

第12回ユニット構築会議 (核融合研究所)

2021年6月28日(月)

ミュオンの応用

— ミュオン科学と核融合科学の融合 —

中部大学

岡田 信二

ミュオン

ミュオンは、電子と似た性質を持ち電子の**約200倍の質量**を有する
(静止状態で約2マイクロ秒の寿命)

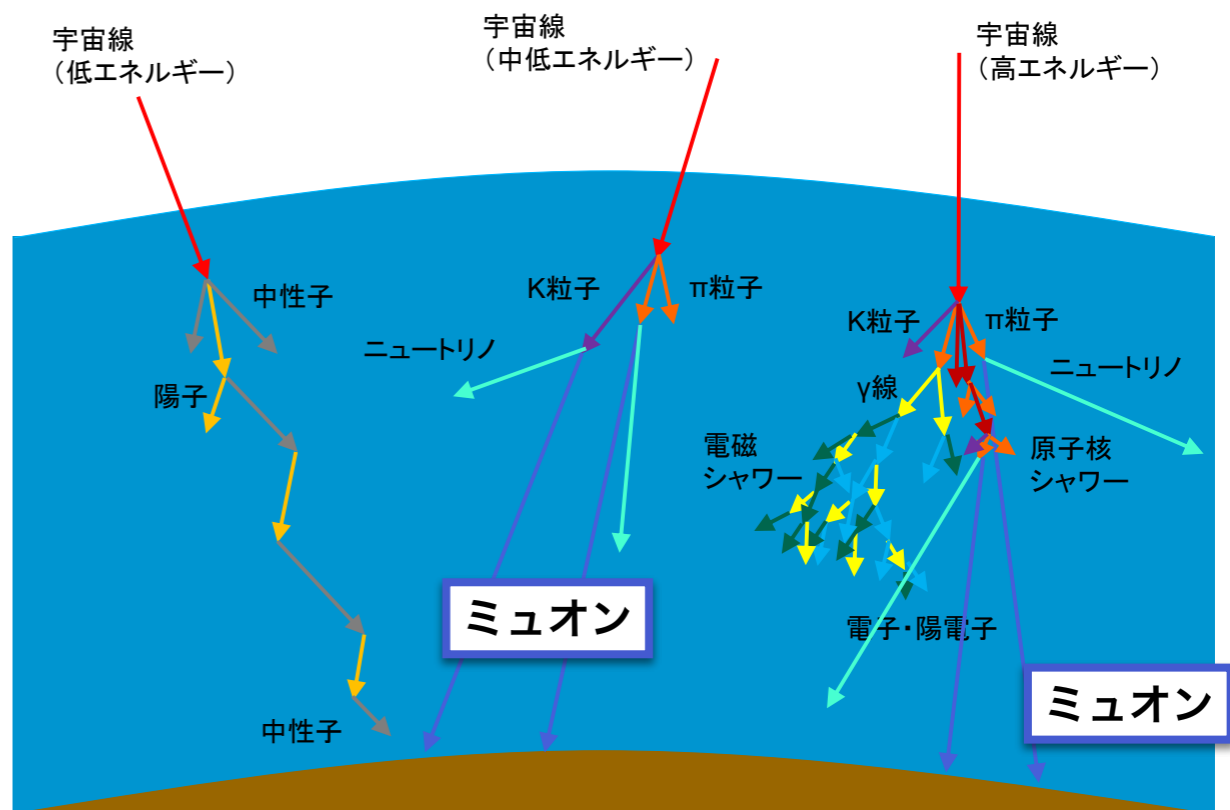
1. 人工生成が可能

粒子加速器により
大強度のミュオン生成が可能



加速器

2. 上空から常に降り注いでいる



高い透過力があり地表まで届く

宇宙線

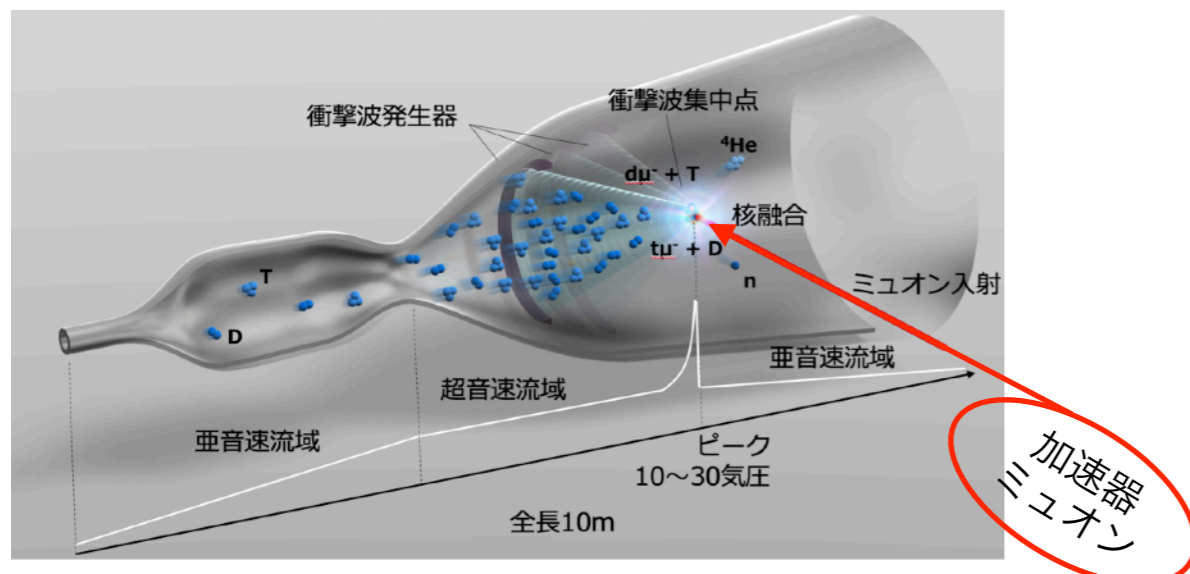
ミュオンの応用

① 量子的性質

人工生成したミュオンを利用

エネルギー

- 中性子利用・応用
 - ➔ 長寿命核分裂生成物の短半減期化
- ゼロエミッションエネルギー源
- 需要が急増しているヘリウム生産



クリーン・コンパクト循環型
新ミュオン触媒核融合炉

加速器
技術

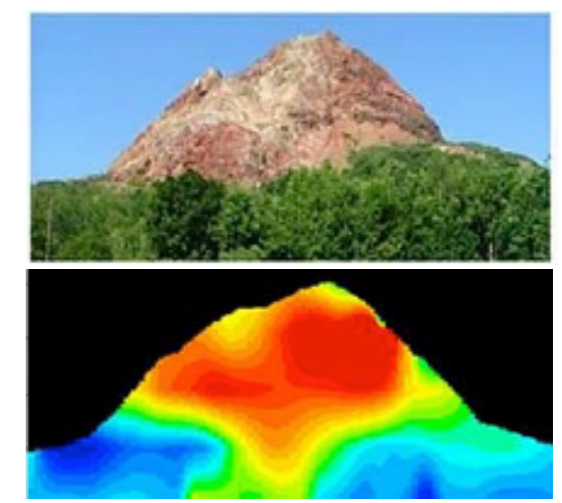
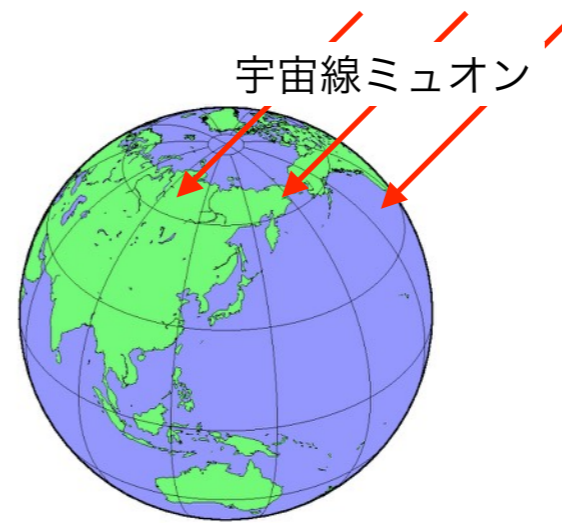
② 高い透過力

宇宙から降り注ぐミュオンを利用

防災減災

地球全体の
宇宙天気予報

大規模構造物
(地殻,火山)の透視



Tanaka et al. (2007)

小型ミュオン源の産業応用

⇒ さらなる応用へ

宇宙天気観測
地殻変動の監視

研究テーマの提案

NIFSと共に取り組むことにより新たな展開を期待

ミュオンの応用



② ミュオン触媒核融合

① エキゾチックな原子・分子分光科学

③ 宇宙線ミュオン応用

メンバー

NIFSにおける窓口： 加藤太治先生

本テーマに関して、現在、
ユニット構築会議に登録しているメンバー：

- 岡田信二（中部大）： μ CF*実験、エキゾチック原子分子
- 佐藤元泰（中部大）： μ CFシステム開発
- 大嶋晃敏（中部大）：宇宙線ミュオンによる宇宙天気観測
- 木野康志（東北大）： μ CF理論、エキゾチック原子分子
- 山下琢磨（東北大）： μ CF理論、エキゾチック原子分子
- 有川安信（阪大）：レーザー粒子加速（ミュオン源）

* μ CF = Muon catalyzed fusion (ミュオン触媒核融合)

