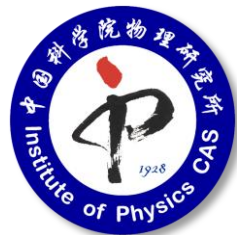




2022年缪子束加速和对撞技术及其应用论坛

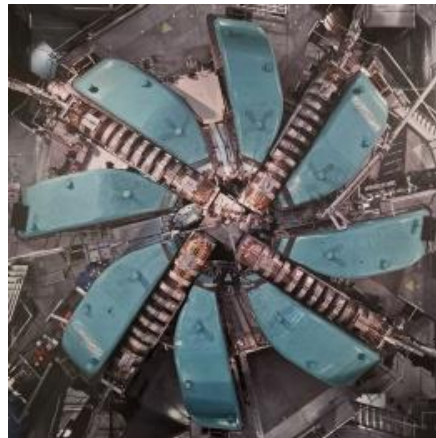
缪子源在凝聚态物理研究邻域的应用以及发展



俞理

li.yu@iphy.ac.cn

SC4, Institute of Physics, CAS, CN



SC4研究团队, 物理研究所(IOP), CAS



Research group **SC4**, IOP, Beijing

Prof. Z.X. Zhao (赵忠贤院士)研究团队

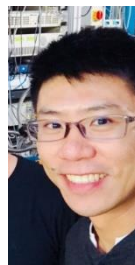
- ✓ High quality superconducting crystal & film synthesis;
 $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$, SmOFeAs , LiFeOHFeSe , ...
Focusing on FeSe-related systems!
- ✓ High precision transport and magnetic properties characterization;
PPMS, MPMS, MFM, ...
To find good & right question!
- ✓ Spectroscopic studies.
 μSR , IR, XS, Neutron, PES, ...
To find proper solution!

SC4研究团队, 物理研究所(IOP), CAS



Research group **SC4**, IOP, Beijing

Prof. Z.X. Zhao (赵忠贤院士)研究团队



Dr. C.N. Wang (王晨南)

PAUL SCHERRER INSTITUT



Prof. Michael J. Graf



Prof. Christian Bernhard

Outline报告大纲

➤ 缪子源的凝聚态应用(能做什么)

缪子产生及利用原理

缪子自旋共振/弛豫/旋转谱学(μ SR)

缪子激励X射线发射谱学研究(MIXE)

➤ 缪子源的类型以及缪子束参数要求(如何做?)

缪子源类型，靶站，及谱仪

连续型缪子源和脉冲型缪子源的比较

国际新型缪子源发展规划

倡议我国连续缪子源以及新型缪子谱仪

Outline报告大纲

➤ 缪子源的凝聚态应用(能做什么)

缪子产生及利用原理

缪子自旋共振/弛豫/旋转谱学(μ SR)

缪子激励X射线发射谱学研究(MIXE)

➤ 缪子源的类型以及缪子束参数要求(如何做?)

缪子源类型, 靶站, 及谱仪

连续型缪子源和脉冲型缪子源的比较

国际新型缪子源发展规划

倡议我国连续缪子源以及新型缪子谱仪

Outline报告大纲

➤ 缪子源的凝聚态应用(能做什么)

缪子产生及利用原理

缪子自旋共振/弛豫/旋转谱学(μ SR)

缪子激励X射线发射谱学研究(MIXE)

➤ 缪子源的类型以及缪子束参数要求(如何做?)

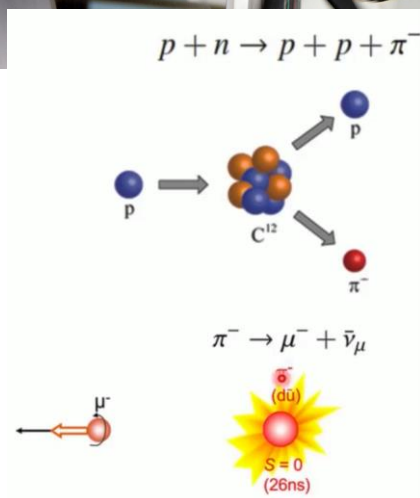
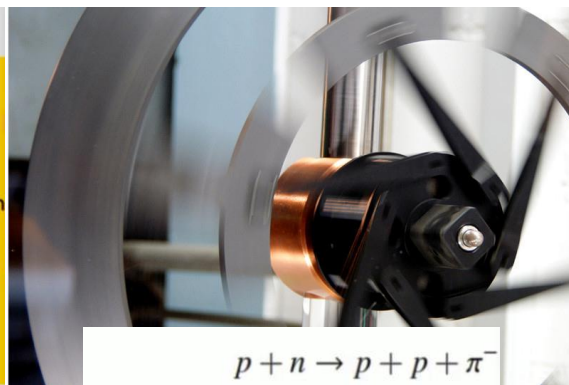
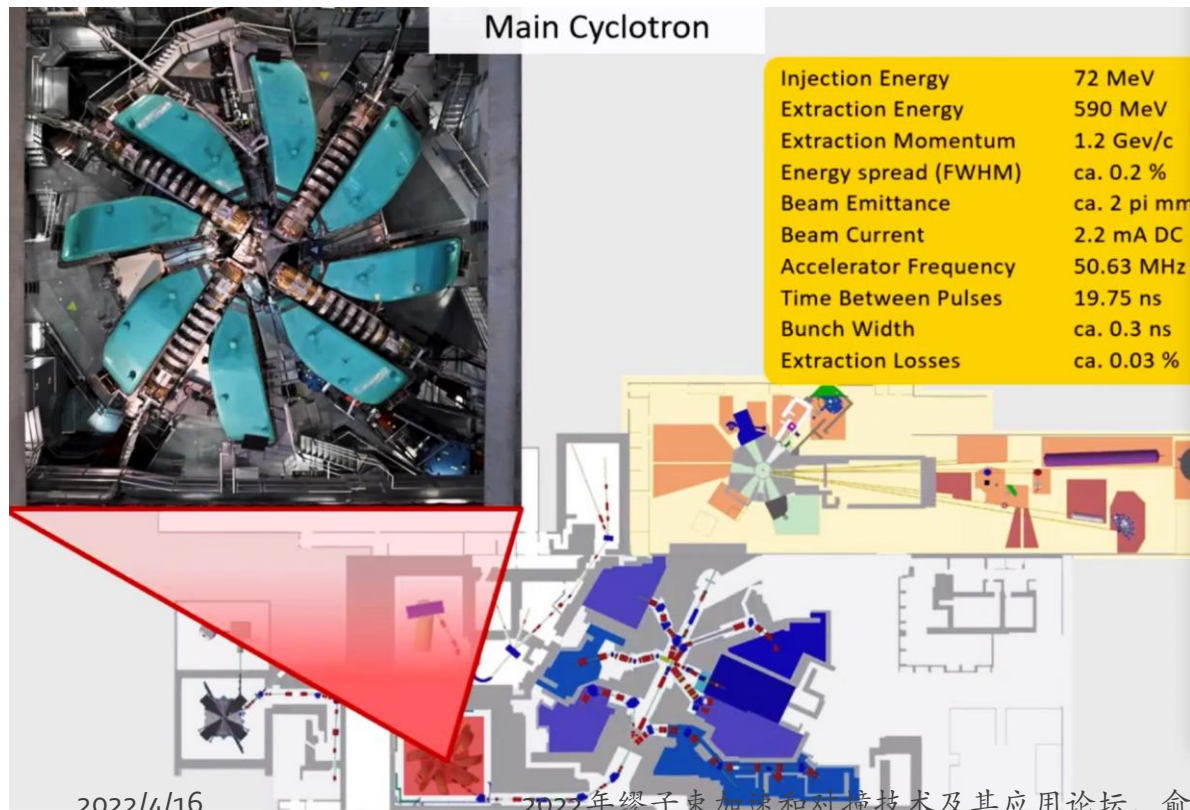
缪子源类型, 靶站, 及谱仪

连续型缪子源和脉冲型缪子源的比较

国际新型缪子源发展规划

倡议我国连续缪子源以及新型缪子谱仪

缪子源图示以及缪子束产生机理



三种不同得缪子束产生方式

- 1. 高能缪子束(High energy muon beams)

Homogeneous implantation in big and thick samples;

- 2. 表面缪子束(Surface muon beams)

Almost 100% muon spin polarization (good for μ SR)

- 3. 低动能缪子束(Low energy muon beams)

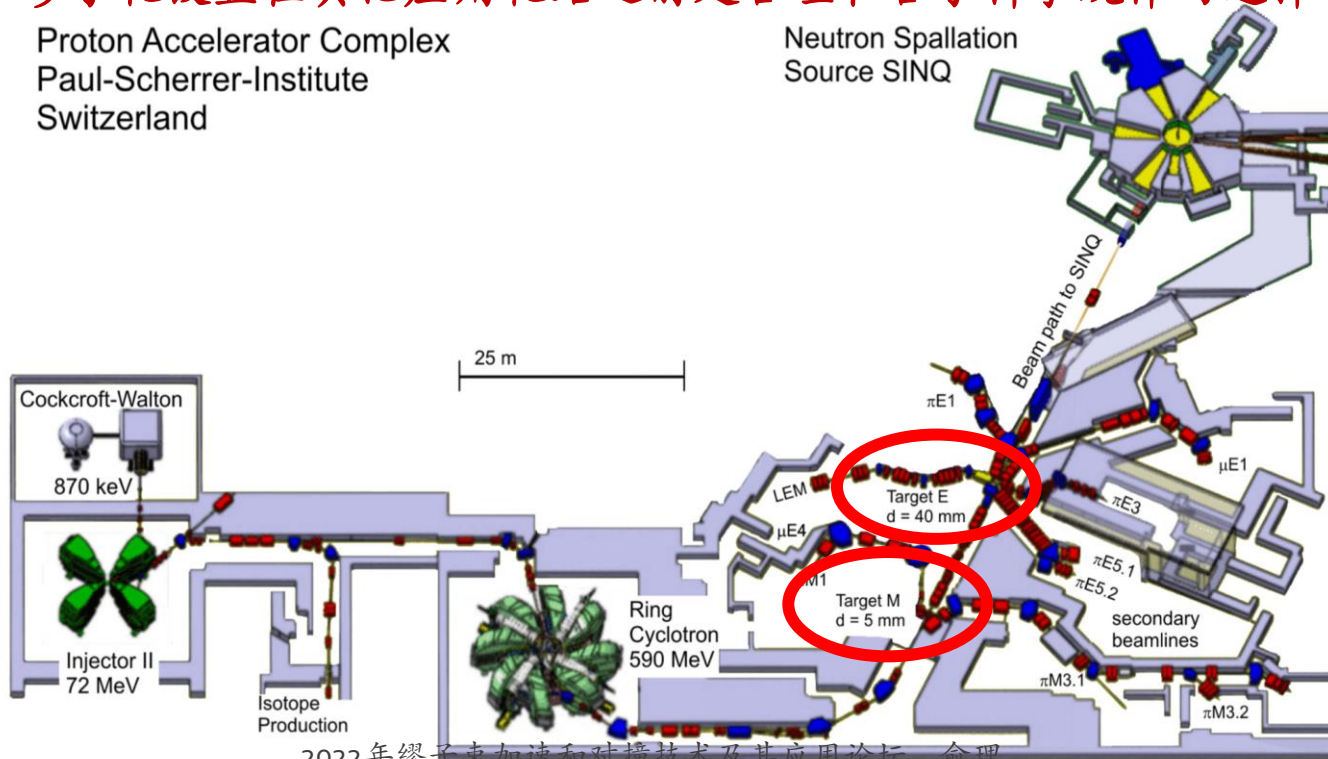
Nanometer size tunability of implantation depth; (good for film sample μ SR)

Beamline layout (PSI)

缪子靶设置在其他应用靶站之前是合理和合乎科学规律的选择

Proton Accelerator Complex
Paul-Scherrer-Institute
Switzerland

Neutron Spallation
Source SINQ



Outline报告大纲

➤ 缪子源的凝聚态应用(能做什么)

缪子产生及利用原理

缪子自旋共振/弛豫/旋转谱学(μ SR)

缪子激励X射线发射谱学研究(MIXE)

