

# 新奇ガンマ線源に向けた Baイオンビームの生成

~量子イオンビーム:QIB~

岡山大学大学院 自然科学研究科

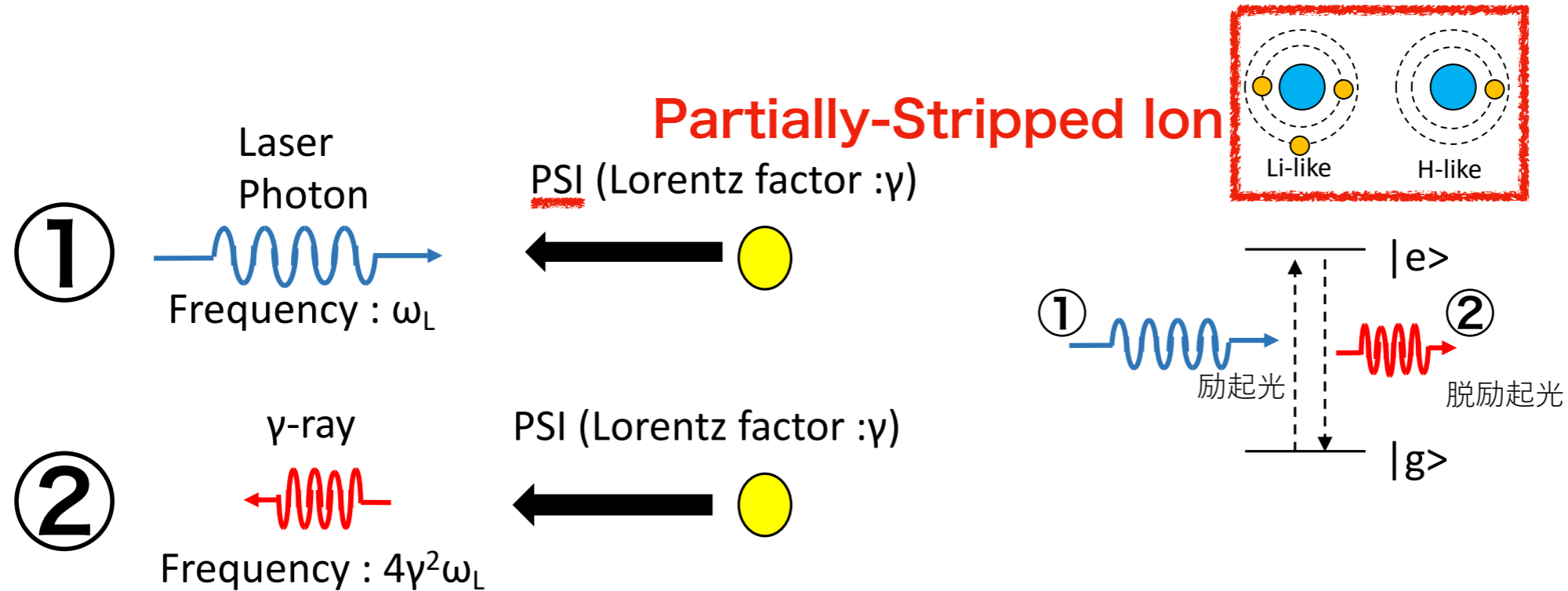
岡山大学 異分野基礎科学研究所量子宇宙研究コア<sup>2</sup>

藤枝 亮 今井 康貴<sup>2</sup>



# ■ イントロダクション：研究の目標

## 高エネルギーイオンの励起過程を用いた $\gamma$ 線の生成



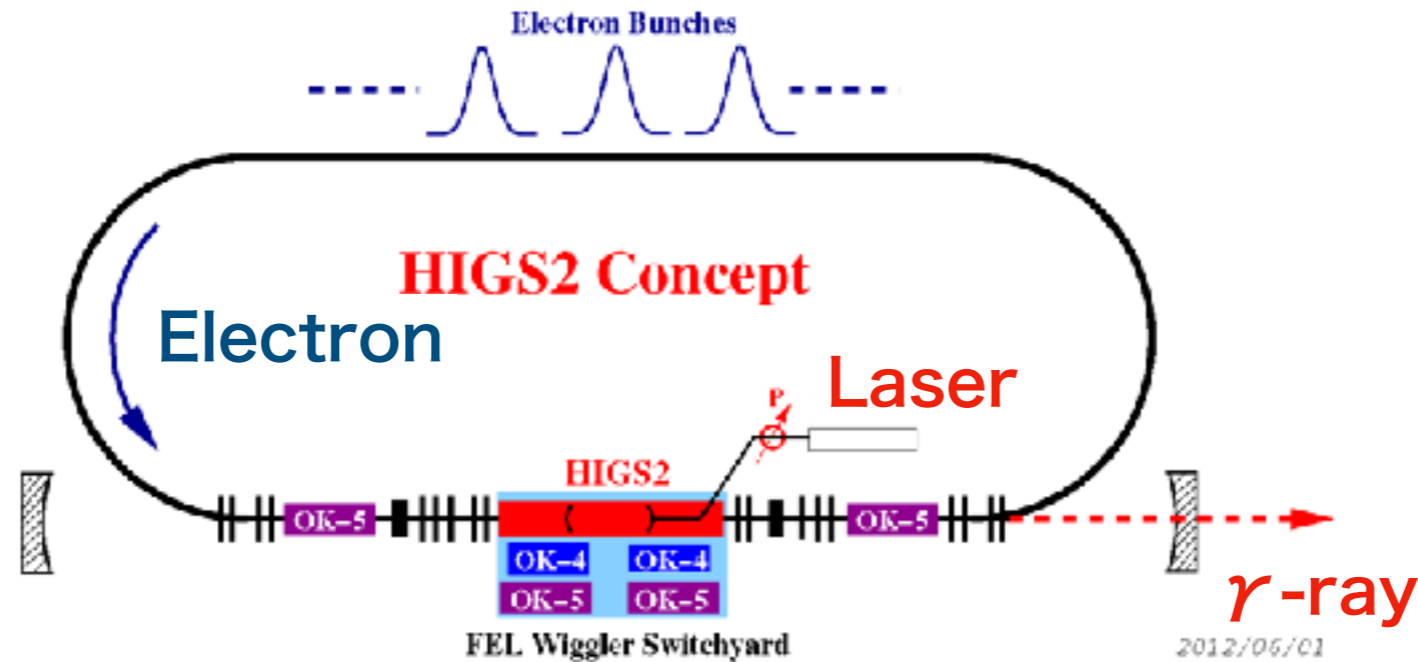
既存のレーザーコンプトン散乱(LCS) $\gamma$ 線源に比べて  
高強度な $\gamma$ 線になる可能性がある

# $\gamma$ -ray Facilityの現状

## レーザーコンプトン散乱(LCS)を用いた $\gamma$ 線の生成

高エネルギー電子との散乱  $\gamma$ : Lorentz Factor

• 電磁波の高エネルギー化  $\times 4\gamma^2$       • 高強度化  $\propto \frac{1}{\gamma}$

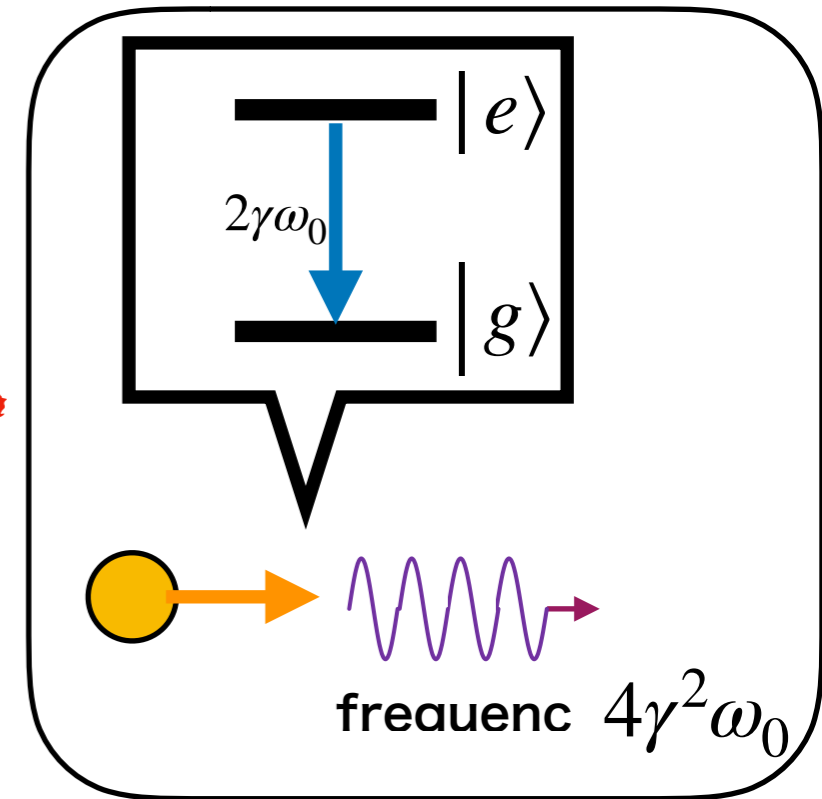
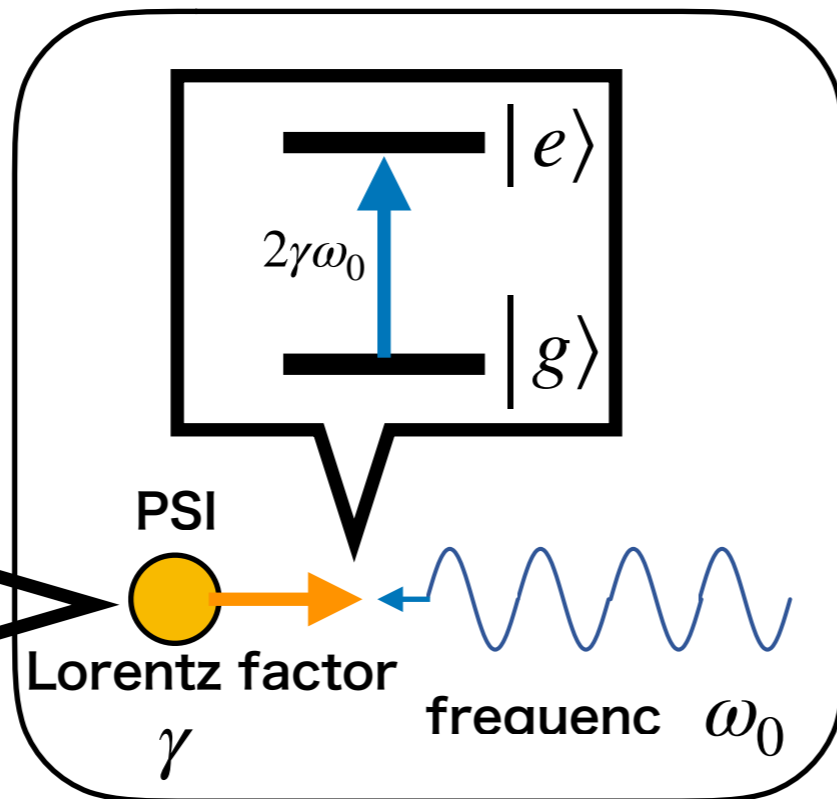
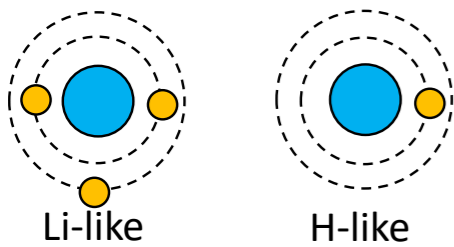


