

# 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

**周 健治**, 村吉 諄之, 石田 明, 難波 俊雄<sup>A</sup>,  
浅井 祥仁, 蔡 恩美<sup>B</sup>, 吉岡 孝高<sup>B</sup>, 五神 真,  
大島 永康<sup>C</sup>, オローク ブライアン<sup>C</sup>, 満汐 孝治<sup>C</sup>,  
伊藤 賢志<sup>C</sup>, 熊谷 和博<sup>C</sup>, 鈴木 良一<sup>C</sup>, 藤野 茂<sup>D</sup>,  
望月 出海<sup>E</sup>, 兵頭 俊夫<sup>E</sup>, 和田 健<sup>F</sup>, 川合 健太郎<sup>G</sup>

東大理, 東大素セ<sup>A</sup>, 東大工<sup>B</sup>, 産総研<sup>C</sup>, 九大GIC<sup>D</sup>, KEK<sup>E</sup>, 量研機構<sup>F</sup>, 阪大工<sup>G</sup>



日本物理学会 第73回年次大会  
2018.03.22 @東京理科大学

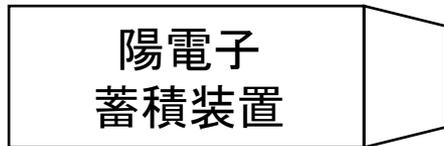
# Ps-BEC 実現法

新しい手法を提案: K. Shu *et al.* J. Phys. B 49, 104001 (2016)

Ps-BEC 実現の第一の鍵:

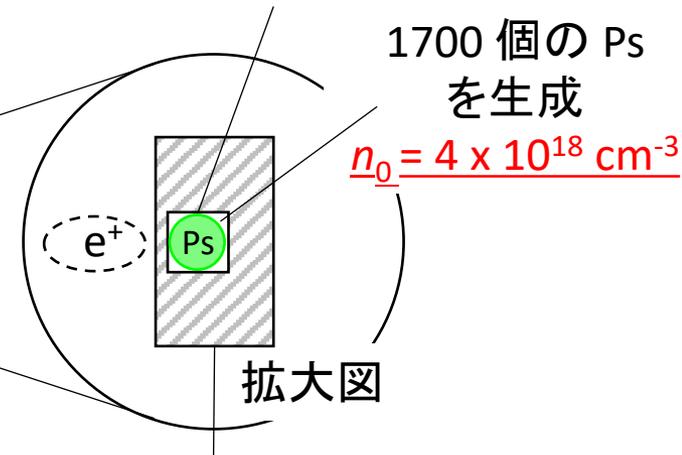
高密度陽電子を生成し、高密度 Ps に一度に変換

- $10^8$  個の偏極した陽電子  
ナノ秒のバンチ、 $\sim$  keV のエネルギー



サブ  $\mu\text{m}$  ウェストに絞ったビーム  
をシリカ ( $\text{SiO}_2$ ) に入射

内部の空隙 = トラップ空間  
 $\sim 75 \text{ nm} \times 75 \text{ nm} \times 75 \text{ nm}$



1700 個の Ps  
を生成

$$n_0 = 4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$$

Ps 生成材料 (シリカ)  
 $\sim 50\%$  の変換効率

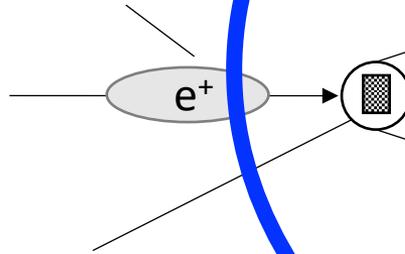
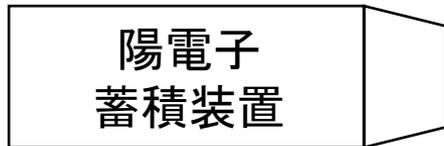
# Ps-BEC 実現法

新しい手法を提案: K. Shu *et al.* J. Phys. B 49, 104001 (2016)

Ps-BEC 実現の第一の鍵:

