

低エネルギー陽子・中性子検出器

清水 裕彦

中性子科学研究系

KEK



Date(2006/01/26) by(H.M.Shimizu)

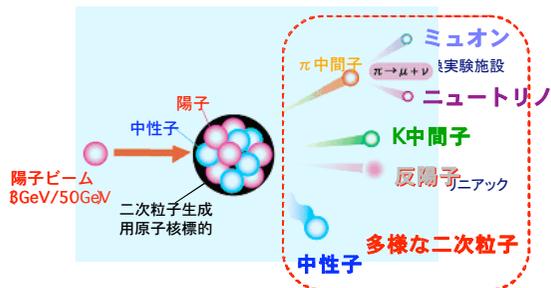
Title(低エネルギー陽子・中性子検出器)

Conf(RCNP研究会「マイクロパターン検出器の開発と展望」) At(Mihogaoka)

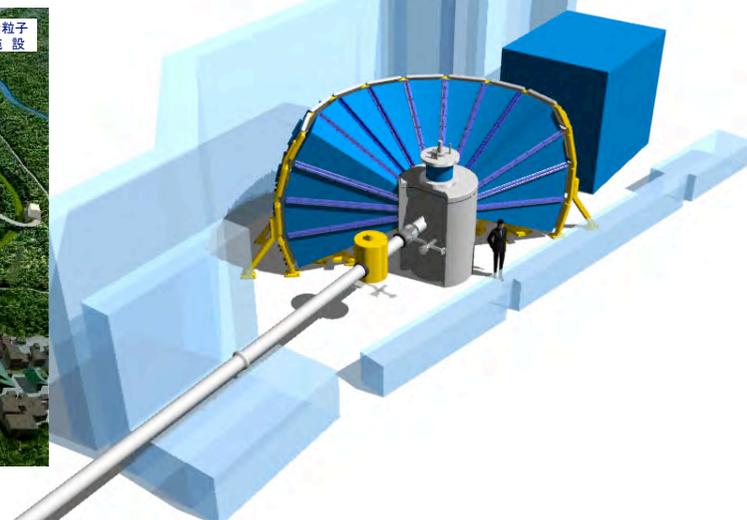
Class(Presentation) Language(Japanese)

大強度陽子加速器 (J-PARC)

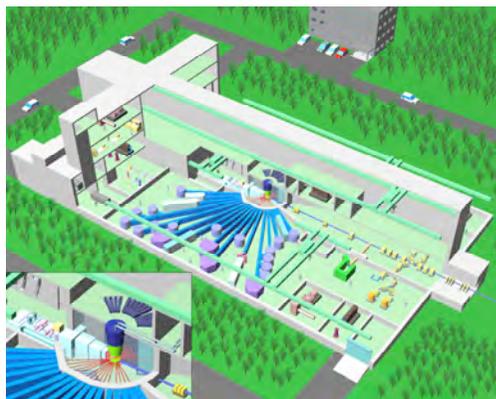
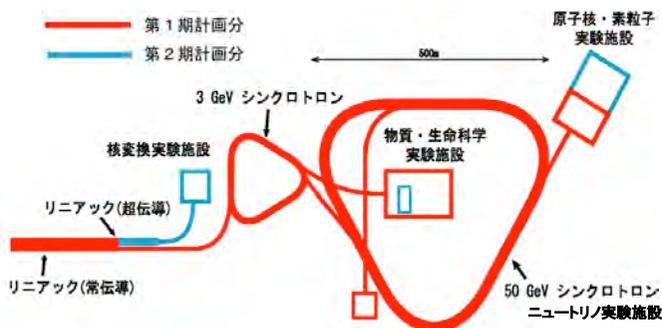
※ J-PARC = Japan Proton Accelerator Research Complex



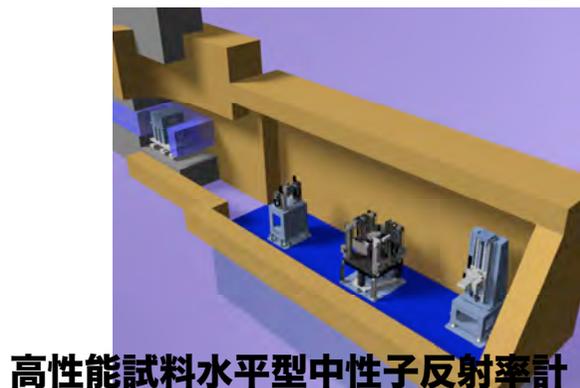
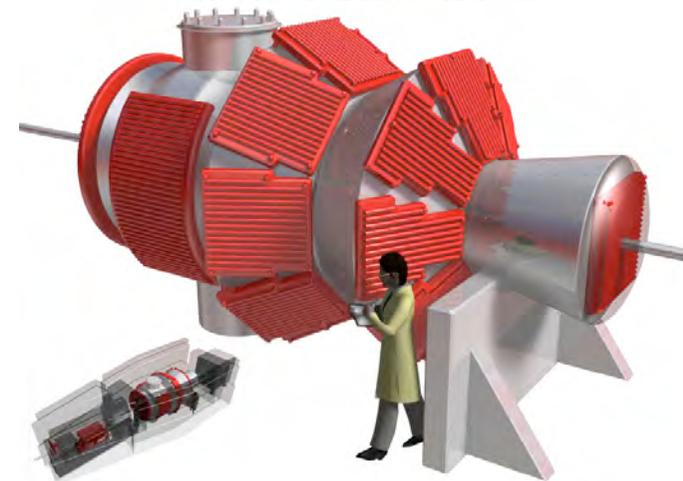
高分解能チョッパー分光器



○ J-PARC の施設構成



高強度汎用全散乱装置



高性能試料水平型中性子反射率計

超高分解能粉末回折装置

Date(2006/01/26) by(H.M.Shimizu)

Title(低エネルギー陽子・中性子検出器)

Conf(RCNP研究会「マイクロパターン検出器の開発と展望」) At(Mihogaoka)

Class(Presentation) Language(Japanese)

キーワード

中性子



ナノスケール (1nm-1 μ m)
ダイナミクス (動的状態観察)
ソフトマター (軽元素系物質)
非侵襲

中性子を利用する機会は限られている

中性子光学



中性子利用効率の桁違いの向上

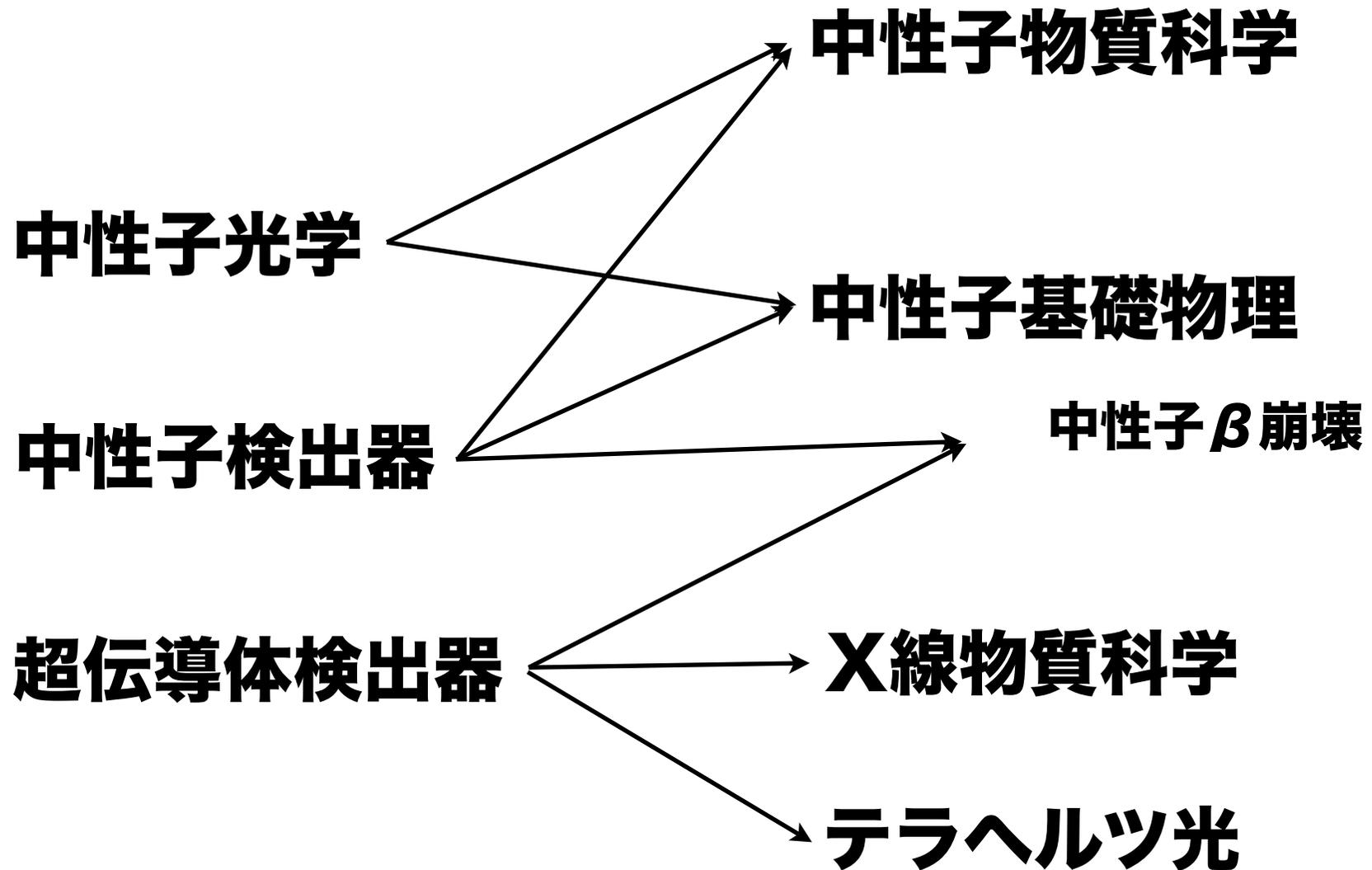


Date(2006/01/26) by(H.M.Shimizu)

Title(低エネルギー陽子・中性子検出器)

Conf(RCNP研究会「マイクロパターン検出器の開発と展望」) At(Mihogaoka)

Class(Presentation) Language(Japanese)



Date(2006/01/26) by(H.M.Shimizu)

Title(低エネルギー陽子・中性子検出器)

Conf(RCNP研究会「マイクロパターン検出器の開発と展望」) At(Mihogaoka)

Class(Presentation) Language(Japanese)

J-PARC 中性子光学・基礎物理実験装置

先進的光学系



高品位ビーム



物質研究への応用



基礎物理

テーマ「崩壊」
高偏極ビーム

- 素粒子標準モデルの検証
- CKM行列のユニタリティの検証
- CP不変性の破れの検証
- 標準ビッグバン宇宙モデルの検証
- 素粒子統一理論モデルの探索
など

テーマ「散乱」
大強度ビーム

- 重力逆2乗則の検証
- 余剰次元の検証(超弦理論モデル)
- 核力の荷電対称性や荷電独立性の
破れの検証
など

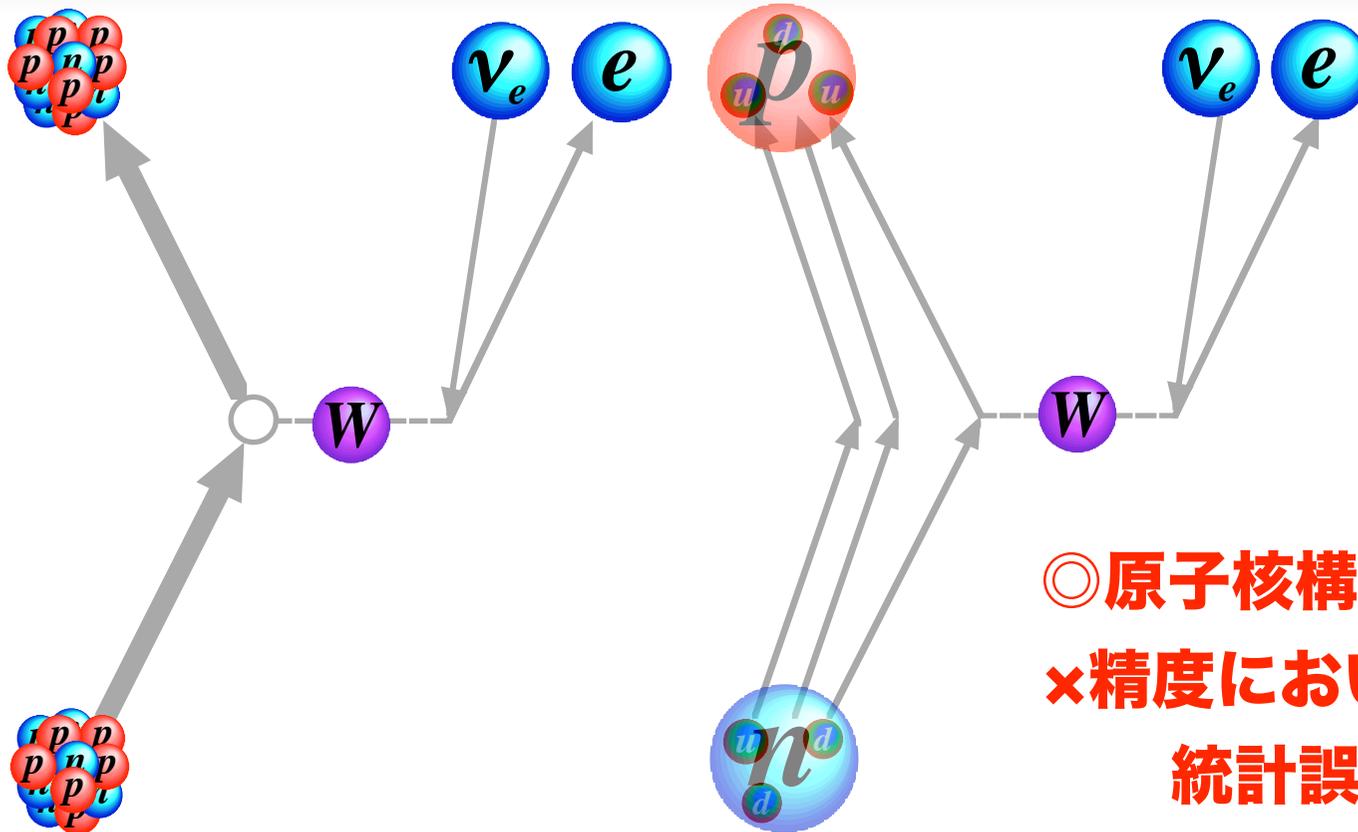
テーマ「干渉」
低発散ビーム

- 重力相互作用の検証
- AC効果の検証
など



原子核β崩壊

自由中性子β崩壊



◎原子核構造の補正がない
 ×精度において不利
 統計誤差、系統誤差

$$dN \propto \left[1 + a \frac{\mathbf{p}_e \cdot \mathbf{p}_{\bar{\nu}}}{E_e \cdot E_{\bar{\nu}}} + \frac{\mathbf{J}}{J} \cdot \left(A \frac{\mathbf{p}_e}{E_e} + B \frac{\mathbf{p}_{\bar{\nu}}}{E_{\bar{\nu}}} + D \frac{\mathbf{p}_e \times \mathbf{p}_{\bar{\nu}}}{E_e E_{\bar{\nu}}} \right) + \dots \right]$$

$$a = \frac{1 - |\lambda|^2}{1 + 3|\lambda|^2} \quad A = -2 \frac{|\lambda| \cos \phi + |\lambda|^2}{1 + 3|\lambda|^2} \quad B = -2 \frac{|\lambda| \cos \phi - |\lambda|^2}{1 + 3|\lambda|^2} \quad D = 2 \frac{|\lambda| \sin \phi}{1 + 3|\lambda|^2}$$

$$\tau = \frac{K / \ln 2}{V_{ud}^2 G_F^2 (1 + \lambda^2) f}$$

基本パラメタは

λ, τ_n or λ, V_{ud}

2個だけ!



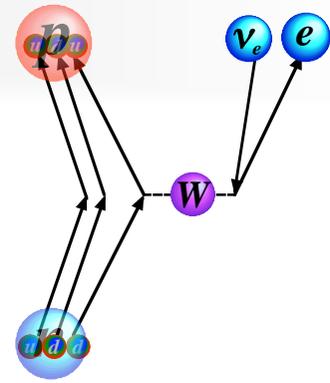
Date(2006/01/26) by(H.M.Shimizu)

Title(低エネルギー陽子・中性子検出器)

Conf(RCNP研究会「マイクロパターン検出器の開発と展望」) At(Mihogaoka)

Class(Presentation) Language(Japanese)

中性子β崩壊



$$V_{ud}^2 = \frac{K / \ln 2}{G_F^2 (1 + \Delta_R^V) (1 + \lambda^2) f (1 + \delta_R) \tau_n}$$

$$\lambda = \frac{G_A^V}{G_V^V} \quad \begin{array}{l} G_A^{V2} = G_A^2 (1 + \Delta_R^A) \\ G_V^{V2} = G_V^2 (1 + \Delta_R^V) \end{array}$$

$$f(1 + \delta_R) = 1.71489 \pm 0.00002$$

$$\tau_n = 885.6 \pm 0.8 \text{ sec}$$

誤差 ±0.0009

$$\lambda = -1.2690 \pm 0.0022$$

誤差 ±0.0017

$$|V_{ud}| = 0.9745 \pm 0.0016$$

ほぼ実験誤差

$$\Delta_R^V: \pm 0.0004$$

δ_C : なし

$$|V_{ud}|^2 + |V_{us}|^2 + |V_{ub}|^2 = 0.9978 \pm 0.0033$$



Date(2006/01/26) by(H.M.Shimizu)

Title(低エネルギー陽子・中性子検出器)

Conf(RCNP研究会「マイクロパターン検出器の開発と展望」) At(Mihogaoka)

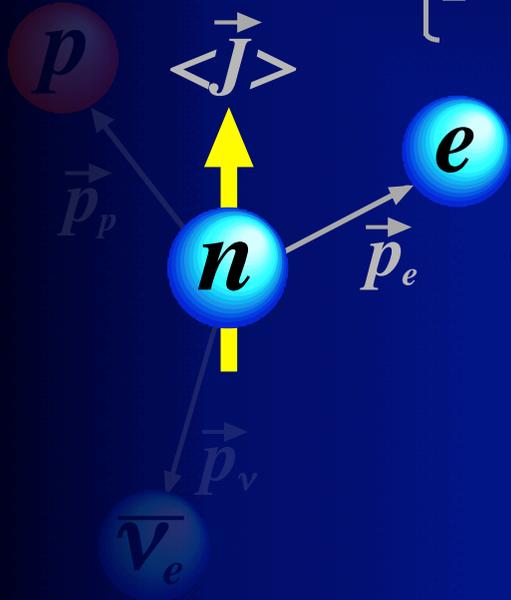
Class(Presentation) Language(Japanese)

電子非対称度

$$A \frac{\langle \vec{J} \rangle \cdot \vec{p}_e}{JE_e}$$

$$W dE_e d\Omega_e d\Omega_\nu \sim p_e E_e (E_0 - E_e)^2 dE_e d\Omega_e d\Omega_\nu$$

$$\times \left[1 + a \frac{\vec{p}_e \cdot \vec{p}_\nu}{E_e E_\nu} + \frac{\langle \vec{J} \rangle}{J} \left[A \frac{\vec{p}_e}{E_e} + B \frac{\vec{p}_\nu}{E_\nu} + D \frac{\vec{p}_e \times \vec{p}_\nu}{E_e E_\nu} \right] \right]$$



電子非対称度

中性子平均寿命

$$A = -0.1189 \pm 0.0007$$

$$\lambda = -1.2739 \pm 0.0019$$

$$|V_{ud}| = -0.9713 \pm 0.0013$$

$$\tau = \frac{2\pi^3 \hbar^7}{f^R m_e^5 c^4} \frac{1}{|G_V|^2 + 3|G_A|^2}$$

$$= (885.7 \pm 0.7) \text{ s}$$

$$1 - |V_{ud}|^2 - |V_{us}|^2 - |V_{ub}|^2 = 0.0083 \pm 0.0028$$

$$0.2196 \pm 0.0023$$

$$0.0036 \pm 0.0009$$

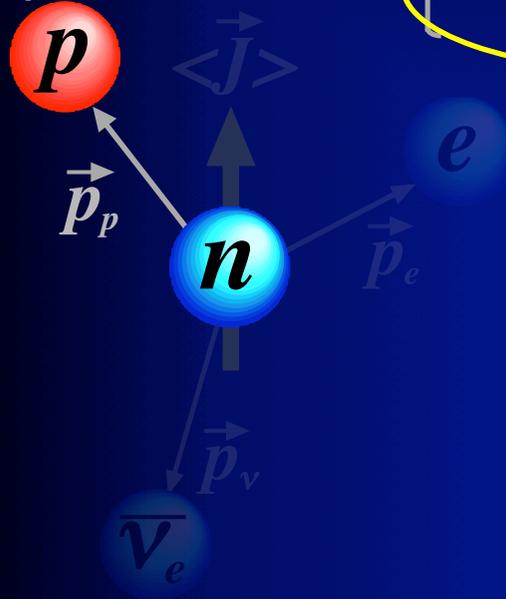
3 σ deviation?