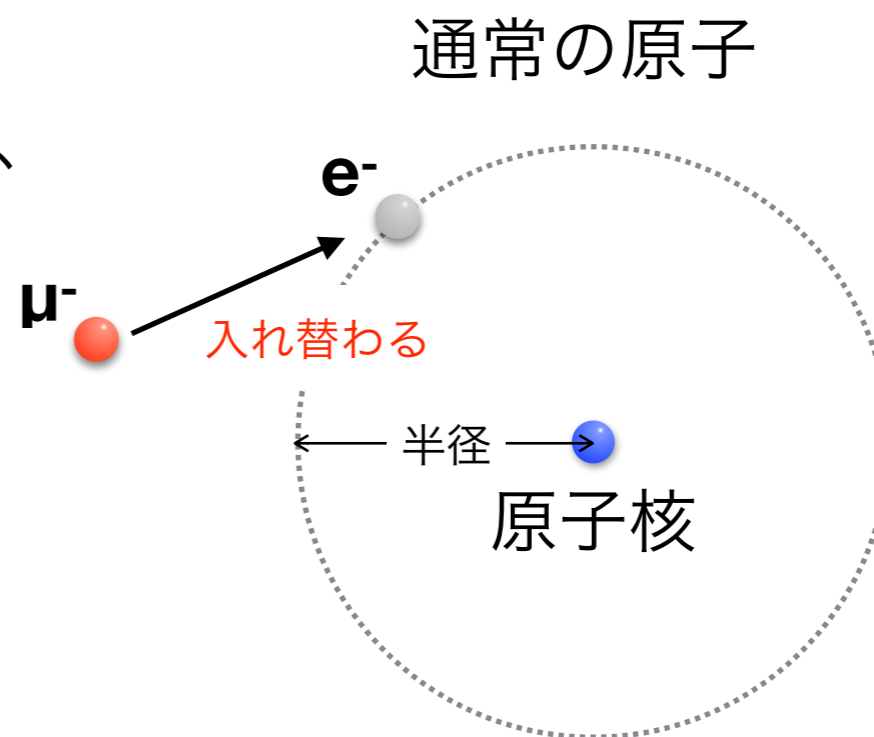
① エキゾチック原子・分子分光科学

エキゾチック原子：「原子」を構成する原子核や電子を
他の荷電粒子で置き換えたクーロン束縛系

→ 近年、高分解能X線検出器により大きく進展

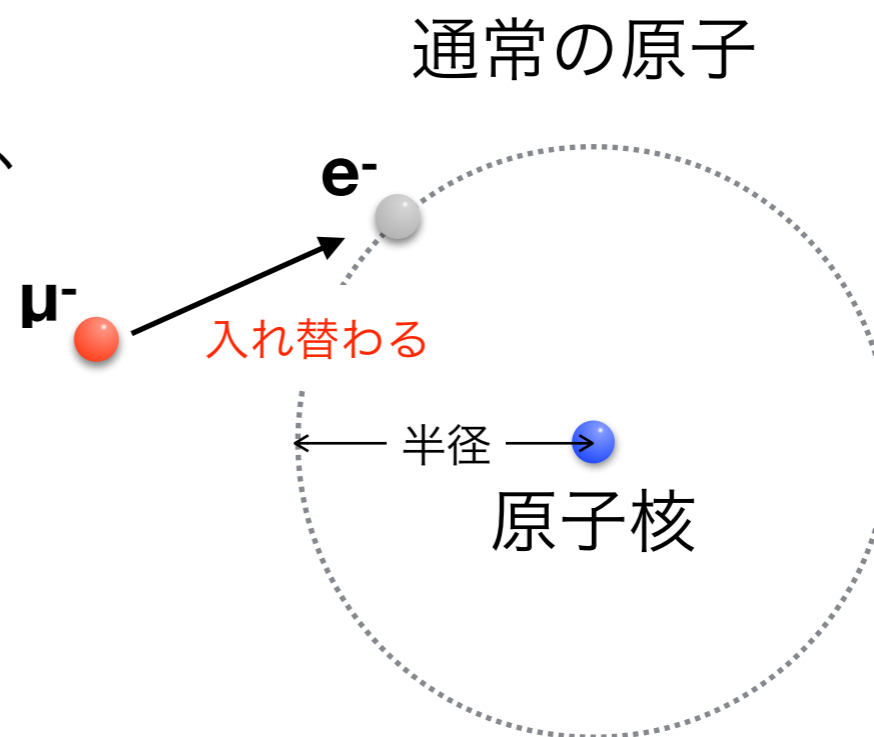
ミュオン原子

- ① 負電荷のミュオンは物質に静止させると、電子と置き換わり **ミュオン原子** を生成



ミュオン原子

- ① 負電荷のミュオンは物質に静止させると、電子と置き換わり **ミュオン原子** を生成



- ② ミュオンは、電子の **約200倍の質量** をもつため、生成初期は高励起状態

e^- にとっては $n=1$ 軌道でも
 μ^- にとっては $n \sim 14$ の高励起状態

$$\text{主量子数 } n \sim \sqrt{\frac{m_{\mu}^*}{m_e^*} n'} \sim \sqrt{\frac{95}{0.51}} 1 \sim 14 \quad (\mu\text{Hの場合})$$

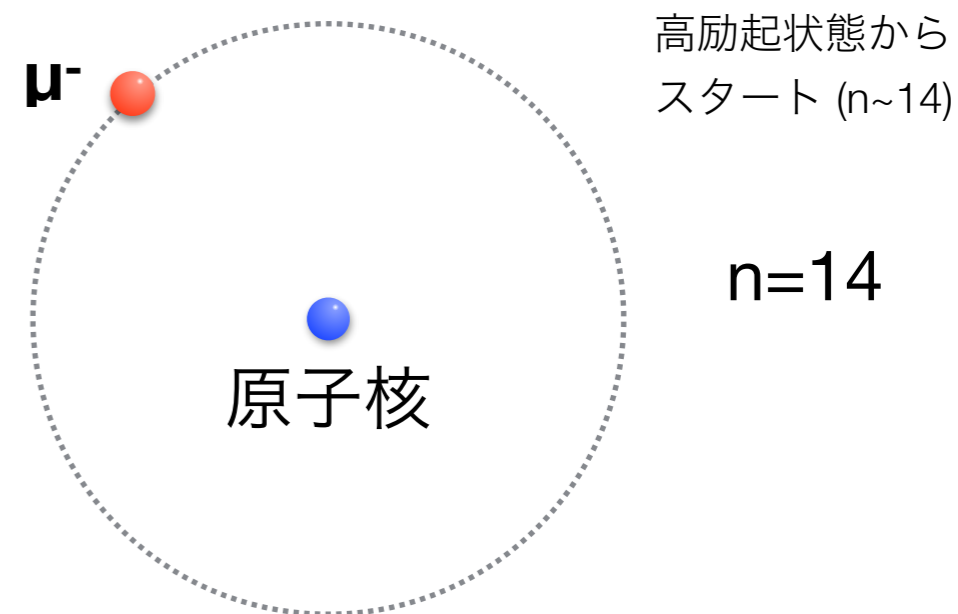
ミュオン原子

① 負電荷のミュオンは物質に静止させると、電子と置き換わり **ミュオン原子** を生成

② ミュオンは、電子の **約200倍の質量** をもつため、生成初期は高励起状態

e-にとっては n=1 軌道でも
μ-にとっては n~14 の高励起状態

$$\text{主量子数 } n \sim \sqrt{\frac{m_{\mu}^*}{m_e^*} n'} \sim \sqrt{\frac{95}{0.51}} 1 \sim 14 \quad (\mu\text{Hの場合})$$



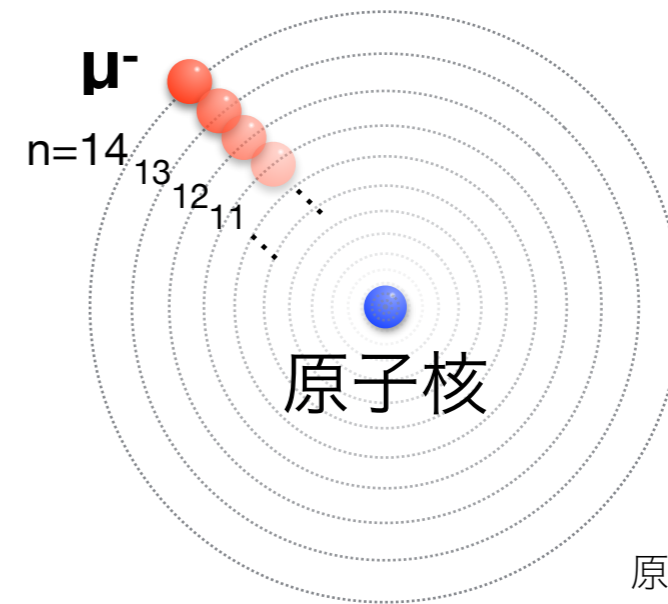
ミュオン原子

① 負電荷のミュオンは物質に静止させると、電子と置き換わり **ミュオン原子** を生成

② ミュオンは、電子の **約200倍の質量** をもつため、生成初期は高励起状態

e-にとっては n=1 軌道でも
μ-にとっては n~14 の高励起状態

$$\text{主量子数 } n \sim \sqrt{\frac{m_{\mu}^*}{m_e^*} n'} \sim \sqrt{\frac{95}{0.51}} 1 \sim 14 \quad (\mu\text{Hの場合})$$



高励起状態から
スタート (n~14)



基底状態 n=1

n=1における
原子半径同士の比較すると

ミュオン原子

① 負電荷のミュオンは物質に静止させると、電子と置き換わり**ミュオン原子**を生成

② ミュオンは、電子の**約200倍の質量**をもつため、生成初期は高励起状態

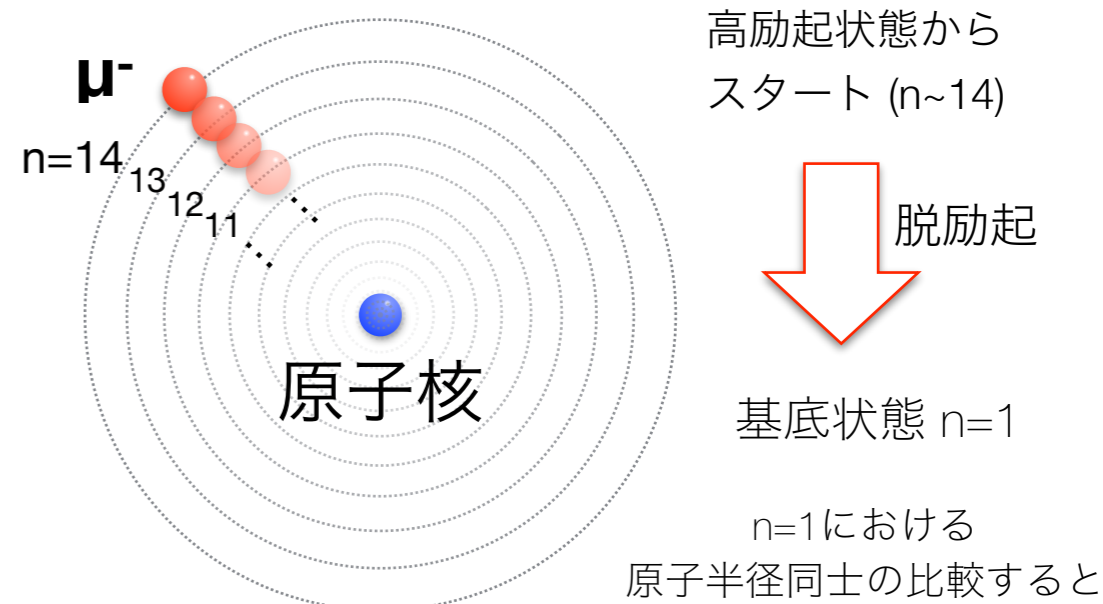
e-にとっては n=1 軌道でも
μ-にとっては n~14 の高励起状態

$$\text{主量子数 } n \sim \sqrt{\frac{m_{\mu}^*}{m_e} n'} \sim \sqrt{\frac{95}{0.51}} 1 \sim 14 \quad (\mu\text{Hの場合})$$

③ 電子より200倍重い為、通常の原子と比べると半径 1/200 の**非常にコンパクトな原子**を形成

ミュオン水素原子は**全体で電荷ゼロ**で、**原子半径が小さく**他の原子核に接近可能

⇒ **核融合**



縮尺

ミュオン水素

μH



全体で電荷ゼロ

μ: 電荷-1

p: 電荷+1

通常の水素

H

Hot topic : ミュオン原子分光

De-excitation dynamics of muonic atoms revealed by high precision spectroscopy of electronic K x rays

T. Okumura,^{1,*} T. Azuma,^{1,†} D. A. Bennett,² P. Caradonna,³ I. Chiu,⁴ W. B. Doriese,² M. S. Durkin,² J. W. Fowler,² J. D. Gard,² T. Hashimoto,⁵ R. Hayakawa,⁶ G. C. Hilton,² Y. Ichinohe,⁷ P. Indelicato,⁸ T. Isobe,⁹ S. Kanda,¹⁰ D. Kato,¹¹ M. Katsuragawa,³ N. Kawamura,¹⁰ Y. Kino,¹² M. K. Kubo,¹³ K. Mine,³ Y. Miyake,¹⁰ K. M. Morgan,² K. Nimomiya,⁴ H. Noda,¹⁴ G. C. O'Neil,² S. Okada,^{1,‡} K. Okutsu,¹² T. Osawa,¹⁵ N. Paul,⁸ C. D. Reintsema,² D. R. Schmidt,² K. Shimomura,¹⁰ P. Strasser,¹⁰ H. Suda,⁶ D. S. Swetz,² T. Takahashi,³ S. Takeda,³ S. Takeshita,¹⁰ M. Tampo,¹⁰ H. Tatsuno,⁶ X. M. Tong,¹⁶ Y. Ueno,¹ J. N. Ullom,² S. Watanabe,¹⁷ and S. Yamada⁷

