

ユニットテーマの軸「装置学・技術」公聴会

2022年3月3日(木)

ユニットテーマ

# 『ミュオンと核融合科学の融合』

軸

素過程・相互作用

軸

装置学・技術

岡田 信二 (中部大学)

# 核融合としての課題

## ○ 核融合のテーマとして何にチャレンジするか？

Muon Catalyzed Fusion

『ミュオン触媒核融合 ( $\mu\text{CF}$ )』という新しい核融合をテーマに、**核融合研究の基盤拡充**にチャレンジ

- **背景**：近年、ミュオン触媒の効率を引き上げる新たな**素過程**の可能性「In-flight  $\mu\text{CF}$ 」(IF $\mu\text{CF}$ )が、理論的に見いだされた。
- **課題**：IF $\mu\text{CF}$  素過程の**検証**、及び、効率的な $\mu$ 生成・ $\mu\text{CF}$ 標的に関する**技術基盤開発**

# 学際的な特徴付け (何の研究か?)

素粒子「ミュオン」の持つ、以下の3つの特異な性質を利用した多彩な学際領域研究：  
①量子的性質，②強い結合力，③高い透過力

## 1. 人工的に生成

### 加速器

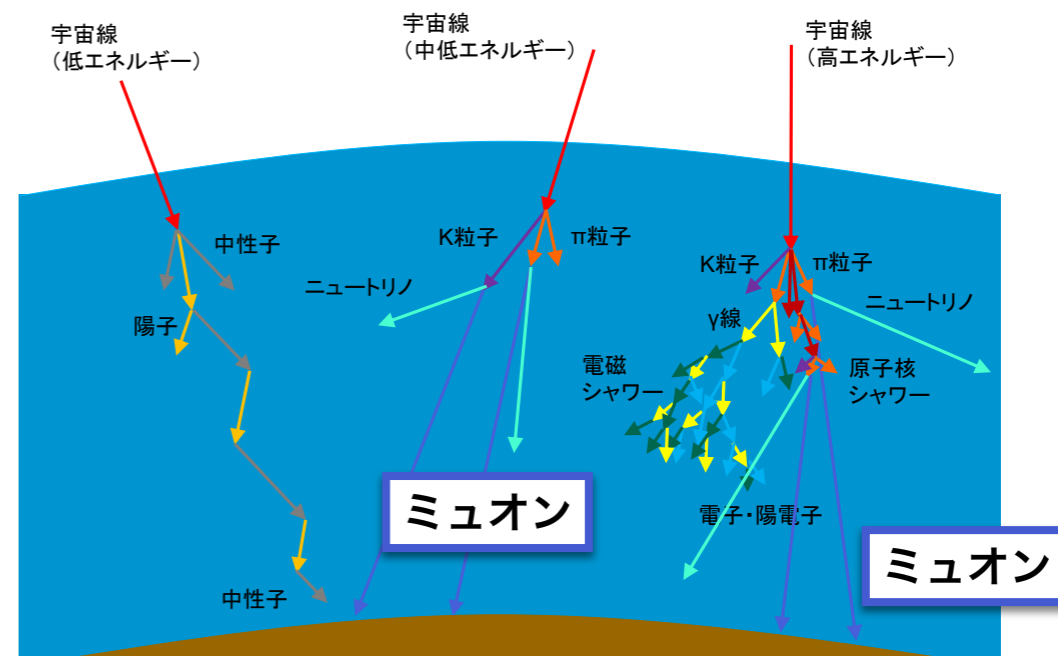
粒子加速器により大強度のミュオン生成が可能



## 2. 上空から常に降り注ぐ

### 宇宙線

高い透過力があり地表まで届く



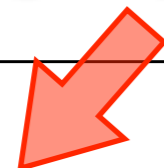
# 学際的な特徴付け

(何の研究か?)