陽子スペクトル

$$WdE_e d\Omega_e d\Omega_\nu \sim p_e E_e (E_0 - E_e)^2 dE_e d\Omega_e d\Omega_\nu$$

$T_p \leq 750 \text{ eV}$

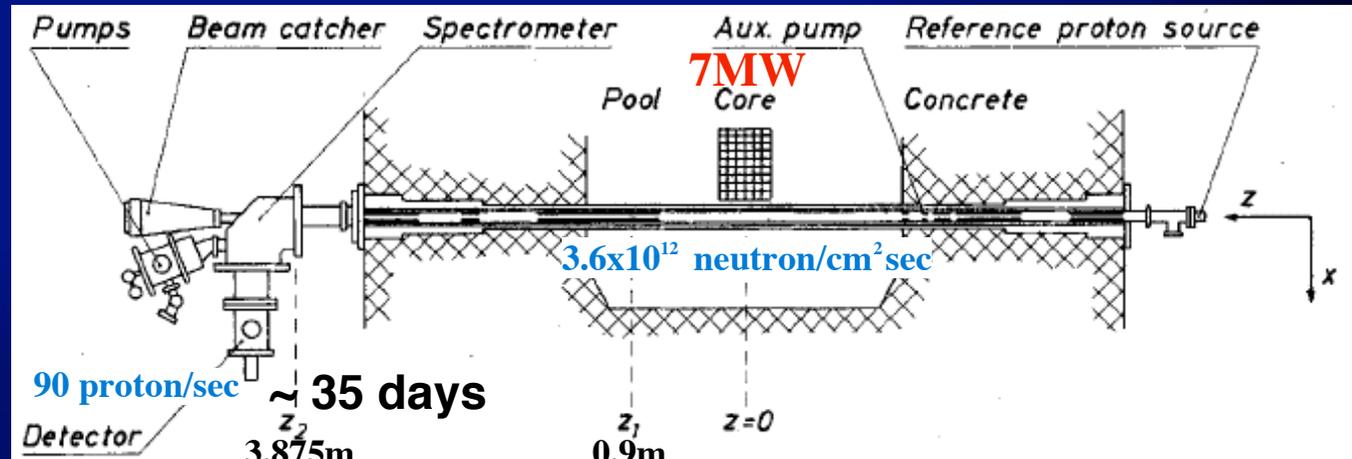
$$\left[1 + a \frac{\vec{p}_e \cdot \vec{p}_\nu}{E_e E_\nu} + b \frac{m_e}{E_e} + \frac{\langle \vec{J} \rangle}{J} \cdot \left[A \frac{\vec{p}_e}{E_e} + B \frac{\vec{p}_\nu}{E_\nu} + D \frac{\vec{p}_e \times \vec{p}_\nu}{E_e E_\nu} \right] \right]$$



$$a = \frac{1 - |\lambda|^2}{1 + 3|\lambda|^2}$$

$$b = \frac{2 \text{Re}(G_S G_V^* + G_A G_T^*)}{|G_S|^2 + |G_V|^2 + 3|G_A|^2 + 3|G_T|^2}$$

陽子スペクトルの測定実験 (Phys. Rev. 18 (1978) 3970)



$$a = -0.1017 \pm 0.0051$$

$$\lambda = -1.259 \pm 0.017$$

陽子スペクトル

$$W dE_e d\Omega_e d\Omega_\nu \sim p_e E_e (E_0 - E_e)^2 dE_e d\Omega_e d\Omega_\nu$$

$$T_p \leq 750 \text{ eV}$$

$$\left[1 + a \frac{\vec{p}_e \cdot \vec{p}_\nu}{E_e E_\nu} + b \frac{m_e}{E_e} + \frac{\langle \vec{J} \rangle}{J} \cdot \left[A \frac{\vec{p}_e}{E_e} + B \frac{\vec{p}_\nu}{E_\nu} + D \frac{\vec{p}_e \times \vec{p}_\nu}{E_e E_\nu} \right] \right]$$

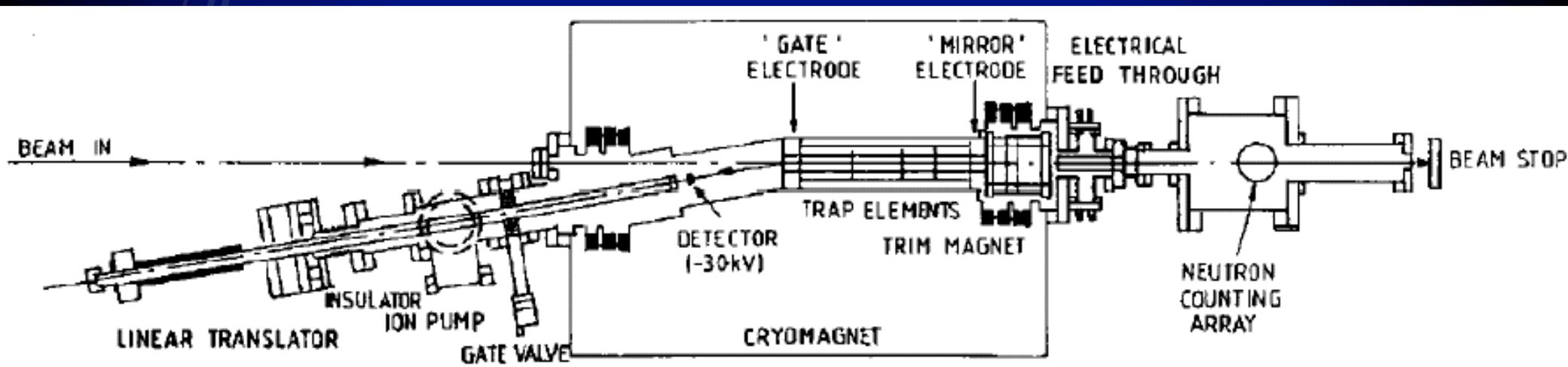


$$\vec{p}_p$$


$$e$$

$$a = \frac{1 - |\lambda| \rho}{1 + 3|\lambda| \rho}$$

陽子スペクトルの測定実験 (J. Phys. G 28 (2002) 1325)



$$a = -0.1054 \pm 0.0055$$

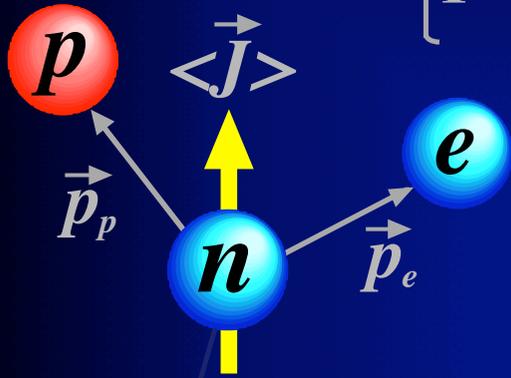
$$|\lambda| = 1.271 \pm 0.018$$

時間反転対称性

$$D = \frac{\langle \vec{J} \rangle \cdot (\vec{p}_e \times \vec{p}_v)}{J E_e E_v}$$

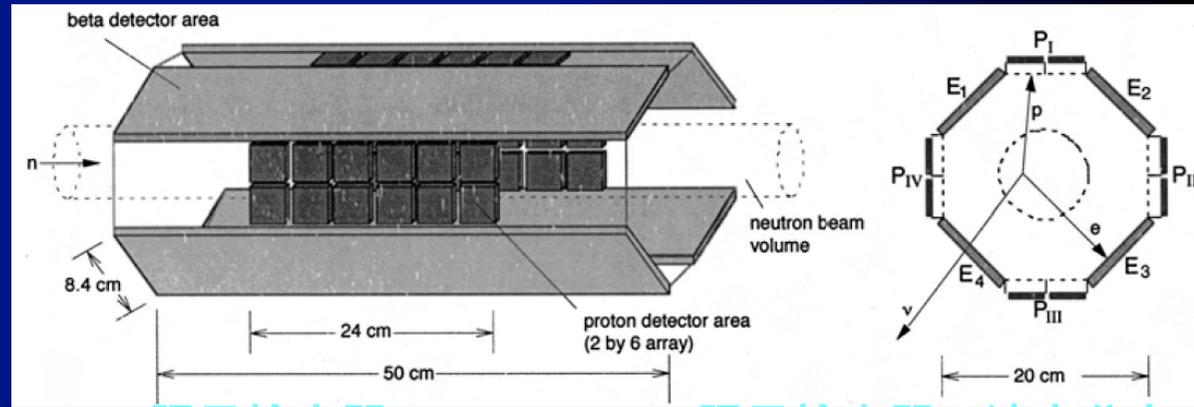
$$W dE_e d\Omega_e d\Omega_v \sim p_e E_e (E_0 - E_e)^2 dE_e d\Omega_e d\Omega_v$$

$$\times \left[1 + a \frac{\vec{p}_e \cdot \vec{p}_v}{E_e E_v} + \frac{\langle \vec{J} \rangle}{J} \cdot \left[A \frac{\vec{p}_e}{E_e} + B \frac{\vec{p}_v}{E_v} + D \frac{\vec{p}_e \times \vec{p}_v}{E_e E_v} \right] \right]$$



$$D = (-0.6 \pm 1.2(\text{stat}) \pm 0.5(\text{syst})) \times 10^{-3}$$

実験のセットアップ



陽子検出器

陽子検出器の波高分布

各モデルが予測する値

D

小林-益川行列

$< 10^{-12}$

θ -QCD

$< 10^{-14}$

超対称性

$< 10^{-7} - 10^{-6}$

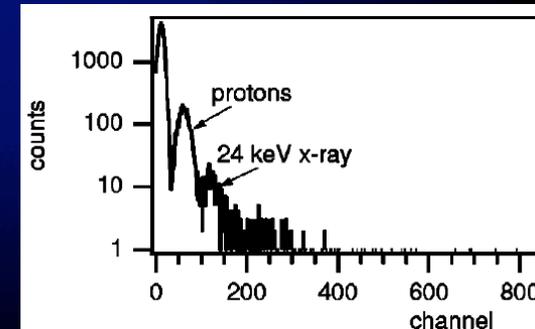
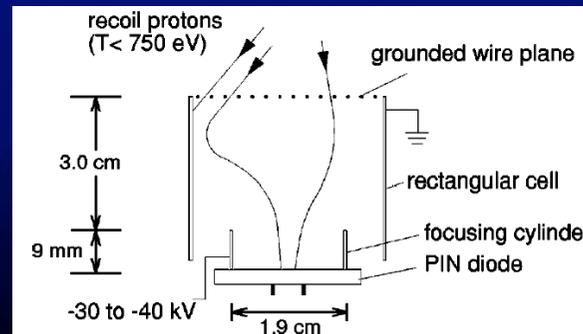
左右対称性

$< 10^{-5} - 10^{-4}$

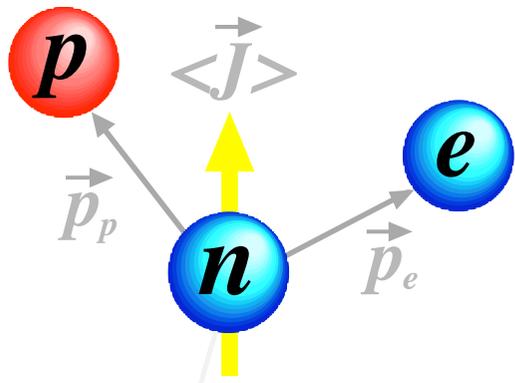
終状態相互作用による疑似効果

$$|D^{\text{EM}}| < (2.8 \times 10^{-5}) (m_e / p_e)$$

$$|D^{\text{WM}}| < 1.1 \times 10^{-5}$$

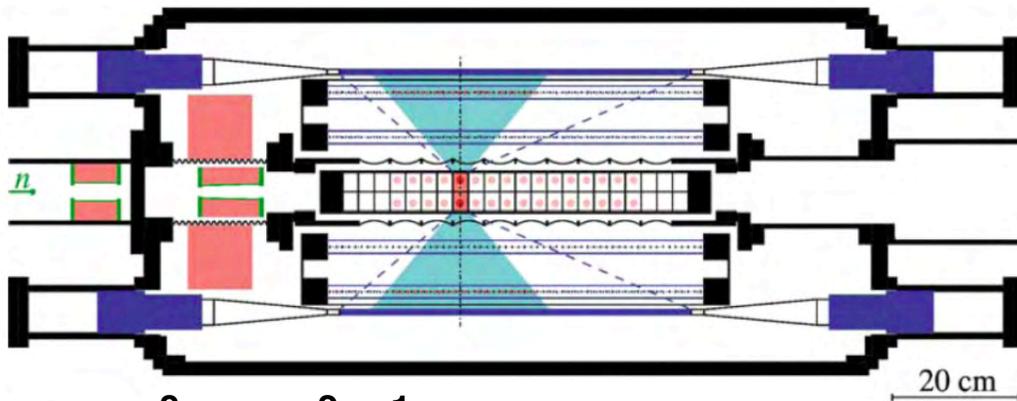


時間反転対称性



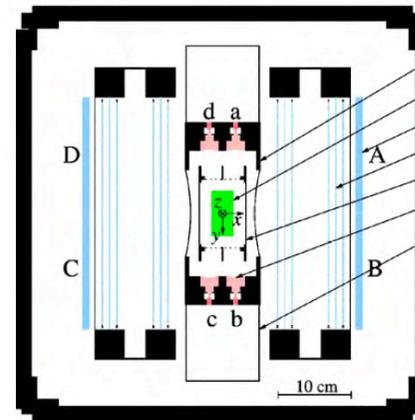
$$D = \frac{\langle \vec{J} \rangle \cdot (\vec{p}_e \times \vec{p}_p)}{JE_e E_p}$$

T.Soldner et al., PLB581(2004)49

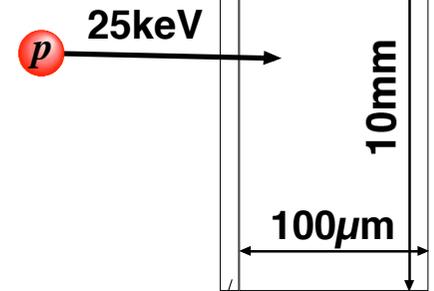


$8 \times 10^8 \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
(thermal equivalent)

3600 n cm^{-3}



10 event s^{-1}
40 days + 10 days



dead layer 25nm

$$D = (-2.8 \pm 6.4(\text{stat}) \pm 3.0(\text{syst})) \times 10^{-4}$$

$$\phi_{AV} = 180.04^\circ \pm 0.09^\circ$$

updated world average

$$D = (-3.9 \pm 5.8) \times 10^{-4}$$

$$\phi_{AV} = 180.05^\circ \pm 0.08^\circ$$

中性子磁気光学



中性子超高偏極

超伝導体低速陽子検出器



信号雑音比向上

運動学的完全測定



Date(2006/01/26) by(H.M.Shimizu)

Title(低エネルギー陽子・中性子検出器)

Conf(RCNP研究会「マイクロパターン検出器の開発と展望」) At(Mihogaoka)

Class(Presentation) Language(Japanese)

中性子光学



Date(2006/01/26) by(H.M.Shimizu)

Title(低エネルギー陽子・中性子検出器)

Conf(RCNP研究会「マイクロパターン検出器の開発と展望」) At(Mihogaoka)

Class(Presentation) Language(Japanese)

中性子光学

(Analyzing Capability) = (Source Power) x ('Efficacy')
Production, Moderation



**Optics, Detectors, Signal Processing, Sample Environment,
Analyzing Algorithm, Theory, ...**

**Advanced Optics and Detectors
enhance Neutron Utilization 'Efficacy'.**



Date(2006/01/26) by(H.M.Shimizu)

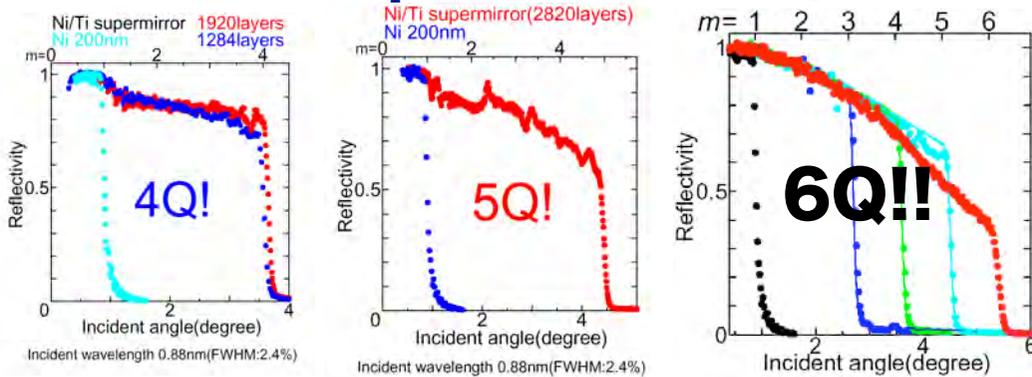
Title(低エネルギー陽子・中性子検出器)

Conf(RCNP研究会「マイクロパターン検出器の開発と展望」) At(Mihogaoka)

Class(Presentation) Language(Japanese)

Device Level Achievements

Reflective Optics M.Hino et al. (Kyoto Univ.)



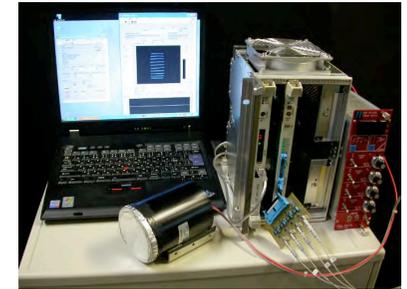
K.Ikeda et al. (RIKEN)



Imaging Detector

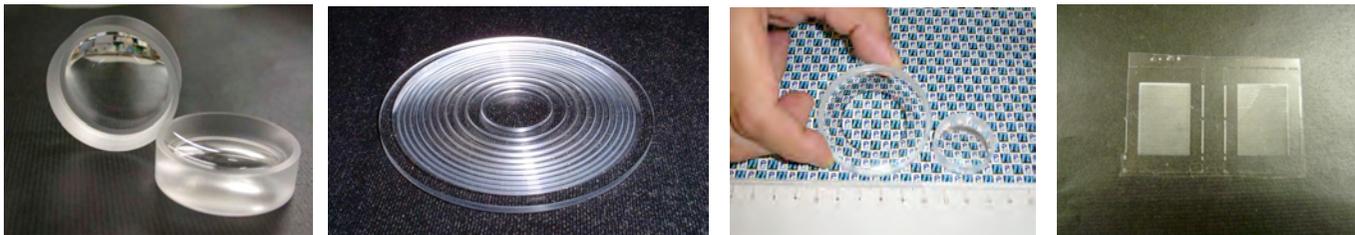
K.Hirota (RIKEN)
S.Sato (KEK) et al.

RPMT

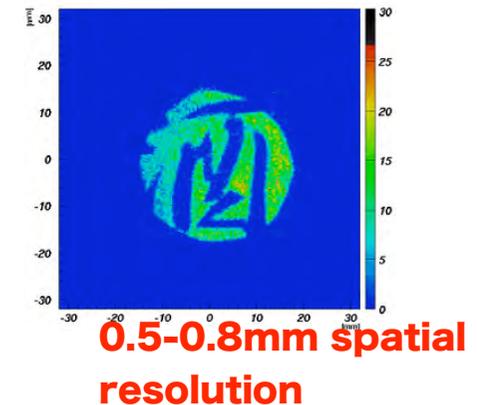


Compound Refractive Optics

Biconcave Fresnel-shape Coaxial Double Biconcave Microprism



T.Adachi et al. (RIKEN) T.Shinohara et al. (RIKEN)



FPPMT



Magnetic Optics

Superconducting Permanent Pulsed Variable Permanent



H.M.Shimizu (RIKEN), T.Oku, J.Suzuki (JAERI) Y.Iwashita et al. (Kyoto Univ.)

Date(2006/01/26) by(H.M.Shimizu)

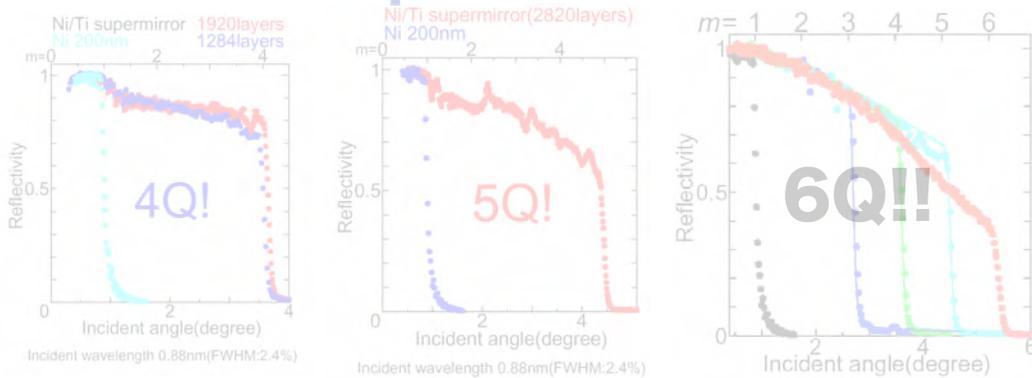
Title(低エネルギー陽子・中性子検出器)

Conf(RCNP研究会「マイクロパターン検出器の開発と展望」) At(Mihogaoka)

Class(Presentation) Language(Japanese)

Device Level Achievements

Reflective Optics M.Hino et al. (Kyoto Univ.)



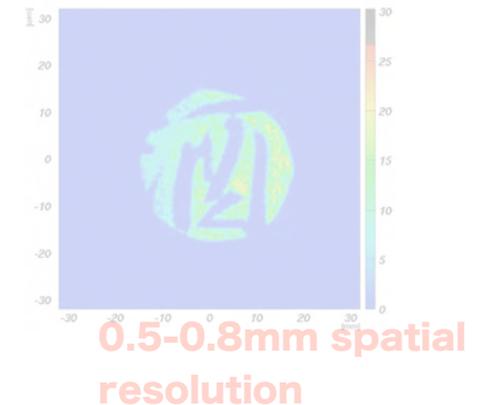
K.Ikeda et al. (RIKEN)



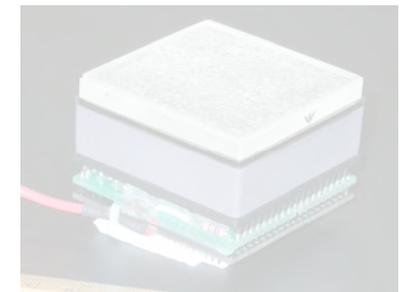
Imaging Detector

K.Hirota (RIKEN)
S.Sato (KEK) et al.

