

ポジトロニウムBECの実現に向けて

周 健治, 樊 星, 安達 俊介, 山崎 高幸^A,
難波 俊雄^A, 浅井 祥仁, 小林 富雄^A,
入松川 知也^B, 畠山 修一^B, 大野 雅史^B, 高橋 浩之^B

東大理, 東大素粒子センター^A, 東大工^B

日本物理学会2015年春季大会
2015.3.24 @早稲田大学

目次

- Ps-BECの概要
- BEC実現のためのPs冷却システムの開発
- 冷却を確認するための温度測定システムの開発

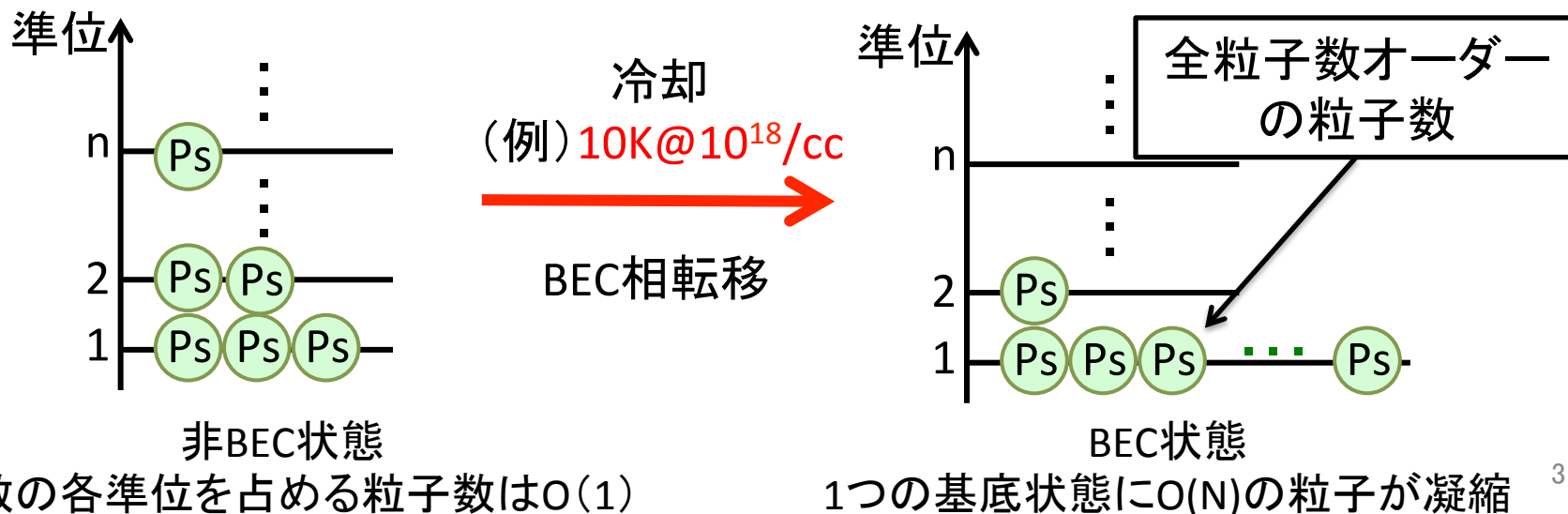
ポジトロニウムとBEC

ポジトロニウム (Ps) :

- 電子・陽電子の束縛系準粒子 → **整数スピン**
- 整数スピンをもつ粒子は**ボソン**と呼ばれ、粒子が同じ状態になってもよい**ボーズ・アインシュタイン統計**に従う
- 統計性により、**高密度・低温**において、**ボーズ・アインシュタイン凝縮 (BEC)**をする

ボーズ・アインシュタイン凝縮 (BEC) :

