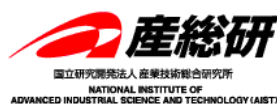


ボース・アインシュタイン凝縮を目指した ポジトロニウム冷却 I

山田 恭平、周 健治、橋立佳央理、石田 明、難波 俊雄^A、浅井 祥仁、
五神 真、田島 陽平^B、蔡 恩美^B、吉岡 孝高^B、大島 永康^C、
オローク ブライアン^C、満汐 孝治^C、伊藤 賢志^C、熊谷 和博^C、
鈴木 良一^C、藤野 茂^D、兵頭 俊夫^E、望月 出海^E、和田 健^F、甲斐 健師^G

東大理、^A東大素セ、^B東大工、^C産総研、^D九大GIC、^E高エネ研、^F量研、^G原子力機構



日本物理学会2019年秋季大会
2019.9.17@山形大学 17aT22-5

世界初の反物質レーザーを実現し、新しい実験がしたい

ポジトロニウム (Ps)

- 最も簡単な反物質原子系、生成が容易
- 水素様原子・純粋なレプトン系と単純な構造
- →束縛状態のQED等、基礎物理学検証に有用

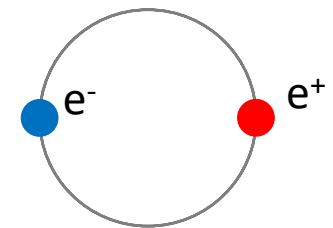
ボース・アインシュタイン凝縮 (BEC)

- 低温高密度のほとんど全ての粒子が単一の量子状態を占める
- 原子のレーザー状態

Ps-BEC

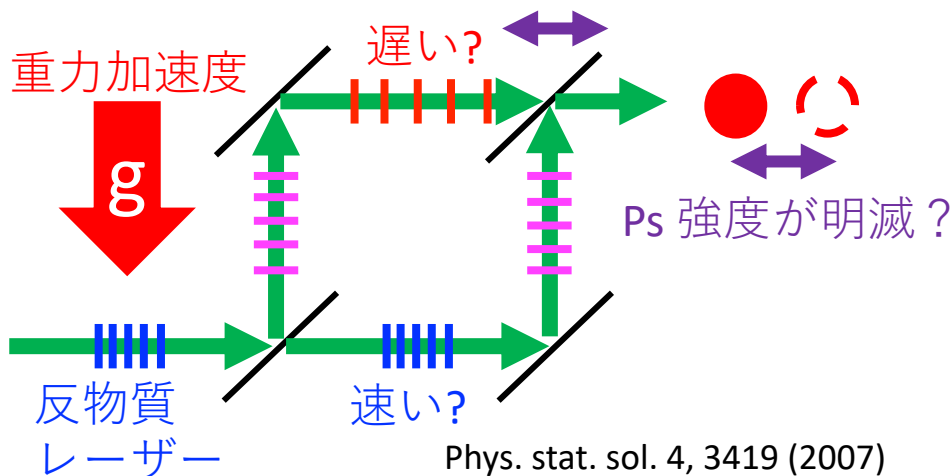
- Psが軽いいため転移温度が高い(14K @ 10^{18} cm^{-3})
- 反物質を含む系で初のBECの有力候補

ポジトロニウム



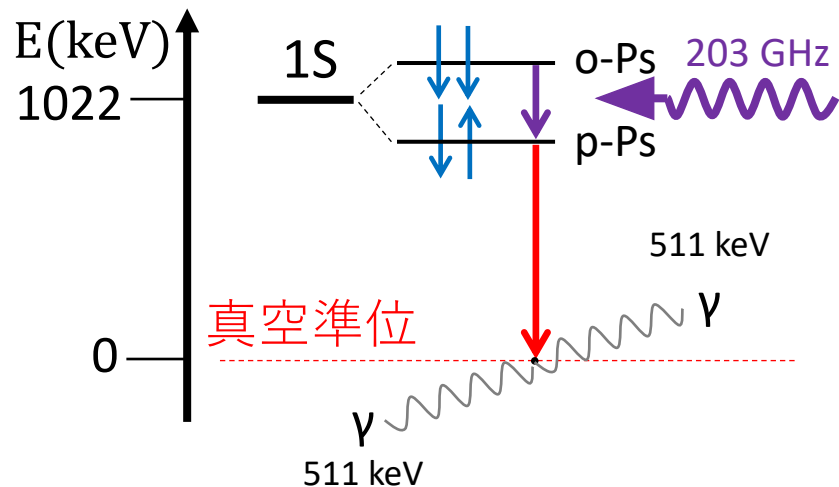
Ps-BECの応用

1. 反物質に働く重力を 原子干渉計を用いて測定する



- 反物質に働く重力効果、物質 e^- ・反物質 e^+ の非対称性をBECの特徴を用いて原子干渉計で検証

2. 511 keV ガンマ線レーザー



- レーザー状態のPsの崩壊によりPs-BEC(原子のレーザー) \rightarrow γ 線レーザー
- 従来のX線の10倍短い波長
 \rightarrow 微細構造プローブ

