

ボーズ・アインシュタイン凝縮を目指した ポジトロニウム冷却の考察

周健治, 樊星, 山崎高幸^A, 難波俊雄^A, 浅井祥仁,
吉岡孝高, 五神真

東大理, 東大素粒子センター^A



陽電子科学とその理工学への応用
2015.11.26 @京都大学原子炉実験所

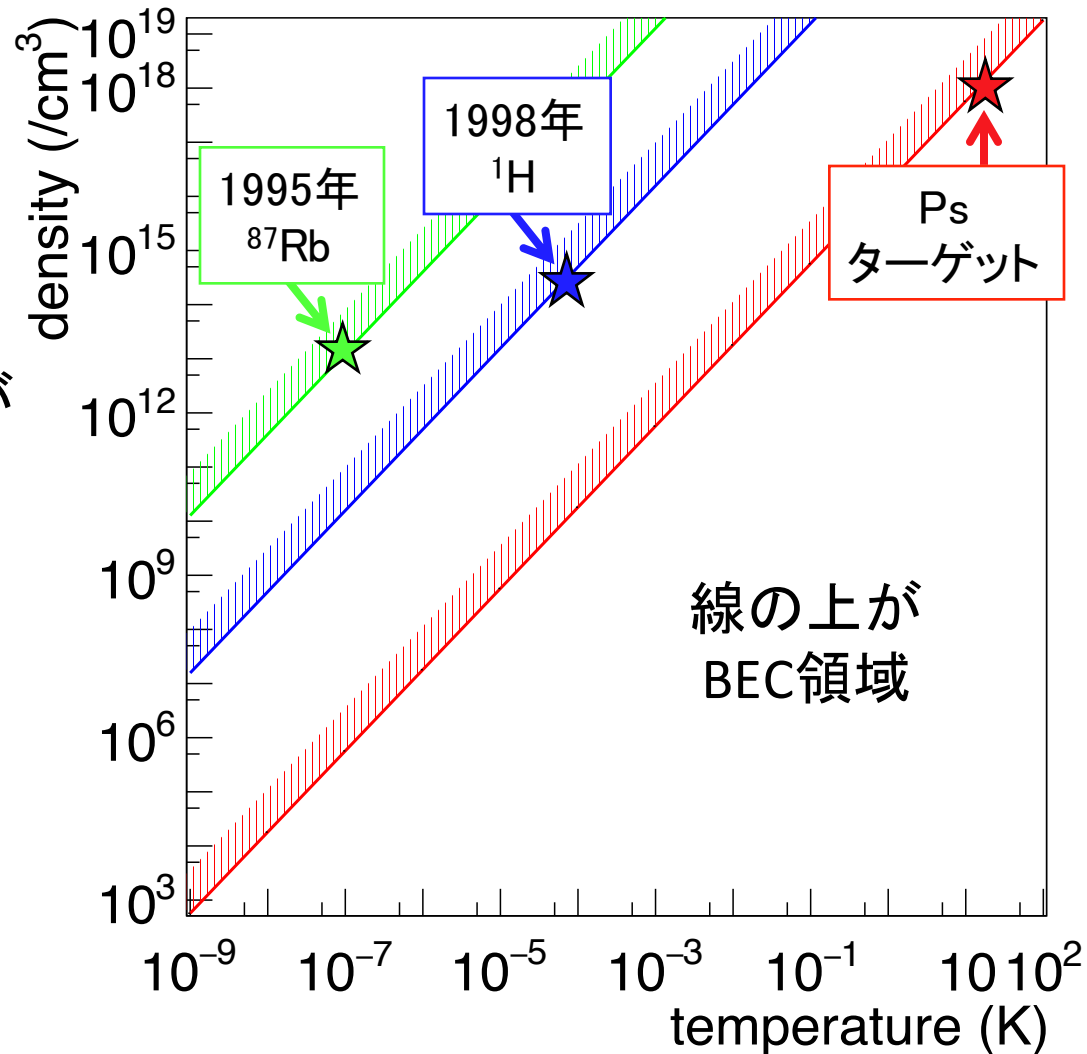
ポジトロニウム(Ps)-BEC

- ポジトロニウム(Ps)は質量が非常に小さいため、**BEC臨界温度が高い**
e.g.) ~10K @ $10^{18}/\text{cc}$
- 1995年にアルカリ原子BECが実現して以来、**反物質系のBECは未観測**
➤ 反物質BECの良い候補