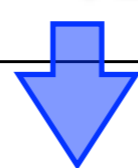
素粒子「ミュオン」の持つ、以下の3つの特異な性質を利用した多彩な学際領域研究：

- ① 量子的性質
- ② 強い結合力
- ③ 高い透過力

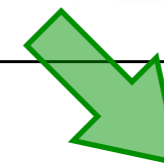
①



②



③



ミュオン  
原子・分子科学

物質科学に普遍的に潜在する原子分子過程の研究

ミュオン  
触媒核融合

新たな $\mu$ CF過程 (IF $\mu$ CF)、及び、これを高める反応場の研究

宇宙線ミュオン  
応用


革新的宇宙天気予報を目指した宇宙線ミュオンの応用研究

素過程・相互作用 軸

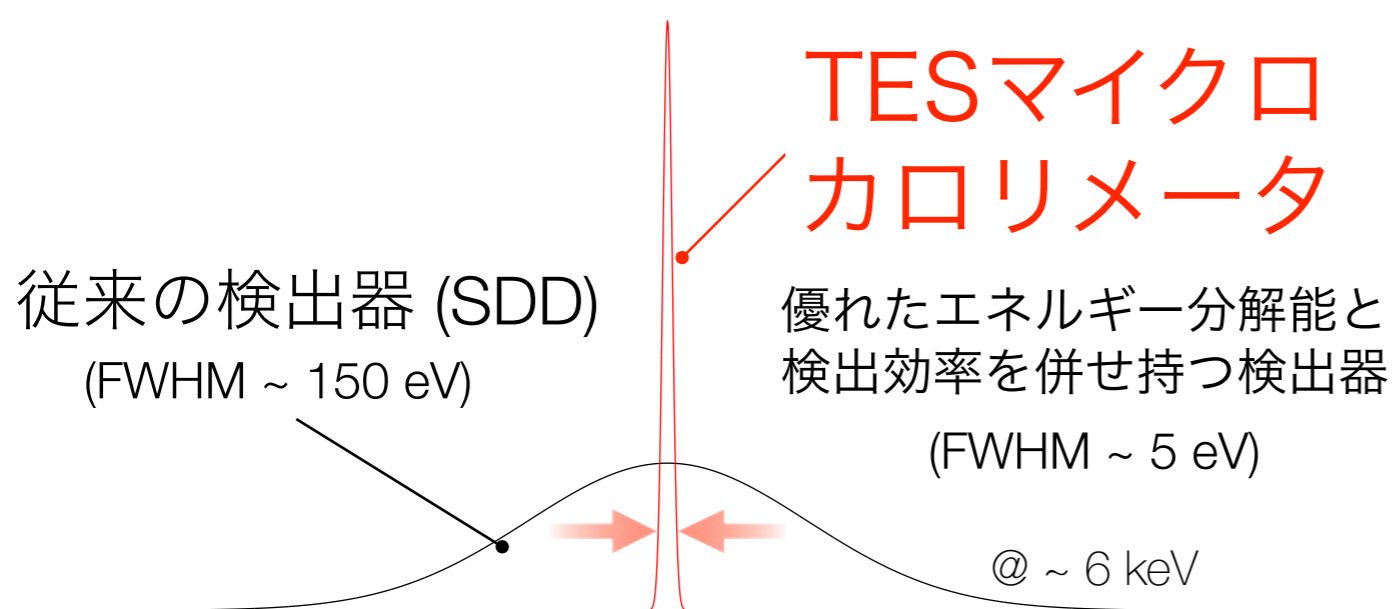
装置学・技術 軸

# アプローチ

## ① ミュオン原子・分子科学

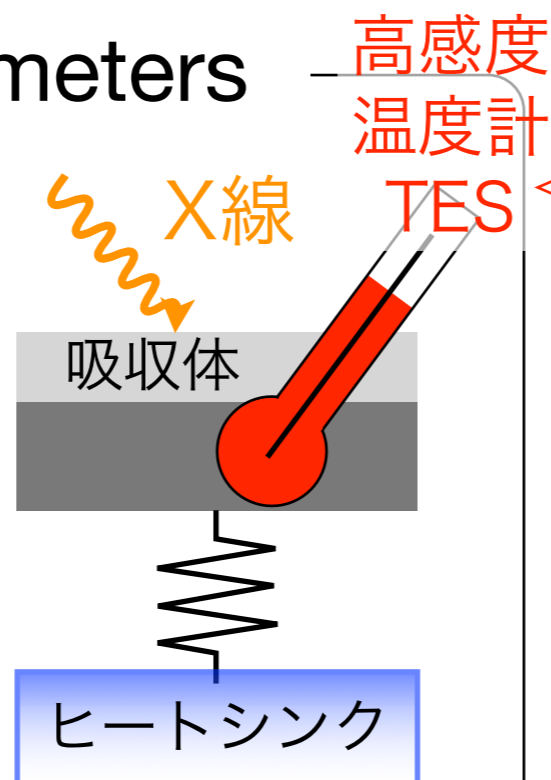
- (a) 革新的分光技術の導入  装置学  
・技術
- (b) 新しいミュオン原子分光手法
- (c) ミュオン『分子』高精度分光
- 素過程・  
相互作用