RPMT



FPPMT



Compound Refractive Optics

Biconcave Fresnel-shape Coaxial Double Biconcave Microprism



T.Adachi et al. (RIKEN) T.Shinohara et al. (RIKEN)

Magnetic Optics

寄生散乱がない

Superconducting Permanent Pulsed Variable Permanent



H.M.Shimizu (RIKEN), T.Oku, J.Suzuki (JAERI) Y.Iwashita et al. (Kyoto Univ.)

Date(2006/01/26) by(H.M.Shimizu)

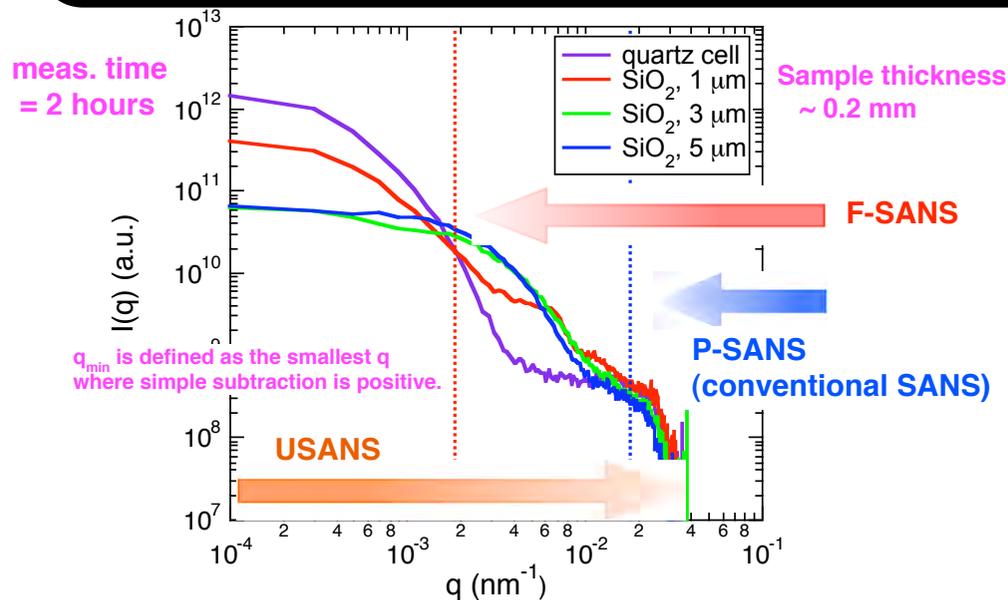
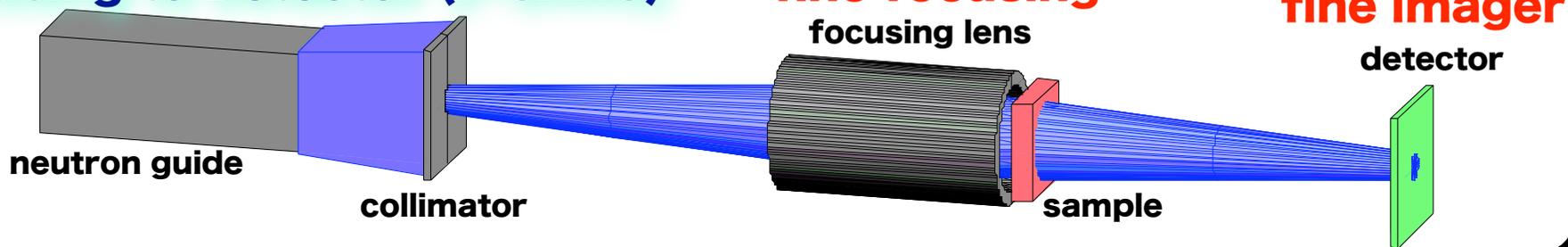
Title(低エネルギー陽子・中性子検出器)

Conf(RCNP研究会「マイクロパターン検出器の開発と展望」) At(Mihogaoka)

Class(Presentation) Language(Japanese)

A Successful Application to Cold Neutron Scattering

Focusing to Detector (F-SANS)

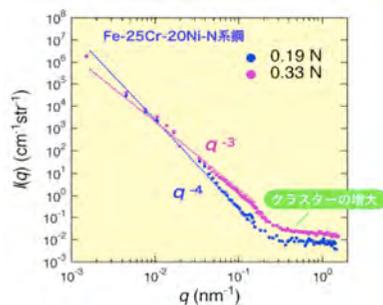
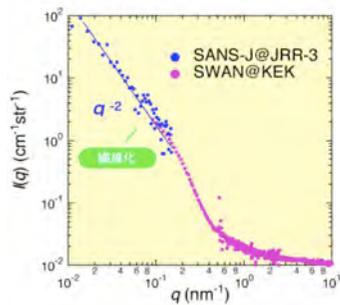


Q_{\min} is lowered by 1/10 or less in two dimensional imaging.

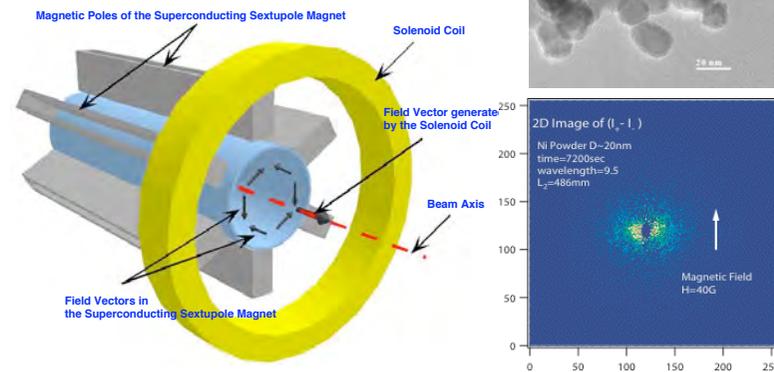
Neutron Utilization Efficacy is improved by a factor of 100 or more.

Magnetic Small Angle Neutron Scattering magnetism of metal particles

Protein Cluster in Water



Atomic Cluster in Nitrogen-rich Steel



Date(2006/01/26) by(H.M.Shimizu)

Title(低エネルギー陽子・中性子検出器)

Conf(RCNP研究会「マイクロパターン検出器の開発と展望」) At(Mihogaoka)

Class(Presentation) Language(Japanese)

(Analyzing Capability) = (Source Power) x ('Efficacy')
Production, Moderation



**Optics, Detectors, Signal Processing, Sample Environment,
Analyzing Algorithm, Theory, ...**

**Advanced Optics and Detectors
enhance Neutron Utilization 'Efficacy'.**

Focusing Optics and Imaging Detector

improved the neutron utilization 'efficacy' by a factor of 100 or more.



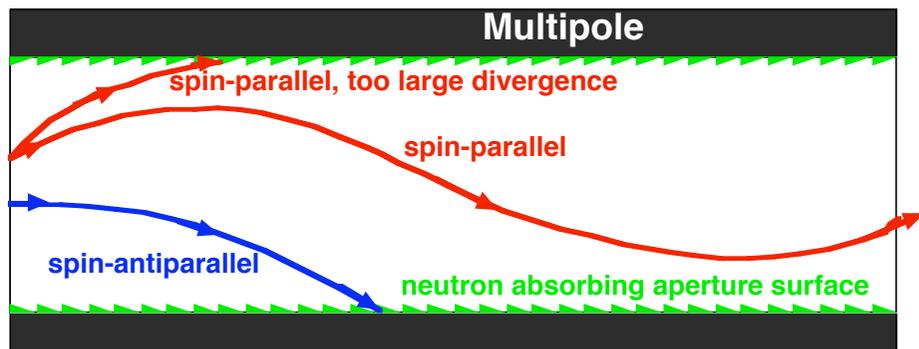
Date(2006/01/26) by(H.M.Shimizu)

Title(低エネルギー陽子・中性子検出器)

Conf(RCNP研究会「マイクロパターン検出器の開発と展望」) At(Mihogaoka)

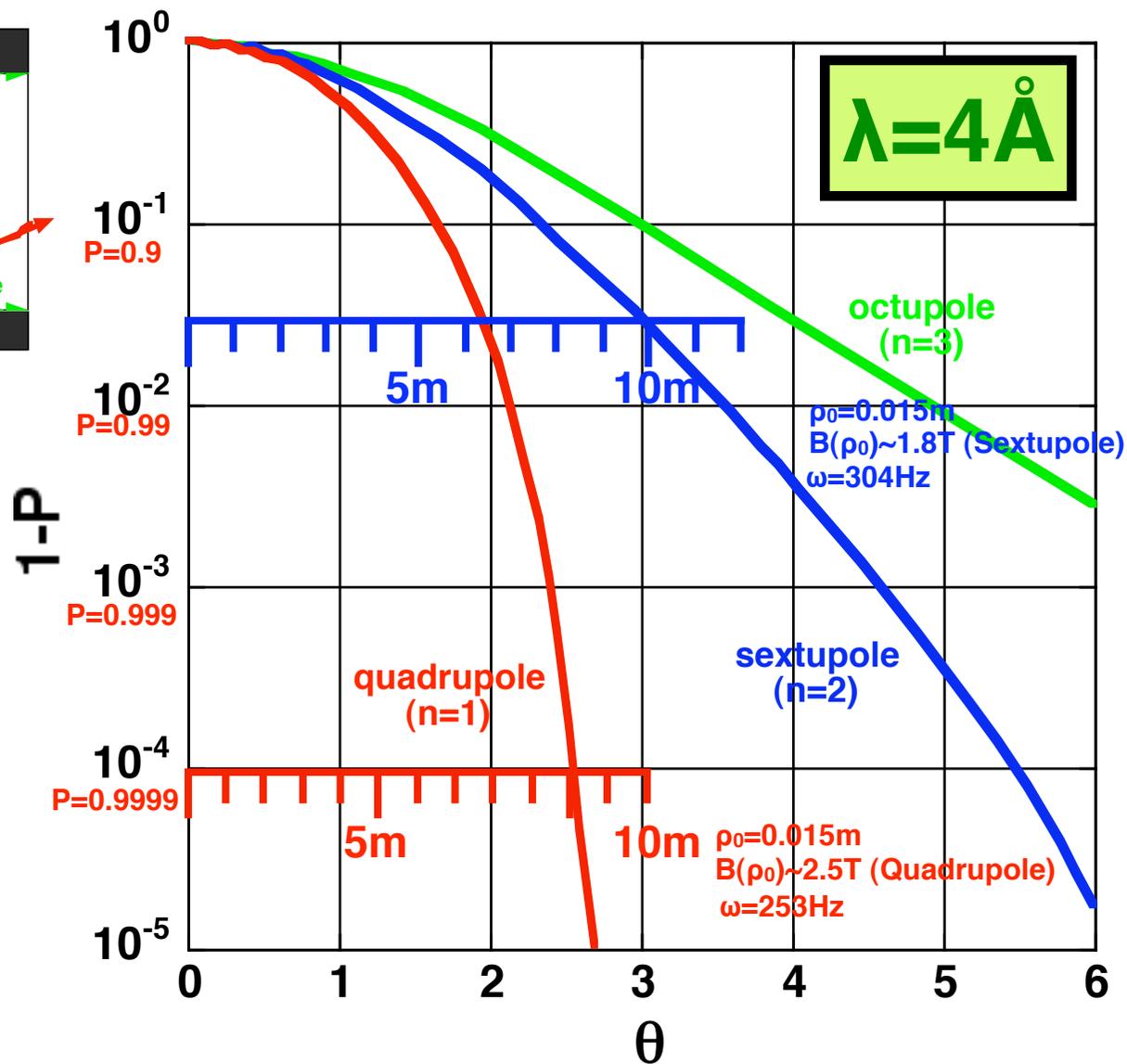
Class(Presentation) Language(Japanese)

Multipole Spin Filter

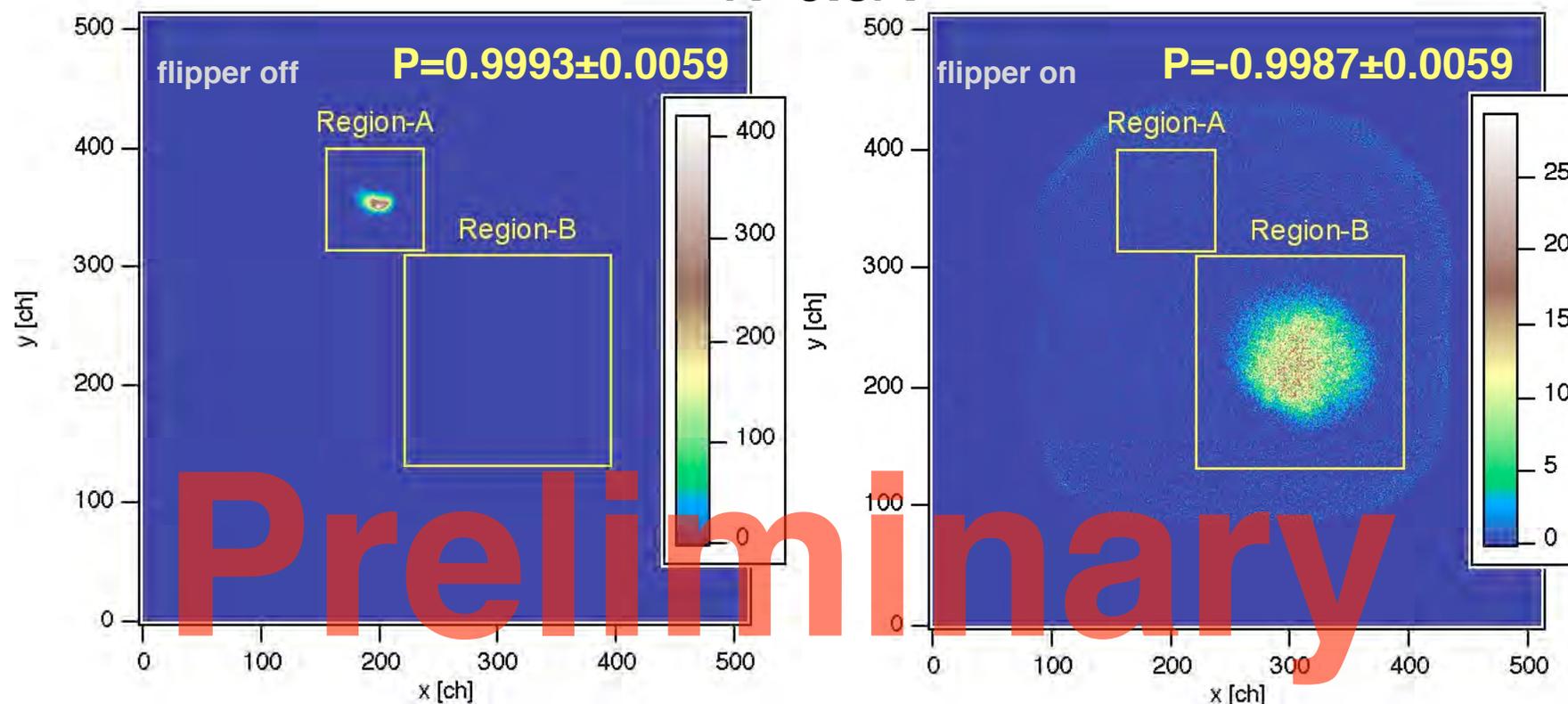
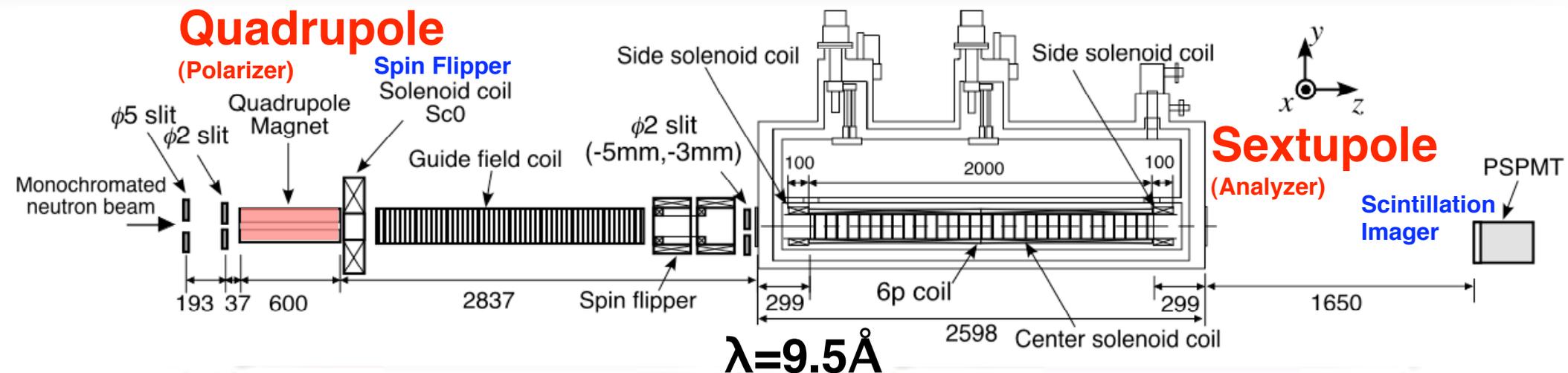


- (1) spin filter
- (2) collimator (divergence filter)

$P > 0.9999 \Leftrightarrow \Delta P < 10^{-4}$,
 for accurate determination of correlation
 terms in neutron β -decay
 for extracting weak spin-flip processes



Quadrupole Magnetic Polarizer



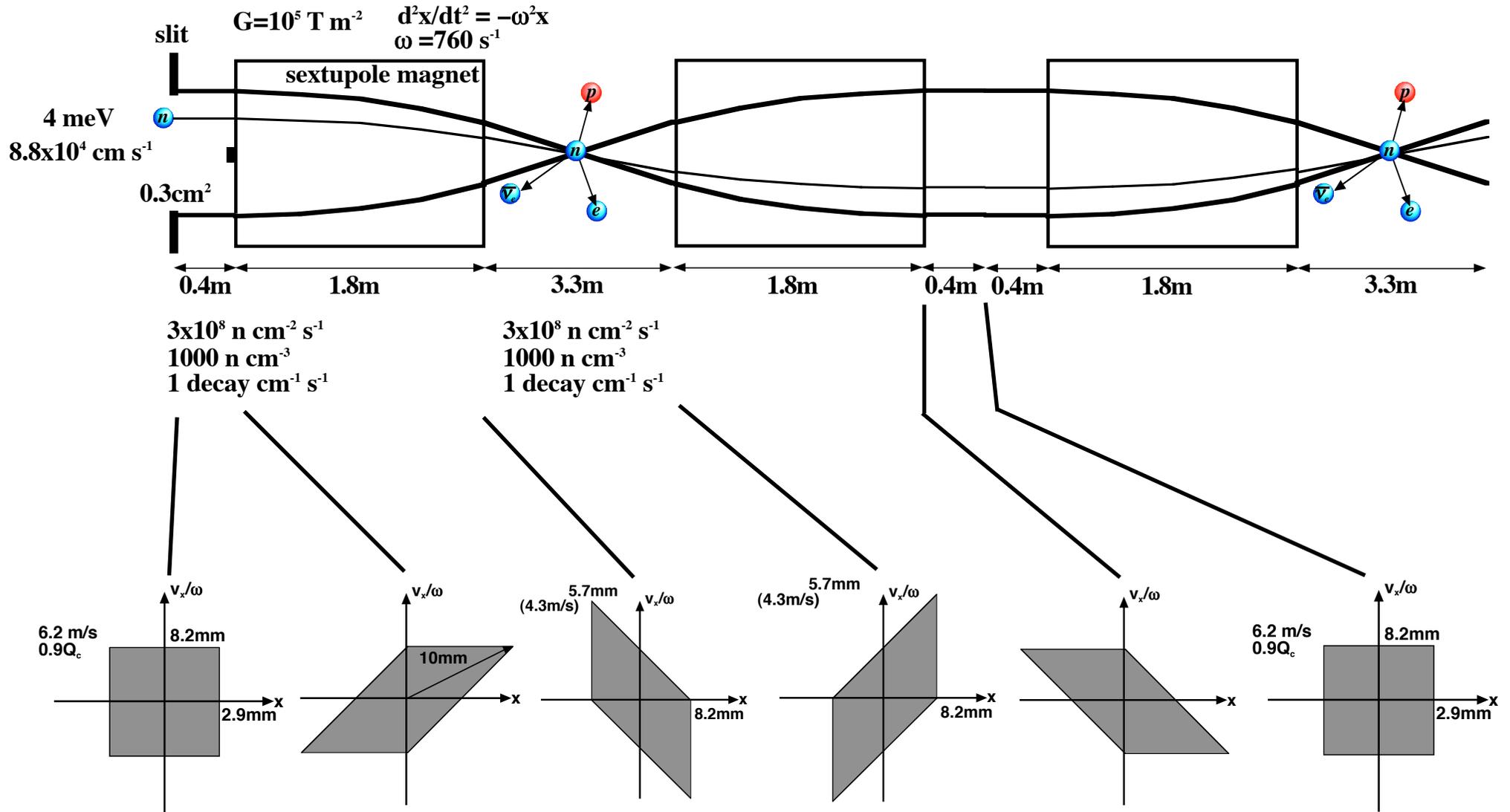
Date(2006/01/26) by(H.M.Shimizu)

