

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Ⅱ

山田 恭平, 周 健治, 石田 明, 難波 俊雄^A,
浅井 祥仁, 田島 陽平^B, 蔡 恩美^B, 吉岡 孝高^B, 五神 真

東大理, 東大素セ^A, 東大工^B



日本物理学会2018年秋季大会
2018.09.17 @信州大学松本キャンパス
17aS28-5

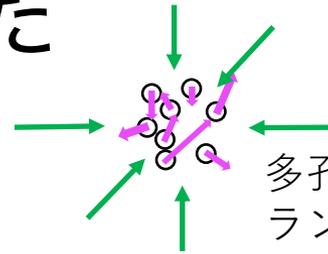
目次

本講演: ポジトロニウムBEC実現のための 冷却レーザーの開発

Ps-BECの実現→反物質重力の測定、511 keV γ 線レーザー

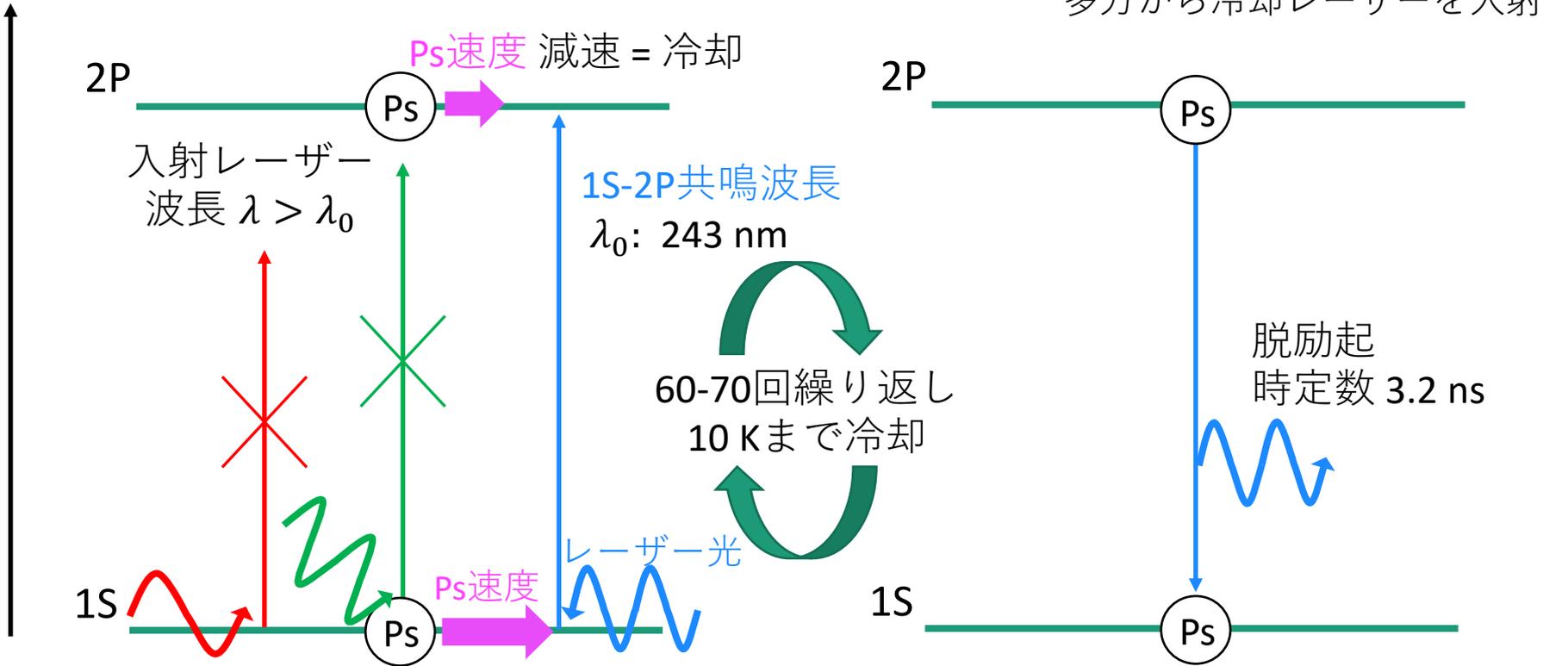
1. レーザー冷却の原理
2. ポジトロニウム冷却用レーザーの設計概要
3. 開発状況
4. 今後
5. まとめ

ドップラー効果を用いた レーザー冷却の原理



多孔質中に閉じ込められた
ランダムに動き回る
ポジトロニウム集団に
多方から冷却レーザーを入射

ポジトロニウム
内部エネルギー



レーザーと逆向きに運動するポジトロニウムが選択的にレーザーを吸収、励起

脱励起光は方向がランダム 平均ゼロ

Ps冷却用レーザーの要求スペック

Ps-BEC実現のための高速冷却には以下の特性が必要
市販品では満たせない**特殊な性能のため自作**

①持続時間: 300 ns

→Psの寿命: ~ 100 nsにわたり冷却

②パルスエネルギー: 40 μ J

→十分な冷却

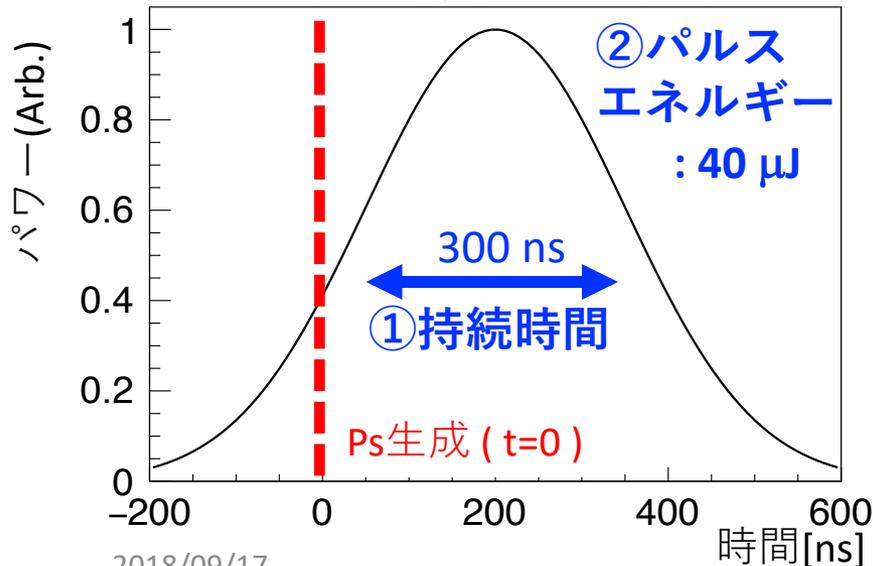
③線幅: 28 pm (140 GHz)