- 例として、Psでは**10K@10¹⁸/cc**で凝縮



ポジトロニウムのBECは面白い

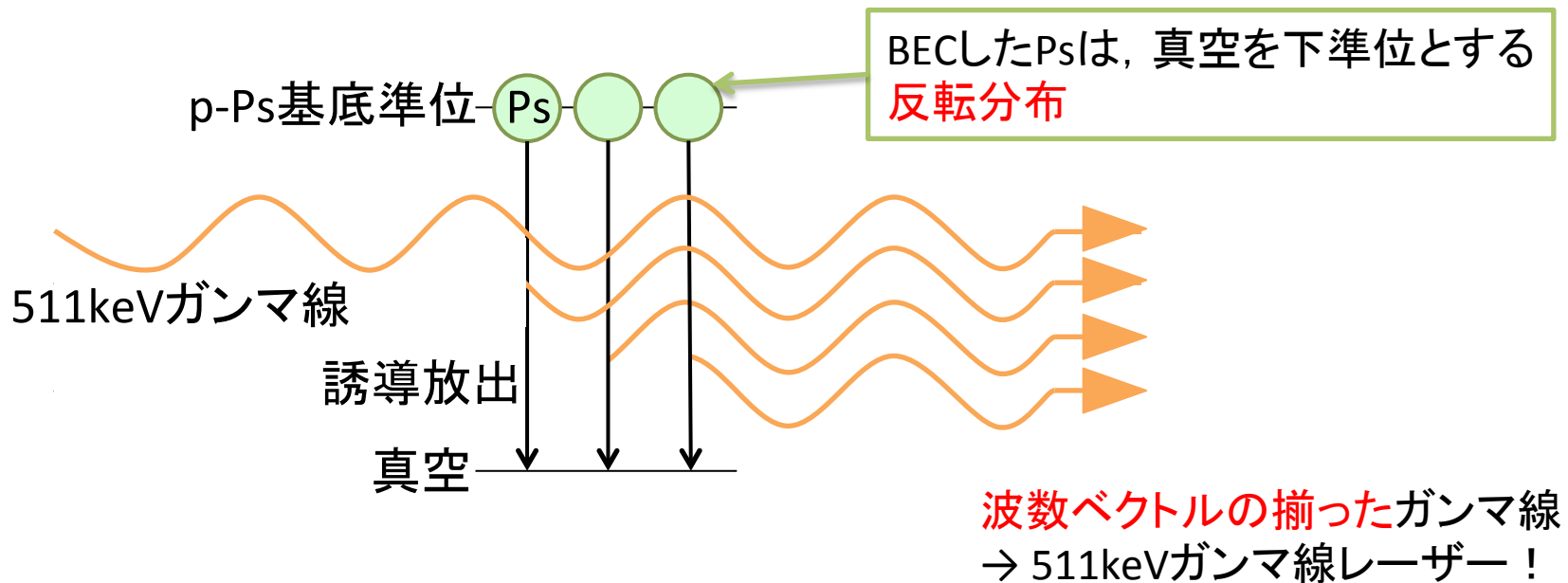
反物質を含んだBECは未観測

→ BECしたPsは反物質を調べるプローブとなる可能性

例: 反物質重力, ...