2つの課題: Psの高密度化と高速冷却

最大の問題

Psは寿命が142 nsと短い

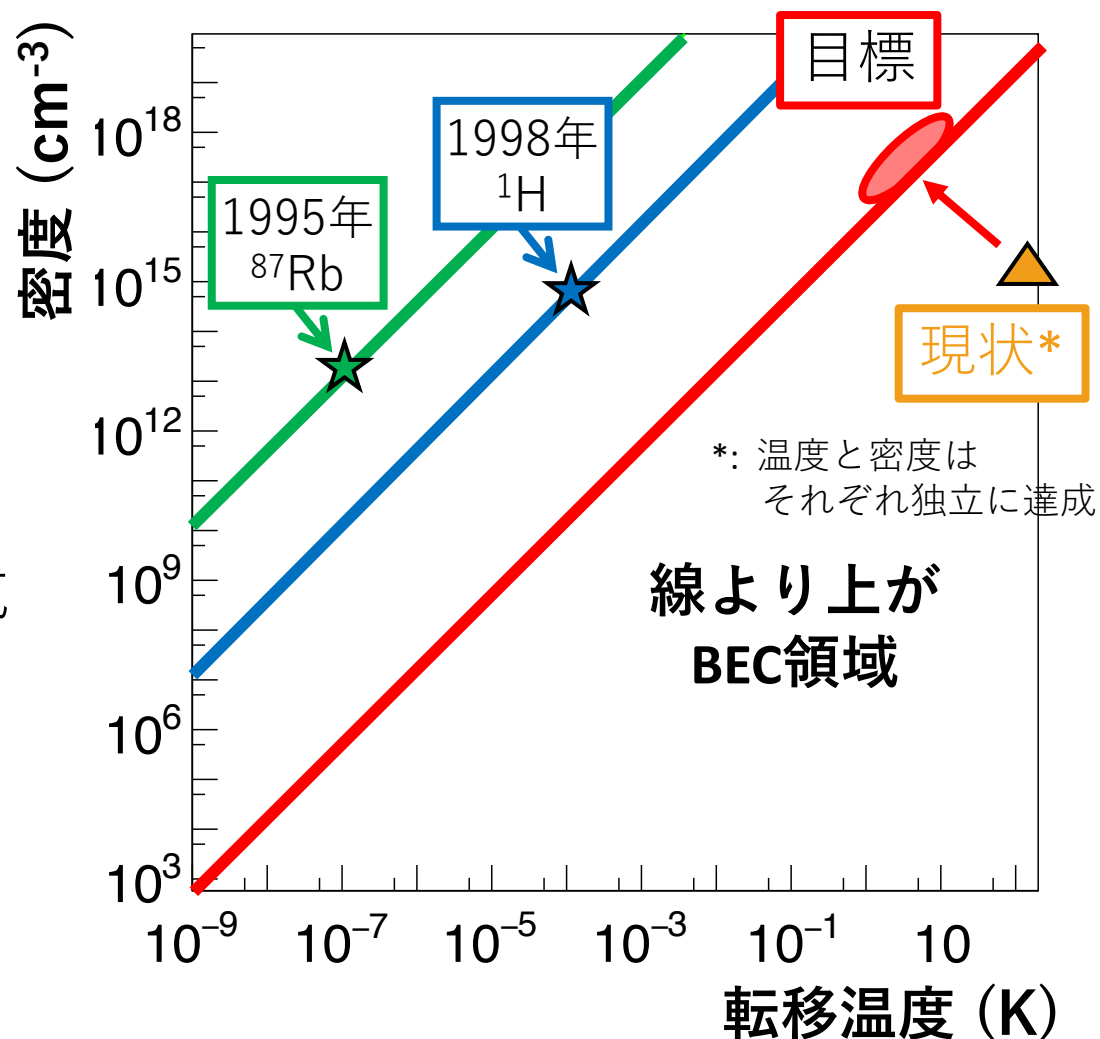
2つの課題

1. 瞬間的な高密度Psの生成

10^{17} cm^{-3} in $< 50 \text{ ns}$

2. Psの高速冷却

$< 10 \text{ K}$ in $\sim 300 \text{ ns}$



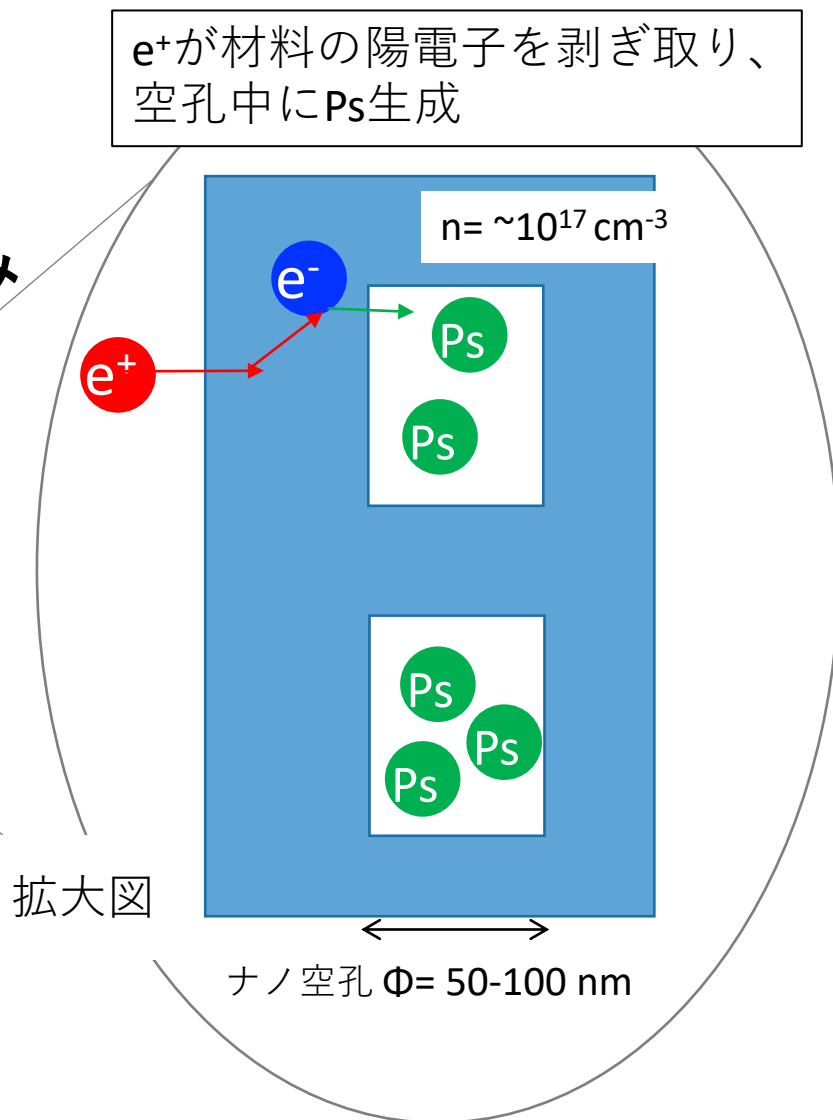
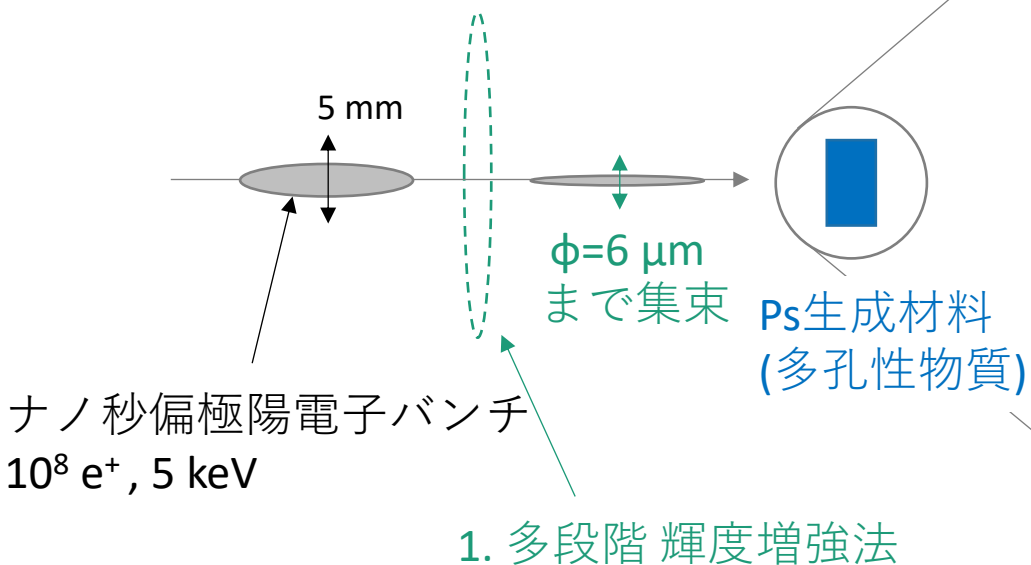
*: S. Mariuzzi *et al.* Phys. Rev. Lett. 104, 243401 (2010)