- Higs  
Photon Energy : 1~100MeV  
Photon Flux :  $10^9$  photons/sec
- ELI-NP  
Photon Energy : 0.2~20MeV  
Photon Flux :  $10^9\sim 10^{10}$  photons/sec  
• 2018現在 コミッショニングフェーズ

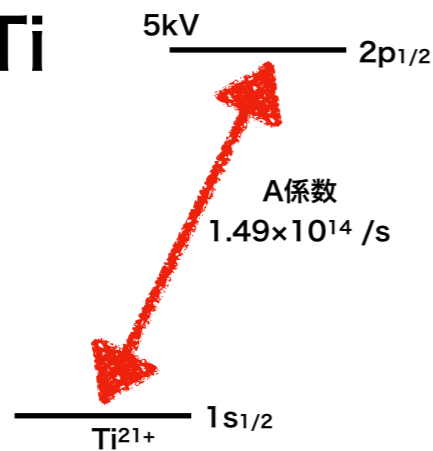
DL. Balabanski *J. Phys.: Conf. Ser.* 966(2018) 012018

# 量子イオンビーム(QIB)

## Partially-Stripped



## 例) H-like Ti



Energy : 2.5MeV ( $\gamma = 250$ )

Flux :  $10^{16}$ photons/s

$$\sigma_{QIB} = \frac{1}{2\pi} \lambda^2$$

$$\lambda \sim 10^{-7} \text{m}$$

$$\sigma_{LCS} = \frac{8\pi}{3} r_e^2$$

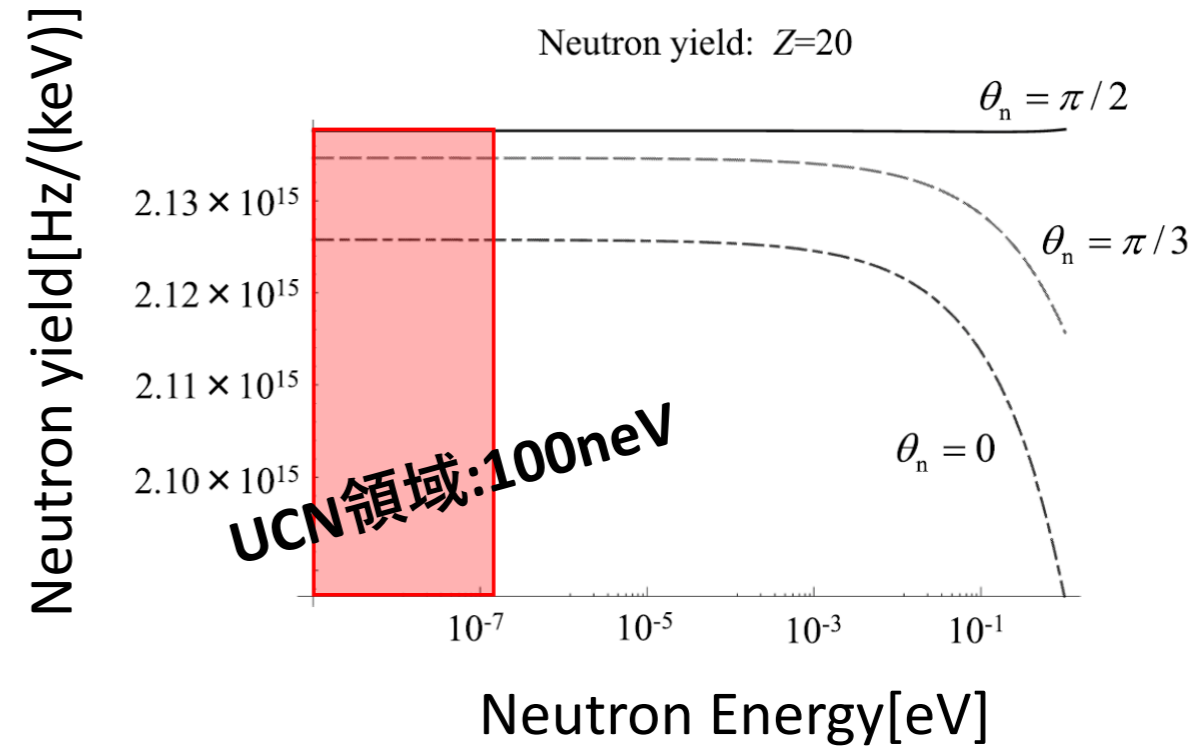
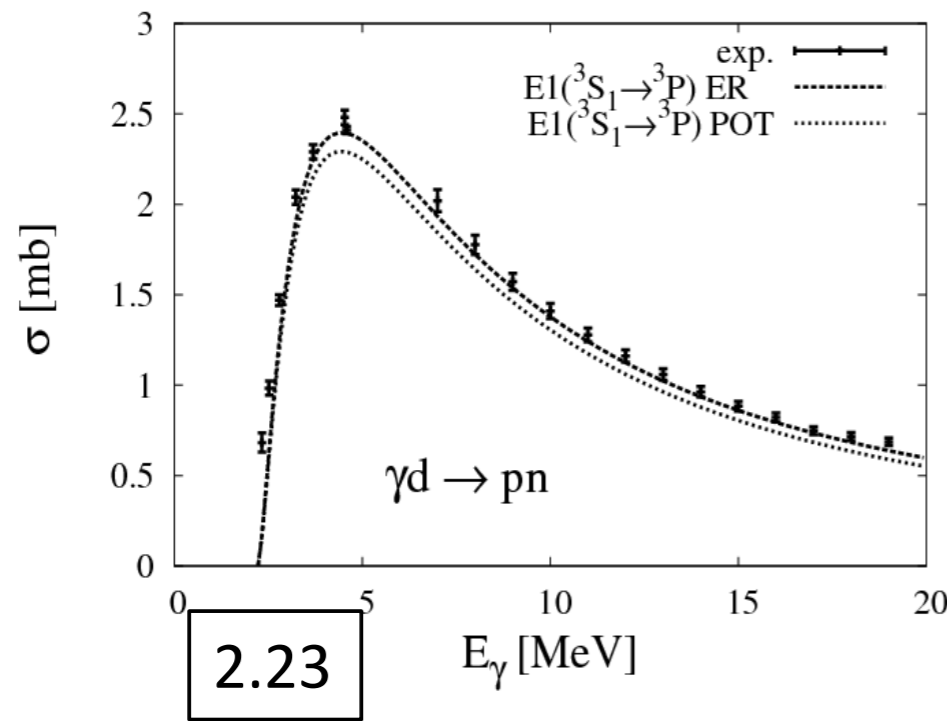
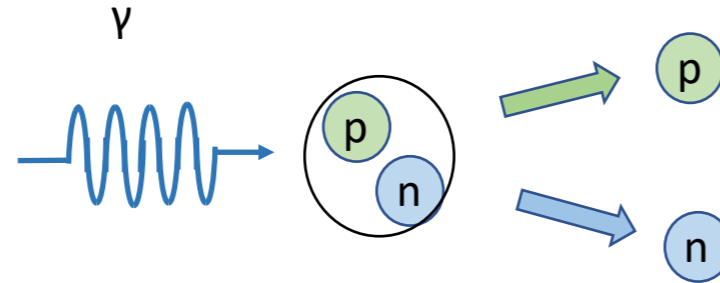
$$r_e \sim 10^{-15} \text{m}$$

高い反応断面積が高強度化のカギ

Flux :  $10^9$ photons/s (LCSガンマ線源)