→Psの幅広い速度分布に対応

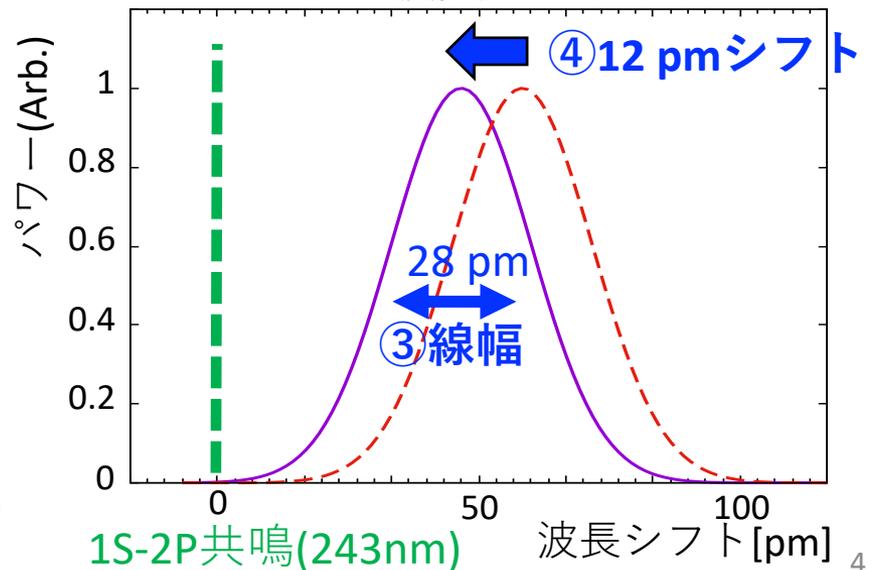
④波長シフト: 12 pm (60 GHz)