*: D. Cassidy *et al.* physica status solidi 4, 3419 (2007) 4

Ps-BEC実現方法

1. 高密度Psの生成

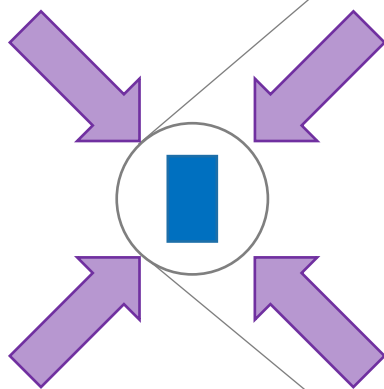
多孔物質に高密度陽電子を打ち込み
高密度Psに変換



Ps-BEC実現方法

2. Psの高速冷却

低温物質との熱化とレーザー冷却
の組み合わせ

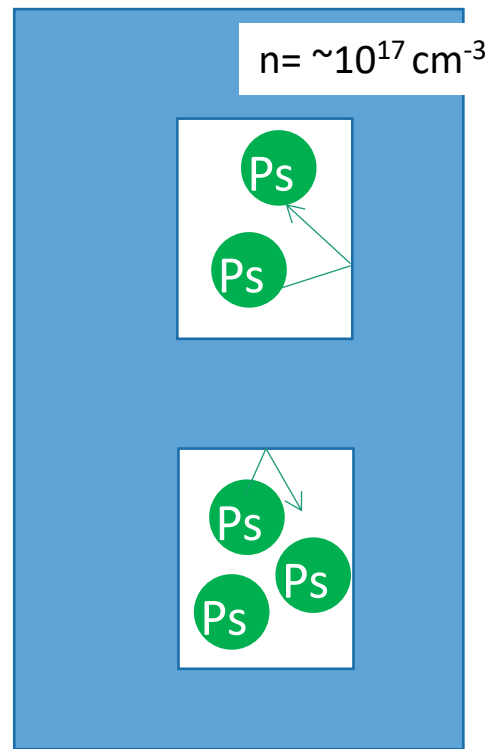


Ps冷却に最適化した
243 nm(1S-2P) 紫外レーザー

低温材料との衝突による
運動エネルギー交換(熱化)