Title(低エネルギー陽子・中性子検出器)

Conf(RCNP研究会「マイクロパターン検出器の開発と展望」) At(Mihogaoka)

Class(Presentation) Language(Japanese)

Refractive Focusing



超伝導体低速陽子検出器



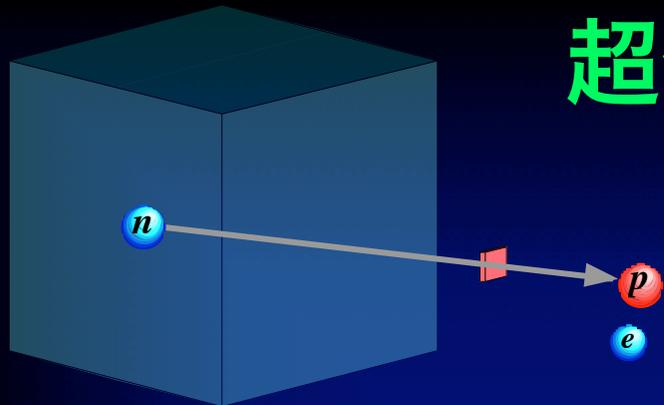
Date(2006/01/26) by(H.M.Shimizu)

Title(低エネルギー陽子・中性子検出器)

Conf(RCNP研究会「マイクロパターン検出器の開発と展望」) At(Mihogaoka)

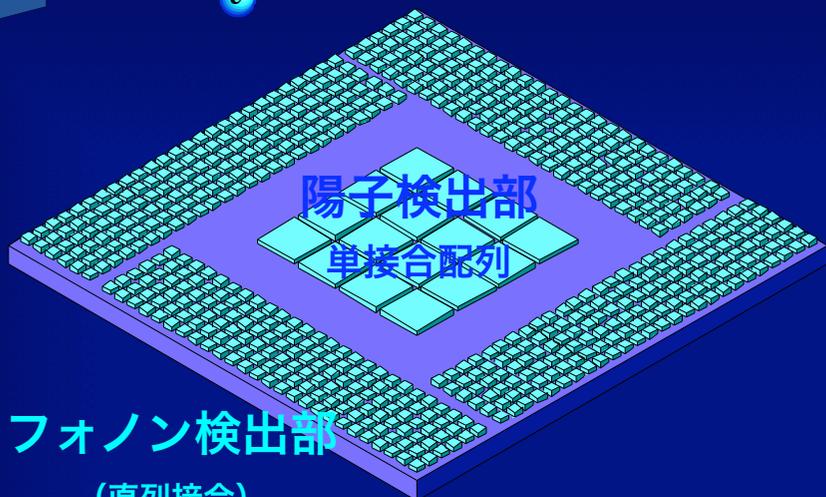
Class(Presentation) Language(Japanese)

超伝導体陽子検出器



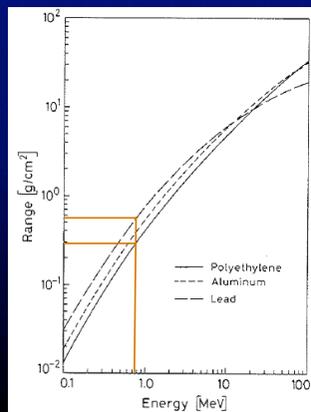
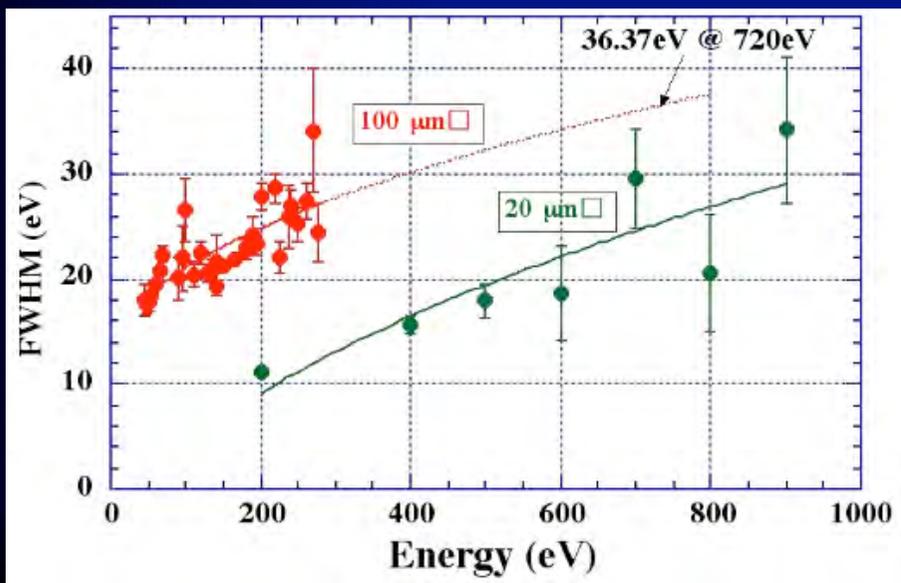
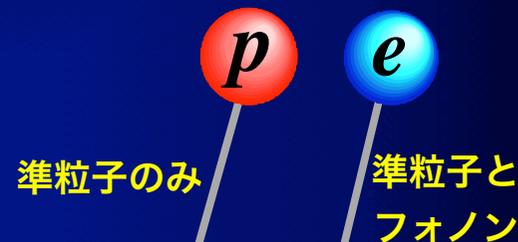
陽子のエネルギーを直接測定

粒子識別方法

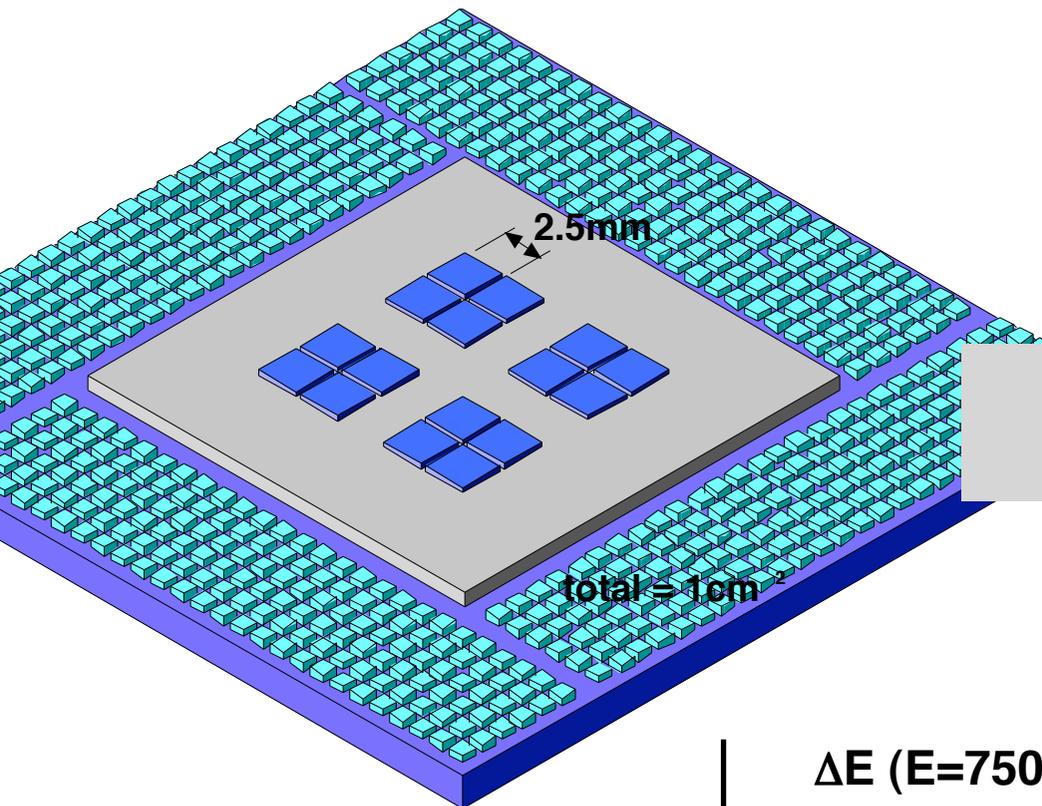


フォノン検出部
(直列接合)

$$0.002 \leq \Delta E/E \leq 0.1$$



極低温陽子検出器 (TES)



$C=13$ pJ/K
 $T_c=0.4$ K
 Ti(10nm)+Au(7.5nm)

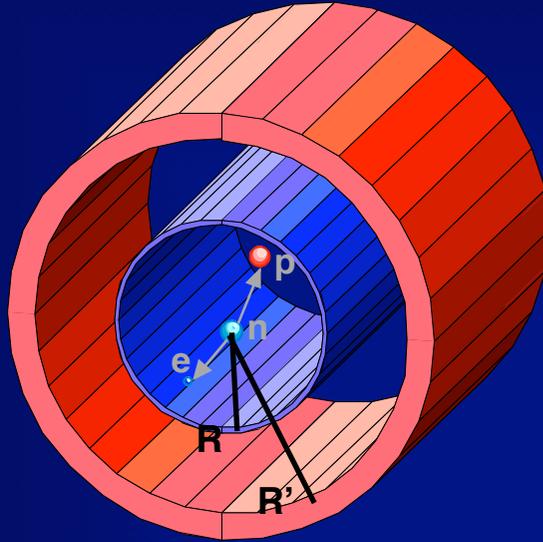
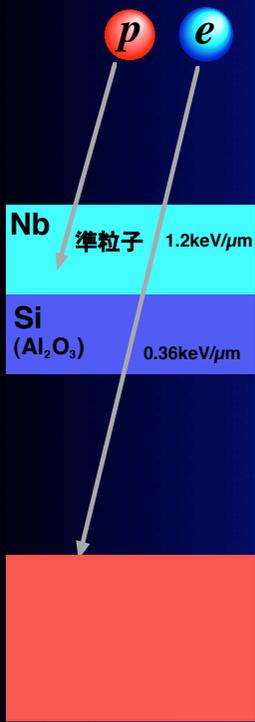
SiN ($\sim\mu\text{m}$)

$T_0=0.35$ K
 $G=12$ nW/K

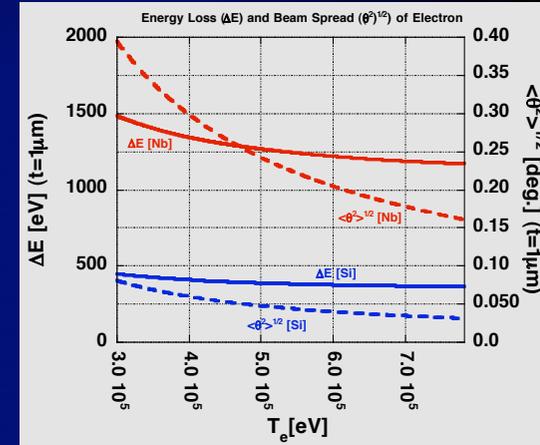
	ΔE (E=750eV)	立ち上がり	立ち下がり
ISAS, SPIE2002 の値から換算	89 eV $\alpha_{\text{static}}=150$ $\alpha_{\text{operation}}=40$		
	35 eV $\alpha_{\text{static}}=1000$ $\alpha_{\text{operation}}=270$		42 μs
計算値	5 eV	2 μs	35 μs

超伝導体陽子検出器 ver.2

陽子のエネルギーを測定しながら電子の運動量方向を測定



E_p, E_e
detected position
 Δt : arrival time difference
さらに検出時間差の測定から
崩壊位置の決定
運動量の向きを決定
運動学的に完全な測定



$\Delta x=1\text{mm}$ $R=10\text{mm}$ $R'=50\text{mm}$
 $\Delta T_e=1\text{keV}$ @ $T_e=100\text{keV}$
 $\Delta T_p=50\text{eV}$ @ $T_p=500\text{eV}$
 $\Delta t=10\text{ns}$

$\Delta\theta=5.7\text{deg}$

各相関項の輻射補正のエネルギー依存性の測定が可能となる

$\Delta x=10\mu\text{m}$ $R=100\text{mm}$ $R'=200\text{mm}$
 $\Delta T_e=17\text{eV}$ @ $T_e=100\text{keV}$
 $\Delta T_p=0.12\text{eV}$ @ $T_p=500\text{eV}$
 $\Delta t=2\text{ps}$

$\Delta\theta=0.006\text{deg}$

スピン偏極軸のずれ



角分布測定による
相関項の比測定

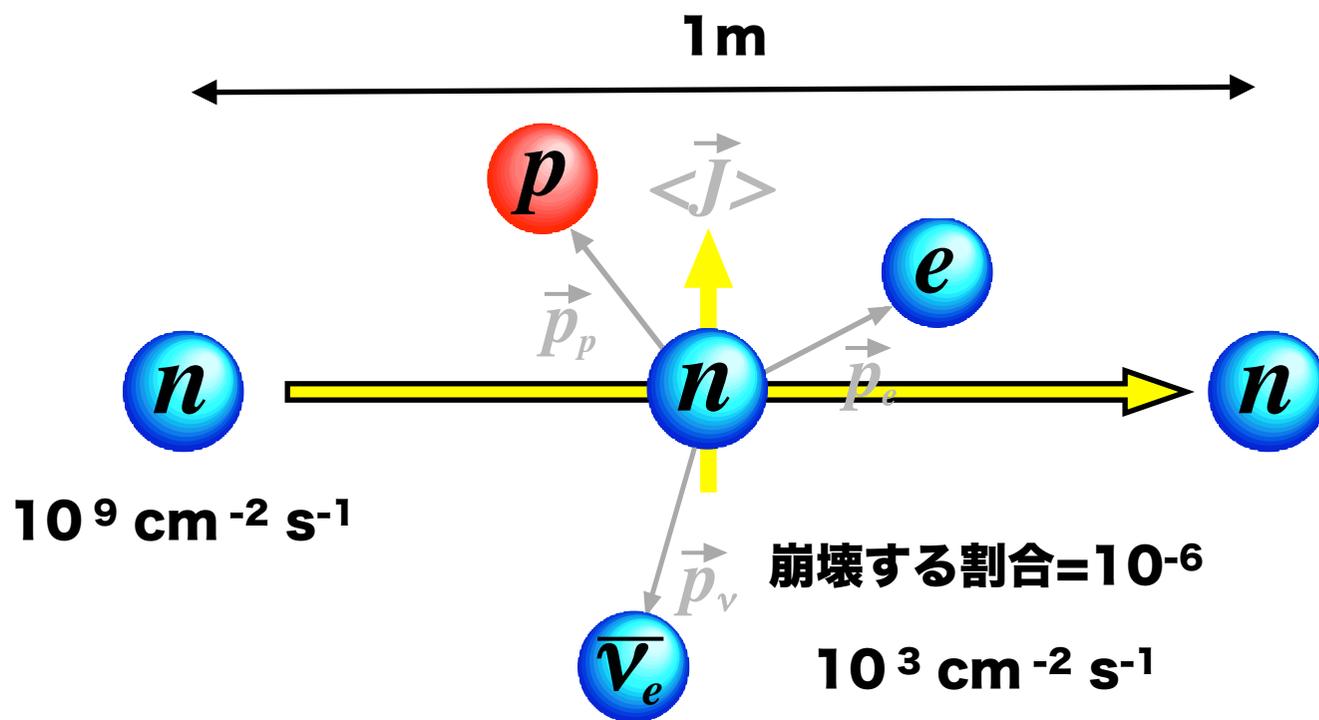
終状態相互作用による疑似効果を区別することにより、
時間反転対称性の破れの測定限界を下げる？

冷中性子

$$\lambda = 4 \text{ \AA}$$

$$E = 5 \text{ meV}$$

$$v = 1000 \text{ m/s}$$



稀崩壊です



Date(2006/01/26) by(H.M.Shimizu)

Title(低エネルギー陽子・中性子検出器)

Conf(RCNP研究会「マイクロパターン検出器の開発と展望」) At(Mihogaoka)

Class(Presentation) Language(Japanese)

超伝導体検出器



Date(2006/01/26) by(H.M.Shimizu)

Title(低エネルギー陽子・中性子検出器)

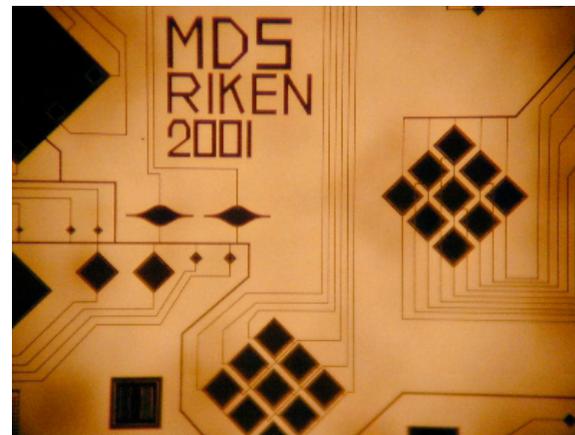
Conf(RCNP研究会「マイクロパターン検出器の開発と展望」) At(Mihogaoka)

Class(Presentation) Language(Japanese)

STJ Detector System

RIKEN (The Inst. of Physical and Chemical Research)

Hiromi SATO



Date(2006/01/26) by(H.M.Shimizu)

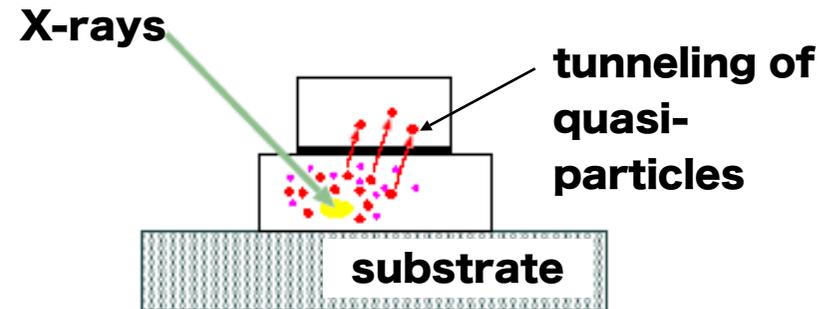
Title(低エネルギー陽子・中性子検出器)

Conf(RCNP研究会「マイクロパターン検出器の開発と展望」) At(Mihogaoka)

Class(Presentation) Language(Japanese)

Superconducting Tunnel Junction (STJ) as Radiation Detector

- (1) energy deposition
- (2) break up of Cooper pairs
- (3) tunneling of quasi-particles



STJ realizes a good energy resolution

Break up energy (1.7Δ) = 2.6 meV @ Nb

Theoretical limit

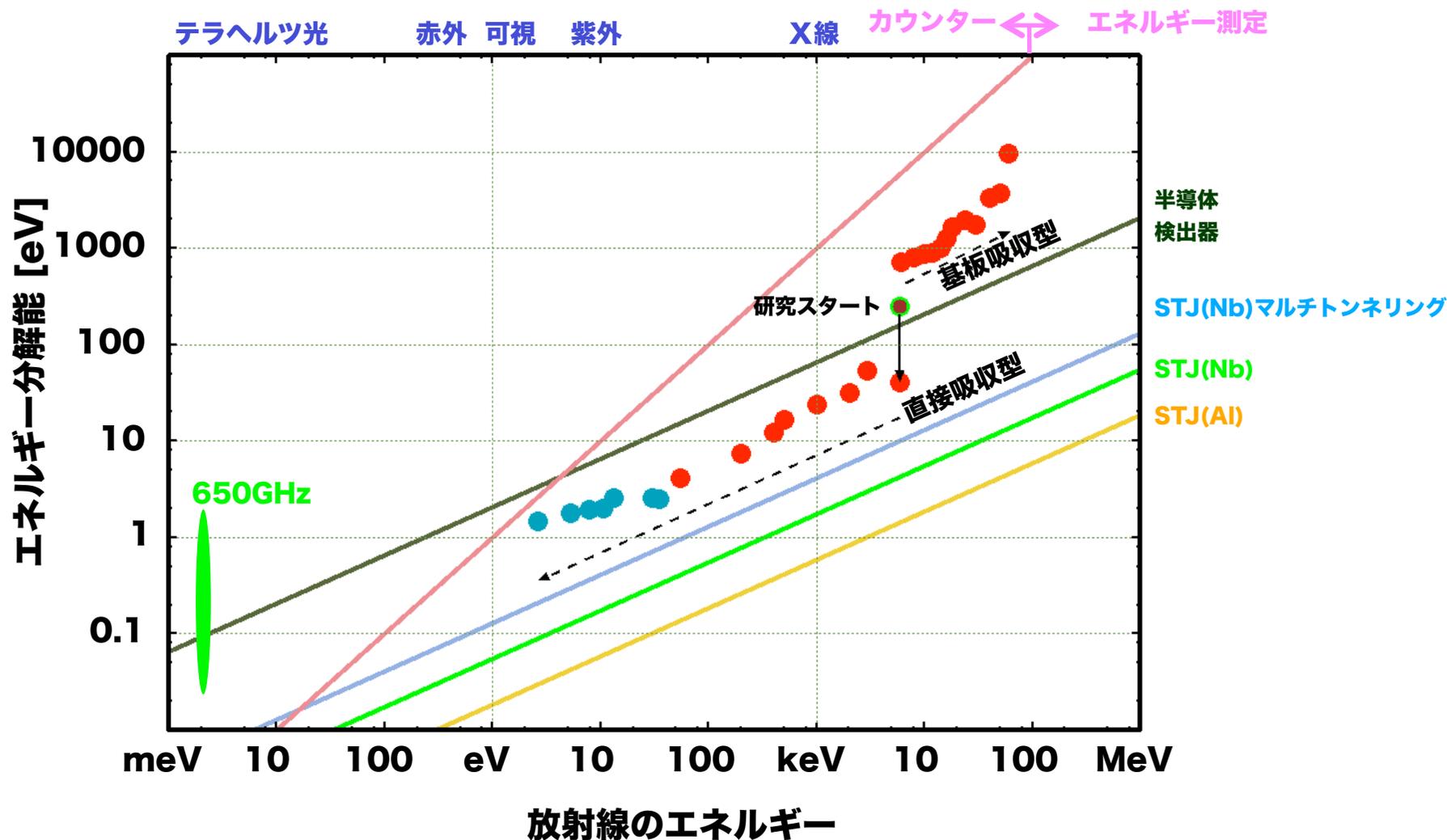
$$\text{FWHM} = 2.35 \sqrt{(1.7\Delta) F E} = 4.3\text{eV} @ 5.9 \text{ keV}$$