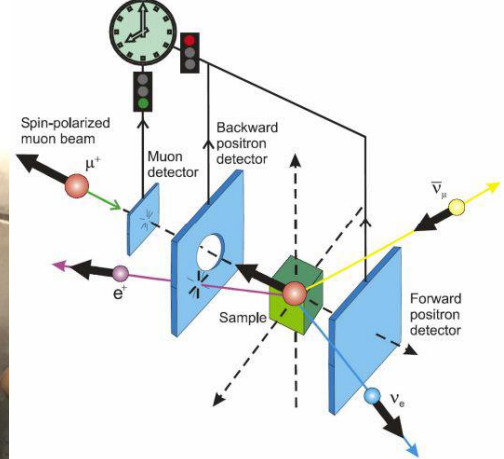
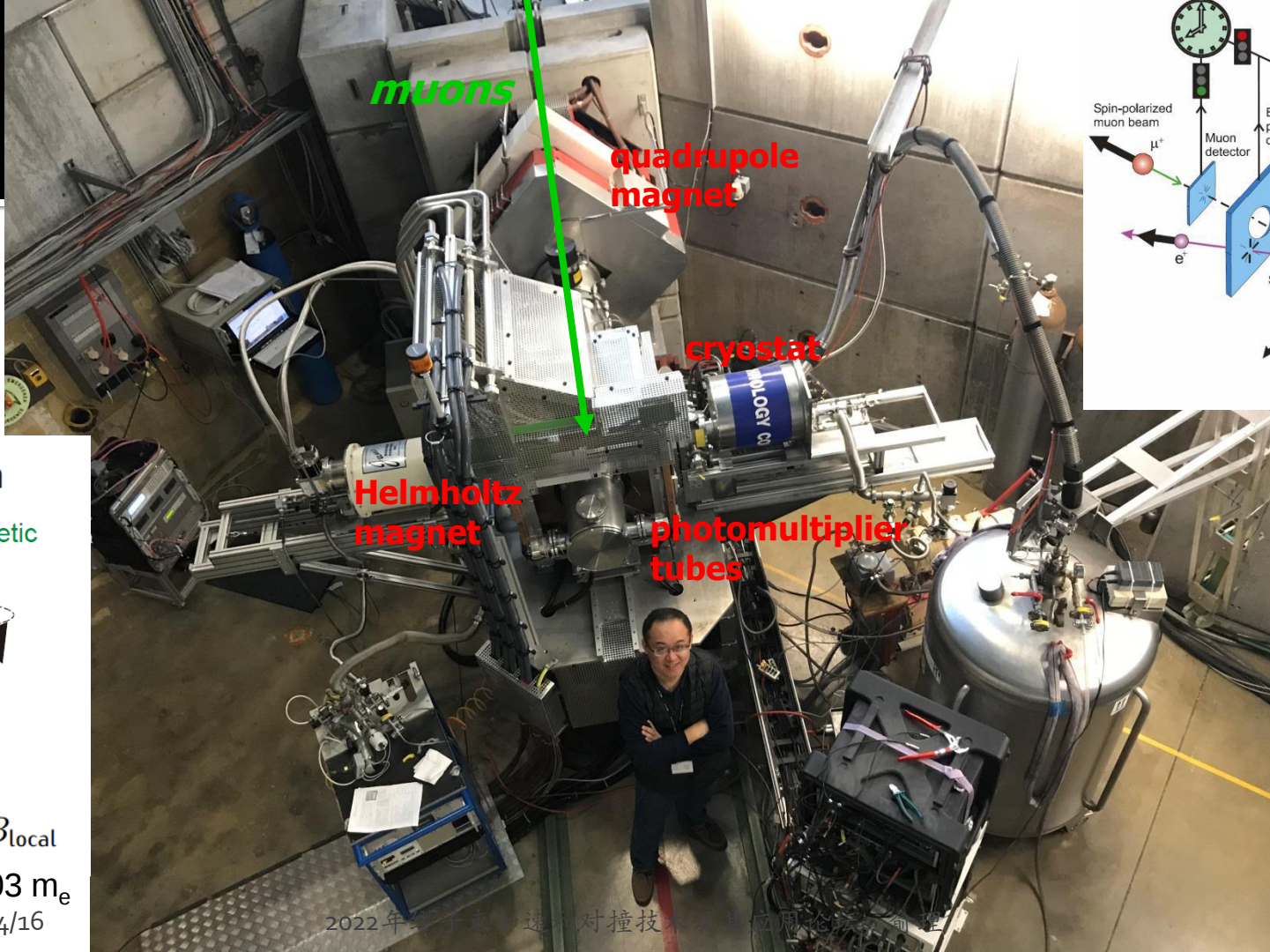
➤ 缪子源的类型以及缪子束参数要求(如何做?)

缪子源类型, 靶站, 及谱仪

连续型缪子源和脉冲型缪子源的比较

国际新型缪子源发展规划

倡议我国连续缪子源以及新型缪子谱仪



Muon

Local Magnetic Field

$$\omega_L = \gamma_\mu B_{\text{local}}$$

$$m = \sim 203 m_e$$

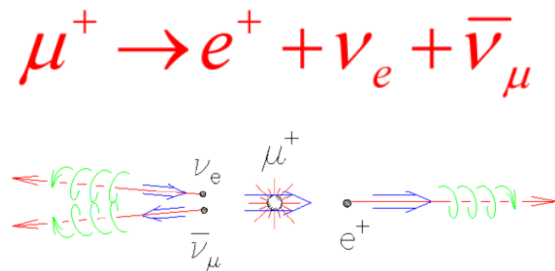
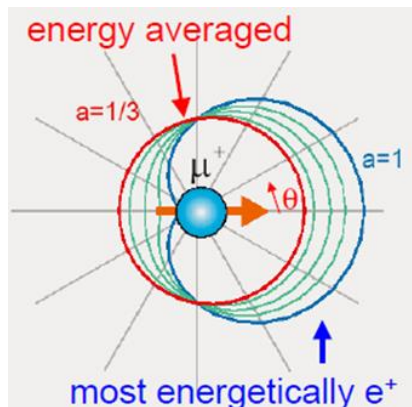
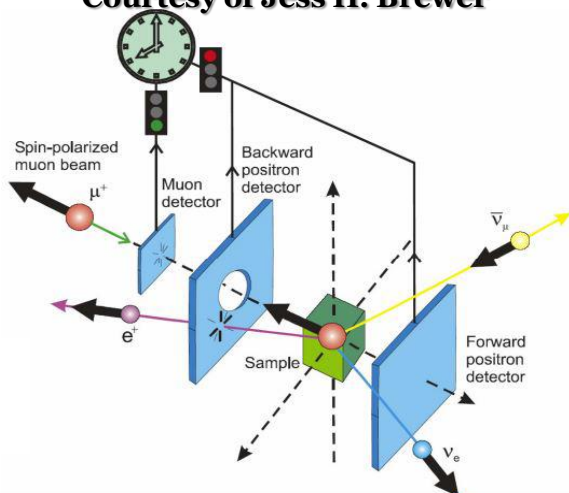
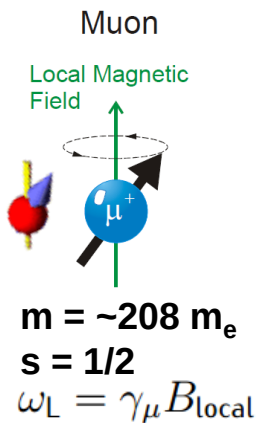
$$s = 1/2$$



测量样品封装

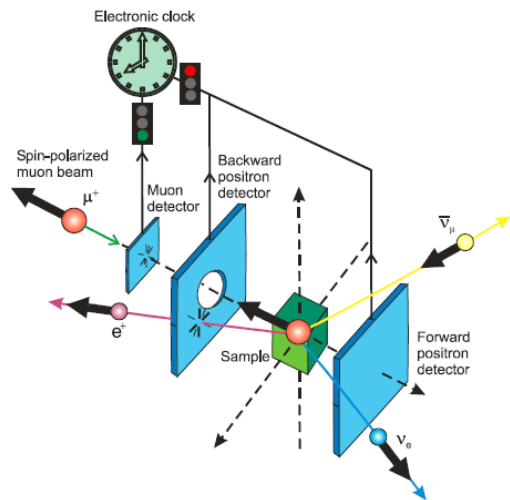
μ SR 谱仪基本原理

Courtesy of Jess H. Brewer

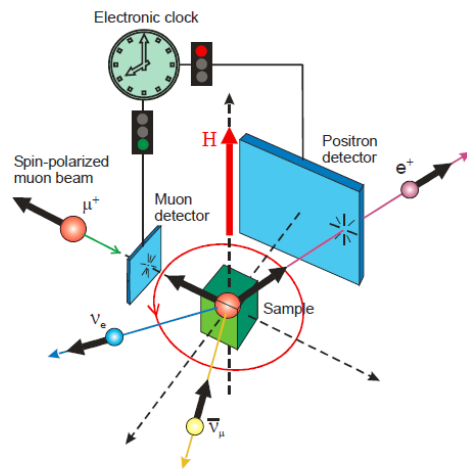


- ✓ decay life time = 2.19714 μs ;
- ✓ Spin=1/2, pure magnetic
- ✓ Positrons emit preferentially in the direction of muon spin $\mathbf{p}_\mu$;
- ✓ Very sensitive to weak internal field ($\mathbf{B}_{\text{loc}} \sim 0.1 \text{ Oe}$ or $\sim 0.001 \mu_B$) or TRSB signal;
- ✓ Use different detector sets can resolve the **field direction**;

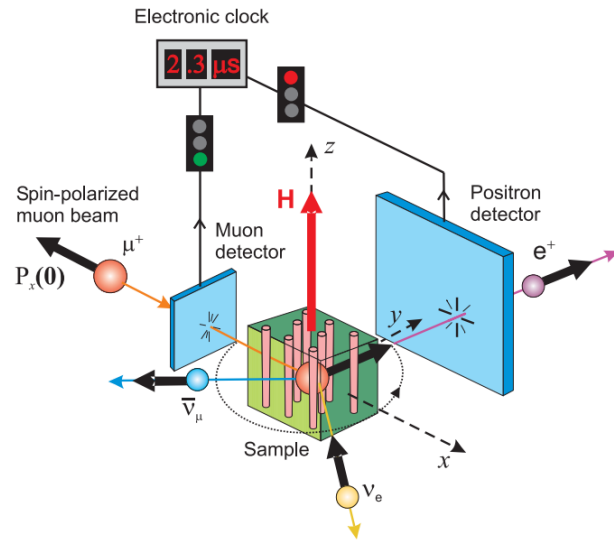
三种典型的缪子测量模式



Schematic of a zero field (ZF) μ SR setup.

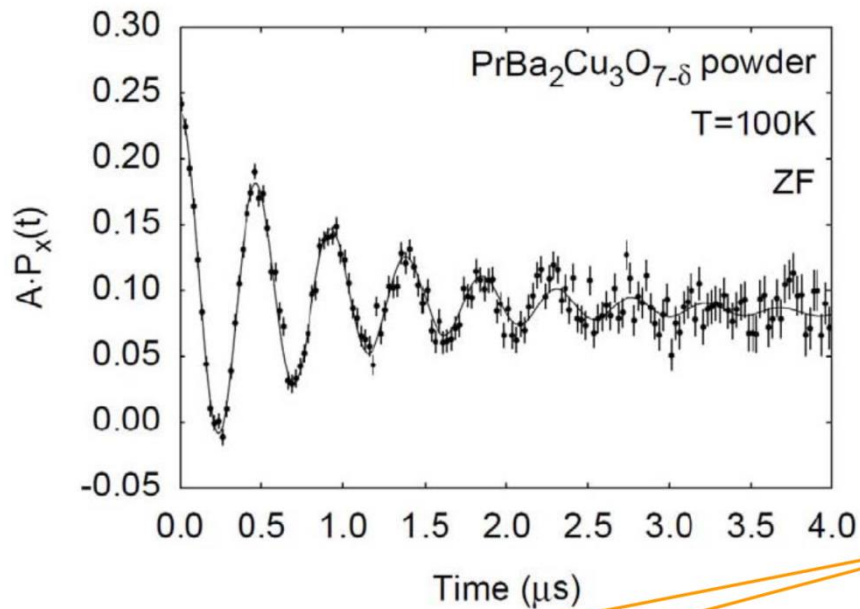


Schematic of a transverse field (TF) μ SR setup.