冷凍機で4 Kまで冷却

拡大図

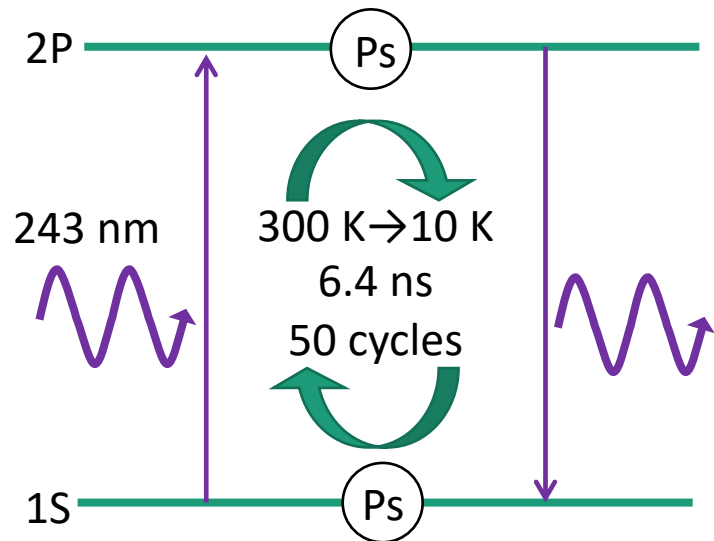


ナノ空孔 $\Phi = 50-100 \text{ nm}$

Ps冷却レーザーの要請

1. 長時間幅

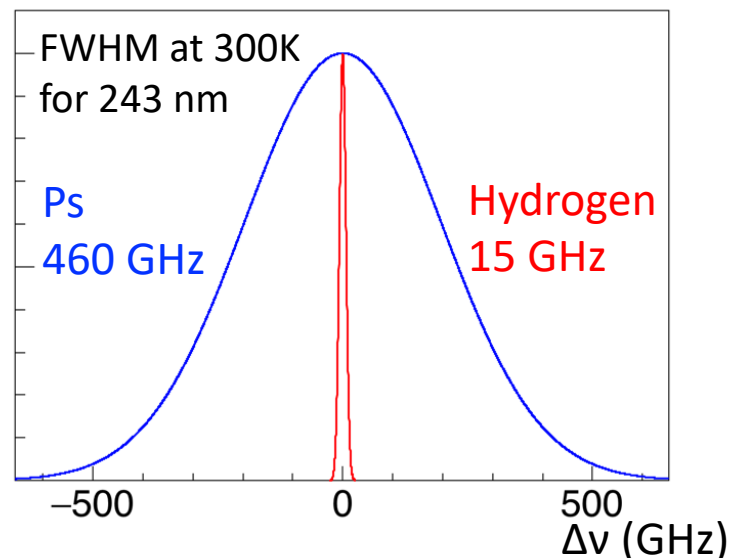
∴ Ps寿命: 142ns



- 1S-2P (243 nm)
- 6.4 ns × 50 ~ 300 ns

2. 広帯域

∴ Psの質量が $2m_e$ と軽い



- ドップラー広がり は水素原子の30倍
→ 全てのPsを冷却するには広帯域が必要

729 nm 高エネルギー(5 mJ) 広帯域(50 GHz) 長パルス(500 ns) レーザー

↓ 3次高調波発生

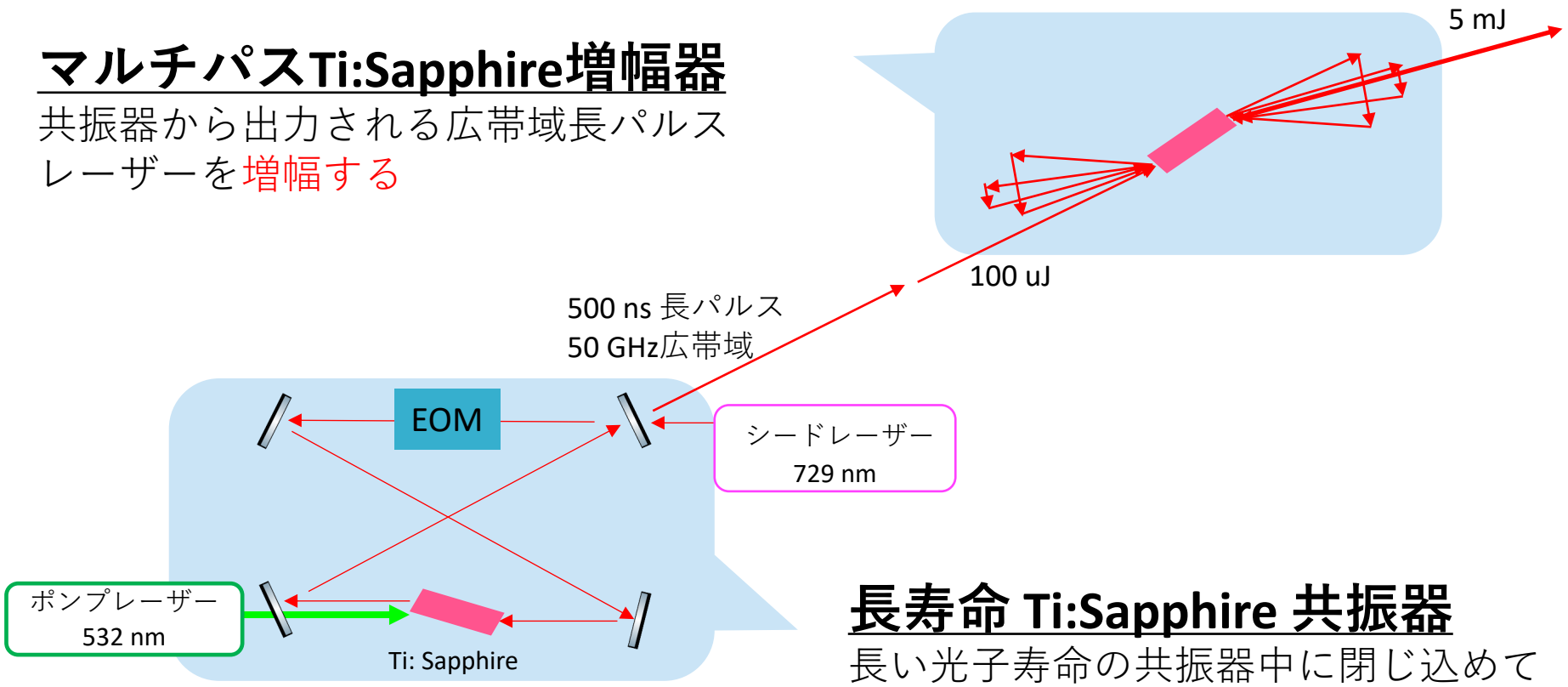
冷却レーザー: 243 nm 40 uJ 広帯域(150 GHz) 長パルス(300 ns) レーザー

高エネルギー 広帯域 長パルスレーザーの開発

2段階のTi:Sapphire増幅

マルチパスTi:Sapphire増幅器

共振器から出力される広帯域長パルスレーザーを**増幅する**



長寿命 Ti:Sapphire 共振器

長い光子寿命の共振器中に閉じ込めて
長パルスレーザー発振
さらに変調器により**広帯域化**

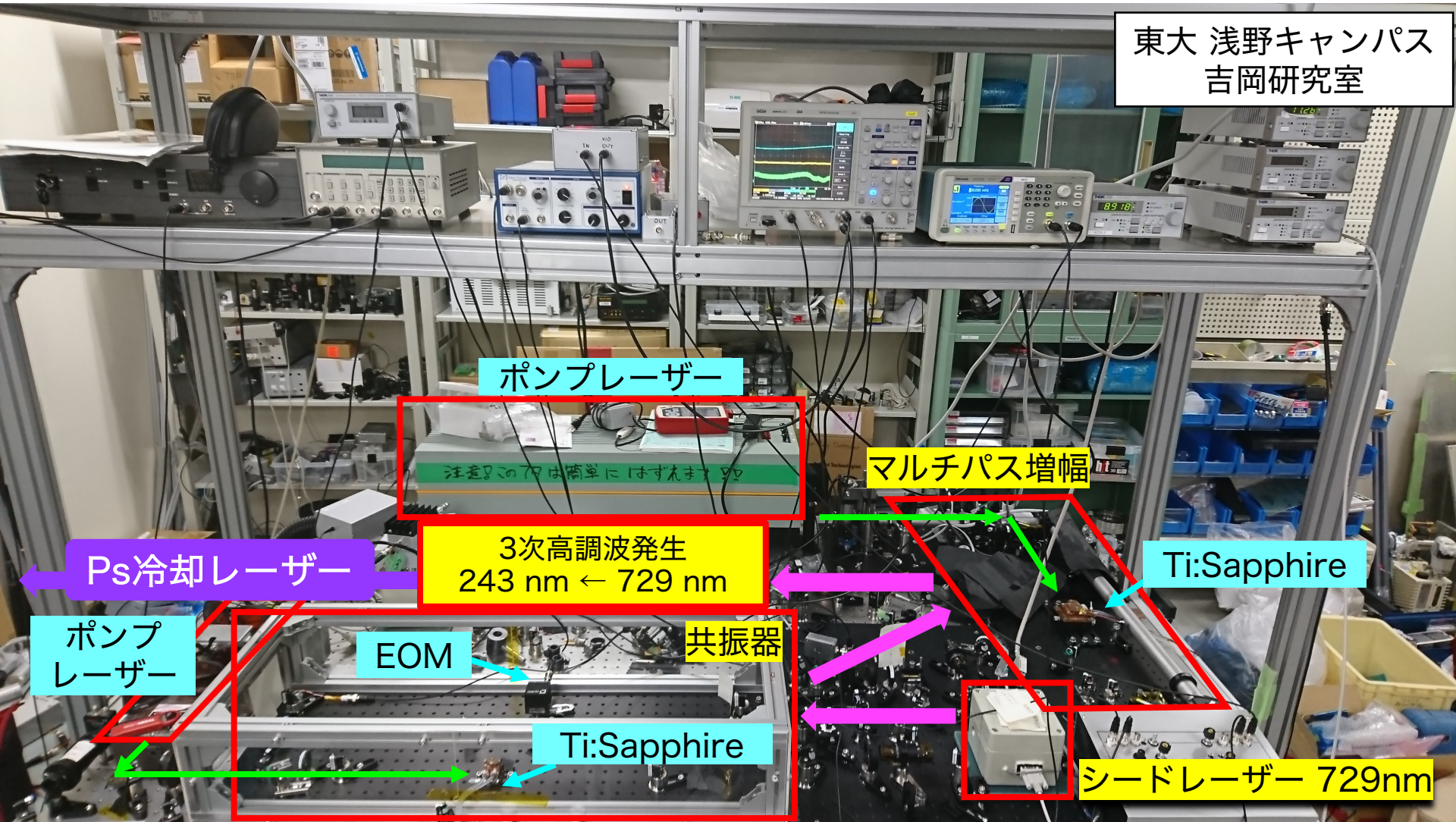
冷却レーザー系をKEKの実験室に合うよう コンパクトに組んでいる (2.0 m×1.1 m)