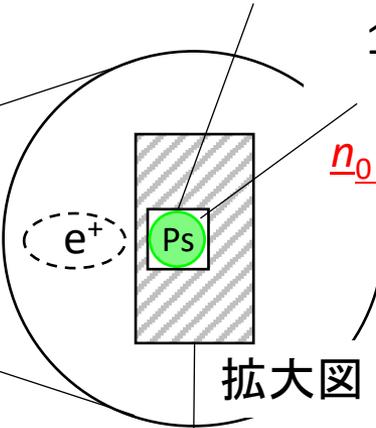
高密度陽電子を生成し、高密度 Ps に一度に変換

➤  $10^8$  個の偏極した陽電子  
ナノ秒のバンチ、 $\sim$  keV のエネルギー



サブ  $\mu\text{m}$  ウェストに絞ったビーム  
をシリカ ( $\text{SiO}_2$ ) に入射

内部の空隙 = トラップ空間  
 $\sim 75 \text{ nm} \times 75 \text{ nm} \times 75 \text{ nm}$



1700 個の Ps  
を生成

$$n_0 = 4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$$

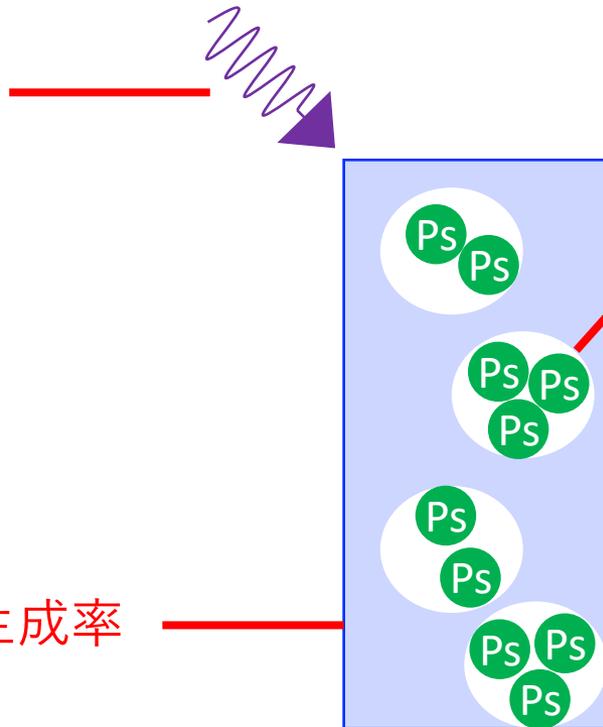
Ps 生成材料 (シリカ)  
 $\sim 50\%$  の変換効率

本講演ではPs生成材料の開発についてお話します

# 紫外光に透明でナノ空孔を持った ポジトロニウム生成デバイス開発

熱化とレーザー冷却を組み合わせた  
冷却を実現するには3つの機能が必要

冷却用紫外レー  
ザーに対して透明



空孔径 50 - 100 nmが  
たくさん

- 大きすぎる → 熱化遅
- 小さすぎる → 寿命短

➤ 3つの要求を満たす  
サンプルは存在しな  
