

Muon Physics at RIKEN-RAL

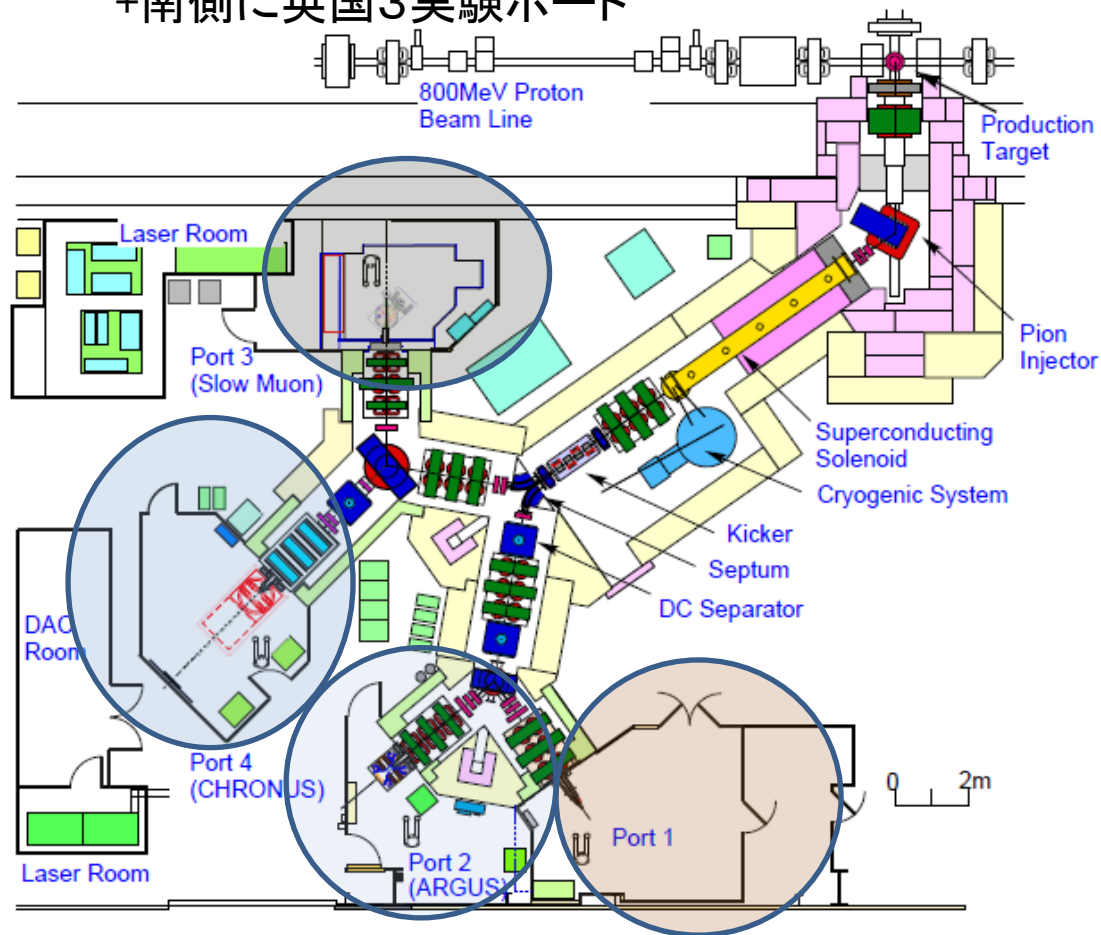
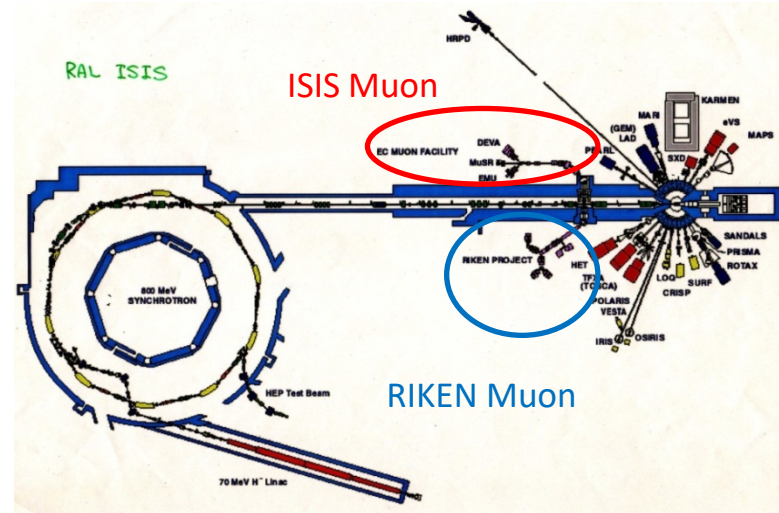
K. Ishida (KEK物構研)

2023年3月まで理研

理研RALミュオン施設の34年
理研RALでの原子・原子核研究
施設の現状と予定

英国RIKEN-RALミュオン施設概要

1994年より稼働のパルス状ミュオン施設
 800 MeV, 300 μ A (240kW) 陽子ビーム
 10mm炭素標的
 4つの実験ポート(同時使用2か所まで)
 +南側に英国3実験ポート



Port-2: μ SR (ARGUS)

Port-4: μ SR (CRONUS)
 + 汎用利用(元素分析など)

Port-3: 超低速ミュオン開発

Port-1: ミュオン核融合 -> 陽子半径

ビーム利用 年160日
 ~80日 for UK (主に元素分析+ α)
 ~80日 for RIKEN(2022年まで)

RIKEN-RALのミュオンビーム

Beam properties

表面 μ^+ (16~28MeV/c) and

崩壊 μ^+/μ^- (16~120MeV/c)

$\Delta p/p$ FWHM 10%(decay),
5%(surface)

典型的なビームサイズ

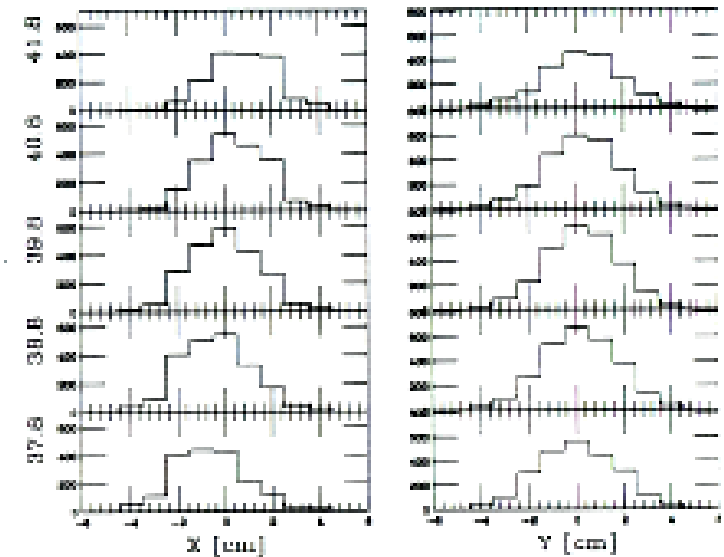
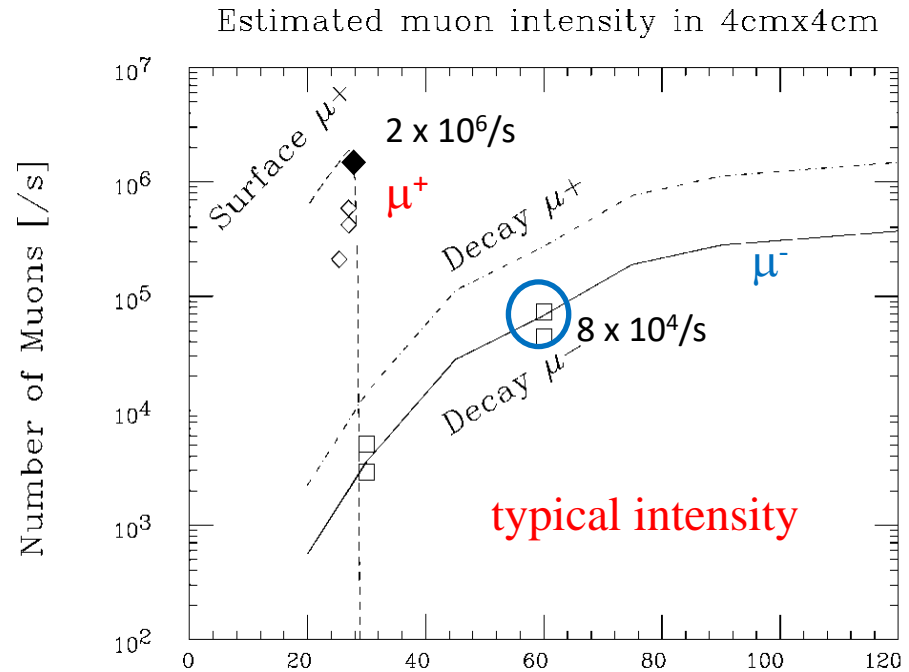
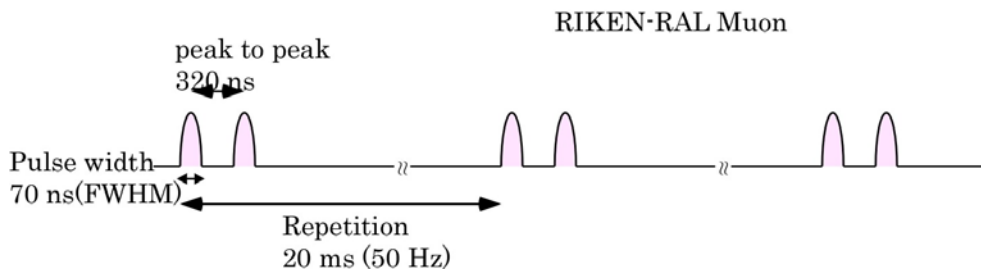
$\sigma_x = 1.5$ cm, $\sigma_y = 1.6$ cm
($\sim 10\text{cm}^2$, FWHM)

J-PARC D-line 陽子パワー5倍、生成標的2倍, 25 Hz

ダブルパルス

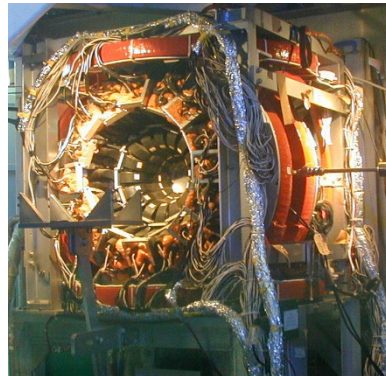
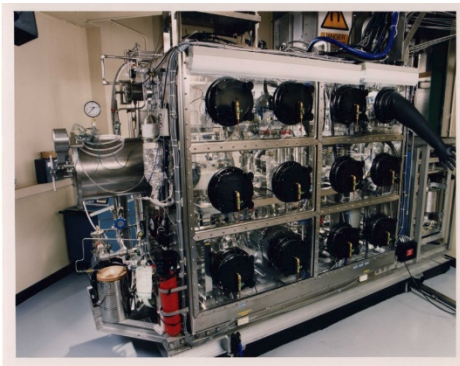
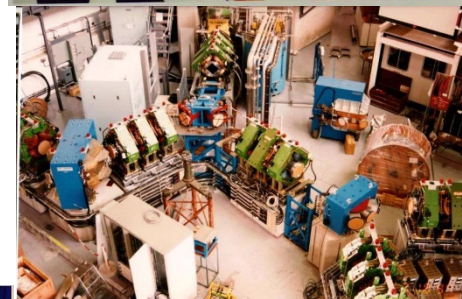
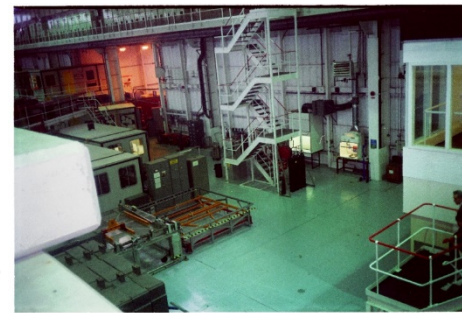
(キッカーによりシングルパルス化可能)

