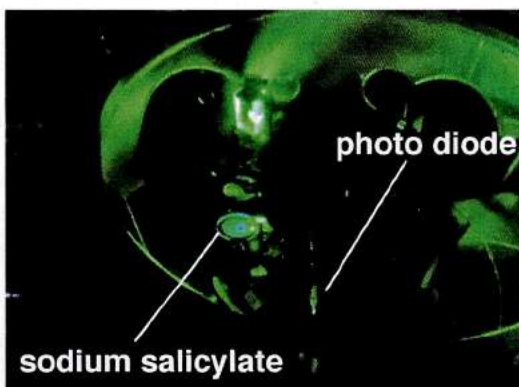
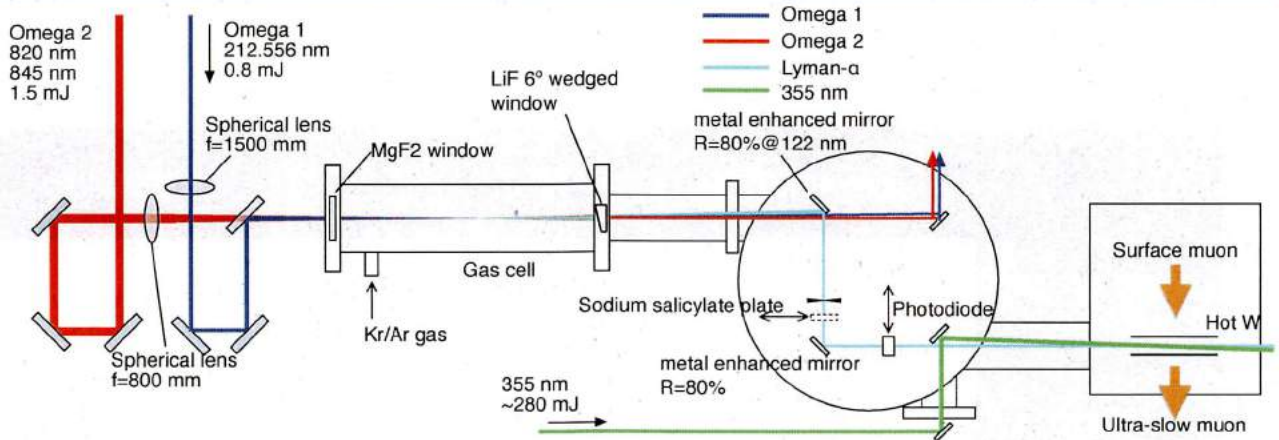