いため新しく開発

# デバイスのアイデア

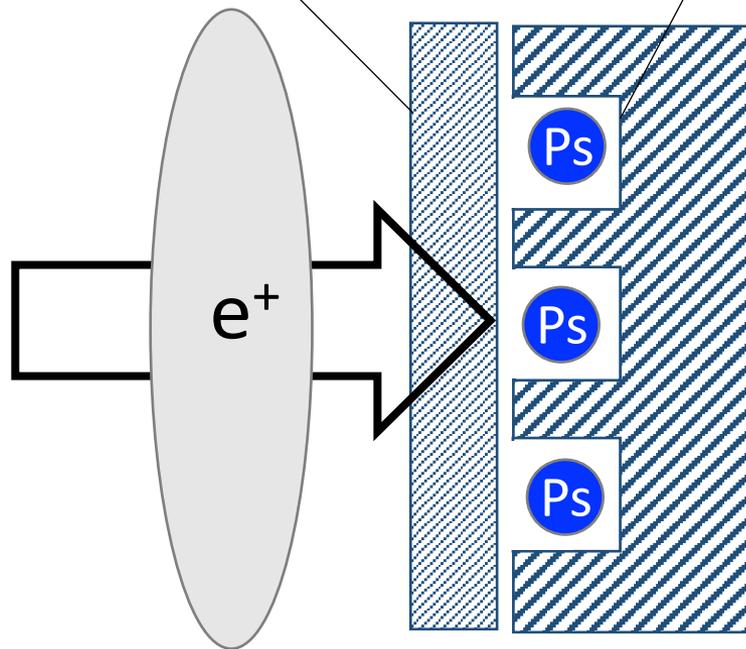
## 微細穴加工したシリカガラス

透明なシリカガラス表面に微細な穴加工を行い、  
穴の上からシリカの薄膜でフタをして空孔を作る

薄膜でフタする

TEMで使われるSiO<sub>2</sub> 100 nm厚

表面穴加工した  
シリカガラス



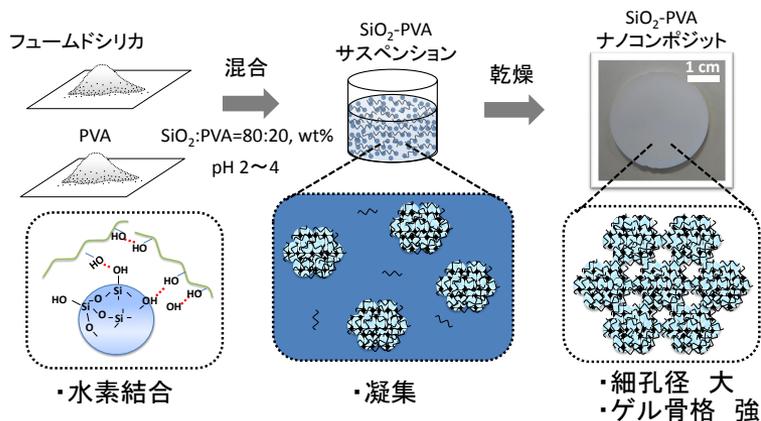
- ✓ 高いPs生成率（8割）
- ✓ ガラスは紫外領域まで透明
- ✓ ナノテク微細加工技術で自在に均一な空孔が作れる
- プロトタイプの穴空きガラスを製作， Ps生成率を評価

# 穴空きシリカガラスの製作

## 手法1：機能性シリカガラスにインプリント

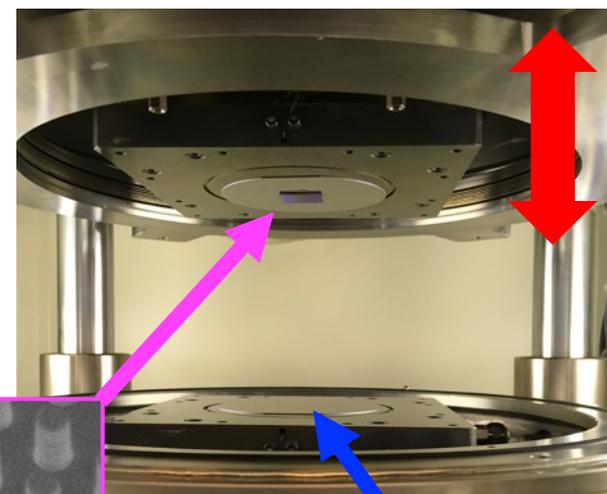
2つの方法で穴空きガラス製作を行った

### その1：機能性シリカガラスの利用



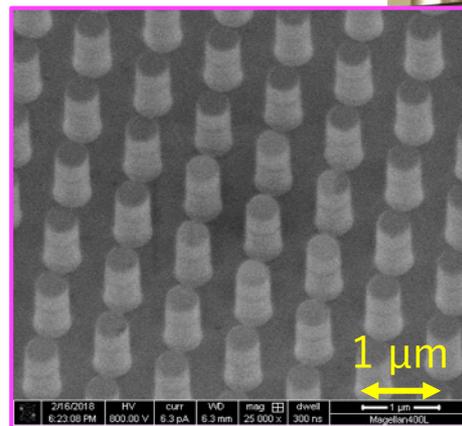
1. SiO<sub>2</sub>/PVA が重合した  
柔らかい成形体を作る

上下動ステージ



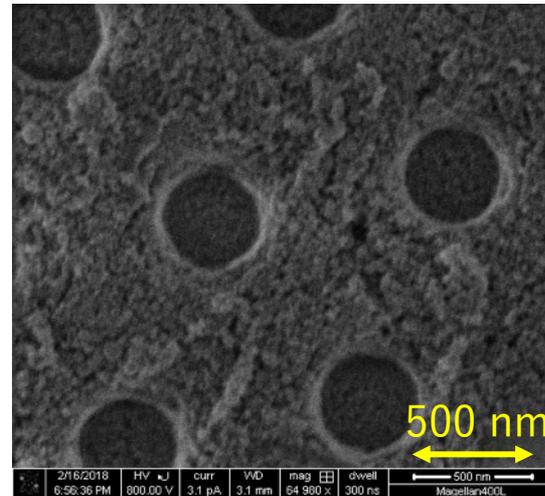
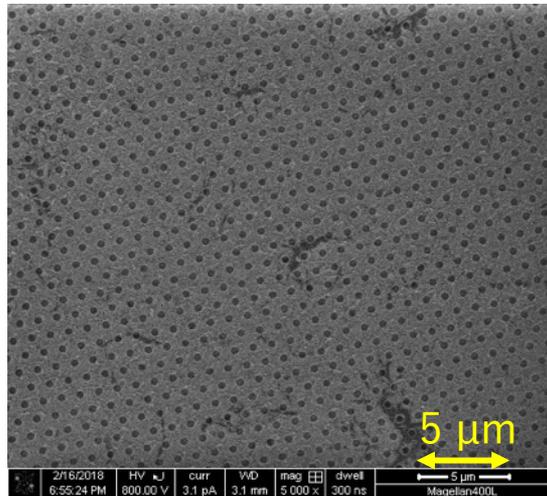
ここに成形体を置く