50Hz (10 Hz分をTS2に間引き, 4-1-4-1)



理研RALミュオンの34年

- 1986,1988 KEK(東大中間子施設 since 1980)での μ CF
- 1989 物質内低温核融合(Fleischmann/Pons, Jones)、予算申請、永嶺主任
- 1990 日英ミュオン科学協定調印、建設開始
- 1994 **ファーストミュオンビーム**
- 1995 施設開所式、ARGUSでの μ SR実験
- 1996 最初のミュオンdt核融合
- 2000 第2回協定, Port4建設
超低速ミュオンビーム
- 2002 **岩崎さん**が主任研究員として着任
超低速ミュオン、 μ CF、 μ A*, CHRONUSでの進展、
- 2010 第3回協定
chips照射実験、元素分析、proton radius, g-2準備など
- 2018 第4回協定(5年間)、施設管理をRALに移行、
- 2021 大規模改修実施のためにビーム休止
- 2023 RAL支所を閉じる、ミュオン施設再開、発展継続



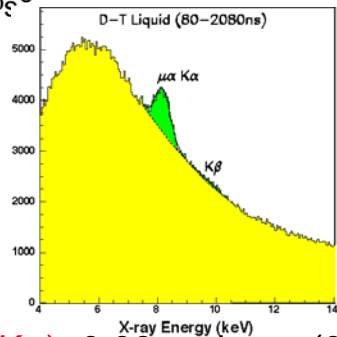
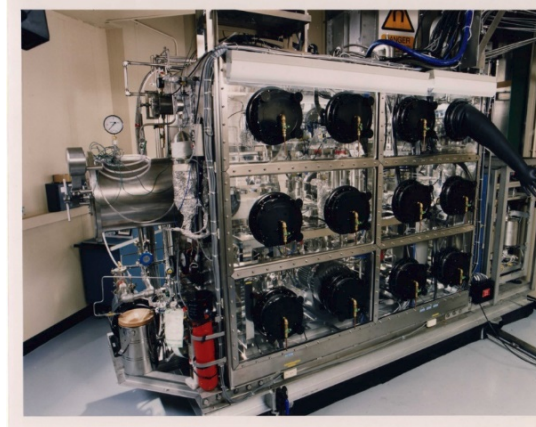
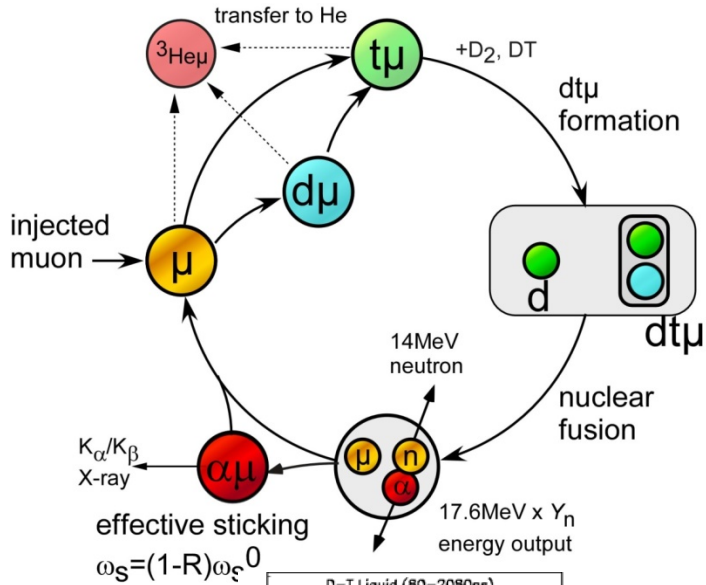
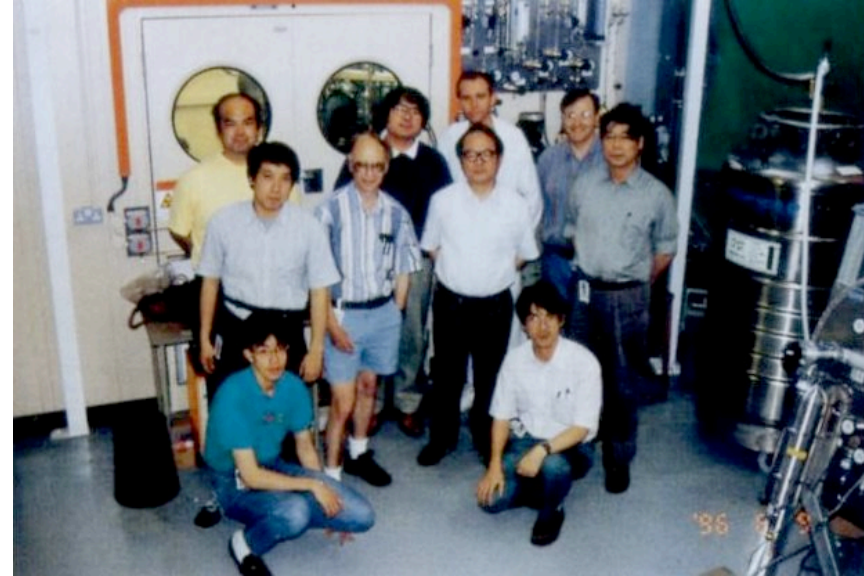
9 June 1996

ミュオン触媒核融合

ミュオンをD/Tに止めることにより核融合が進行
1個のミュオンで多数(~120回)の核融合

1986, 1988 KEK (DT密閉容器)実験の経験を基に、
1996年よりRALでdt- μ CF

大強度ミュオン、測定機器、トリチウム設備
幅広い実験条件での測定を可能に



パルスミュオンによりdt核融合 α 附着X線 信号が
トリチウム起源連続バックグラウンドに打ち勝つ
ミュオン損失現象の証明

$Y(K\beta) / Y(K\alpha) = 0.06 \ll \text{theory}(0.12),$

μCF理論計算との相互発展

MuCF Theory:

Prof. Kamimura, Dr. Kino, Dr. Hiyama, Dr. Koike,

Prof. Shimamura, Prof. Akaishi, ...

Precise calculation of $\mu\alpha$ -sticking
by Prof. Kamimura



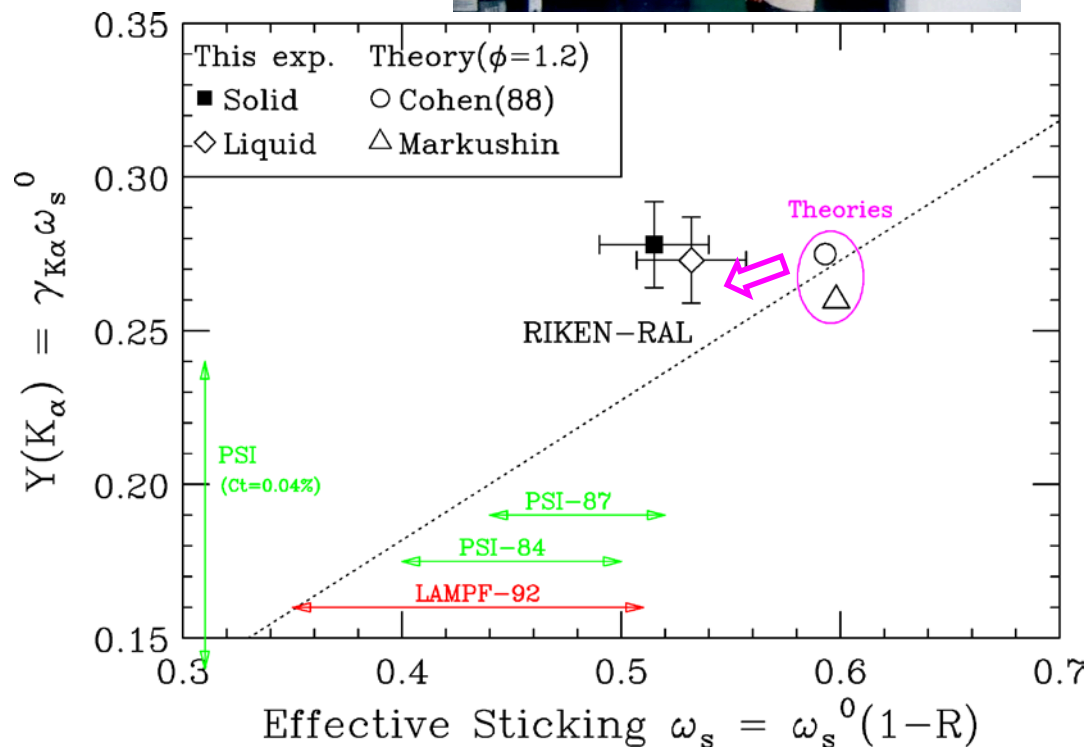
更なる理論計算の発展(4体計算)
木野氏: ミュオン分子過程の考察
上村氏: α 付着の高精度計算



発展@J-PARC

原子分子過程に関わるミュオン原子・分子X線精密測定

(木野、岡田、...)

