

ミュオン非破壊分析の紹介

μ

大阪大学 大学院理学研究科 佐藤 朗

ミュオン非破壊分析の可能性 2018/11/12@大阪大学

ミュオン非破壊分析の種類

- ミュオンが資料内に停止する

- ミュオン特性X線分析

- 元素、同位体、化学状態

二宮・久保

- ミュオン放射化ガンマ線分析

- 元素、同位体

- ミュオンが資料を通過する

- ミュオン透過法（影を撮影）

森島

- 2次元透過図（多方向観測で3次元）

- ミュオン散乱法（物質の3次元測定）

宮寺

- 3次元での重物質の位置

ミュオン非破壊分析の特徴：特性X線、ガンマ線

ミュオンビーム

X線, γ 線

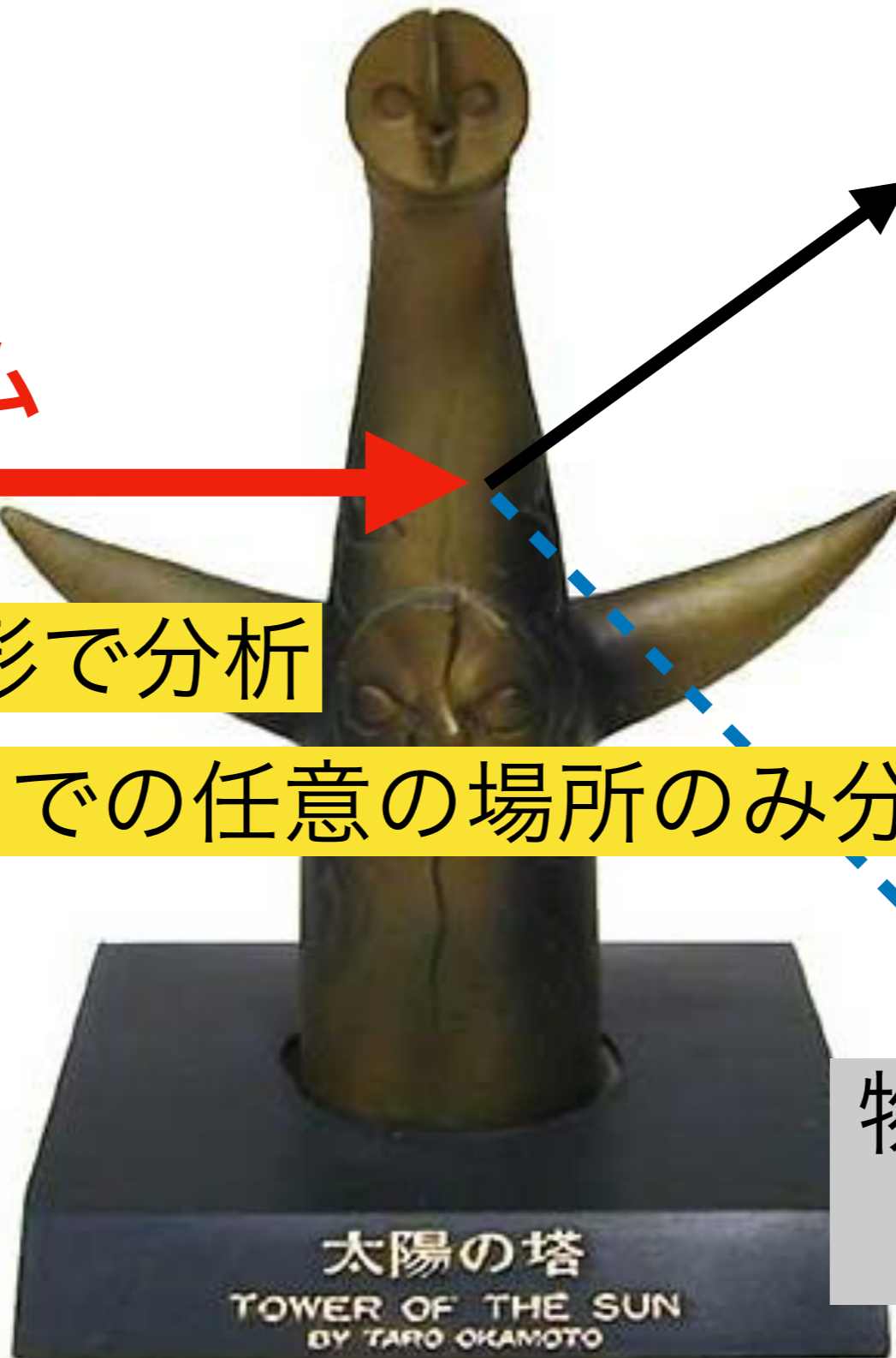
元素, 同位体,
化合物分析

資料そのままの形で分析

深さ~1cm程度までの任意の場所のみ分析

電子

物質内の局所磁場
(μ SR法)



ミュオンX線非破壊分析の特徴

- **高エネルギーX線の特性エックス線を使用**
 - 元素固有のエックス線エネルギー
- **全ての元素に対する多元素同時分析**
 - 軽元素のエックス線も高い透過力があるので測定できる
- **高感度の定量元素分析**
 - ひとつのミュオンで複数の特性エックス線を放出する
- **分析深さの選択性**
 - 非破壊で厚み数cmまでの任意の深さの位置における組成分析が可能
- **横方向広範囲を同時に分析**
 - 平均化された分析結果が得られる
- **同位体分析**
 - $K\alpha$ エックス線のエネルギーには同位体シフトがある
- **化学状態についての知見**
 - ミュオン捕獲現象は試料の化学状態により変化する