東大 浅野キャンパス
吉岡研究室



冷却レーザー系をKEKの実験室に合うよう コンパクトに組んでいる (2.0 m×1.1 m)

東大 浅野キャンパス
吉岡研究室



ポンプレーザー

マルチパス増幅

Ti:Sapphire

3次高調波発生
243 nm ← 729 nm

Ps冷却レーザー

ポンプ
レーザー

EOM

共振器

Ti:Sapphire

シードレーザー 729nm

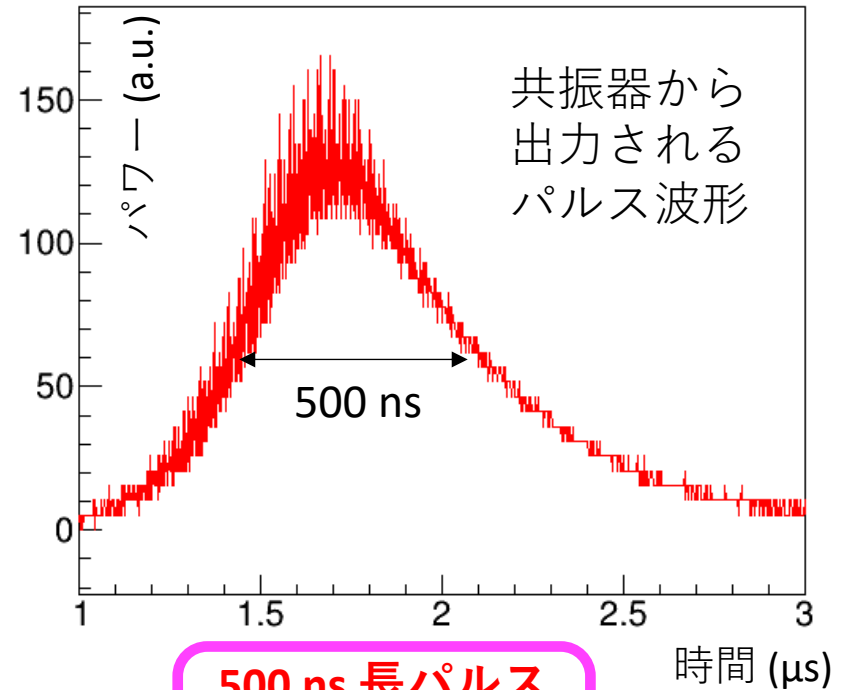
シードレーザー 729nm

500 ns 長パルスレーザーの生成

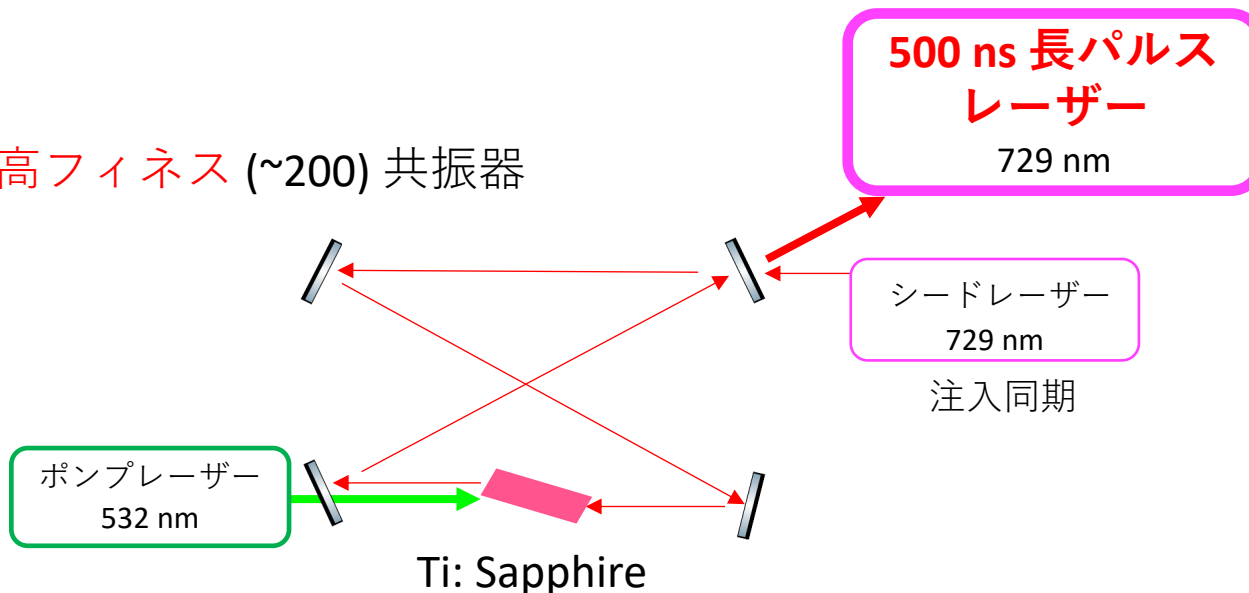
500 ns 長パルス

→長い光子寿命の共振器を用いて
光を長時間閉じ込める

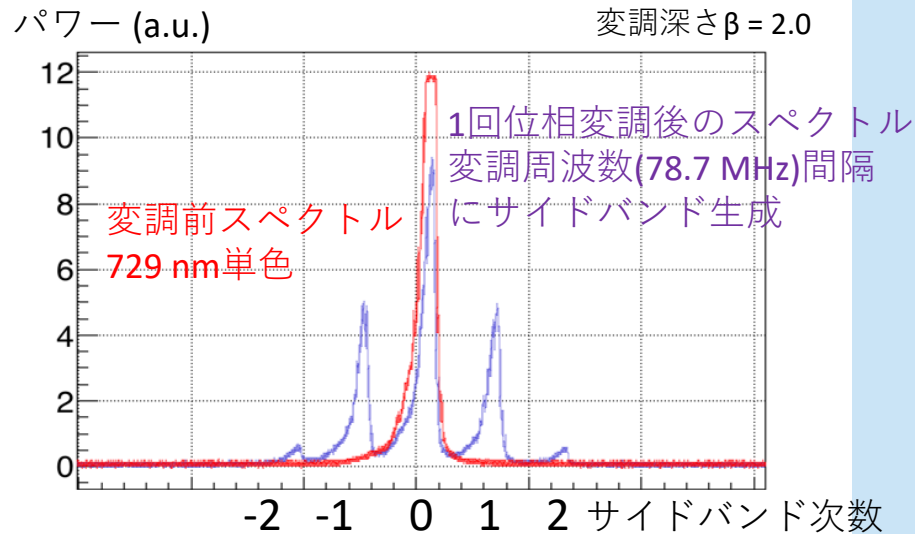
1. 長い共振器長 (3.8 m)