Ps-BECの実現により、

- 原子波干渉による **反物質重力**の精密測定
- 消滅 γ 線を利用した **511keV γ 線レーザー**の実現

など、反物質系ならではの応用



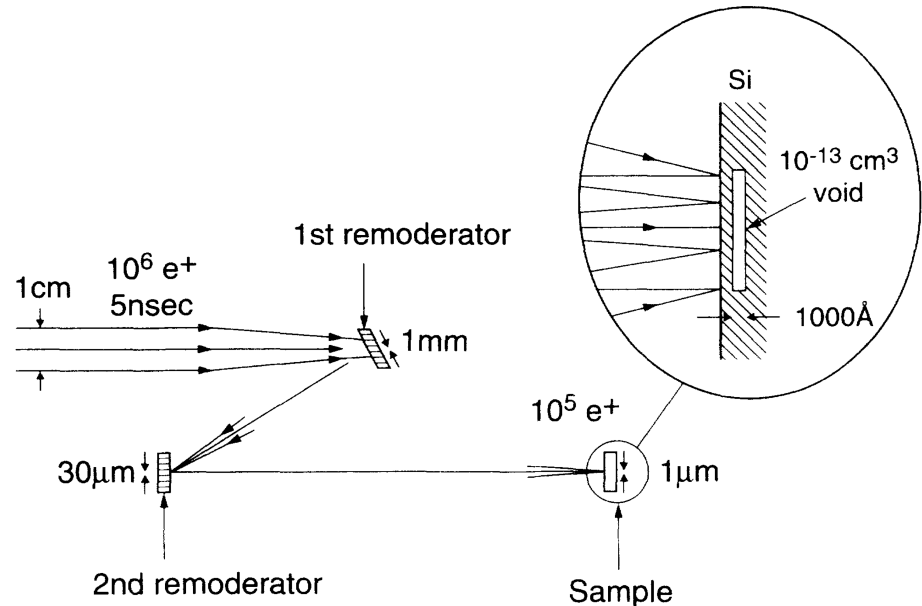
Ps-BECを目指して

- o-Psは崩壊寿命が142nsしかない
いので,
 1. 高密度陽電子からPsを生成
 2. 高速で~1Kまで冷却することが必要

- ~1K程度の低温は容易に作れる
ことから、**冷却したSiキャビティ
中でPsを冷却・トラップ**する
ことが提案された
(P. M. Platzman and A. P. Mills)