最近話題のミュオン

● 宇宙線ミュオンによる透過法の応用

— 福島原子炉の内部透視

- 原子炉燃料位置の調査

— ピラミッドの内部透視

- 新たな空間の発見

— 奈良春日古墳の内部透視

- 発掘せずに内部調査

● 宇宙線ミュオンによる散乱法の応用

— 福島原子炉の内部透視

— コンテナ内の核燃料や麻薬の探査

- <http://decisionsciences.com/our-product/technology/>

ミューオンとは？

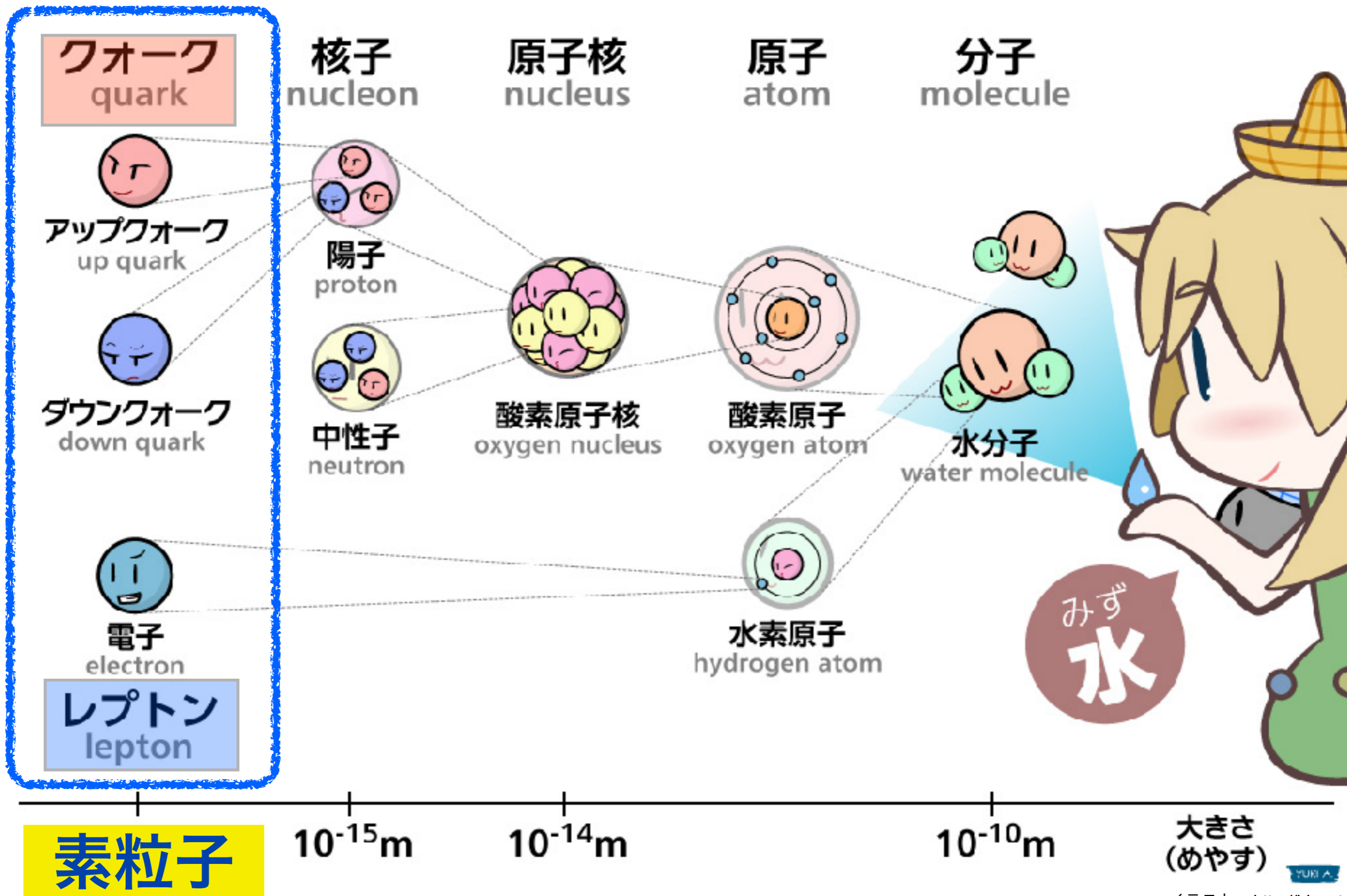
200倍重たい電子

電子 = 素粒子 = ミューオン

宇宙は何でできているか？

小さい

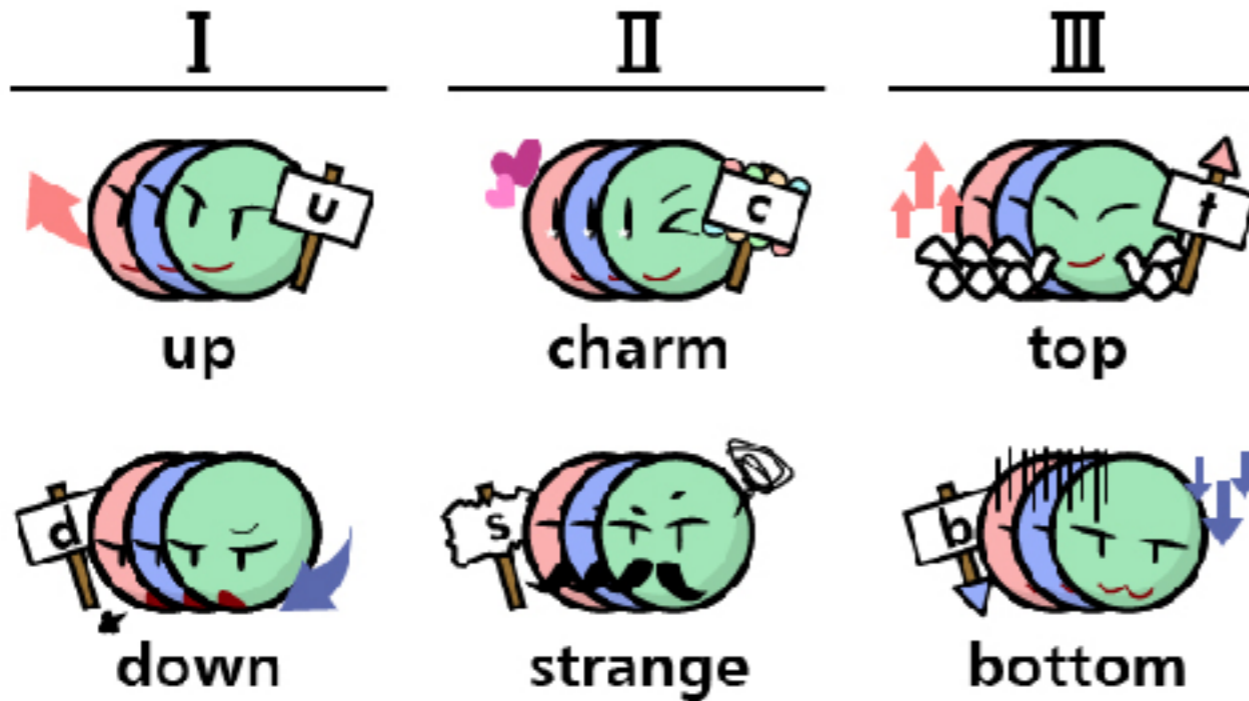
大きい



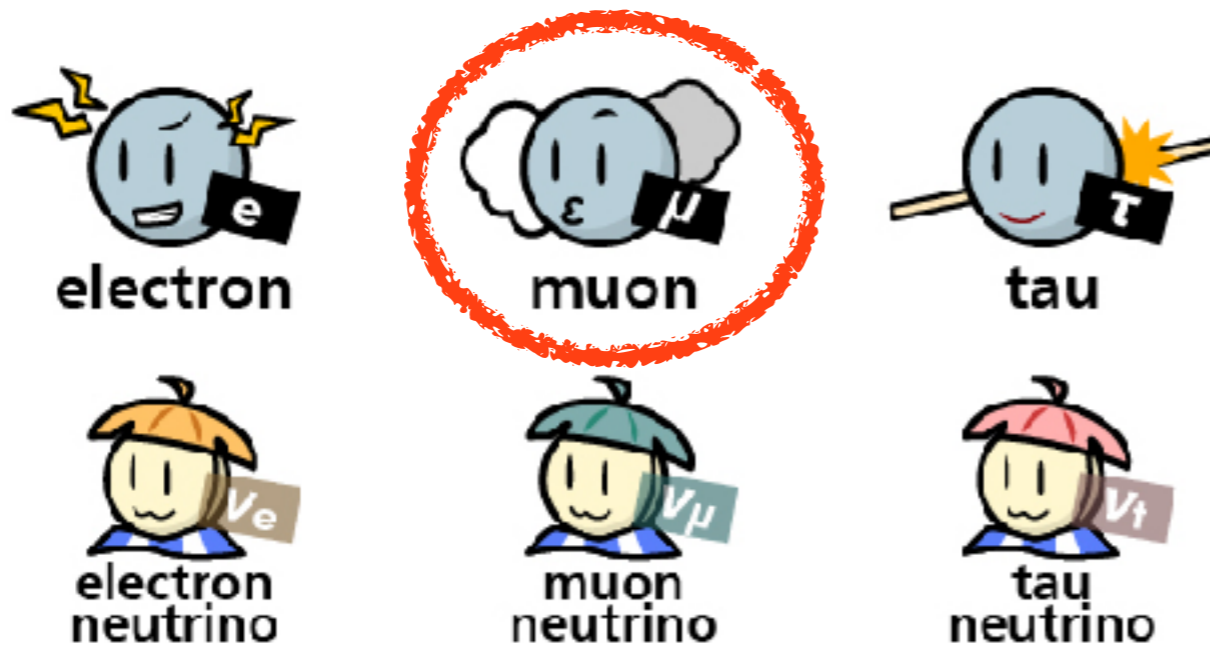
素粒子=宇宙を構成する基本粒子

物質粒子 matter (fermions)

クォーク
quarks



レプトン
leptons



ゲージ粒子 gauge bosons

電磁気力
electromagnetic



強い力
strong



弱い力
weak



ヒッグス粒子 Higgs bosons



ミューオン

(注) ミュオンという人もいる

- 電荷を持つレプトン族の中で電子の次に質量が大きい
- 電子の約207倍の質量
- 電荷は +1 または -1
- スピン1/2
- 不安定粒子 (崩壊する)
- 寿命は2.2マイクロ秒
- 自然界には安定には存在しない
- π 、 K の崩壊により作られる