→Psの冷却に合わせ300 nsで高速変化

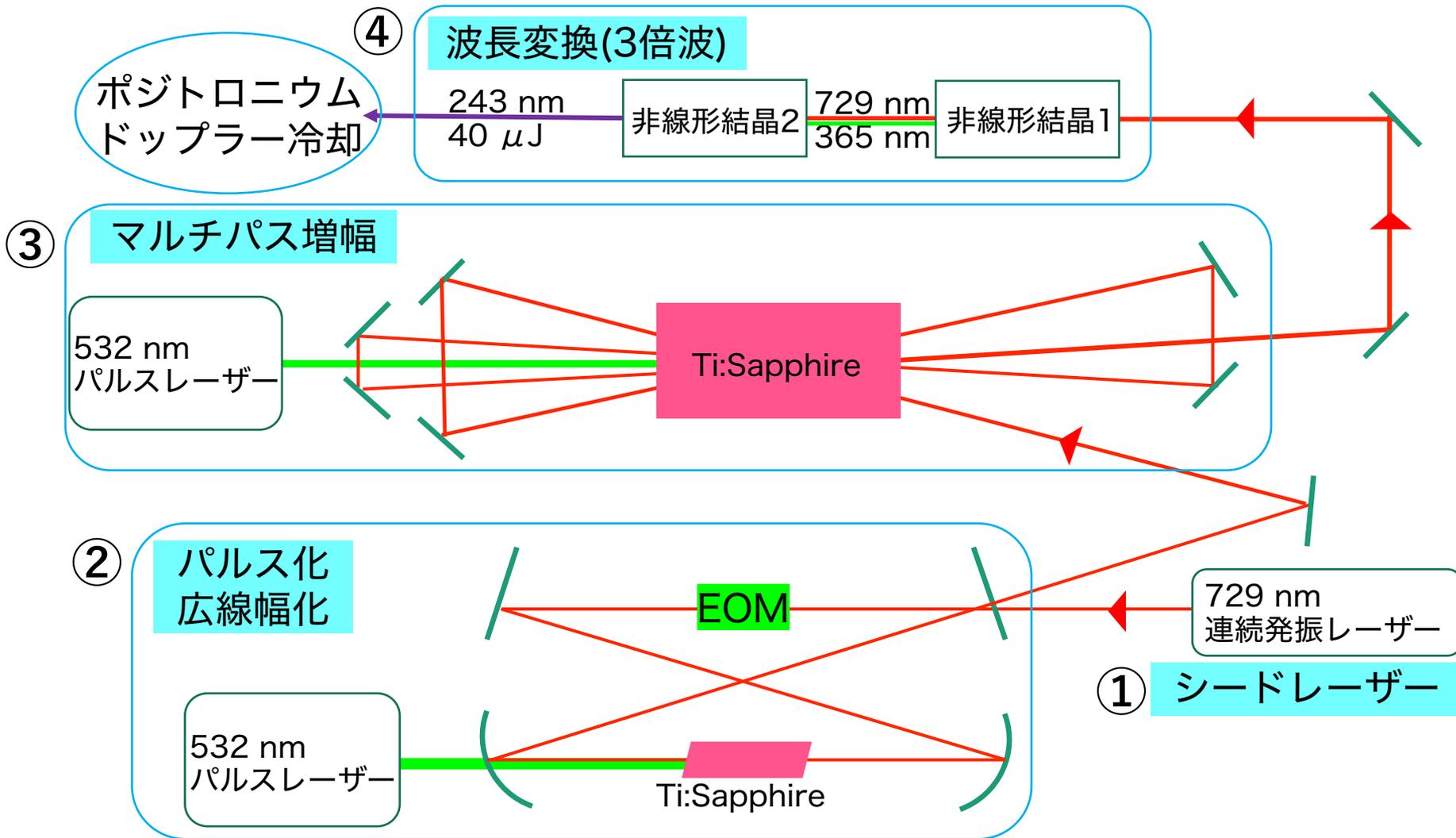
レーザー時間プロファイル



レーザー波長スペクトル



要求スペックを満たすレーザー光学系を最先端技術を組み合わせ設計



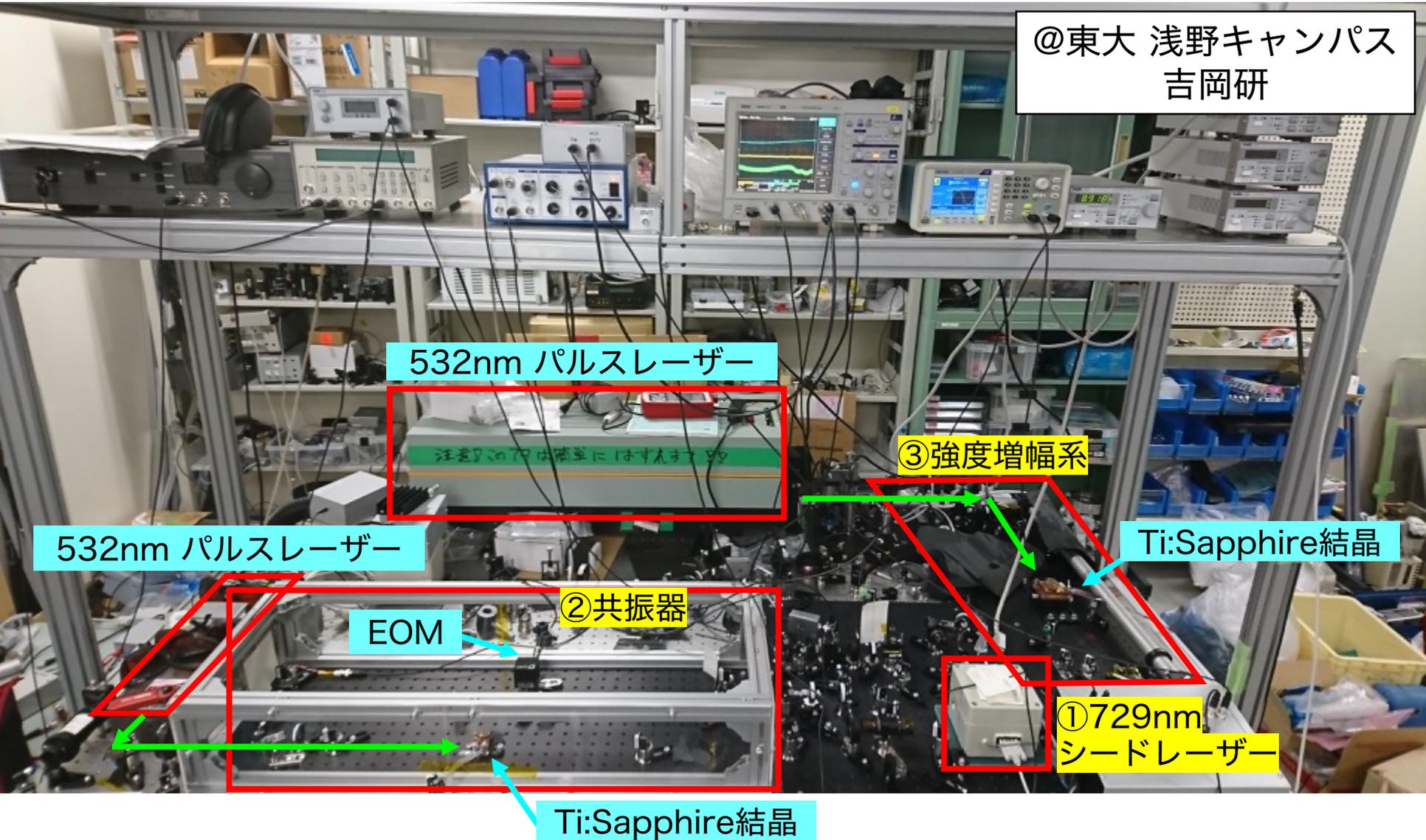
目次

本講演: ポジトロニウムBEC実現のための 冷却レーザーの開発

1. レーザー冷却の原理
2. ポジトロニウム冷却用レーザーの設計概要
3. 開発状況
4. 今後
5. まとめ

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)