2. 高いフィネス ~ 200



高フィネス (~ 200) 共振器



500 ns 長パルス**広帯域**レーザーの生成

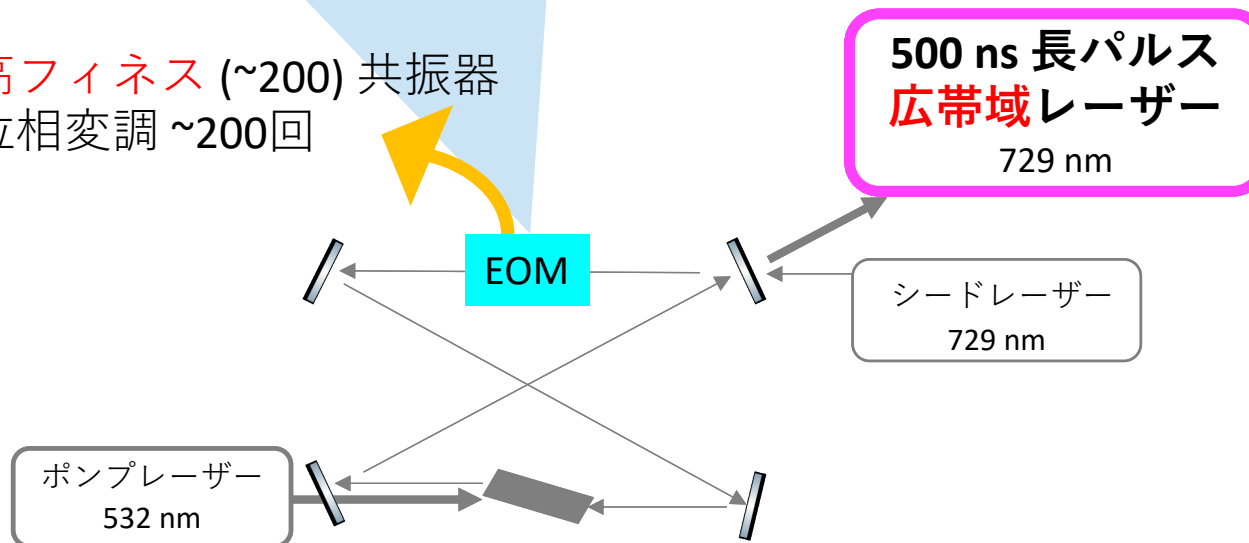


広帯域化

EOMで位相変調を ~ 200 回
高次までサイドバンド生成
→実効的な広帯域化

1. 高フィネス (~ 200) 共振器
2. FSRとEOM変調周波数の調整
3. 共振器制御

高フィネス (~ 200) 共振器
位相変調 ~ 200 回



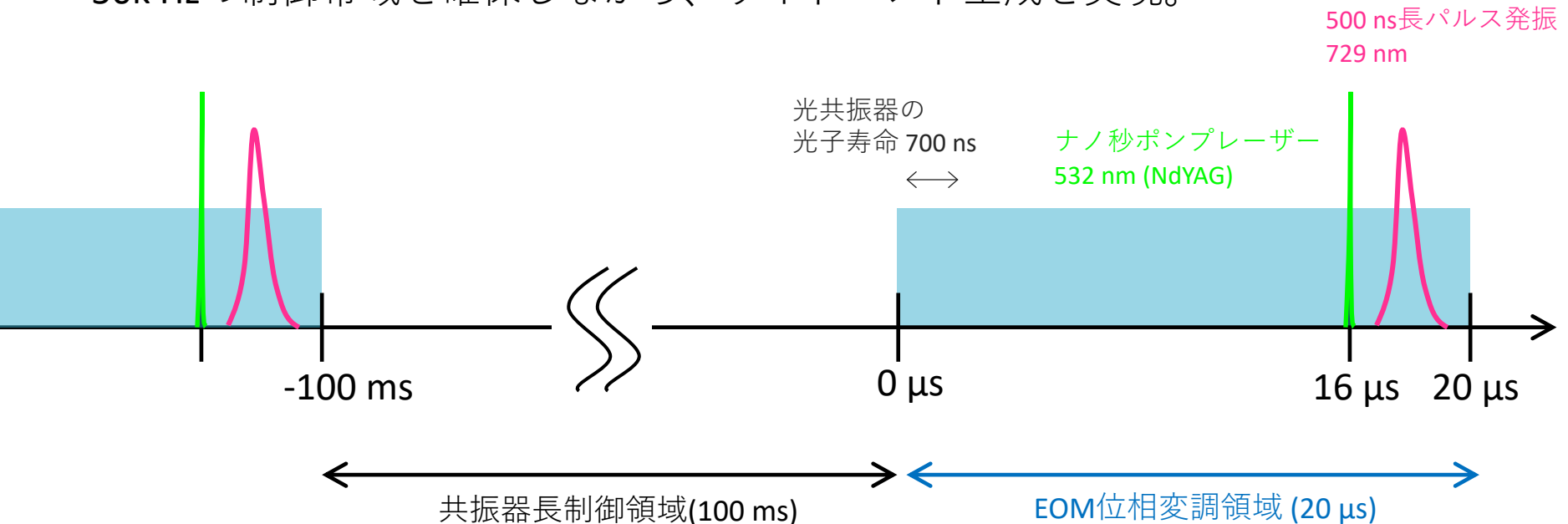
EOMによるサイドバンド生成と共振器長制御を両立する方法

共振器中のEOMは共振器中のレーザーに位相変調を与えるが、共振器の制御信号を乱してしまう。

パルスレーザー発振は 100 ms周期

パルス発振の直前だけEOMを駆動する。

50k Hzの制御帯域を確保しながら、サイドバンド生成を実現。