簡単に言うならば電子を200倍重くしたものだ。

ミューオンで何が出来る？

● 素粒子・原子核の研究

- 宇宙の仕組みを調べる。→ 僕のメイン研究テーマ

● 物性研究

- 物質中の局所磁場構造を調べる。

- 高温超伝導

● 非破壊・非接触元素・同位体分析

- 考古資料、文化財など稀少試料の分析

- 物質内部の透視・3次元測定

● エネルギー問題の解決

- 原発廃棄物長寿命放射性生物質の処理

- ミューオンを触媒とした核融合発電

● 安全防衛

- ウラン・プルトニウム密輸の発見

今日のメインテーマ



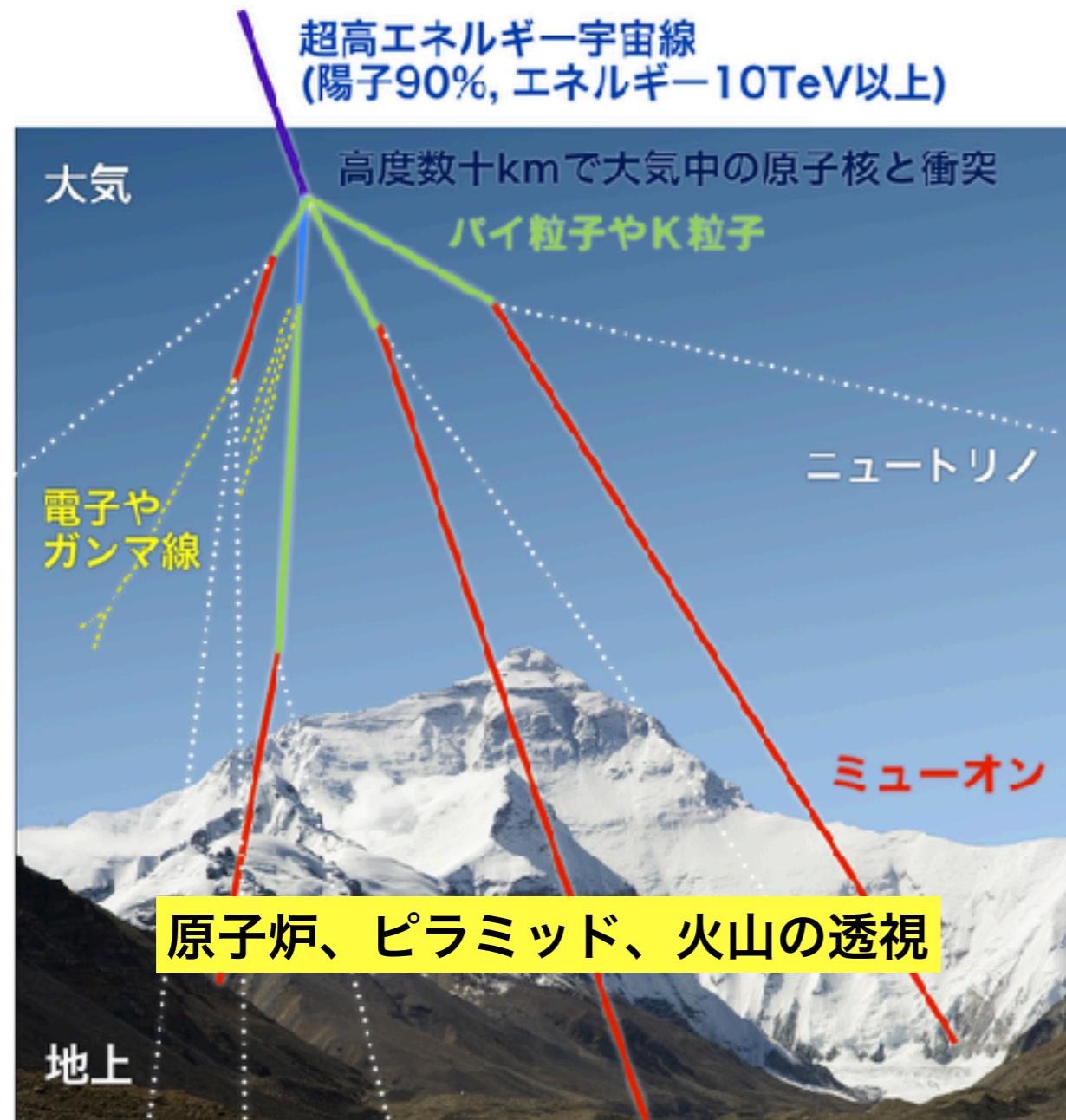


ミューオンは 何処で使えるか？

μ

- (1) 貴方のいる場所：宇宙線ミューオン
- (2) 大型加速器施設：人工ミューオンビーム

最近話題の宇宙線ミュオン



(注)エネルギーの単位は、参考資料(1)を参照のこと。

しかし、物質中で簡単に停止する低エネルギーミュオンが沢山あるととっても面白いことが出来る。

● 宇宙線ミュオンの特徴

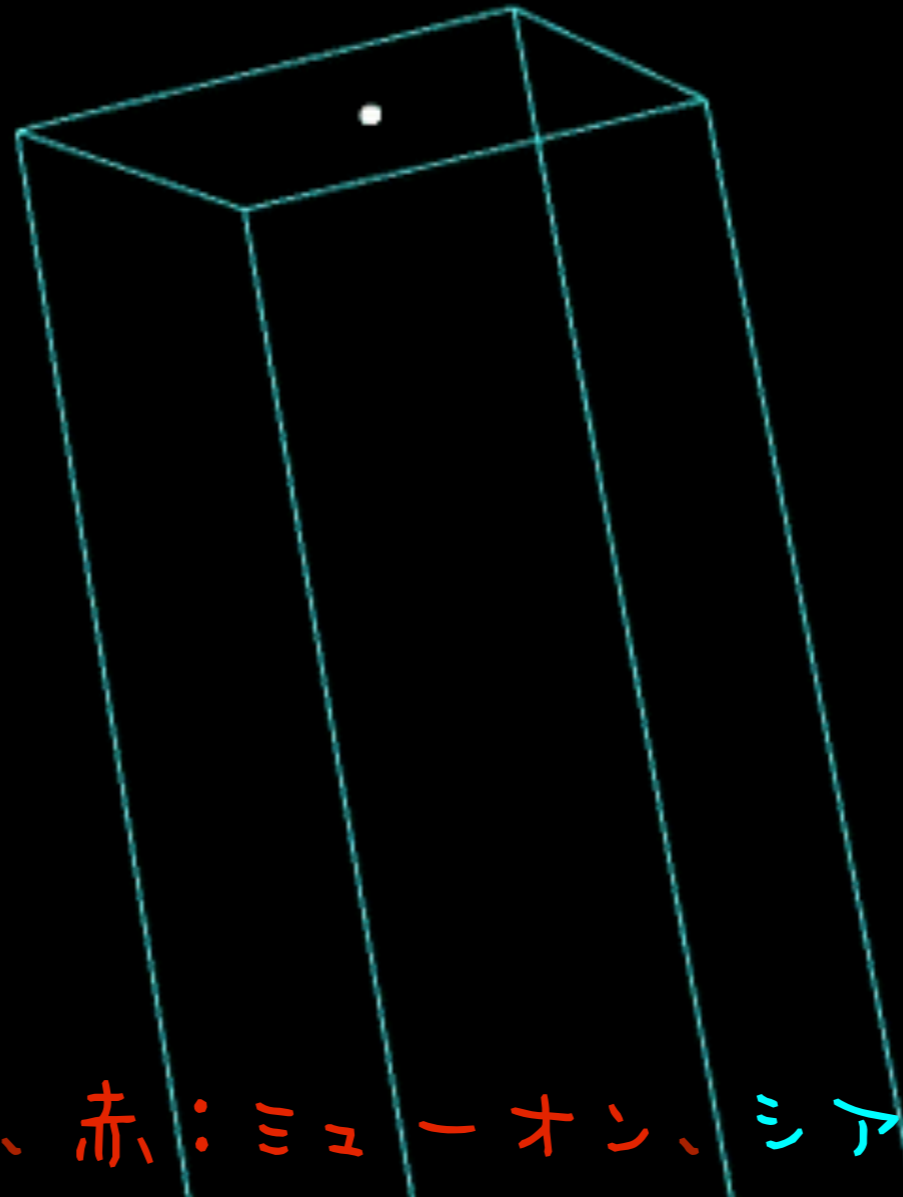
- いつでもどこにでも降り注いでいるが数が少ない：地上での量は**毎秒1個/60cm²**
- エネルギーが高い：**1GeV(光速の99.5%)以上**、山も透過する。



1TeV陽子による大気シャワー生成

Box size: 20km x 5km x 5km

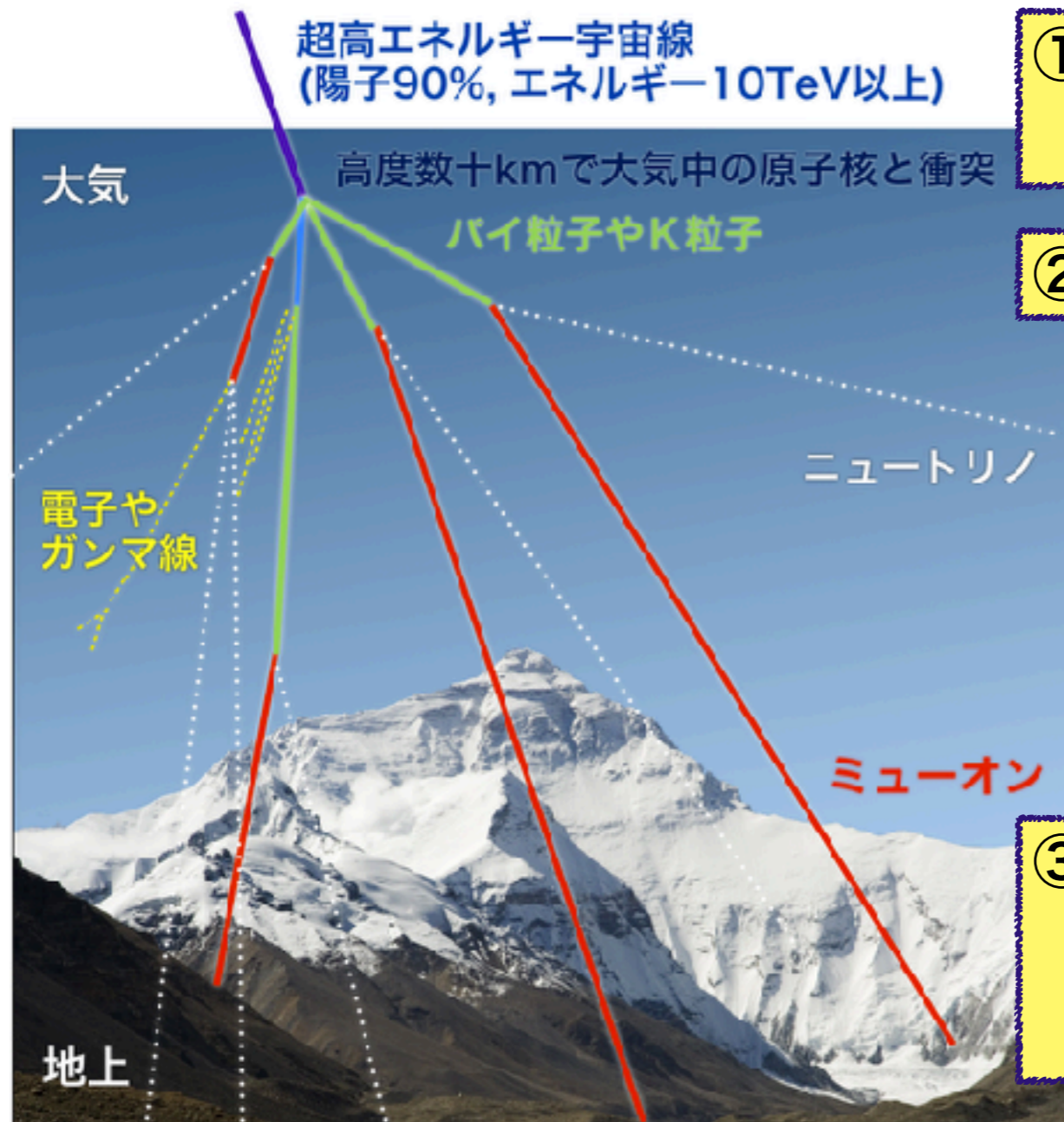
<http://astro.uchicago.edu/cosmus/projects/aires/>



緑：電子、陽電子、赤：ミューオン、シアン：ガンマ線

でも、数がゴッゴ少ない。手のひらに毎秒1個。

加速器による人工ミューオンの作り方



①加速器で高速陽子ビームを作る。
陽子のエネルギー0.3GeV以上

②陽子を標的に当てる。

③ミューオンを集める。
毎秒1億個の低エネルギー
ミューオン

● 加速器による人工ミューオンビームの特徴

- 数が多い：**毎秒1千～1億個**（典型的なビームサイズ直径5cm程度）
- エネルギーが低い：**40MeV(光速の68.8%)以下**、アルミ4cmで停止する。

世界のミュオン施設

(注)様々な実験研究に使用できるもの。



- DCミュオン施設
- パルスミュオン施設
- パルスミュオン施設(素粒子実験に特化)