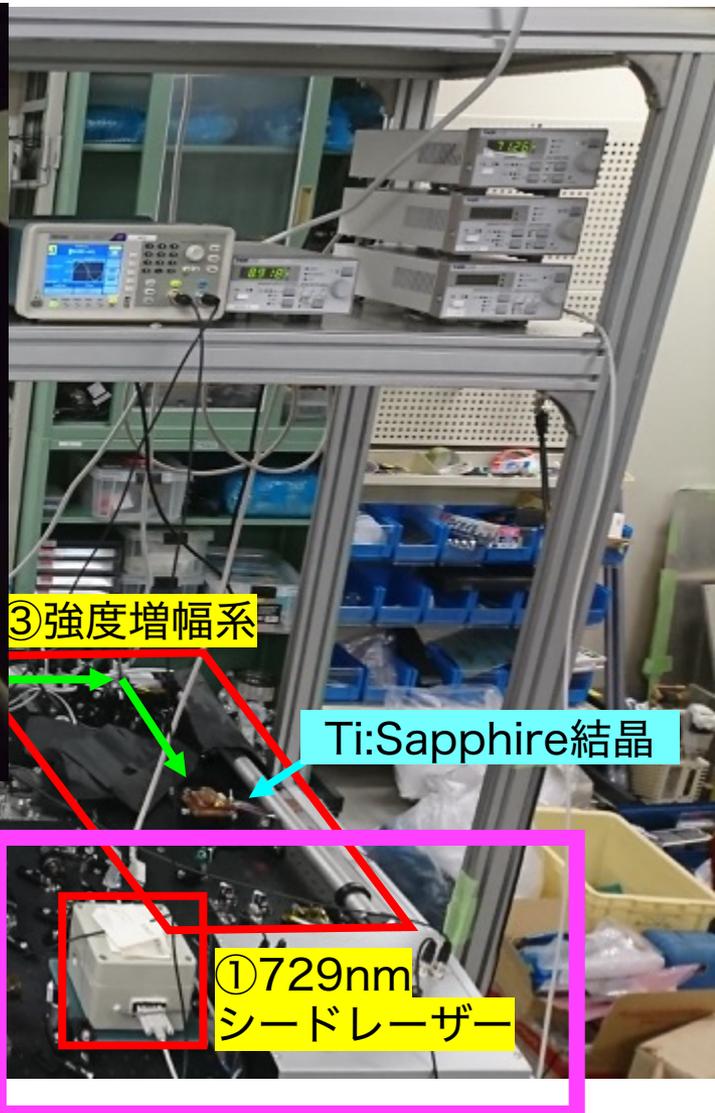
@東大 浅野キャンパス
吉岡研



①シードレーザーは完成済



729 nm
連続発振



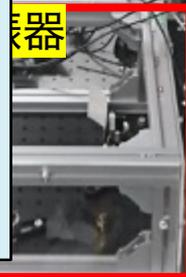
③強度増幅系

Ti:Sapphire結晶

①729nm
シードレーザー

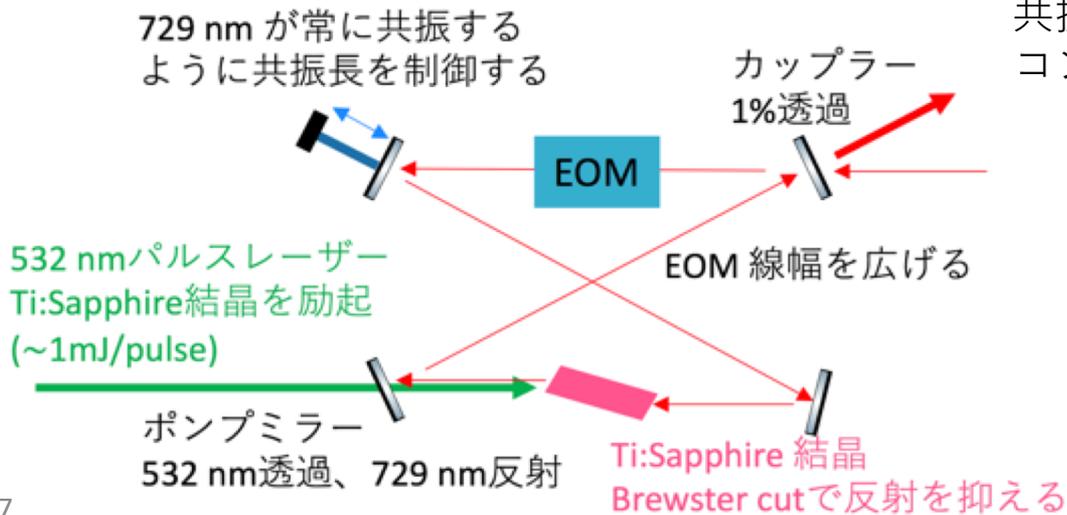
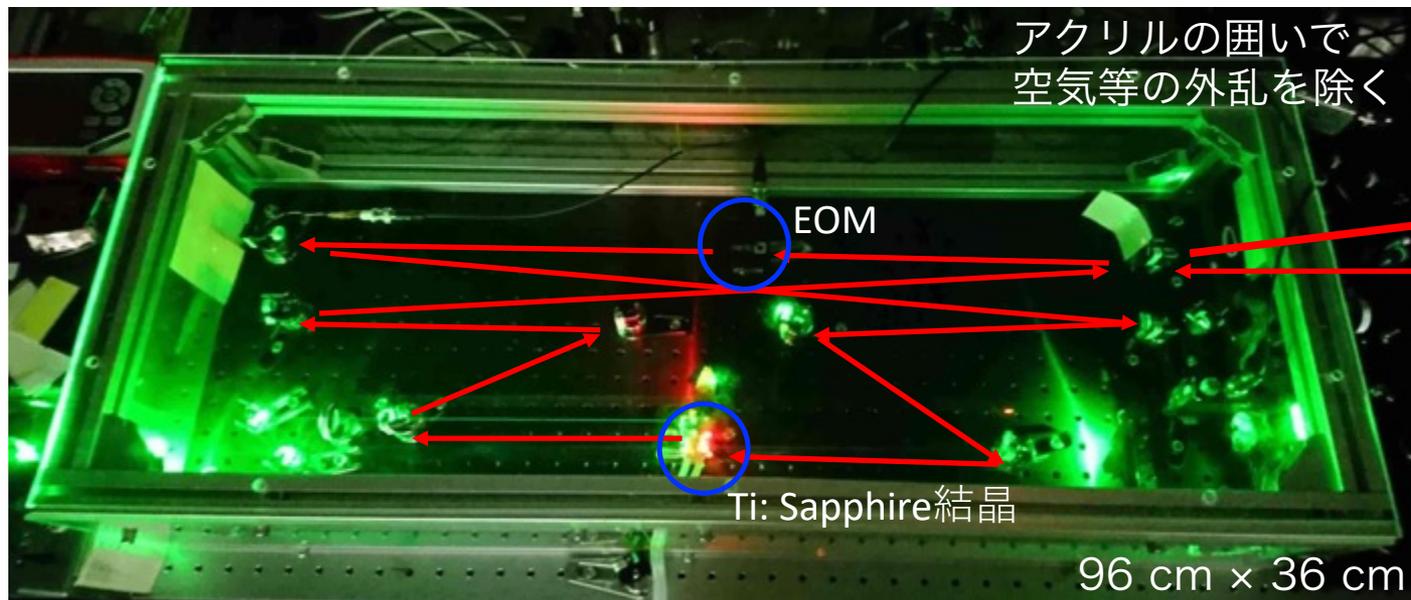
完成済