Fano factor

Energy

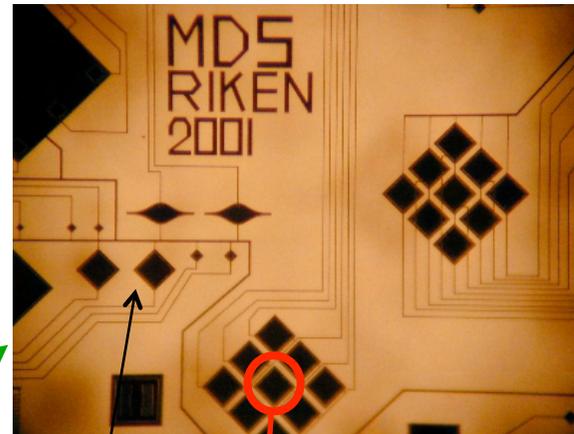
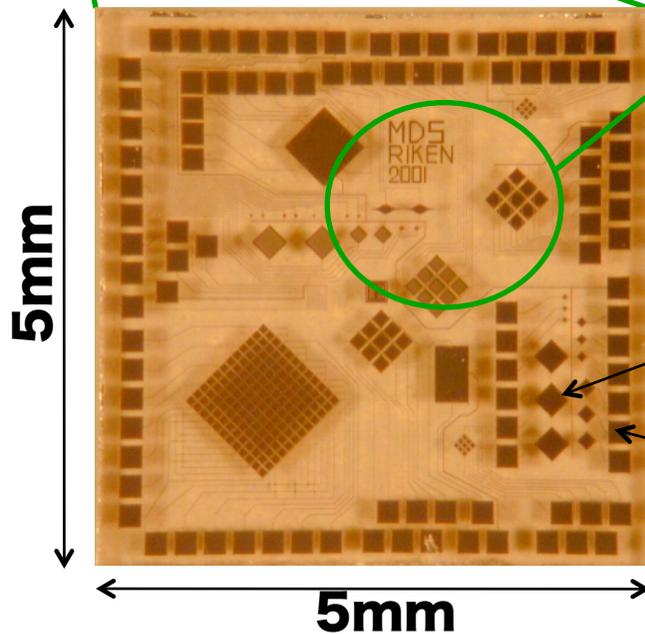
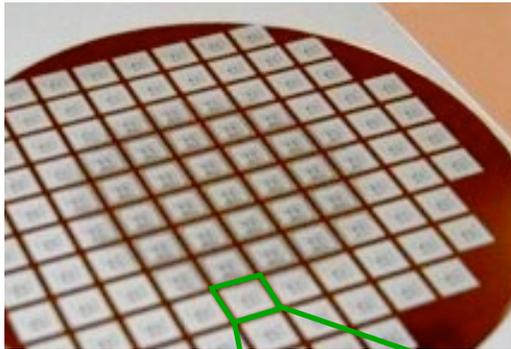
(cf. FWHM = 150eV for Si semiconductor detector, gap $E=3.6\text{eV}$)

エネルギー分解能の比較



STJ chip

3inch sapphire substrate



100 μ m x 100 μ m

STJ (detector area)

PAD



Date(2006/01/26) by(H.M.Shimizu)

Title(低エネルギー陽子・中性子検出器)

Conf(RCNP研究会「マイクロパターン検出器の開発と展望」) At(Mihogaoka)

Class(Presentation) Language(Japanese)

作成装置



Date(2006/01/26) by(H.M.Shimizu)

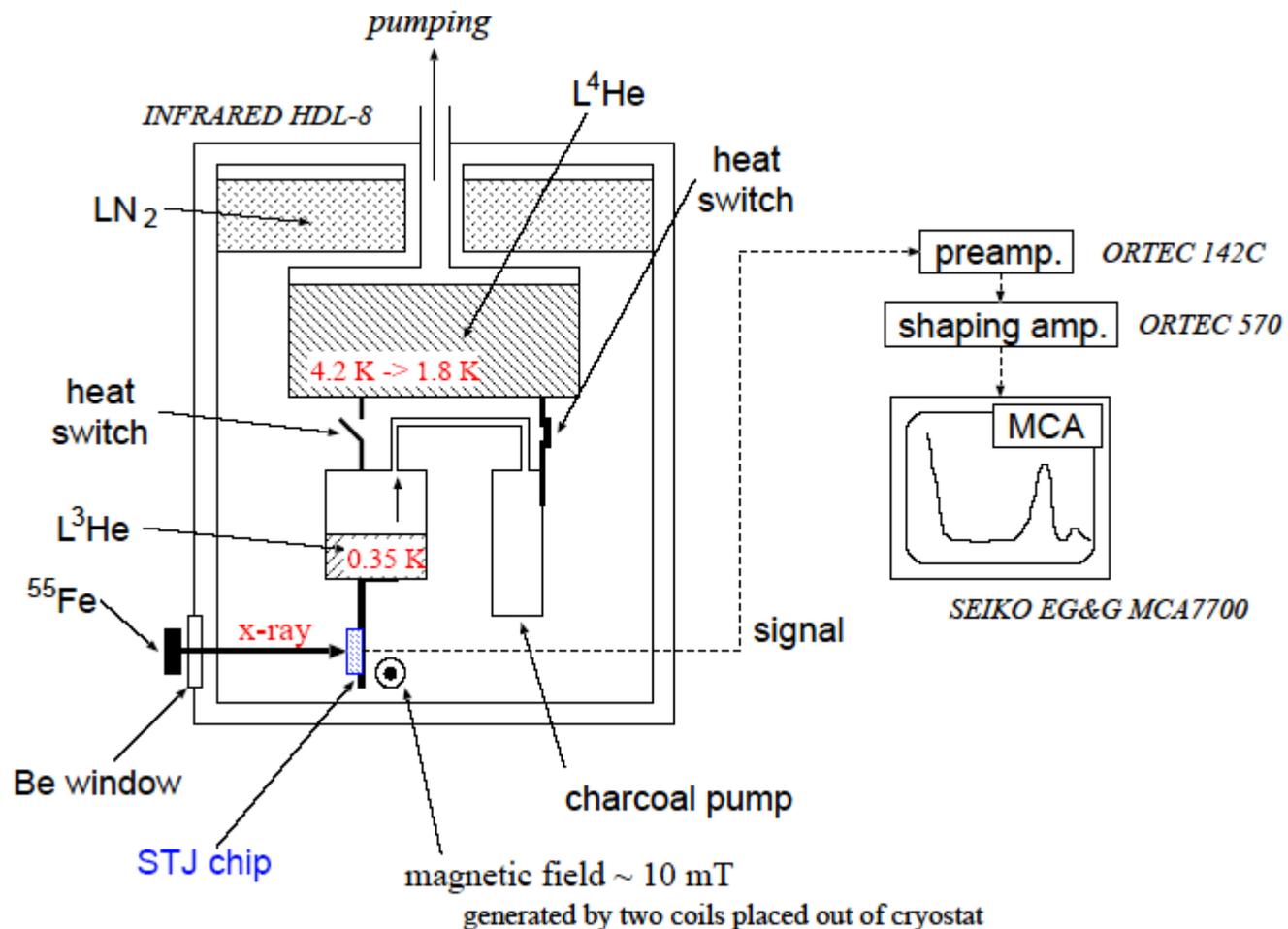
Title(低エネルギー陽子・中性子検出器)

Conf(RCNP研究会「マイクロパターン検出器の開発と展望」) At(Mihogaoka)

Class(Presentation) Language(Japanese)

Detector System

- * STJs are operated at 0.35K with ~100G of magnetic field.
- * Signals are fed to the charge sensitive preamp.



Date(2006/01/26) by(H.M.Shimizu)

Title(低エネルギー陽子・中性子検出器)

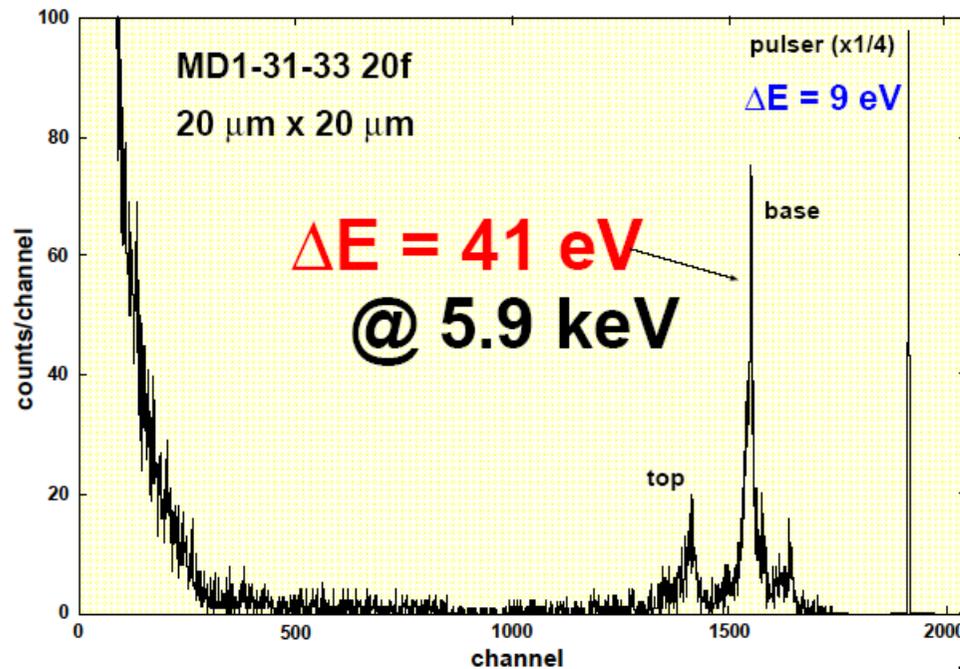
Conf(RCNP研究会「マイクロパターン検出器の開発と展望」) At(Mihogaoka)

Class(Presentation) Language(Japanese)

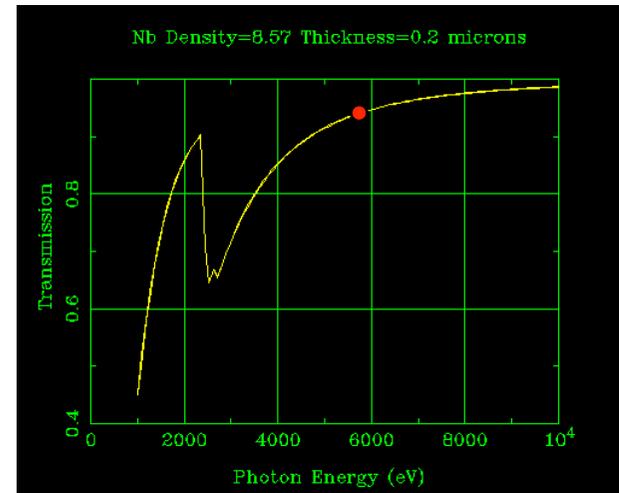
X-ray detection

Energy spectrum of ^{55}Fe X-ray source

Energy = 5.9 keV (K_α) and 6.4 keV (K_β)

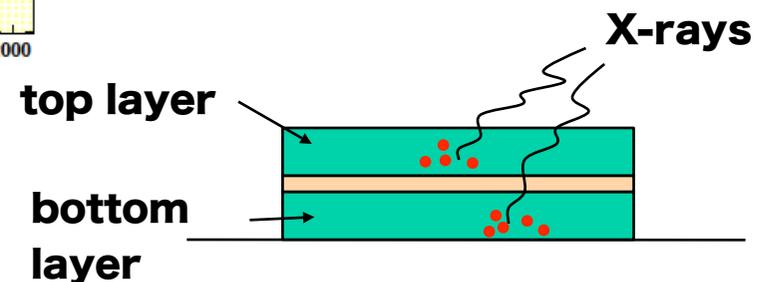


transmission of Nb (200nm)



5% of X-rays are detected with up and bottom layer.

Two sets of peaks



Date(2006/01/26) by(H.M.Shimizu)

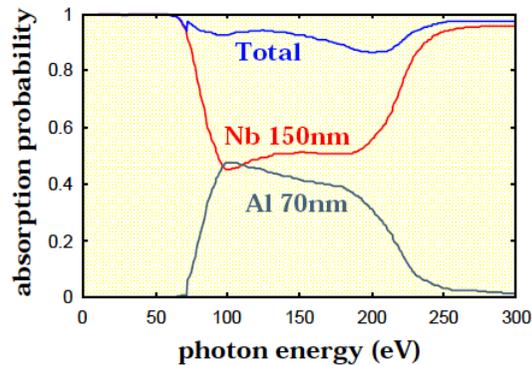
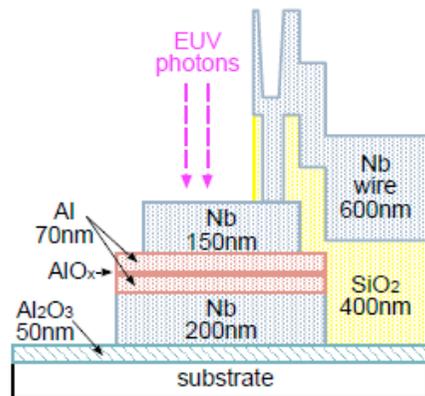
Title(低エネルギー陽子・中性子検出器)

Conf(RCNP研究会「マイクロパターン検出器の開発と展望」) At(Mihogaoka)

Class(Presentation) Language(Japanese)

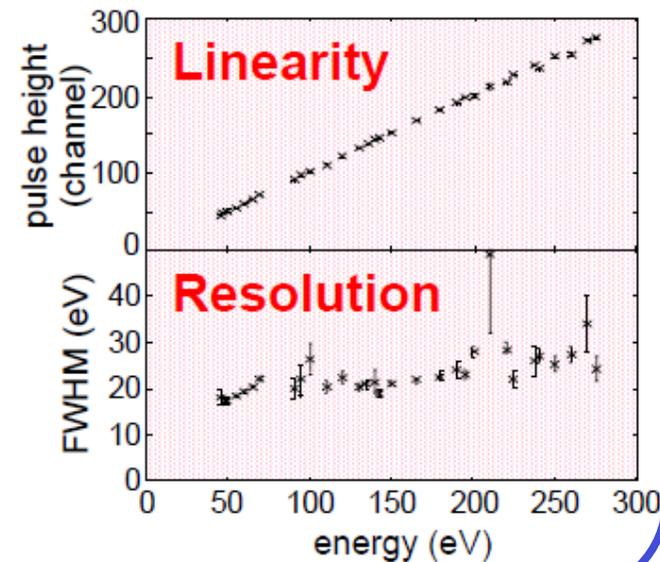
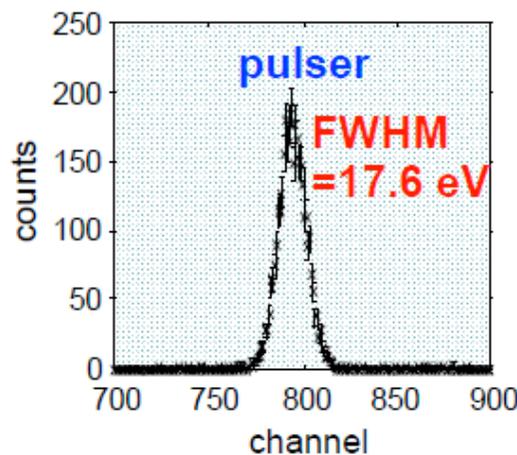
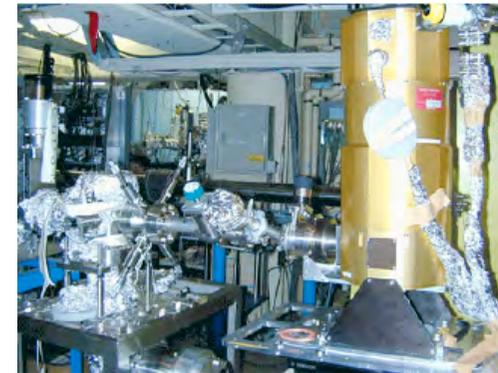
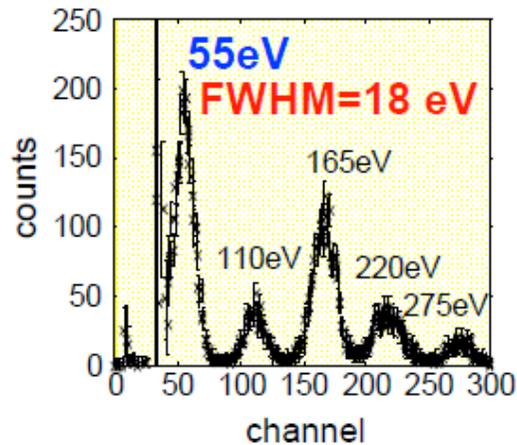
EUV detection

Nb / Al / AlO_x / Al / Nb



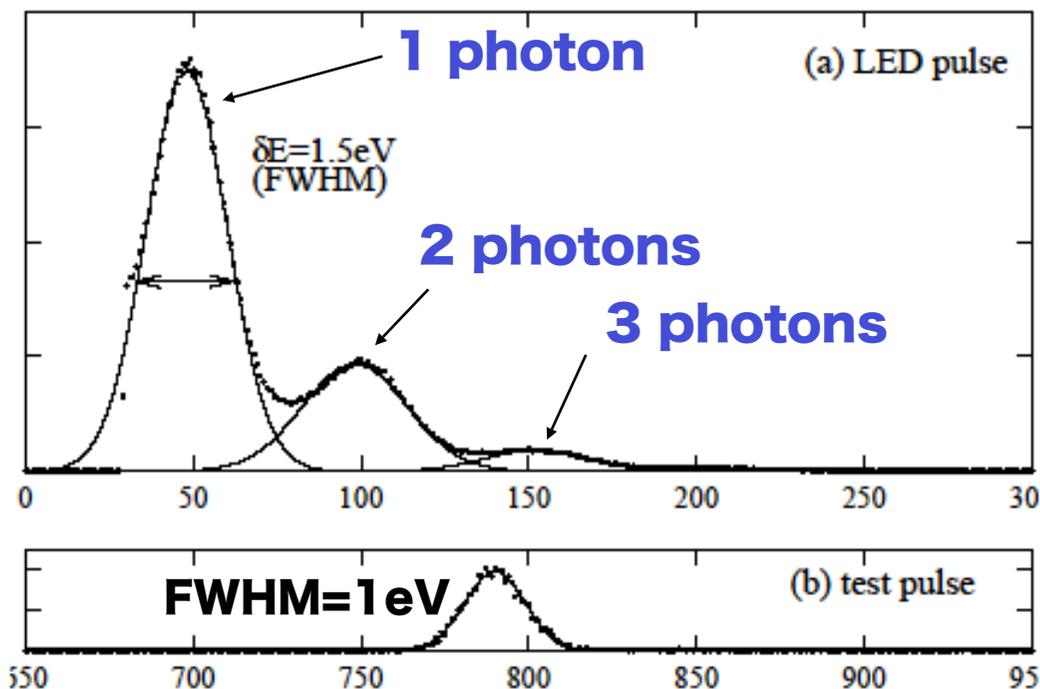
>90% of photons are absorbed by top layer.