# (a) 革新的分光技術の導入

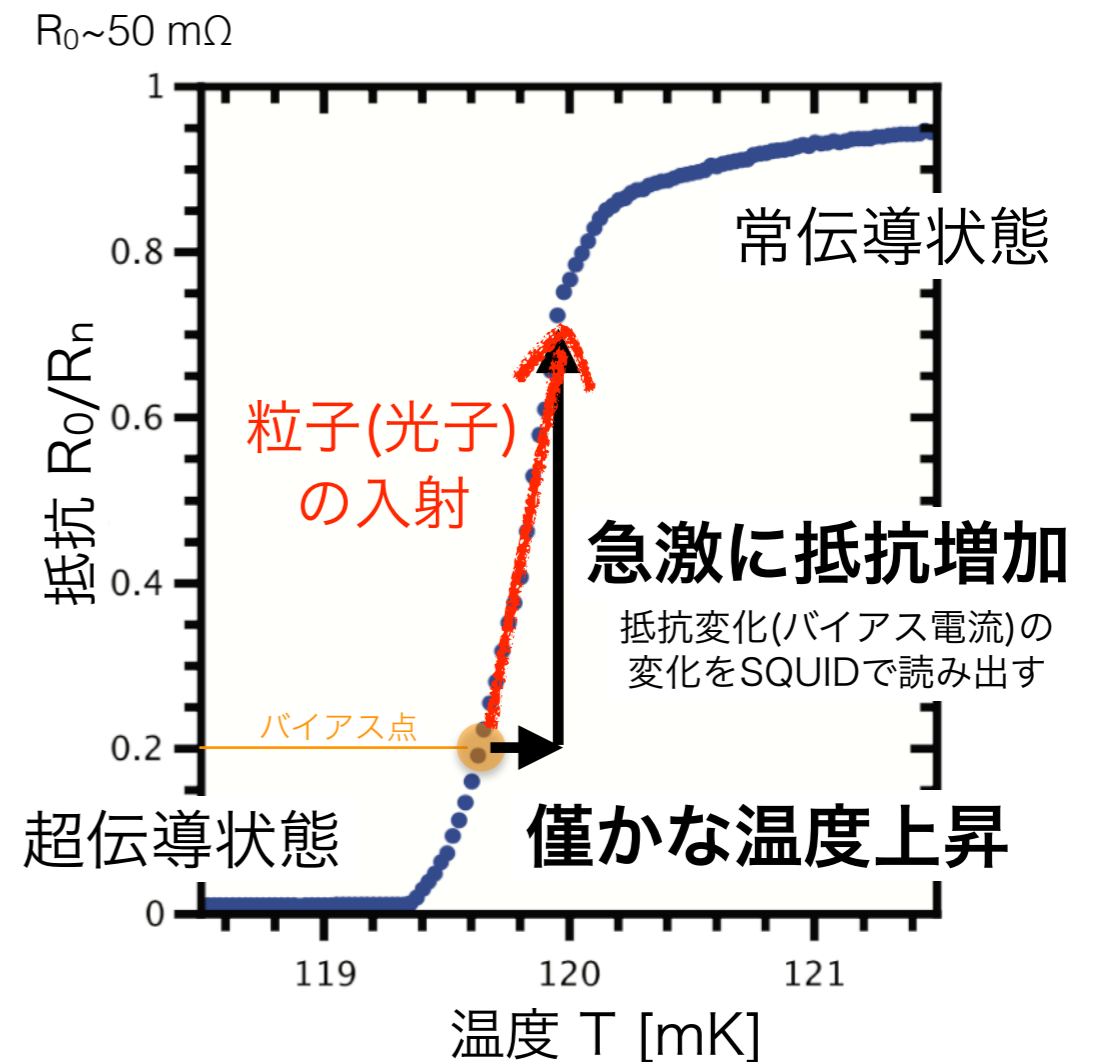


## TES microcalorimeters

1. 入射粒子が吸収体に吸収される
2. エネルギー  $\Delta E$  はフォノンに変換
3. 僅かな温度上昇を高感度温度計 TES で測定する



## Transition Edge Sensor



高分解能を実現 ( $\Delta E / E \sim 10^{-3}$ )



- (b) 新しいミュオン原子分光手法  
(c) ミュオン『分子』高精度分光

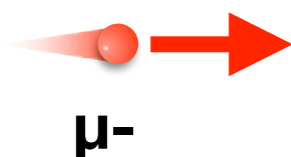
素過程・相互作用  
軸

# アプローチ

## ② ミュオン触媒核融合

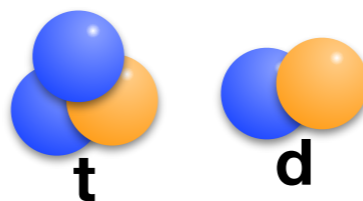
### (a) ミュオン源

大強度ミュオンビーム

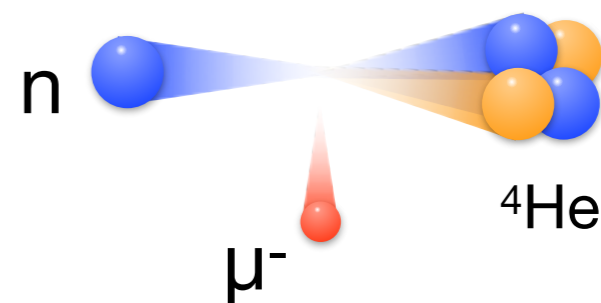


### (b) ミュオン標的

高密度・定常循環



### (c) 素過程の理解



(a) ミュオン源開発 (イオン源/加速器)

(b)  $\mu$ CF標的開発 (定常循環型標的)