- ✓最大パワー: 8.7 mW
- ✓線幅50 kHz \ll 1 GHz (目標値)
- ✓周波数ドリフト1 GHz以下



Ti:Sapphire結晶

②パルス化・広線幅化のための共振器を作成中



共振器長3.8 mを8個のミラーでコンパクトに折り畳んでいる

30分以上にわたる共振維持を実現

安定して高いパルスエネルギーのパルスを得るにはシードレーザーを安定して共振器中で共振させることが不可欠。

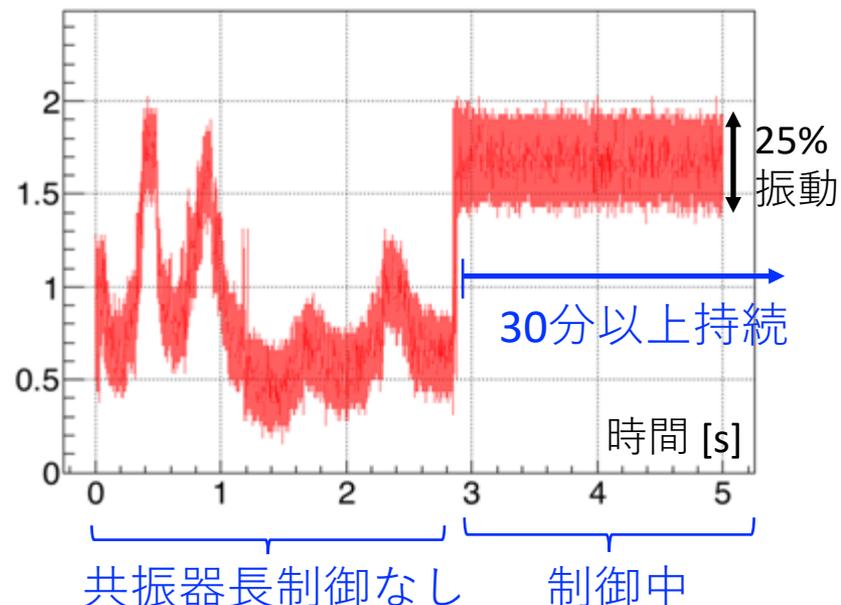
1. シードレーザーの周波数安定化
2. 共振器の安定化(アクリルケースによる外乱除去)
3. 共振器長制御系の改善