Experiments at SOR facility (KEK-PF)



Visible Photon Detection

FWHM=1.5eV@2.64eV (470nm)



1光子のエネルギー差を弁別



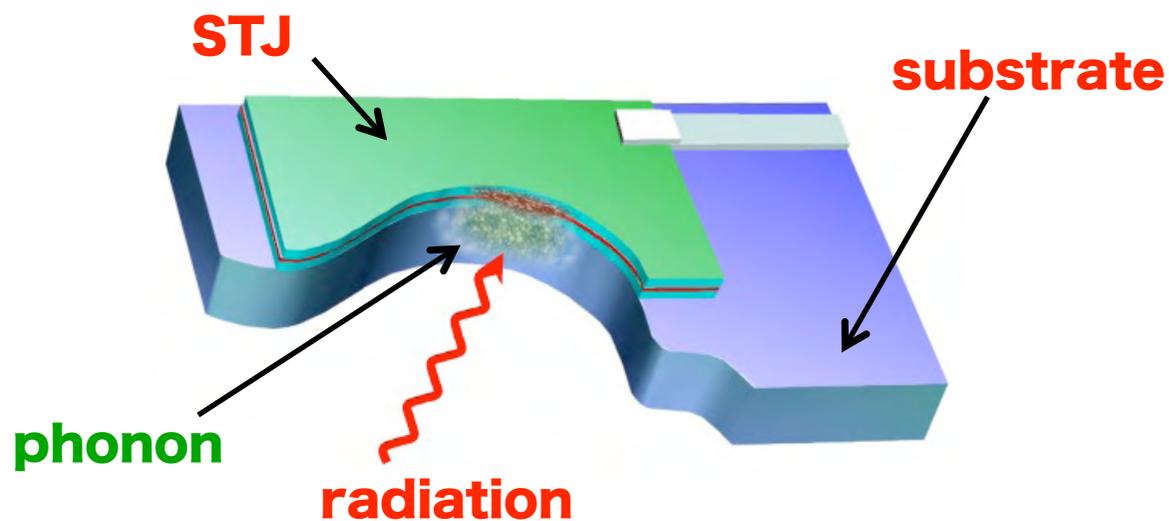
Date(2006/01/26) by(H.M.Shimizu)

Title(低エネルギー陽子・中性子検出器)

Conf(RCNP研究会「マイクロパターン検出器の開発と展望」) At(Mihogaoka)

Class(Presentation) Language(Japanese)

基板吸収による検出



- 高い吸収効率
- シングルピーク が実現可能
- 広い検出領域



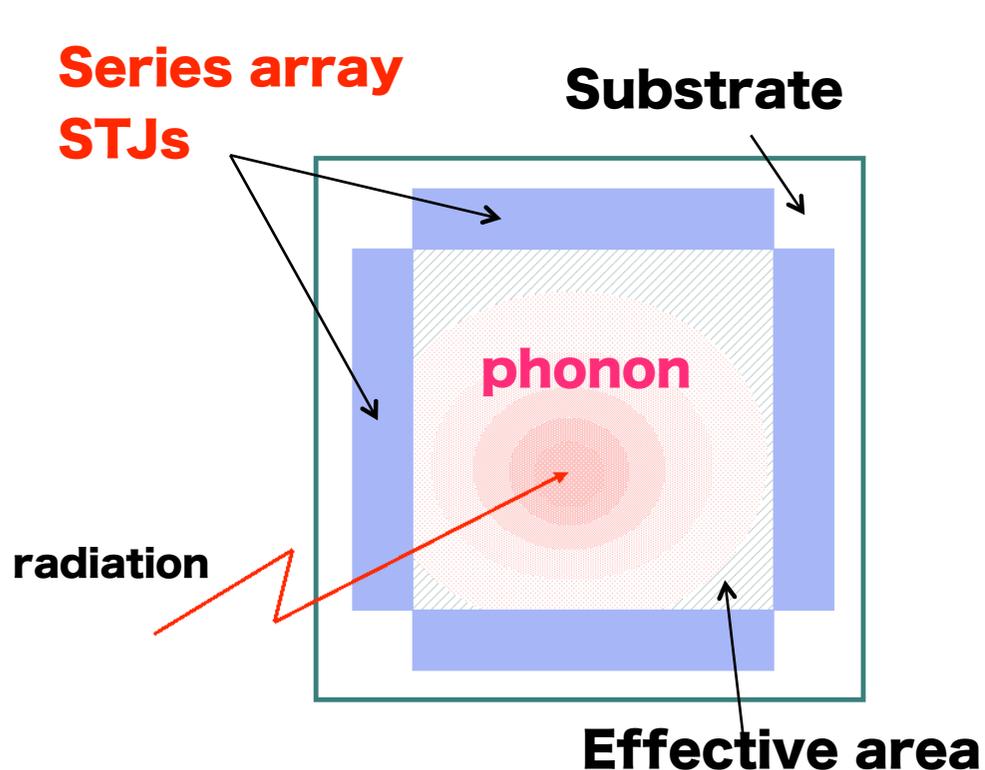
Date(2006/01/26) by(H.M.Shimizu)

Title(低エネルギー陽子・中性子検出器)

Conf(RCNP研究会「マイクロパターン検出器の開発と展望」) At(Mihogaoka)

Class(Presentation) Language(Japanese)

基盤吸収型の検出原理



Radiations are absorbed by substrate.



Phonons are created.



Phonons are detected by four series array STJs.



Signals from for series arrays are summed.



Full energy peak of radiations are obtained.

M. Kurakado et al., Proc. SPIE 1743 (1992) 351.



Date(2006/01/26) by(H.M.Shimizu)

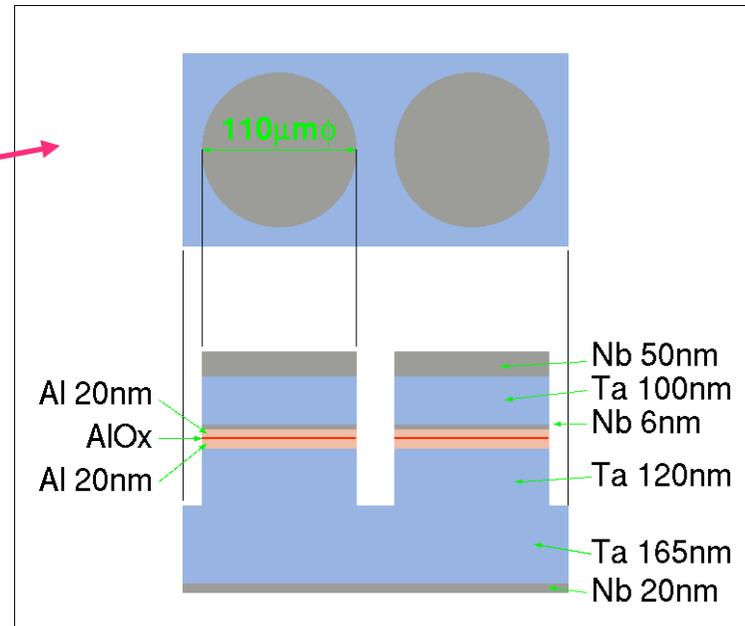
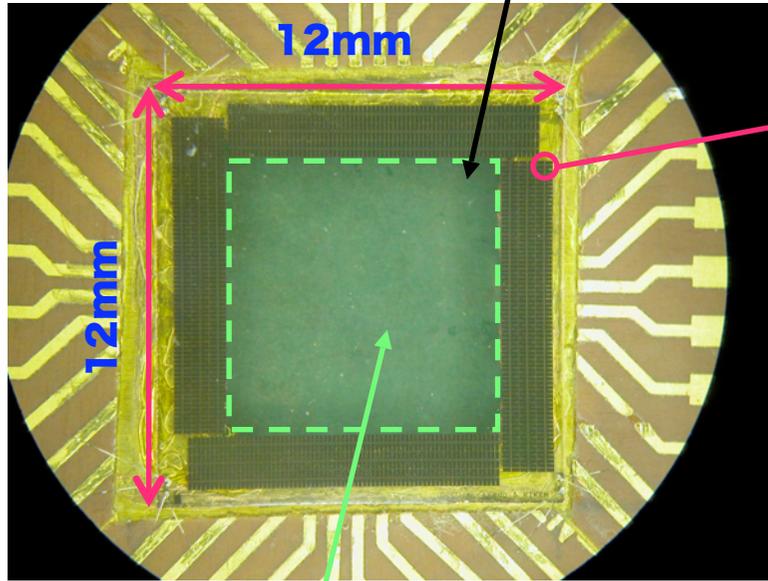
Title(低エネルギー陽子・中性子検出器)

Conf(RCNP研究会「マイクロパターン検出器の開発と展望」) At(Mihogaoka)

Class(Presentation) Language(Japanese)

直列接合素子

Sapphire substrate



Effective area: 8mm x 8mm

288 series x 3 parallel x 4 arrays = 3456 STJs



Date(2006/01/26) by(H.M.Shimizu)

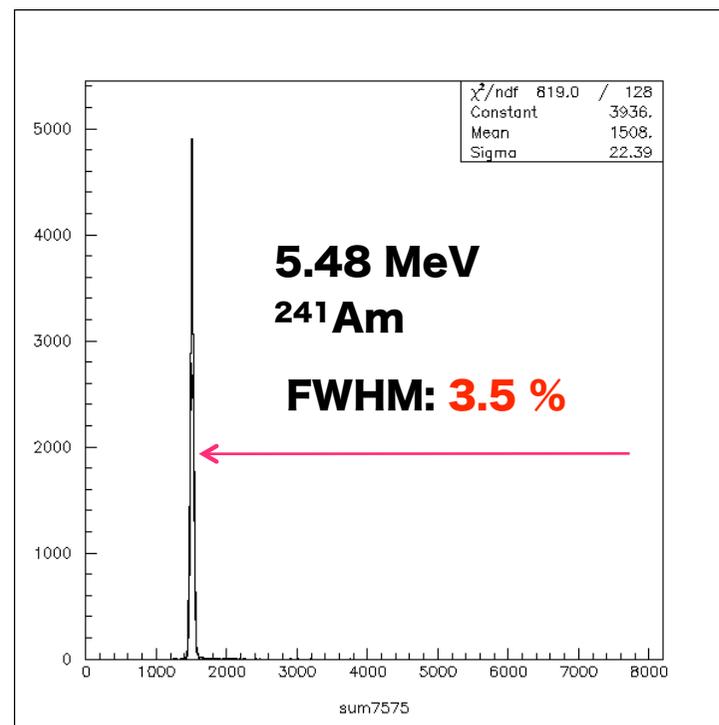
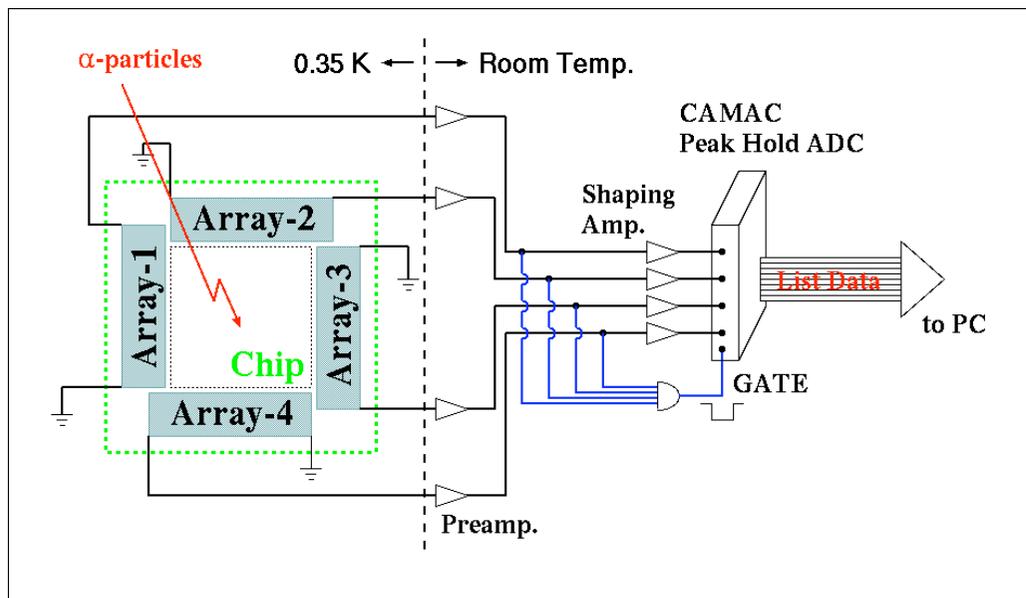
Title(低エネルギー陽子・中性子検出器)

Conf(RCNP研究会「マイクロパターン検出器の開発と展望」) At(Mihogaoka)

Class(Presentation) Language(Japanese)

α線の測定

Data acquisition process



大阪電通大 倉門氏：検出面積1.5mm x 1.5mm

→ 分解能 0.42%



Date(2006/01/26) by(H.M.Shimizu)

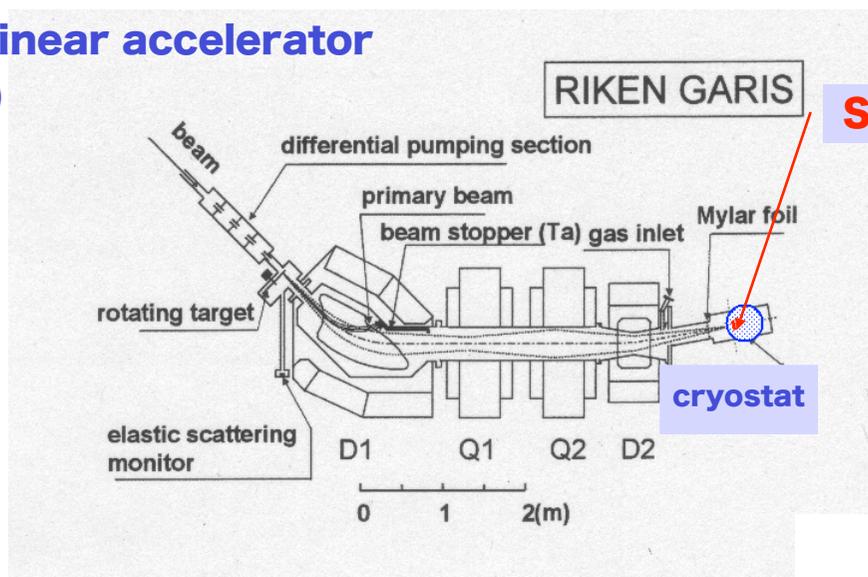
Title(低エネルギー陽子・中性子検出器)

Conf(RCNP研究会「マイクロパターン検出器の開発と展望」) At(Mihogaoka)

Class(Presentation) Language(Japanese)

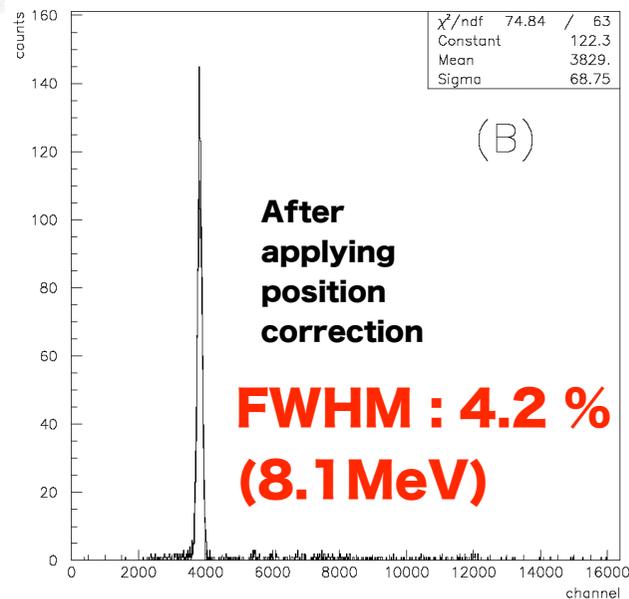
重イオン検出

RIKEN linear accelerator
(RILAC)



線形加速器からの ^{40}Ar ビームをSTJに照射

エネルギー : 191 MeV



Date(2006/01/26) by(H.M.Shimizu)

Title(低エネルギー陽子・中性子検出器)

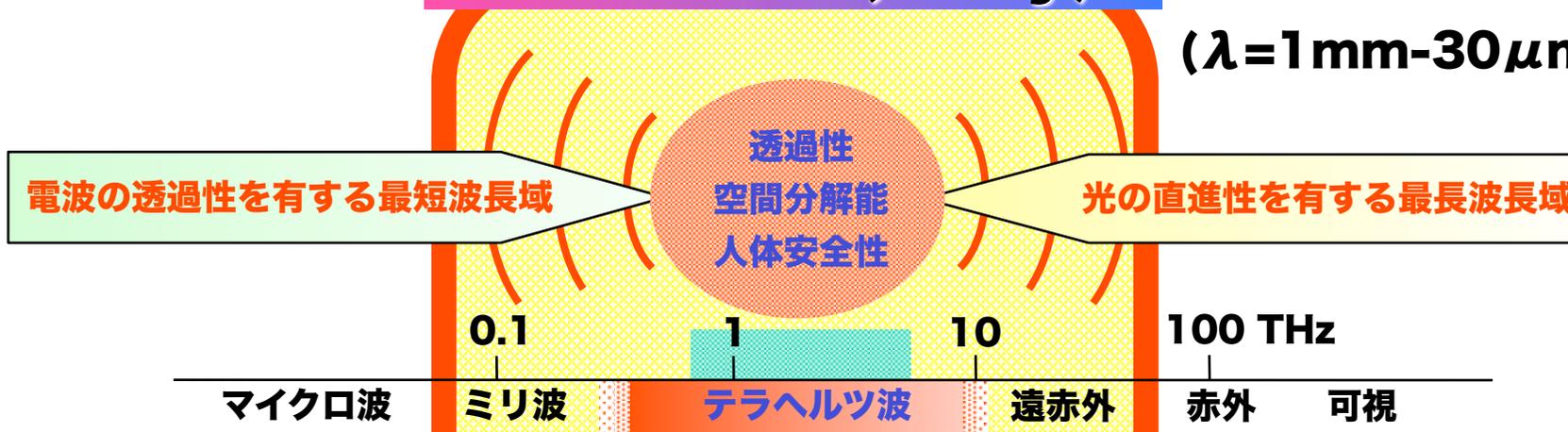
Conf(RCNP研究会「マイクロパターン検出器の開発と展望」) At(Mihogaoka)

Class(Presentation) Language(Japanese)

テラヘルツ

THz-wave (T-ray)

$\nu = 0.3 - 10 \text{ THz}$
($\lambda = 1 \text{ mm} - 30 \mu\text{m}$)



未開拓電磁波領域 = 未発見の事実の宝庫

乳癌・皮膚癌
火傷・肌診断

製品・食品
農作物・検査

物性・分子
・生命研究

DNA・蛋白
環境計測

なかでも「THz波の最も魅力的な応用はイメージングである」と言われている



Date(2006/01/26) by(H.M.Shimizu)

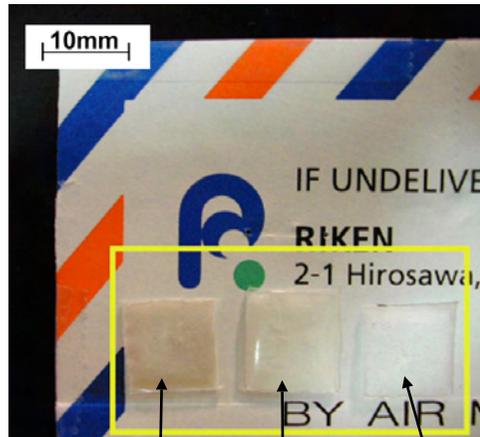
Title(低エネルギー陽子・中性子検出器)

Conf(RCNP研究会「マイクロパターン検出器の開発と展望」) At(Mihogaoka)

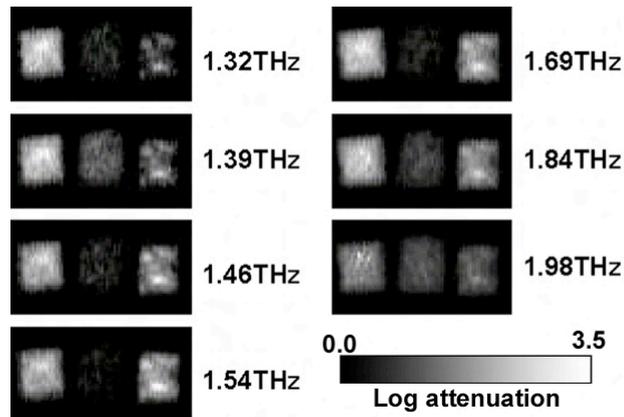
Class(Presentation) Language(Japanese)

応用例

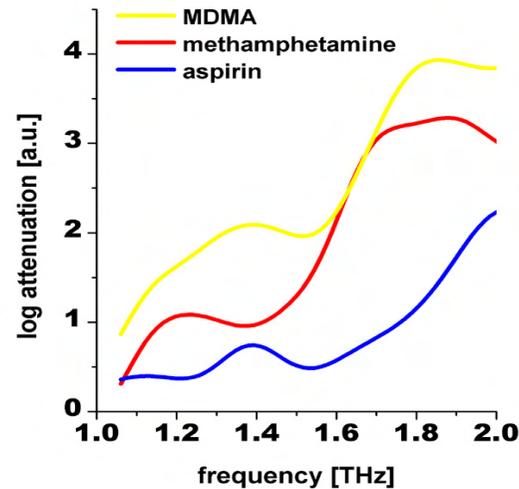
信書内の禁止薬物の同検査



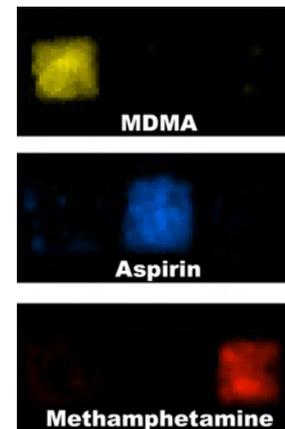
麻薬 (MDMA) アスピリン 覚せい剤



マルチスペクトル画像



THz帯での分光特性



各物質の抽出に成功!!

禁止薬物

安全!!