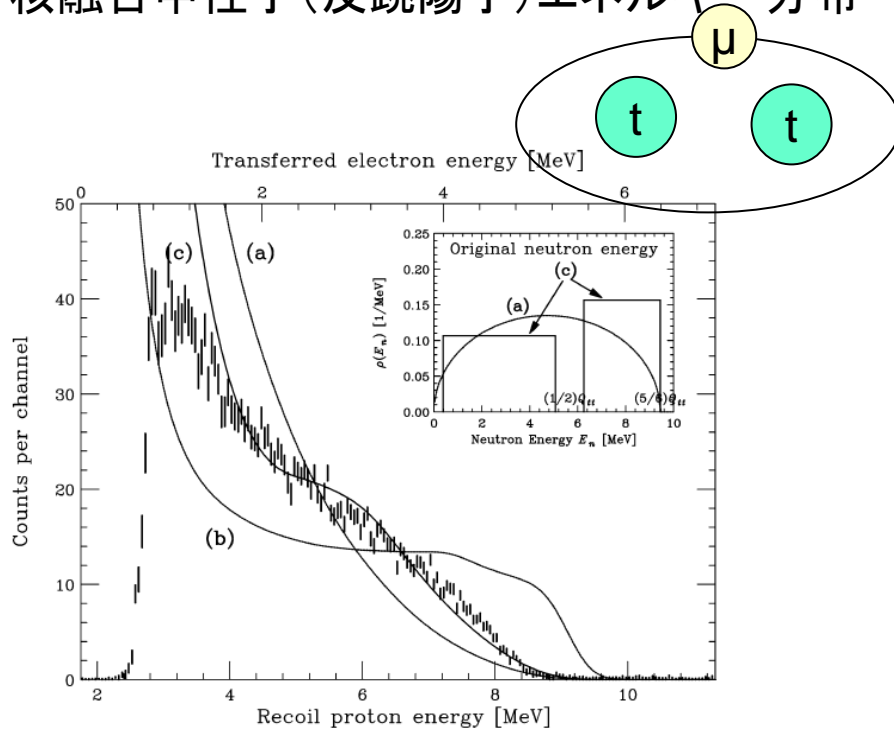


ミュオン触媒核融合：多数の成果

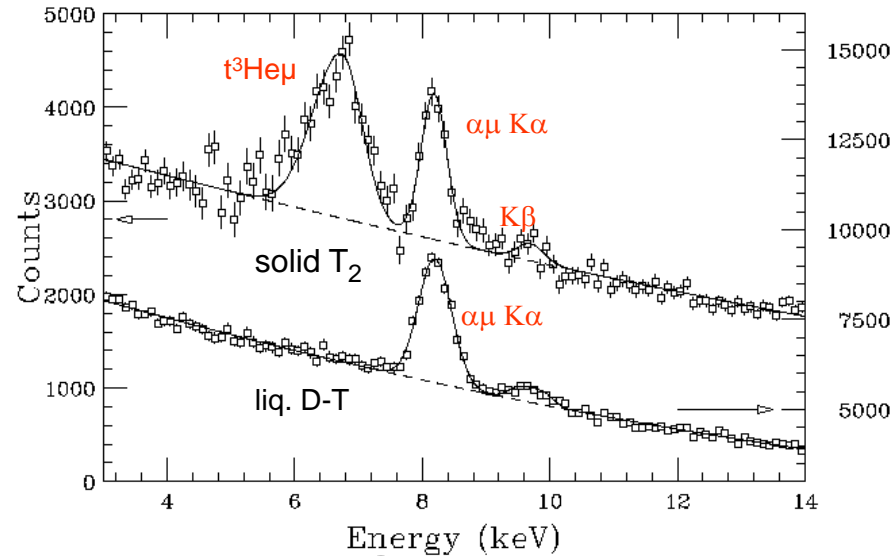
少数多体系の興味あるモデル

tt核融合

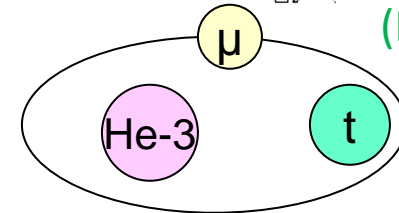
核融合中性子(反跳陽子)エネルギー分布



ttミュオン附着X線、ミュオン移行X線



(Matsuzaki et al.)



$tt\mu \rightarrow \alpha nn\mu$ 反応 $Q(11.33 \text{ MeV})$ で
 $n\alpha$ 相関の強いモデルでの計算と一致

T. Matsuzaki et al.,
 Phys. Lett. B557 (2003) 176

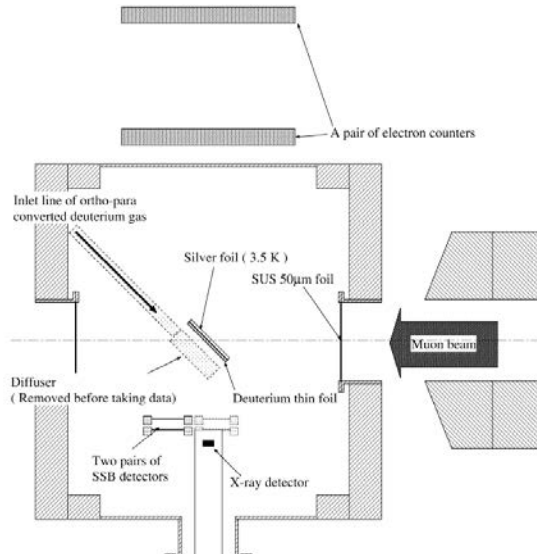
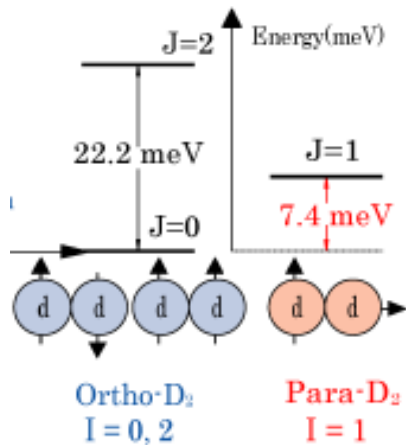
他にも

dd核融合のortho/para分子組成効果

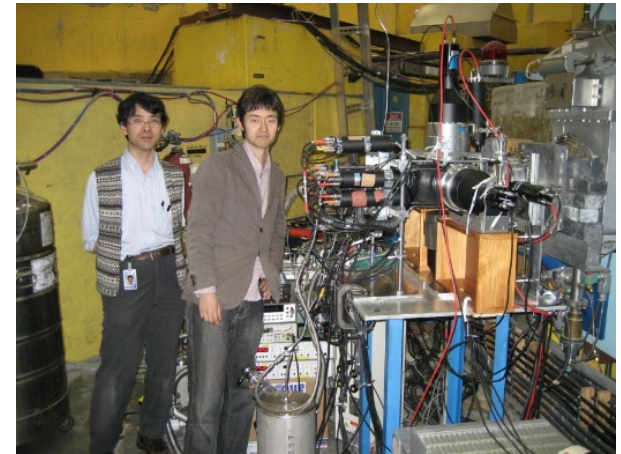
3He 蓄積効果、ミュオン移行反応

など

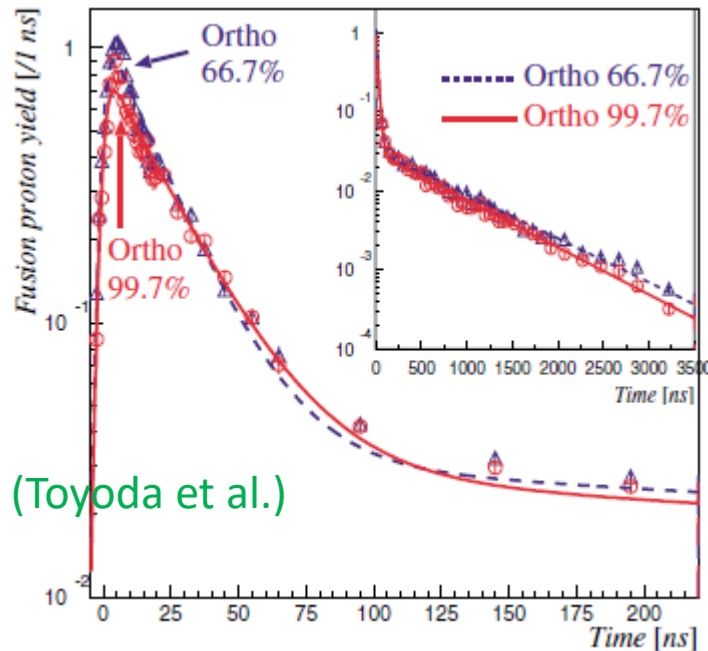
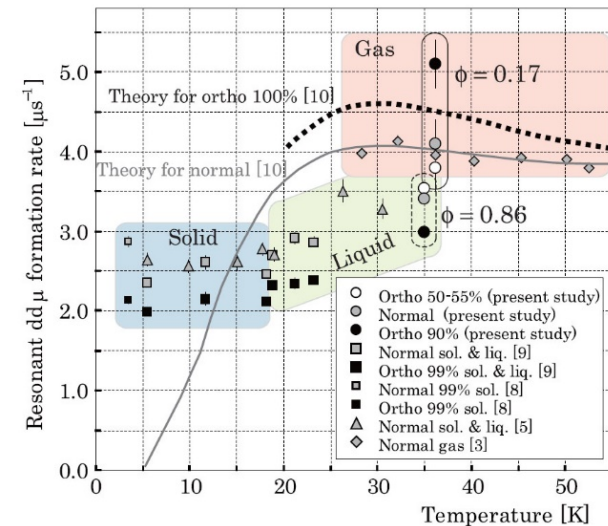
dd muCF - ortho-para effect @RAL(1999) and @TRIUMF(2000)



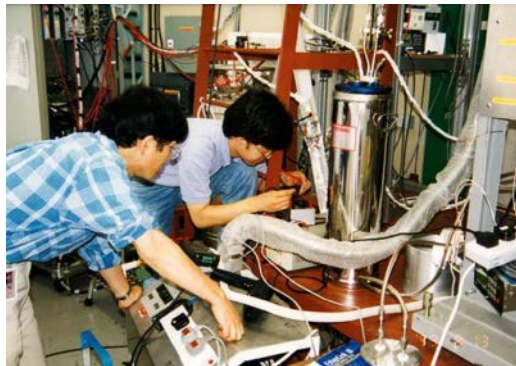
dd muCF@TRIUMF: 2003-2006



(Imao et al.)



(Toyoda et al.)



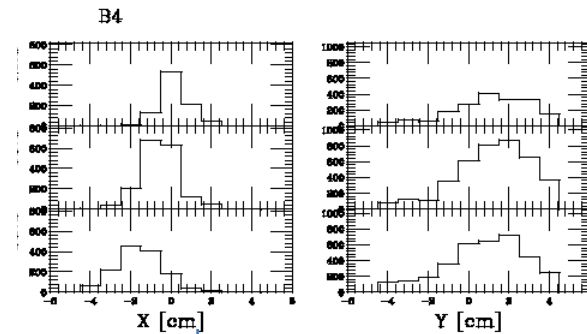
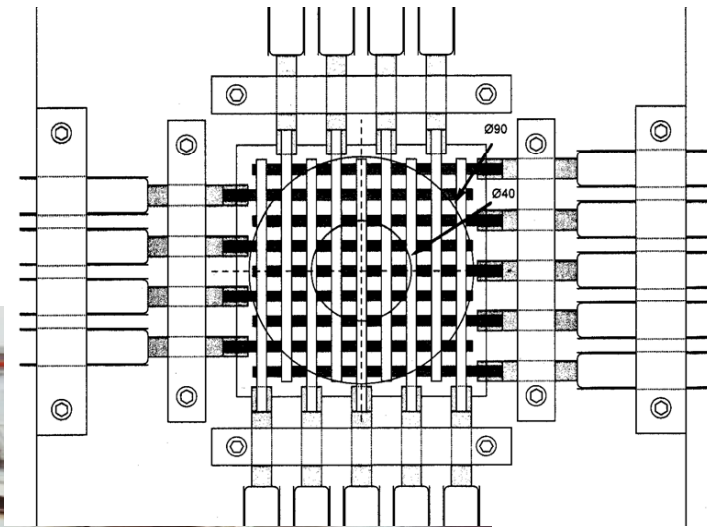
理研RAL 2002以降、
原子・原子核関係実験に絞って