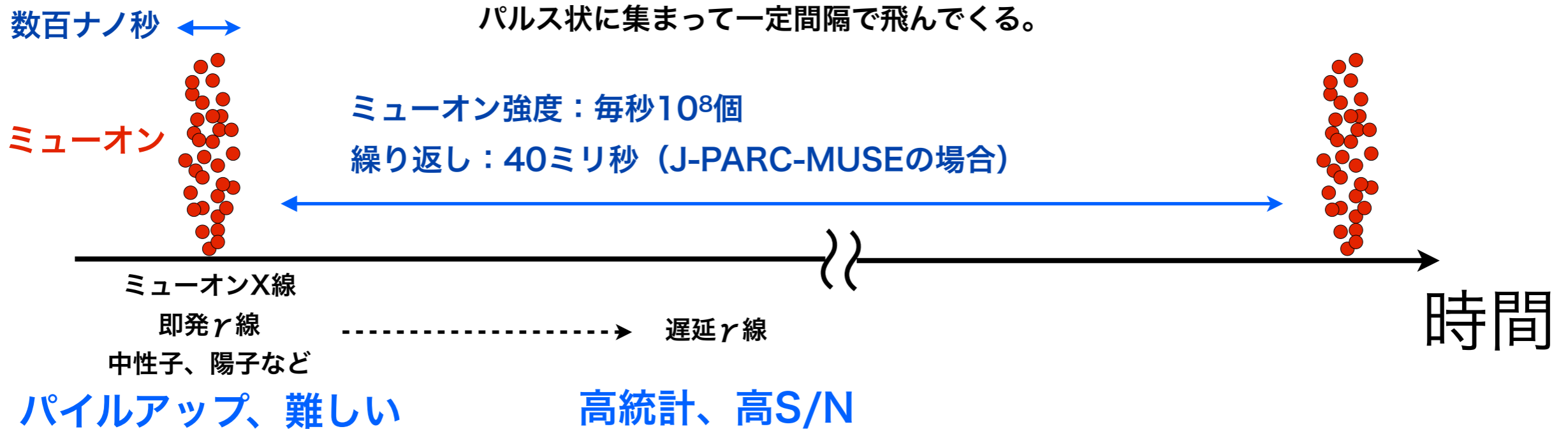
日本国内でパルスとDCビームによる負電荷ミュオン実験が可能

負電荷DCミュオンが利用できるのは現在MuSICとPSIだけ

負電荷ミュオン実験におけるパルスとDCビームの違い

J-PARC-MUSE：パルスミュオンビーム

世界最高強度



RCNP-MuSIC：DCミュオンビーム

ランダムにパラパラと飛んでくる。



負電荷ミュオン実験におけるパルスとDCビームの違い

DCミュオンビーム

$1 \times 10^4 \mu^-/s$
= 100 μs 毎に1個来る

特性X線/ γ 線

ゲルマニウム半導体検出器で
1つずつエネルギーを測定

負電荷ミュオン

試料

中性子

非破壊分析に適している

100 μs 毎に μ^- を1事象ずつ測定できる。

ビームレート(10⁴Hz)でデータ貯まる。
光子や中性子等の同時計測が可能。

パルスミュオンビーム

$2.5 \times 10^4 \mu^-/s @ 25Hz$
= 幅100nsのパルスに10³個入ってる

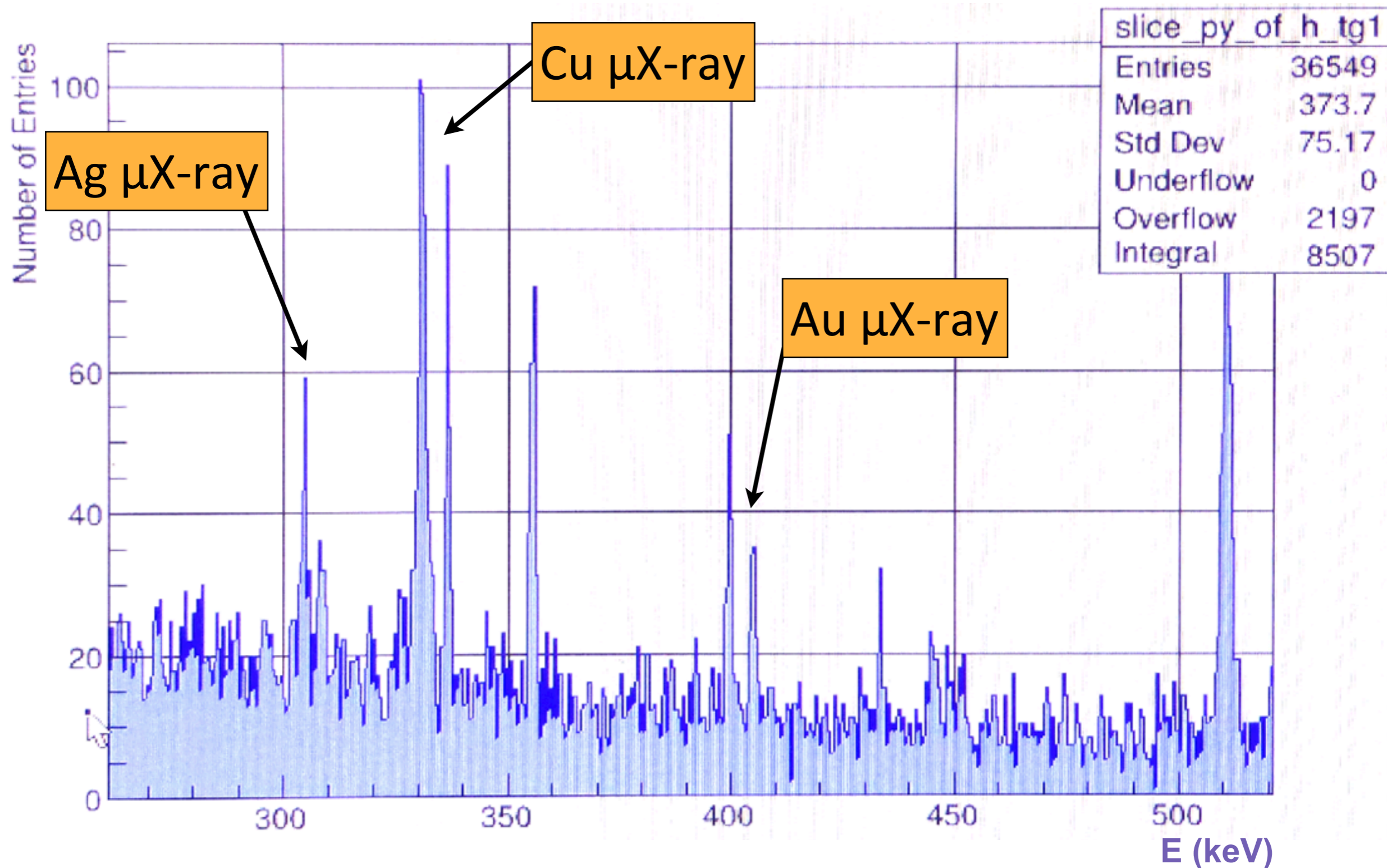
ゲルマニウム半導体検出器に
一度に沢山当たるので、
エネルギー測定出来ない

1検出器1ヒットになるように検出器を
離す必要がある。

25Hz/検出器でデータ貯まる。
同時計測は難しい。

**MuSICミュオンX線非破壊元素分析：2017.3.2
天保小判(1.1 μ A, 50MeV/c, 15分照射)**

MuSIC-DCミュオンでは、
素早くデータが貯まる。
J-PARCの20-30倍



核物理研究センターサイクロトロン加速器施設

阪大吹田キャンパスにあります。見学大歓迎です！

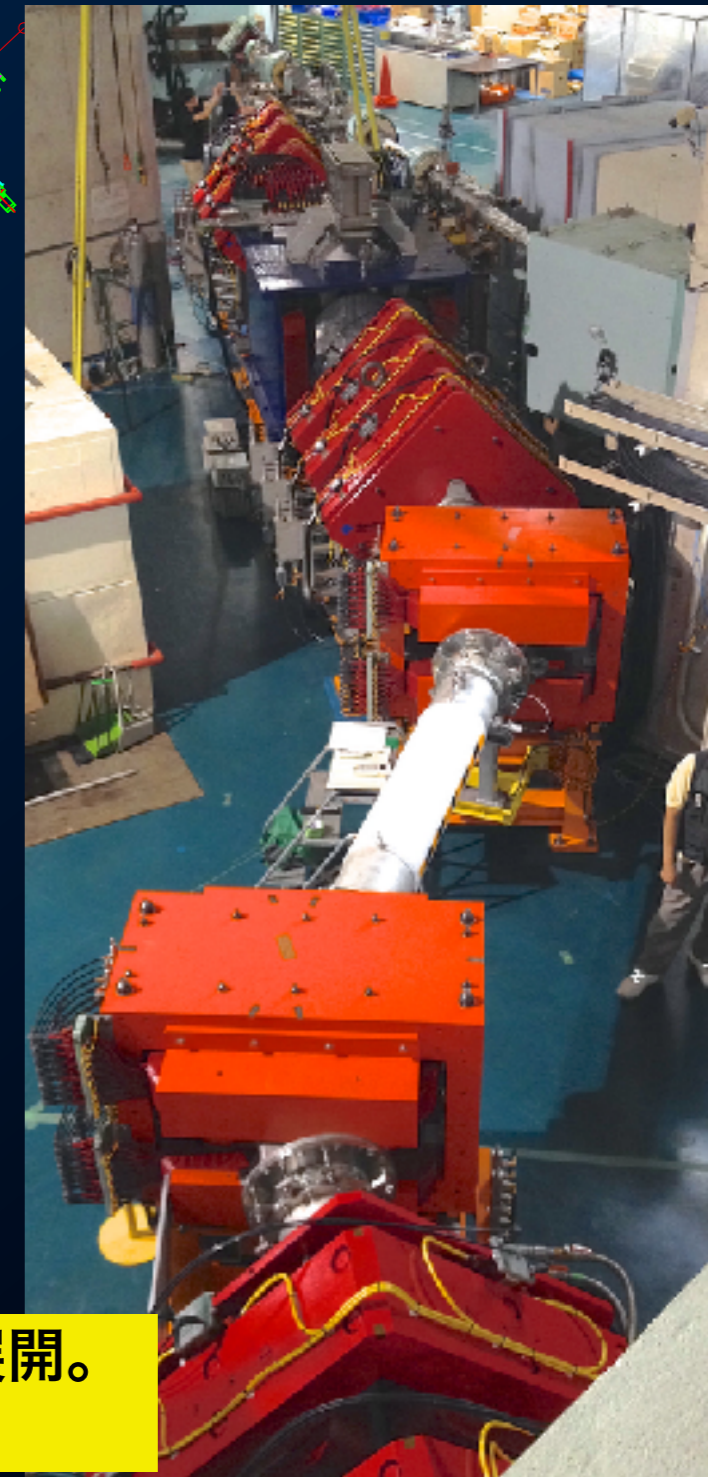
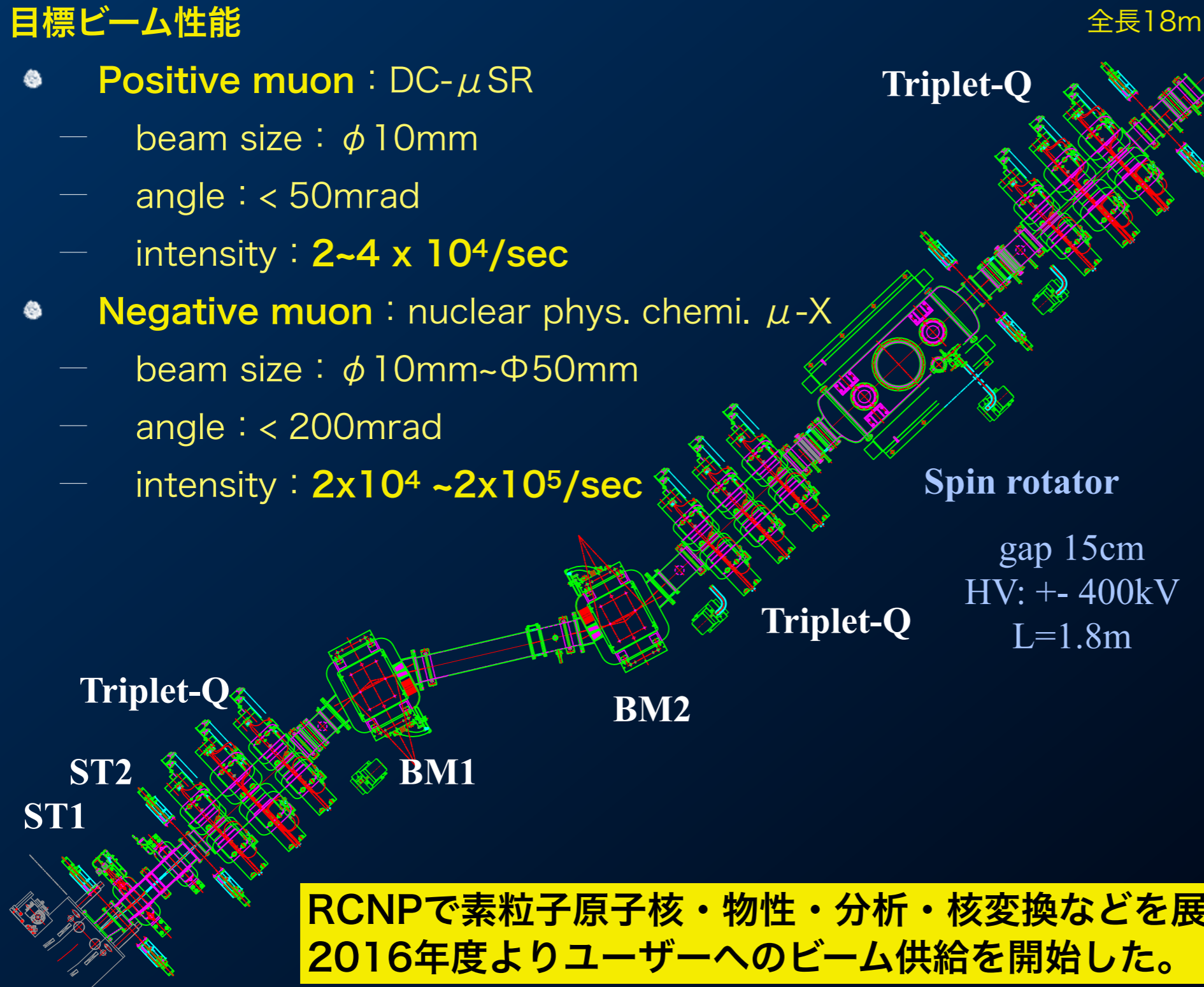