禁止薬物



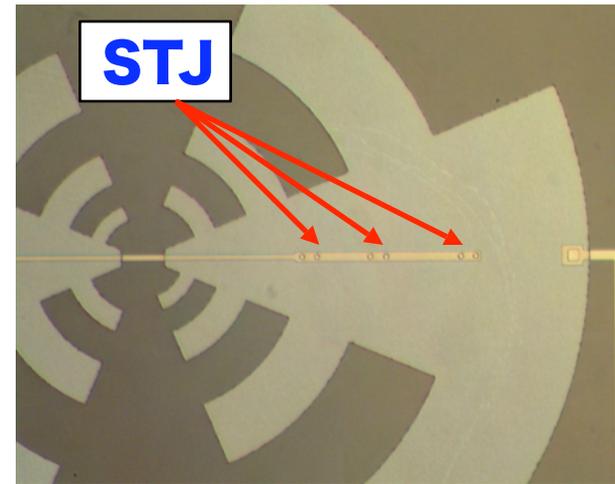
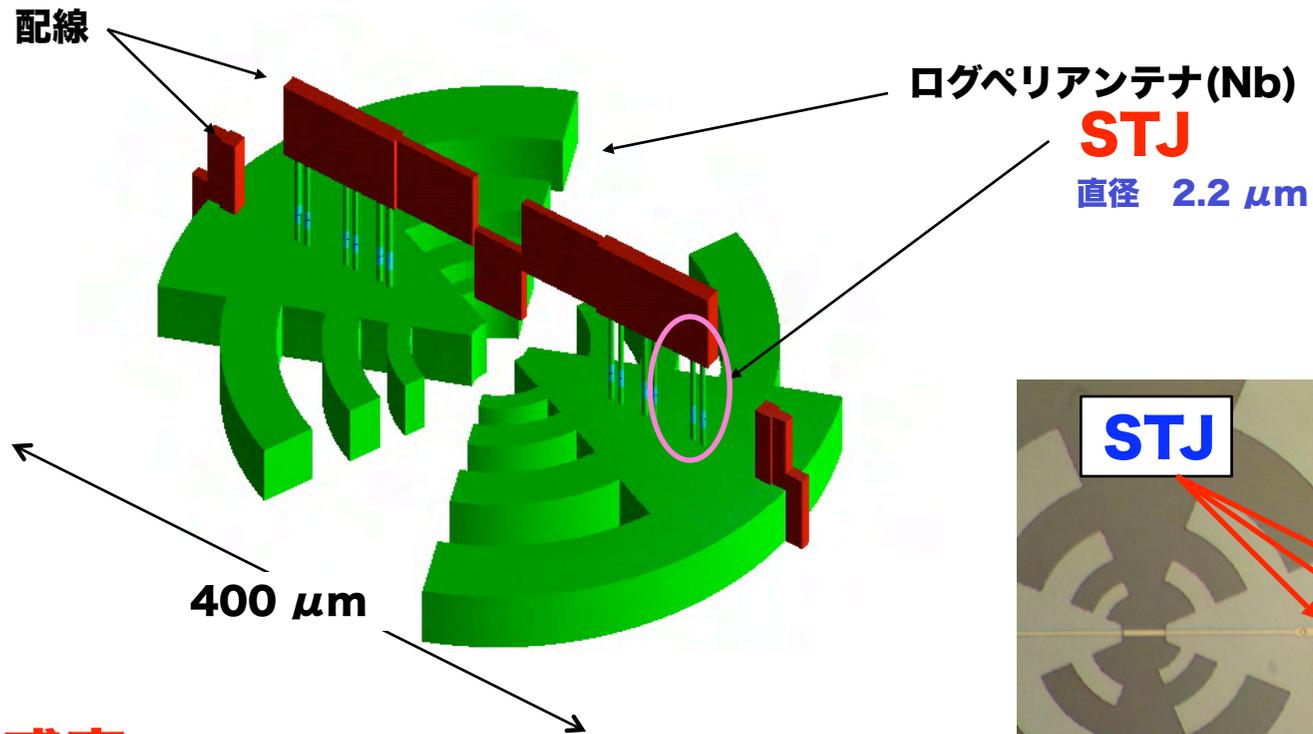
Date(2006/01/26) by(H.M.Shimizu)

Title(低エネルギー陽子・中性子検出器)

Conf(RCNP研究会「マイクロパターン検出器の開発と展望」) At(Mihogaoka)

Class(Presentation) Language(Japanese)

テラヘルツ検出器



高感度

$$\text{NEP}_{\text{STJ}} \sim 10^{-(17 \sim 18)} \text{ W} / \sqrt{\text{Hz}}$$

これをアレイ化することで、高感度テラヘルツイメージングを実現する。



Date(2006/01/26) by(H.M.Shimizu)

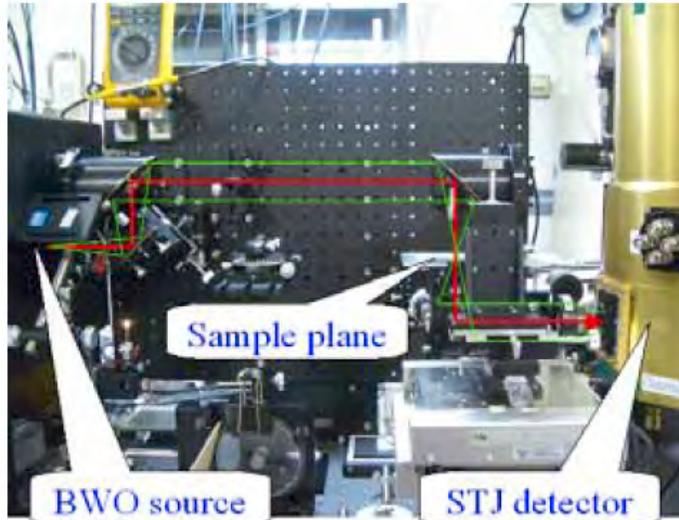
Title(低エネルギー陽子・中性子検出器)

Conf(RCNP研究会「マイクロパターン検出器の開発と展望」) At(Mihogaoka)

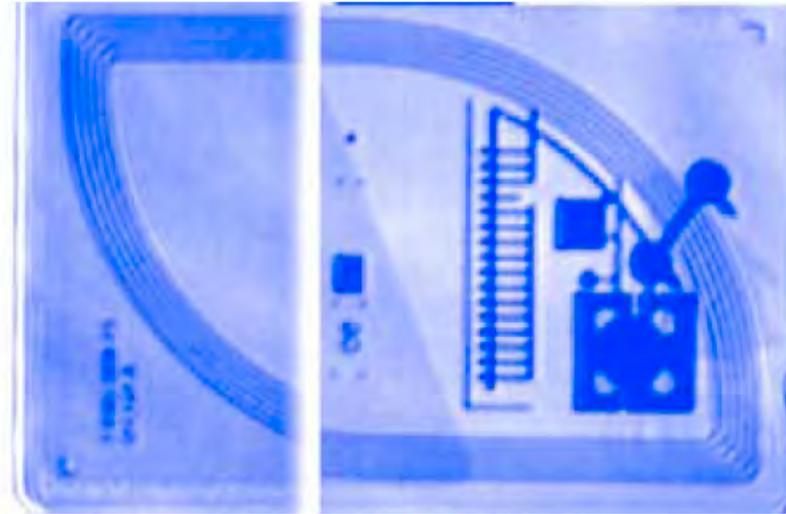
Class(Presentation) Language(Japanese)

イメージング現状

STJ検出器 1 画素を用いて、試料のスキャンによりイメージングを行う



実験のセットアップ



STJを用いた世界初のテラヘルツ透過画像
(SUICAカード)

現在、5画素リニアアレイ



Date(2006/01/26) by(H.M.Shimizu)

Title(低エネルギー陽子・中性子検出器)

Conf(RCNP研究会「マイクロパターン検出器の開発と展望」) At(Mihogaoka)

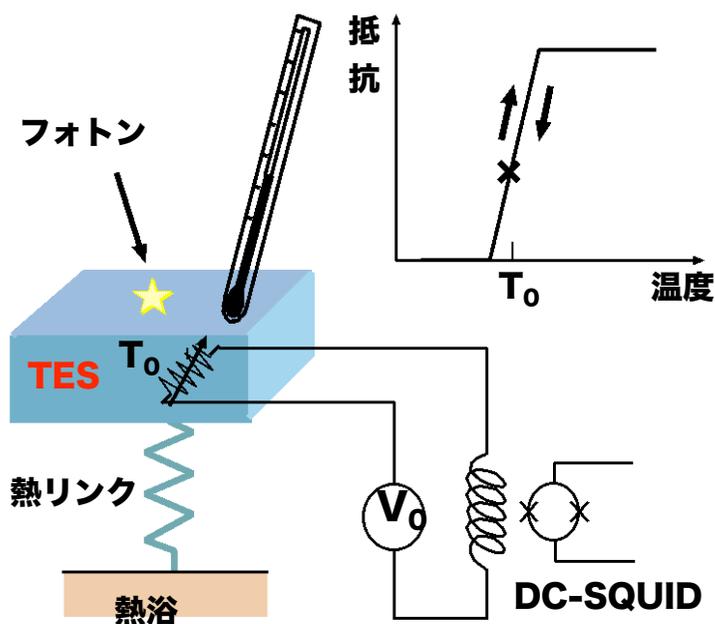
Class(Presentation) Language(Japanese)

超伝導転移端温度計

Transition Edge Sensor : TES

構成：フォトンの吸収体 + 高感度温度計 (TES)

フォトン入射時の吸収体の温度上昇を、高感度な温度計 (TES) で測定



極低温での物質の格子比熱

：温度の3乗に比例して小さくなる

極低温での物質の電子比熱

：温度に比例して小さくなる

→ mK程度の温度上昇

超伝導体の T_c 付近における抵抗値の急峻な温度依存性を利用



Date(2006/01/26) by(H.M.Shimizu)

Title(低エネルギー陽子・中性子検出器)

Conf(RCNP研究会「マイクロパターン検出器の開発と展望」) At(Mihogaoka)

Class(Presentation) Language(Japanese)

TESの特徴

★エネルギー分解能

$$\Delta E_{(FWHM)} = 2.36\sqrt{4kT_c^2 C(1/\alpha)\sqrt{n/2}}$$

C : 熱容量

α : 転移の急峻さを表すパラメタ (=d[logR]/d[logT])

n : 定数 (=5)

● T_c , Cが小さいほど、また α が大きいほど良い分解能が実現

★信号の時定数

$$\tau_{eff} = \frac{C}{G(1 + \alpha/n)}$$

(数10~数100 μ s)

G : TESと熱浴の間の熱コンダクタンス



Date(2006/01/26) by(H.M.Shimizu)

Title(低エネルギー陽子・中性子検出器)

Conf(RCNP研究会「マイクロパターン検出器の開発と展望」) At(Mihogaoka)

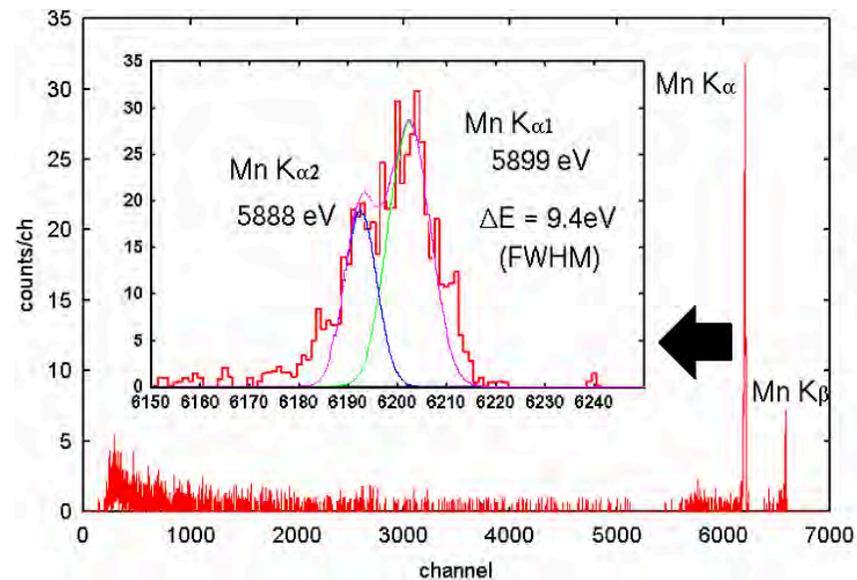
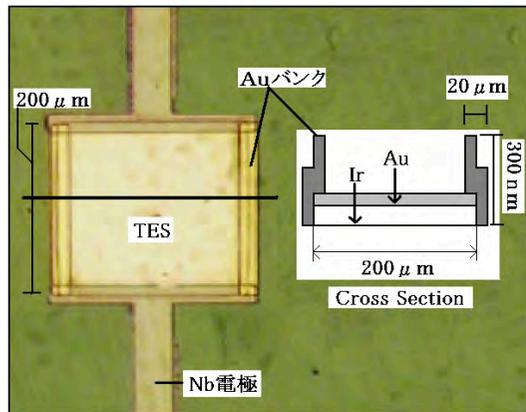
Class(Presentation) Language(Japanese)

TESの能力

5.9keV X線による評価

	$\Delta E(\text{eV})$	$\tau(\mu\text{s})$	Thermometer	Tc(mK)	Rn(Ω)	Absorber
SRON	4.5 (3.9)	100	TiAu	96	0.25	Cu
NIST	4.5	750	MoCu	93	0.017	None/TES
GSFC	6.1	310	MoAu	106	0.010	None/TES
Jyvaskyla	9.2	260	TiAu	150	0.25	Bi
東大	9.4	400	IrAu	110	0.15	None/TES

東大 中沢・高橋研



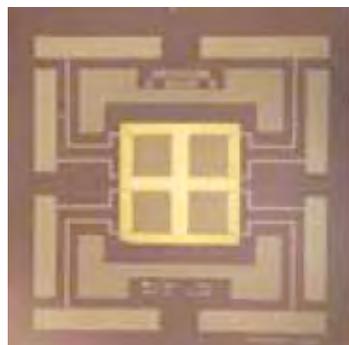
Date(2006/01/26) by(H.M.Shimizu)

Title(低エネルギー陽子・中性子検出器)

Conf(RCNP研究会「マイクロパターン検出器の開発と展望」) At(Mihogaoka)

Class(Presentation) Language(Japanese)

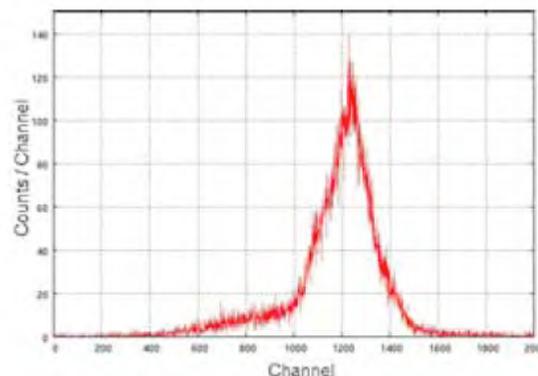
大面積化（低エネルギー陽子検出のため）



1mm x 1mm TES x 4

Ti: 100nm, Au: 40nm

Tc=489.5mK



$\Delta E=940\text{eV @ } 5.9\text{keV}$

現在、 $500\mu\text{m} \times 500\mu\text{m}$ TES x 4 の開発中

Au (40nm) / Ti (100nm) / Au (40nm)

Tc=382mK



$\Delta E=300\text{eV @ } 5.9\text{keV}$

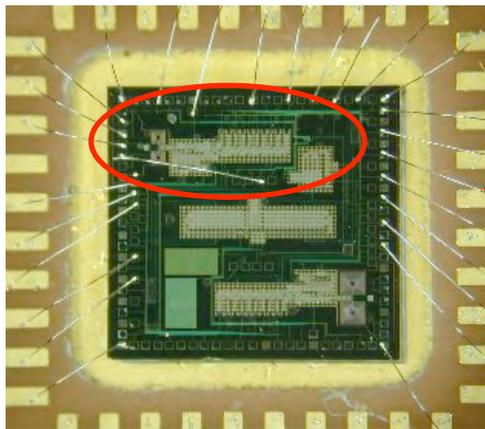


多素子化による大面積化の問題点 \longleftrightarrow 信号処理

Combination with SFQ ADC circuit and STJ SFQ: Single Flux Quantum logic

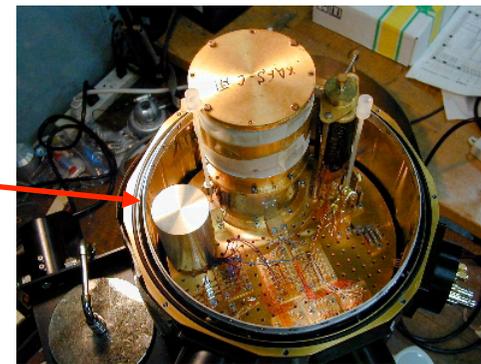
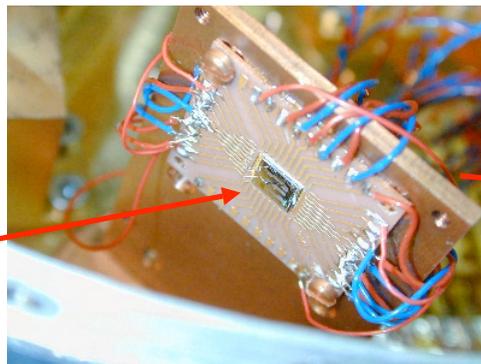
test of the SFQ ADC circuit using ^3He cryostat
(Nagoya Univ. and RIKEN)

SFQ ADC (Nagoya Univ.)



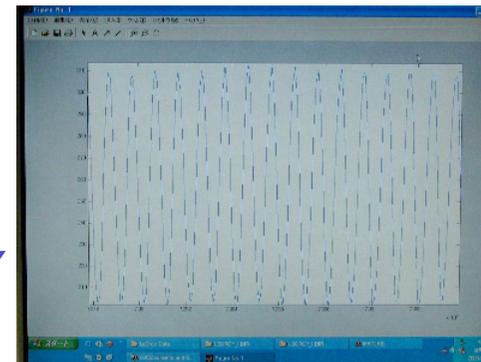
8 bit, 50~100MHz clock

8 bit parallel readout



Analog signal (sine curve)
was supplied to the ADC
and output bit pulses
were acquired by a PC.

Reconstructed sine curve



Date(2006/01/26) by(H.M.Shimizu)

Title(低エネルギー陽子・中性子検出器)

Conf(RCNP研究会「マイクロパターン検出器の開発と展望」) At(Mihogaoka)

Class(Presentation) Language(Japanese)

現在



Date(2006/01/26) by(H.M.Shimizu)

Title(低エネルギー陽子・中性子検出器)

Conf(RCNP研究会「マイクロパターン検出器の開発と展望」) At(Mihogaoka)

Class(Presentation) Language(Japanese)

a 項の測定実験

$$dN \propto \left[1 + a \frac{\mathbf{p}_e \cdot \mathbf{p}_{\bar{\nu}}}{E_e \cdot E_{\bar{\nu}}} + \frac{\mathbf{J}}{J} \cdot \left(A \frac{\mathbf{p}_e}{E_e} + B \frac{\mathbf{p}_{\bar{\nu}}}{E_{\bar{\nu}}} + D \frac{\mathbf{p}_e \times \mathbf{p}_{\bar{\nu}}}{E_e E_{\bar{\nu}}} \right) + \dots \right]$$

無偏極中性子を使用 (J=0)

電子と反ニュートリノとの角相関項

⇒反ニュートリノの代わりに、反跳陽子を測定

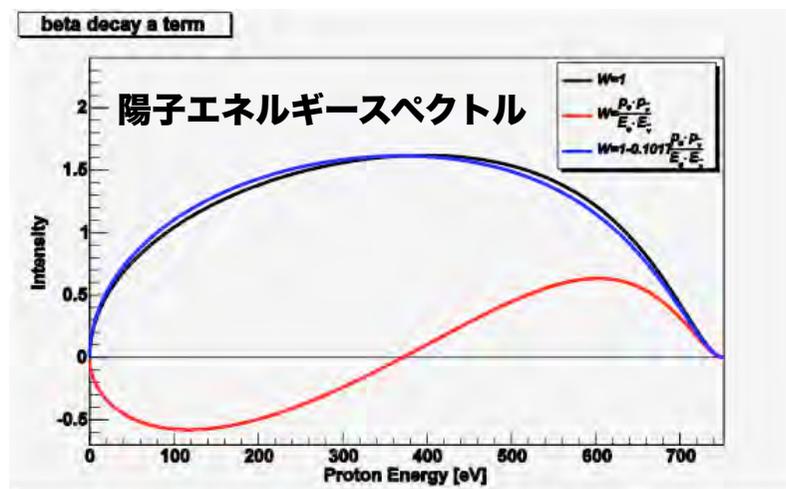
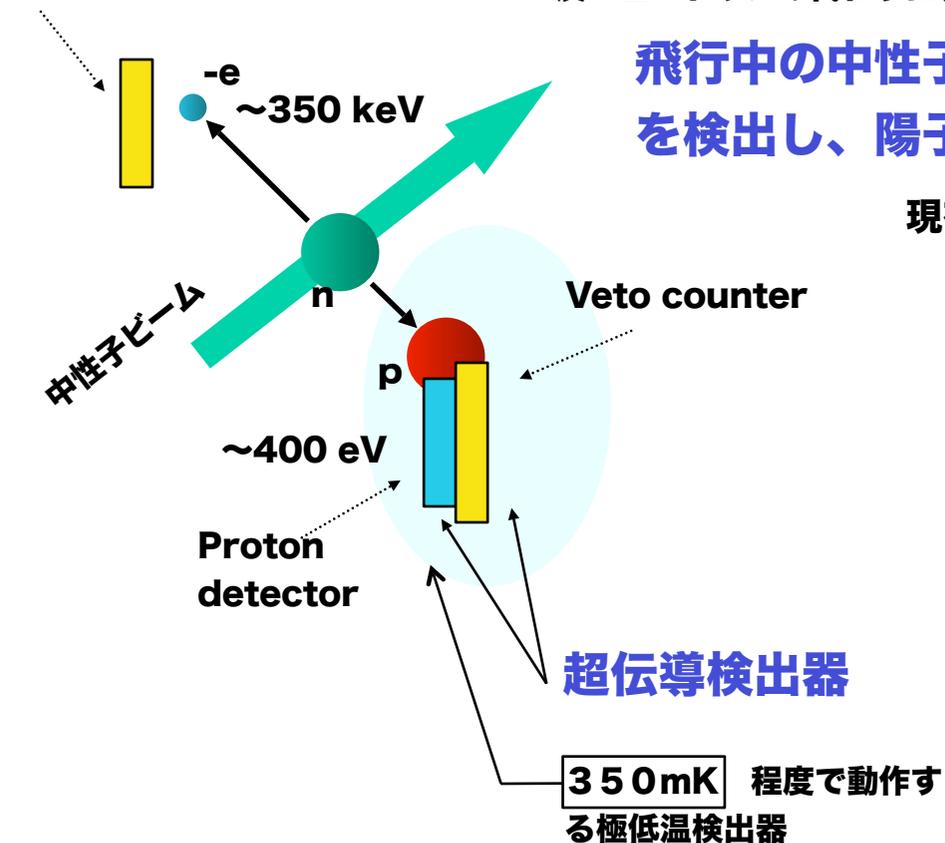
Electron detector