- その後、室温でのPs熱化が実測
され、想定より**熱化は遅い**こと
が明らかになった

➤ さらなる冷却機構が必要

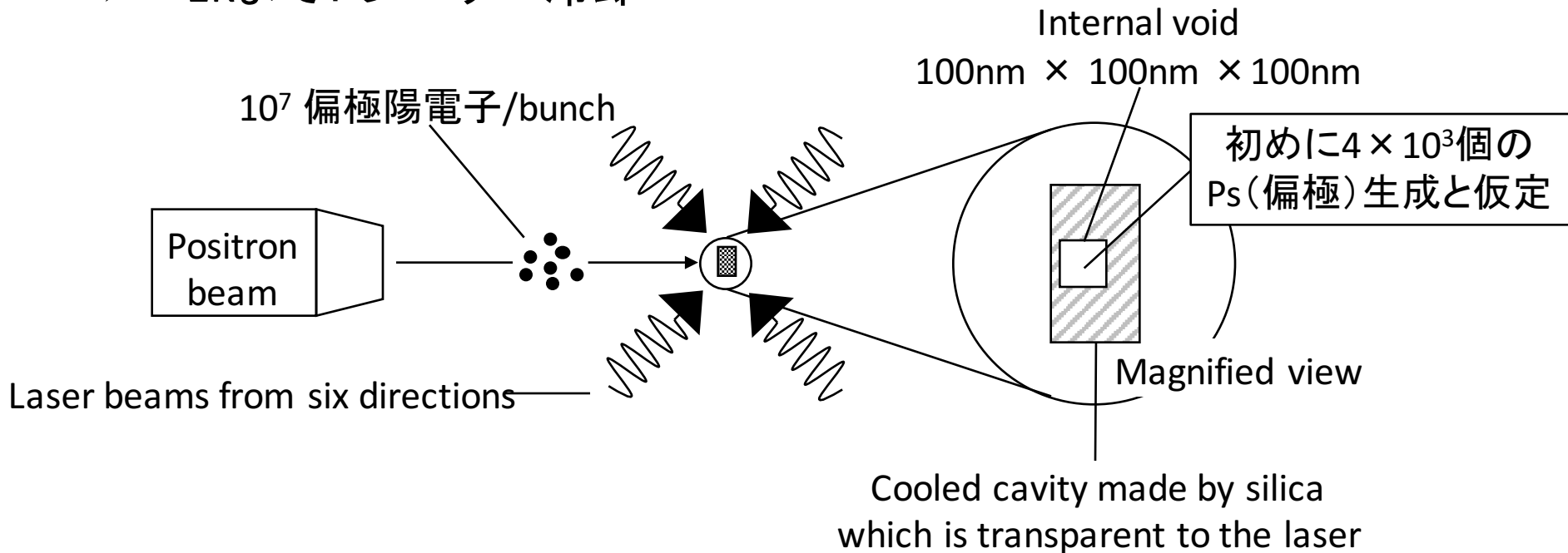


Ps - 冷却・トラップ用のセットアップ模式図

(図: P. M. Platzman and A. P. Mills, Jr, Phys. Rev. B 49, 454(1994))

レーザーを組み合わせた 高速冷却

- 冷却の高速化のために、キャビティとレーザー冷却を組み合わせることを提案 (Submitted to Journal of Physics B, arXiv:)
 - ~300Kまで: キャビティとの熱化
 - ~1Kまで: レーザー冷却



トラップキャビティ(シリカ)とレーザー冷却を組み合わせたセットアップ

熱化

- Ps熱化モデルとして、分子との古典弾性散乱を考えた次の式がある:

from Y. Nagashima *et al.* Phys. Rev. A, 52, 258(1995)

$$\frac{dE_{av}}{dt} = -\frac{2}{LM} \sqrt{2m_{Ps}E_{av}} \left(E_{av} - \frac{3}{2}k_B T \right)$$

E_{av} : Psの平均運動エネルギー, m_{Ps} : Ps質量,
 L : 散乱の平均自由行程,
 M : 散乱分子の有効質量, T : 周囲の温度

散乱での有効質量Mには
エネルギー依存性がある

Y. Nagashima *et al.* J. Phys. B 31, 329(1998)

- 依存性の仮定:

$$M(E) = p_0 + p_1 \exp\left(\frac{E}{p_2}\right)$$

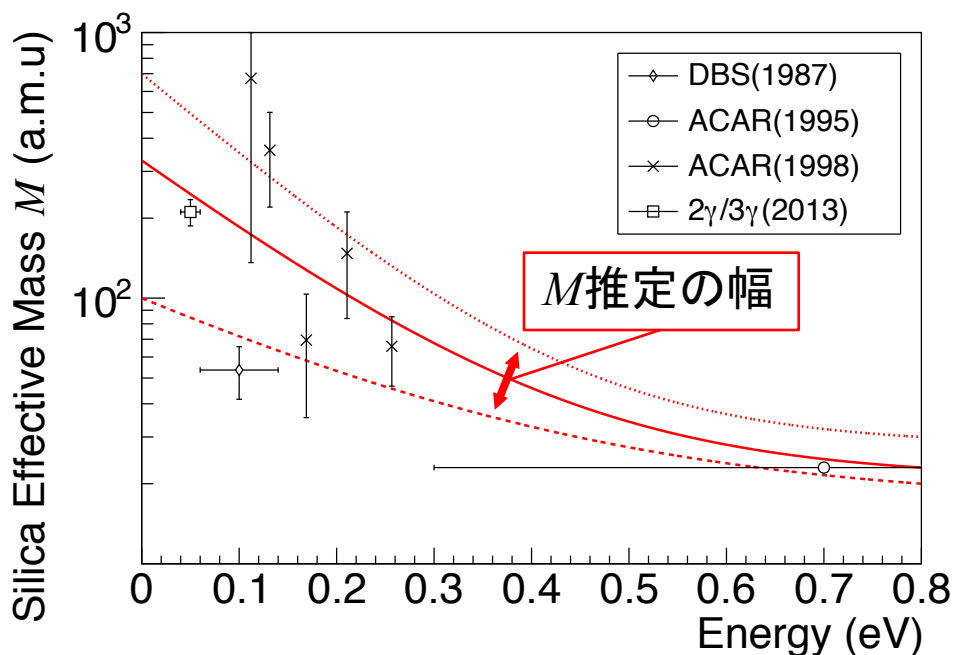
凡例の対応

DBS(1987): T. Chang *et al.* Phys. Lett. A 126, 189

ACAR(1995): Y. Nagashima *et al.* Phys. Rev. A 52, 258

ACAR(1998): Y. Nagashima *et al.* J. Phys. B 31, 329

2 γ /3 γ (2013): K. Shibuya *et al.* Phys. Rev. A 52, 258



シリカ有効質量Mの測定結果

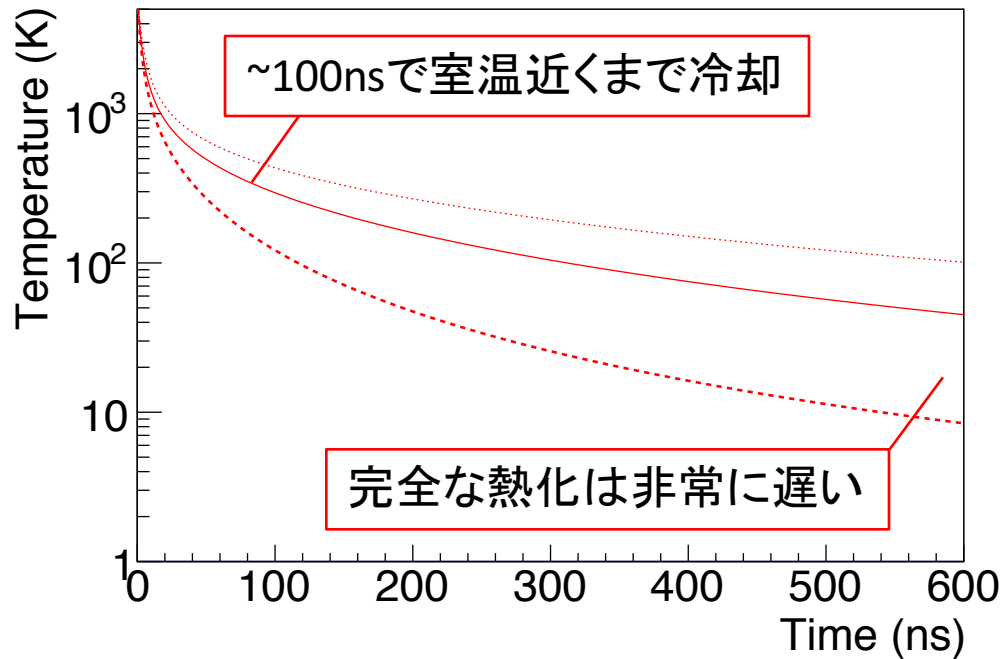
熱化の見積もり

- 熱化は先程のモデル
- Ps – Ps二体散乱効果(後述)も考慮

初期条件

- Ps初期運動エネルギー: 0.8eV
from Y. Nagashima *et al.* Phys. Rev. A 52, 258(1995)
- Ps初期生成数: 4×10^3 個
- シリカキャビティ:
100nm × 100nm × 100nm, 1K