他にも, Psが電子と陽電子からできたエキゾチック系であることによる様々な応用がある

(例) 511keVガンマ線レーザー媒質



難しいところ

Psはたったの100nsほどで光子に崩壊してしまう

Ps-BEC実現のためには以下のテクノロジーが必要不可欠

✓ 100nsの内に、数K程度まで冷却



高速冷却

✓ 大量のPsを狭い領域に生成



陽電子集積

本講演では、冷却について述べます。

Psの冷却方法

極低温への冷却方法にはどんなものがあるか？

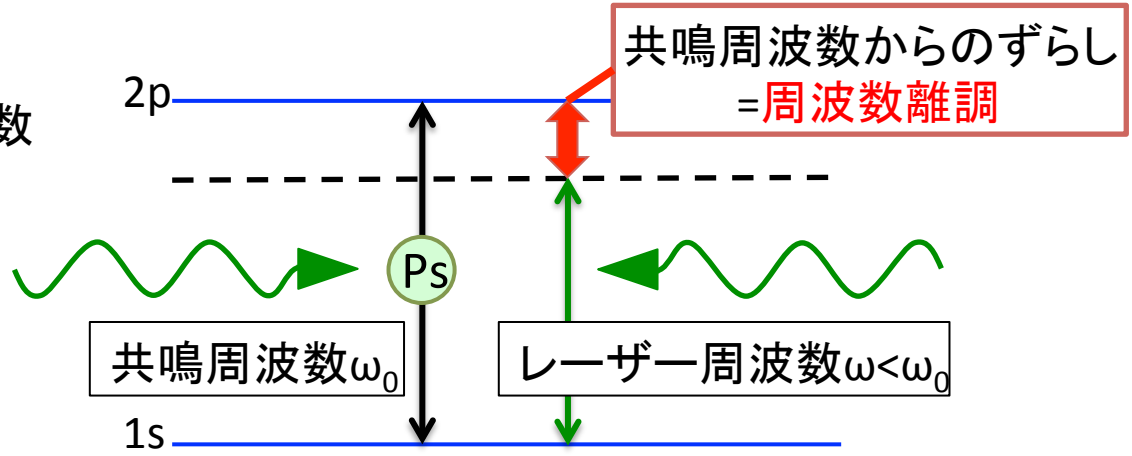
例えば、原子BECは、レーザー冷却によって実現された

→ Ps-BECにも適用してみる
(過去にも取り組まれた)

レーザー冷却の原理

Psは水素原子などと同じように複数の束縛状態をもつ

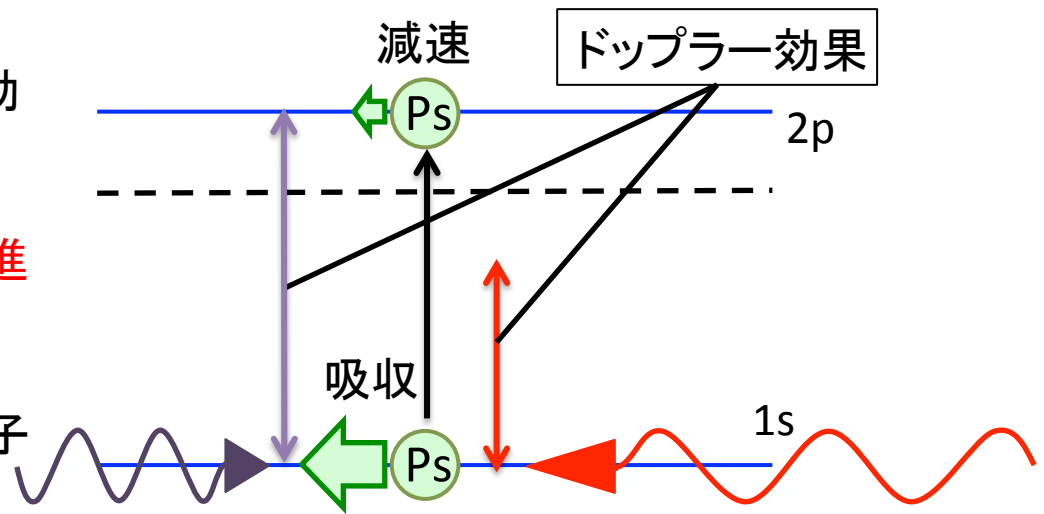
準位間共鳴周波数より
小さい周波数をもつレーザー
を両方向から入射



運動する原子にとっては、ドップラー効果により光の周波数に変化

離調がある場合、自分と反対方向に進む光子のみ周波数が高くなり、吸収

その際、反対方向の運動量をもつ光子を吸収したので原子は減速



この後励起状態から自然放射で脱励起することで、減速サイクルを繰り返す。

ポジトロニウムのレーザー冷却

ポジトロニウムにレーザー冷却を適用

レーザー冷却に関するパラメータ:

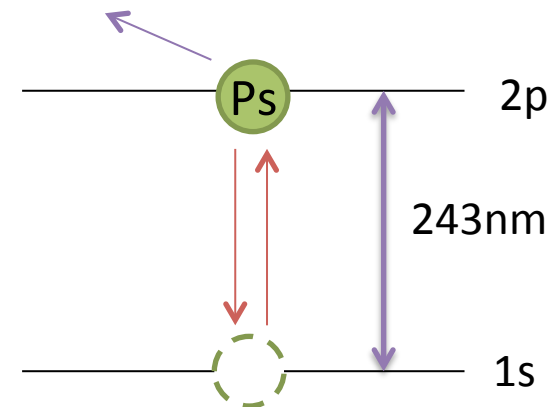
- 1s-2p準位差: 波長**243nm**(紫外光)
- 自然放射の時定数:**3.2ns**
(1回の光子吸収にかかる時間)