国内初のDCミュオンビームライン

RCNP-MuSIC-M1 大阪大学核物理研究センターに建設 (2013年度)

目標ビーム性能

- **Positive muon** : DC- μ SR
 - beam size : ϕ 10mm
 - angle : < 50 mrad
 - intensity : $2\sim 4 \times 10^4$ /sec
- **Negative muon** : nuclear phys. chemi. μ -X
 - beam size : ϕ 10mm~ ϕ 50mm
 - angle : < 200 mrad
 - intensity : $2 \times 10^4 \sim 2 \times 10^5$ /sec



RCNPで素粒子原子核・物性・分析・核変換などを展開。
2016年度よりユーザーへのビーム供給を開始した。

国内初のDCミュオンビームライン

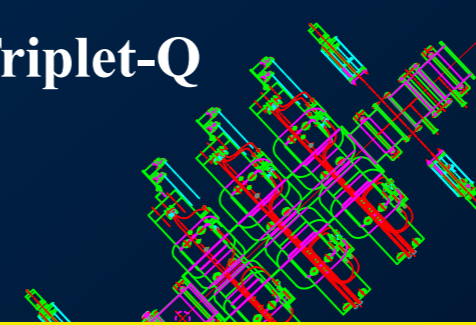
RCNP-MuSIC-M1 大阪大学核物理研究センターに建設 (2013年度)

目標ビーム性能

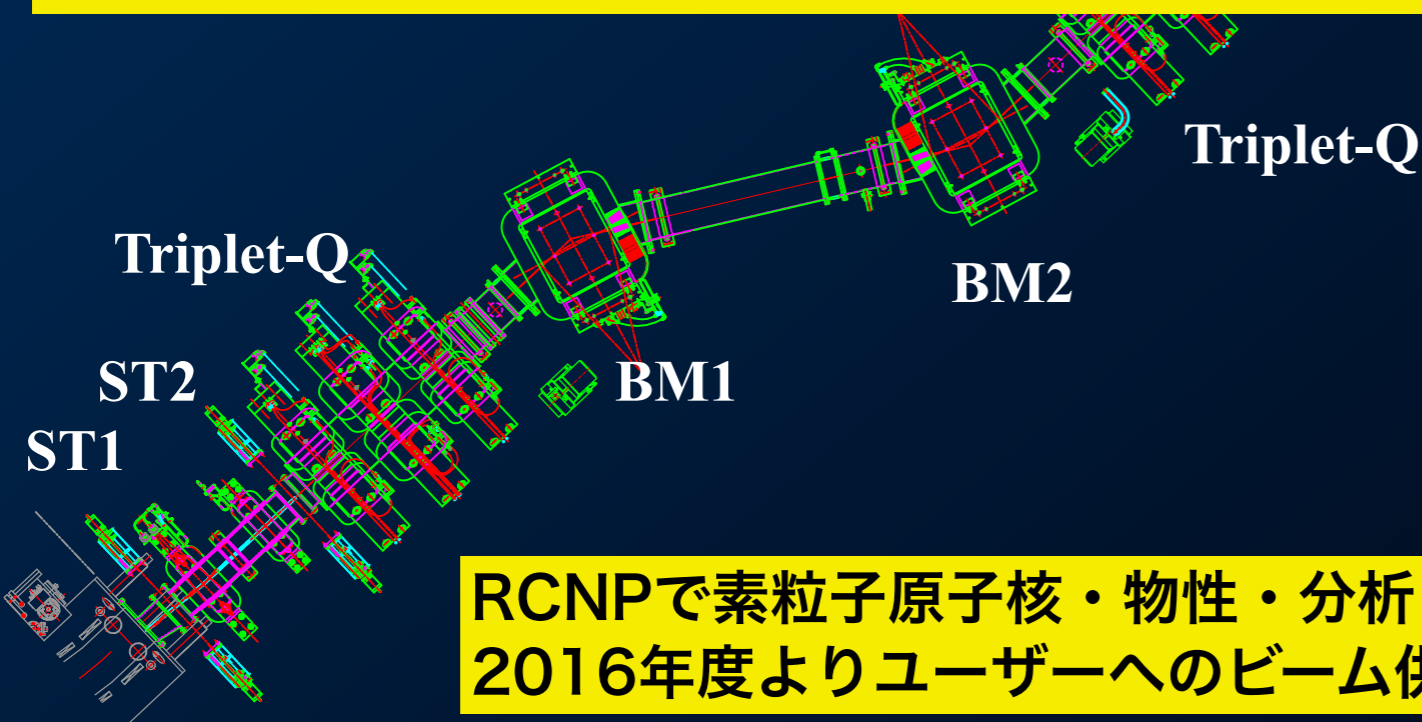
- **Positive muon** : DC- μ SR
 - beam size : ϕ 10mm
 - angle : < 50 mrad
 - intensity : $2 \sim 4 \times 10^4$ /sec