Port4 のコミッショニング

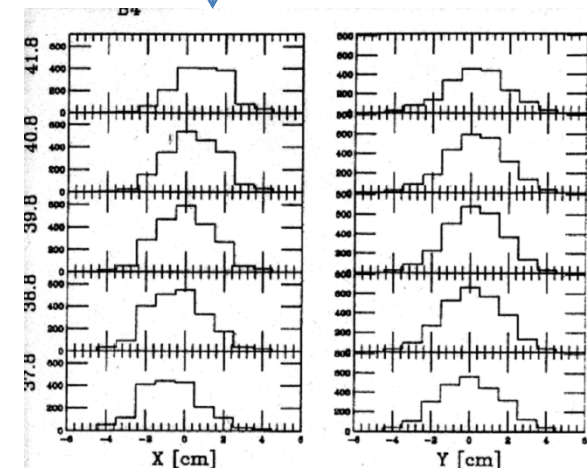
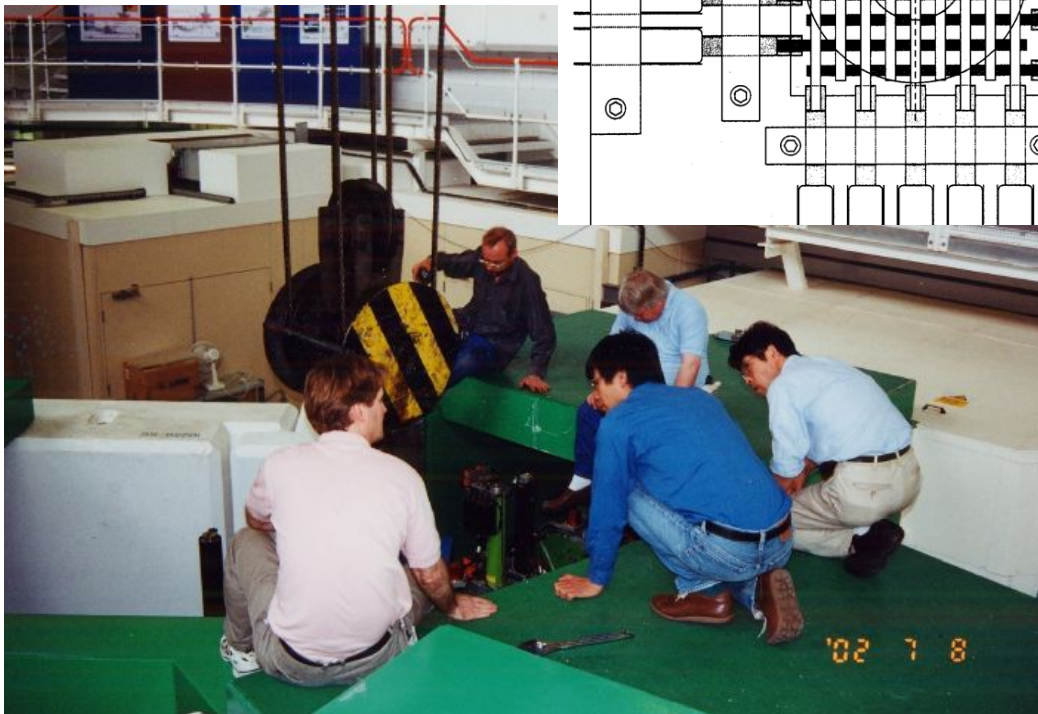
2001: 4本目のビームラインfirst beam、しかしビーム強度が期待の1/4

2002: 岩崎さんの提供したカウンターで急遽プロファイルモニター作成 P. Strasser et al.

わかったこと: Q磁石の振る舞いがおかしい、電極間ショートを修正



Shorted Q section fixed



μA^* (Port 4)

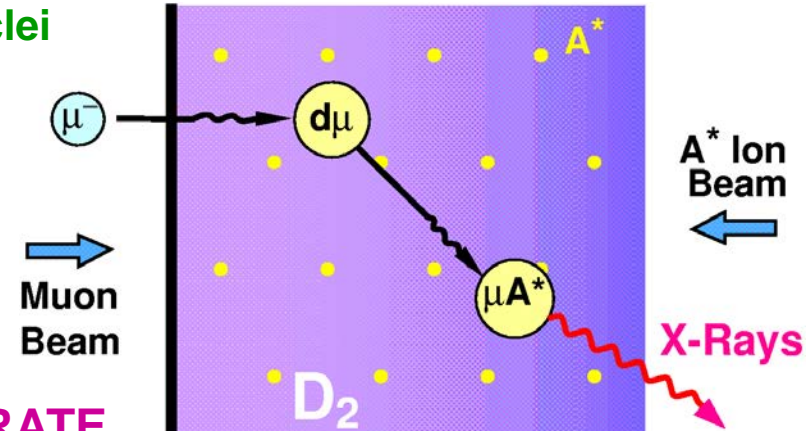
(P. Strasser, ...)



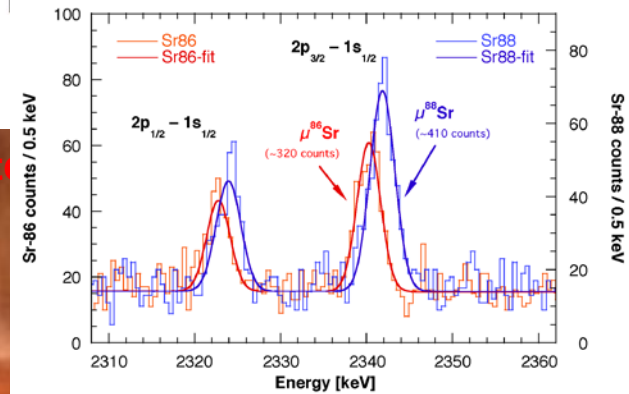
Development towards Muonic Atom Spectroscopy of Unstable Nuclei

- Nuclear Charge Distribution of short-lived Nuclei
- SOLID HYDROGEN FILM to stop both μ and A^*
- MUON TRANSFER $\mu H + A_z^* \rightarrow \mu A_z^* + H$
- TRANSFER RATE $\lambda_z \approx C_z Z 10^{10} \text{ s}^{-1}$

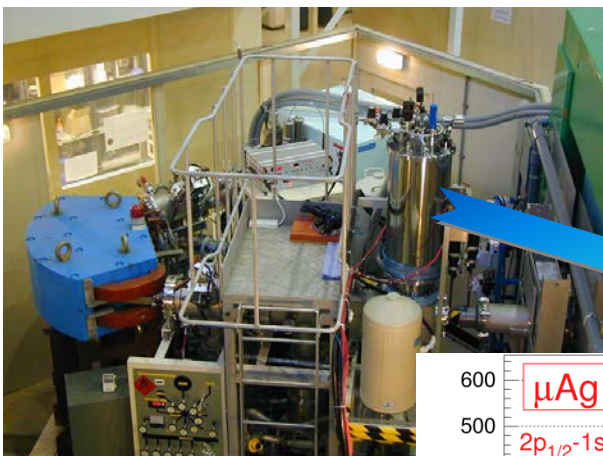
Basic Concept: Solid Deuterium



HIGH TRANSFER RATE & HIGH EFFICIENCY

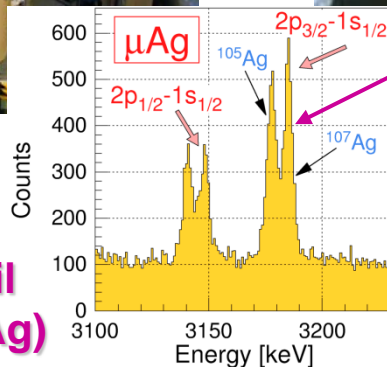


J-PARC: μ CFを利用した低速負ミュオン生成



μA^* Setup at RIKEN-RAL

Cold Foil (100- μ m Ag)



Target Syst

CHRONUS μ SRスペクトロメーター (2007-)