(c) 素過程に関する理解

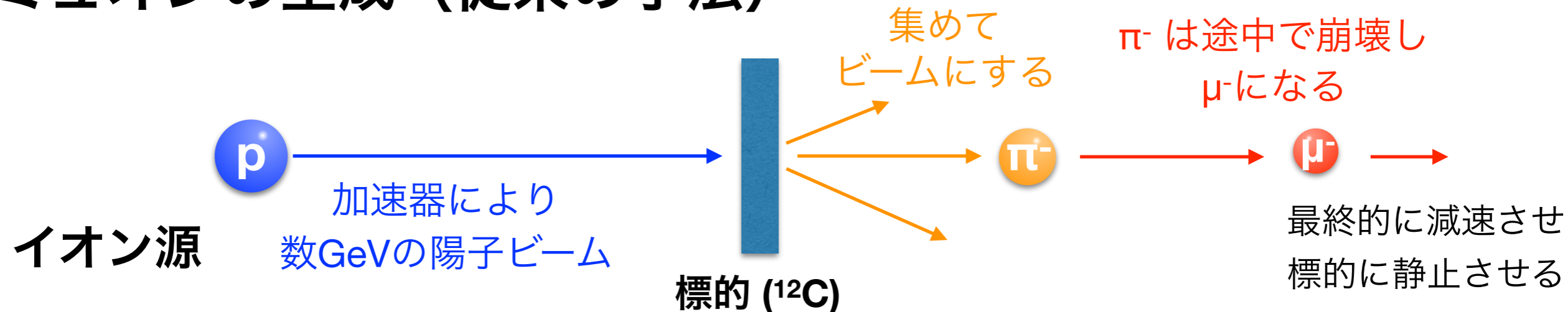
装置学  
・技術

素過程・相互作用

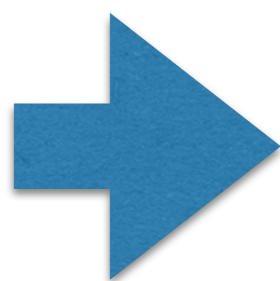
軸

# (a) ミュオン源開発

## ミュオンの生成（従来の手法）



- $\mu\text{CF}$ のためのミュオン源：**
- (1) 大強度
  - (2) 低コスト ( $\mu^-$ 生成)  $\rightarrow$  高効率
  - (3) エネルギーの揃ったビーム



- ✓ 大強度ビーム用イオン源（NBIチームとの連携）
- ✓ 粒子加速の新技術を導入（レーザー加速も検討）
- ✓ ミュオン生成法の再検討



# (b) $\mu$ CF標的開発 (定常循環型標的)

## ○ $\mu$ CFのための標的：

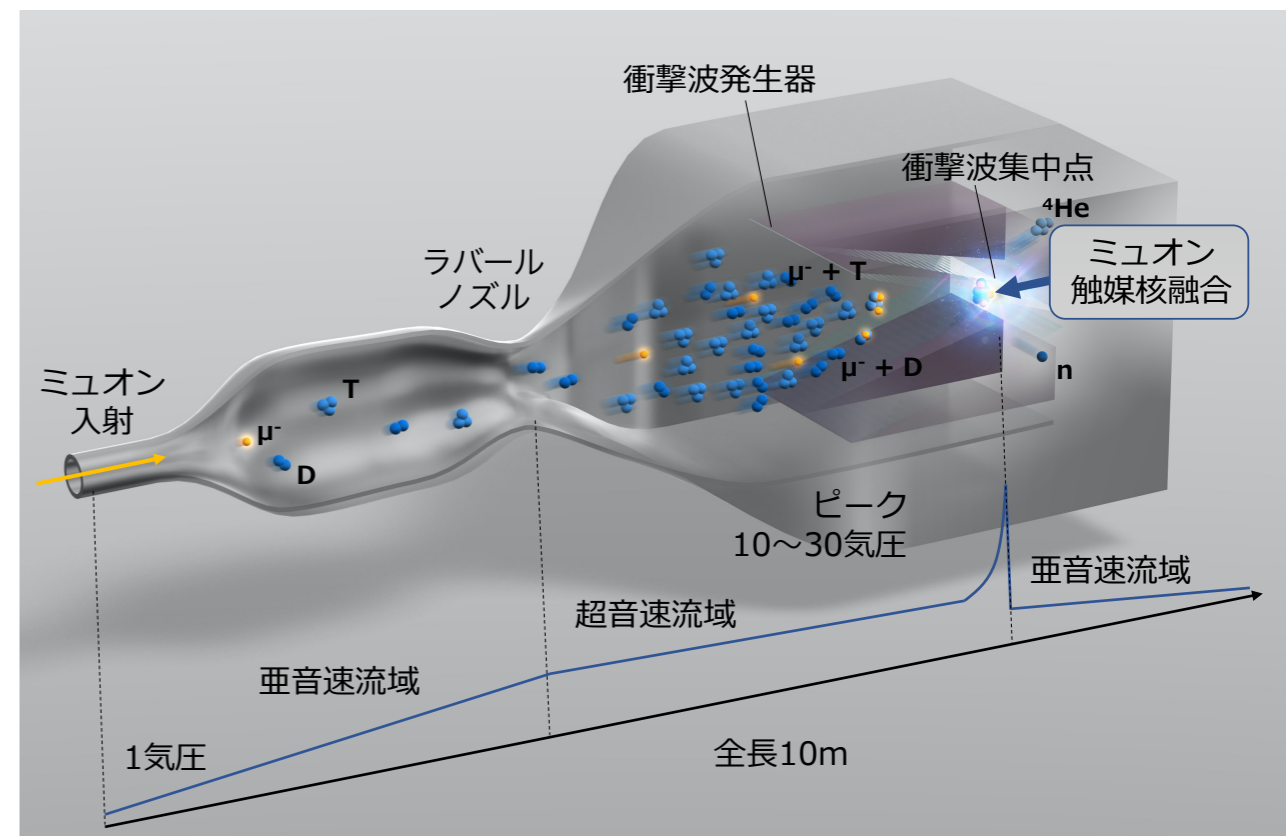
- (1) 重水素と三重水素の混合標的
- (2) 高密度 ( $\mu^-$ を効率的に標的中に静止させるため)
- (3) 反応生成物 ( $^4\text{He}$ ) の除去