2光子共鳴波長の決定



3光子イオン化によるプラズマ発光強度で
2光子共鳴波長を決定

ライマンαの発生と出力評価

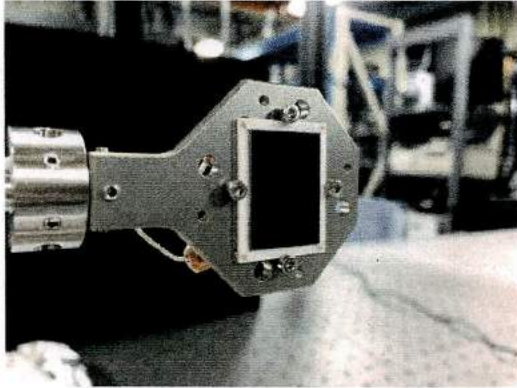


ライマンαのパルスエネルギー

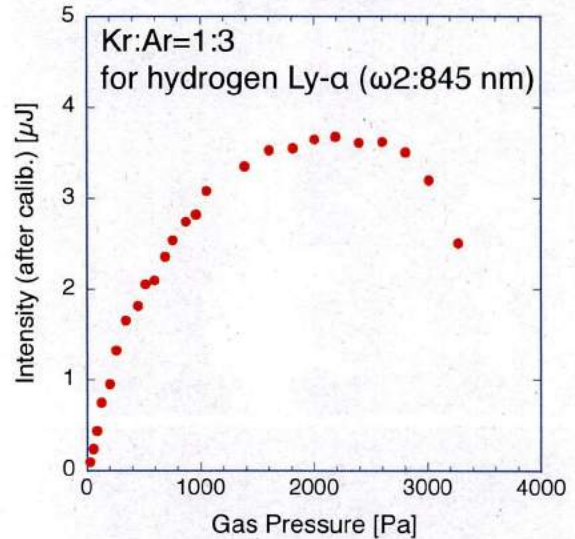
パワーメーター

SXUV 300 (Opto diode Corp.)
+ Lyman bandpass filter (Acton research)
受光面 : 22 mm x 16 mm

応答速度 : 15~20 ns



ライマンα出力の混合ガス圧依存



校正 (NIST校正済み量子効率換算表使用)

Calibrated power meter :
OPHIR PE-50C-DIF
pulse wavelength :
266 nm
measurement energy range :
2.6 μJ ~55 μJ

利用可能パルスエネルギー : 3.7 μJ
ガスセル窓出射エネルギー : 8.4 μJ
変換効率 : 3.6×10^{-3} (conventional : 10^{-5})

従来のライマンα光発生との比較

	レーザーの特徴	ポンプ光	Lyman-α パルスエネルギー	変換効率
以前のシステム (理研RAL)	Flush lamp Multimode Jitter rich	ω_1 : 24 mJ ω_2 : 24 mJ	1 μJ with fluctuation	2×10^{-5}
本研究 (J-PARC)	All-solid-state Quasi-singlemode Jitter free	ω_1 : 0.8 mJ ω_2 : 1.5 mJ	8.4 μJ with low fluctuation	4.3×10^{-3}
Enhancement	Longterm stability Maintenance free	pulse energy will be increased soon by installing of power amplifier	~10 times	$>10^2$

ライマンα光発生に関する議論

変換効率が良いのではないか？ (従来： $\sim 10^{-5}$)

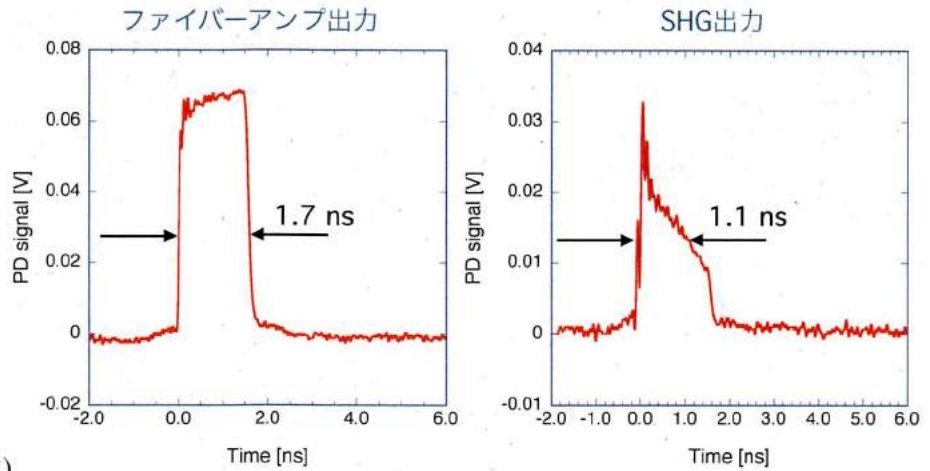
パルス時間波形測定

フォトディテクタ

: EOT (12.5GHz)

オシロスコープ

: テクトロニクス (20GHz)



変換効率の相違点

$$P_{Ly} \propto [\chi^{(3)}]^2 P_1^2 P_2 \frac{\sin^2(\Delta kL/2)}{(\Delta kL/2)^2}$$