¹Atomic, Molecular and Optical Physics Laboratory, RIKEN, Wako 351-0198, Japan

²National Institute of Standards and Technology, Boulder, CO 80505, USA

³Kaoh IPMU (WPI), The University of Tokyo, Kashiwa, Chiba 277-8583, Japan

⁴Department of Chemistry, Osaka University, Toyonaka, Osaka 560-0043, Japan

⁵Advanced Science Research Center (ASRC), Japan Atomic Energy Agency (JAEA), Tokai 319-1184, Japan

⁶Department of Physics, Tokyo Metropolitan University, Tokyo 192-0397, Japan

⁷Department of Physics, Rikkyo University, Tokyo 171-8501, Japan

⁸Laboratoire Kastler Brassel, Sorbonne Université, CNRS, ENS-PSL Research University,

Collège de France, Case 74, 4, place Jussieu, 75005 Paris, France

⁹RIKEN Nishina Center, RIKEN, Wako 351-0198, Japan

¹⁰High Energy Accelerator Research Organization (KEK), Tsukuba, Ibaraki 305-0801, Japan

¹¹National Institute for Fusion Science (NIFS), Toki, Gifu 509-5292, Japan

¹²Department of Chemistry, Tohoku University, Sendai, Miyagi 980-8578, Japan

¹³Department of Natural Sciences, College of Liberal Arts,

International Christian University, Mitaka, Tokyo 181-8585, Japan

¹⁴Department of Earth and Space Science, Osaka University, Toyonaka, Osaka 560-0043, Japan

¹⁵Materials Sciences Research Center (MSRC), Japan Atomic Energy Agency (JAEA), Tokai 319-1184, Japan

¹⁶Center for Computational Sciences, University of Tsukuba, Tsukuba, Ibaraki 305-8573, Japan

¹⁷Department of Space Astronomy and Astrophysics,

Institute of Space and Astronautical Science (ISAS),

Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), Sagamihara, Kanagawa 252-5210, Japan

NIFS

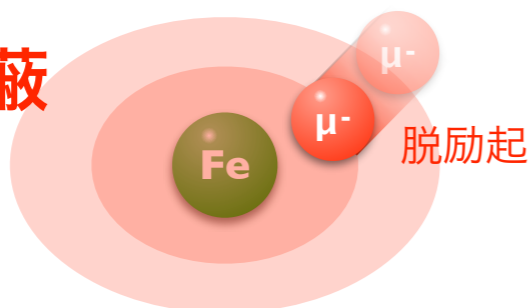
→ **PRL受理** (6月12日)
as Editor's suggestion

X線の精密分光

ミュオン原子(μ^- -Fe)

電子の軌道

遮蔽



ミュオンの軌道

周期表

23 V バナジウム Vanadium 50.9415	24 Cr クロム Chromium 51.9961	25 Mn マンガン Manganese 54.938	26 Fe 鉄 Iron 55.845	27 Co コバルト Cobalt 58.9332	28 Ni ニッケル Nickel 58.6934
41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd

- ✓ **Feの電荷 (+26)** は μ^- (-1)によって遮蔽
- ✓ 電子にとっては、原子番号25の**Mn**にみえる
- ✓ μ 原子の脱励起中にみると**遮蔽具合が変化**
- ✓ 電子のX線エネルギーを精密分光して**ミュオンの原子形成過程の全貌を捉えた**

μFe 原子：精密分光実験結果

超伝導転移端マイクロカロリメータ

Transition Edge Sensor = TES

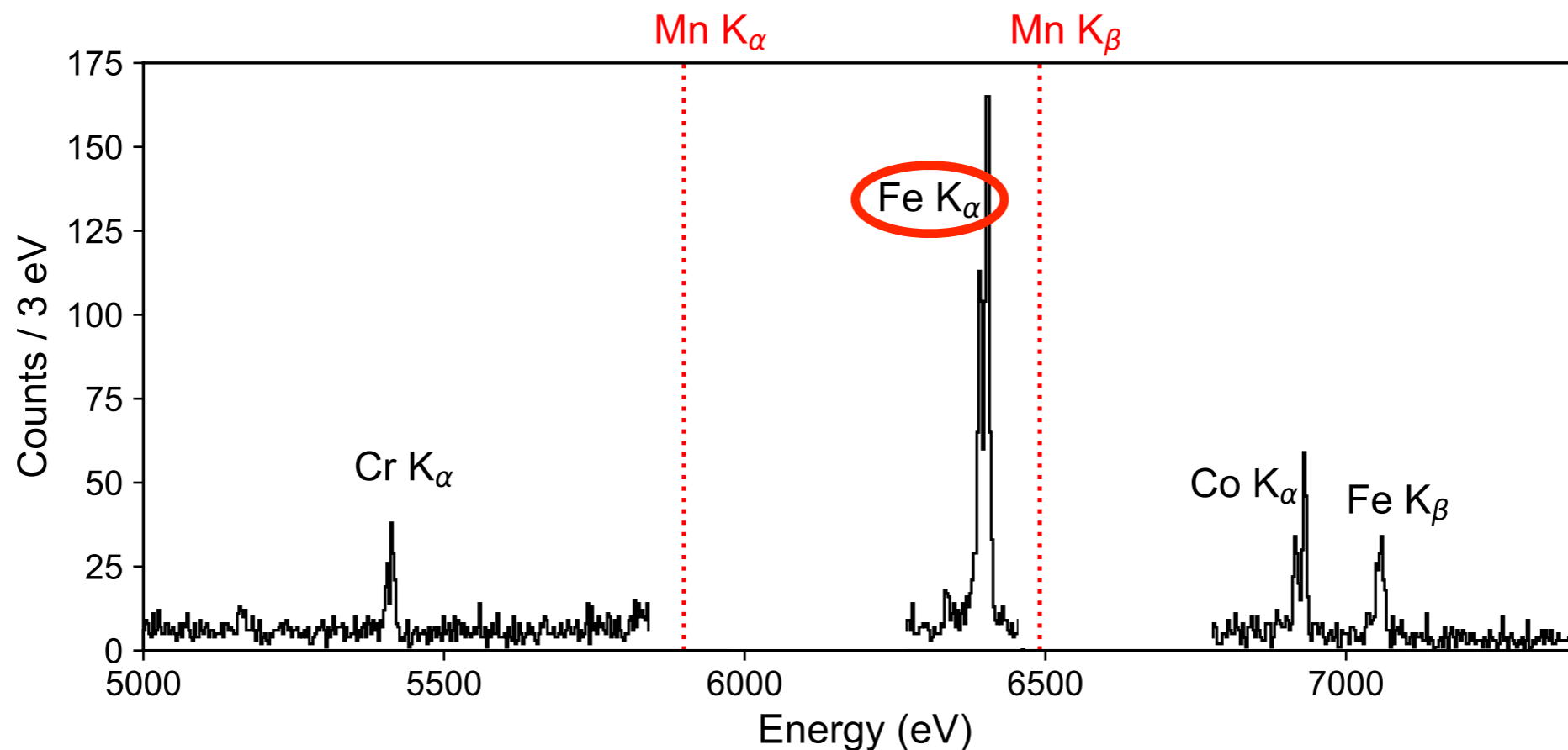
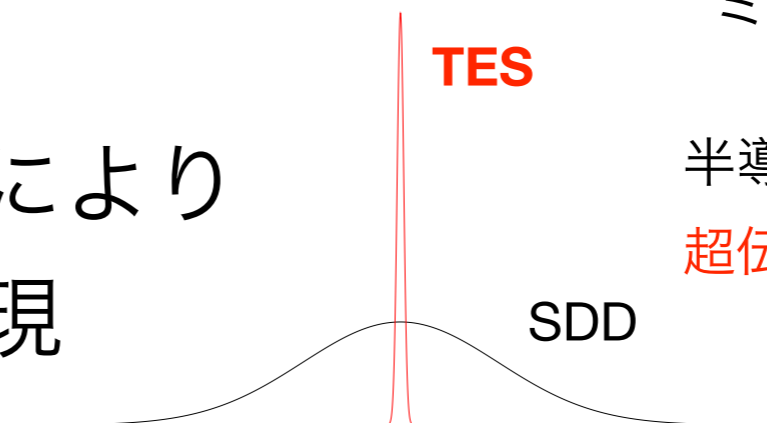
ミュオンビーム実験 @ J-PARC

半導体検出器(SDD) : $\Delta E \sim 150 \text{ eV}$

超伝導検出器(TES) : $\Delta E \sim 5 \text{ eV}$

(30倍優れた分解能)

超伝導検出器により
高分解能を実現



μFe 原子：精密分光実験結果

超伝導転移端マイクロカロリメータ

Transition Edge Sensor = TES

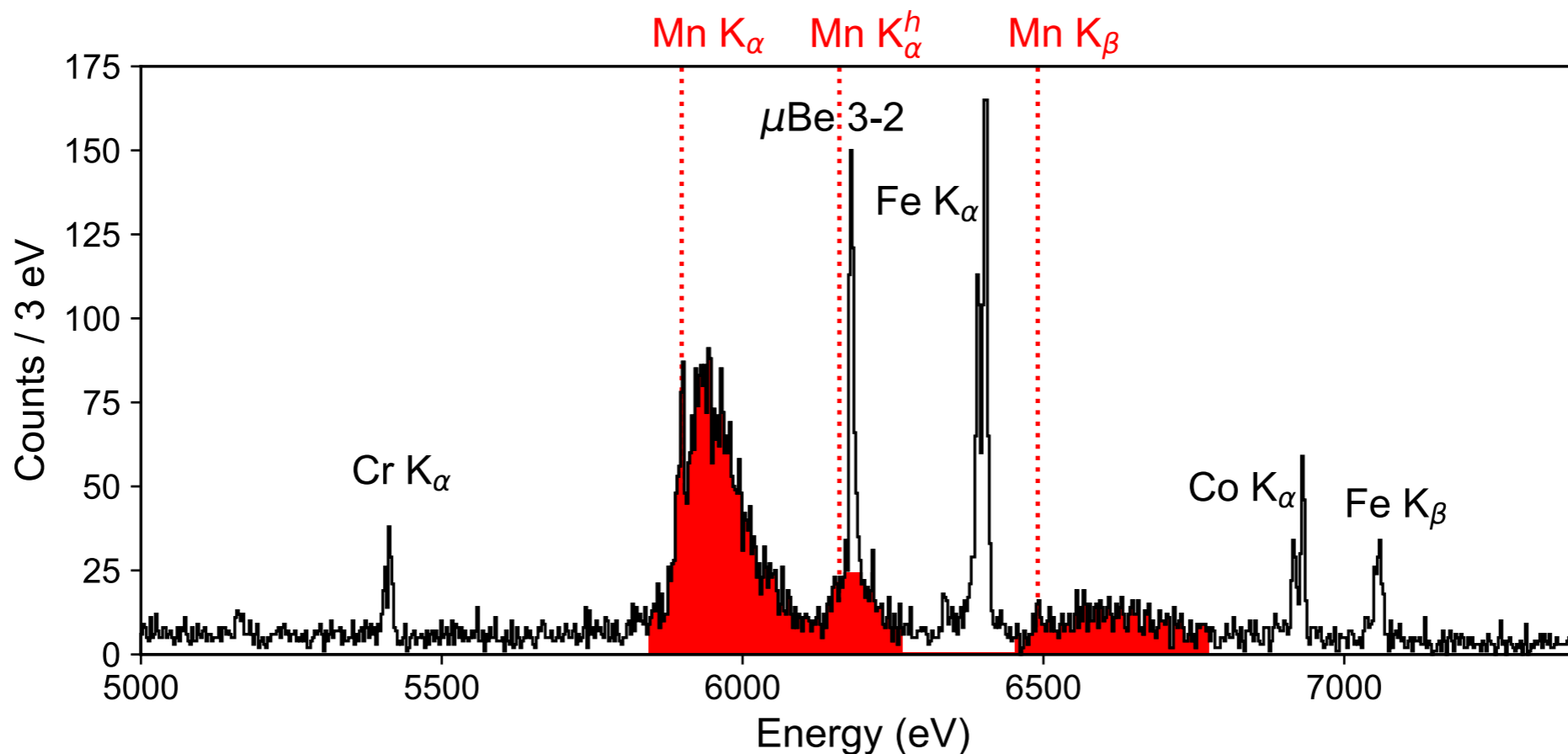
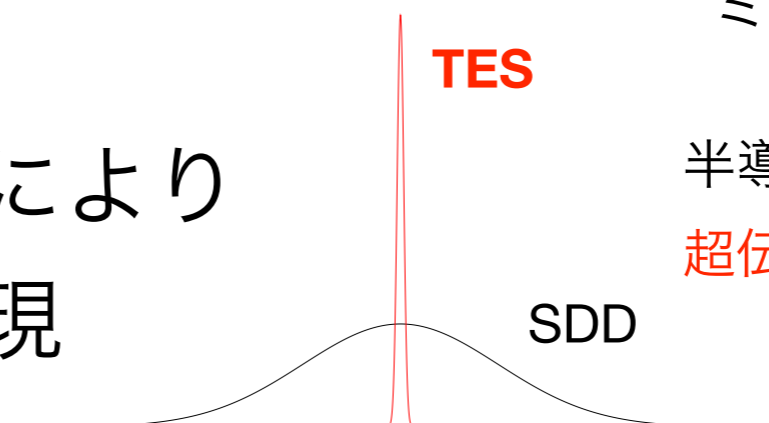
ミュオンビーム実験 @ J-PARC