→EOMを駆動しつつ30分以上にわたる共振維持が実現。

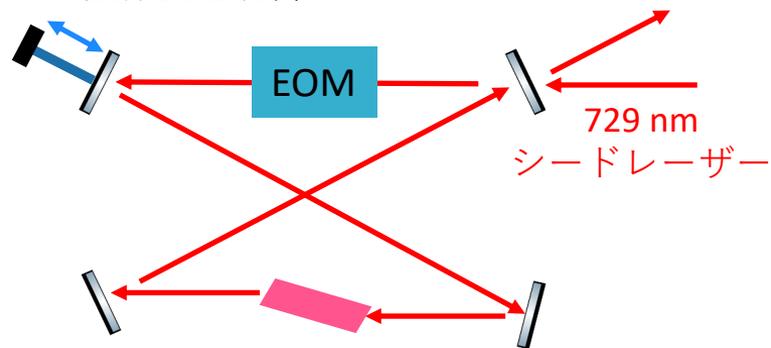
問題点: 共振器中の光パワーに25%の速い振動。

対策: 共振器長制御を大きく遅い制御と小さく速い制御の二つでより安定化させる予定。

PD電圧 \propto 共振器中光パワー

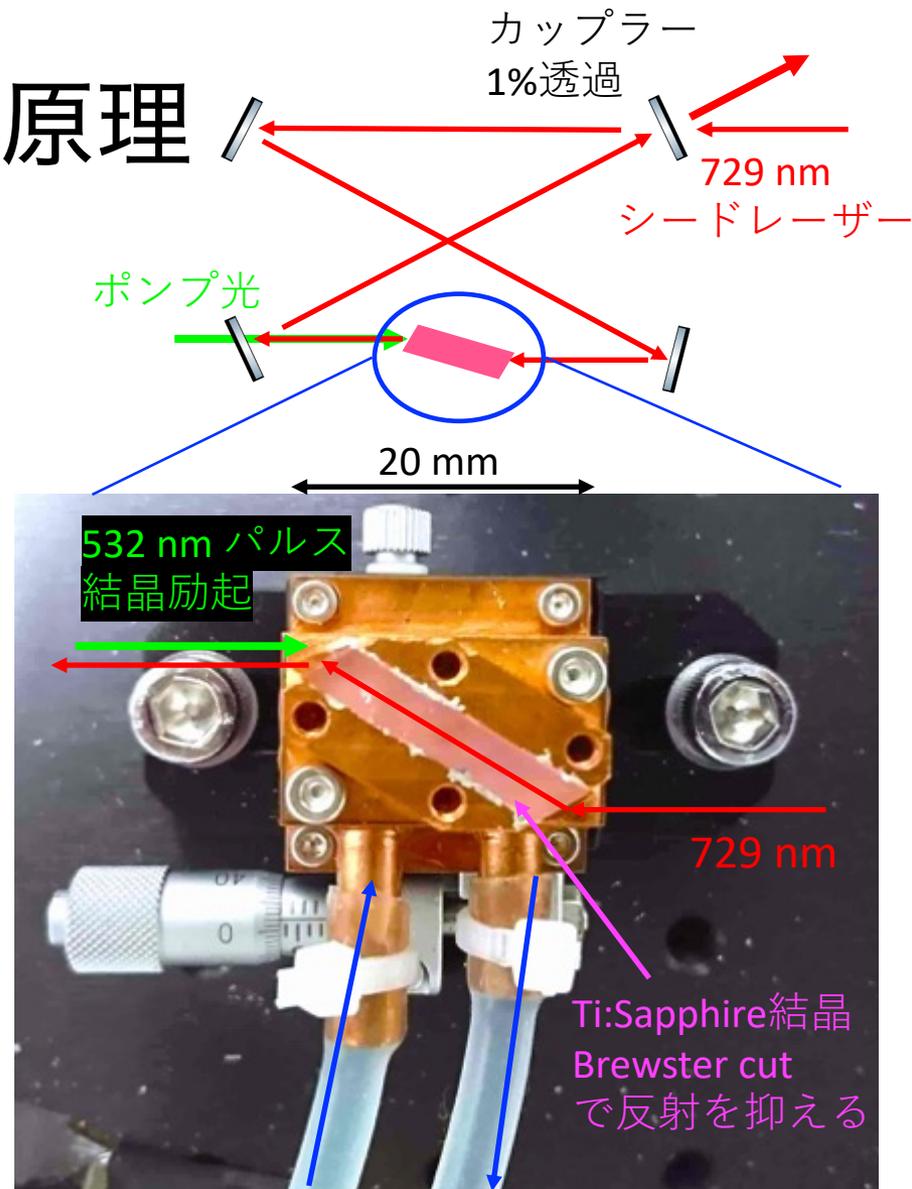


729 nmが常に共振する
様に共振器長を制御



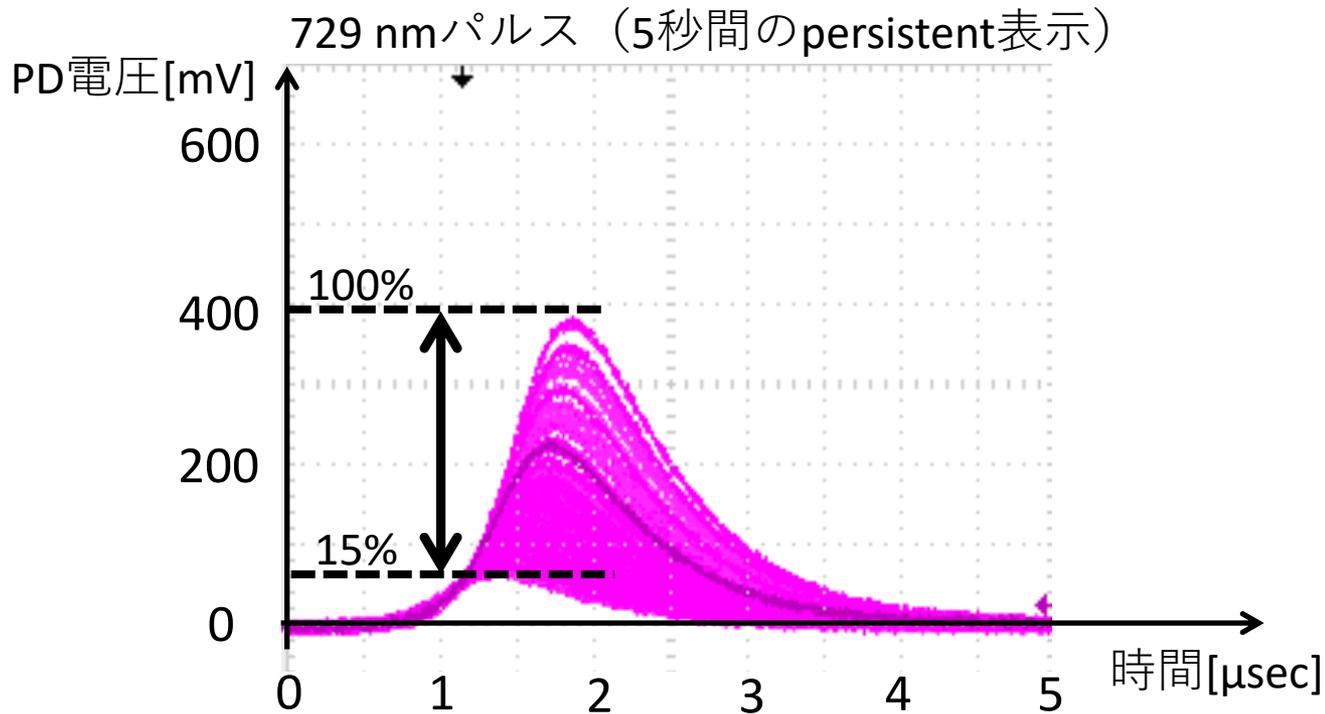
729nmパルス生成の原理

- 共振器中のTi:Sapphire結晶を532 nmパルスレーザー(~1 mJ/pulse)で励起。
- シードレーザーによる誘導放出で729 nmが増幅され、それが共振器から少しずつ出ていくことで長い時間幅のパルスが得られる。
- 時間幅の長いパルスを得るためには反射率が高くロスが少ない共振器が必要。
- シードレーザーが729 nmパルスの種となり、波長729 nmと発振方向を選択する。



Ti:Sapphireの熱的損傷を防ぐため水冷

1 μ sの長パルスの出力に成功



✓十分な時間幅 1 μ s > 300 ns (目標値)

- パルスエネルギーと安定性に問題。
- 平均パルスエネルギー 8.7 μ J/pulse < 100 μ J/pulse (目標値)

対策: ①共振の安定化

②パルスによる制御信号の乱れを除去するよう改善

→出力パルスの安定化とパルスエネルギー増大を図る。

EOMを用いた広線幅化の原理検証として サイドバンドを観測

広線幅化に電気光学変調器を用いる
(EOM: Electro-Optic Modulator)