従来

ω_1 : 24 mJ@6 ns

ω_2 : 24 mJ@6 ns

f=500mm

シリンドリカルレンズで集光

変換効率: 10^{-5}

ω_{Ly} : $\sim 1 \mu J$

現在

ω_1 : 0.8 mJ@<1 ns

ω_2 : 1.5 mJ@<1 ns

f=1500mm

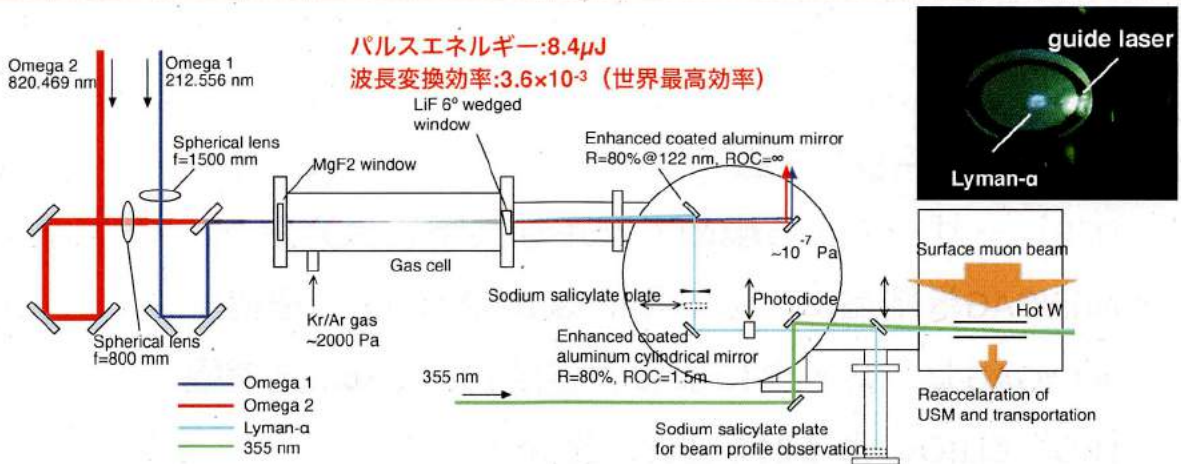
球面レンズで集光 相互作用長3倍以上

変換効率: 10^{-3}

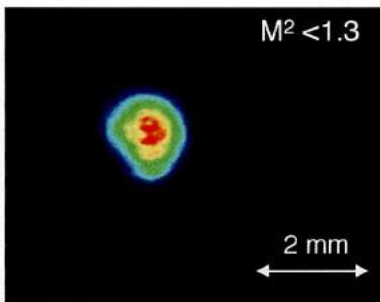
ω_{Ly} : 8 μJ

超低速ミュオンの発生実験

37

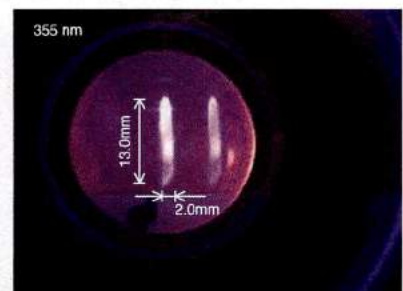
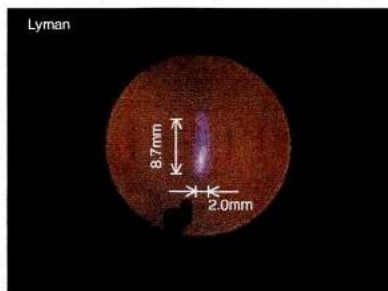