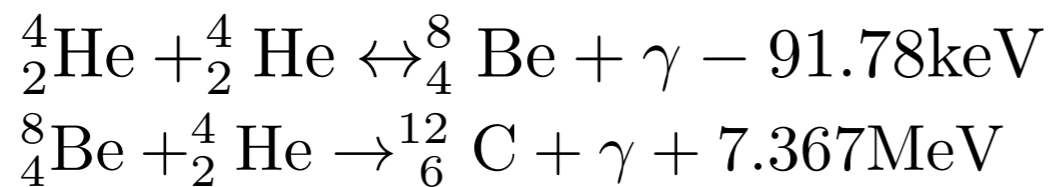
## 高強度中性子源



5MeV ,  $10^{17}$  photons/sec で  
 $O(10^5)$ Hz/100neV  
 nEDMなどへの応用

## 宇宙核物理

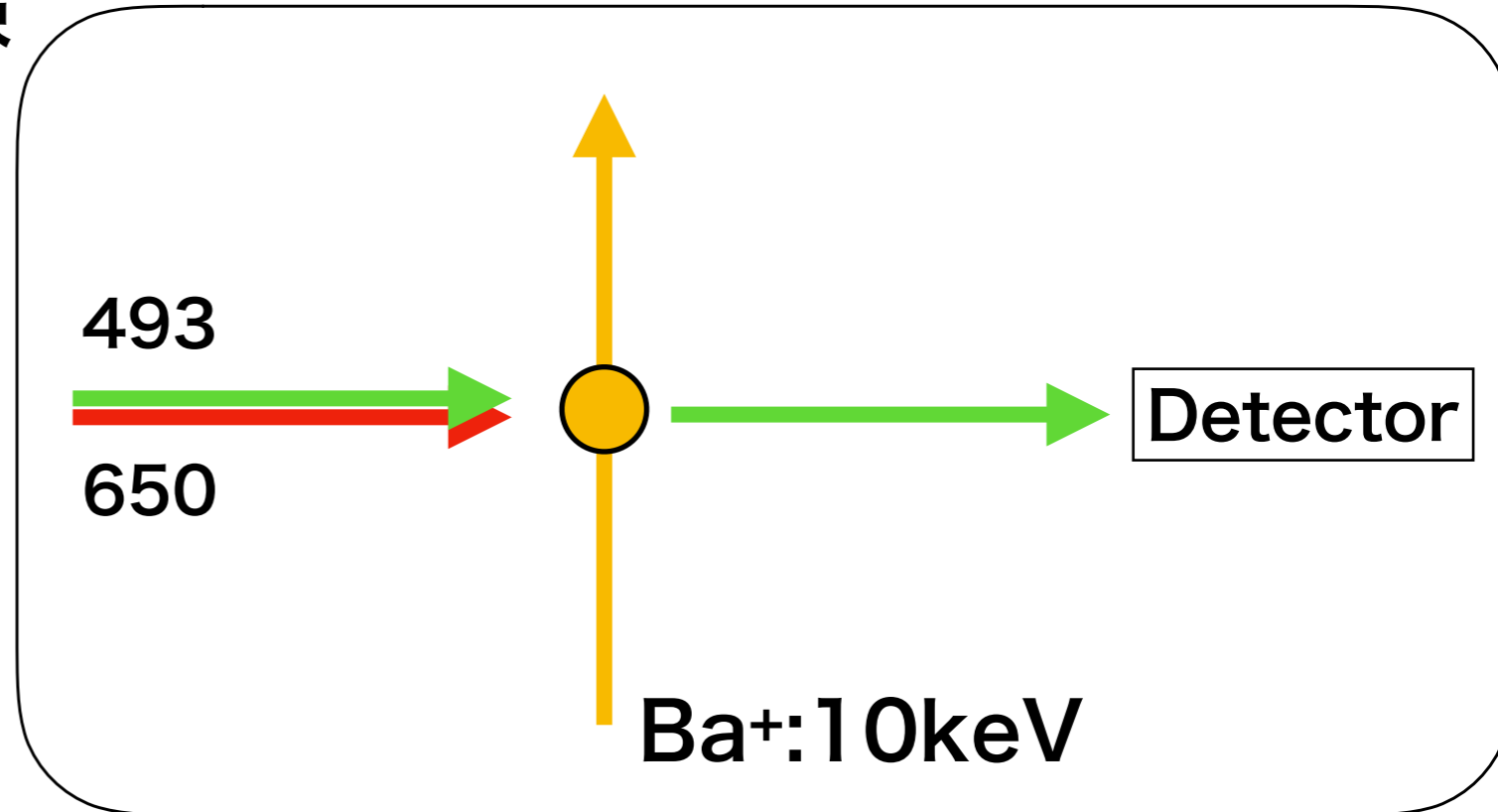
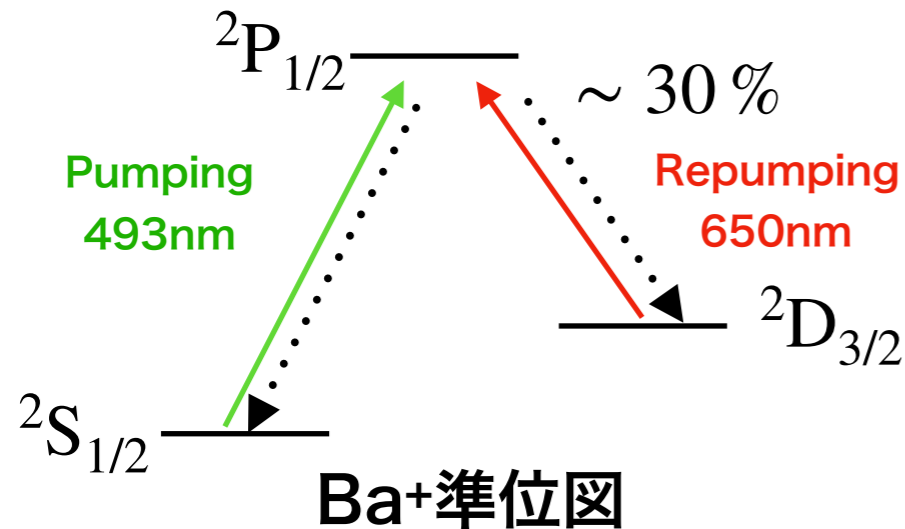
星生成過程初期段階のTriple-alpha反応の反応断面積の実験的決定  
 逆反応の観測をすることにより値を決めることができる



8MeV ,  $10^{17}$  photons/sec

# QIBの原理実証実験

## • 低エネルギーBaを用いた実験

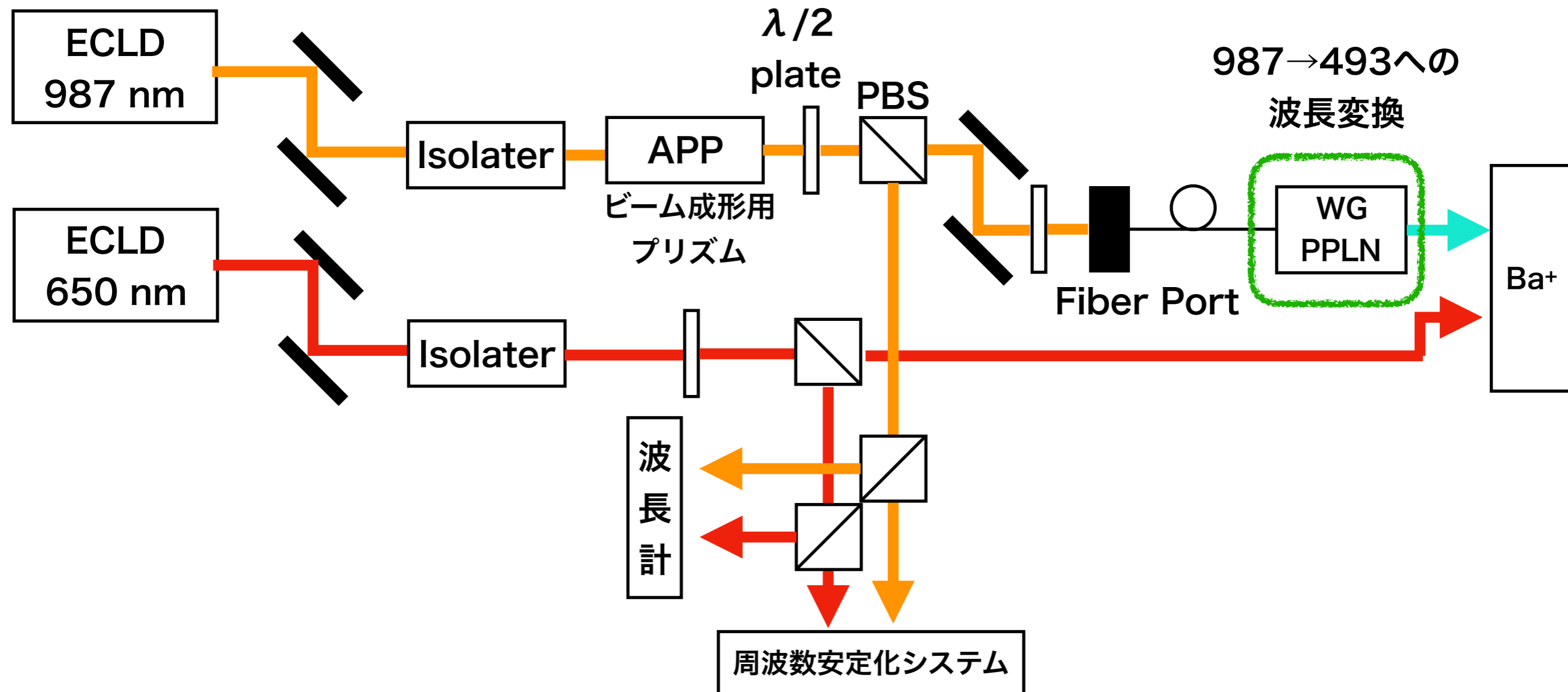


### 開発方針

- 493nmレーザー(10mW)
  - 987nmから倍波をとって生成
- 650nmレーザー
- Baイオン源    イオン電流：1  $\mu$ A    エミッタンス：1mm mrad