従来のARGUSスペクトロメーターの性能(192検出器)を3倍に増やす

大口徑 μ SR磁石

松崎、友野, et al

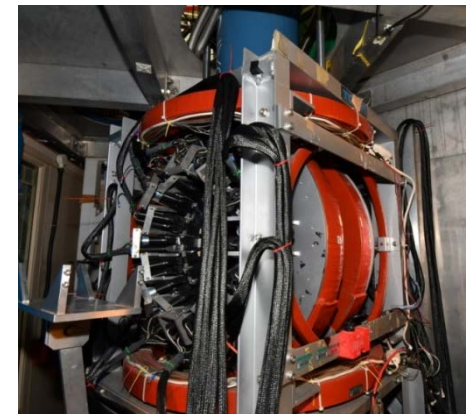
+検出器高集積化のために波長変換光ファイバー採用



CHROUS in Port4
since 2007
(303+303) シンチ
+WLSファイバー
+ 4x4 MAPMT



ARGUS in Port2
since 1995
(96+96) シンチ
+アクリルLG
+高磁場PMT



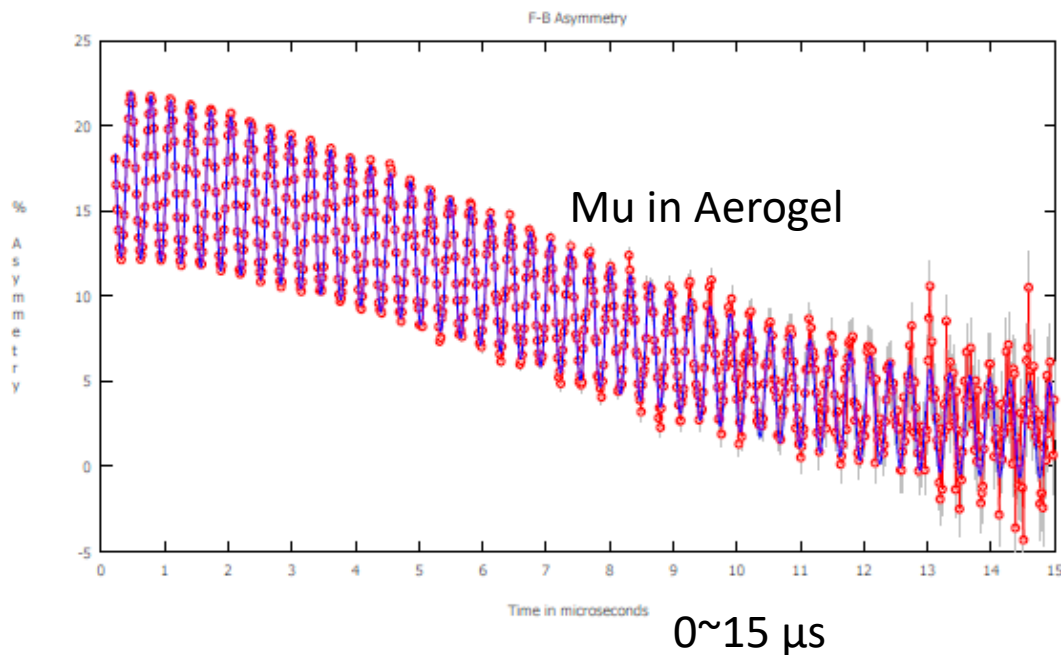
理研RALの μ SR装置

ARGUSとCHRONUSの同時実験可能

μ^+ SRデータレート 50~150 MEV/hr

μ^- SRデータレート ~30 MEV/hr

長時間緩和測定が可能

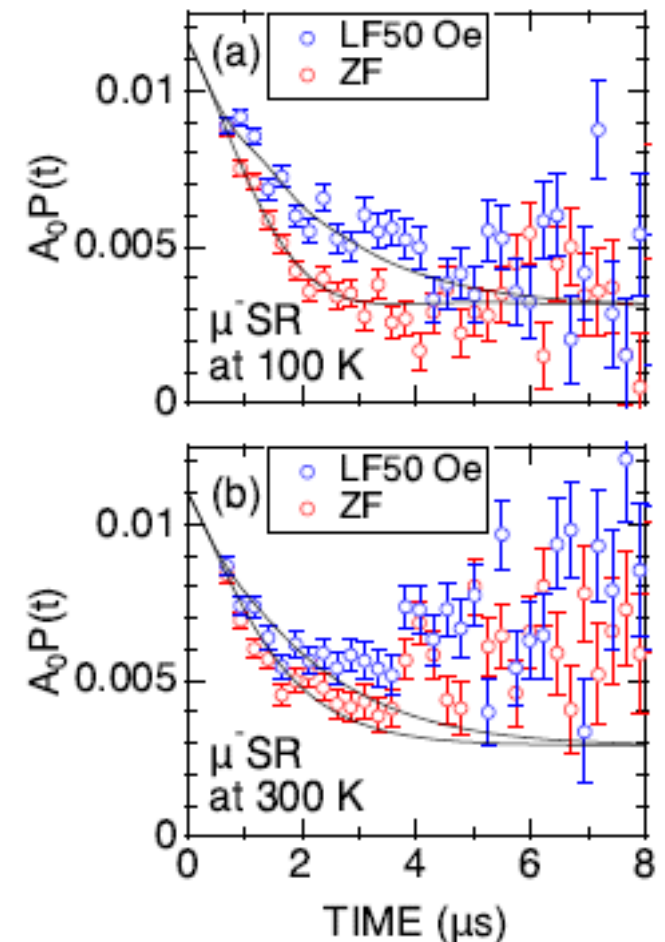


低バックグラウンドを利用して
負ミュオンスピン緩和も実施

J. Sugiyama et al.,

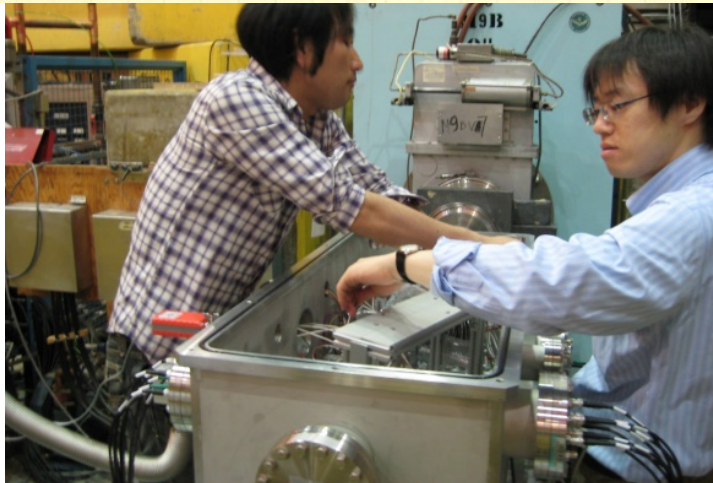
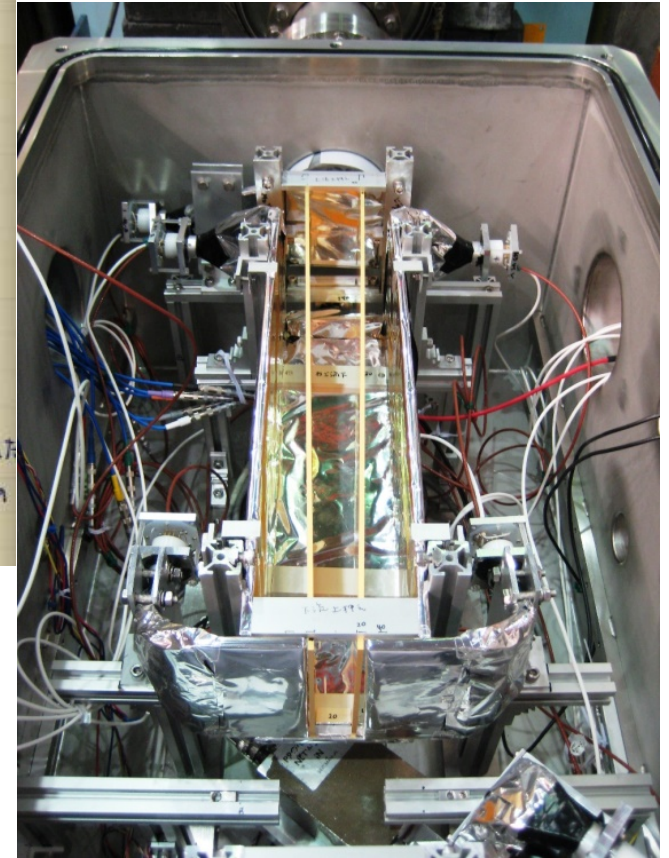
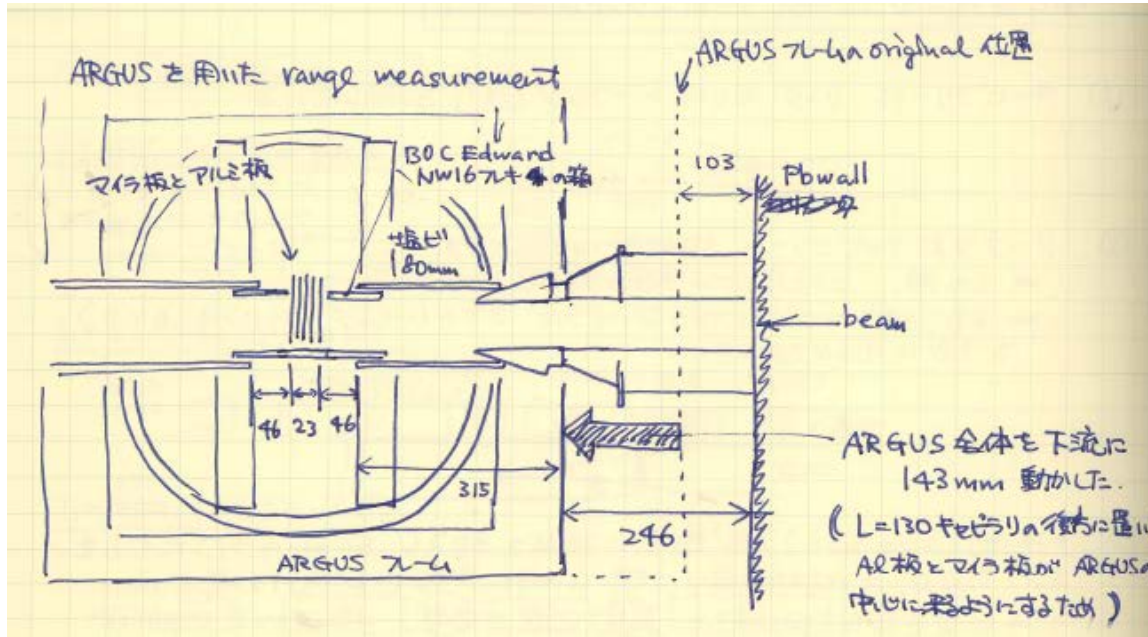
μ^- SR in LiMnPO₄

Phys. Rev. Res. 2, 033161 (2020)



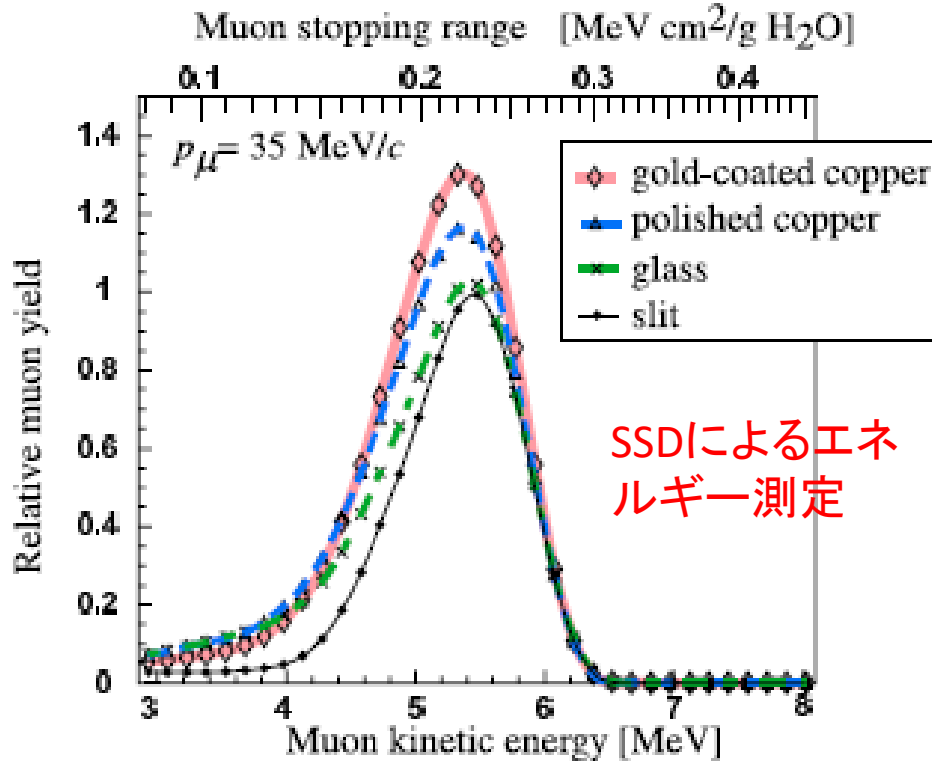
Muon focusing with capillary tube @RAL (2006) & TRIUMF (2008-2009)

ミュオン高輝度化装置として、キャピラリーを用いる可能性
低速イオンビームで収束効果が見られていた(細胞照射への応用など)