Courtesy of Jess H. Brewer

多晶磁性样品的测量

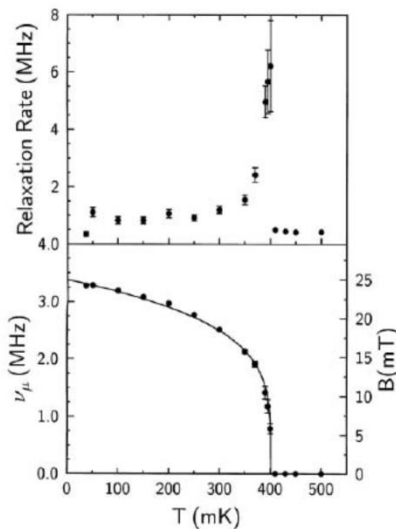
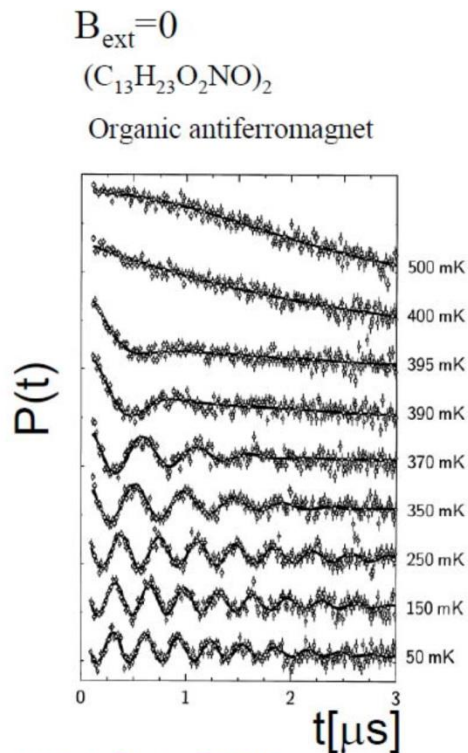


缪子探测对研究样品的特性容忍度很大。对于多晶样品的磁性和超导电性都可以开展研究。这对于新材料探索，尤其是不具备单晶材料样品的研究或者新型高通量材料的研究都可以运用缪子技术展开研究。

Damping,
Depolarization

$$A_0 P(t) = A_0 \left[e^{-\lambda_L t} \frac{1}{3} + e^{-\lambda_T t} \frac{2}{3} \cos(\gamma_\mu |\vec{B}| t) \right]$$

微观磁性测量：有机反铁磁材料

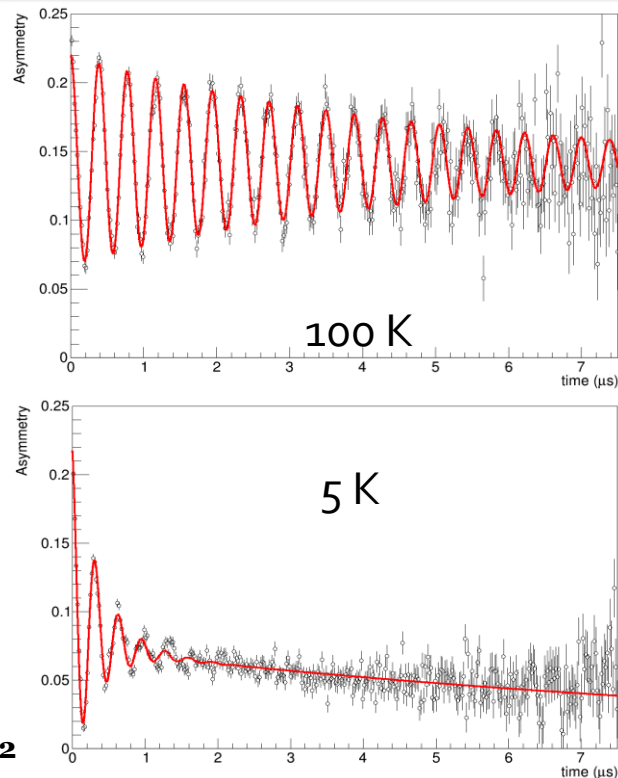
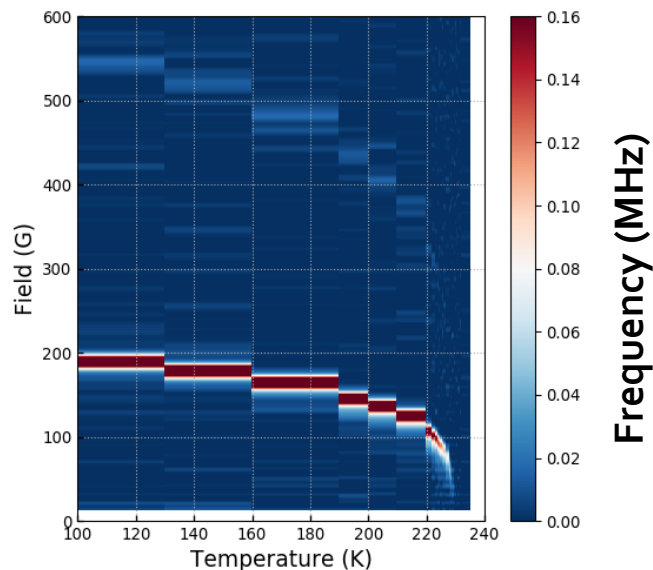


缪子对于有机磁性材料也能够开展研究。甚至对于宏观上不具备磁性，而只具有非常局域磁性的材料，也能够提供磁性序参量的准确测量。

$$P(t) = a_L(t) + a_T e^{-\lambda t} \cos(2\pi \nu_\mu t)$$

$$\lambda = \frac{1}{T} \quad \text{relaxation rate, } [\mu\text{s}^{-1}] \text{ or } [\text{MHz}]$$

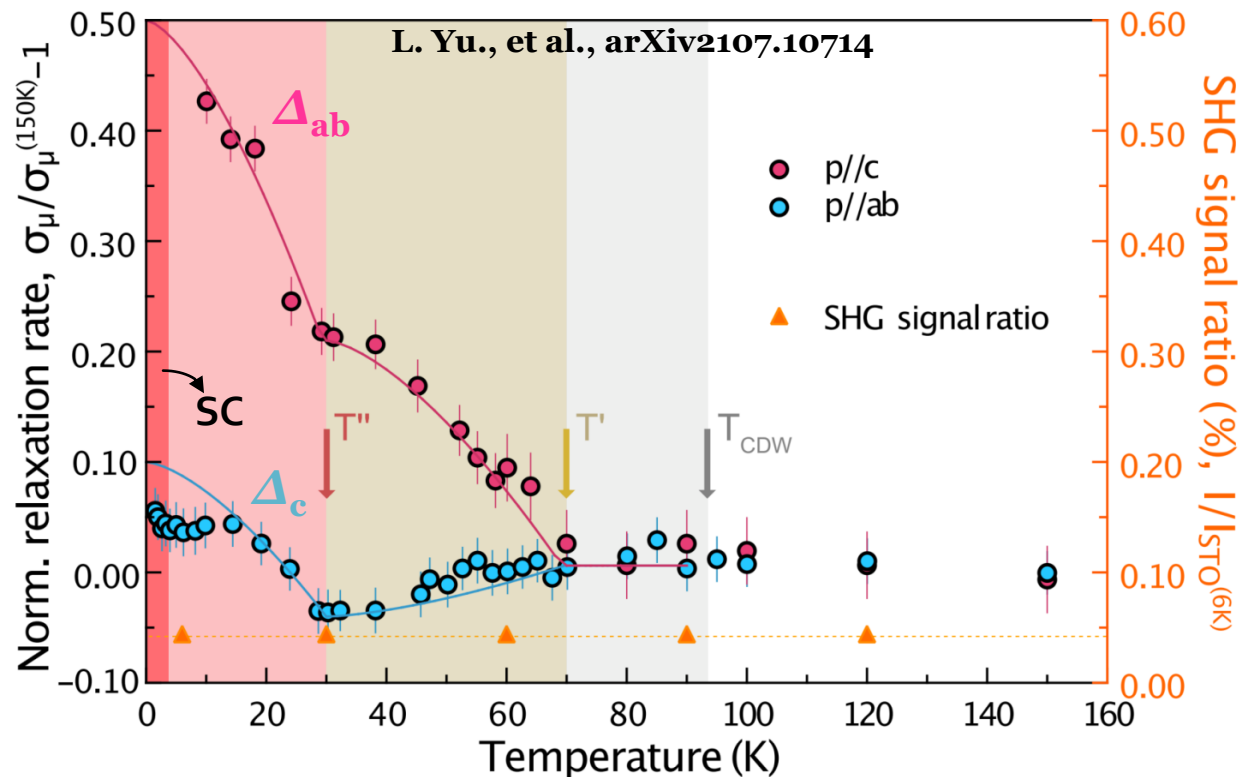
磁性序参量测量：单晶反铁磁材料 Sr_2IrO_4 (ZF- μSR)



而对于单晶的反铁磁材料，缪子探测这更是不可多得的一种探测手段，可以详细研究磁相变的过程以及磁性序参量的精准测量。

C.N. Wang, Li. Yu, et al., in preparing 2022

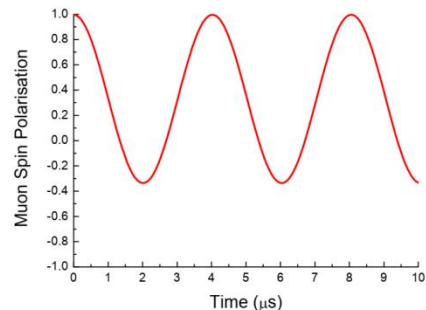
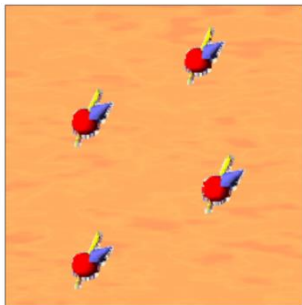
时间反演对称破缺测量: CsV_3Sb_5 零场ZF- μSR



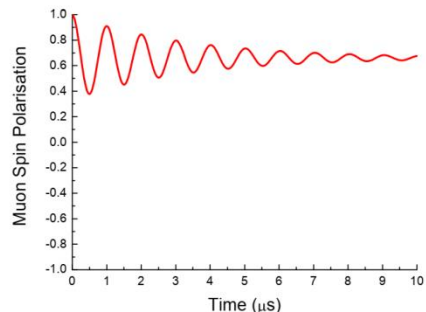
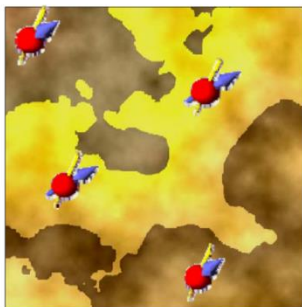
不光对于传统磁性材料，对于由非传统电子磁矩产生的时间反演对称破缺信号，缪子探测也非常敏感，能够提供不可替代的时间反演堆成破缺相变的精准测量

缪子对相分离样品体积分数的探测

Homogeneous:



Inhomogeneous:



对于非均匀的或者具有相分离的磁性或者超导材料，缪子不光可以探测磁性或者超导性质。还可以测量出磁性或者超导在样品中相应的体积分数。

Amplitude a = Magnetic volume fraction

Frequency ω = Local field, size of magnetic moments

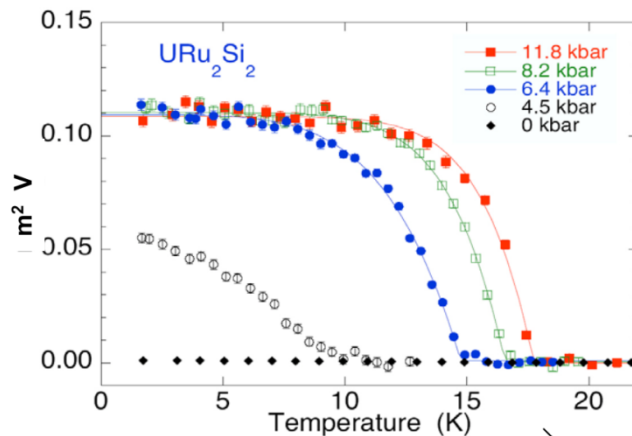
Damping λ, σ = inhomogeneity of magnetic regions

缪子对相分离样品体积分数的探测及其应用论坛, 俞理

相分离样品磁体积分数探测： URu_2Si_2

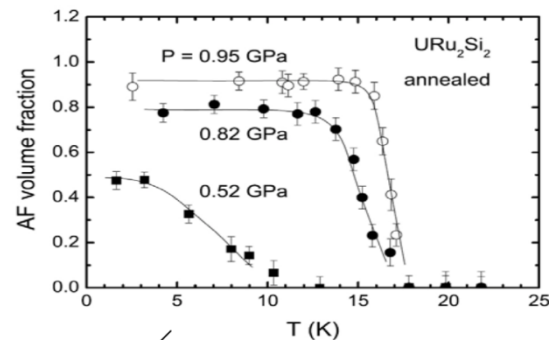
Neutron scattering:

F. Bourdarot et al., condmat/0312206



Muon Spin Rotation:

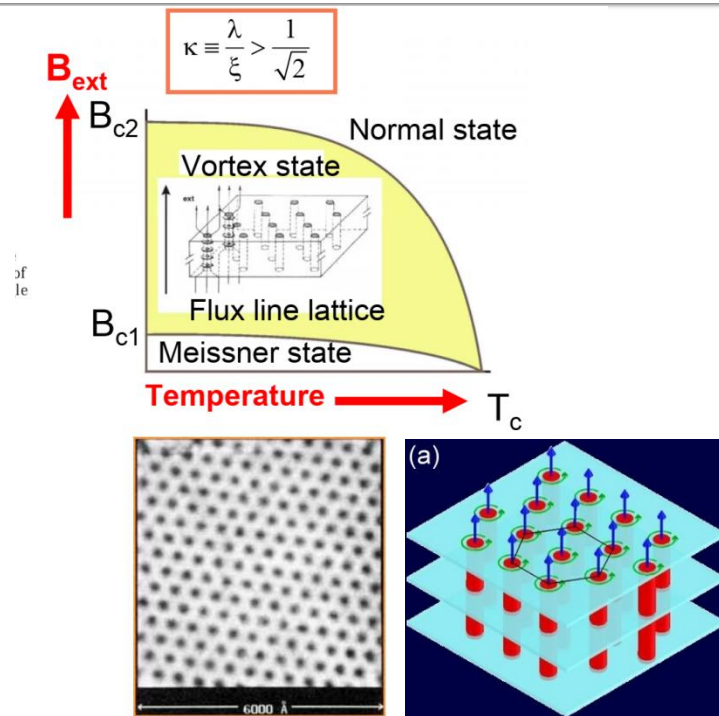
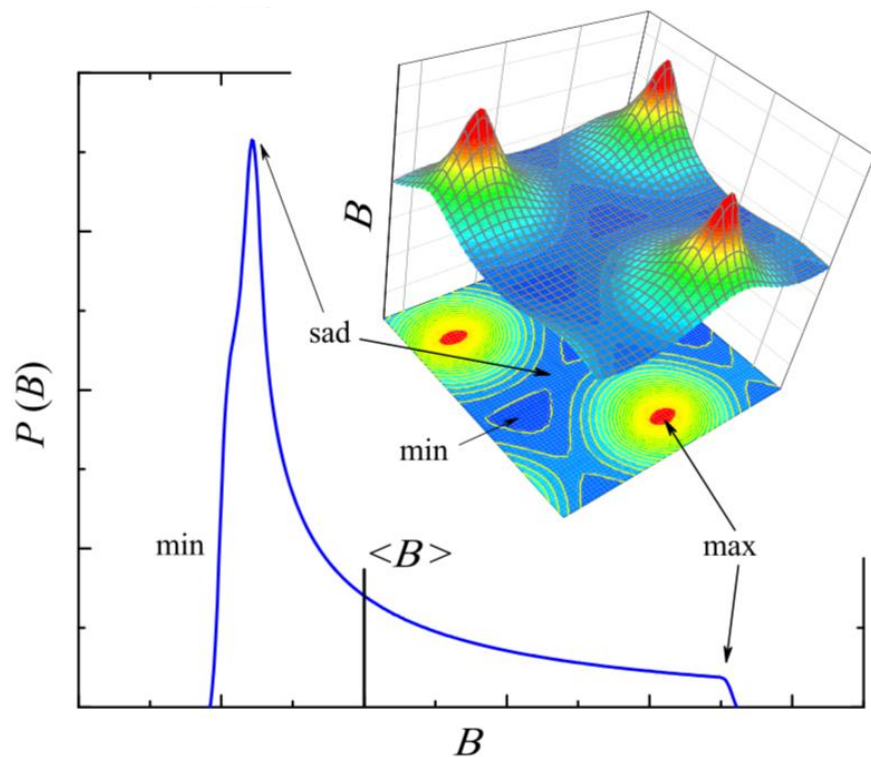
A. Amato et al., J. Phys.: Condens. Matter **16** (2004) S4403



Phase separation in magnetic and non magnetic volumes

Only the combination of neutron and muon data allows the correct interpretation of the data

超导混合态(Mix State)的 μ SR测量

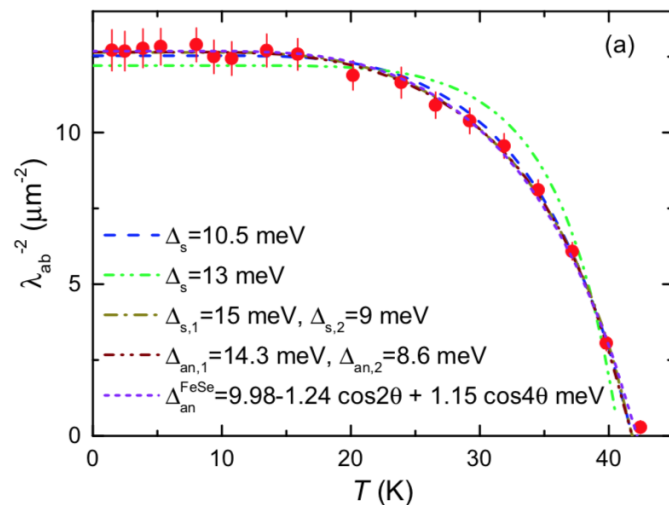
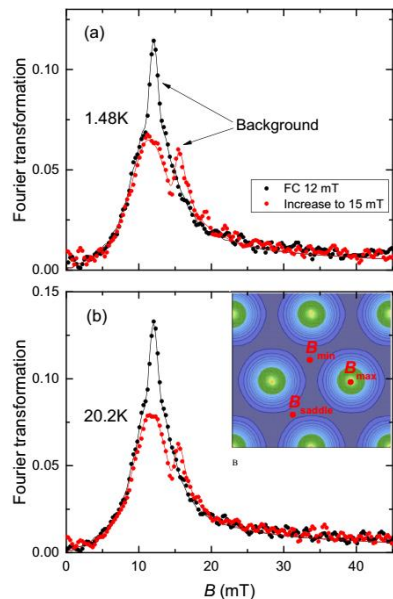
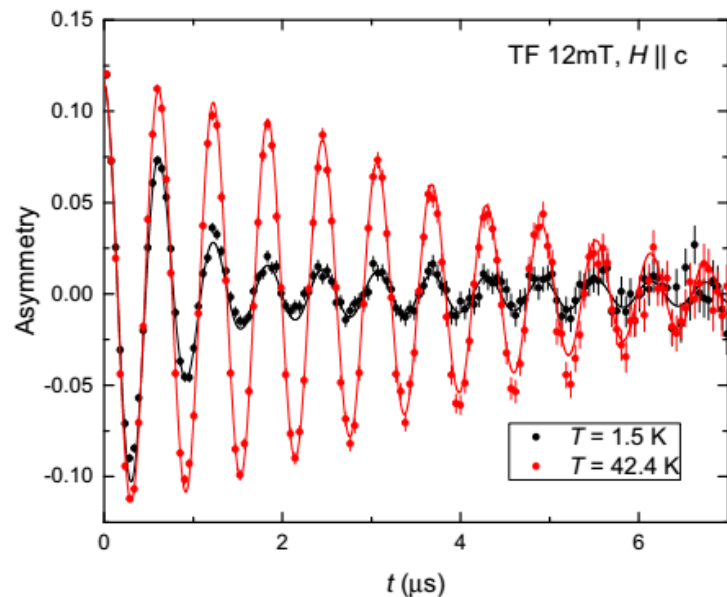


Surface image by Scanning Tunnel Microscopy

NbSe₂, 1T, 1.8K

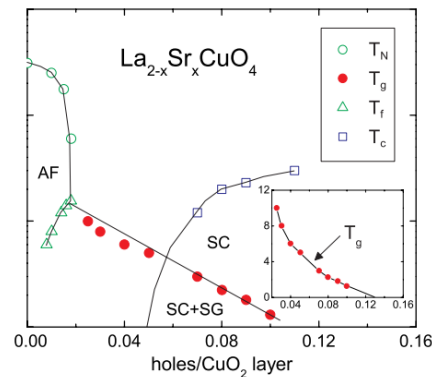
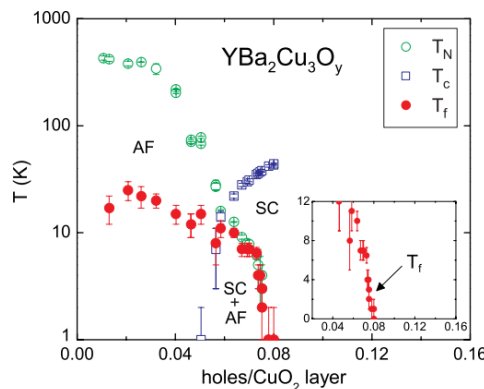
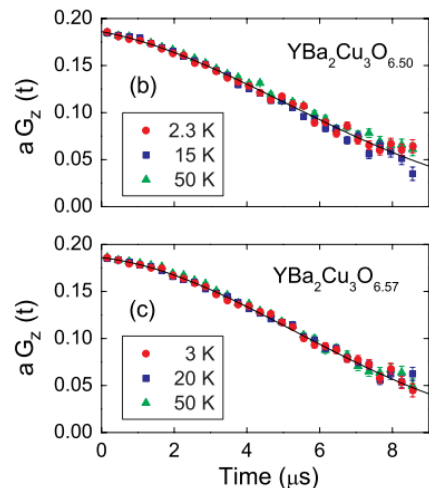
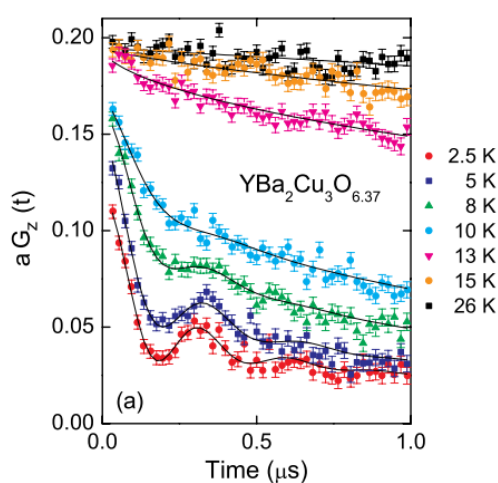
H. F. Hess et al. Phys. Rev. Lett. 62, 214 (1989)

超导混合态(Mix State) 超导穿透深度的探测



R. Khasanov., et al., PRB 93, 224512 (2016)

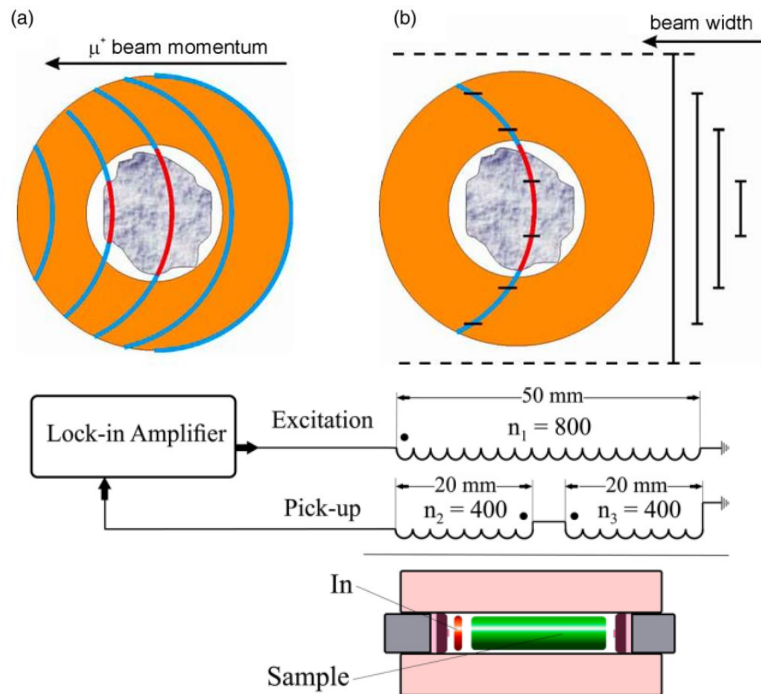
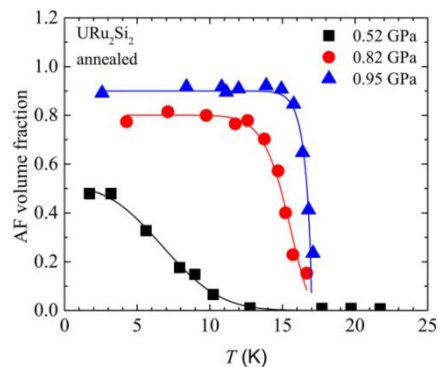
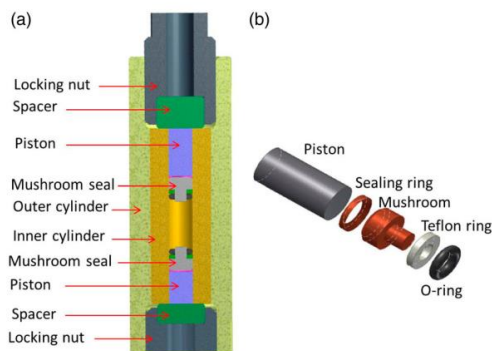
超导磁性共存态超导相及磁体积分数的探测