電気光学結晶に電場が加わると屈折率が変化。電場を振動させると結晶を通過するレーザーの位相が振動する。

→等間隔の周波数にサイドバンドが立つ。

$$E_0 e^{i\omega t} \rightarrow E_0 \exp(i\omega t + i\beta \sin \Omega t)$$

$$= E_0 \sum_{k=-\infty}^{k=\infty} J_k(\beta) e^{i(\omega + k\Omega)t}$$

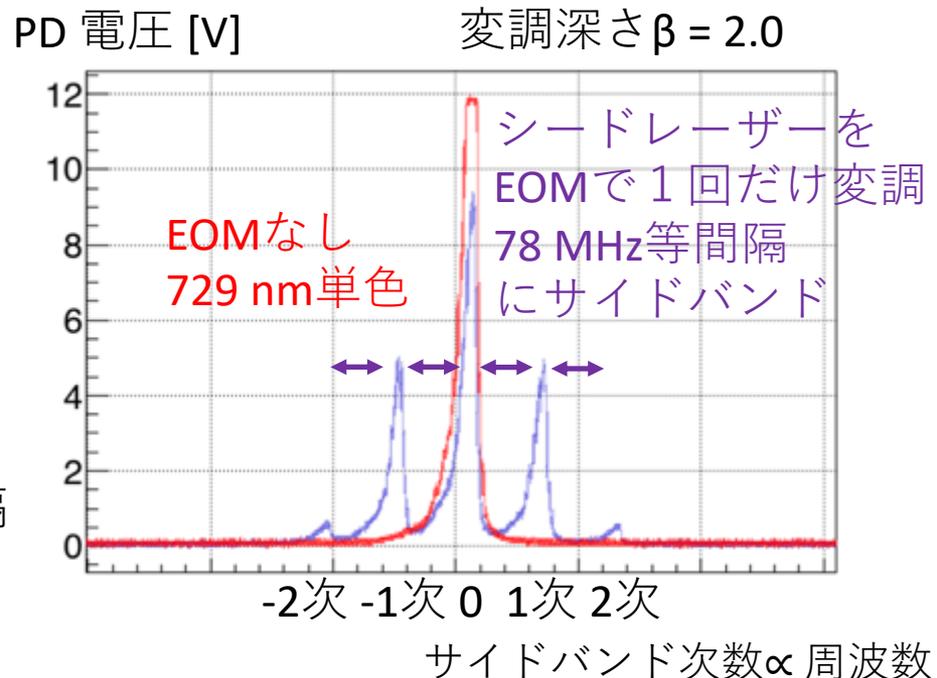
ω : 中心角周波数 [rad/s]

Ω : 変調角周波数 [rad/s] = サイドバンド間隔

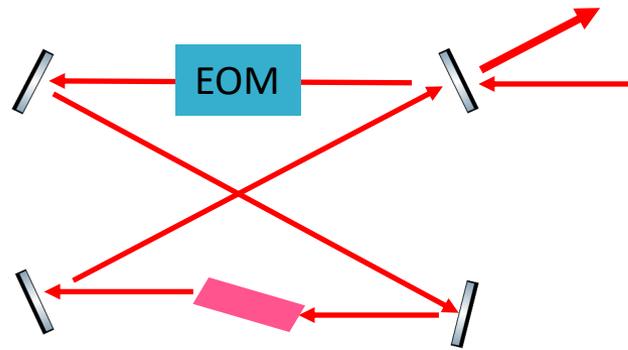
β : 変調深さ [rad]



EOM:
レーザーが通過すると位相変調を受けサイドバンドが立つ

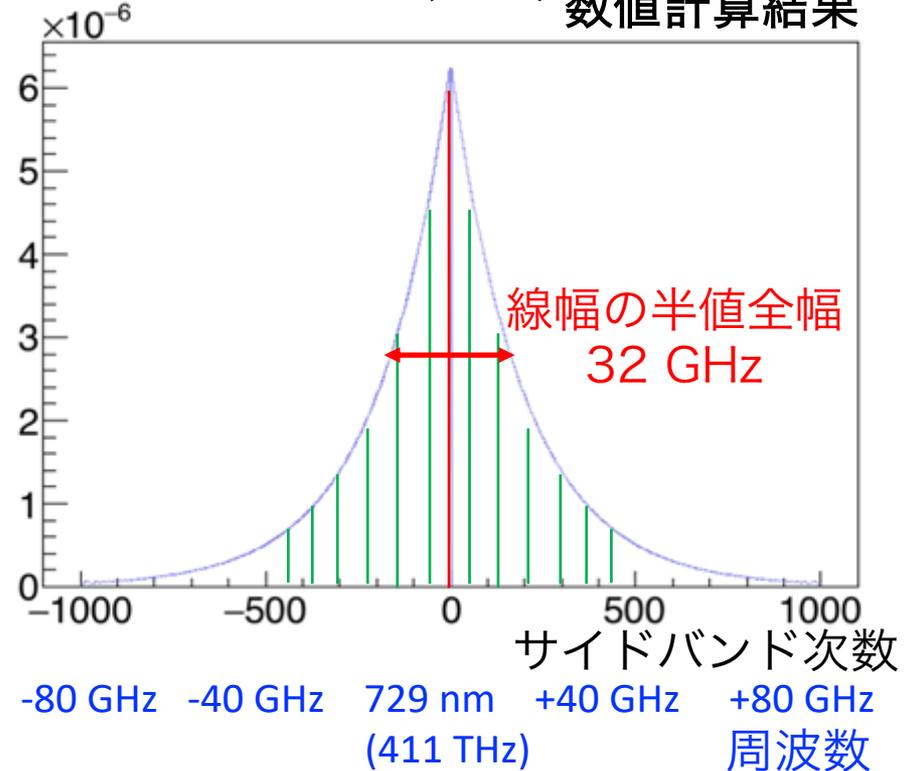


共振器内でのEOMを用いたパルスレーザーの広線幅化 世界初の試み



- 共振器とEOMを組み合わせることで78 MHz間隔のサイドバンドを300次立てて線幅を実効的に50 GHz広げる。
- 共振器が78 MHzの周波数間隔で共振する設計なのでサイドバンド間隔はそれに合わせている。
- 現状EOMを駆動しつつパルス発振しており、今後共振器とCCDカメラを用いて出力パルスの線幅測定を行う。