半導体検出器(SDD) : $\Delta E \sim 150 \text{ eV}$

超伝導検出器(TES) : $\Delta E \sim 5 \text{ eV}$

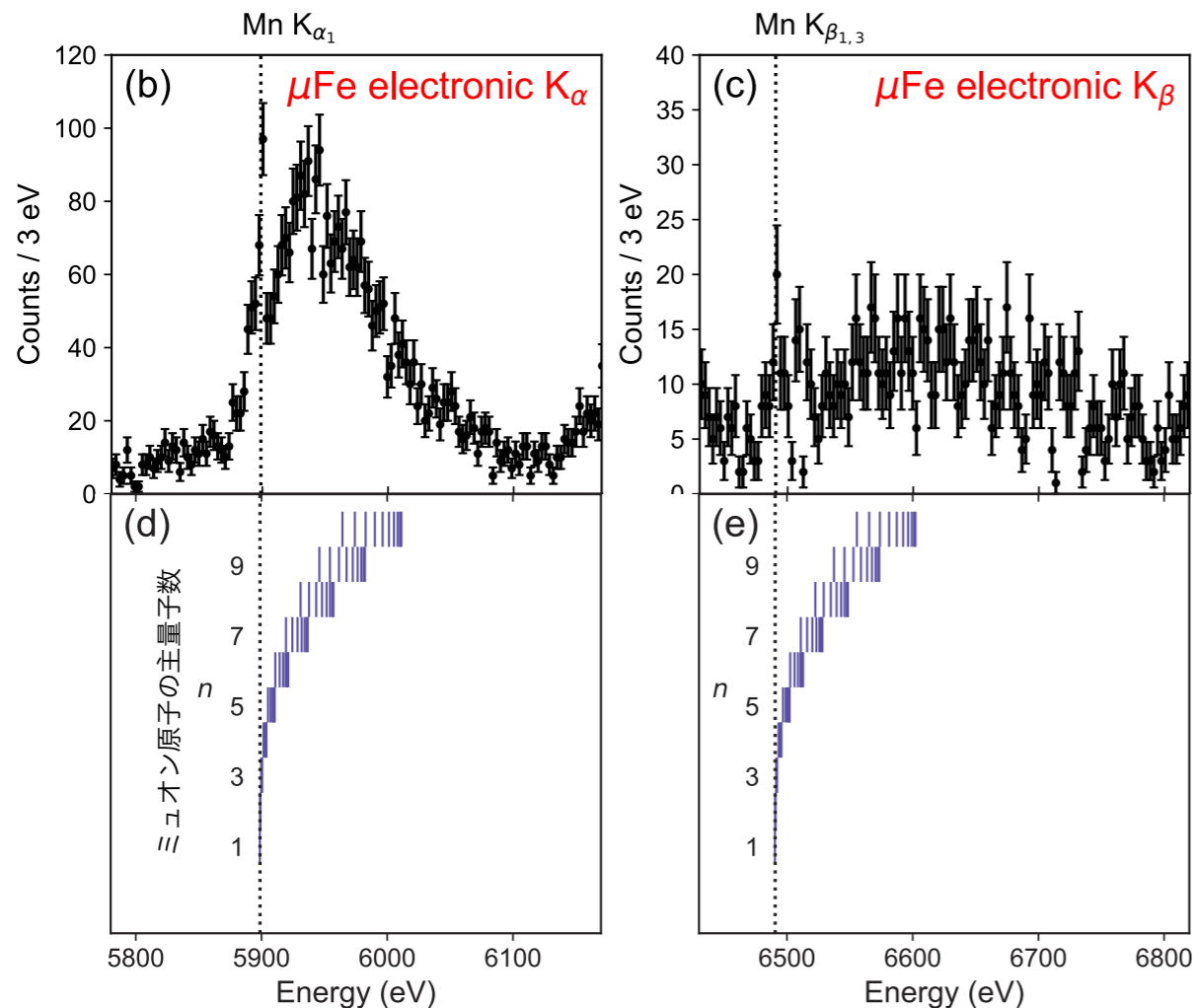
(30倍優れた分解能)

超伝導検出器により
高分解能を実現



Mn K α , K β の位置から高エネルギー側に広がる
ブロードな構造を観測

理論計算との比較



1. ミュオンによる遮蔽効果
($\mu\text{-Fe}$ の主量子数の違い)

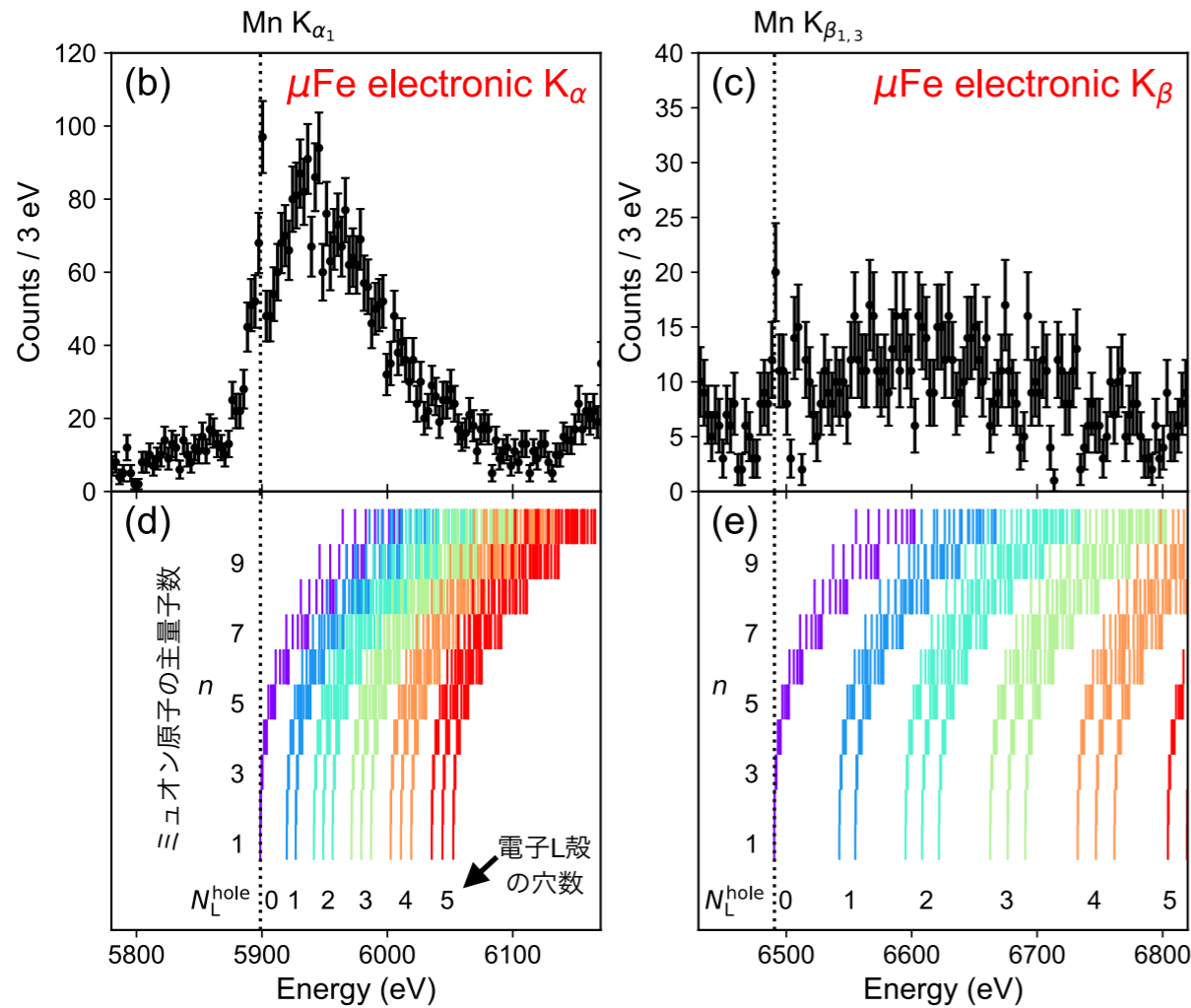
2.