Sonier J E *et al* 2001 *Science* **292** 1692
 Miller R I *et al* 2006 *Phys. Rev. B* **73** 144509
 Sonier J E *et al* 2007 *Phys. Rev. B* **76** 064522

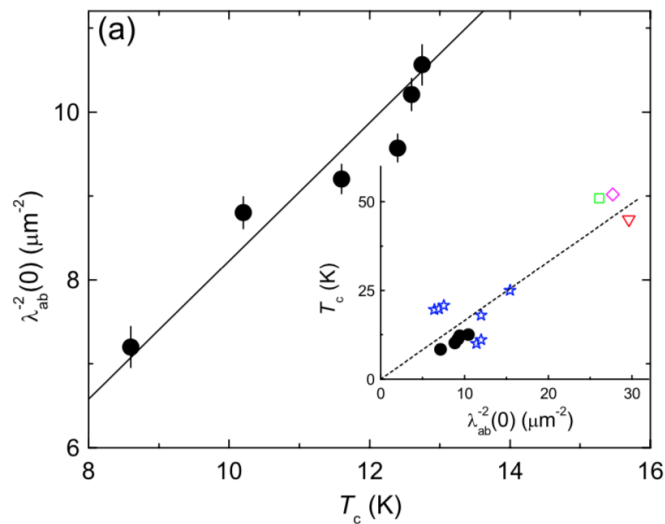
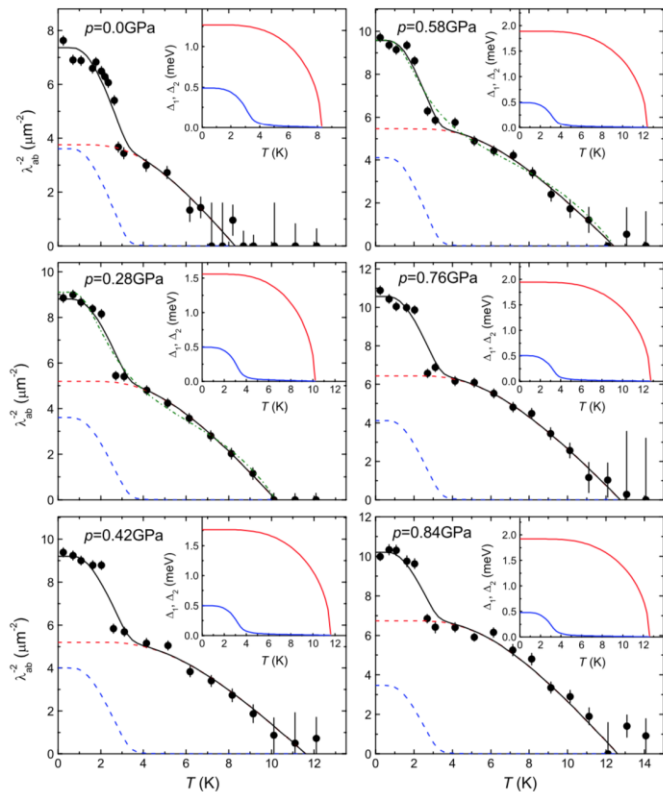
Niedermayer Ch *et al* 1998 *Phys. Rev. Lett.* **80** 3843
 Sanna S, Allodi G, Concas G, Hillier A D and De Renzi R
 2004 *Phys. Rev. Lett.* **93** 207001

压力环境下 μ SR 测量(< 2.8 GPa)



- ① 压力盒提供了巨大的背景信号，干扰样品信号；
- ② 压力盒的选材导致最高压力无法超过3 GPa; (高压物理期待 ~ 200 GPa)
- ③ 提高压力的新缪子技术正在路上；

压力下 μ SR 超导穿透深度的测量



FeSe_{0.94} (solid reaction)
 T_c scales with the large SC gap
PRL 104, 087004 (2010)

PSI低动能超导薄膜缪子探测谱仪



Low energy μ^+ beam and set-up for LE- μ SR (LEM)

- UHV system, 10^{-10} mbar
- some parts LN_2 cooled

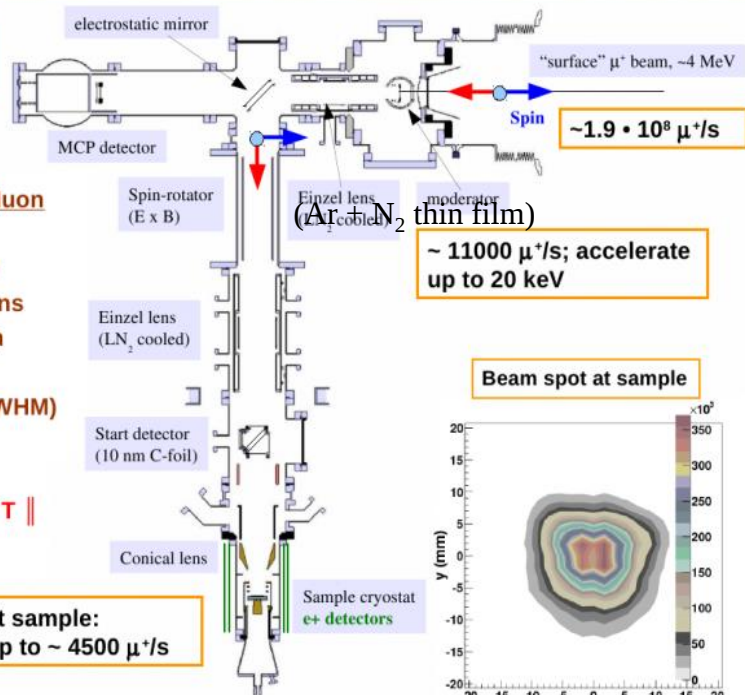
Polarized Low Energy Muon Beam

Energy: 0.5-30 keV
 $\Delta E, \Delta t$: 400 eV, 5 ns
Depth: 1 – 300 nm
Polarization ~100 %
Beam Spot: 12 mm (FWHM)

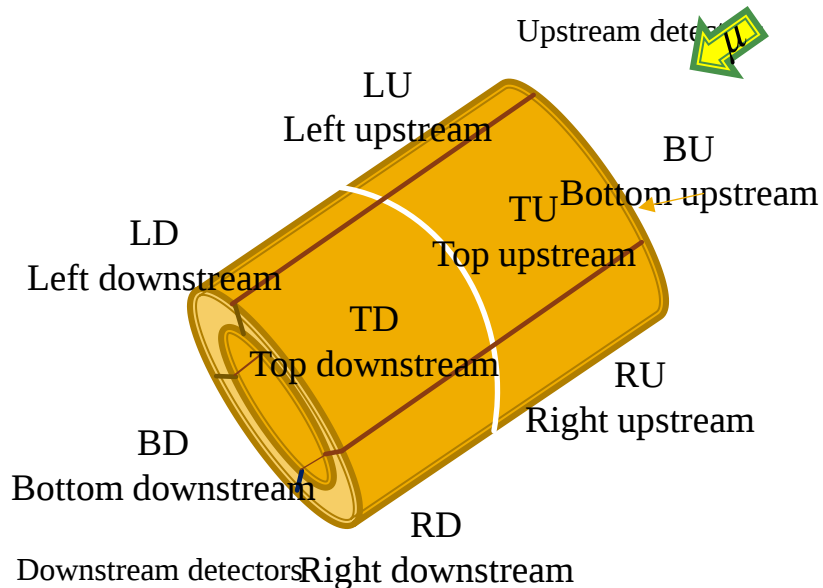
Sample environment:

$B = 0 - 0.3 \text{ T} \perp, 0 - 0.03 \text{ T} \parallel$
sample surface
 $T = 2.5 - 320 \text{ K}$

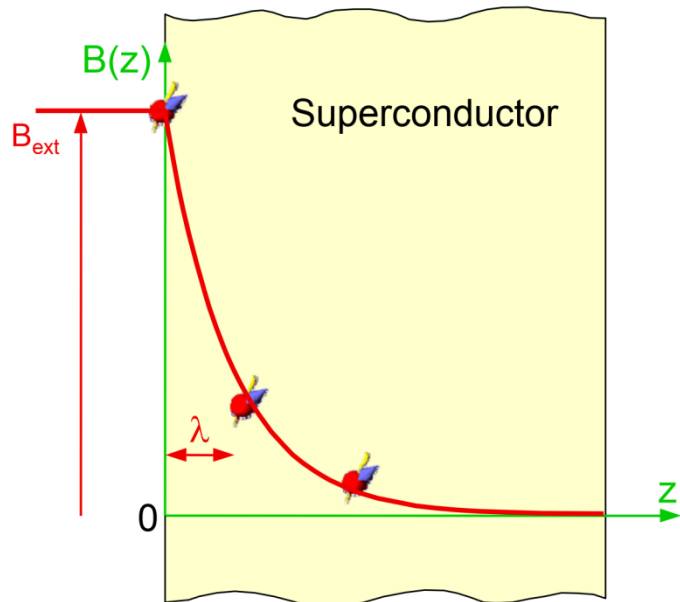
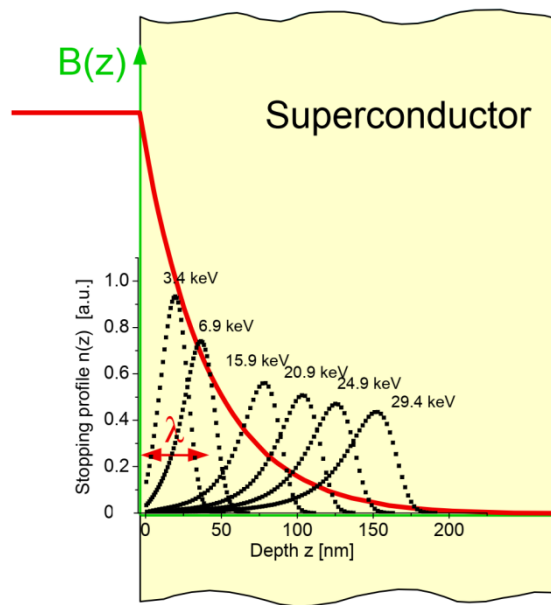
at sample:
up to $\sim 4500 \mu^+/\text{s}$



Detecting system



超导麦斯纳态(Meissner)的LEM- μ SR测量

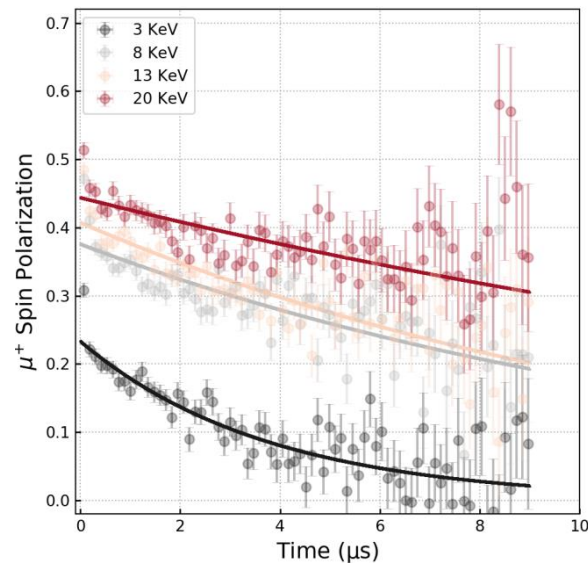
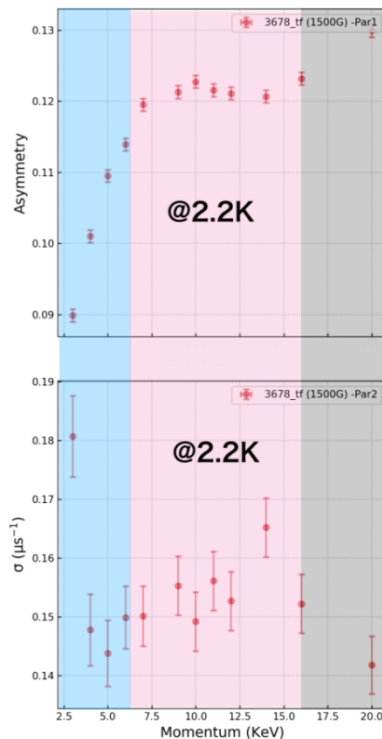
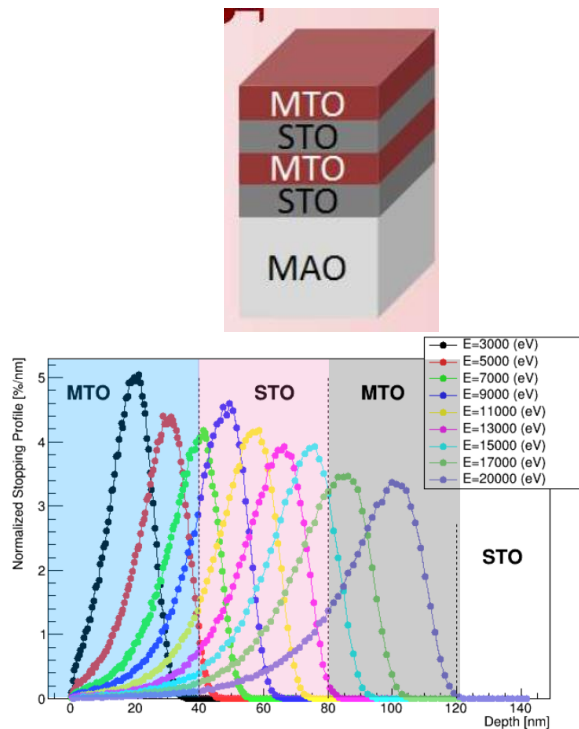