サイドバンドパワー(Arb.) 数値計算結果



目次

本講演: ポジトロニウムBEC実現のための 冷却レーザーの開発

1. レーザー冷却の原理
2. ポジトロニウム冷却用レーザーの設計概要
3. 開発状況
4. 今後
5. まとめ

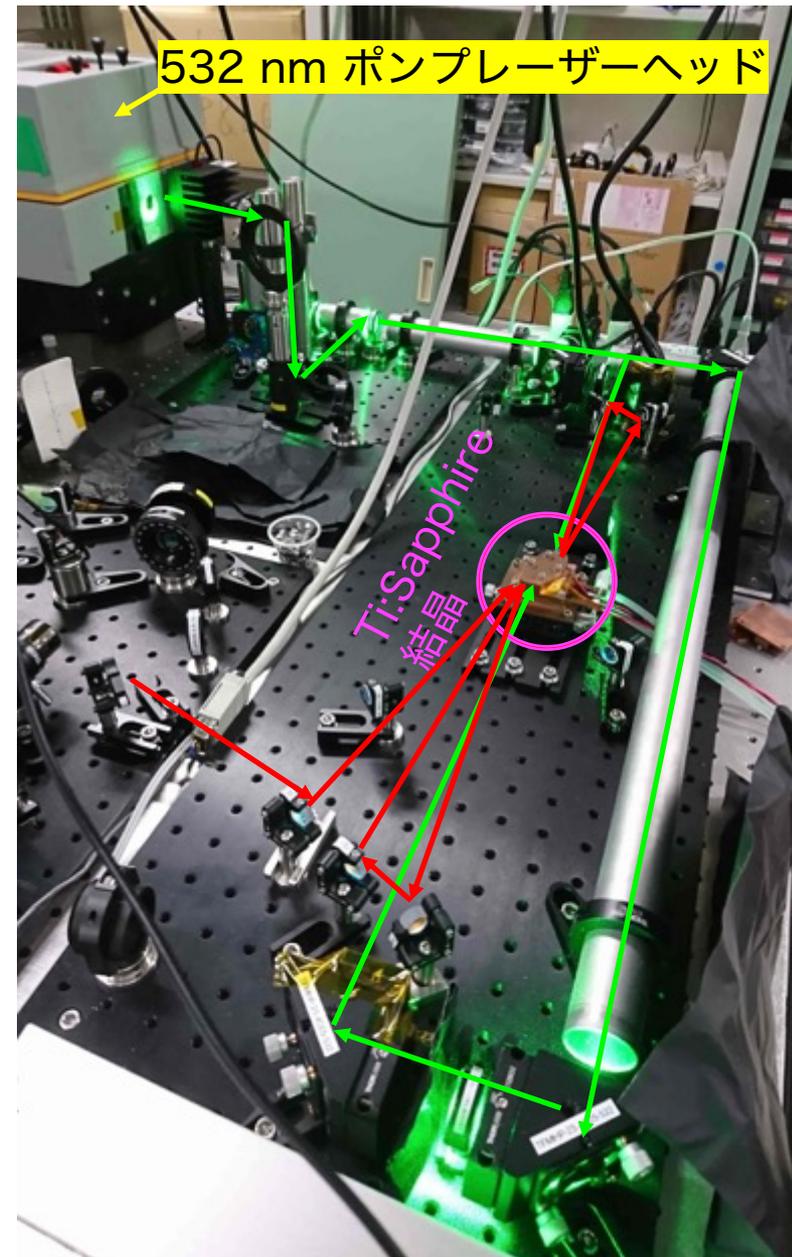
今後: ③マルチパス増幅による パルスエネルギー増幅

マルチパス増幅によりパルスエネルギーを増幅する。

Ti: Sapphire結晶を532 nm のパルスレーザー(最大270 mJ/pulse)で励起する。

励起された結晶にパルスを10回程度通し
パルスエネルギーを100 μ J \rightarrow 5 mJへ増幅。

ポンプレーザー(Powerlite 7030)は調達済み。その他必要な光学素子等をそろえて予備実験を進めて行く。



今後: ④非線形結晶による波長変換 (3倍波生成: 729 nm→243 nm)

3倍波生成のための非線形結晶は調達済み
2次高調波生成と和周波生成を組み合わせることで3倍波を作る



LBO結晶
729 nm → 365 nm



BBO結晶
729 nm & 365 nm → 243 nm

学会後テスト実験を進めていく

目次

本講演: ポジトロニウムBEC実現のための 冷却レーザーの開発

1. レーザー冷却の原理
2. ポジトロニウム冷却用レーザーの設計概要
3. 開発状況
4. 今後
5. まとめ

まとめ

- Ps-BECの実現→反物質重力の測定、511 keV γ 線レーザー
- Ps-BEC実現のための243 nm冷却レーザーを開発中

		要求値	達成状況	今後
シードレーザー 完成		強度 数mW パルスエネルギー <1 GHz 周波数ドリフト <1 GHz	達成 8.7 mW 達成 <50 kHz 達成 0.8 GHz	-
共振器	パルス化	時間幅 >300 ns パルスエネルギー 100 μ J	達成 1 μ s 平均 8.7 μ J	エネルギー増大 安定化
	広線幅化	線幅 50 GHz	実験中	学会後線幅の測定
マルチパス増幅		パルスエネルギー 5 mJ	物品調達中	学会後予備実験
波長変換		パルスエネルギー 40 μ J	物品調達完了	学会後予備実験
周波数シフト		60 GHz	計画段階	-

- 今年中の冷却用レーザー完成を目指す。その後KEKの低速陽電子実験施設へ移設しPs冷却実験を行う。結果を踏まえ周波数シフト等のPs-BEC実現に向けた冷却レーザーの最適化を行う。