特にPsが軽いため、光子を吸収したときの減速度(反跳速度)が大きい → **冷却が速い**

- 反跳速度: 1.5 km/s
- 300Kでの速度: 48 km/s
- 1Kでの速度: 2.7 km/s

十分強度が高いレーザーを用いれば、高速で極低温までの冷却が可能

自然放射時定数3.2ns
≒3.2nsに一回減速される



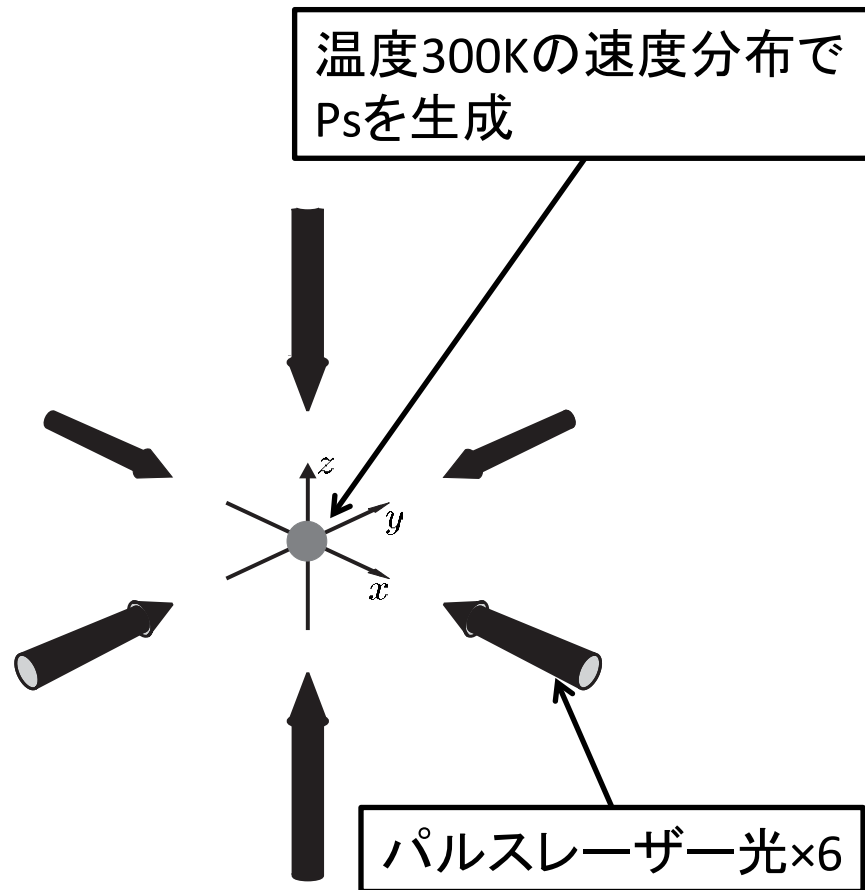
冷却効率シミュレーション

冷却効率を確かめるモンテカルロシミュレーションを行った。

Psの位置, 速度とレーザー光強度分布から励起レートを計算し, 時間発展をシミュレーションする

レーザーのインプットパラメータ