→ 従来、 $\mu$ CF用の標的は、固体・液体が利用されてきた

## 循環型の標的を提案

マッハ衝撃波緩衝領域 (中空に浮いた高密度領域) を利用

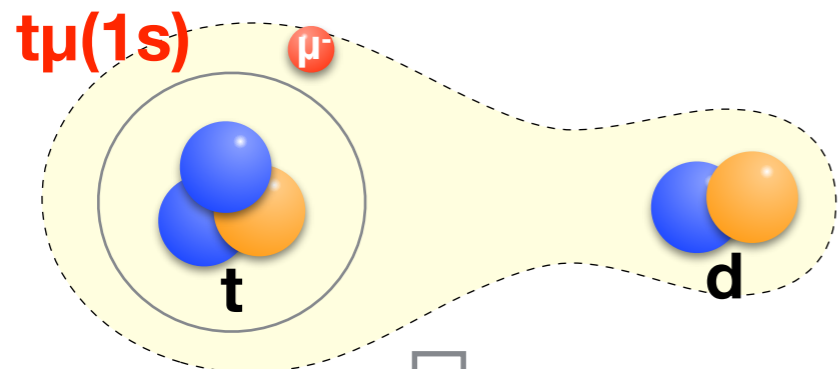
プロトタイプ製作/試験を実施



# (c) 素過程に関する理解

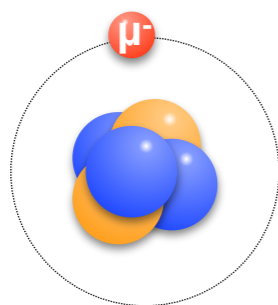
## 従来

(Vesman 機構)



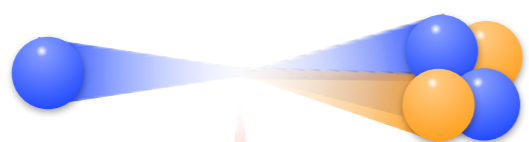
dt fusion

分子内で  
核融合



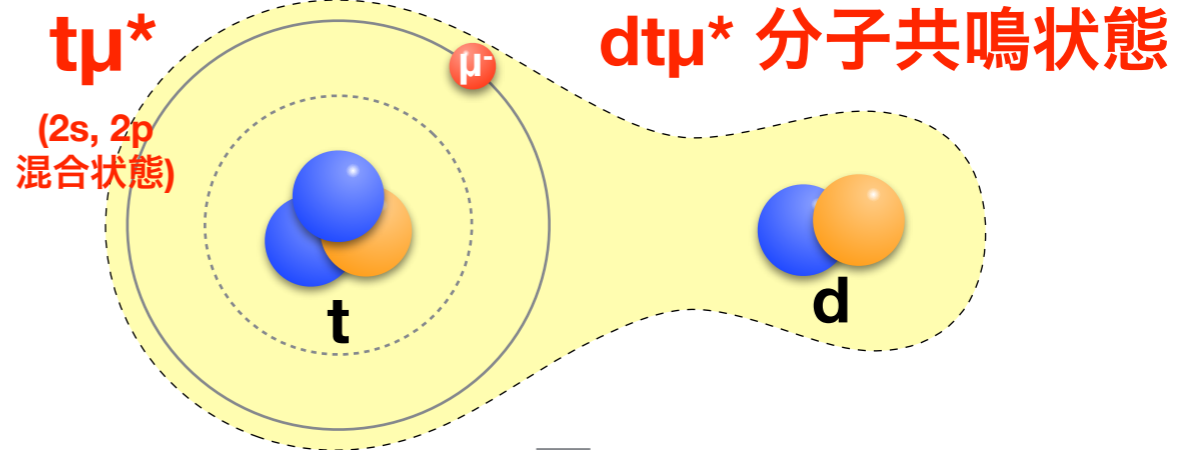
n

<sup>4</sup>He



μ⁻

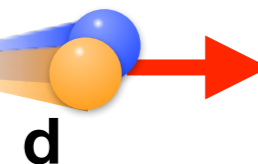
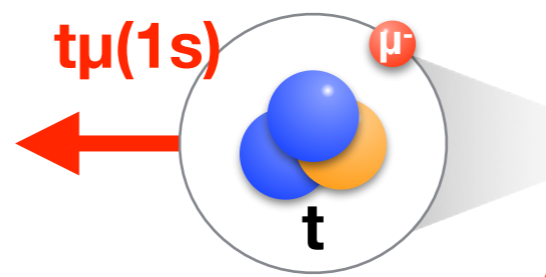
## 新たな素過程 (IF-μCF)