2. 成形体に柱付金型を  
押し付けて、穴を転  
写（インプリント）



柱付金型

# 成形体の穴空けに成功 焼成して透明なガラスへ



成形体全面に渡って、デザイン通りの穴空けに成功  
穴の充填率は 8% (低いのは汎用の金型を使用したため)



穴空けした成形体を  
焼成することで透明な  
シリカガラスに

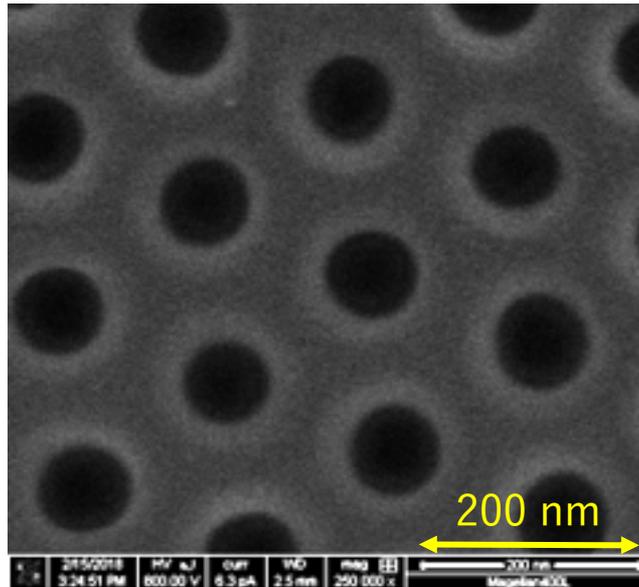
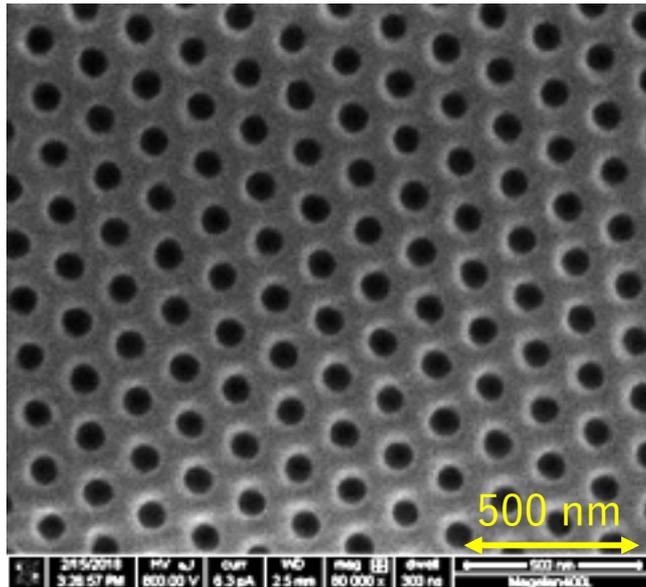
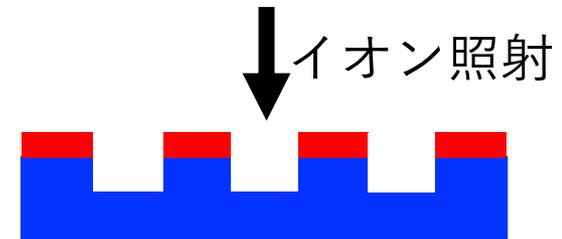
# 穴空きシリカガラスの製作