→ Magnetic field profile $B(z)$ over nm scale

→ Characteristic lengths of the sc λ, ξ

- ① 提供了另外一种独立方法测量超导临界参数;
- ② 可以适用于超导薄膜样品;
- ③ 拓展缪子探测进入纳米尺度的物理
- ④ 缪子光斑聚焦很难; (~20 mm)
- ⑤ 磁场调节很难;

超导超晶格多层膜的缪子探测(LEM μ SR)



li.yu, et al., in preparing

缪子探测技术在凝聚态研究中的优势以及我国现状

- 适用于各种类型的样品: single crystal, polycrystal, thin film, liquid, ...
- 多维度物理参数调制的测量环境: Temperature (> 20 mK), H-field (< 9.5 T), Pressure (< 2.8 GPa), current, strain, Photon pumping...
- Sensitive to Magnetism ($\sim 0.001 \mu_B$), Superconductivity, and phase separation (in both macroscopic & microscopic level)...
- 我国目前没有缪子源以及缪子谱仪，国际大装置机时申请非常的科研政治依赖，并且对于大多数凝聚态研究而言全世界可以工作的装置很少 (< 2)

Outline报告大纲

➤ 缪子源的凝聚态应用(能做什么)

缪子产生及利用原理

缪子自旋共振/弛豫/旋转谱学(μ SR)

缪子激励X射线发射谱学研究(MIXE)

➤ 缪子源的类型以及缪子束参数要求(如何做?)

缪子源类型, 靶站, 及谱仪

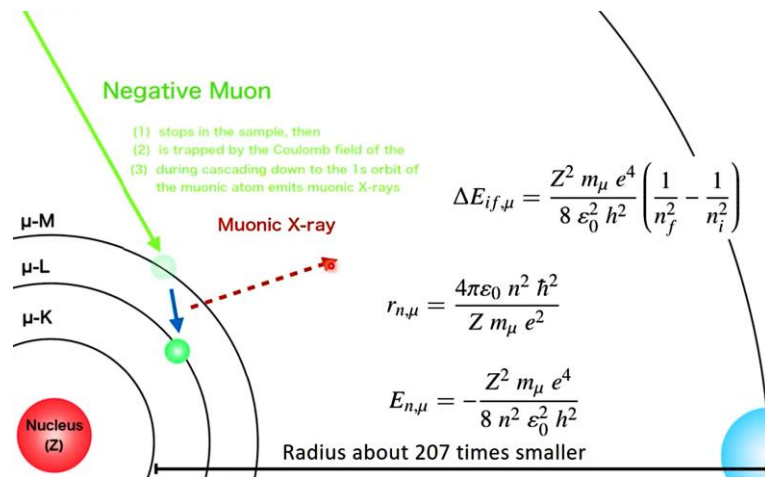
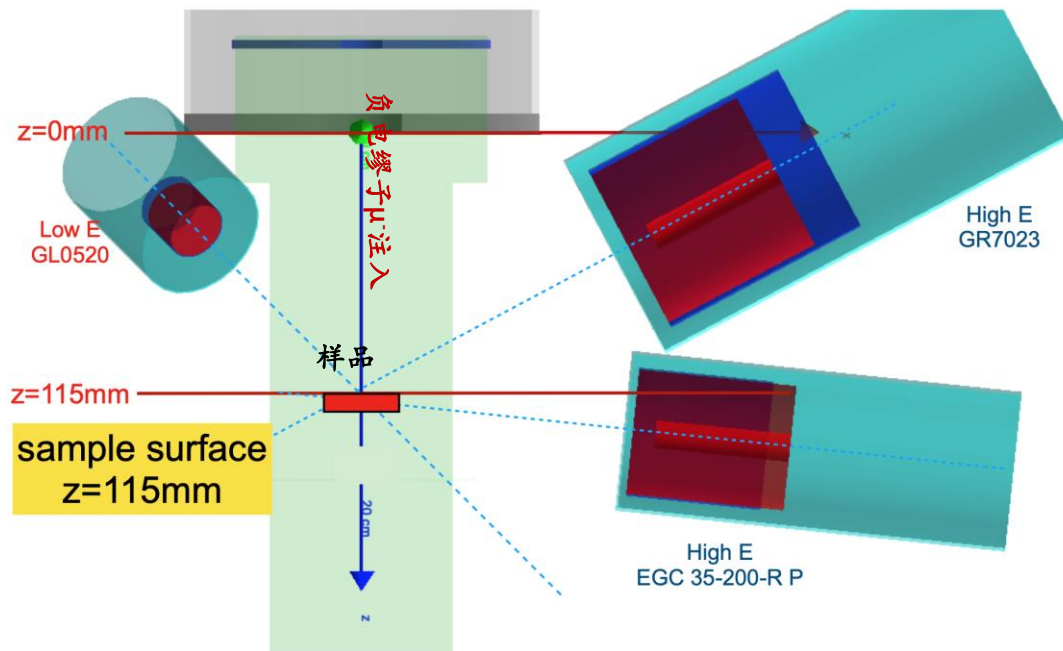
连续型缪子源和脉冲型缪子源的比较

国际新型缪子源发展规划

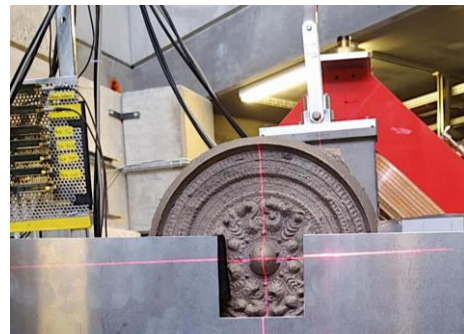
倡议我国连续缪子源以及新型缪子谱仪

缪子激励X射线发射谱仪(MIXE)

负缪子(μ^-)的应用

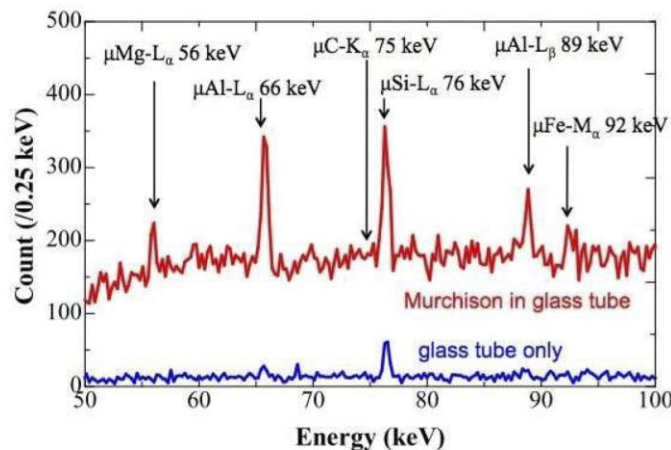


适合考古及高价值物质成分无损探测



Sample		Cu	Sn	Contents Pb
#2 Japanese coin	fluorescence X-ray	77.77	14.45	7.79
	J-PARC	77.7 ± 1.6	12.5 ± 1.5	9.8 ± 1.5
	PSI	79.7 ± 0.1	10.0 ± 0.1	10.3 ± 0.1
#3 Japanese coin	fluorescence X-ray	73.64	12.18	14.17
	J-PARC	69.0 ± 1.9	9.9 ± 1.3	21.1 ± 2.6
	PSI	73.2 ± 0.1	7.7 ± 0.1	19.1 ± 0.1
Chinese mirror	fluorescence X-ray	73.16	21.49	5.35
	RAL-RIKEN	71.8 ± 1.5	22.1 ± 2.0	6.1 ± 0.8
	PSI	72.1 ± 0.1	23.4 ± 0.5	4.5 ± 0.1

地外物质成分微量无损分析



隕石粉末を封入したガラスチューブ(右)と検出されたX線スペクトル(左)

In-situ analysis without breaking the sample protection environment.

scientific reports

Explore our content ▾ Journal information ▾

nature > scientific reports > articles > article

Article | [Open Access](#) | Published: 13 November 2017

Non-destructive elemental analysis of a carbonaceous chondrite with direct current Muon beam at MuSIC

K. Terada , A. Sato, K. Ninomiya, Y. Kawashima, K. Shimomura, G. Yoshida, Y. Kawai, T. Osawa & S. Tachibana

Scientific Reports 7, Article number: 15478 (2017) | [Cite this article](#)

728 Accesses | 6 Citations | 58 Altmetric | [Metrics](#)

使用PSI-MIXE的缺点

- 每年只有特定的2周机时对国际用户开放
- 没有固定的beamline，束线无法优化，直接采用表面缪子的束流动能调节受限，也无法安装大场磁铁进一步聚焦。
- 样品环境受限，共享线站无法持续优化
- 官方对样品有限定，不能测放射性、军事、商业样品，所有数据必须公开

国内有建立高精度MIXE的需求

- 金融：纯度测定
- 国防：同位素丰度测量
- 军工：零件测试
- 商用：电池工作在线测量
- 航天：采样测试
- 考古：年代测定以及古代工艺研究

核能领域，军工领域，高端制造领域，文物考古领域，宇航探索领域，国家安全...

Outline报告大纲

➤ 缪子源的凝聚态应用(能做什么)

缪子产生及利用原理

缪子自旋共振/弛豫/旋转谱学(μ SR)

缪子激励X射线发射谱学研究(MIXE)

➤ 缪子源的类型以及缪子束参数要求(如何做?)

缪子源类型, 靶站, 及谱仪

连续型缪子源和脉冲型缪子源的比较

国际新型缪子源发展规划

倡议我国连续缪子源以及新型缪子谱仪

Outline报告大纲

➤ 缪子源的凝聚态应用(能做什么)

缪子产生及利用原理

缪子自旋共振/弛豫/旋转谱学(μ SR)

缪子激励X射线发射谱学研究(MIXE)

➤ 缪子源的类型以及缪子束参数要求(如何做?)

缪子源类型，靶站，及谱仪

连续型缪子源和脉冲型缪子源的比较

国际新型缪子源发展规划

倡议我国连续缪子源以及新型缪子谱仪

目前国际凝聚态缪子源部署



1. 目前国际上主要的缪子源以及缪子研究中心只集中在世界上的这四个地方。
2. 其中日本**J-Pac**和英国**ISIS**都是基于脉冲型质子加速器的缪子源，追求的是测量的统计和效率，但时间分辨精度低，对微小磁性和超导信号测量能力不足。而且由于缪子光斑尺寸巨大，实验要求的样品尺寸不少于20毫米见方；
3. 瑞士**PSI**和加拿大的**TRIUMF**则是基于连续流的质子加速器的缪子源。其中**PSI**的连续流质子加速器的束流强度是目前国际上最高的。由于使用连续流缪子，就可以跟踪每个缪子进入后的演变，从而极大提高了缪子信号的时间分辨能力，在磁性和超导信号的灵敏度上较脉冲型缪子源有了至少2-3个数量级的提升，对磁性和超导等信号的研究能力得到了极大的加强。

国际上连续流缪子源加速器主要参数

- PSI (590 MeV, 2000 μ A, RF-50MHz)
- Triumf (500 MeV, <200 μ A, RF-23MHz)
- MuSIC (392 MeV, 1 μ A, RF?)