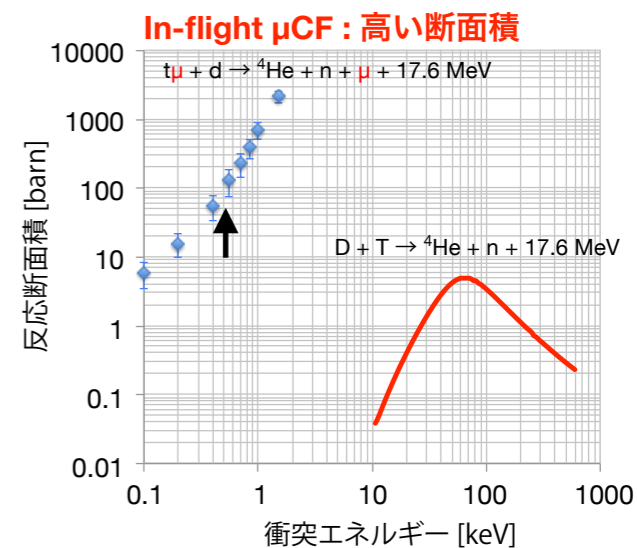
解離

1 keV tμ原子

tμ(1s)

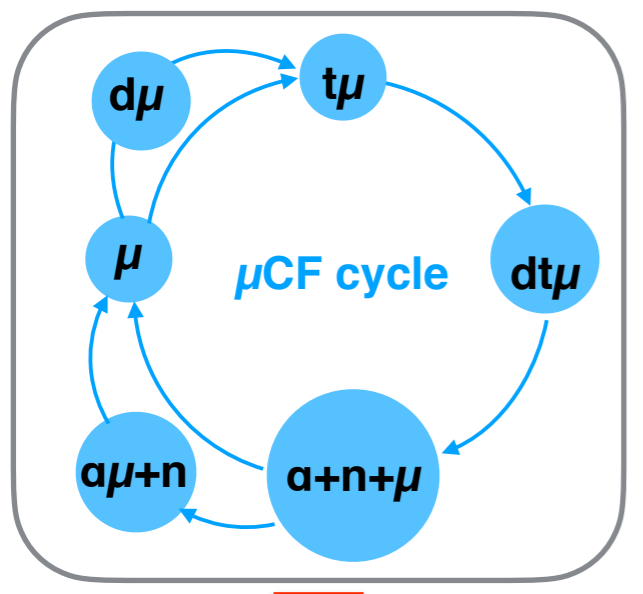


他のD<sub>2</sub>ガスに衝突し  
高い断面積で  
「In-flight」による  
核融合を起こす

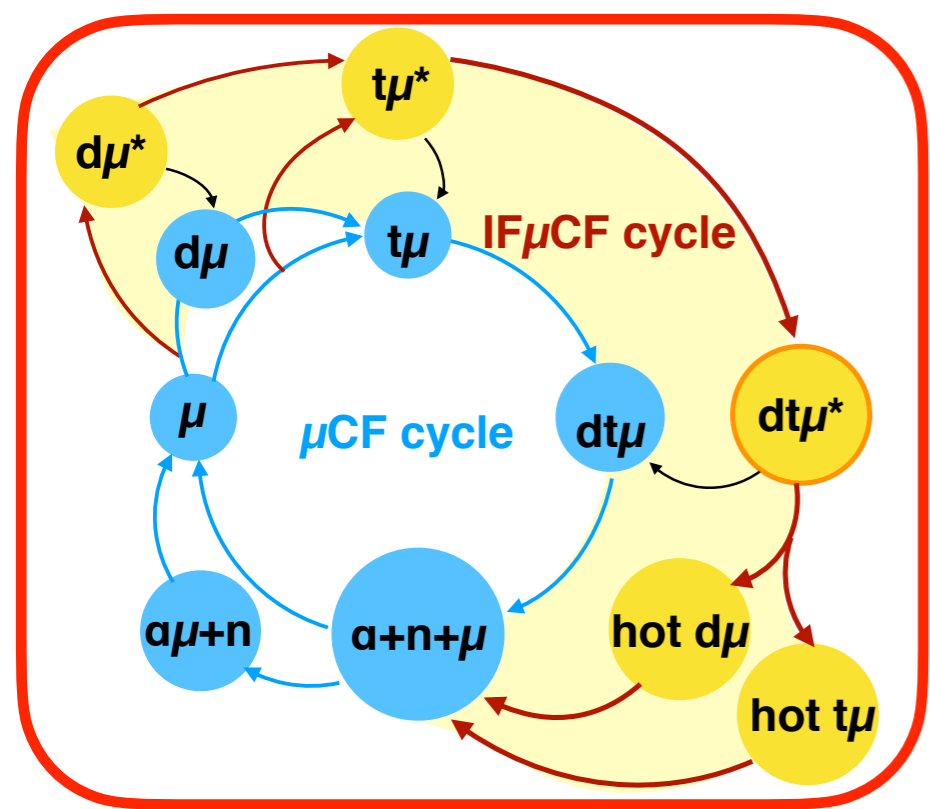