- ~100nsで~300K程度まで冷却可
- その後の熱化は非常に遅い
- 熱化のみではBECしない
- レーザーによって300Kから高速冷却する



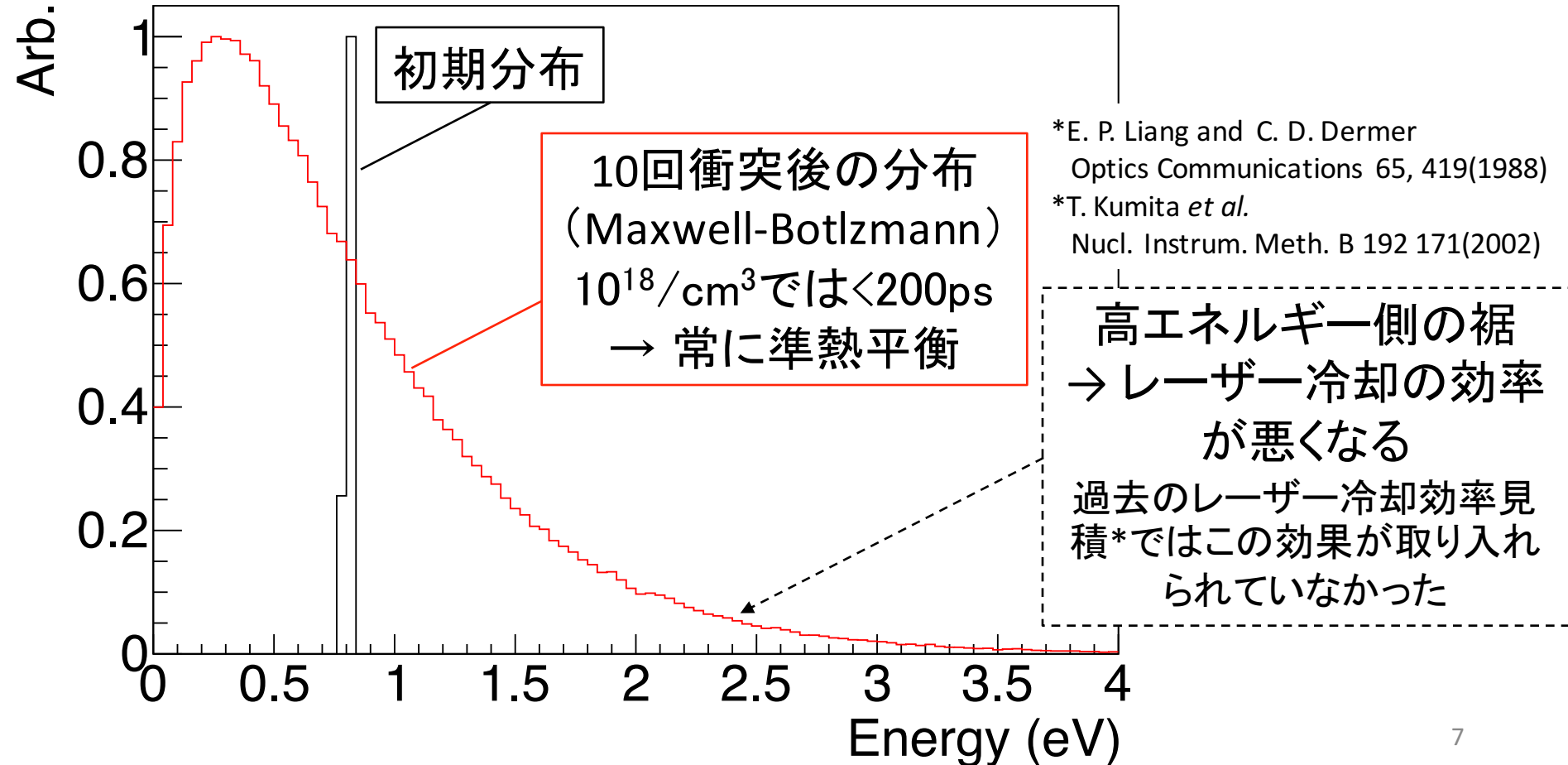
推定した熱化関数

Ps - Ps 二体散乱

- スピン偏極したPs同士は弾性散乱(断面積=32Å²)する

from Journal of the Physical Society of Japan 70, 1549(2001)

Phys. Rev. A 65, 022704(2002)