固体レーザー出力ビーム



Omega1&2 keep the beam quality

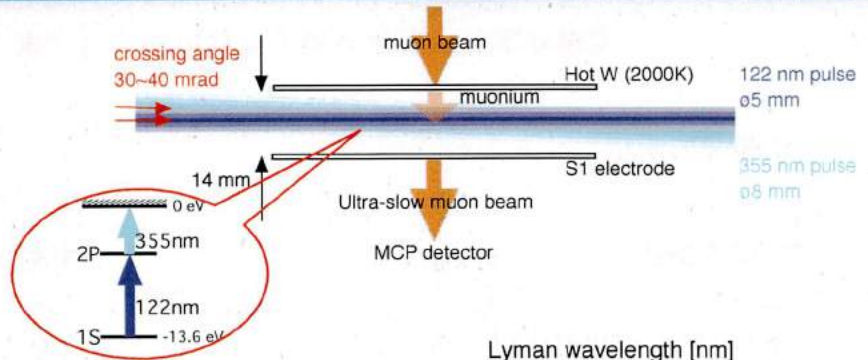
整形後ビームプロフィール



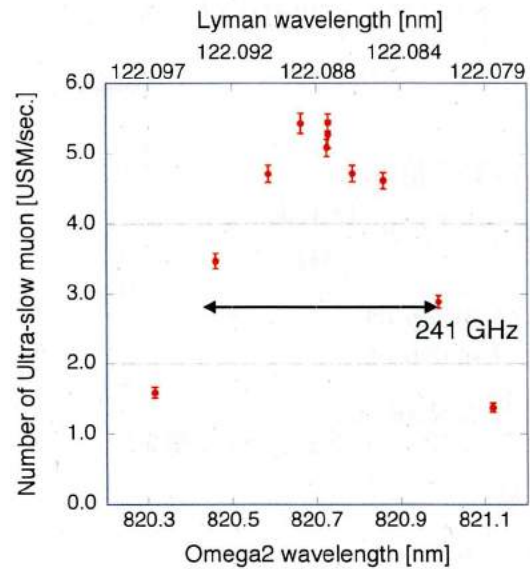
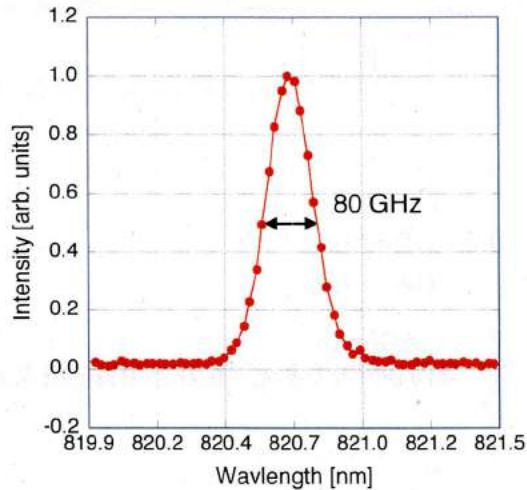
超低速ミュオン収量のライマンα波長依存性

ライマンα強度 : 4μJ
355 nm強度 : 280 mJ

Mu標的
厚み : 50 μm
温度 : 2000K
ドップラー幅 : 230GHz
(Maxwell-Boltzman分布を仮定)



ω₂スペクトル



まとめ

全固体レーザーシステム

- DFBレーザーによる極めて安定な共鳴波長発生
- Nd:YGAG単結晶による効率的な1062.78nm光増幅
- Nd:YGAGセラミックによる大強度1062.78nm光増幅
- LBO、CLBOによる212.556nm光発生
- 注入波長同期OPGによる820nm光発生

ライマンα光発生

Member and Acknowledgement

Photonics Control Technology Team RIKEN

Satoshi WADA
Norihiro SAITO
Kotaro OKAMURA
Takayo OGAWA
Oleg LOUCHEV

Muon Science Lab. (J-PARC/KEK)