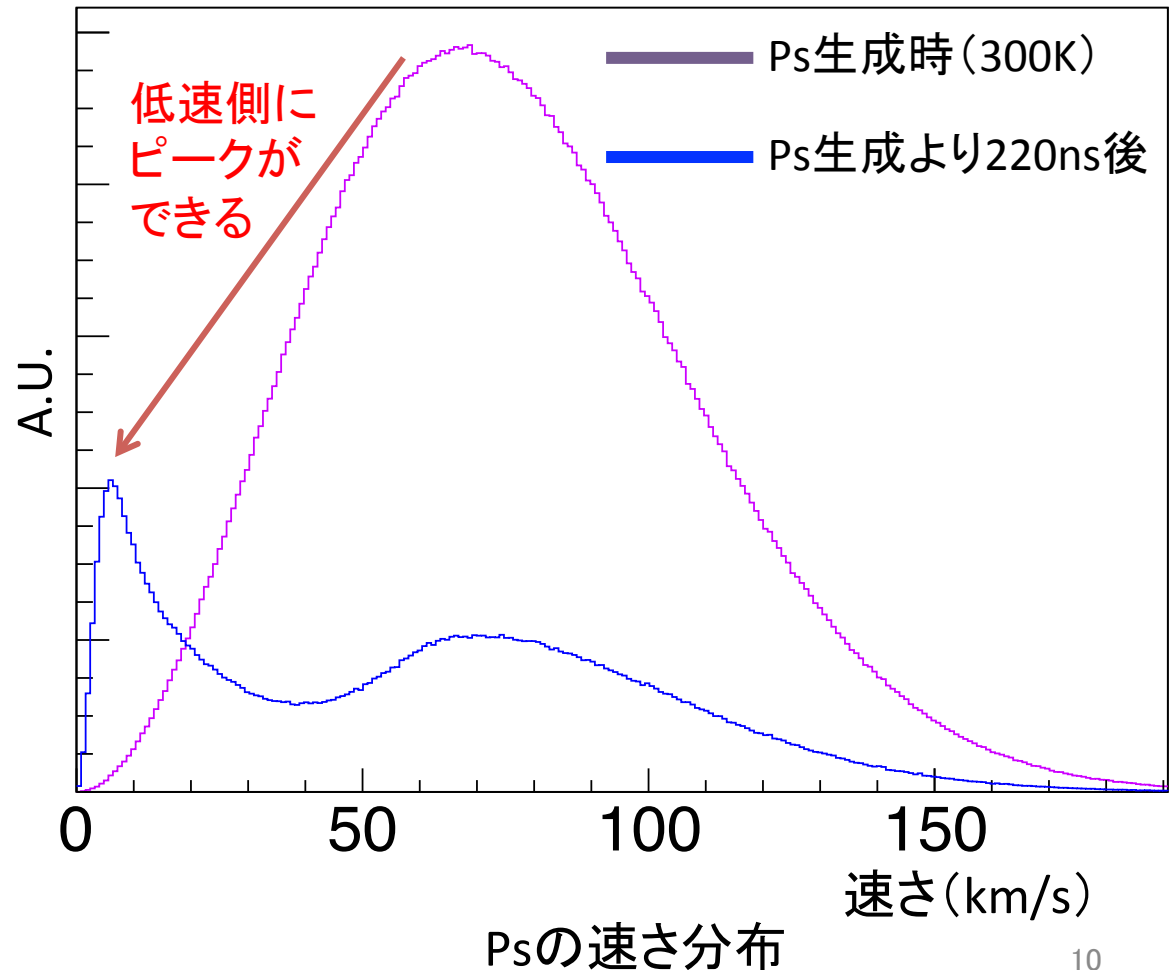
- ✓ 高強度 (**100 μ J**×6方向)
 - 2pにしっかり励起するように
- ✓ 大きい周波数離調 (**100GHz**)
 - 速いPsの冷却が可能.
- ✓ 広い周波数幅 (**50GHz**)
 - 冷却され速度が変わっていくPsを一気に冷却.
- ✓ 長い持続時間 (**200ns**)
 - Psが生きている間冷やし続ける.



シミュレーション結果

シミュレーションの結果

- 右図より, Psが減速し, 冷却されていることが分かる
- 生成されたPsのうち, **7%が7Kまで冷却**
- 過去の見積(NIM B, 192(2002) 171-175)よりも厳しいスペックが必要となった