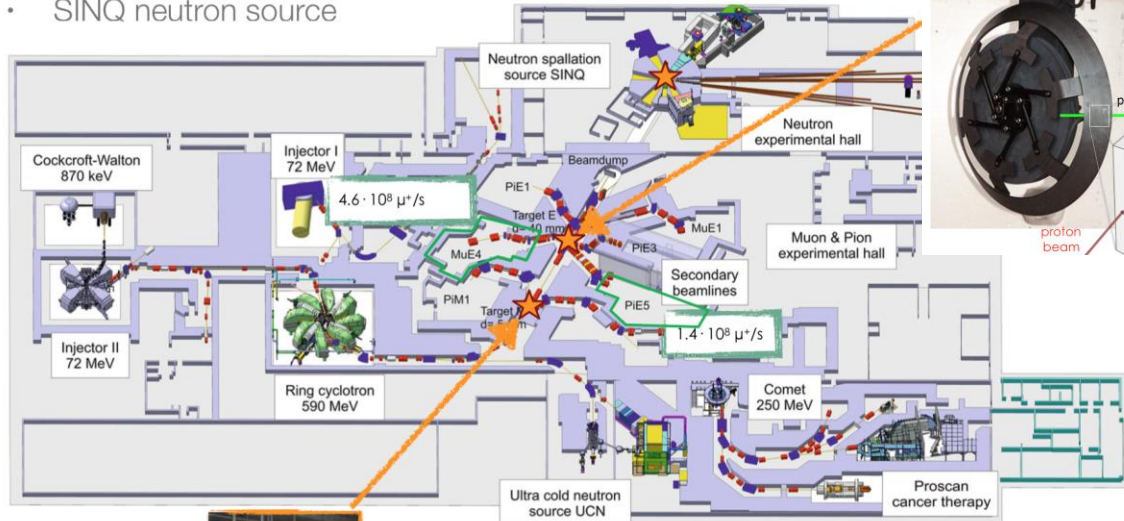
Table 1: Comparison of Surface Muon Facilities and Mu2e

Facility	Max. (surface) μ rate (Hz)	Type	Comments
PSI [14]	9×10^8	CW	
TRIUMF [15]	2×10^6	CW	
MuSIC at Osaka [16]	10^8	CW	
J-PARC [17]	6×10^7	pulsed	
ISIS [17]	6×10^5	pulsed	
HIMB at PSI [13]	10^{10}	CW	(design goal)
Mu2e at Fermilab	10^{11}	pulsed	Not surface muons: $p_\mu \approx 40 \text{ MeV}/c$
Mu2e with PIP-II	10^{12}	pulsed	Not surface muons: $p_\mu \approx 40 \text{ MeV}/c$

PSI (HIPA)

The world's most intense continuous muon beam

- PSI High Intensity Proton Accelerator experimental areas
- Two production targets
- SINQ neutron source

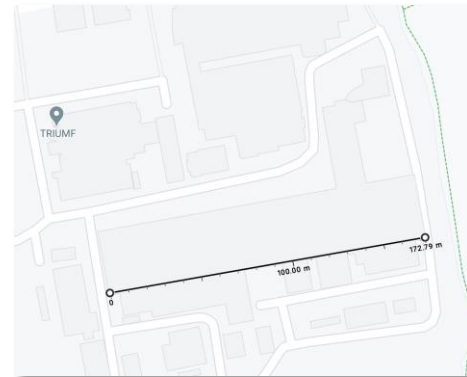


- ✓ Graphite
- ✓ $dP/P = 10\%$, **>99% polarized**
- ✓ 合理配置双缪子靶在中子靶之前
(Target-MTarget-E)
- ✓ Thermal load $\sim 70 \text{ kW}$ @ 2.4 mA

加拿大TRIUMF连续源

- ✓ $dP/P = 10\%$, **>99% polarized**
- ✓ **590 MeV @ 140 μA**
- ✓ **Target-1: Graphite 10 (mm) edge cooled**

- ① 0.2 mA 强度够用
- ② 有计划5年内升级线性加速器部分
- ③ 设备趋于老化



Beamline		Beam Characteristics				Flux	BeamSpot	MORE
		$p(\text{MeV}/c)$	$\Delta p/p$	Spin Rotation	Polarisation	10^6s^{-1}	$(h \times w) \text{ cm}^2$	y/n
M15	μ^+	29.5 ^a	2-10%	18-90°	>98%	2	1.2×1.6	n
M9A	μ^+	29.5 ^a	2-10% ^k	~18-90° ^k	>98%	2 ^k	1.5×1.5^k	y
M9B	μ^+	<70	11%	0°	>90%	+	10×10	n
	μ^+	>70	11%	0 - 90°	70-90%	2 - 5	~7 × *	n
	μ^-	30-80	11%	not measured	>90%	1.4	10×10	n
M20 C/D	μ^+	29.5 ^a	1-8%	10 - 90°	>98%	0.6	0.5×1.1	y

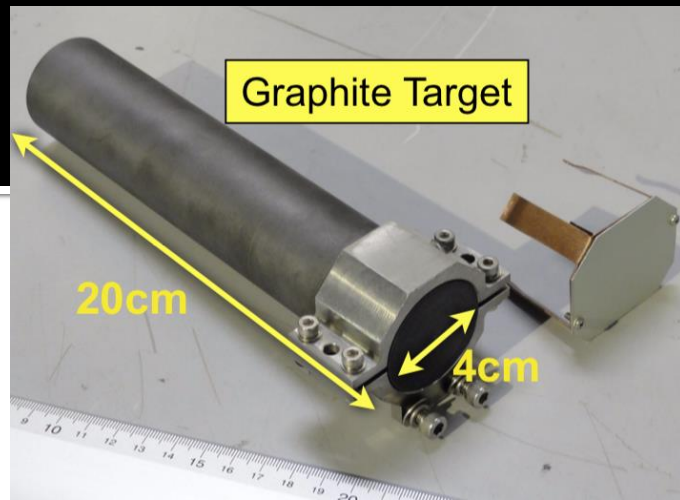
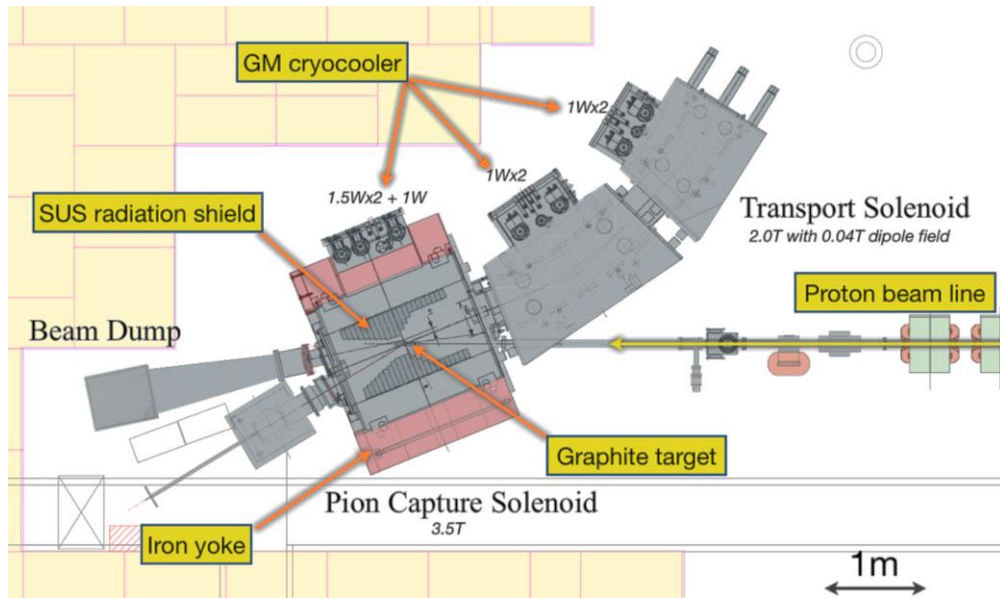
^alower momenta possible at cost of lower rate. ^kestimated

Table 1. Properties of main beamlines at TRIUMF.

日本MuSIC连续源

Graphite Target

392 MeV, 1μ ($\sim 400 \text{ W @ } 1 \mu\text{A}$), 60 MeV/c
3.5 T superconducting coil, rate: $10^8 \mu/\text{s}$



MuSIC@RCNP-West Hall (~2012 Feb)

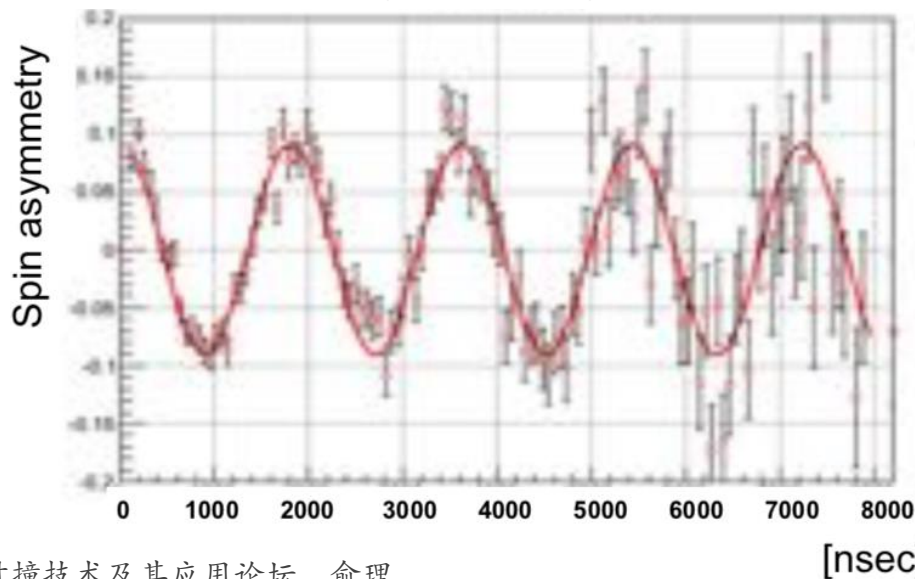


μ SR performance (MuSIC)

- ✓ Full asymmetry is low
- ✓ Poor performance for μ SR experiment (as compared with GPS, it has ~8x worse data quality !)
- ✓ 400 MeV and 1 μ A
- ✓ 圆柱形靶不利于收集高极化的muon
- ✓ 动量分辨率差
- ✓ Neutron heating on the SC cable is 1W – 低于制冷机可以满足的超导线圈的热负荷

MuSIC in 2017: upgrades of the beamline for intense muon beam with 1.1 μ A proton beam and start of μ SR and new scientific programs

D. Tomono¹, M. Fukuda¹, K. Hatanaka¹, W. Higemoto³, M. Ieiri⁴, S. Kanda⁵, Y. Kawashima¹, M.K. Kubo⁶, Y. Kuno², Y. Matsuda², T. Matsuzaki⁵, M. Minakawa⁴, Y. Miyake⁴, K. Miyamoto², Y. Mori⁷, S. Morinobu¹, Y. Morita¹, T. Motoishi², Y. Nakamura², Y. Nakazawa², P.H. Nguyen², M. Niikura⁸, K. Ninomiya⁹, R. Nishikawa², K. Okinaka², S. Ohta², T.Y. Saito⁸, A. Sato², S. Seo¹⁰, K. Shimomura^{4,1}, K. Takahisa¹, A. Taniguchi⁷, Y. Ueno¹⁰, Y. Weichao², M.L. Wong², and D. Yagi¹⁰
(MuSIC Collaboration)



ISIS 脉冲源muon target

- The target consists of a carbon target set at 45° and is 10 mm thick to the proton beam.
- muon target takes approximately 5% of the proton beam

PHILOSOPHICAL
TRANSACTIONS A

rsta.royalsocietypublishing.org

Review



Cite this article: Hillier AD, Lord JS, Ishida K, Rogers C. 2019 Muons at ISIS. *Phil. Trans. R. Soc. A* **377**: 20180064.
<http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2018.0064>

Accepted: 18 October 2018

Muons at ISIS

A. D. Hillier¹, J. S. Lord¹, K. Ishida² and C. Rogers¹

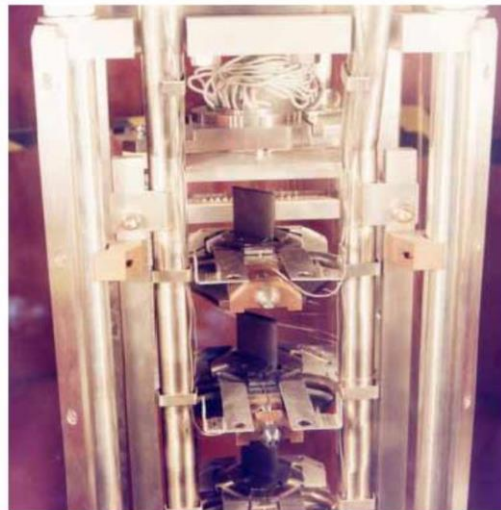
¹ISIS Pulsed Neutron and Muon Source, STFC Rutherford Appleton Laboratory, Didcot OX11 0QX, UK

²RIKEN Nishina Center, RIKEN, Wako, Saitama, Japan

ADH, 0000-0002-2391-8581; JSL, 0000-0001-8315-482X

For the last 30 years, muon experiments at ISIS pulsed neutron and muon facility at the Rutherford Appleton Laboratory, Oxfordshire have been making a significant contribution to a number of scientific fields. The muon facilities at ISIS consist of eight experimental areas. The European Commission Muon facility consists of three experimental areas with a fixed momentum (28 MeV c^{-1}). The RIKEN-RAI