に依存してエネルギーが変化

理論計算コラボレーション

- 加藤太治 (核融合研)
- X. M. Tong (筑波大)
- P. Indelicato (ソルボンヌ大)

理論計算との比較

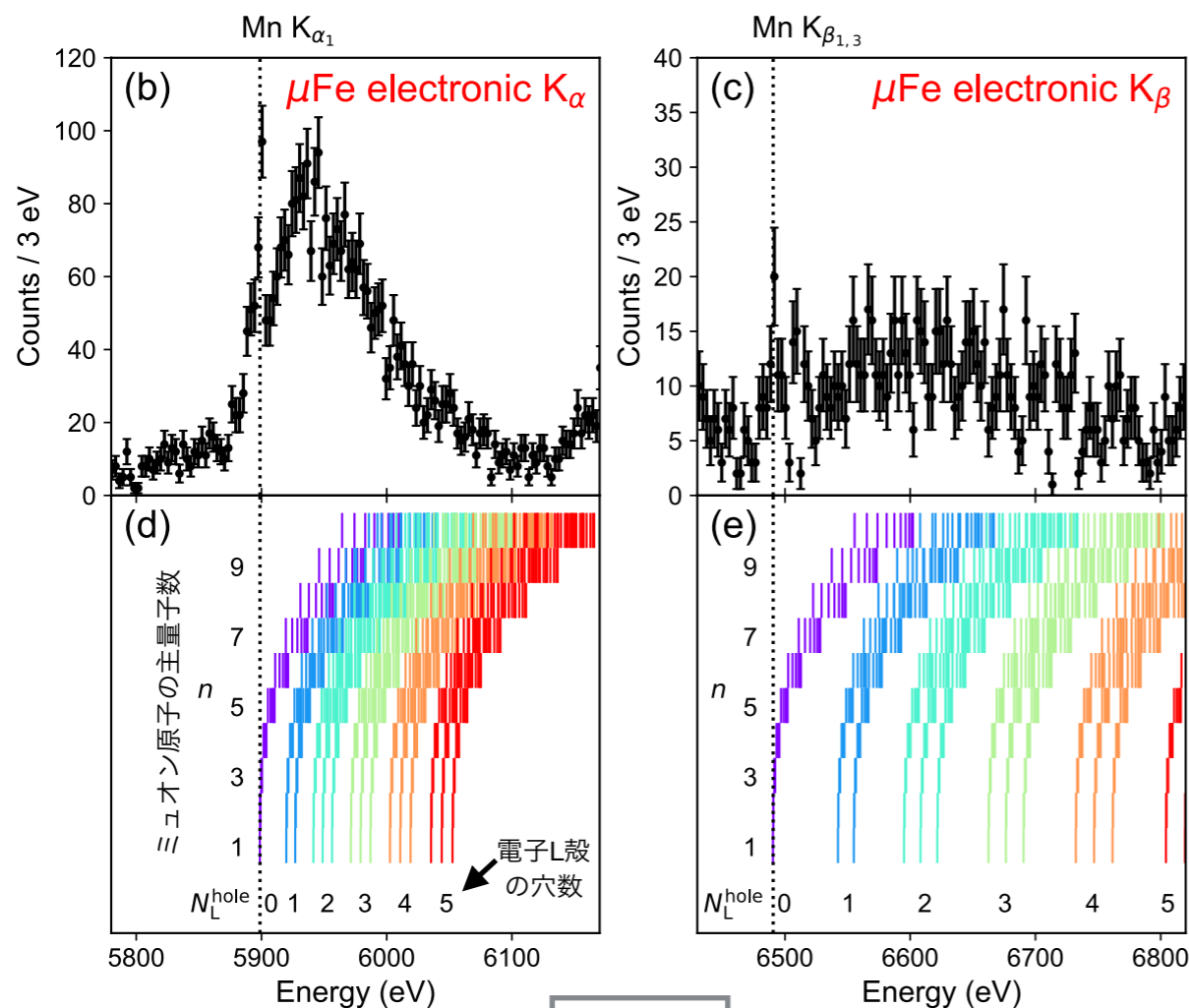


1. ミュオンによる遮蔽効果
($\mu\text{-Fe}$ の主量子数の違い)
 2. 電子のconfiguration
(L殻の穴の数)
- に依存してエネルギーが変化

理論計算コラボレーション

- 加藤太治 (核融合研)
- X. M. Tong (筑波大)
- P. Indelicato (ソルボンヌ大)

理論計算との比較

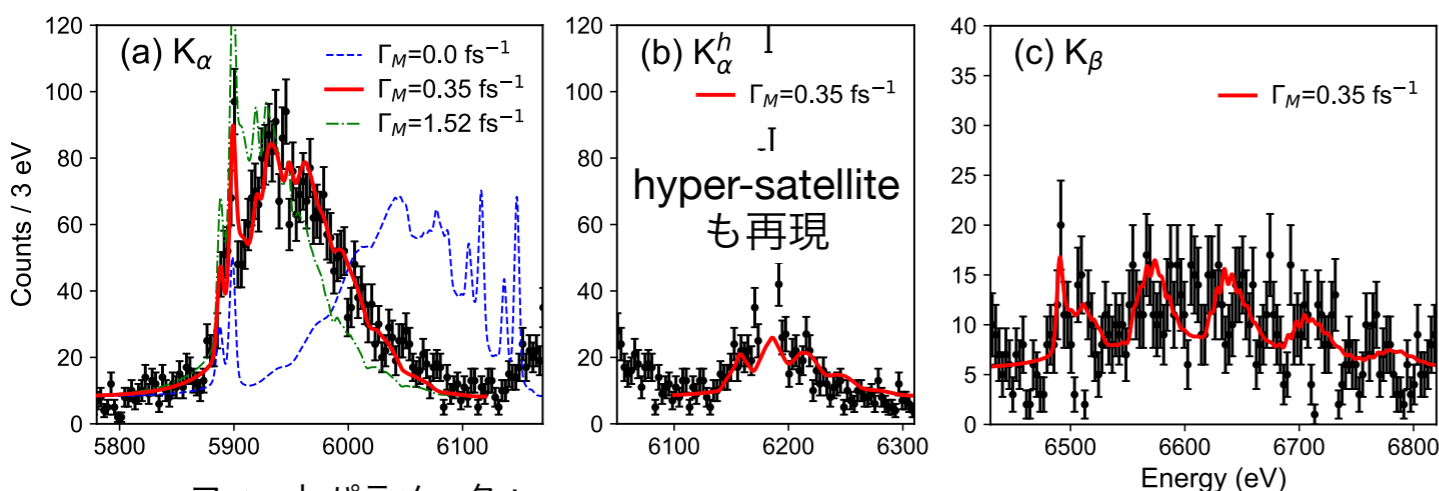


1. ミュオンによる遮蔽効果
($\mu\text{-Fe}$ の主量子数の違い)
 2. 電子のconfiguration
(L殻の穴の数)
- に依存してエネルギーが変化

⇒ カスケード計算
スペクトルを再現

理論計算コラボレーション

- 加藤太治 (核融合研)
- X. M. Tong (筑波大)
- P. Indelicato (ソルボンヌ大)



フィットパラメータ：
金属バンドからの電子のM殻へのside-feedingの速さ Γ_M

超伝導転移端 (TES) マイクロカロリメータ

Transition Edge Sensor = **TES**

X線が吸収体で吸収された時の微量な温度上昇を
高感度温度計TESで測定し、
X線エネルギーを高精度で測定する熱量計

現状のTES検出器： < 15 keV 用



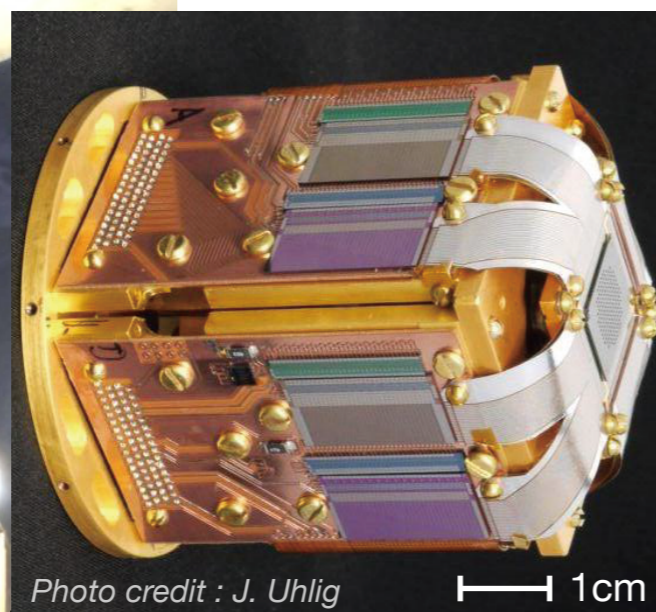
現在制作中 @ NIST

TES検出器： < 50 keV 用

TES検出器： < 130 keV 用

γ線領域まで拡張

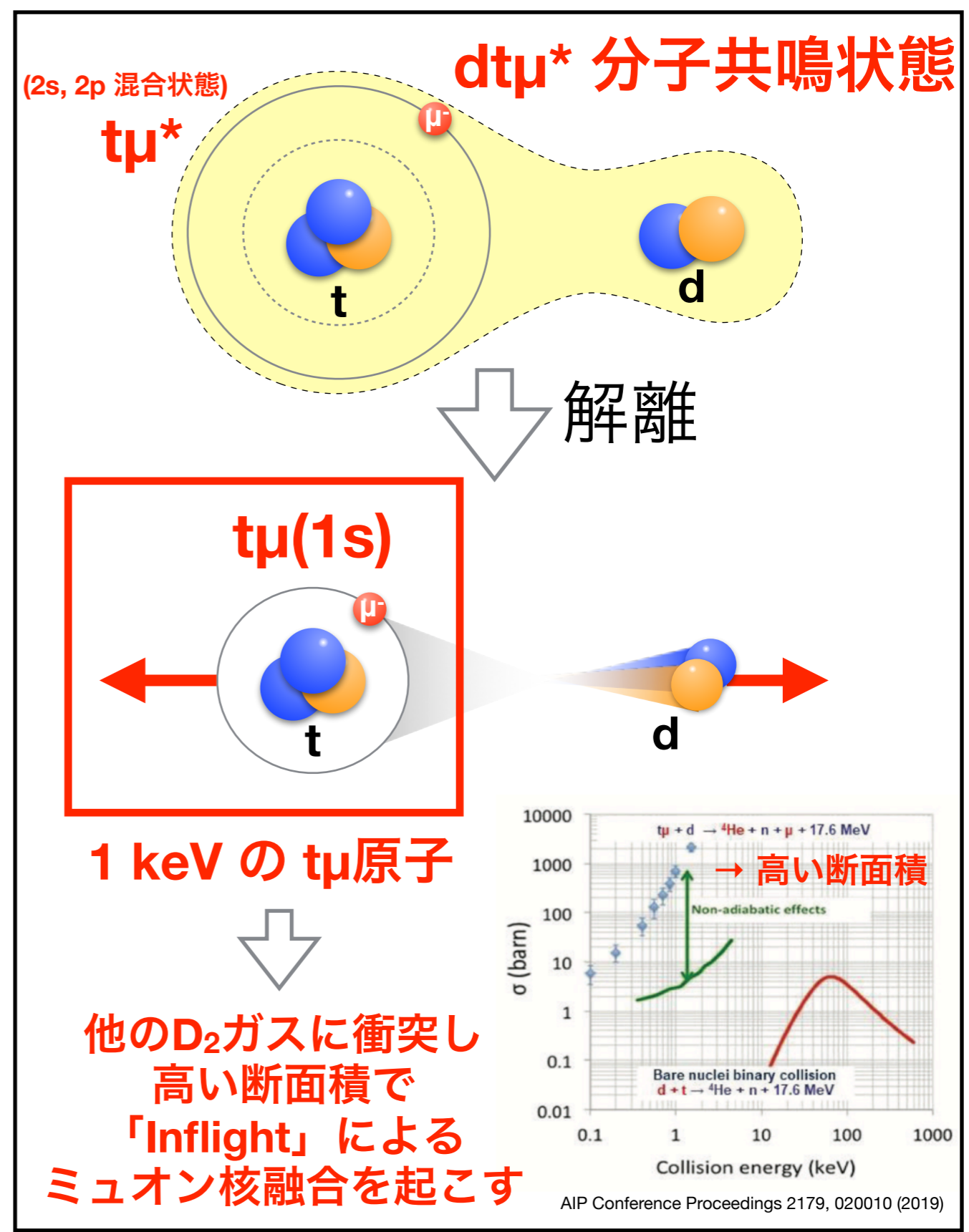
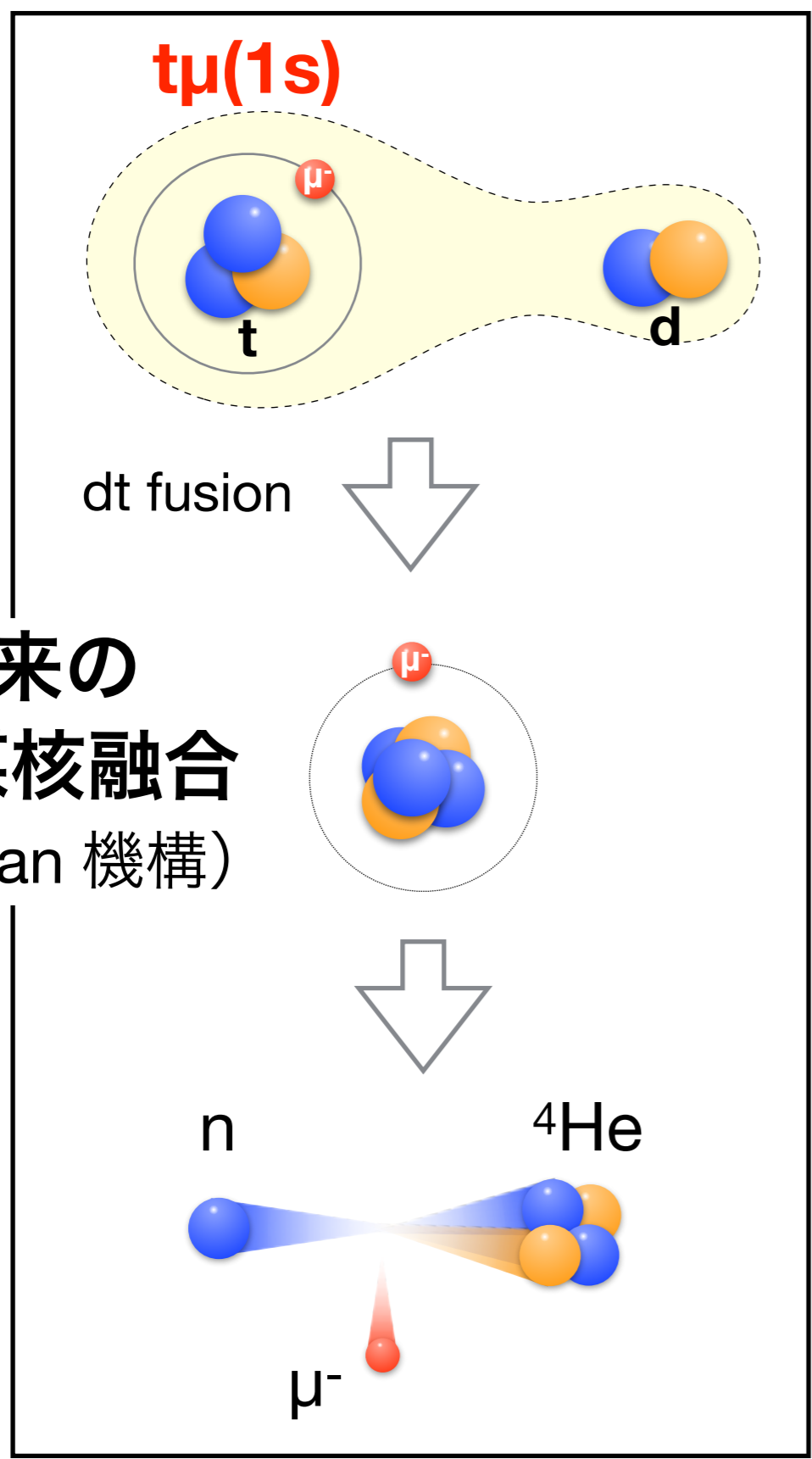
(ミュオン原子分光の他にも、
多価イオン高精度分光実験への応用等も)