全長18m

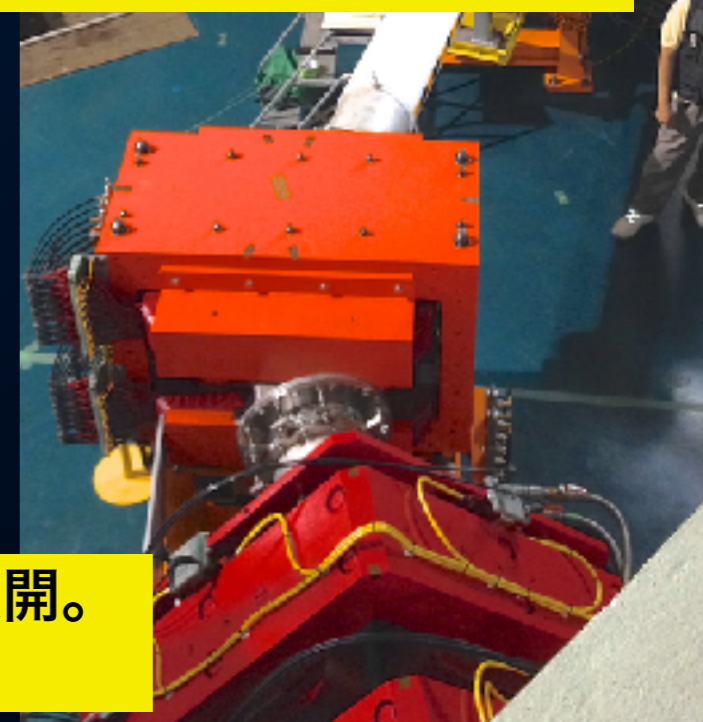
Triplet-Q



MuSICのDCミュオンは非破壊元素分析に最適！
どんどん利用して下さい。



gap 15cm
HV: ± 400 kV
L=1.8m



RCNPで素粒子原子核・物性・分析・核変換などを展開。
2016年度よりユーザーへのビーム供給を開始した。

茨城県東海村J-PARC MUSE

河村さんのスライド

世界最高強度のパルスミュオン施設

低エネルギーミュオンでもたくさん出るので、表面や深さ毎の分析が得意。
2次元元素マッピングの開発も進んでいる。

詳しくは河村さん
講演スライドを見て下さい。

ミュオン非破壊分析の原理

μ

今回が電荷-1を持ったミューオン
負電荷ミューオンを使います。

μ

μ^-

と書くことが多いです。

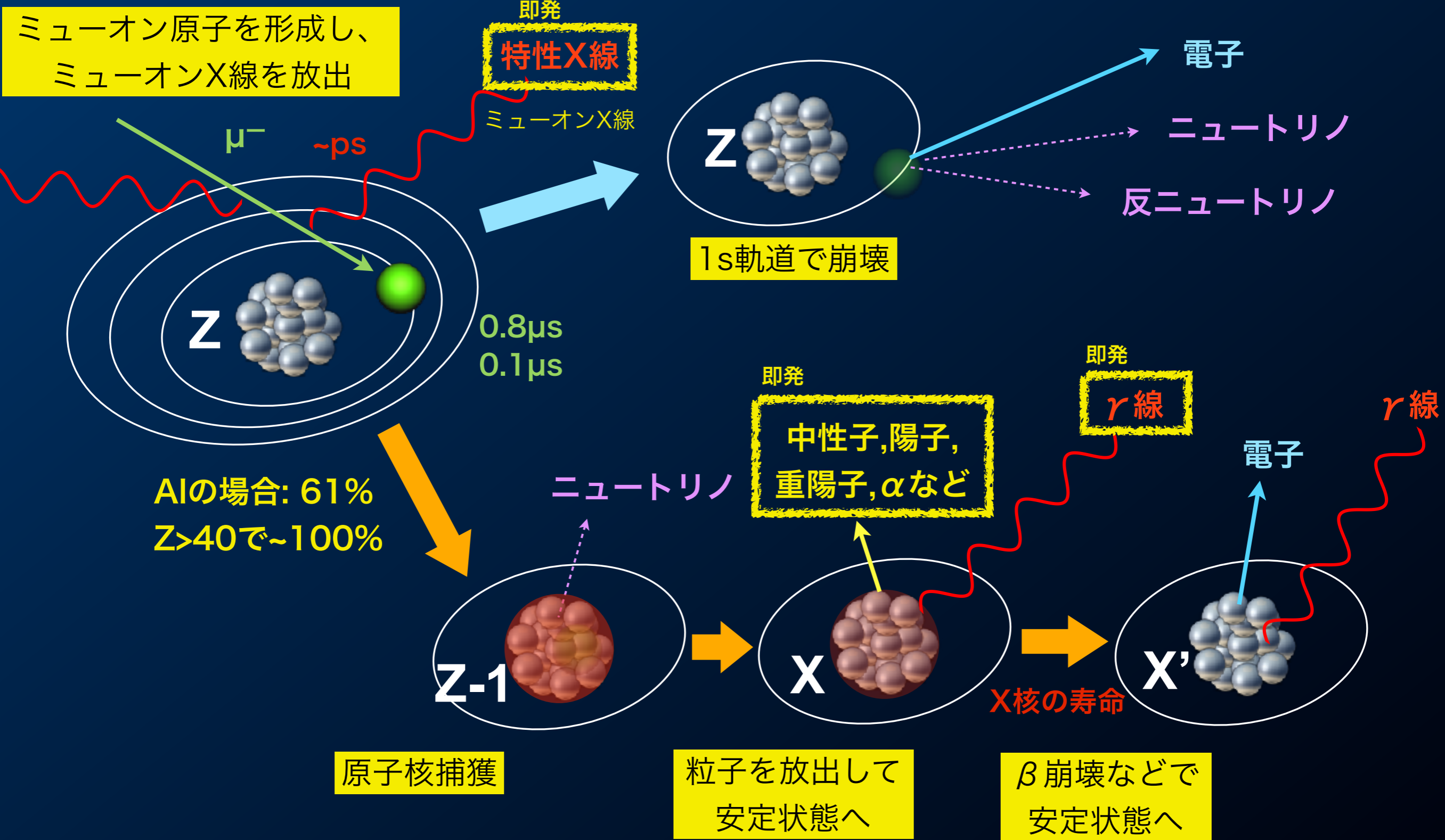


負電荷ミューオンの 物質内での振る舞い

μ

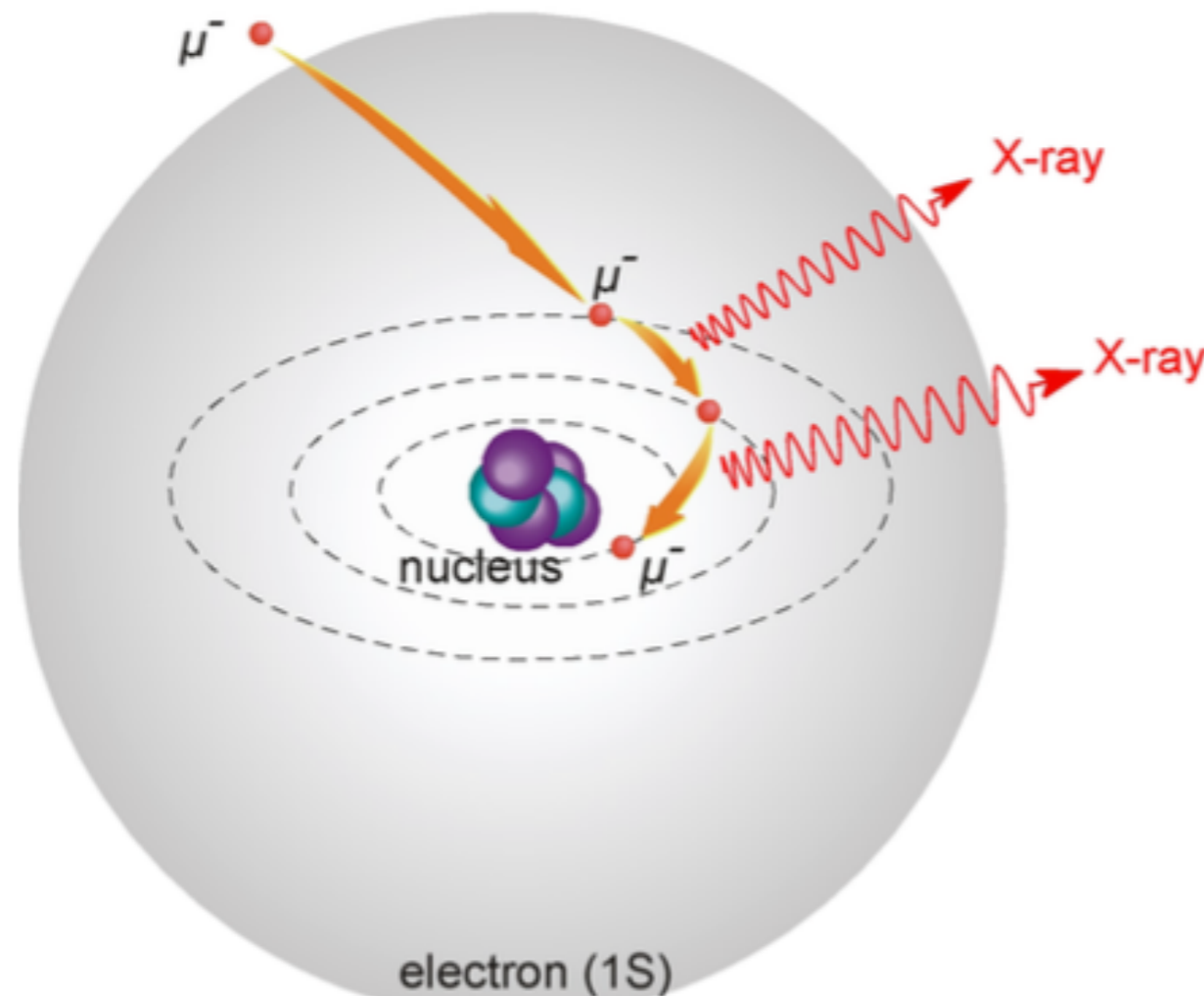
重い電子のように振る舞います

負電荷ミュオンが物質中に停止すると起こる現象



ミュオンX線とは

- 物質中に負電荷ミュオンを停止させると必ずミュオン原子が生成される。
- ミュオン原子中のミュオンはX線を放出しながらミュオン原子の1s軌道へと脱励起して行く。このX線をミュオンX線と呼ぶ。これは元素により固有のエネルギーを持つ特性X線であるので、元素分析に利用できる。
- ミュオンX線は、電子の特性X線より約200倍高いエネルギーを持つ。



$$E_n = -\frac{Z^2 m e^4}{8n^2 \epsilon_0^2 h^2}$$

$$r_n = -\frac{4\pi \epsilon_0 n^2 \hbar^2}{Z m e^2}$$

$$\frac{m_\mu}{m_e} \approx 207 \approx \frac{E_\mu}{E_e} \approx \frac{r_e}{r_\mu}$$

Bohr model

元図：ICU久保スライドより

ミュオンX線のエネルギー

Element	$K\alpha$	$K\beta$	$L\alpha$	$L\beta$
C	76 (0.28)	89	14	19
O	134 (0.52)	158	25	34
Al	347 (1.49)	422	66	89
Fe	1256 (6.40)	1704	264	357
Cu	1513 (8.05)	2126	307	444
Pb	5966 (85.0)	8466	938	1372