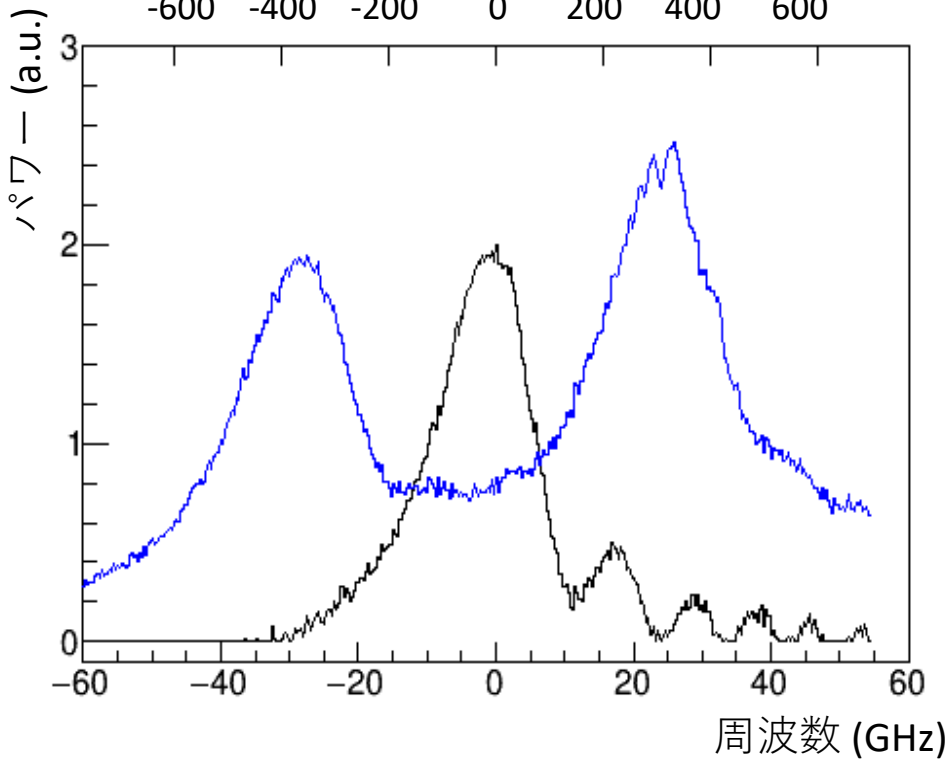


広帯域パルス発振に成功

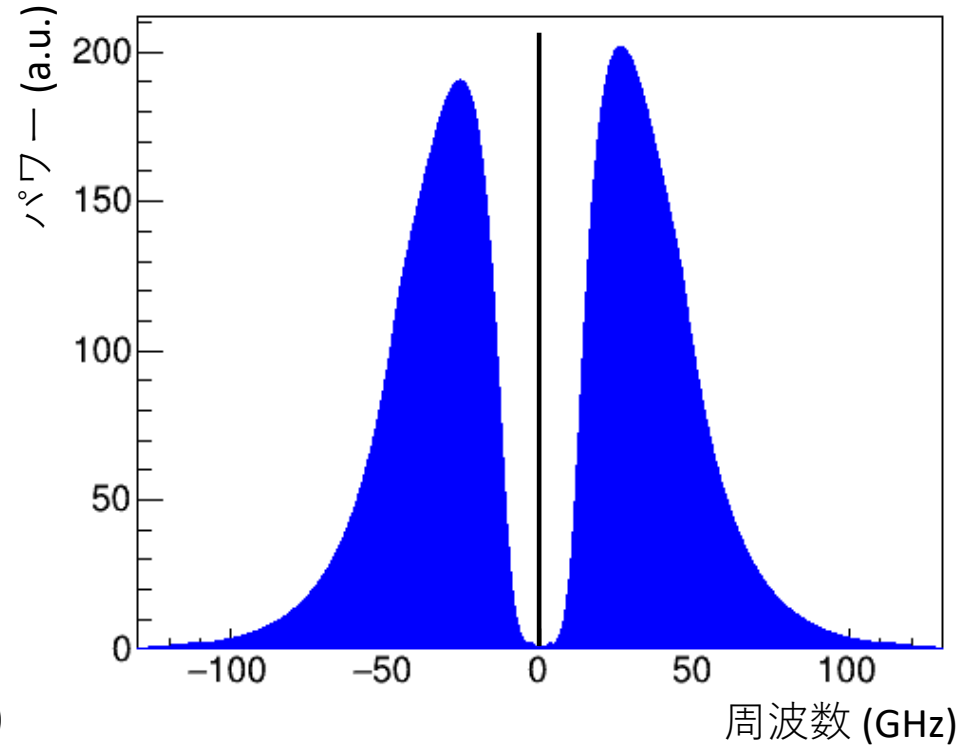
測定結果

サイドバンド次数

-600 -400 -200 0 200 400 600



数値計算

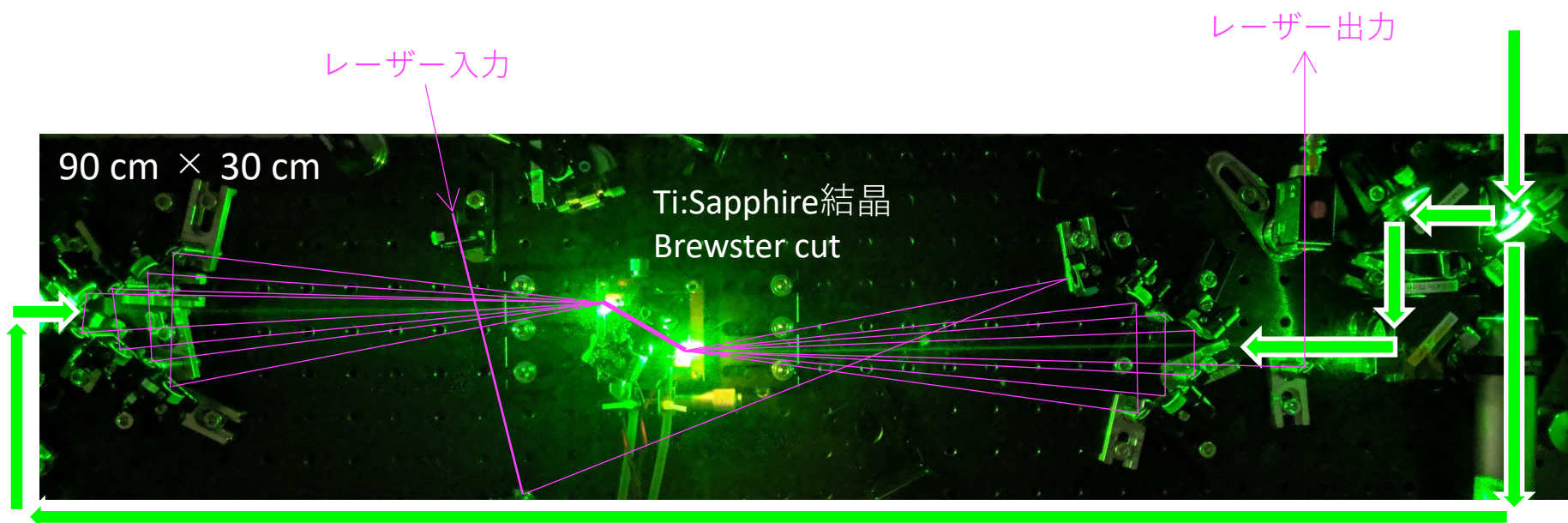


— EOM off のスペクトル
— EOM on のスペクトル

※黒線幅はスペクトル測定に用いた分光器の分解能に相当する

※青線が潰れているのは細かくサイドバンドが立っているため

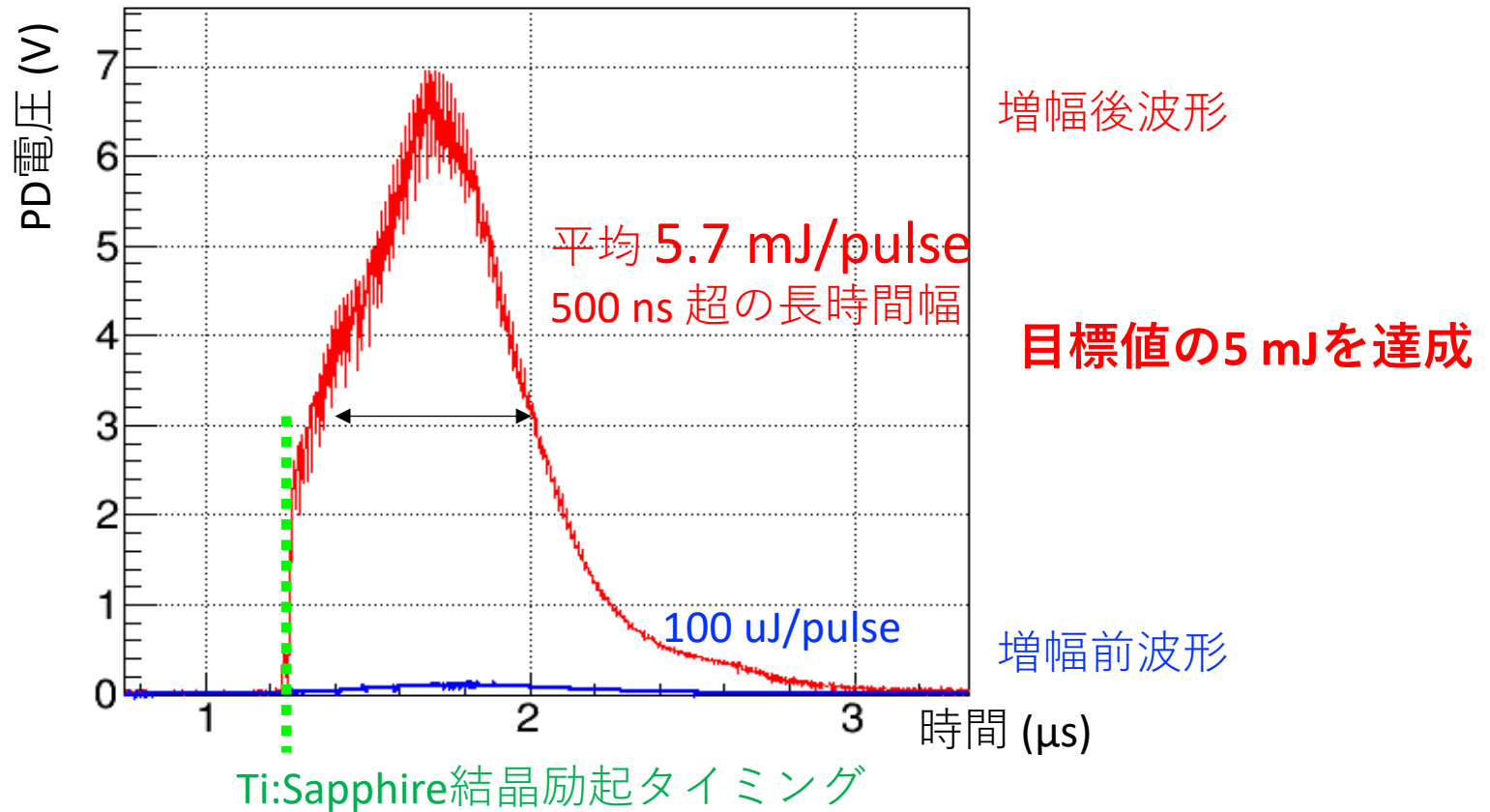
マルチパスTi:Sapphire増幅器



Ti:Sapphire結晶をポンプレーザー(220 mJ, 532 nm, 5 ns, 10Hz, Nd:YAG SHG)で励起
励起された結晶に729 nmパルスを8回通過させ、誘導放出で増幅する

結晶の損傷抑制: ポンプレーザーは2つに分割し結晶を両側から叩く
増幅効率向上: 下段ほどBrewster angleに近づける

パルスエネルギーを50倍以上に増幅できた



時間波形にはサイドバンド間隔78.7 MHzの変調がかかっている。
これはサイドバンドが生成されていることと対応している。

まとめ

- Ps-BECは反物質系で初のBEC有力候補
- Ps-BEC実現のための3つの開発要素
 1. 陽電子多段階輝度増強法
 2. Ps冷却レーザー
 3. Ps生成・濃縮・冷却材料
- Psレーザー冷却に最適化した光源を開発中。
- 729 nm、5.7 mJ高エネルギー、広帯域、500 ns 長パルス発振に成功。
- 冷却レーザー完成まで3次高調波発生(729 nm → 243 nm)を残すのみ。
- 世界初のPsレーザー冷却を12月にKEK-SPFで実現することを目指している。