② ミュオン触媒核融合

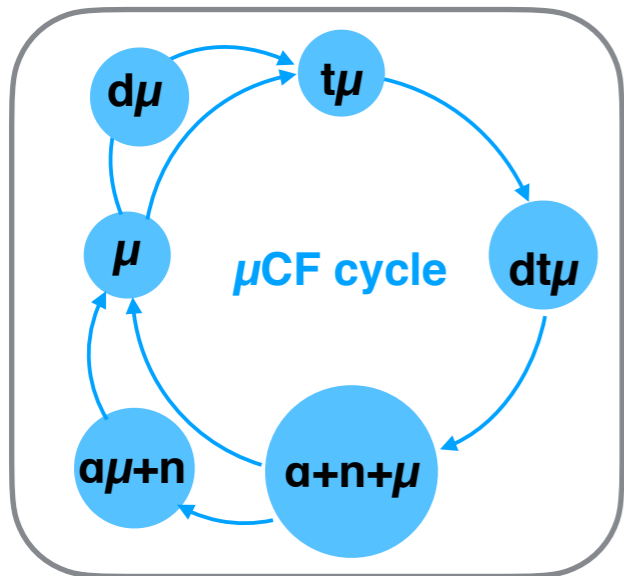
- ◎ 1980 - 2000年：実験・理論共に大きな進展
- ◎ 2015年頃から、東北大 木野らにより再検討が始まる
- ◎ 先進理論により、素過程の理解に大きな進展
- ◎ 現在：理論・実験、工学的見地からも精力的に研究を進めている

ミュオン触媒核融合の素過程

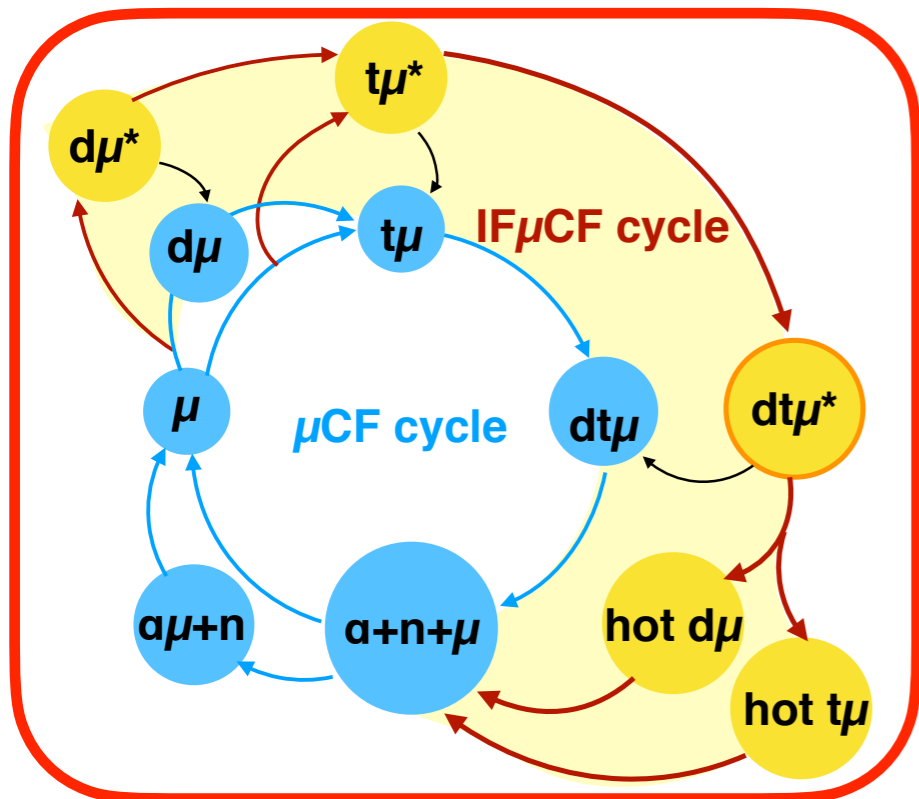


素過程に関する理解の進展

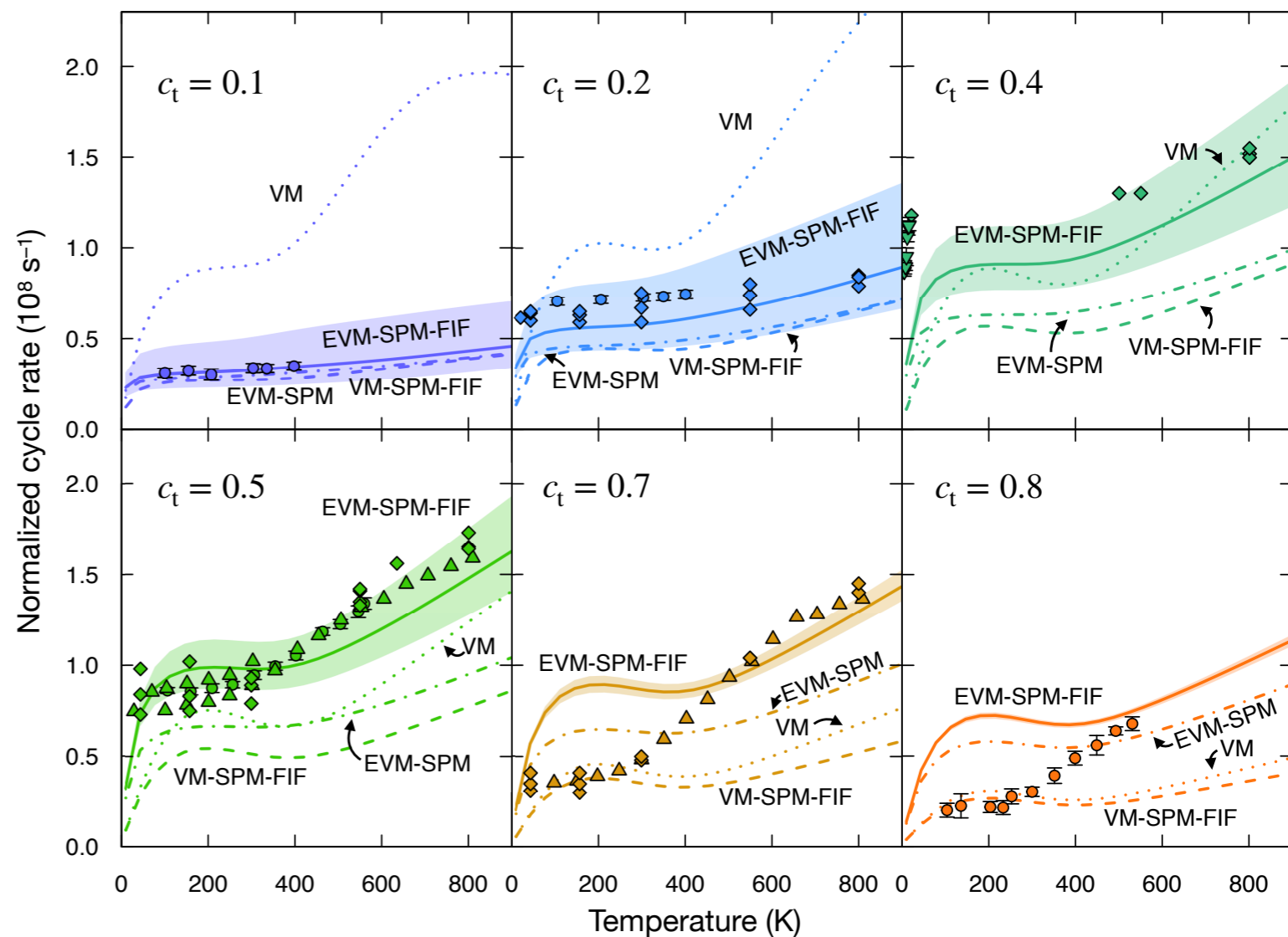
従来の μ CFサイクル



新しい μ CFサイクル



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



従来の μ 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！

論文投稿済 (東北大: 山下・木野 他)

最近の進展・提案

①

素過程に関する理解の進展 (μCF理論)