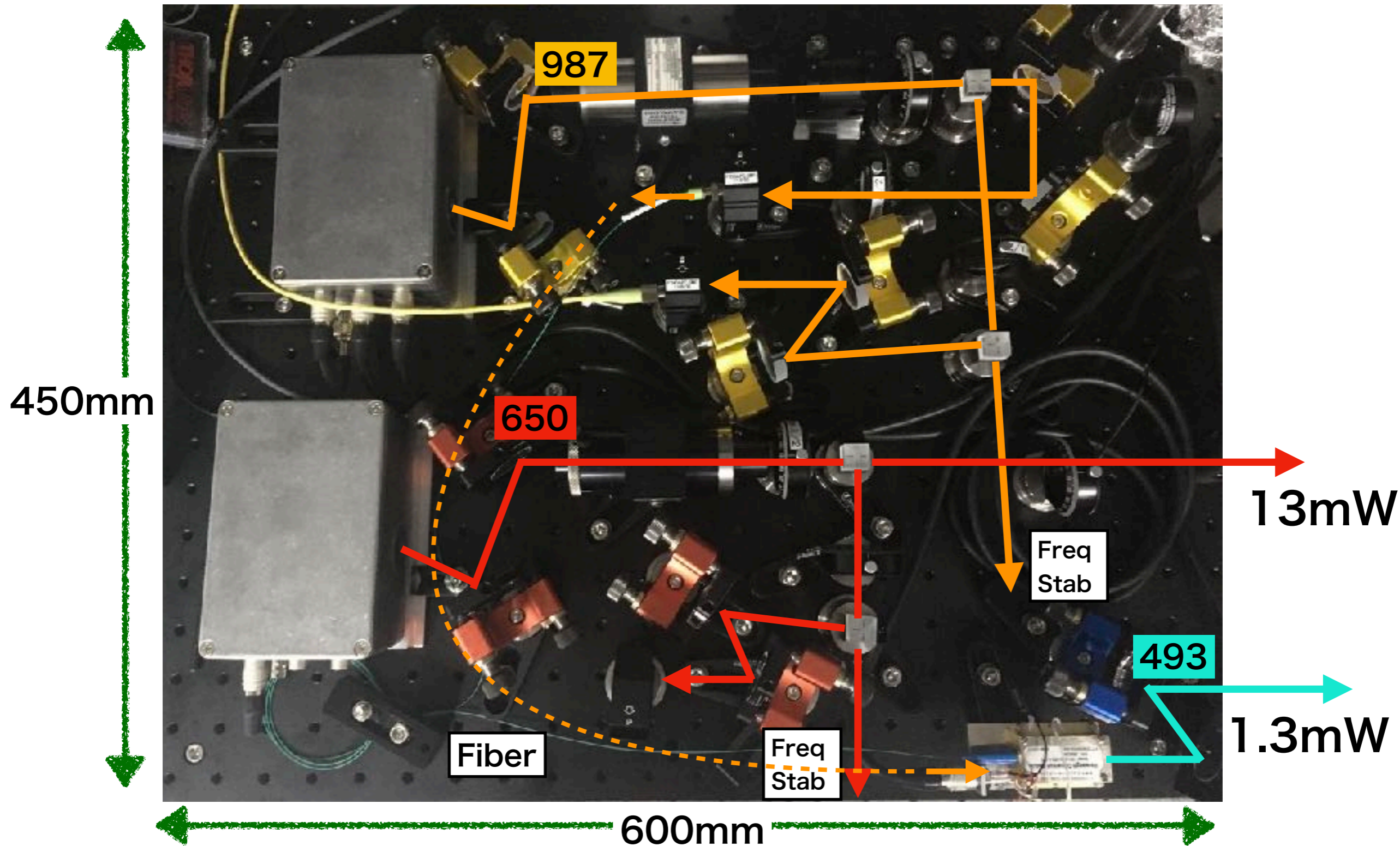
信号観測レート：8.8 $\times$ 10<sup>5</sup>Hz

# レーザーシステム



- 493nmのレーザーは987nmのECLDの倍波をとる
- 将来的に周波数安定化システムを入れるためにPBSでパスを作っておく

# 実際のレーザーシステム



- 周波数安定化システムはまだ先
- 493nmのレーザーパワーがもう少し欲しい(10mW)

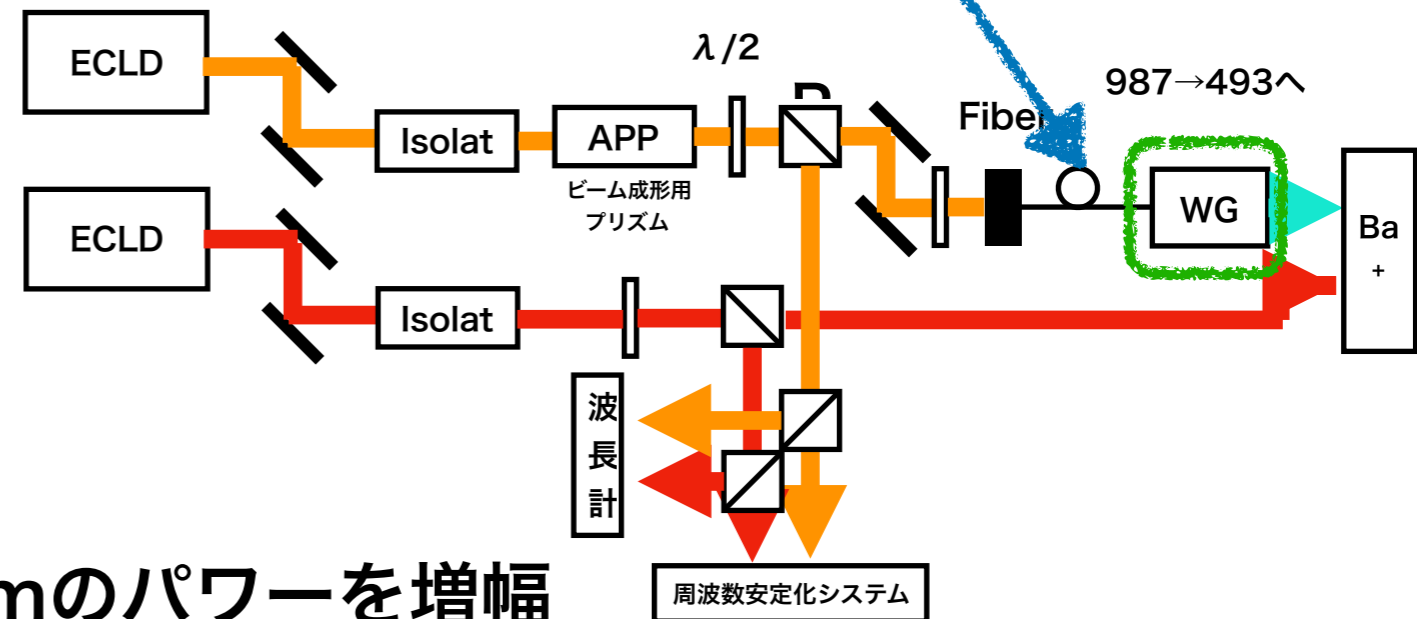
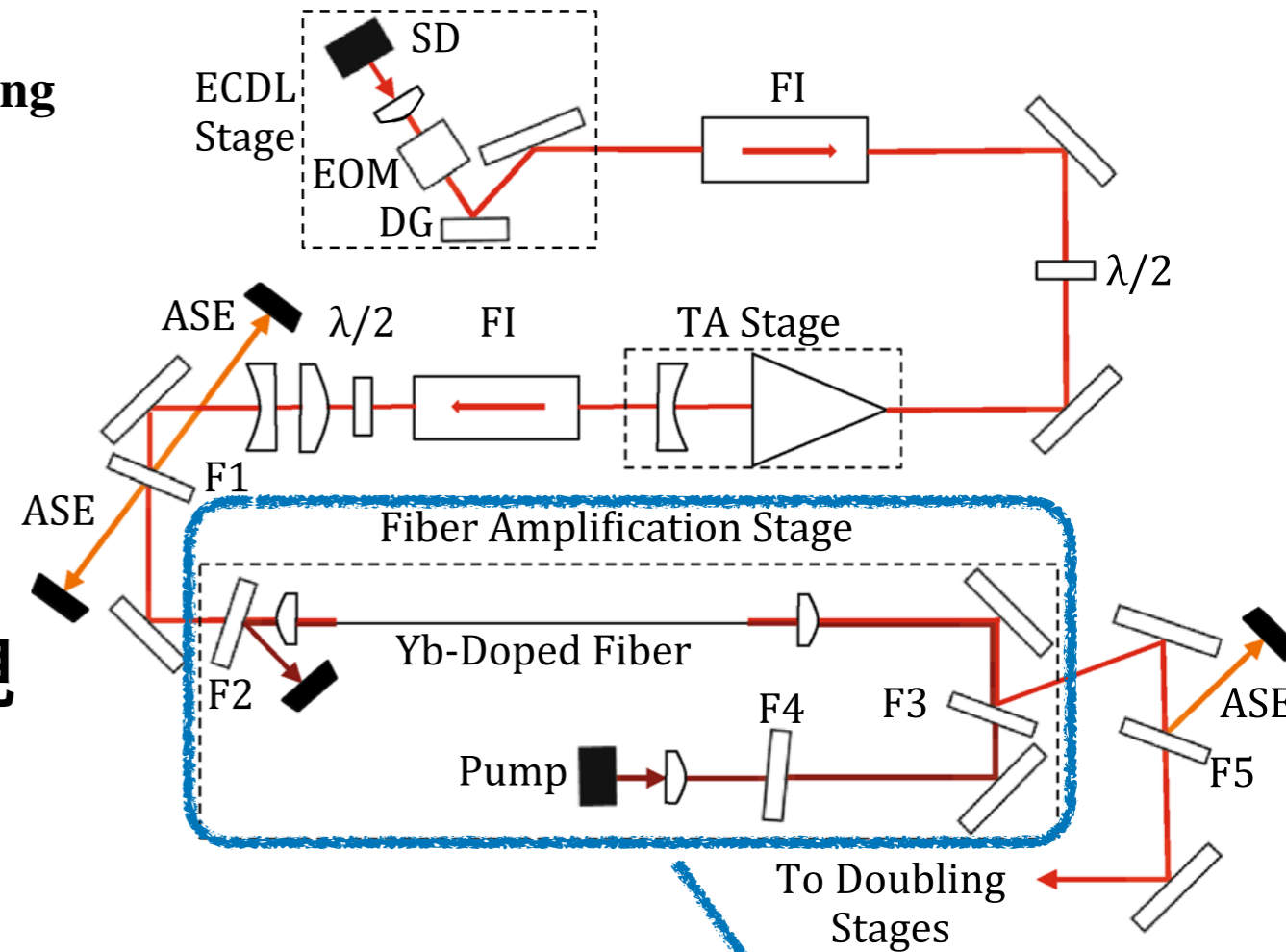