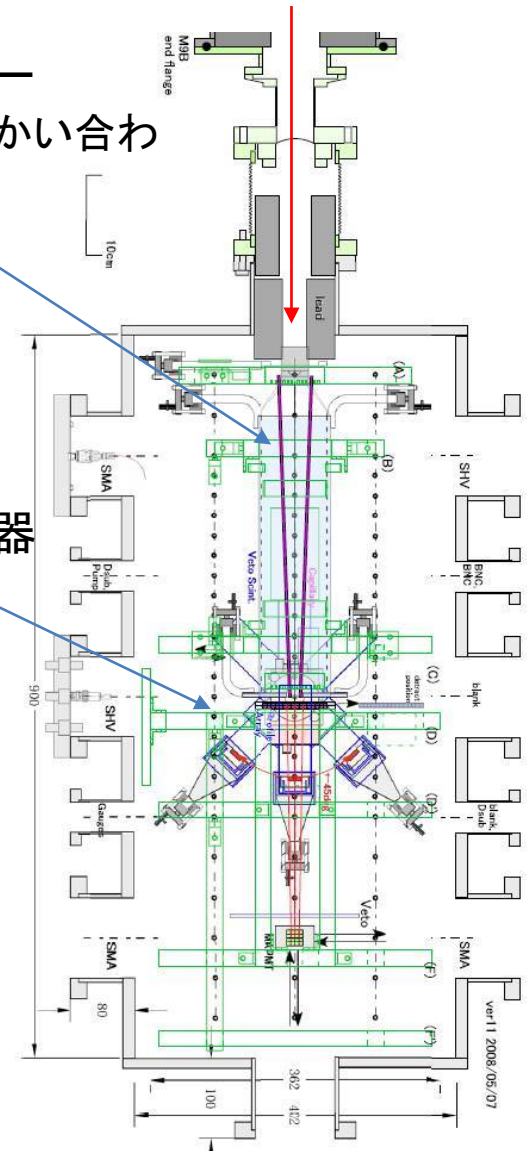
原子物理研との共同研究
(Tomono, Kojima, Ikeda, et al)

キャピラリー効果



キャピラリー
(というか向かい合わせの平板)

SSD検出器



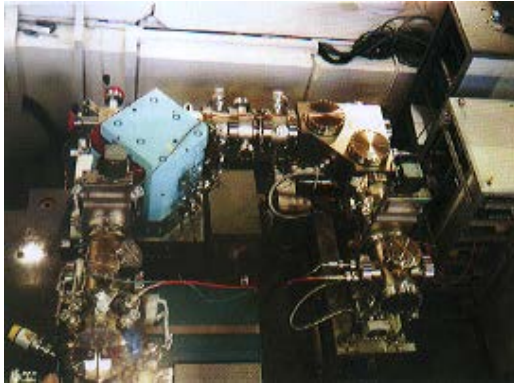
ミュオンの収束作用による増加が見られた(40%)

ミュオンが内壁表面で跳ね返される効果で解釈(イオン実験と速度領域が違う)
キャピラリー最適化で例えばmuon g-2/EDM実験でのmuon数増大

超低速ミュオンビームの開発(Port3)

松田さんの講演

Ultra slow muon beam by laser ionization of thermal muonium



2000- RAL Port3にて性能実証
(大強度ミュオンビーム+大強度Lyman α)



(P. Bakule, Y. Matsud, Y. Miyake, K. Shimomura, S. Makimura, a, ...)

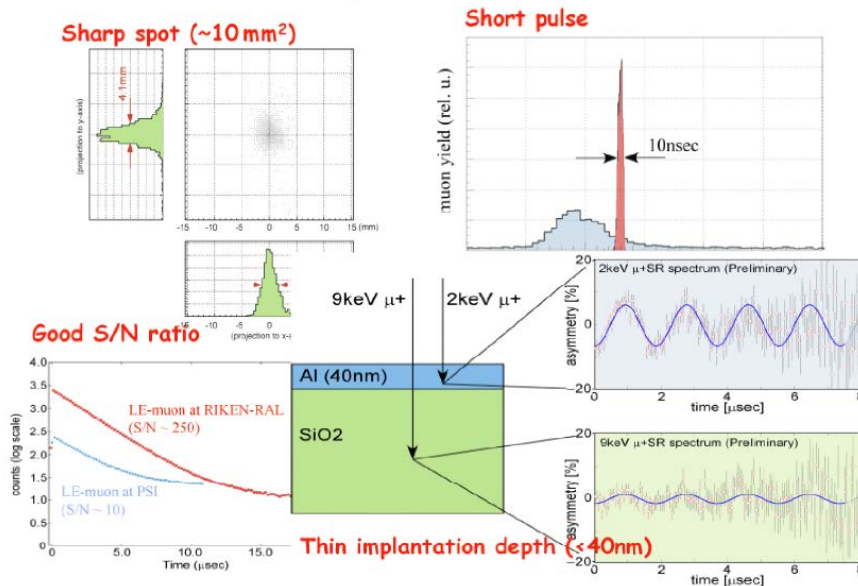
J-PARCでの超低速ミュオンビーム(U-line)

J-PARCでのmuon g-2/EDM(H-line)

Lyman- α 大強度化

シリカエアロゲルの開発

Laser ionizing Ultra-Slow muon beam



超低速ミュオンへの理研の貢献:2010以降



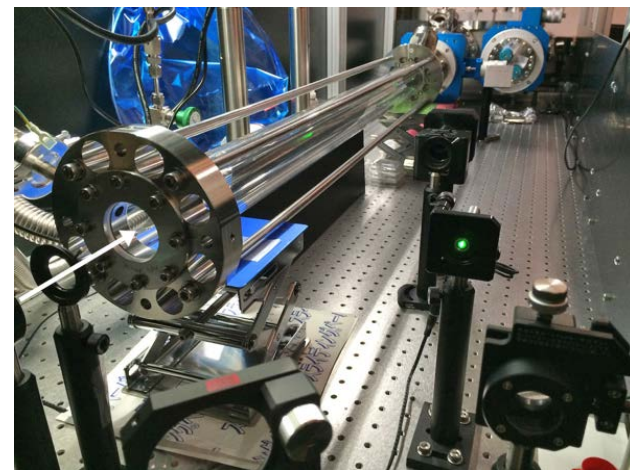
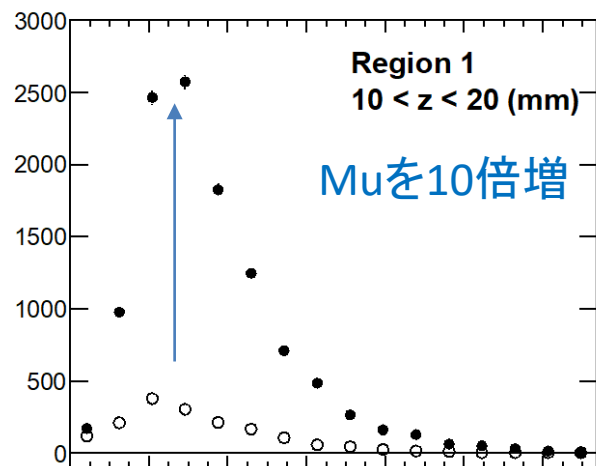
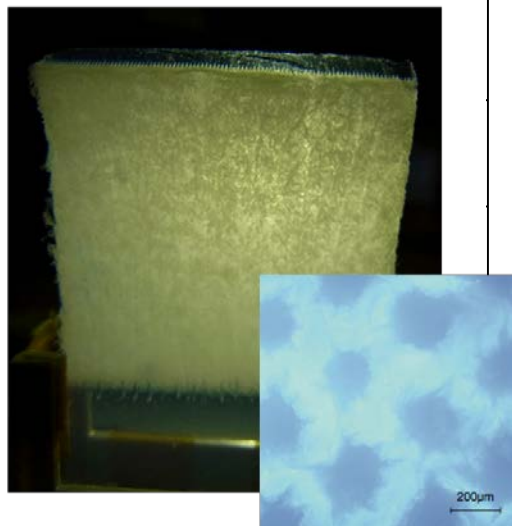
鳥養新学術(超低速ミュオン顕微鏡)の分担班として
muon g-2実験に必要な超低速ミュオンの大強度化(2011-2016)

Mu発生源としてのシリカ エアロゲルの開発

TRIUMFでの測定 2011-
表面積を増やすアイデア2013
レーザー加工(大石)

大強度Lyman- α レーザー開発
(和田グループとの共同研究)

Silica aerogel with holes

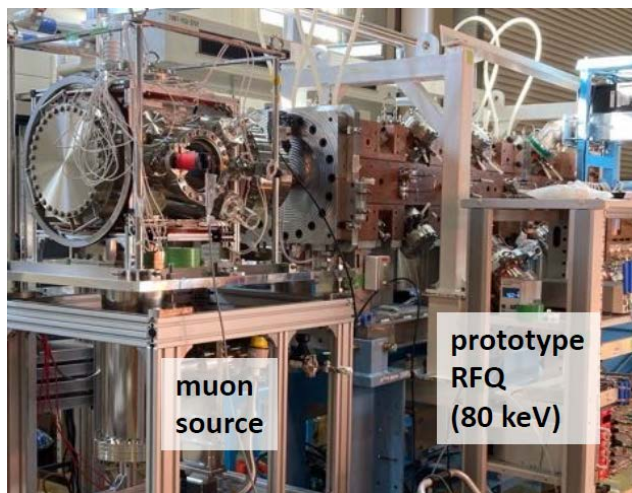
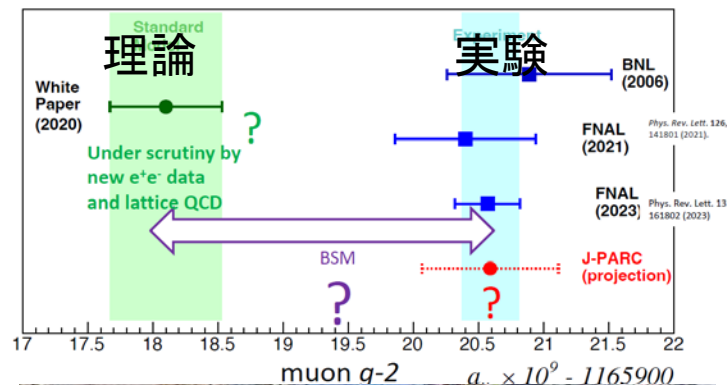


muon g-2/EDM実験の進捗

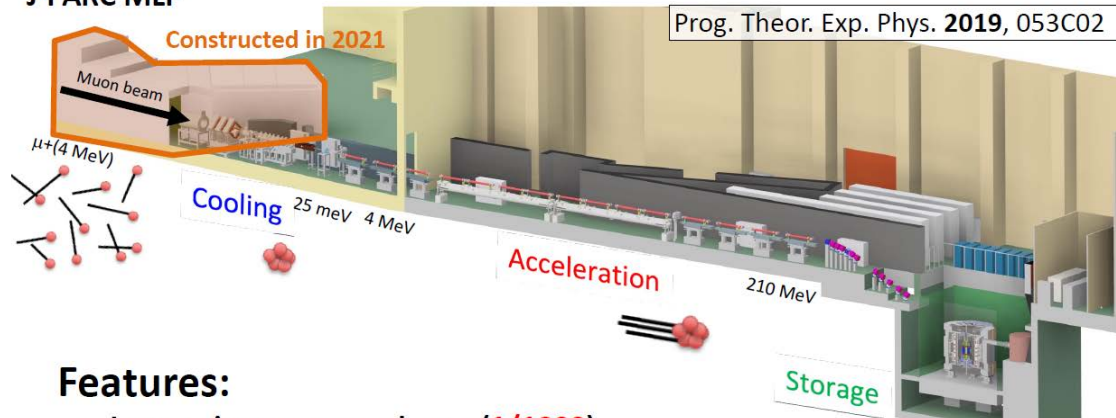
FNALのg-2実験がRUN1, RUN2/3の結果を発表(2021,2023)