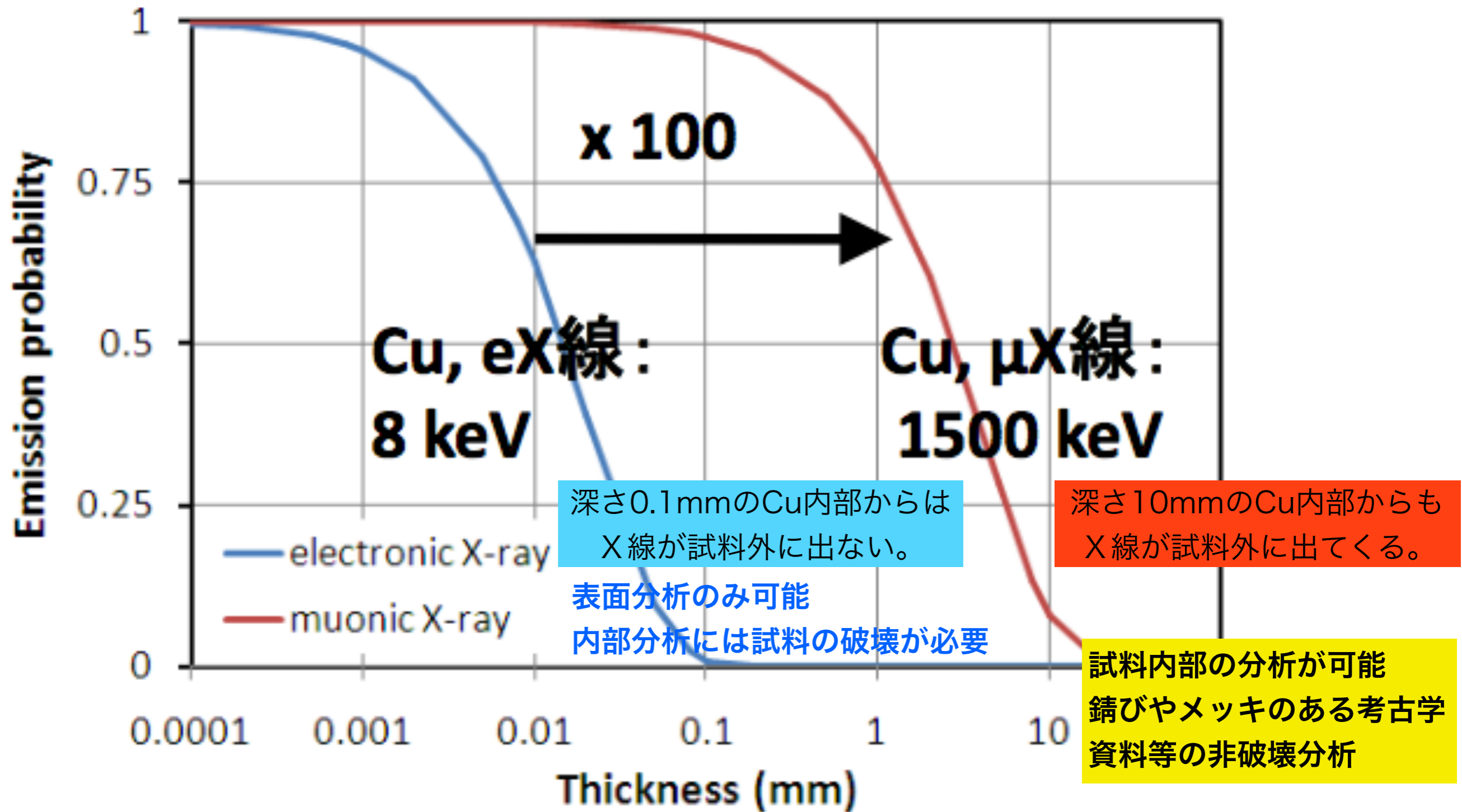
表：ICU久保スライドより

()内は電子の $K\alpha$ 特性X線のエネルギー

単位 keV

ミュオンX線は電子特性X線に比べて約200倍大きいエネルギーを持つ。
軽元素でもX線エネルギーが大きいので、検出可能。

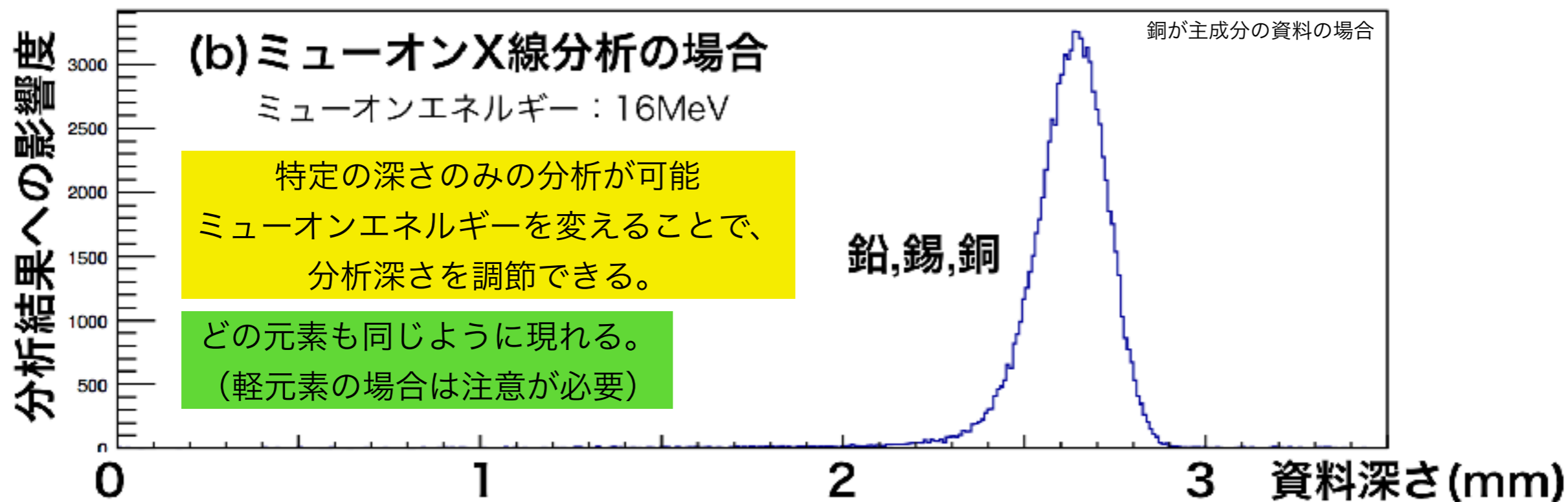
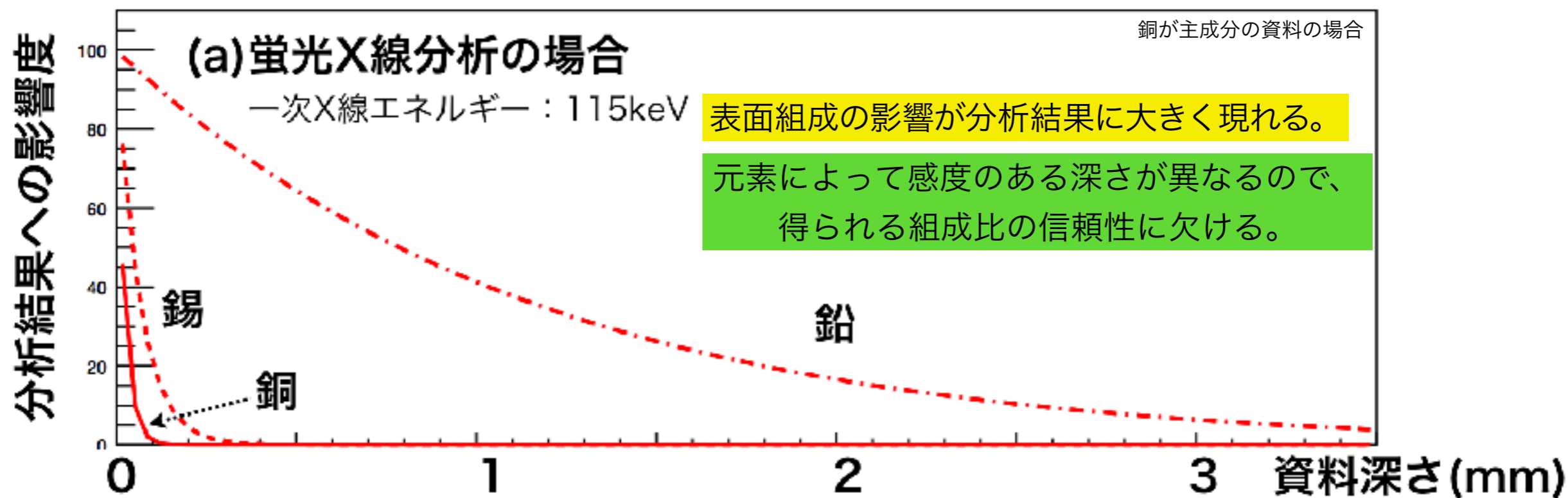
ミュオンX線と電子特性X線の透過率比較