冷却の確認方法

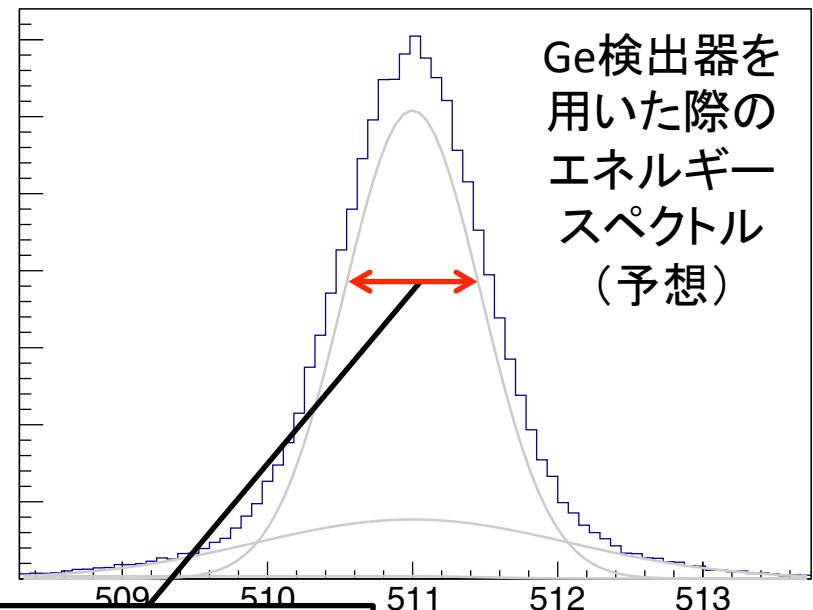
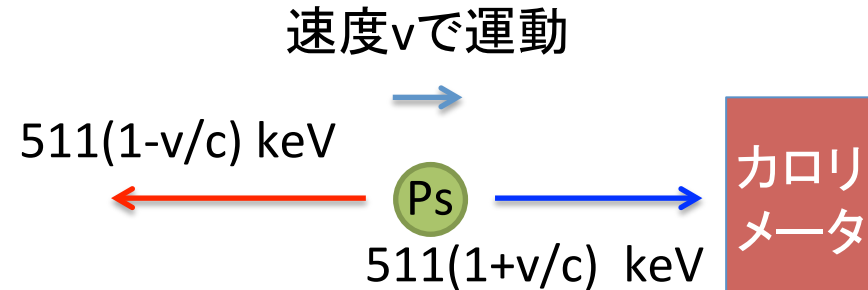
冷却したことを確認することも必要

→ 低い温度を測定できる高感度な温度測定システムが必要

DBSを用いたPs温度測定

Doppler Broadening Spectroscopy
(ドップラー拡がり分光法, DBS)

1. Psが崩壊してできた511keV光子は、ドップラー効果を受けてエネルギーが変化する
2. カロリメータで測定した511keV γ 線ピークは拡がりをもつ
3. 511keV γ 線ピークの拡がりから既知の検出器レスポンスを差っ引くことで、Psの運動によるドップラー拡がりを求める。これより、Psの速度分布、温度が求まる。



検出器のレスポンス
+
ドップラー拡がり

エネルギー (keV)

Ps-DBSの感度向上

Ps-DBSの高感度には、**カロリメータ分解能の向上**が必要

これまでのDBSはGe半導体検出器で行われてきた

HPGe分解能@511keV

:約1keV

HPGeの分解能に対して、
ドップラー拡がり小さい
さらなる高分解能が必要



Ps10Kでのドップラー拡がり

:0.035keV

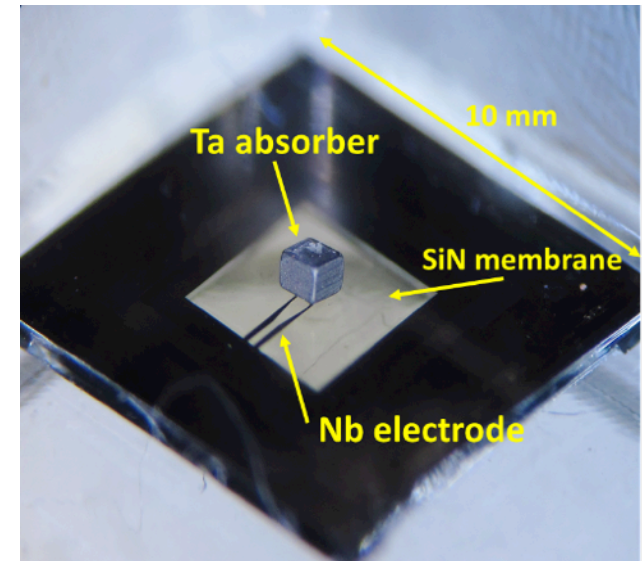


超伝導センサーを用いた高分解能カロリメータの利用

- 温度計に超伝導素子を用いたボロメータ
- X線(<10keV)領域では、分解能2eVというような超高分解能を達成
- **これをガンマ線に使う**
↑これまでにないような高分解能ガンマ線分光が可能に！