BNL実験とconsistentで理論とは~4σのずれ

J-PARC muon g-2/EDM実験 (E34)準備が進行
世界初のミュオン加速による
低エミッタンスビーム(soon)



2028年Physics RUNを目指す
J-PARC MLF



Features:

- Low emittance muon beam (**1/1000**)
- No strong focusing (**1/1000**) & good injection eff. (**x10**)
- Compact storage ring (**1/20**)

半導体ソフトウェア – Port 4

- RALでのミュオンによるメモリーソフトウェア測定2013-

Bias Dependence of Muon-Induced Single Event Upsets in 28 nm Static Random Access Memories

Brian D. Sierawski, Bharat Bhuva, Robert Reed
Institute for Space and Defense Electronics
Vanderbilt University
Nashville, TN 37212
brian.sierawski@vanderbilt.edu

Nelson Tam
Marvell Semiconductor
Santa Clara, CA 95054

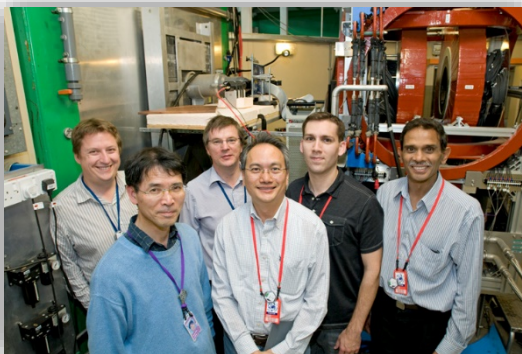
Balaji Narasimham
Broadcom Corporation
Irvine, CA 92617

Katsuhiko Ishida
RIKEN Nishina Center, RIKEN
Wako, Saitama, Japan

Adrian Hillier
STFC Rutherford Appleton Laboratory
Didcot, Oxfordshire OX11 0QX, United Kingdom

Michael Trinczek, Ewart Blackmore
TRIUMF
Vancouver, BC V6T 2A3, Canada

Shi-Jie Wen, Richard Wong
Cisco Systems
San Jose, CA 95134



Solar flares, muons and microelectronics – what's the connection?

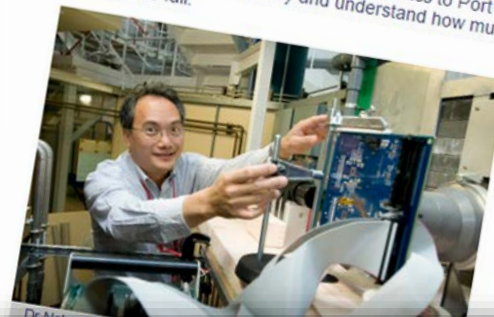
Here on Earth, such spectacular solar flares seem far away but in fact these extra-terrestrial events are a cause for concern in our modern digital world.

Of concern are so called single event upsets (SEUs), which occur when high energy particles hit microelectronics, causing devices to malfunction. Solar flares and cosmic rays are the main sources of such particles, and with the ubiquitous nature and rapid advances in microelectronics, it's an area of intense interest.



These images from NASA's Solar Dynamics Observatory show four X-class flares emitted on May 12-14, 2013 – the first four X-class flares of 2013. Credit: NASA/SDO/GSFC
[View full-size image](#)

So far the particles most under scrutiny have been neutrons, generated in the Earth's atmosphere by cosmic rays. But recently attention has turned to muons, and this week a group from Vanderbilt University and Marvell Semiconductor in the US have brought microelectronics to Port 4 at the RIKEN-RAL muon facility at ISIS, to try and understand how muons could cause these devices to fail.



Comparison of the Effects of Muon and Low-Energy Proton Irradiation on a 65 nm Low-Power SRAM

A. Bosser, V. Gupta, A. Javanainen, G. Tsiligiannis, A. Hillier, K. Ishida, H. Puchner, F. Saigné, F. Wrobel, A. Virtanen and L. Dilillo

J-PARC

負ミュオンでのエラーレート増加の発見

基本原理実証(渡辺、川瀬、新倉、...)

RAL, J-PARC

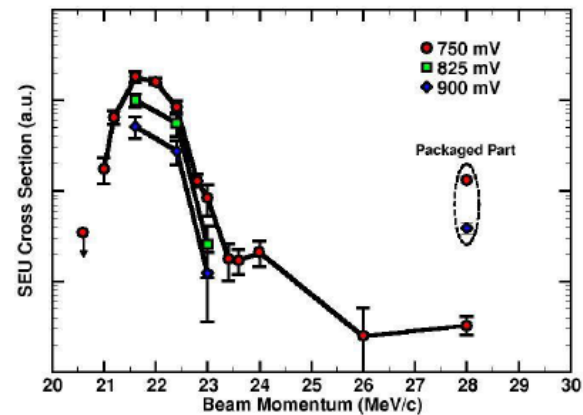
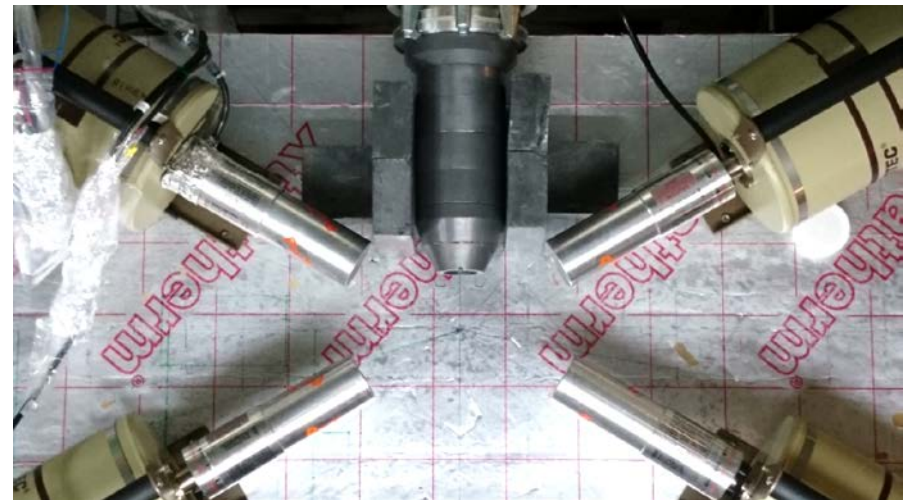


Figure 4: Muon-induced single event upsets in SRAM B1 as a function of beam momentum at RIKEN-RAL.

Muons and Elemental Analysis – Port 4

ミュオン原子X線を利用した非破壊元素分析

主にISIS側によるプログラム
(英国・ヨーロッパの貨幣、考古物、合成試料,...)



Probing the past with negative muons

Using negative muons as a tool for elemental analysis is now possible at ISIS. Muon scientists, together with the Universities of Oxford and Warwick, are currently developing the technique on the RIKEN Port 4 to non-destructively probe the composition of archaeological objects – including gold and silver coins from the Roman period and the Mary Rose – paving the way for future studies on other archaeological artefacts, engineering samples, bio-systems, and battery materials.



Figure 2. Gold Roman coin dated AD 74-75, analysed on RIKEN Port 4. [View full-size image](#)

Elemental analysis is a process in which the composition of a sample is determined. These techniques are often destructive and damaging, and therefore unsuitable for the analysis of valuable samples such as those used in engineering, and earth and archaeological sciences. Negative muons, on the other hand, can offer non-destructive multi-elemental analyses, based on the measurement of characteristic muonic X-rays emitted after the muon has been captured by the nuclei inside the sample (Figure 1).

Since the muon has a mass approximately 200 times that of an electron and orbits closer to the nucleus, the energy of a muonic X-ray transition is much greater than that of an electron transition. These high energy muonic X-rays (2 keV-10 MeV) are intense enough to pass through the sample material from the deep interior, without significant photon self-absorption, and can be easily detected by a semiconductor detector. The depth of muon implantation in the sample, and therefore depth of measurement, can be controlled by adjusting the incident muon momentum. The depth of muon momenta (several 10s of MeV/c) have a relatively high permeability and this, combined with high energy muonic X-ray emissions, allows for investigation of elemental composition from micrometres to centimetres below the sample surface. Moreover, the sample is not activated by implanting muons.

ミュオン核データ

ミュオン核吸収のリバイバル

負ミュオン核吸収で核に低スピン高励起を持ち込む

どういう状態ができて、どういう粒子(n,p, α ,..., β , γ)を放出するか

負ミュオン照射の放射化のデータベースがあまりない

ミュオンで核変換

半導体照射効果にも関連

生成核データと荷電粒子測定を併用

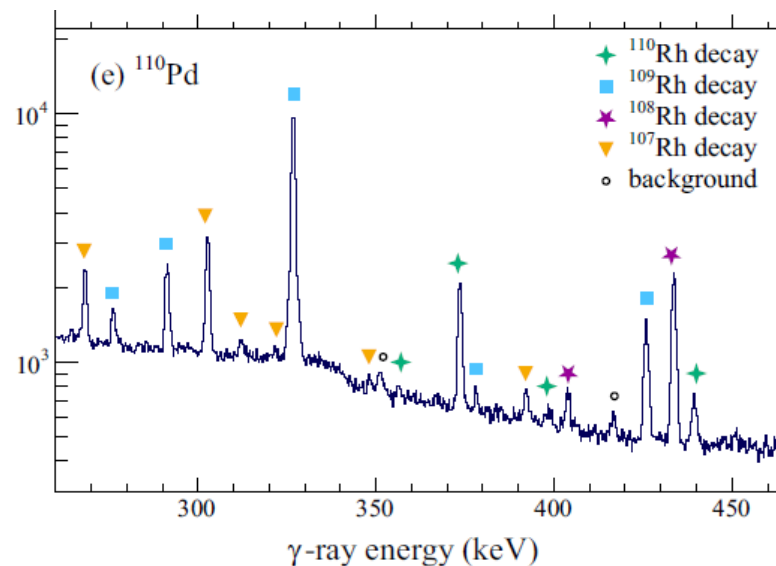
Niikura, Matsuzaki et al.