Target

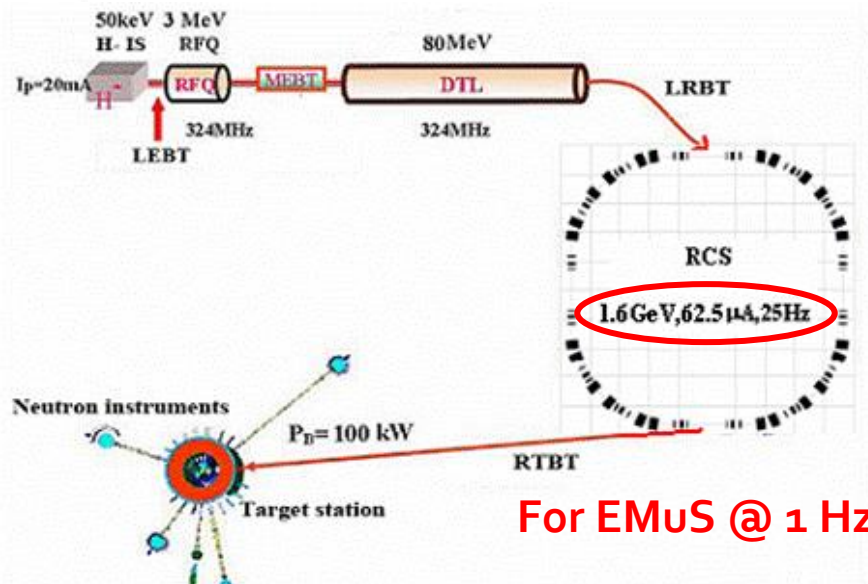


Carbon target, 10 mm thick
Takes 2-3% of the proton beam

ISIS源和CSNS源的参数比较

表 1: CSNS 质子束流和反角白光中子束参数

中子能量范围	1 eV - 150 MeV
质子束能量和流强	1.6 GeV, 1.6×10^{13} (ppp)
质子束脉冲重复频率	25 Hz
中子束注量率 (未准直)	3.7×10^5 n/cm ² /pulse (80 m) 7.9×10^5 n/cm ² /pulse (55 m)
时间分辨率 (1eV - 30 MeV)	0.2% ~ 0.9%
分能区中子注量率比	0.53 (1eV - 1 MeV) 0.40 (1MeV - 20 MeV) 0.05 (20 MeV - 200 MeV)



英国脉冲源ISIS的muon target工作在 800 MeV, 196 μ A, 50 Hz, 有利于产生缪子！
以目前中国CSNS脉冲质子源的计算, 其产生的缪子效率低于英国ISIS脉冲源
缪子产生效率的1%。(这没有计算CSNS缪子靶, 质子动能过高等其他不利缪子产
生的因素。)

Outline报告大纲

➤ 缪子源的凝聚态应用(能做什么)

缪子产生及利用原理

缪子自旋共振/弛豫/旋转谱学(μ SR)

缪子激励X射线发射谱学研究(MIXE)

➤ 缪子源的类型以及缪子束要求(如何做?)

缪子源类型, 靶站, 及谱仪

连续型缪子源和脉冲型缪子源的比较

国际新型缪子源发展规划

倡议我国连续缪子源以及新型缪子谱仪

连续(CW)缪子源对比脉冲(Pulse)缪子源

- Pulse源时间精度不够。以ISIS为例，其产生中子的脉宽在 $0.4\ \mu\text{s}$ ，缪子脉宽为 $0.07\ \mu\text{s}$ ，勉强对应能测量 **250 Oe** 外磁场对应的信号。而在CW源(如PSI)则可以进行 **9.5 Teslar (95000 Oe)** 磁场环境的缪子测量。JPARC报道采用slicer之后可以把FWHM降低到 $0.037\ \mu\text{s}$ (Muon Beam Slicer at J-PARC MUSE)，但这并不能明显提高磁场上限（既缪子测量时间精度，磁场测量理论上限依然 **< 2000 Oe**）。
- 脉冲源无法跟踪每一个入射缪子，因此测量中**脉冲源会有极高的缪子背景信号干扰测量**；
- 高功率质子流对靶有很高的热负载，而且会产生很高的辐射。每次脉冲都会使缪子靶产生急速升温与降温的问题，**严重影响缪子靶的寿命，并急剧增加缪子靶站的建设以及维护成本。**
- **脉冲源对于缪子光斑聚焦极为不利**。这不光对缪子的产生效率有不良影响，对于稀有样品的研究也极为不便。(ISIS一般实验需求g级样品质量，PSI只需mg级)

Outline报告大纲

➤ 缪子源的凝聚态应用(能做什么)

缪子产生及利用原理

缪子自旋共振/弛豫/旋转谱学(μ SR)

缪子激励X射线发射谱学研究(MIXE)

➤ 缪子源的类型以及缪子束参数要求(如何做?)

缪子源类型, 靶站, 及谱仪

连续型缪子源和脉冲型缪子源的比较

国际新型缪子源发展规划

倡议我国连续缪子源以及新型缪子谱仪

美国SEEMS计划

✓ 包含在第二靶站建设计划中

✓ 1.4MW -» 2.8MW

✓ 目前: Linac, 60 Hz, 1GeV, 26-38 mA

SEEMS: World-leading muon spectroscopy capabilities

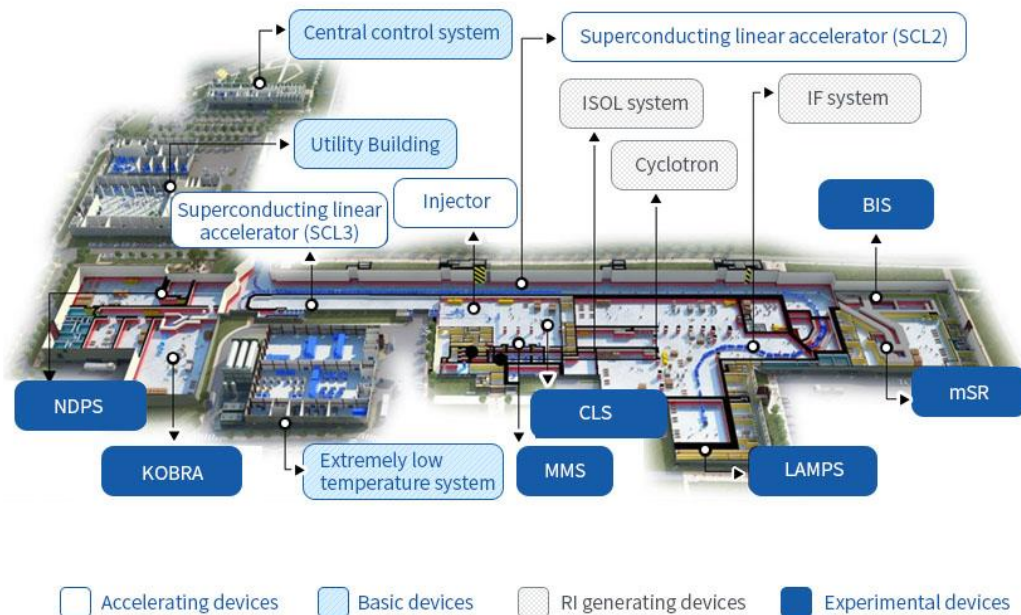
- The world's best muon source for performing μ SR experiments not possible anywhere else.
 - Fills a missing US capability that is needed by the scientific community.
 - Has better resolution and 200x more flux than any existing muon source.
 - Will allow for new types of experiments that are not currently possible.
- Making use of a world-class accelerator, without disrupting any of its current missions.
 - No impact on neutron scattering mission or Second Target Station, while benefiting from the Proton Power Upgrade.
- This allows tremendous cost savings by leveraging existing infrastructure.
 - Projected cost ~\$142M, versus >\$1B if built from green field.

 OAK RIDGE
National Laboratory

DOE is very supportive of the SEEMS project.

韩国IBS-RAON 直线型重离子加速器

- 600 MeV proton @ 660 μA (4×10^{15} protons/s), 80 MHz
- $\approx 7 \times 10^8$ muons/s
- Muon energy **130 MeV/c**~**140 MeV/c**
- graphite target



Outline报告大纲

➤ 缪子源的凝聚态应用(能做什么)

缪子产生及利用原理

缪子自旋共振/弛豫/旋转谱学(μ SR)

缪子激励X射线发射谱学研究(MIXE)

➤ 缪子源的类型以及缪子束参数要求(如何做?)

缪子源类型, 靶站, 及谱仪

连续型缪子源和脉冲型缪子源的比较

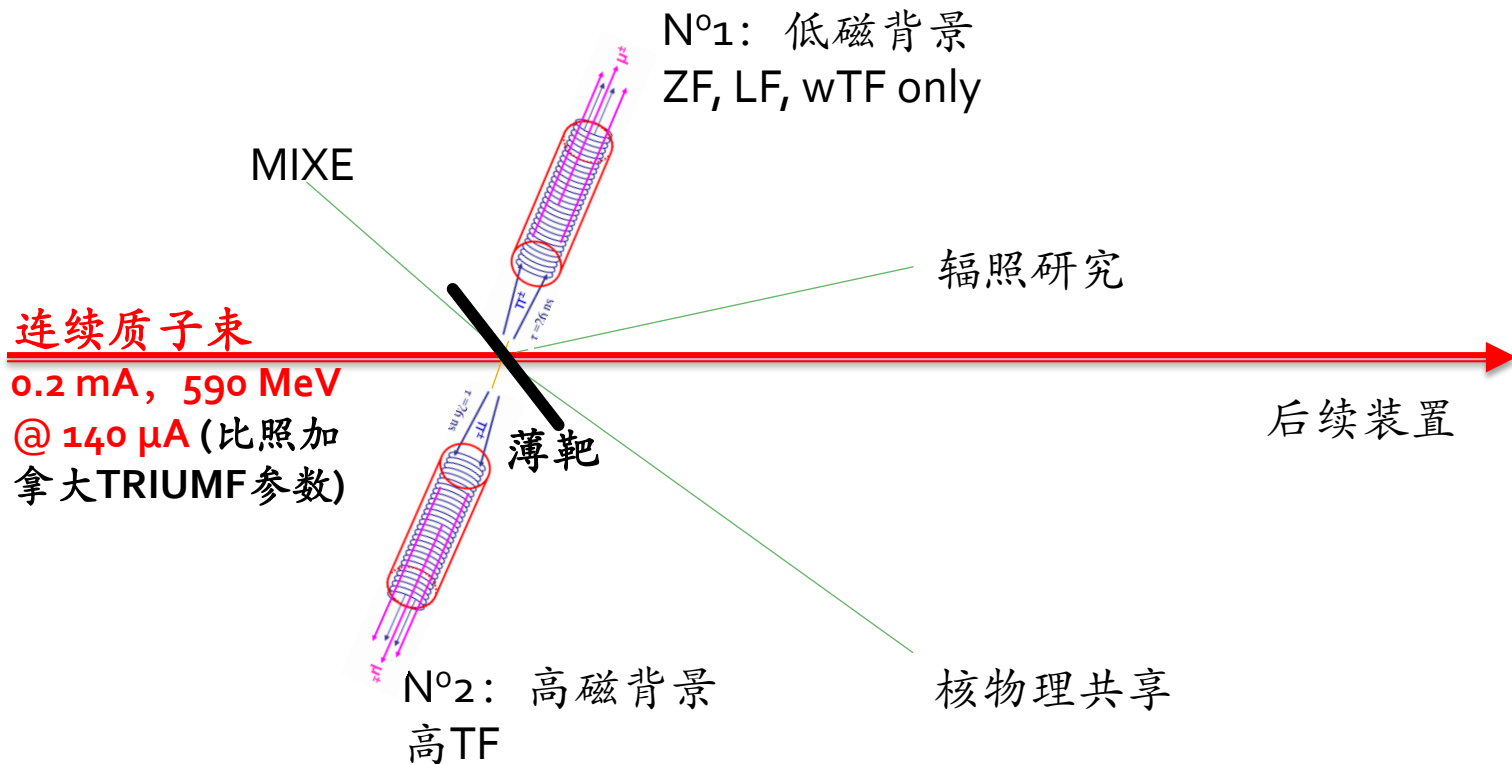
国际新型缪子源发展规划

倡议我国连续缪子源以及新型缪子谱仪

建设中国自有的连续muon源具有重要的战略意义！

建设一台基于连续缪子源的，可以正常开展凝聚态物理研究以及材料学研究工作的缪子谱仪更是当务之急！

连续Beamline可能布局方案(简单薄靶)



The End

Thanks for your attention!

感谢各位专家，敬请批评指正