冷却の評価

初期条件

- Ps初期運動エネルギー: 0.8eV
- Ps初期生成数: 4×10^4 個
- シリカキャビティ:
100nm × 100nm × 100nm, 1K

相互作用

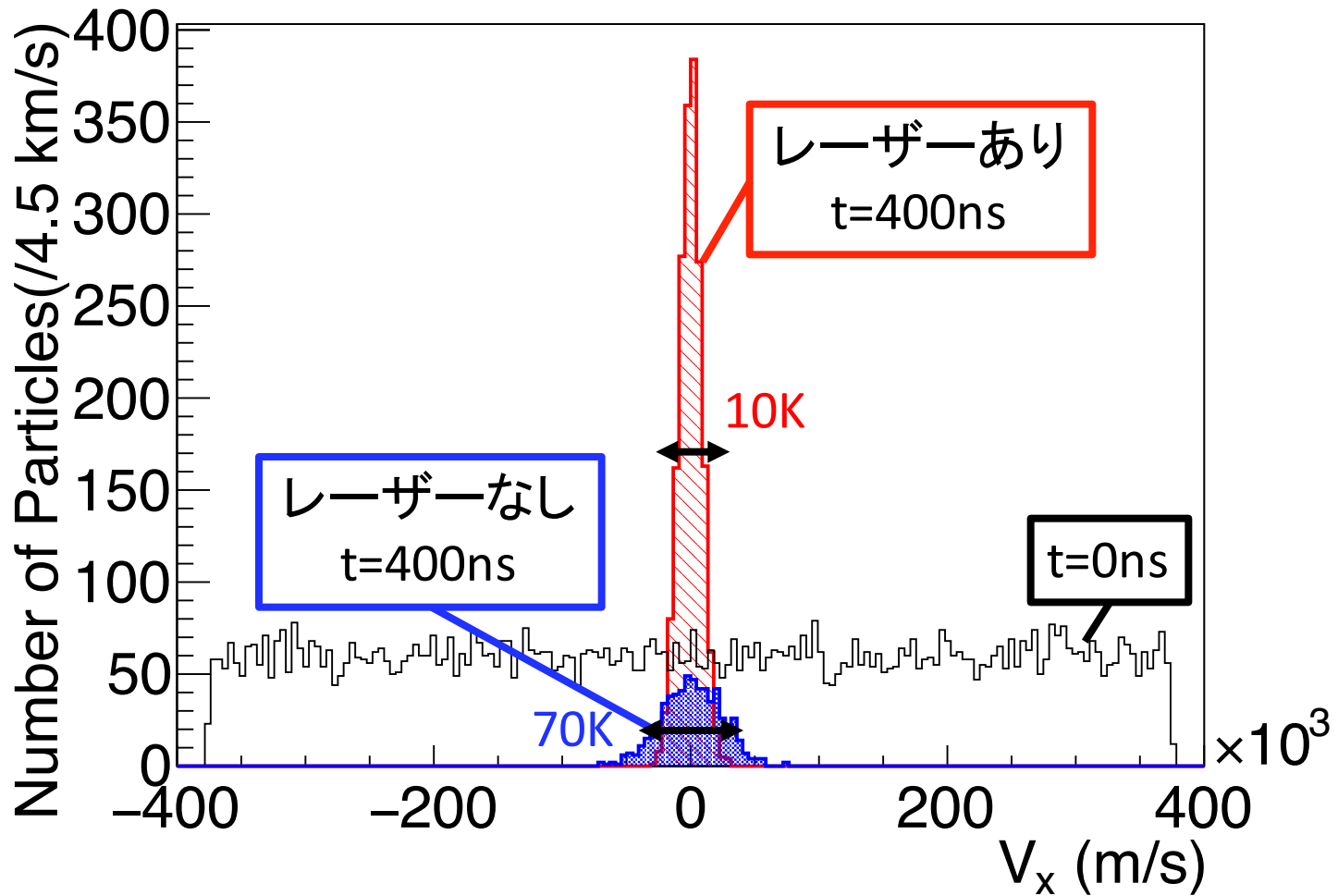
- 熱化
- Ps - Ps二体散乱
- レーザー冷却

↓ レーザーパラメータ

パルスエネルギー	42 μ J
中心周波数	1.23PHz- $\Delta(t)$
周波数離調 ($\Delta(t)$)	$\Delta(0\text{ns})=300\text{GHz}$ $\Delta(300\text{ns})=240\text{GHz}$
周波数幅 (2σ)	140GHz
時間幅 (2σ)	300 ns
ビーム径 (2σ)	200 μ m