## 手法2：SiO<sub>2</sub>基板に電子リソグラフィ+エッチングの利用

1. 電子線リソグラフィにより、SiO<sub>2</sub>基板上に穴パターンマスクを作成



2. エッチングによりSiO<sub>2</sub>基板に穴空け，最後にマスクを除去



10 mm x 10 mmの領域に渡って穴空け成功  
穴の充填率は20%

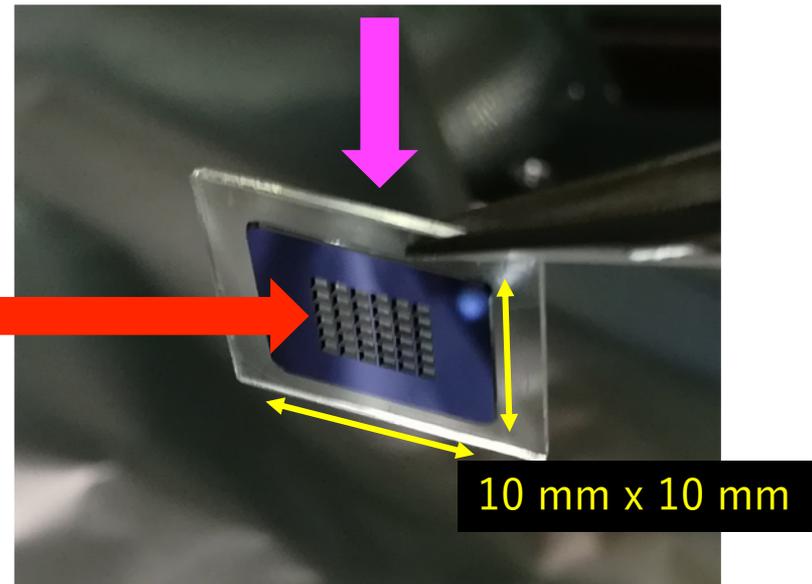
# SiO<sub>2</sub> 100 nm 膜で穴にフタ

SiO<sub>2</sub> 100 nm 膜は TEM 観察に使う窓を使用。フレームはシリコン製。

透明な部分が SiO<sub>2</sub> 窓  
500 μm x 500 μm  
t 100 nm  
6 x 6 = 36 枚

10 mm x 10 mm のフレーム中  
での窓充填率は 9%

電子線リソグラフィーで製作した  
穴空きガラス

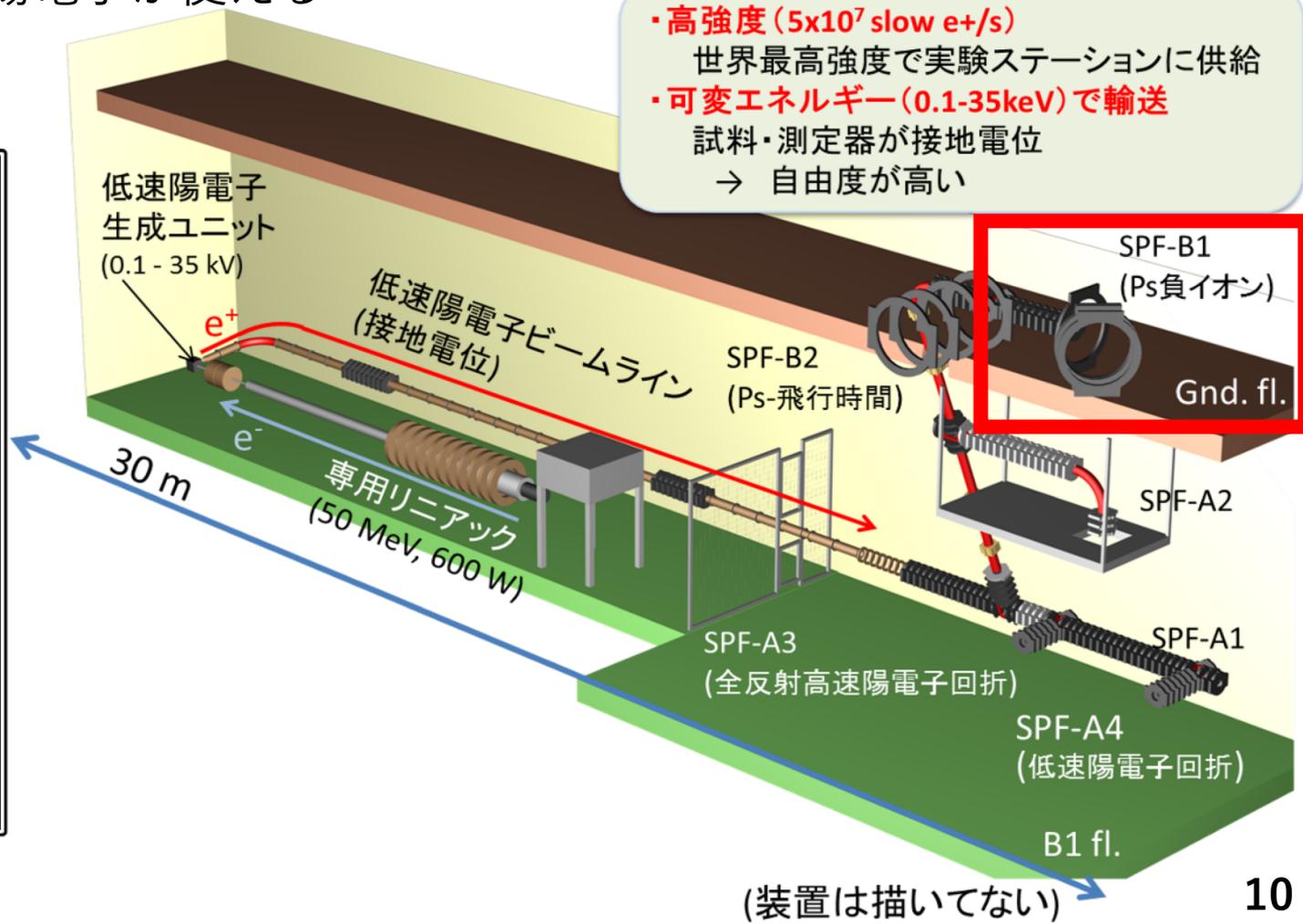
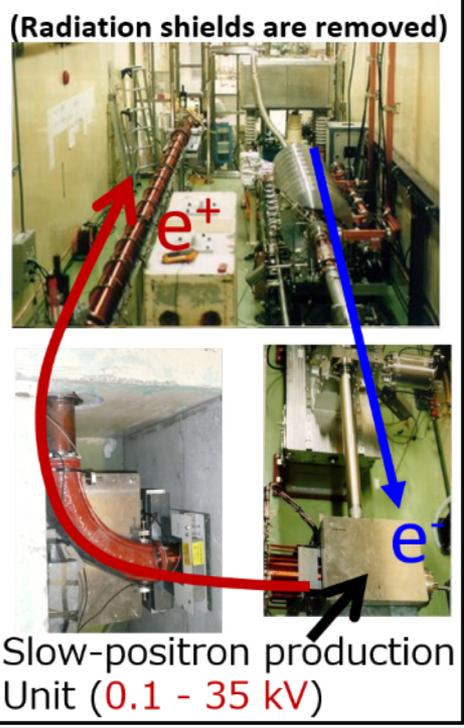