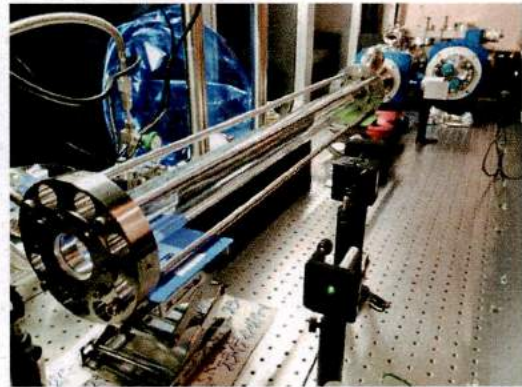
Yasuhiro MIYAKE
Koichiro SHIMOMURA
Yutaka IKEDO
Taihei ADACHI
Yukinori NAGATANI
Eiko TORIKAI
Taiki IWASHITA
Jumpei NAKAMURA

Advanced meson Lab. RIKEN

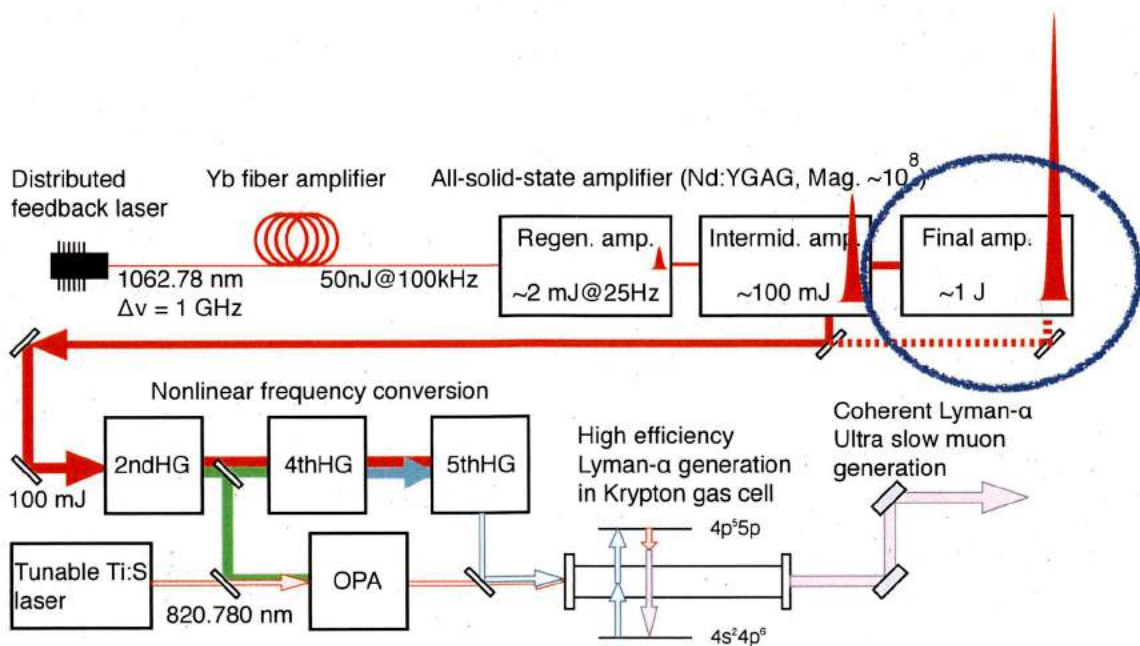
Masahiko IWASAKI
Katsuhiko ISHIDA



This work was supported by MEXT
KAKENHI Grant Number 2318005



今後の展望



パワーアンプの追加

- パワーアンプの追加 (100 mJ → ~1 J)
- ω_1 、 ω_2 の集光条件の最適化 (相互作用長の増大)
- 集光条件、ガス混合比、ガス圧の調整による最適位相整合条件の探索
- ミュオニウムの励起・イオン化効率の最適化

$$P_{Ly} \propto [\chi^{(3)}]^2 P_1^2 P_2 \frac{\sin^2(\Delta kL/2)}{(\Delta kL/2)^2}$$

入射ビーム径 : ~ ϕ 8mm (~2.7 times of intermediate amp.)