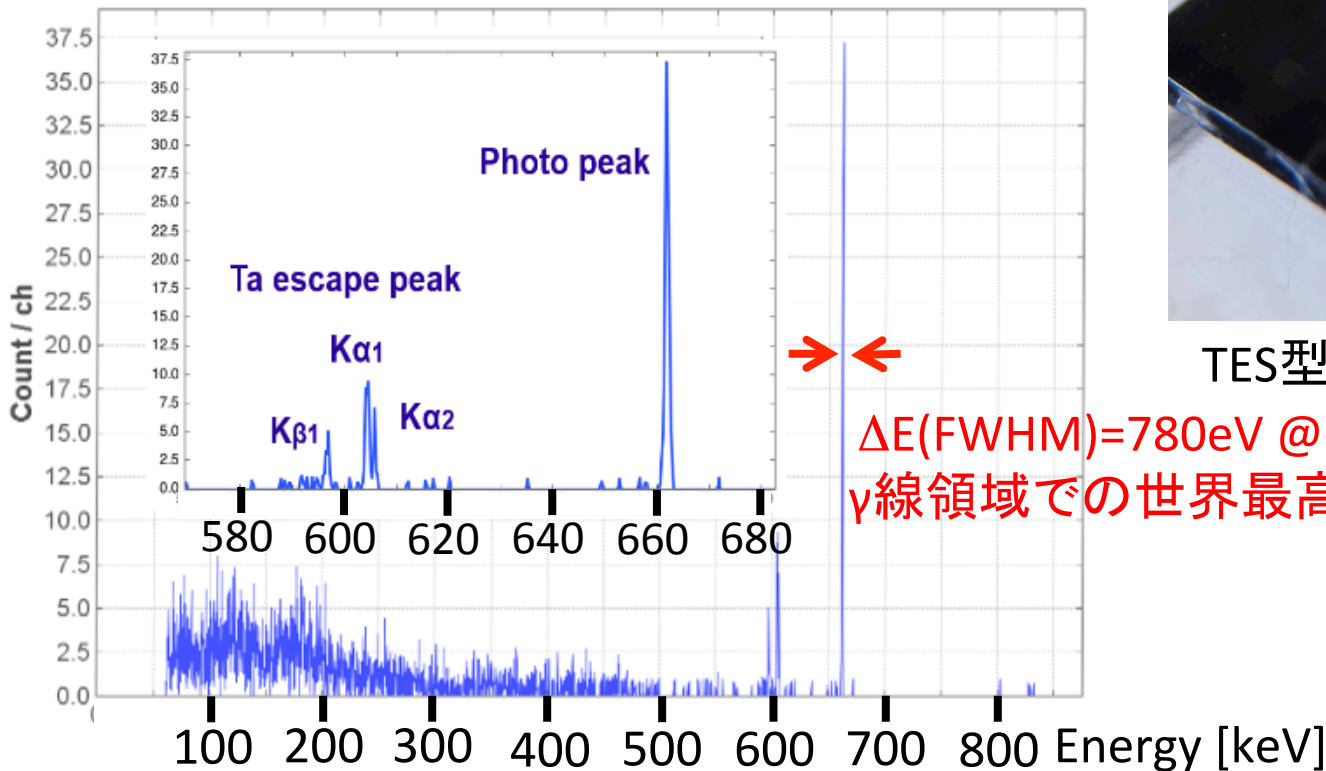
γ 線を測るTES型カロリメータ

東大工学部高橋・大野研究室によって、sub-MeV γ 線に使用できるTa吸収体を用いたTES型カロリメータが開発されている。



TES型マイクロカロリメータ

γ -ray Spectrum from Cs-137



$\Delta E(\text{FWHM})=780\text{eV @ }662\text{keV}$
 γ 線領域での世界最高分解能

Cs137からの γ 線スペクトル

TES型カロリメータを用いた Ps-DBS実験

現在, TES型カロリメータを用いた初めてのPs-DBS実験を行うために, 高橋・大野研究室と共同で研究中

最終的には, BECの温度スケール $<10\text{K}$ での温度測定を行うための,

✓ 分解能: $100\text{eV}@511\text{keV}$

✓ アレイ化: 10ピクセル

を目指す

まとめ

- Ps-BECはそれ自身興味深く, また, 様々な応用が期待できる現象
- 高速冷却と高密度化がキーテクノロジー
- 高速冷却
 - Psは軽いため, レーザー冷却が有効
- 温度測定システム
 - 超高分解能力熱量計を用いたDBSによる極低温Ps温度測定を行う