製作した穴空きガラスに窓を押し付け、  
プロトタイプデバイスの完成

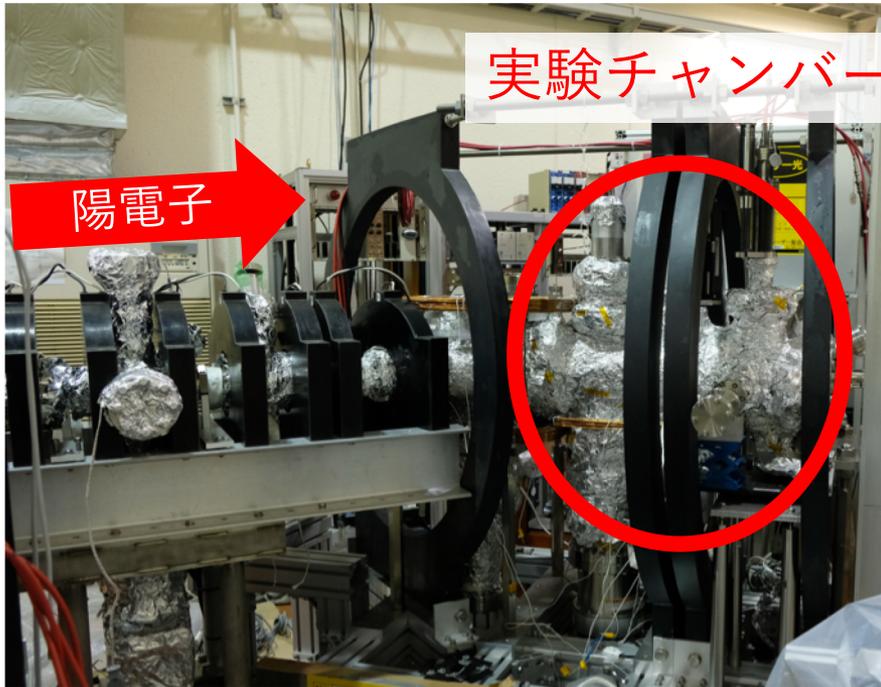
# ショートパルス陽電子が使える KEK低速陽電子実験施設で実験

パルスレーザーと同期できる  
時間幅の短い低速陽電子が使える

- ・高強度 ( $5 \times 10^7$  slow  $e^+$ /s)  
世界最高強度で実験ステーションに供給
- ・可変エネルギー (0.1-35keV) で輸送  
試料・測定器が接地電位  
→ 自由度が高い