# ファイバーアンプ

Yb fiber amplifier at 972.5 nm with frequency quadrupling to 243.1 nm

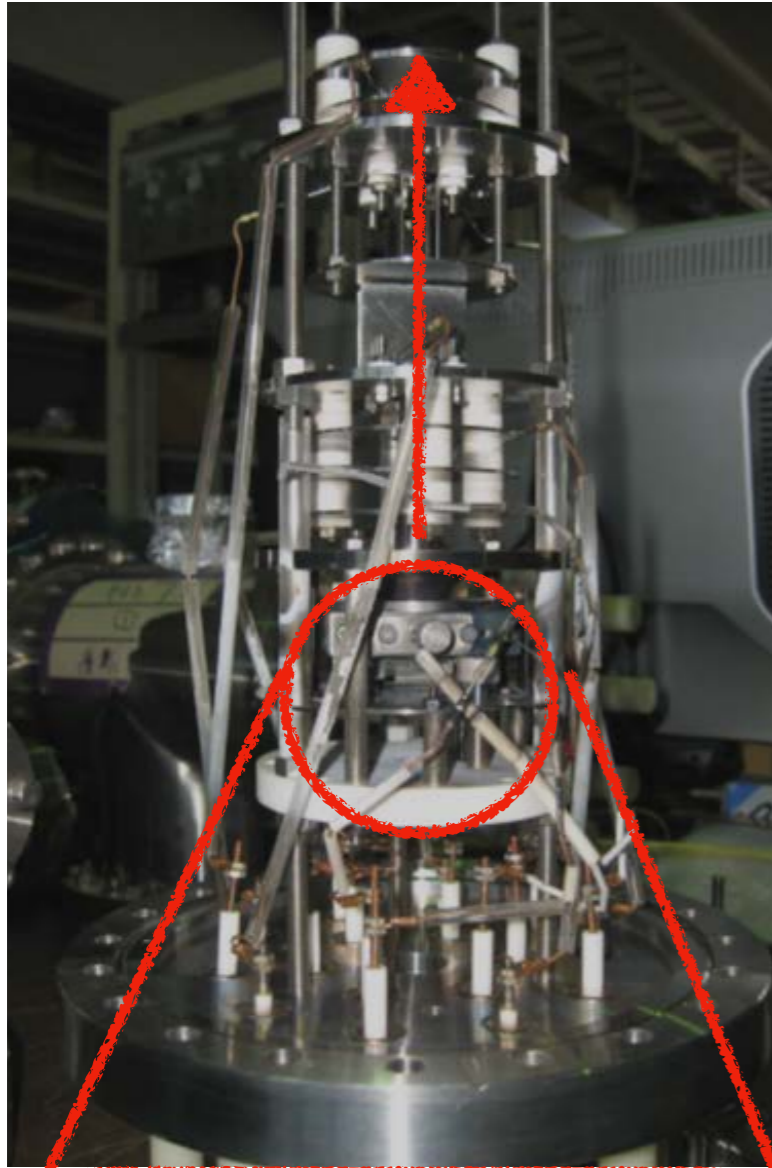
Z. Burkley<sup>1</sup> · C. Rasor<sup>1</sup> · S. F. Cooper<sup>1</sup> · A. D. Brandt<sup>1</sup> · D. C. Yost<sup>1</sup>

Ybドープファイバーを用いたアンプ  
 先行研究では100倍程度の増幅を実現  
 10倍程度の増幅を目指し開発中  
 (4回生卒業研究)



SHG前の987nmをアンプして493nmのパワーを増幅

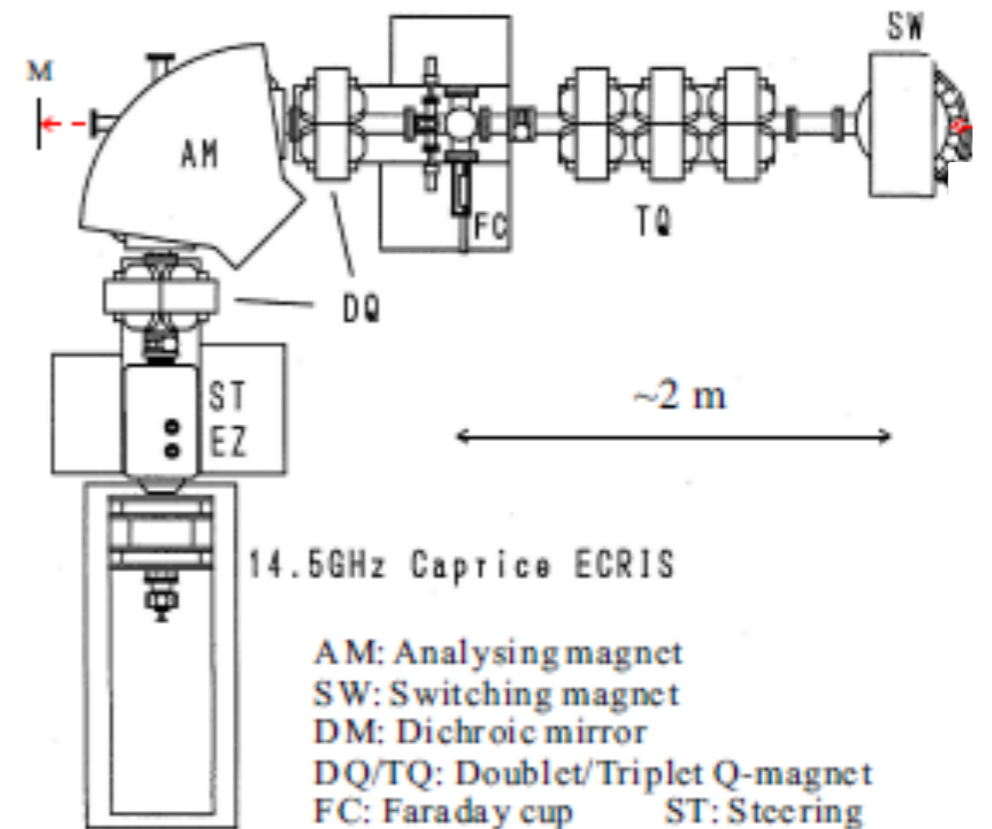
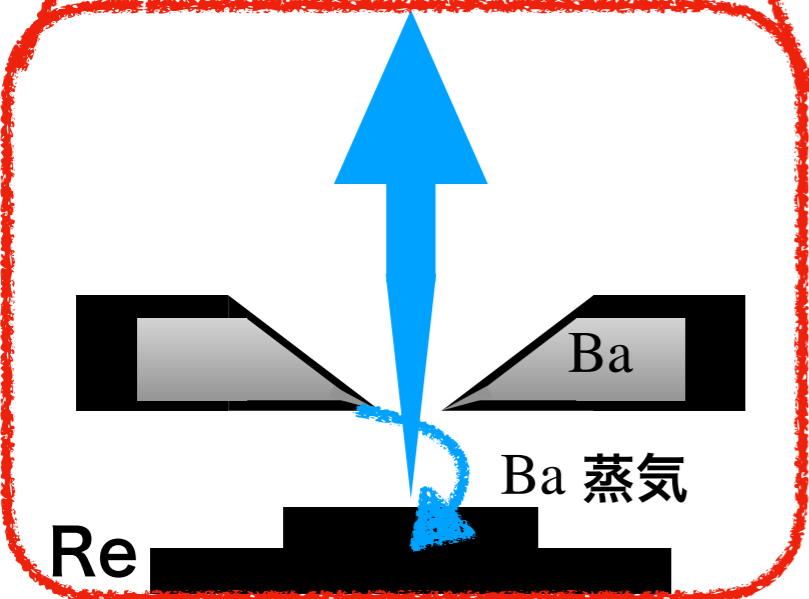
# Baイオン源の準備状況



前面供給表面電離型  
立ち上げ実験（イオン電流のみ）

・数百nA程度

今後、既存のビームラインにつなげて、  
エミッタンスメーターと  
レーザー励起による蛍光で、ビーム性能を評価



Re表面付近でBaを電離させて、ビームとして引き出す

# Signal観測レート

## イオンビーム

イオン	Ba <sup>+</sup>
運動エネルギー	10keV
エネルギー広がり	10 <sup>-4</sup>
エミッタンス	1mm mrad
励起点ビームサイズ (水平、垂直)	0.1~1mm、1~20mm
曲率半径	0.4m