# IF- $\mu$ CF 素過程の研究

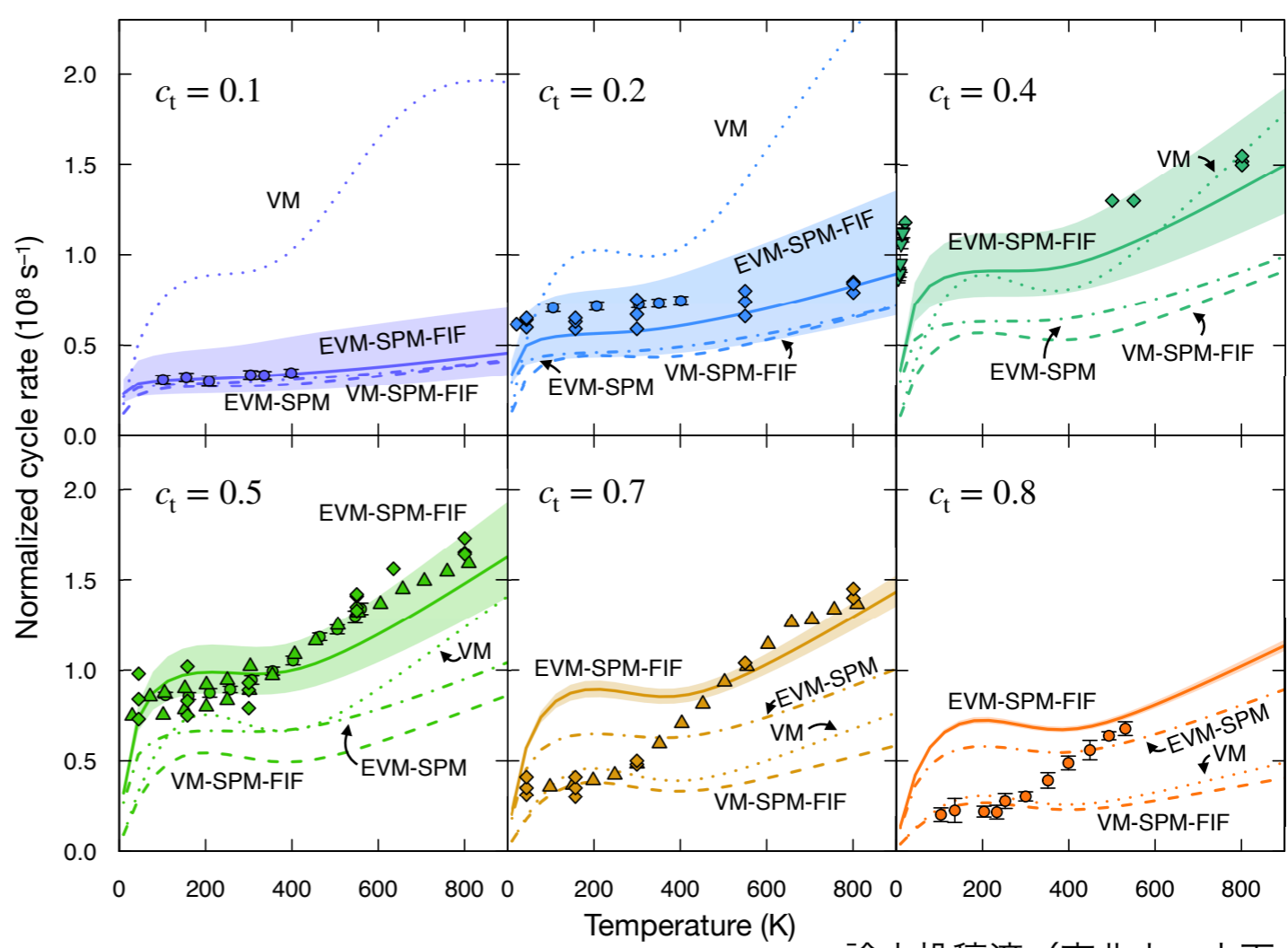
## 従来の $\mu$ CFサイクル



## 新しい $\mu$ CFサイクル



断熱近似を脱却した新しい少数多体系計算:  $(d\mu^*)e \rightarrow$  電子も含めた4体計算



論文投稿済 (東北大: 山下・木野 他)

従来の $\mu$ CFサイクルでは説明できなかった  
反応速度の温度依存性を説明することに成功!