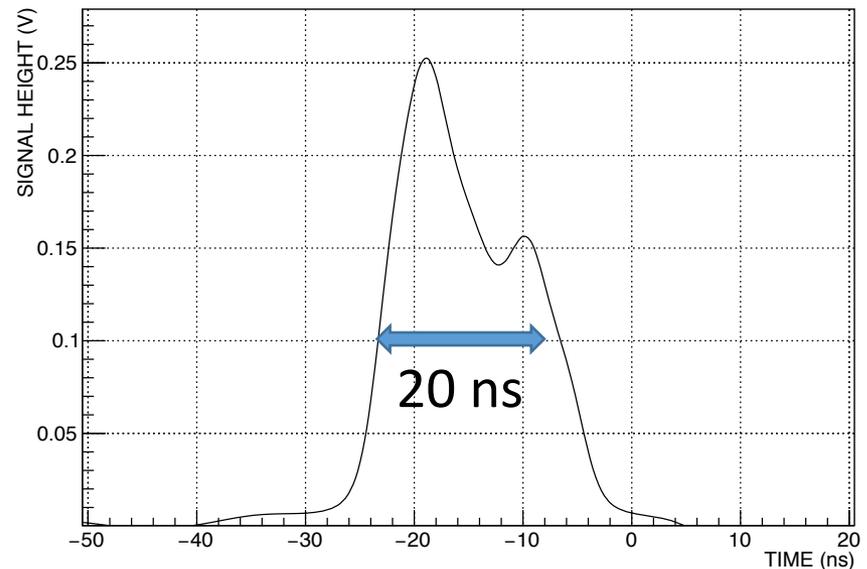
# ショートパルス陽電子が使える KEK低速陽電子実験施設で実験



2017/12/17-19, 2018/03/05-09  
にビームタイムを取得。プロトタイプ  
デバイスの評価を行った。

## ビームのスペック

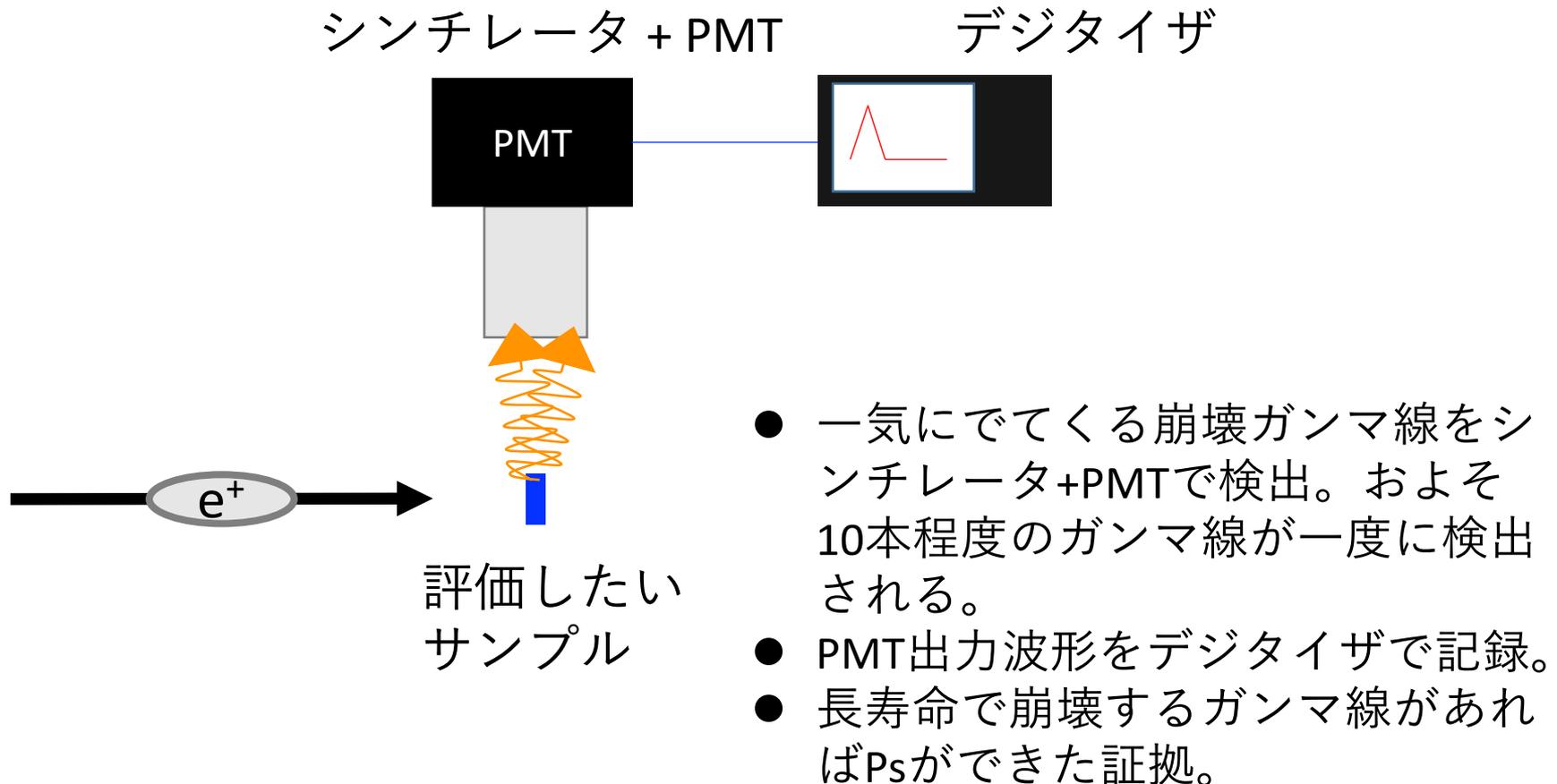
- 時間幅 20 ns
- ビーム径 5 mm
- 繰り返し 50 Hz



実際にMCPで取得した  
陽電子の時間波形

# 長寿命で崩壊したガンマ線から Psの観測

## 測定セットアップ

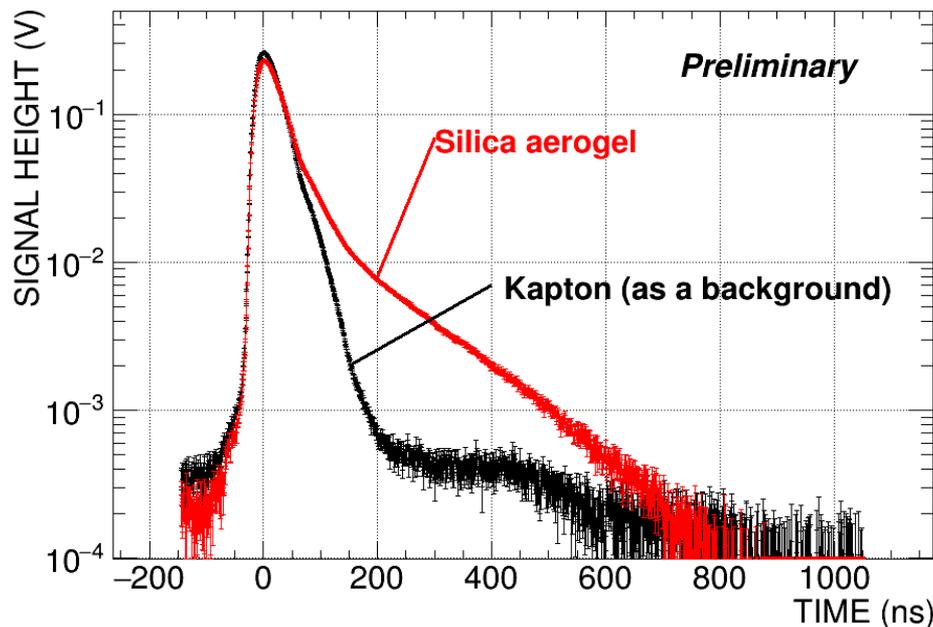


# キャリブレーション用サンプルで長寿命成分を観測 現在詳細な解析中

キャリブレーション用サンプル

Kapton・・・Psができない

Aerogel・・・Psができる



測定したガンマ線の波形 (LaBr<sub>3</sub>(Ce))  
10分間測定し平均

Aerogelで長寿命成分を観測

現在, Aerogelや穴空きガラス  
デバイスで, 寿命や生成率を  
詳細に解析中

Ps を作らずすぐ消滅する陽電  
子の影響を抑えるために

- 発光の減衰が速いシンチ  
レータを使用 (今回は  
Plastic, LaBr<sub>3</sub>(Ce))
- ビームライン磁場  
(~100G) で動作し, アフ  
ターパルスが十分少ない  
PMTを使用 (Hamamatsu  
R6041)

# 今後の展望

## 長寿命 Ps 生成率の向上

- 500  $\mu\text{m}$  径程度に集束された陽電子の利用