今後実験により測定

## イオン準位

寿命	10.5ns
A係数	9.53×10 <sup>-7</sup> s <sup>-1</sup>

## レーザー

波長	493nm
パワー	10mW
サイズ	1mm

$$\text{Signal} = (\text{1 イオン辺りのシグナル}) \times (\text{イオンフラックス}) \times (\text{量子効率} \times \text{立体角})$$

イオン電流100nA

$$= 0.0037 \times 0.6 \times 10^{12} \times 4 \times 10^{-5}$$

$$= 8.8 \times 10^4 \text{ Hz}$$

# まとめ

- 我々のグループでは、重イオンとレーザーを用いた高強度ガンマ線源のための基礎研究を行なっている
- 提案中のものは従来のLCS  $\gamma$  線源と比べて、物理過程の断面積が大きく、高強度化が期待できる
- 現在は低エネルギーBaを用いた原理実証実験の準備をしている
- 現在の準備状況

## レーザー

基本的なパスが完成したが、レーザーパワーが足りていないのでファイバーアンプの導入を検討中 (1.3mW  $\rightarrow$  10mW)

## イオン源

数百nA程度の出力のイオン源の立ち上げ中

今後、エミッタンス測定により、ビーム性能を評価

信号観測レート： $8.8 \times 10^4 \text{Hz}$





笹尾 登, 吉村 太彦, 吉村 浩司, 吉見 彰洋,  
植竹 智, 宮本 祐樹, 増田 孝彦, 原 秀明,  
平木 貴宏, 今村 慧, 今井 康貴



上垣外 修一, 中川 孝秀, 金井 保之,  
市川 雄一, 長友 傑



本田 洋介



坂上 和之

Back up

# イオン源の検討

	simulation	Ion Source(ECR)	Ion Source(thermal)
ビーム電流	$1 \mu\text{A}$	$1 \mu\text{A}$	10nA
規格化エミッタンス	1 mm mrad	1.0 mm mrad	5.5 mm $\mu\text{rad}$
エミッタンス(10keV)		2.5 mm mrad	14.1 mm $\mu\text{rad}$
エネルギー幅	$10^{-4}$	$1.5 \times 10^{-3}$	$1.1 \times 10^{-5}$
輝度[A/(mm mrad) <sup>2</sup> ]		$1.0 \times 10^{-4}$	4.6

Thermal Ion Sourceの方がエミッタンスがよく、最終的なビーム強度は

Thermal Ion Sourceの方が良い

ECRの方で46mAが出れば、Thermal Ion Sourceに匹敵するが、難しい (らしい)

# QIBの見積もり

## • Super-KEK-B ring

- $\gamma=250$   
(requires super-conducting magnets)
  - $\rho=210\text{m}$   $B=8.5\text{T}$
- $N_i=10^9$  ions/bunch
- Energy spread  $(dE/E)=0.5 \times 10^{-3}$

## • H-like ion

- $Z=22$  Ti H-Like
- $E_{eg}=5$  keV



「相対論的イオンビームによる高強度 $\gamma$ 線源」  
 本田、第14回日本加速器学会プロシーディング  
 'Intense gamma radiation by accelerated quantum ions'  
 笹尾、18th Lomonosov

E.G.Bessonov and K.-J.KIM, PRL 76 431 (1996.)

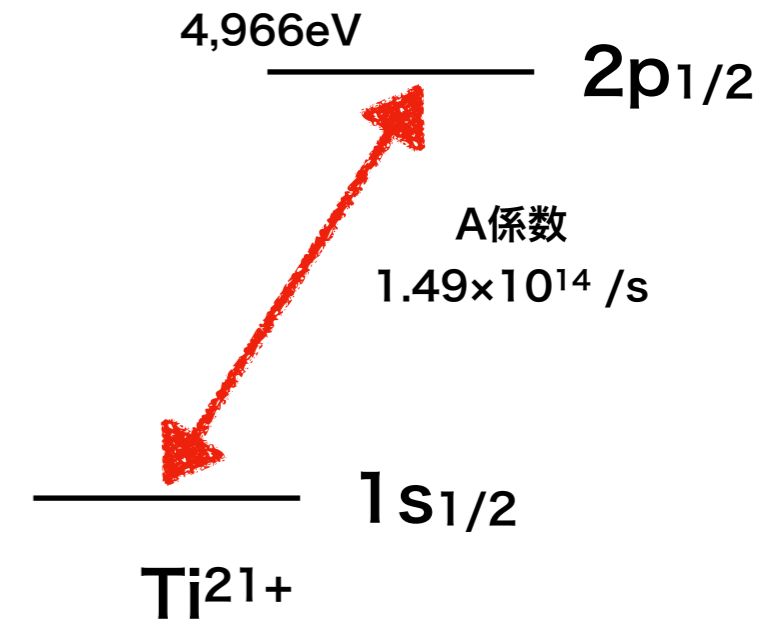
“Radiative Cooling of Ion Beams in Storage Rings by Broad-Band Lasers”

## • Light source(FEL)

- $E=10\text{eV}$
- $I/I_s=5 \times 10^{-4}$
- $\langle P_L \rangle = 12\text{kW}$

## • Gamma rays

- $E_g = 2.5$  MeV
- Flux  $10^{17}$  Hz



## 1 イオンが励起光と1回交差した時の放射個数

$$\Delta N^s = 2(1 + \beta_z) \frac{\bar{\sigma}}{1 + D} \frac{I}{\hbar\omega_L} \frac{\sigma_L}{c} \sim 1$$

D: Saturation Parameter,

$\sigma$ : Laser線幅込みの実効的な断面積

$\sigma_L/c$ : 相互作用長 (時間)

$I/\hbar\omega$ : Laser Flux

1 bunchが30MHzだとすると  
 $3 \times 10^{16}$  photon/sの $\gamma$ 線が得られる

# これまでの研究

## 理論

(1) E.G. Bessonov and K.J. Kim, Phys. Rev. Lett 76(1996) 431

→ レーザーを用いたイオン冷却

(2) E.G. Bessonov, Nucl. Instr. Meth. B309 (2013) 92

(3) M.W. Krasny, arXiv:1511.07794v1 [hep-ex] 24 Nov 2015

→ Gamma Factory計画(QIBと同種原理を用いた計画)

## 実験

PSI(Partially-Stripped Ion)を加速し、  
レーザー励起させた例はない

昨年の秋頃

## Gamma Factory(CERN)

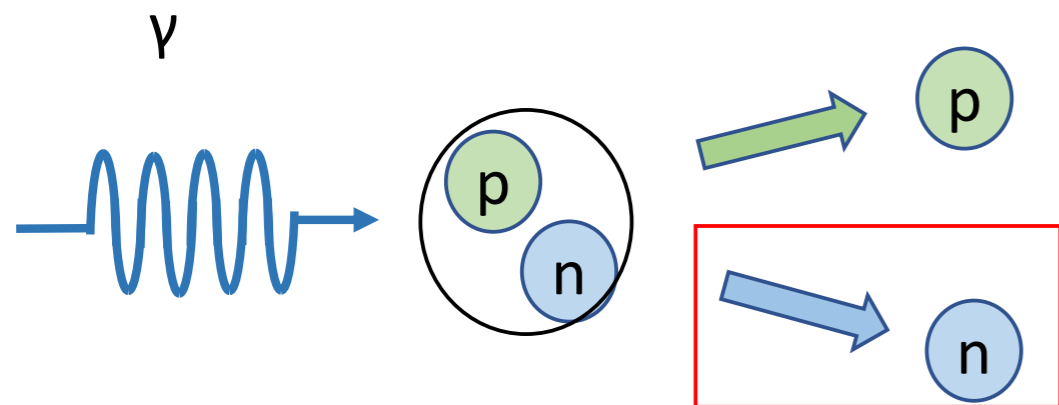
SPSにおいて $\text{Xe}^{39+}$ ( $Z=54$ )ビームの蓄積の成功



# High Flux $\gamma$ 線の応用例

## • Ultra cold neutronの生成

T. Masuda, A. Yoshimi, M. Yoshimura,  
Int. J. Mod. Phys. E 26, No.11, 1750076 (2017)



~2.2MeV,  $10^{17}/\text{sec}$ で  
 $10^5$ 個/sec程度

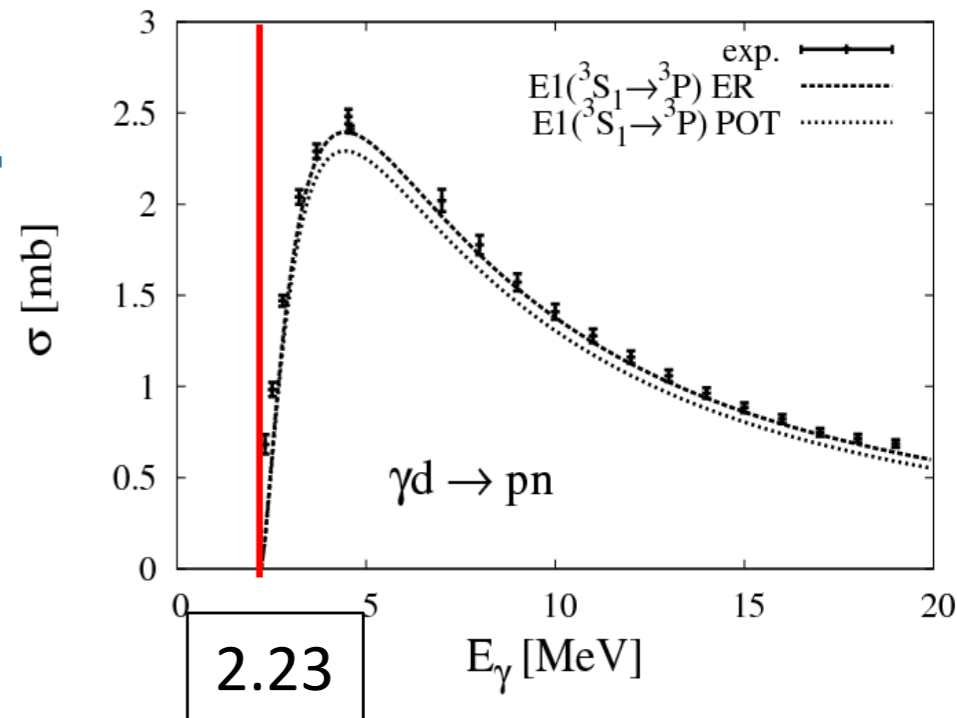
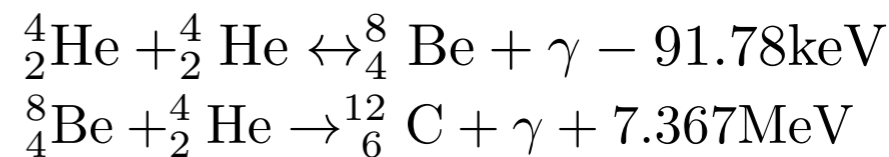
Paul Scherrer Institute(PSI)では $3 \times 10^4$ 個/sec  
(G. Bison et al., Phys.Rev.C95, 045503 (2017).)