先進理論により正確で大きな反応断面積を理論的に検証

木野・山下 (東北大) 他

②

ミュオン核融合炉の提案

定常循環型μCF標的
既存技術で開発可能レベル

佐藤 (中部大) 他

③

先進ミュオン源の提案

従来の方法とは全く異なる、
μCFの為の低速ミュオン生成法

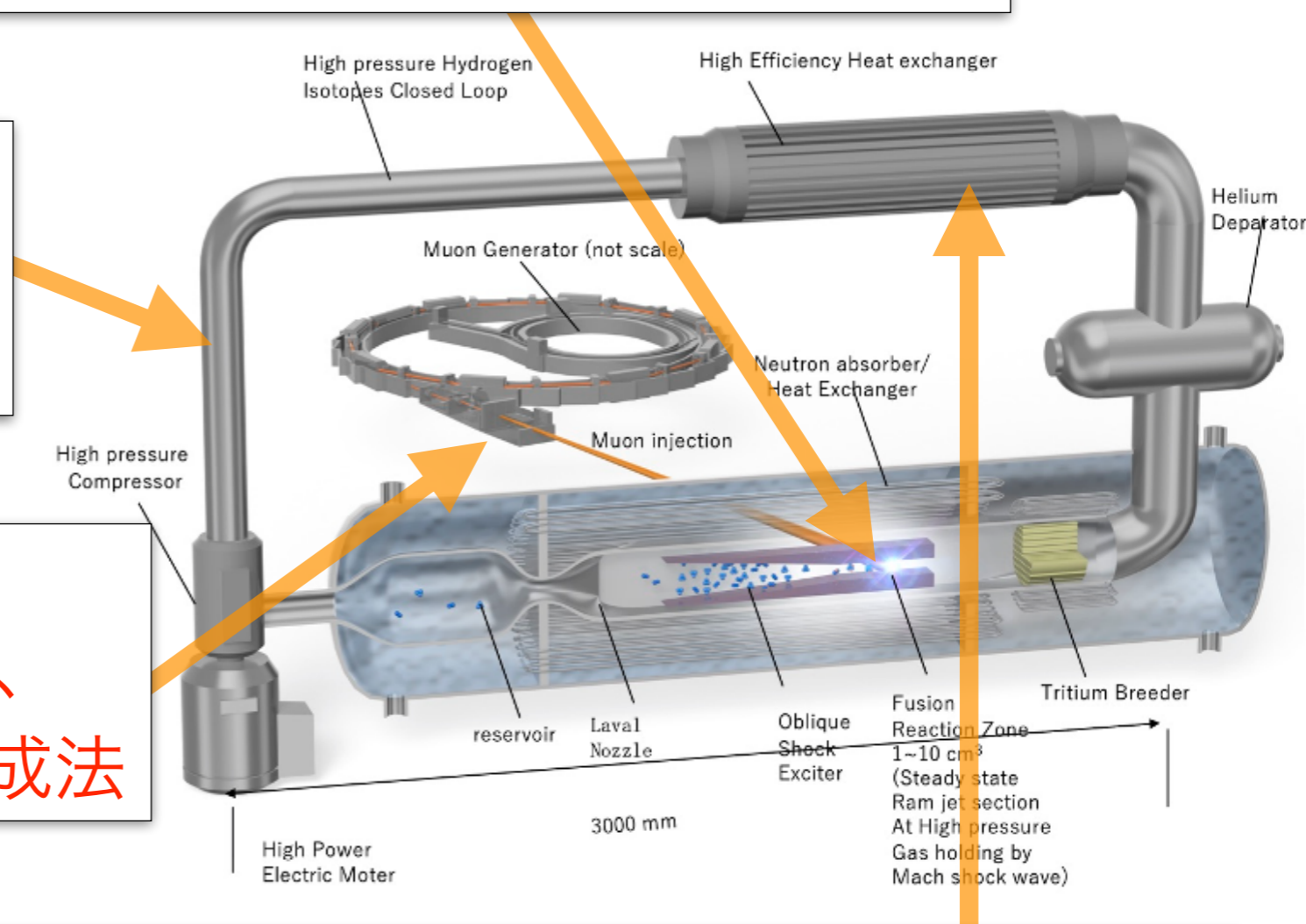
岡田 (中部大)、有川 (阪大) 他

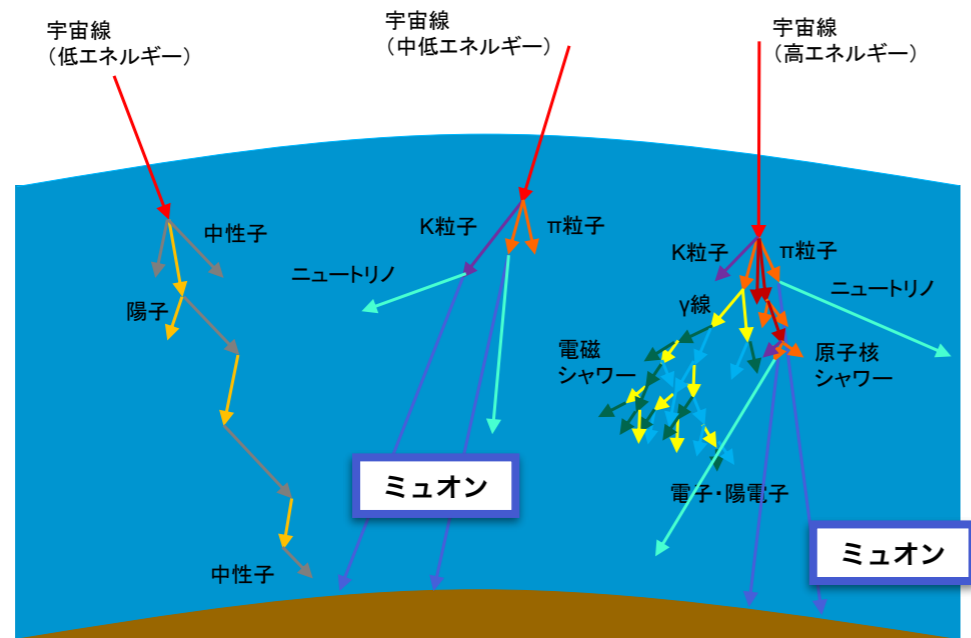
④

新規高効率エネルギー交換法の提案

温度差の小さな熱源にも有効な高効率集電。μCFから放出される
「アルファ粒子」からのエネルギー回収 (温度差~200°C)