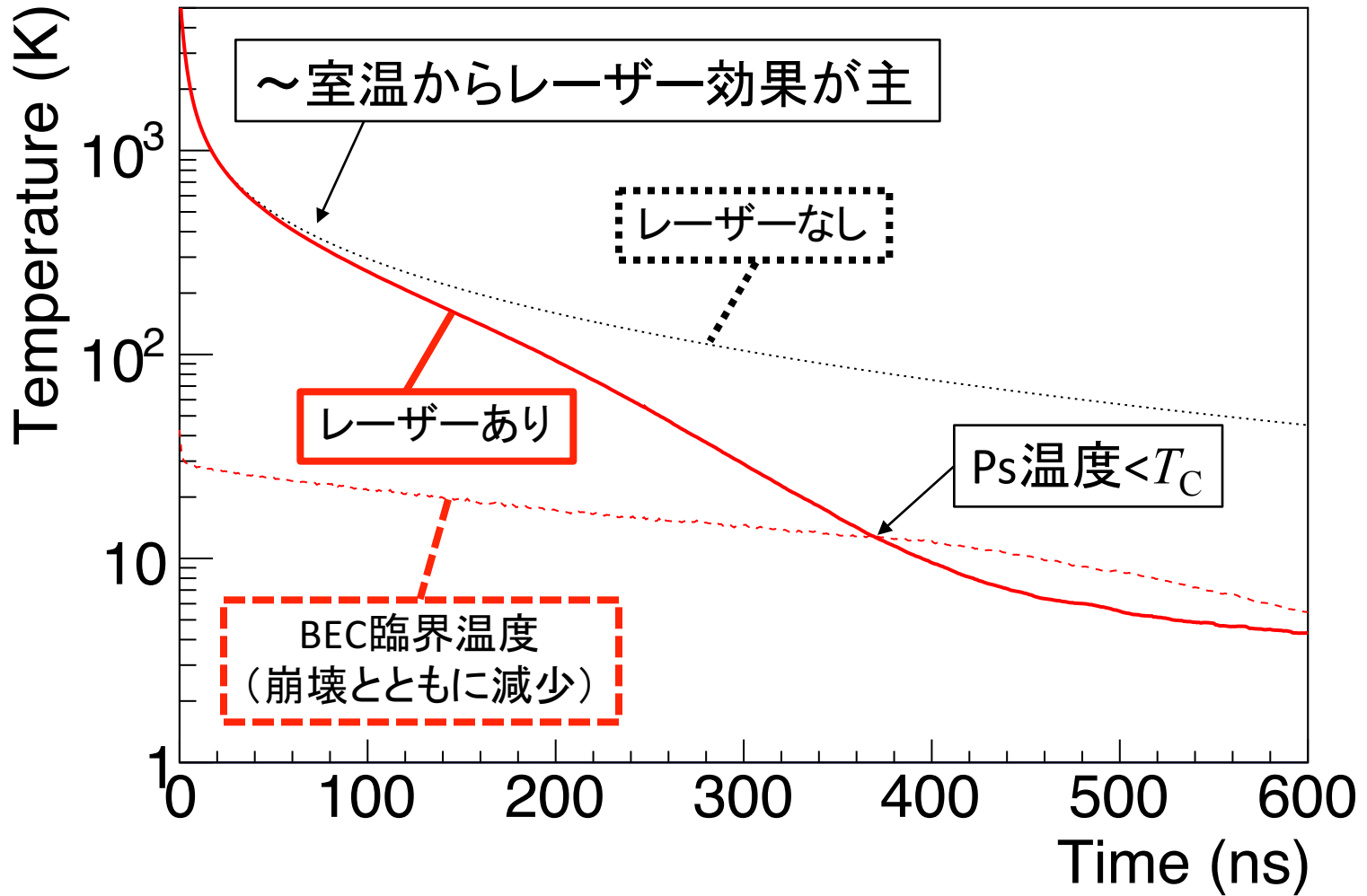
- Ps寿命程度の持続時間
- 大きなドップラーシフトを補償するため、広い周波数幅・変調が必要