パルスミュオンの特徴: 照射 + 放射化測定 (sub ms以上の核に対応) の時間分離
→ 低バックグラウンド

Muon capture in Pd (2017)



PHYSICAL REVIEW C 109, 014328 (2024)



MuP (2015~)

陽子荷電半径の謎

μp 原子を用いた陽子半径測定@PSI (2010)

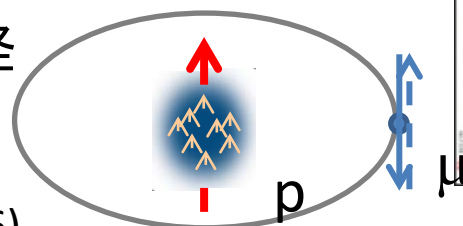
(ミュオン測定と他の食い違い 7σ)

超微細構造エネルギーから磁気半径

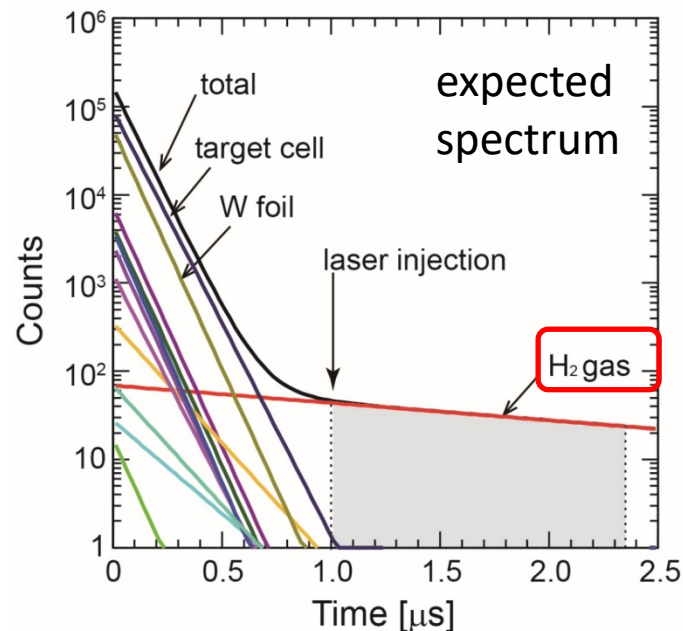
Detector background measurement (2016),

Muon stopping test in gas (2017)

Laser development, ...

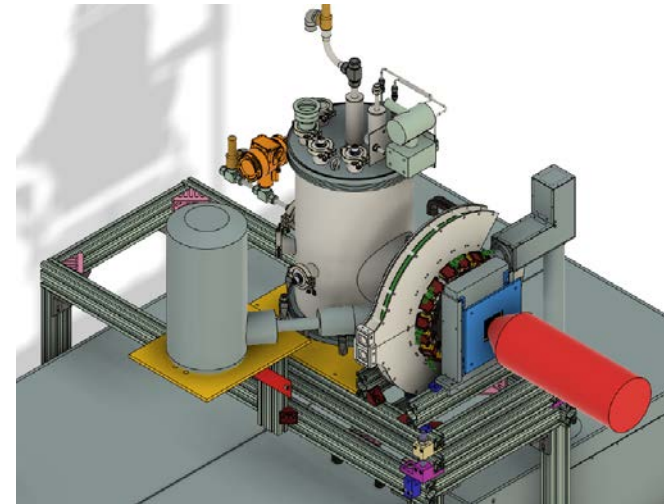
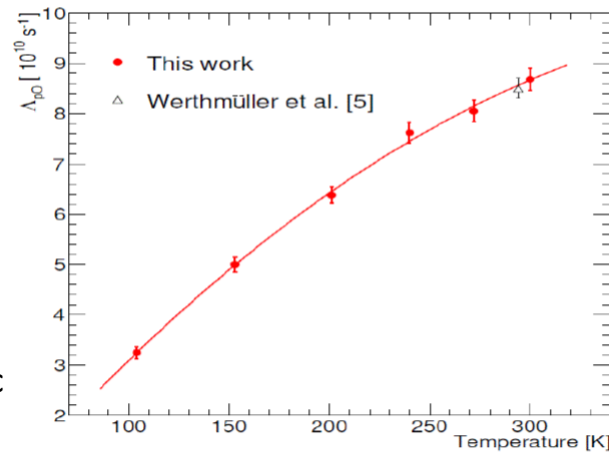
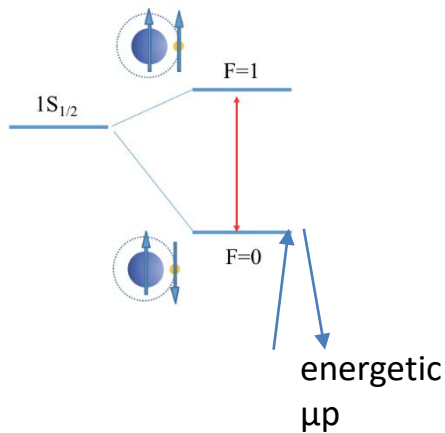


more detail by 神田さん

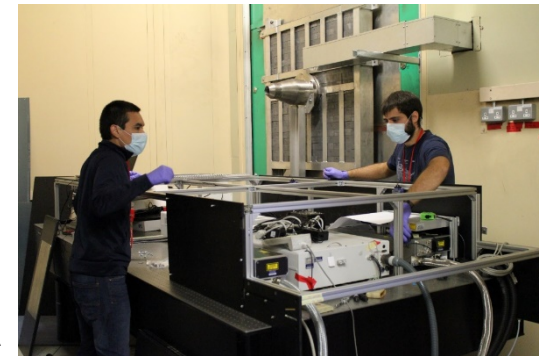


陽子半径測定 - Port4, Port 1

イタリアグループも別の原理で測定
RIKEN レーザー遷移による偏極測定
FAMU レーザー活性化と添加酸素への移行速度変化



D2中のミュオンのO2不純物への移行速度



FAMU: 2014-2018 RAL Port4での実験で移行速度の温度変化を確認
励起レーザー(6.8 μm)、レーザー照射標的をPort1に設置⇒本測定を開始

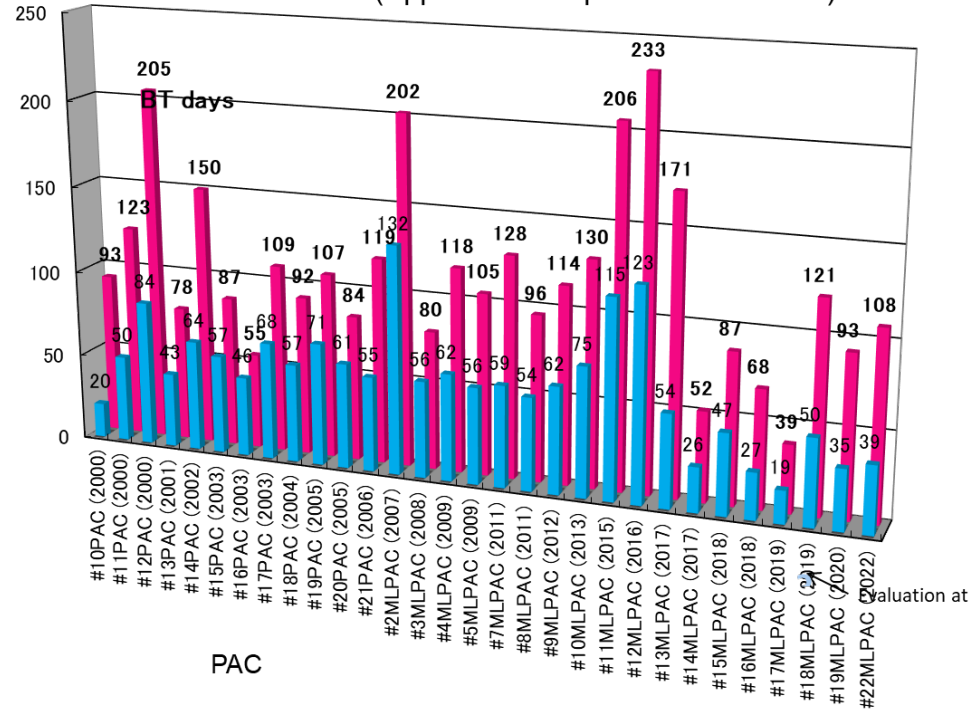
課題採択方式による施設ビームタイム運営(PAC)

RIKEN-RAL PAC 1st (1995)-21st(2006)

ML-PAC 1st (2006) - 22nd (2022)



Approved/Proposed RIKEN-RAL Beam Time Days at PAC
(Approved / Proposed ratio = 0.52)



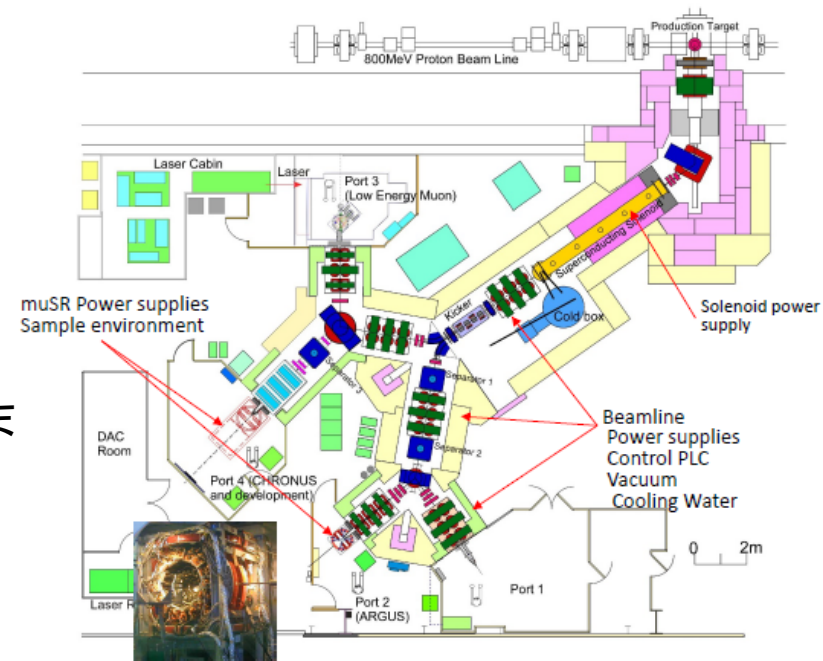
RAL支所閉所(2023)とともに理研独自のミュオン課題PACを廃止
 今後はISISに直接申請することで実験可能

RIKEN-RAL施設の最近事情

2018年に**施設管理を理研からRALに移管した**
5年間の協定
将来にわたり運転の信頼性を確保するため
建設当初(1990-)以来の機器を改修

2020年4月～

コロナ禍で日本研究者が実験できない状況のまま
2021年7月から**施設改修**に着手
磁石電源、ソレノイド電源、真空ポンプ、冷却etc
2022年12月に完了

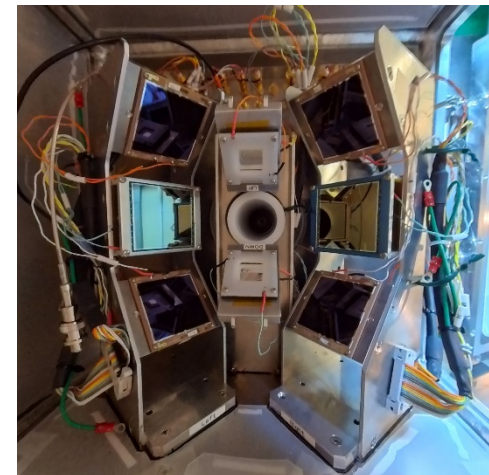


同時に実施した中性子標的のコミッショニング遅れで

2023年7月にやっと**本格ミュオン実験再開**

シリコン中のミュオン核吸収(生成荷電粒子、生成核)
陽子半径、 μ SR

今後はISISを通した実験課題申請



まとめ

RIKEN-RALミュオン施設

日本で開始されたパルス状ミュオン施設(1985-)を
英国で30倍の陽子強度で発展させた
日本が実験課題をリード

特に2002以降の進展を、主に原子・原子核関連実験に絞って紹介
J-PARC稼働(2008)後も日本・世界のミュオン科学研究に貢献

大規模改修後、2023年7月に本格ミュオン利用実験再開