## • Nuclear Astrophysics

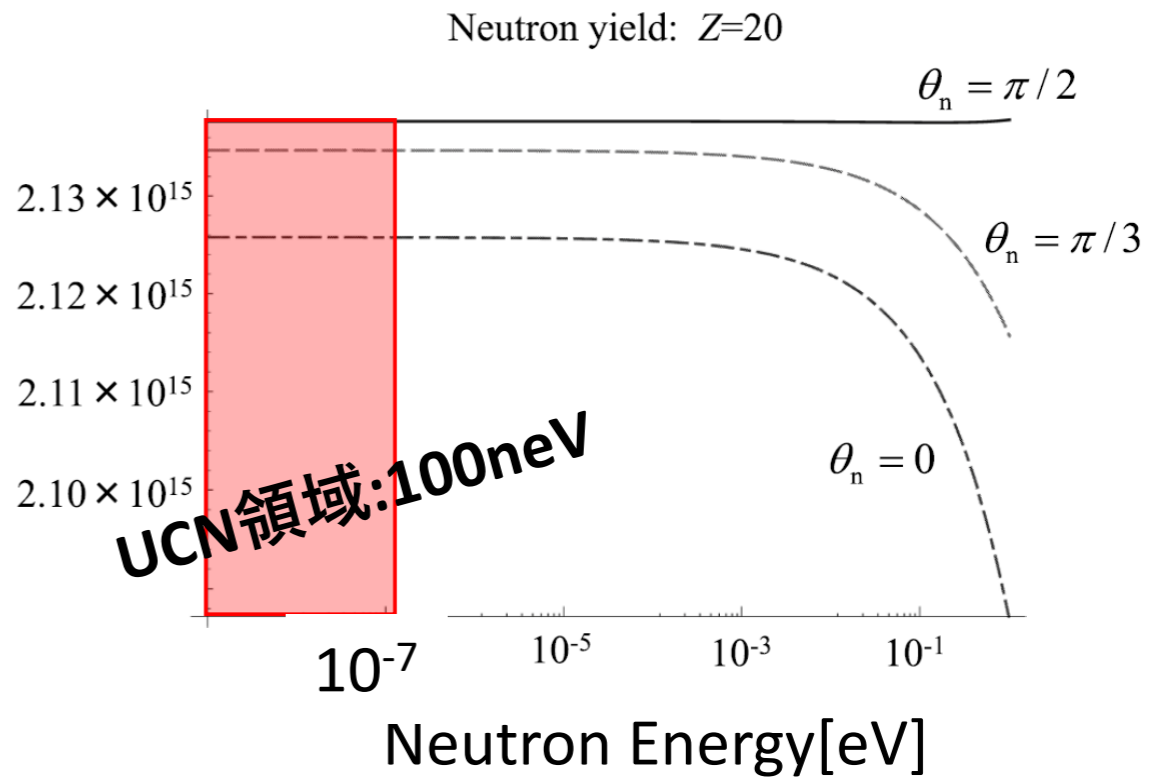
${}^4\text{He}(2\alpha, \gamma){}^{12}\text{C}$ の反応率を逆反応を $\gamma$ 線を用いて実験的に測定

星の進化を記述する上で重要なパラメーター

~8MeV,  $10^{17}/\text{sec}$



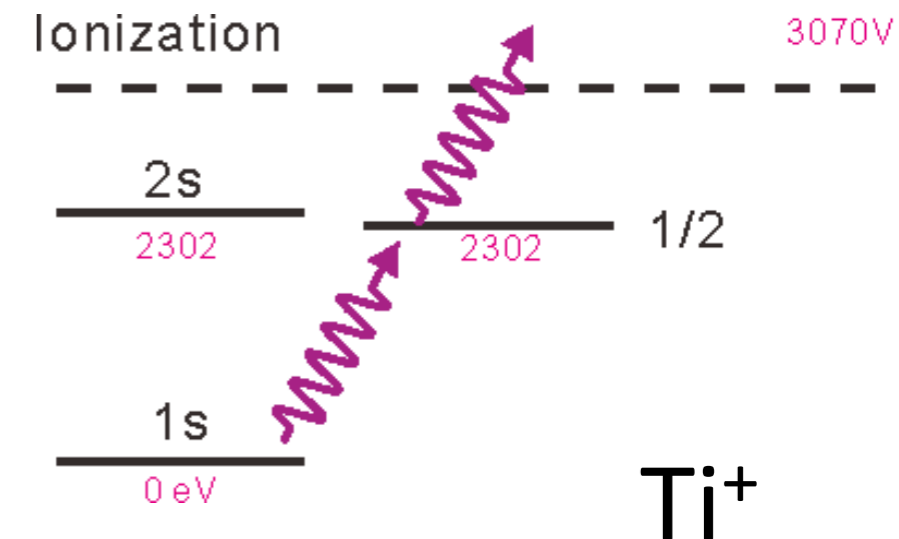
Neutron yield[Hz/(keV)]