### ⇒ 直接的な実験検証を目指す

( $dd\mu^*$  精密分光実験はその第一歩)

# アプローチ

## ③ 宇宙線ミュオン応用

(a) 宇宙天気

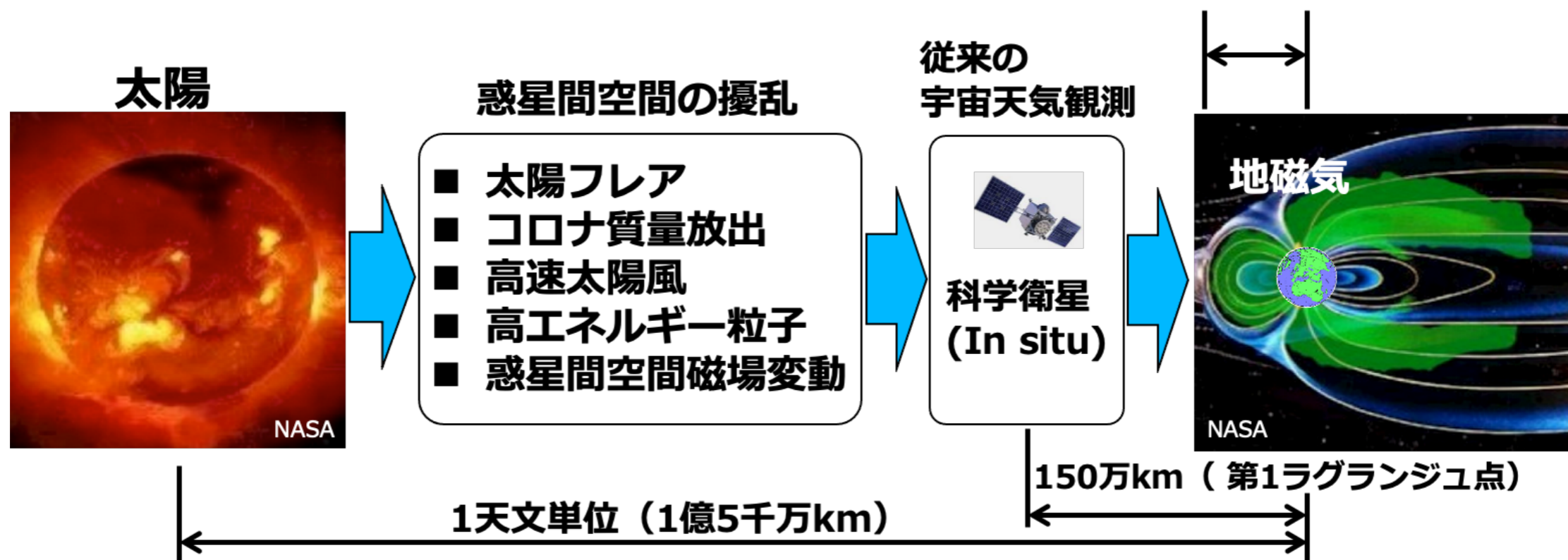
(新たな宇宙天気観測の開拓)

装置学  
・技術

軸

# (a) 宇宙天気 (新たな宇宙天気観測の開拓)

プラズマ速度：700 km/s → 2.4日 (光速 ~8分)



## 宇宙線 (ミュオン) による惑星間空間の観測

IMF = Interplanetary Magnetic Field

1. 1 GeV以上のミュオン (親粒子は約100 GeVの宇宙線陽子)
2. 惑星間空間磁場 (IMF) の平均強度約50 nT
3. IMF中での宇宙線陽子の磁気旋回半径は、0.1~1 天文単位
4. 観測領域は地球を中心とした0.1~1 天文単位の全方位

➡ 宇宙線を用いた宇宙天気観測 ➡ 惑星間空間磁場の解明

核融合研究にて飛躍的に発達した複雑磁場研究成果を活用 → 創発的発展

# 学際的展開

- ミュオン触媒核融合( $\mu$ CF)
- 核融合の意義
- 核融合科学の基盤強化

ミュオンの持つ特異な性質：

1. 量子的性質
2. 強い結合力
3. 高い透過力



共通焦点

## 核融合科学

## ミュオンを用いた 多彩な分野への拡がり

● 焦点

- エキゾチック原子分子科学
- 新しい分光学
- 災害予知・宇宙天気

# 独自性・優位性など

国際的に極めて優位な位置にある：

- 理論：「少数多体量子理論・原子分子データベース」
- 実験：「超伝導検出器を用いたビーム実験研究・宇宙線ミュオン研究」
- 工学：「イオン源 (NBI)・レーザー加速研究」

を最大限に活かし、新規領域を開拓する。



近年、IF $\mu$ CF という新過程の可能性が拓かれ気運が高まってきた。

「原子分子研究」と「 $\mu$ CF 研究」を、NIFSユニットにおいて同時に進めることでシナジー効果が得られ、新しい $\mu$ CF過程をはじめとする、  
 「核融合研究を豊かにする」革新的な研究を世界に先駆けて展開する。