  - フタをしている窓部分 (500  $\mu\text{m}$  x 500  $\mu\text{m}$ ) を狙い撃ちし、フレーム部分で消滅した9割の陽電子を全て窓に (10倍ゲイン)
  - ガラス穴加工領域を小さくすることで、nm レベルの精度が出る微細加工装置を利用、穴の充填率を6割程度に (3倍ゲイン)
- ゾル-ゲル法による多孔質シリカ薄膜の利用も検討

シリカゾル溶液を乾燥させ多孔質にする。空隙率を8-9割と非常に高くすることができる。熱化とレーザー冷却のハイブリッド冷却の実証まで可能。現在 50-100 nm 程度の空孔径を持った薄膜を探している。

Ps冷却用レーザー，陽電子多段輝度増強  
システムの開発も並行して進めている

KEK-SPFにて

2018年度中のレーザー冷却実験開始

2019年度中の極低温Ps生成を目標

# まとめ

- Ps-BECのための熱化とレーザー冷却のハイブリッド冷却を実現するには、紫外光に透明かつ 50 - 100 nm 程度の空孔を持ったPs生成材料が必要。微細加工したシリカガラスとSiO<sub>2</sub>薄膜を用いてシリカ材料の試作を行った。微細加工の基本手法は確立。
- レーザーとの組み合わせに必要なショートパルス低速陽電子が得られるKEK-SPFで試作したシリカガラスのPs生成率を評価するための測定を行った。現在詳細な解析を進めている。
- シリカガラスを利用したデザイン、測定手法の最適化を進めるとともに、ゾル-ゲル法を利用した方法によるデバイス製作も検討している。
- Ps冷却用レーザー、陽電子多段輝度増強システムの開発も並行して進めており、KEK-SPFにて2018年中のレーザー冷却パイロット実験、2019年中のPs高速冷却実現を目指している。