# PSIを蓄積する上で…

## 問題点

- 残留ガスとの衝突
- 2光子吸収によるイオン化
- バンチ内の散乱



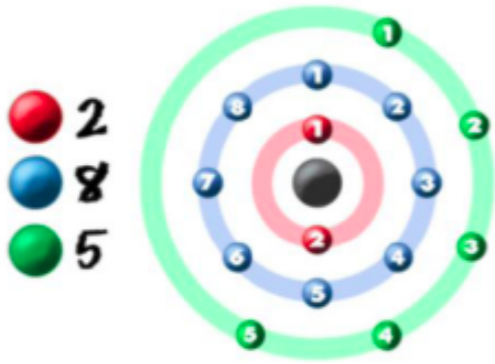
➡ いずれもイオンの価数を変えてビームをロスさせる

- 磁場によるStark効果



# イオンビームの蓄積 (CERNでの先行研究)

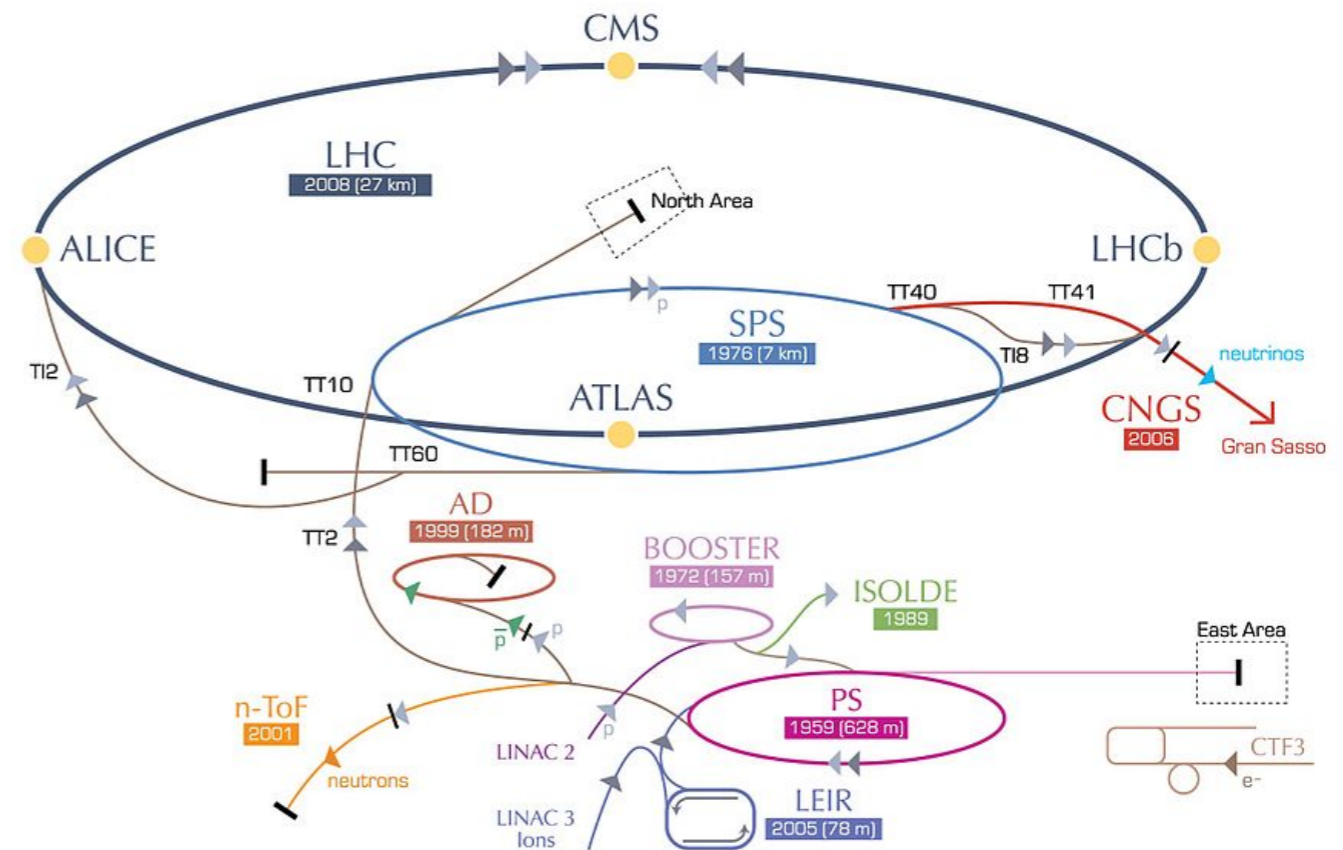
+39 Xe P-like Xenon



Xe39+ lifetime MD in the SPS

- 14-15 Sep. 2017:
  - first SPS MDION cycle setup
  - Lifetime at injection (23.6 GeV/Z)
  - Effect of 200MHz RF ON/OFF
- 13/19-20 Oct. 2017:
  - Lifetime at injection (23.6 GeV/Z) and flat top (270 GeV/Z)
  - Effect of 200MHz RF ON/OFF
- 08 Nov. 2017:
  - Lifetime at injection (23.6 GeV/Z) and flat top (189 GeV/Z)

CERN's accelerator complex



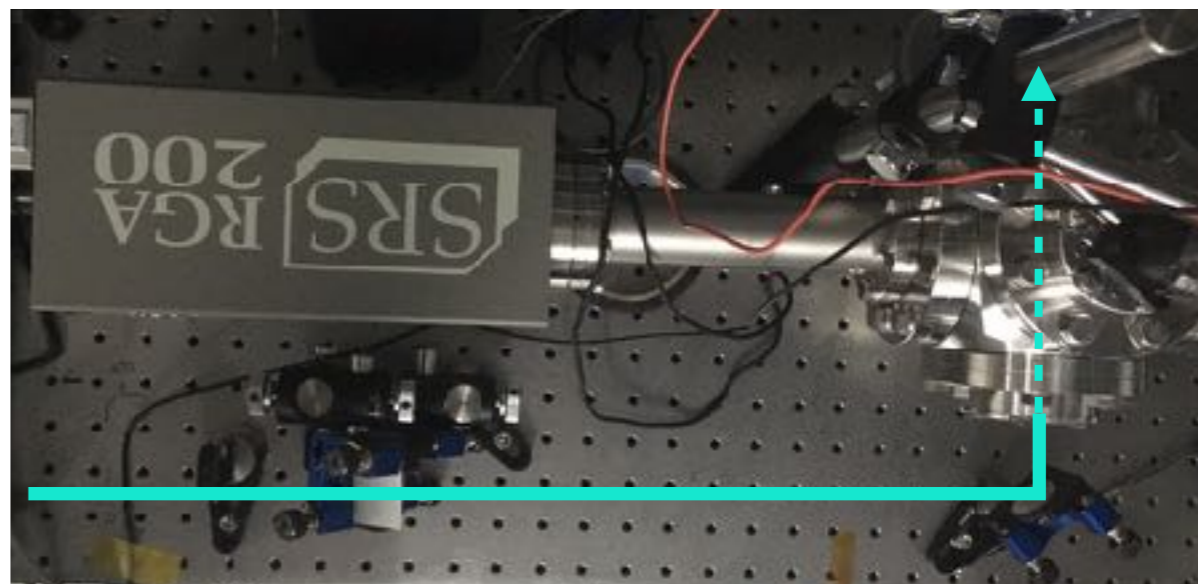
SPSでのXeイオンの蓄積・ビーム寿命の測定 (2017)

1714ms程度の寿命

今年はH-like Pbイオンを用いて実験?



# Baイオン源



## フィラメント熱放出型

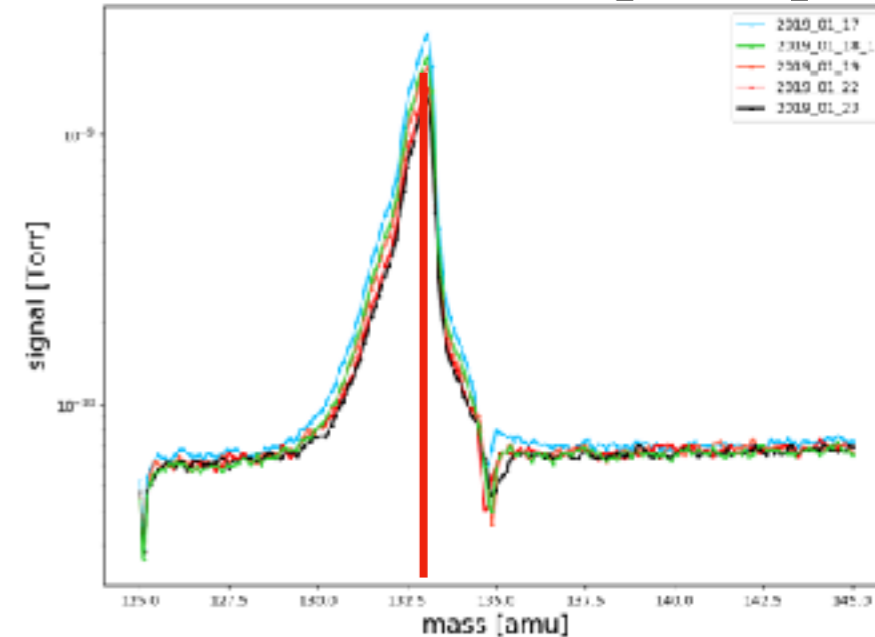
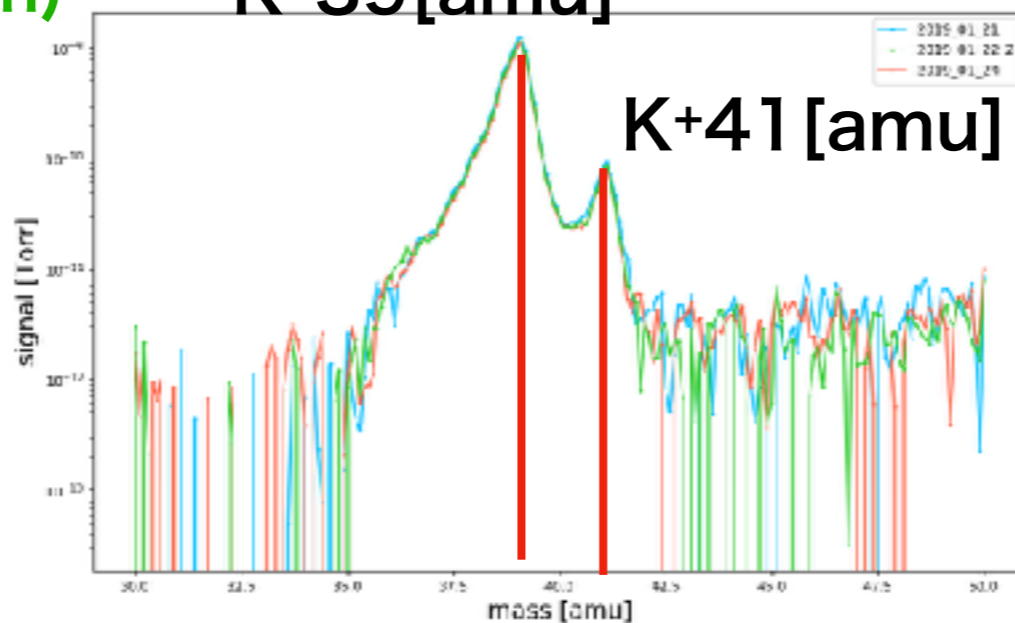
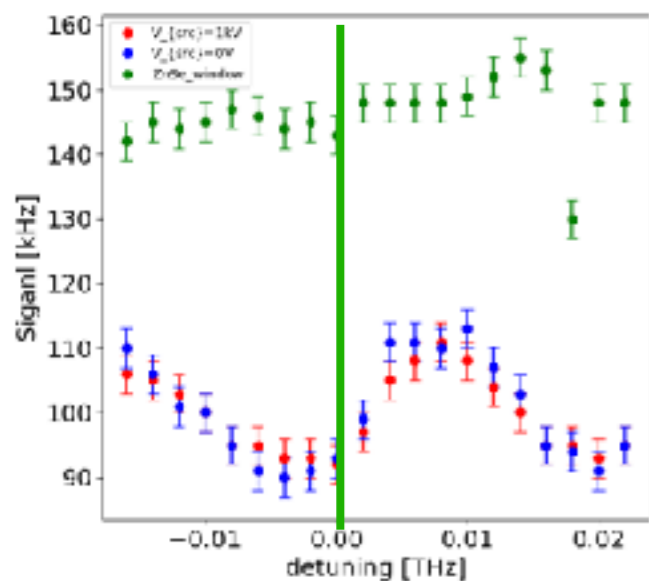
## 4重極質量分析機を用いた、組成測定

J. P. Blewett and E. J. Jones, Phys. Rev. 50, 464(1936).

共鳴波長(493.54nm)

K<sup>+</sup>39[amu]

Cs<sup>+</sup>133[amu]



イオン電流：数nA

イオン組成：K<sup>+</sup>、Cs<sup>+</sup>



過去に使用実績のあるBaイオン源に変更