佐藤 (中部大) 他





加速器ではなく

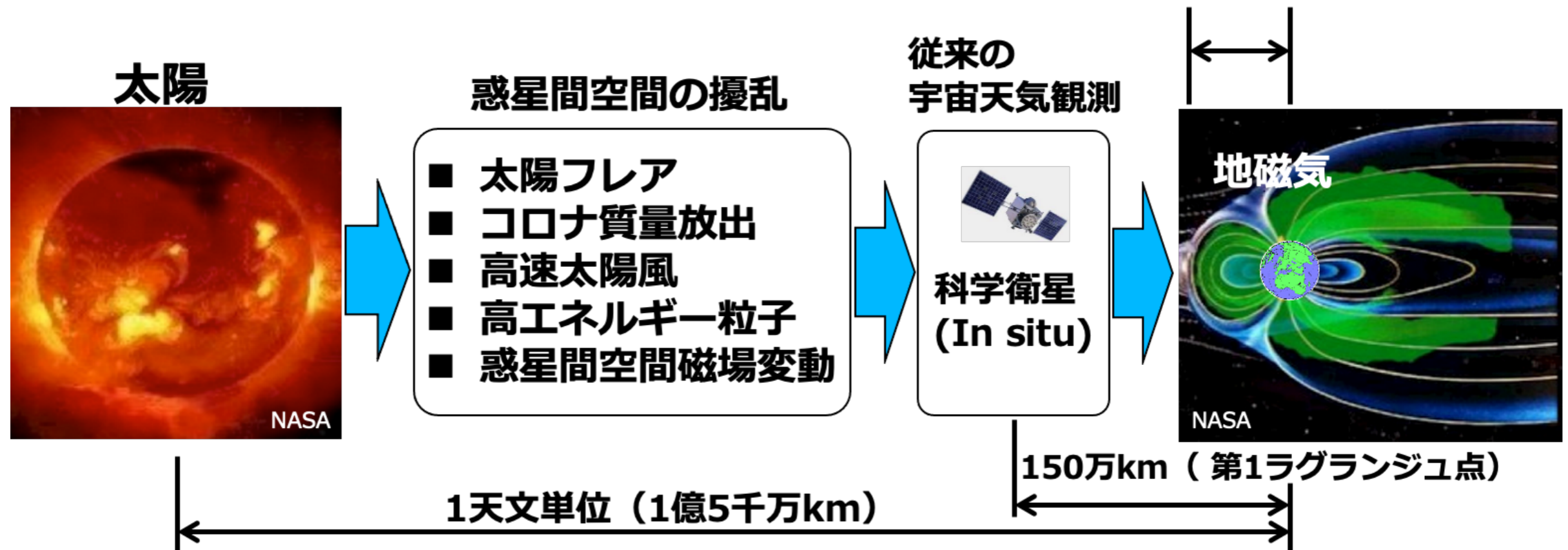
「高エネルギー宇宙線 (陽子)」起因の
地上まで透過してくる「ミュオン」を利用

③ 宇宙線ミュオン応用

- (a) 宇宙天気
- (b) 雷雲電場の透視
- (c) 密度構造物透視

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）



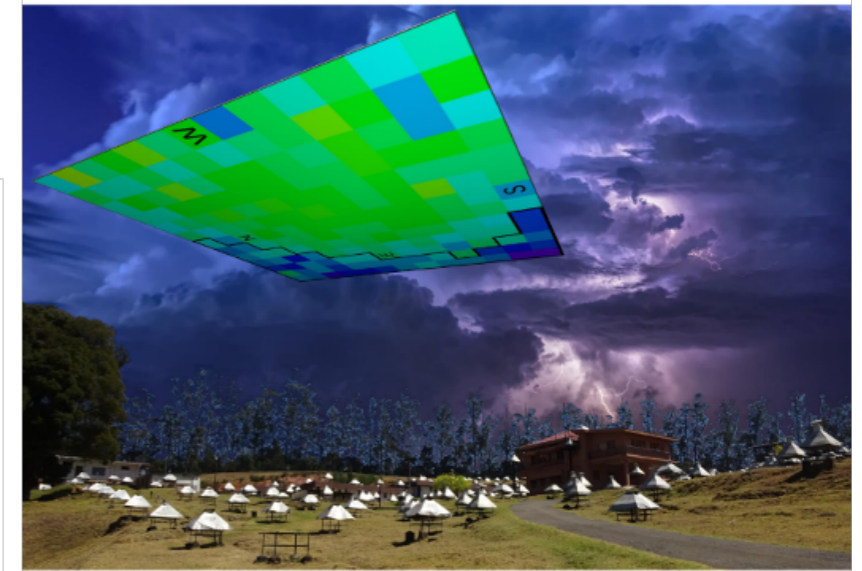
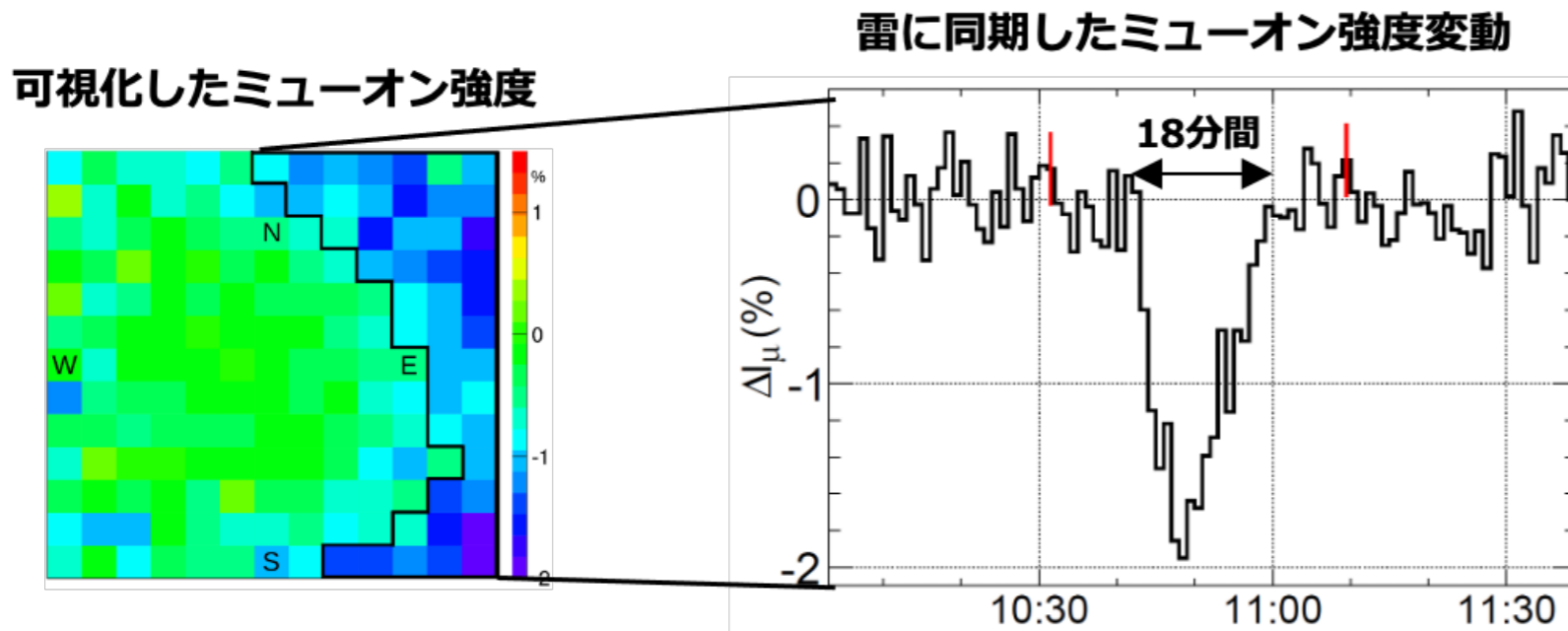
宇宙線（ミュオン）による惑星間空間の観測

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

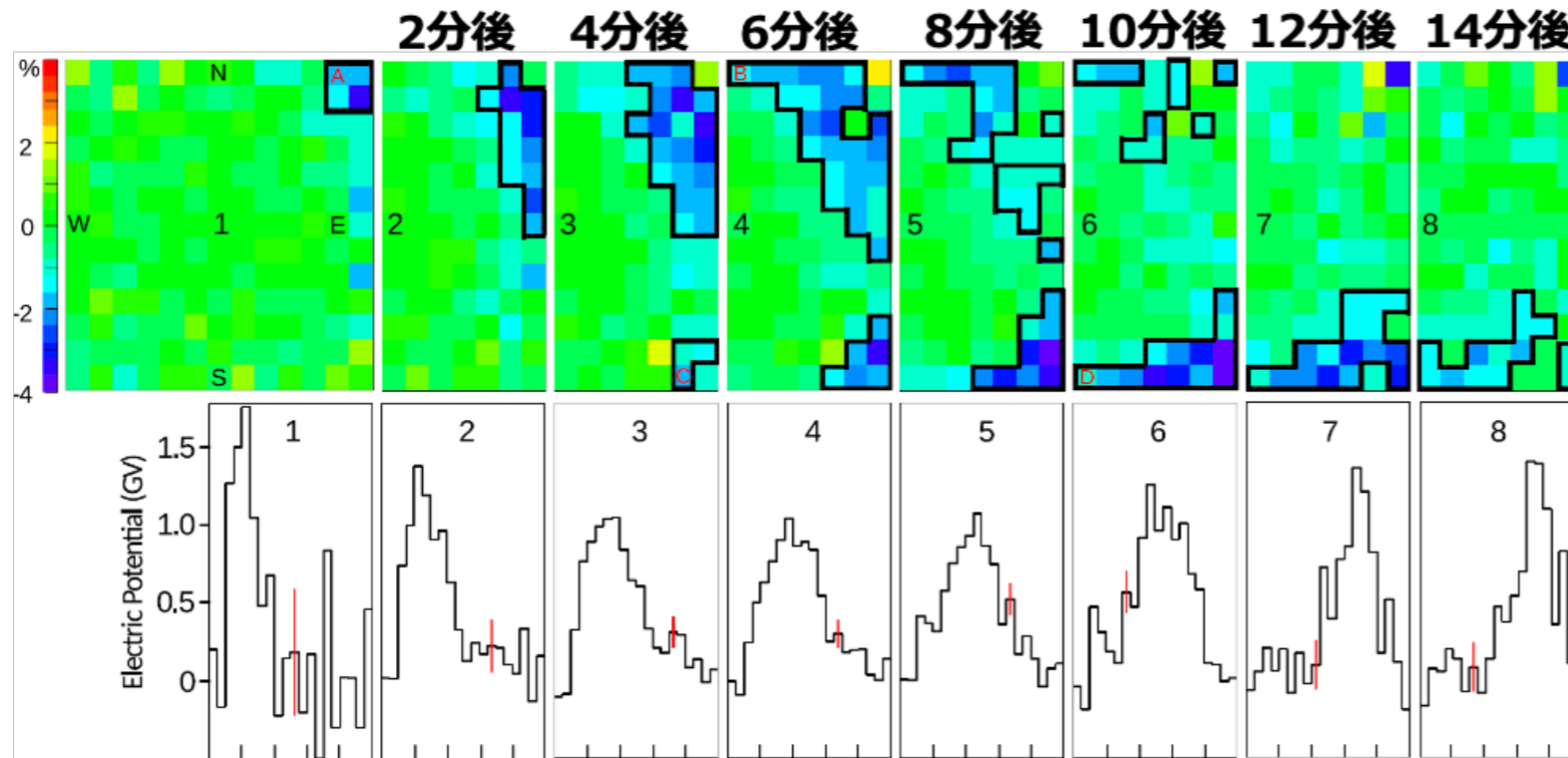
➡ 宇宙線を用いた宇宙天気観測 ➡ 惑星間空間磁場の解明

ミュオンによる雷雲電場の透視

(雷雲と同期したミュオン強度変動の検出)



Phys. Rev. Lett. 122, 105101 (2019)



雷雲の移動速度と面積の
推定が可能

移動速度：1 km/分
面積： $\geq 380 \text{ km}^2$

電位強度の推定が可能

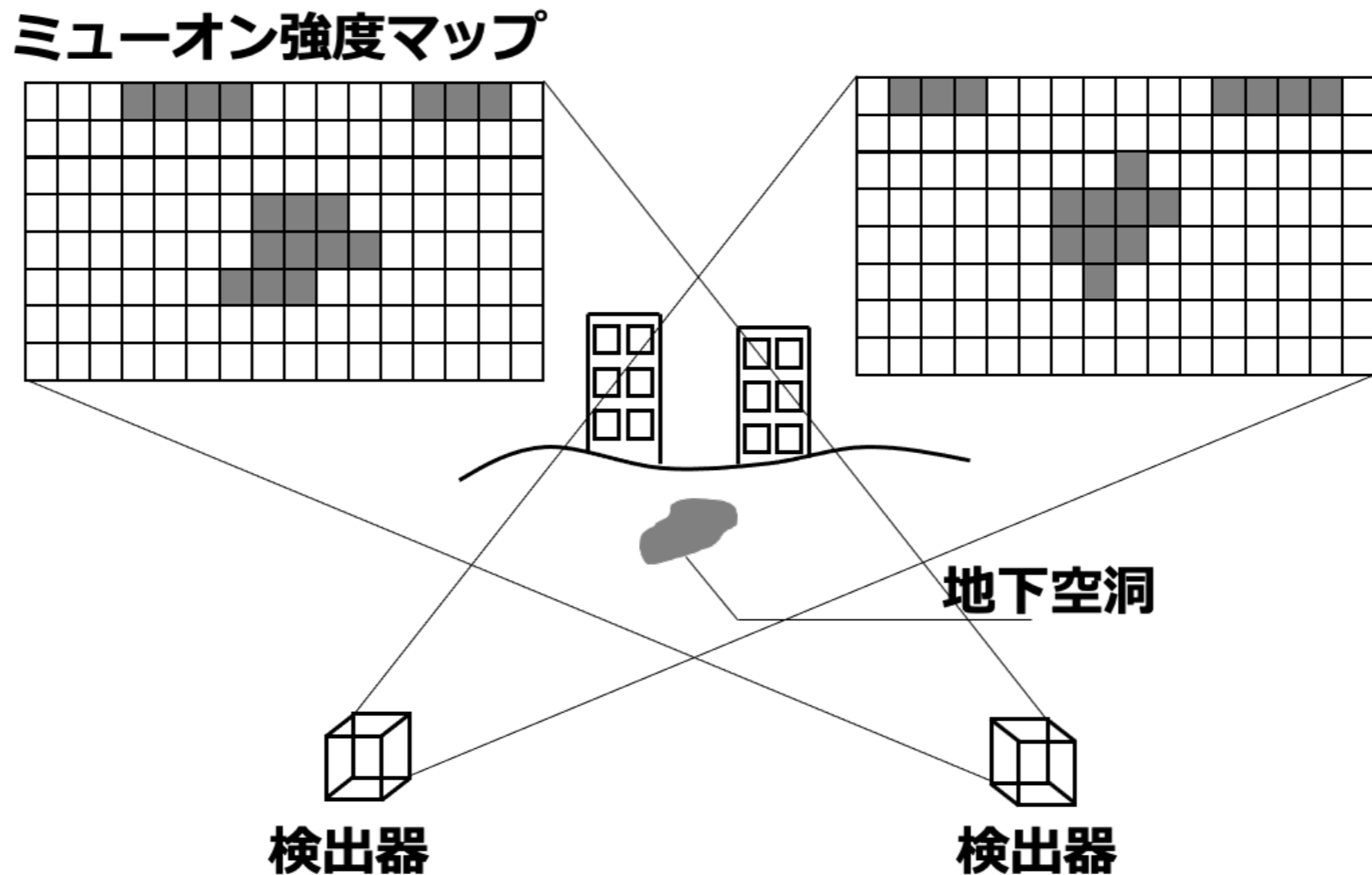
最大値：1.8 GV
平均値：1.3 GV

宇宙線による宇地球大気科学

大気放電現象の理解の深化

ミュオンによる構造物透視

(高分解能ミュオン検出器によるステレオ観測)



ミュオンによる透視 (ミュオグラフィ)

ミュオンは物質中でエネルギーを失い、吸収を受ける。

吸収量の違いからミュオンが通過してきた物質質量 (密度) が推定できる。

➡ 吸収量の可視化 ➡ 目に見えない密度構造を明らかにする

Summary

研究テーマの提案

— ミュオン科学と核融合科学の融合 —

ミュオンの応用

ミュオン触媒核融合

新しい核融合の可能性

エキゾチックな原子・分子分光科学

先進の理論と検出器により
原子・分子素過程の解明

宇宙線ミュオン応用

宇宙物理・地球大気科学・イメージング技術