冷却の評価



速度(の x 成分)の分布

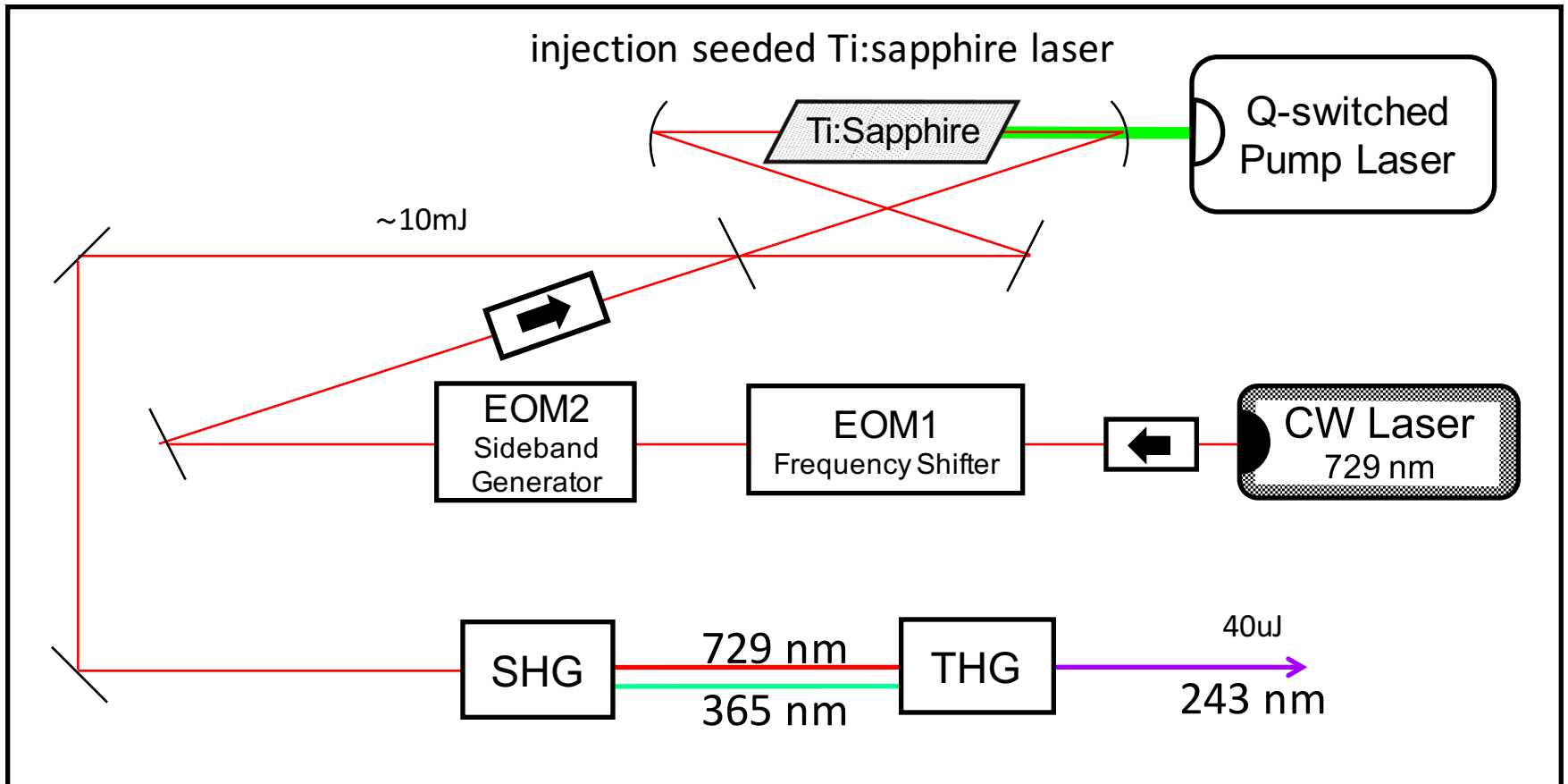
冷却の評価



温度の時間発展

レーザー開発

- 広帯域, 長持続時間, 大周波数変調という点で新しい光源



BEC実現に向けたロードマップ

1. シリカ中での熱化による冷却を確認

- 低温における熱化関数の測定

- 現在,

 - 窒素温度でのDBS実験を進めている

 - また, 精度の良い温度測定方法を検討中

2. 冷却用レーザー光源の開発

- これまでにはなかったいくつかの特徴が必要なため, 新たな光学系を開発中

3. 陽電子源の開発

- 10^7 という数のバンチ化は達成されているが, 100nmへのフォーカスは非常にチャレンジング

まとめ

- Ps-BEC実現のために、冷却シリカキャビティとの熱化+レーザー冷却を組み合わせ、
~300Kまで: 熱化
~1Kまで: レーザー冷却
という二段階冷却を提案・BEC実現可能かどうか評価した
- 評価の際、
 1. 熱化
 2. Ps – Ps 二体散乱
 3. レーザー冷却の3つの効果を考慮した。特にPs – Ps 二体散乱はレーザー冷却にとって重要であった
- 評価の結果、BEC相転移に十分な冷却が可能であることが分かった
- 必要なレーザーは数10GHzの周波数変調や100ns以上の長持続時間といった新しい特徴をもつため、現在開発を進めている