Cu中の K_{α} X線の透過率

元図：阪大二宮スライドより

分析結果に表れる物質の深さ



2018年5月のMuSICでの測定

μ

岡山大学・埋蔵文化財調査研究センター 南健太郎

大阪大学大学院・理学研究科・物理学専攻 佐藤朗

大阪大学大学院・理学研究科・化学専攻 二宮和彦

星雲鏡（泉屋博古館の廣川先生より）

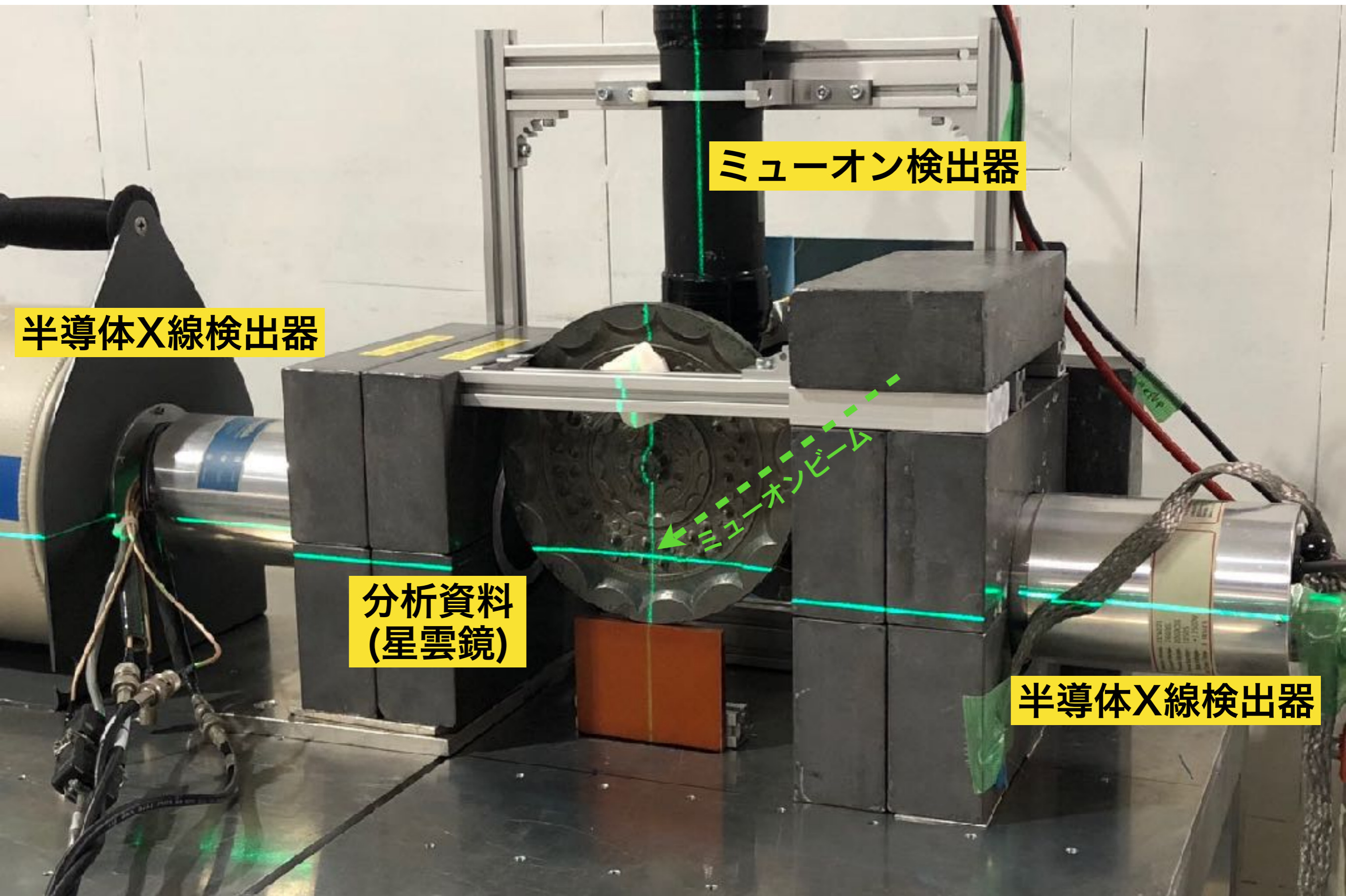


図 34 星雲鏡

直径：18.2cm

分析位置最薄厚：2.35mm

RCNP-MuSICでの星雲鏡ミュオン分析の様子



ミュオン検出器

半導体X線検出器

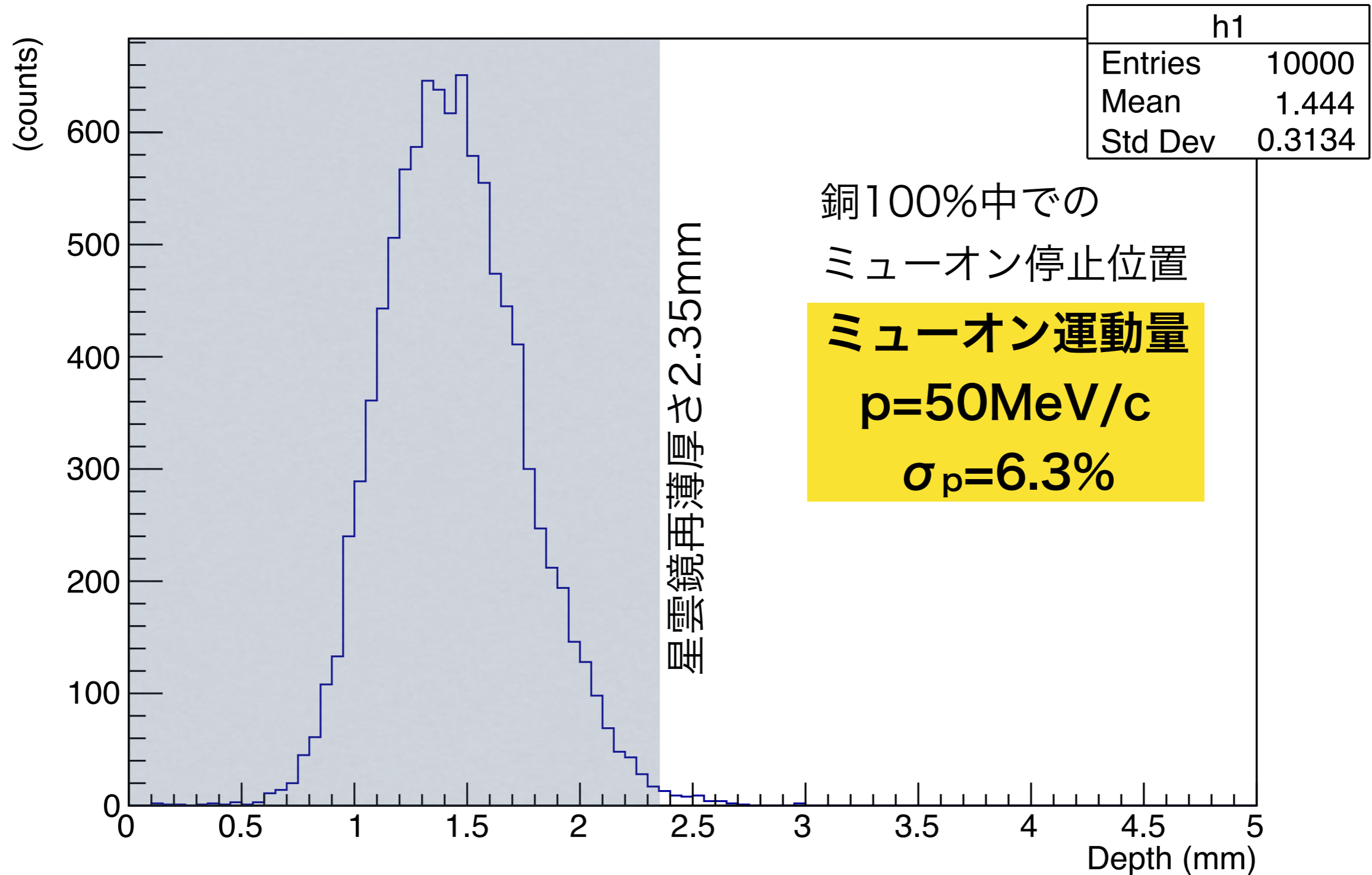
分析資料
(星雲鏡)

ミュオンビーム

半導体X線検出器

2018年5月青銅器測定時の分析深さ

Muon Stopped depth in Cu



まとめ

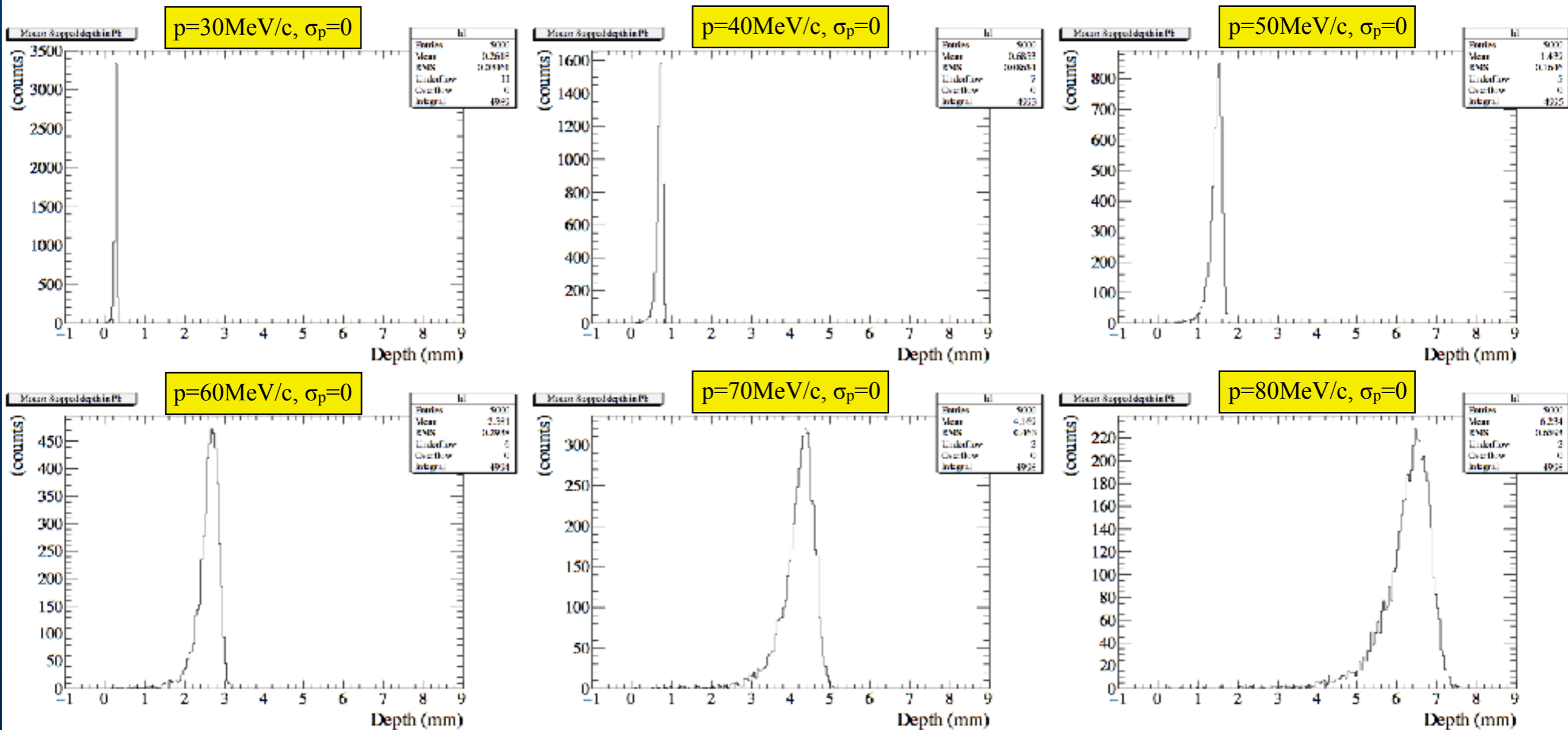
- ミューオン非破壊分析の実用化に向けて、様々な取り組みが進んでいます。
 - ミューオン特性X線分析
 - ミューオン放射化ガンマ線分析
 - ミューオン透過法
 - ミューオン散乱法
- 他の分析方法と同様に、ミューオン分析法も得手不得手があります。
 - 得意なこと（現在いるいるやっている）
 - 得意でないけど出来ること（これからやりたい）
 - 出来ないこと
- 本研究会で、ミューオン分析を理解して頂いて、皆さんのニーズを合いそうなことを教えて頂けると幸いです。
- 他の分析法が得意なことは、無理してミューオンでやることはありません。
- 他の分析法で出来ないけど、ミューオンなら出来る事があると思います。



Backup

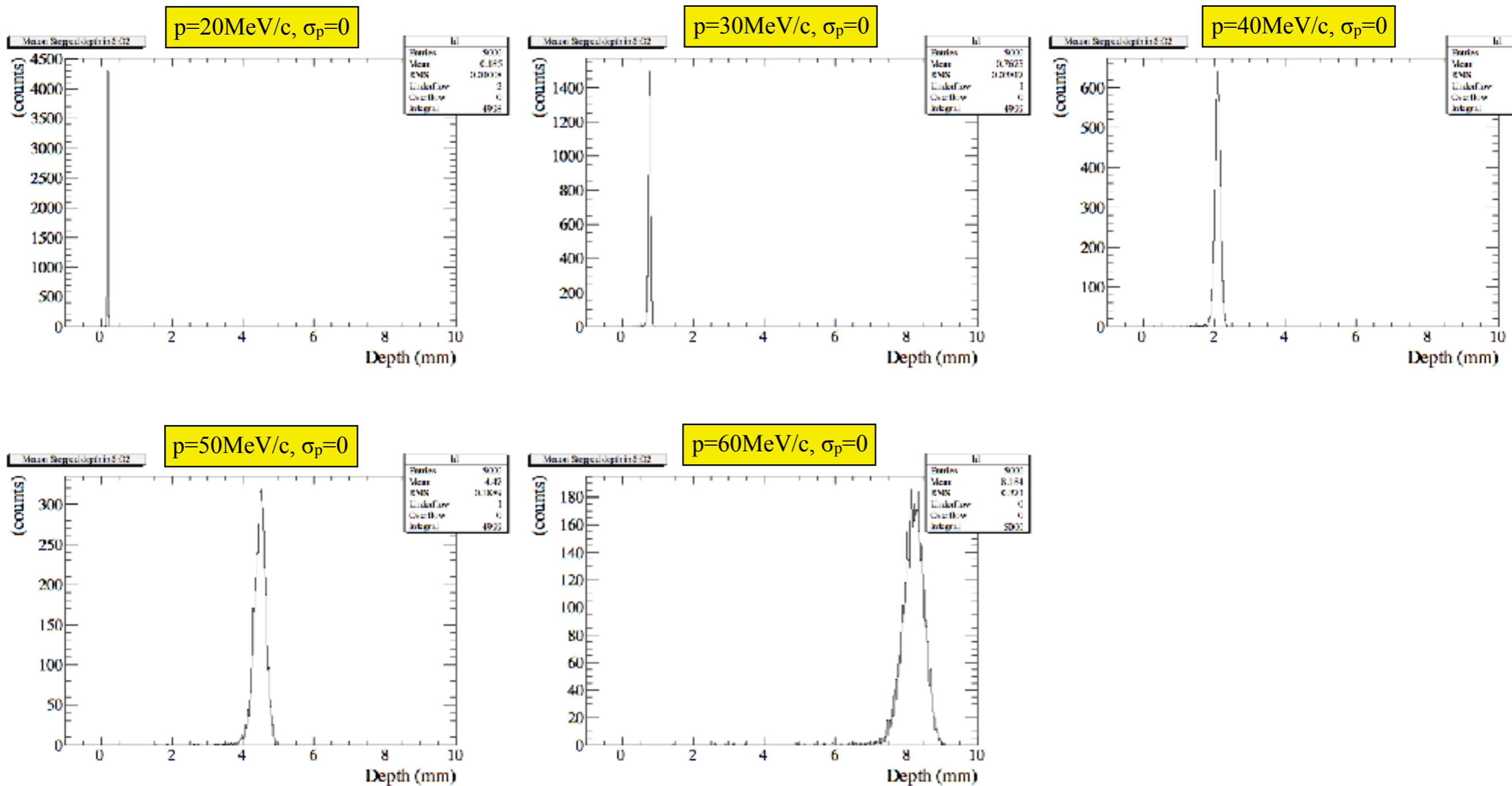


結果：MuonのPb中での停止深さ ($\sigma_p=0$)



$\sigma_p=0$ でも停止深さは少しばらつく (Range straggling)。
これらの停止深さ分布のmeanとRMSの運動量との関係を
次ページのグラフにまとめた。

結果：MuonのSiO₂中での停止深さ ($\sigma_p=0$)



これらの停止深さ分布のmeanとRMSの運動量との関係を次ページのグラフにまとめた。