飛行中の中性子がβ崩壊した際に生じる陽子と電子を検出し、陽子のエネルギースペクトルを得る

現在の測定値

$$a = -0.103 \pm 0.004$$

PDGの平均値



Date(2006/01/26) by(H.M.Shimizu)

Title(低エネルギー陽子・中性子検出器)

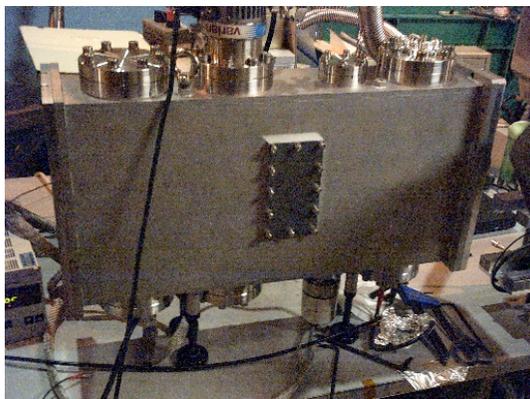
Conf(RCNP研究会「マイクロパターン検出器の開発と展望」) At(Mihogaoka)

Class(Presentation) Language(Japanese)

基礎実験

原研 JRR-3 にて、基礎実験をスタートした

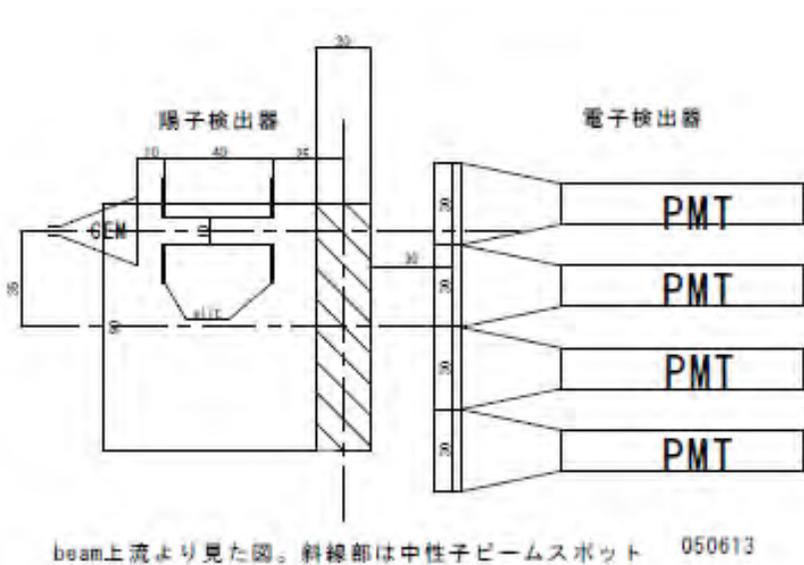
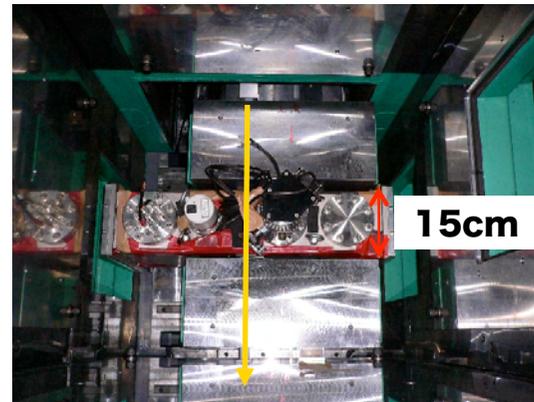
測定チャンバ



T1-NBD



ビームラインに設置



電子と陽子のTOFを測定し、その時間差より β 崩壊イベントを同定

陽子検出器として、EM管を使用
(エネルギー分解能なし)

バックグラウンドの除去が重要

LiF、Pb、Bを使用



Date(2006/01/26) by(H.M.Shimizu)

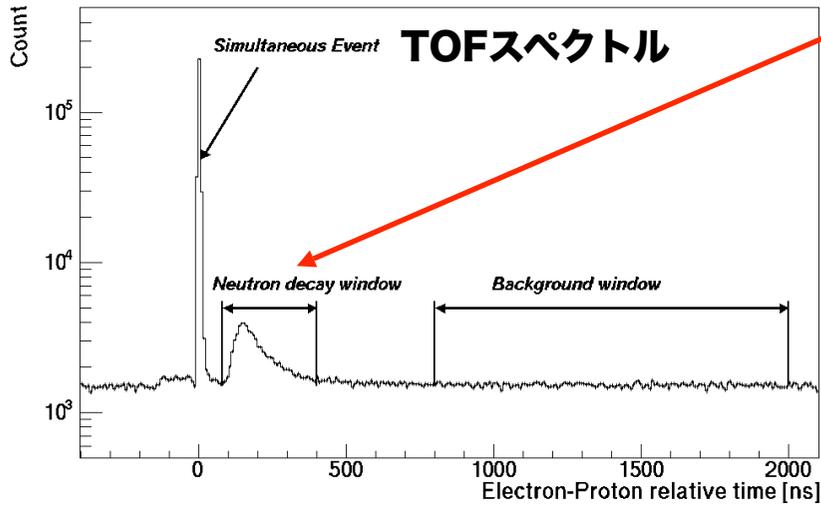
Title(低エネルギー陽子・中性子検出器)

Conf(RCNP研究会「マイクロパターン検出器の開発と展望」) At(Mihogaoka)

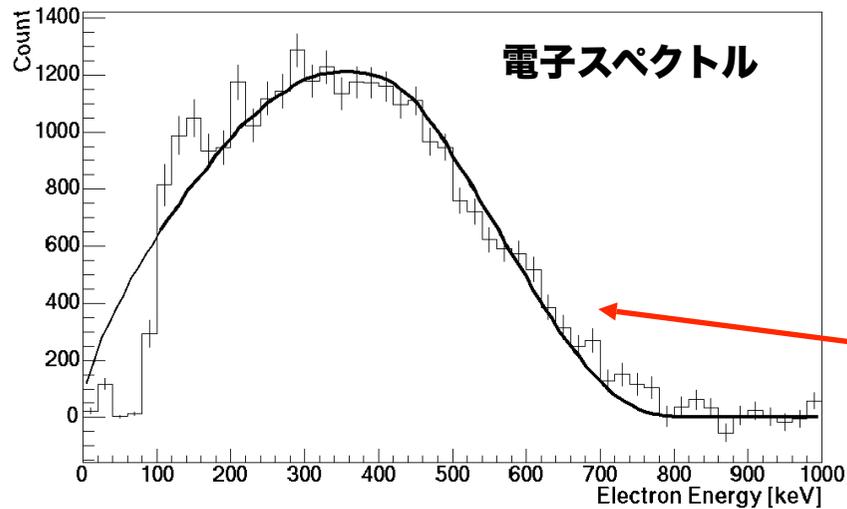
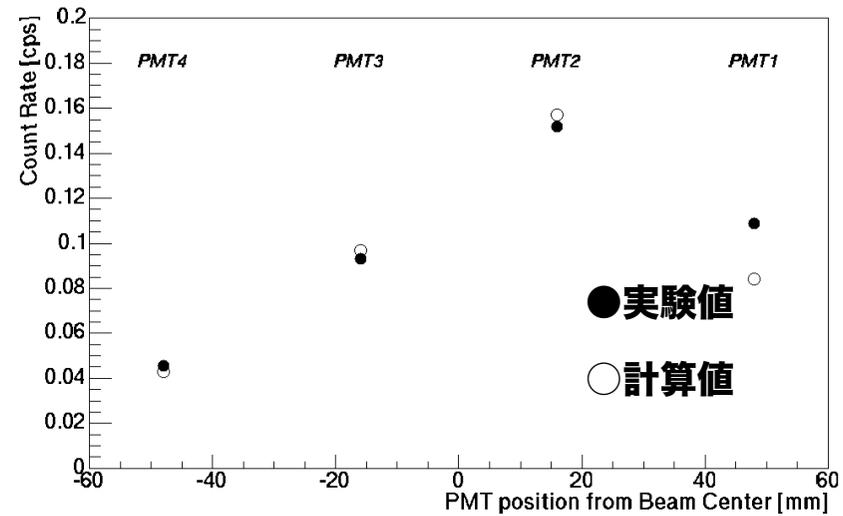
Class(Presentation) Language(Japanese)

実験の現状

β 崩壊



β 崩壊のカウントレート



バックグラウンド : ~4kcps

シミュレーションと形が一致



Date(2006/01/26) by(H.M.Shimizu)

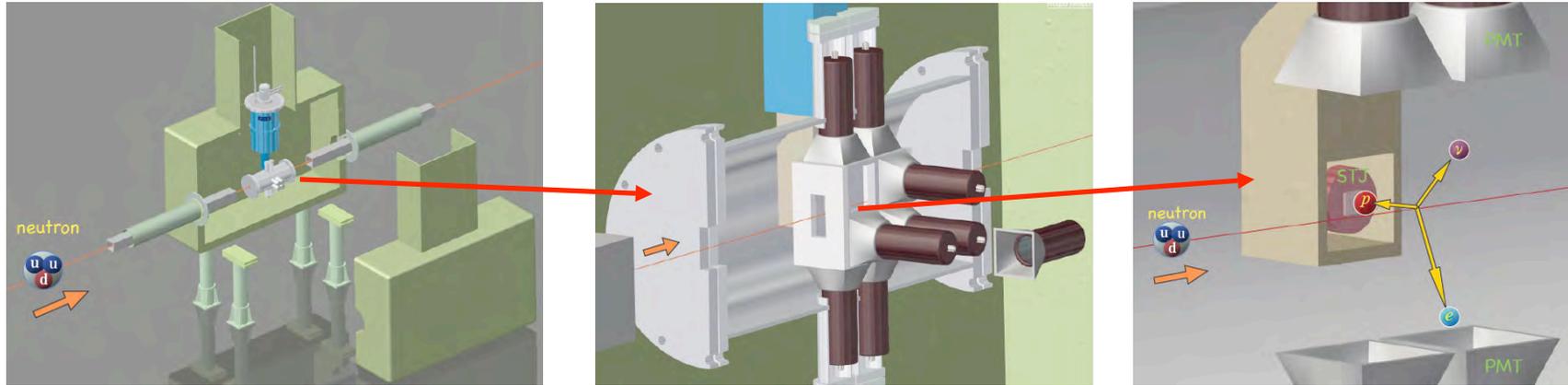
Title(低エネルギー陽子・中性子検出器)

Conf(RCNP研究会「マイクロパターン検出器の開発と展望」) At(Mihogaoka)

Class(Presentation) Language(Japanese)

次のステップ

☆超伝導検出器の導入⇒陽子のエネルギー測定



現在、超伝導検出器の有感面積を広げるべく、開発をすすめている
(STJ, TES)

☆実験スペースの確保

T1-NBDの位置は、導管の間隔が15cmと狭いため、検出器テストには有効であるが、本実験を行うには装置の自由度が限られてしまう



Date(2006/01/26) by(H.M.Shimizu)

Title(低エネルギー陽子・中性子検出器)

Conf(RCNP研究会「マイクロパターン検出器の開発と展望」) At(Mihogaoka)

Class(Presentation) Language(Japanese)

中性子検出器



Date(2006/01/26) by(H.M.Shimizu)

Title(低エネルギー陽子・中性子検出器)

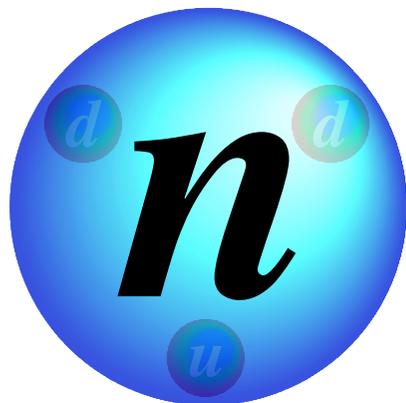
Conf(RCNP研究会「マイクロパターン検出器の開発と展望」) At(Mihogaoka)

Class(Presentation) Language(Japanese)

物質研究のための中性子検出器

透過型検出器を実現する手段は見つかりません

核反応を使って検出することになります

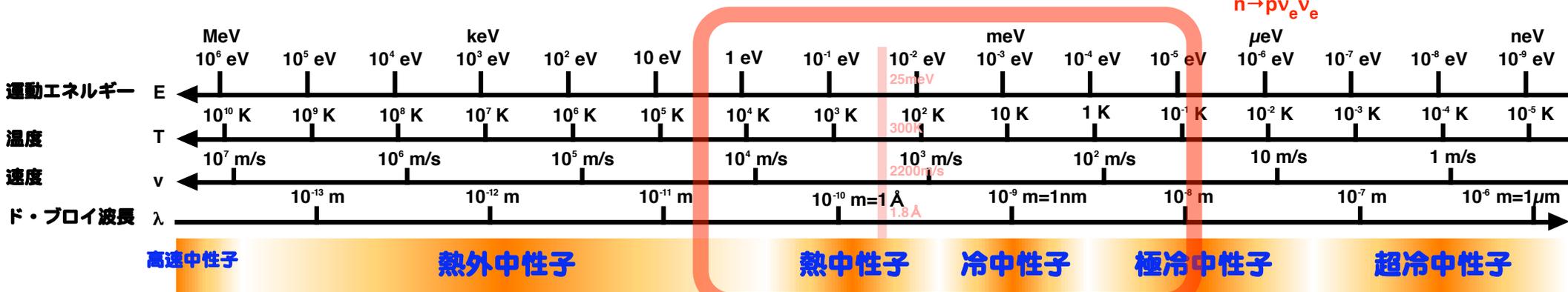


中性子は中性

運動エネルギーのほんの一部だけを確実に電子に与えることが困難。

低エネルギー

運動エネルギーを全部取り出しても、電子を動かすには足りない。



$$I(J^P) = \frac{1}{2} \left(\frac{1+}{2} \right)$$

静止質量 (ref. PDG2004)

$$m = 939.56536 \pm 0.00008 \text{ MeV}$$

平均寿命

$$\tau = 885.7 \pm 0.8 \text{ s}$$

磁気双極子能率

$$\mu = -1.9130427 \pm 0.0000005 \mu_N$$

電気双極子能率

$$d < 0.63 \times 10^{-25} \text{ e cm (CL=90\%)} >$$

自乗平均電荷半径

$$\langle r_n^2 \rangle = -0.1161 \pm 0.0022 \text{ fm}^2 \text{ (S=1.3)}$$

電気分極率

$$\alpha = (11.6 \pm 1.5) \times 10^{-4} \text{ fm}^3$$

磁気分極率

$$\beta = (3.7 \pm 2.0) \times 10^{-4} \text{ fm}^3$$

電荷

$$q = (-0.4 \pm 1.1) \times 10^{-21} \text{ e}$$

平均中性子反中性子振動時定数

$$\tau_{nn}[\text{free}] > 8.6 \times 10^7 \text{ s (CL=90\%)}$$

$$\tau_{nn}[\text{bound}] > 1.3 \times 10^8 \text{ s (CL=90\%)}$$

崩壊様式

$$n \rightarrow p e^- \bar{\nu}_e \text{ 100\%}$$

$$\lambda = g_A / g_V = -1.2695 \pm 0.0029 \text{ (S=2.0)}$$

$$A = -0.1173 \pm 0.0013 \text{ (S=2.3)}$$

$$B = 0.983 \pm 0.004$$

$$a = -0.103 \pm 0.004$$

$$\phi_{AV} = (180.08 \pm 0.10)^\circ$$

$$D = (-0.6 \pm 1.0) \times 10^{-3}$$

$$n \rightarrow p e^- \bar{\nu}_e \gamma < 6.9 \times 10^{-3}$$

$$n \rightarrow p \nu_e \bar{\nu}_e$$



Date(2006/01/26) by(H.M.Shimizu)

Title(低エネルギー陽子・中性子検出器)

Conf(RCNP研究会「マイクロパターン検出器の開発と展望」) At(Mihogaoka)

Class(Presentation) Language(Japanese)



物質研究のための中性子検出器

透過型検出器を実現する手段は見つかっていません

核反応を使って検出することになります

得られる情報は、中性子吸収反応が起こった

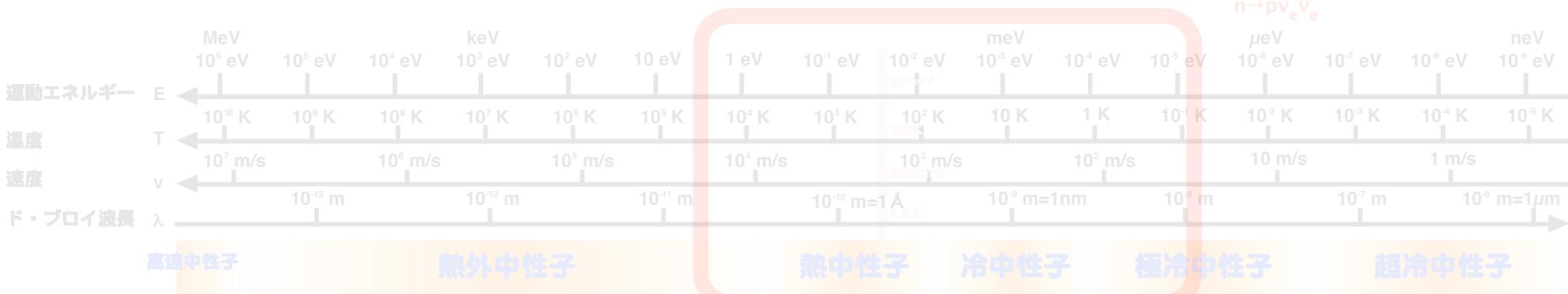
中性子は中性

運動エネルギーのほんの一部だけを確実に電子に与えることが困難。

位置と時間のみ

低エネルギー

運動エネルギーを全部取り出しても、電子を動かすには足りない。

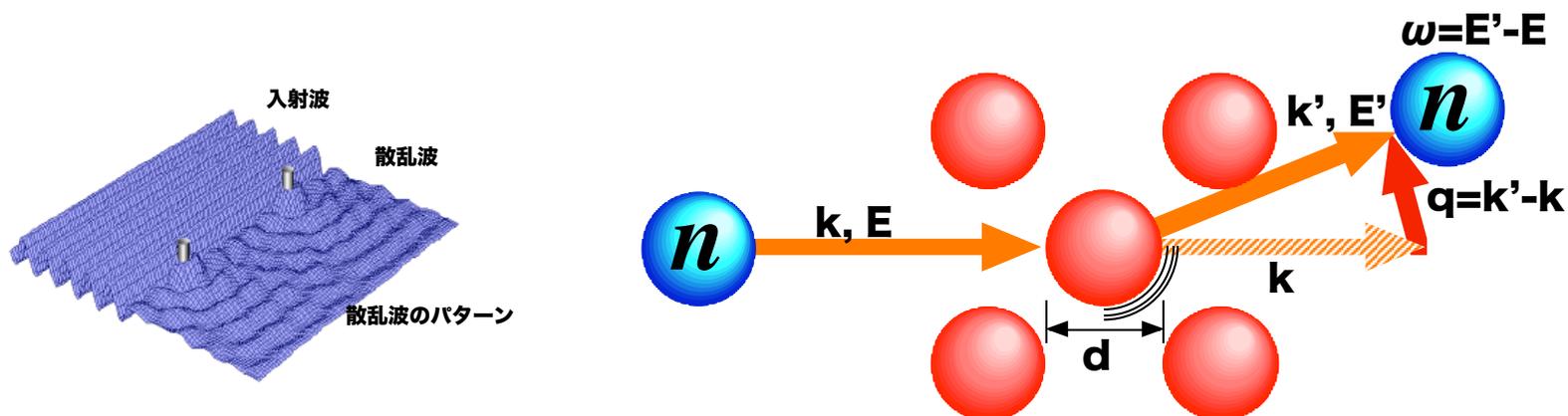


- $I(J^P) = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{2} \right)^+$
- 静止質量 $m = 939.56536 \pm 0.00008 \text{ MeV}$ (ref. PDG2004)
- 平均寿命 $\tau = 885.7 \pm 0.8 \text{ s}$
- 磁気双極子能率 $\mu = -1.9130427 \pm 0.0000005 \mu_N$
- 電気双極子能率 $d < 0.63 \times 10^{-25} \text{ e cm (CL=90\%)}$
- 自乗平均電荷半径 $\langle r_n^2 \rangle = -0.1161 \pm 0.0022 \text{ fm}^2 (S=1.3)$
- 電気分極率 $\alpha = (11.6 \pm 1.5) \times 10^{-4} \text{ fm}^3$
- 磁気分極率 $\beta = (3.7 \pm 2.0) \times 10^{-4} \text{ fm}^3$
- 電荷 $q = (-0.4 \pm 1.1) \times 10^{-21} \text{ e}$
- 平均中性子反中性子振動時定数 $\tau_{nn}[\text{free}] > 8.6 \times 10^7 \text{ s (CL=90\%)}$
 $\tau_{nn}[\text{bound}] > 1.3 \times 10^8 \text{ s (CL=90\%)}$
- 崩壊様式 $n \rightarrow p e^- \bar{\nu}_e$ 100%
- $\lambda = g_A/g_V = -1.2695 \pm 0.0029 (S=2.0)$
- $A = -0.1173 \pm 0.0013 (S=2.3)$
- $B = 0.983 \pm 0.004$
- $a = -0.103 \pm 0.004$
- $\phi_{AV} = (180.08 \pm 0.10)^\circ$
- $D = (-0.6 \pm 1.0) \times 10^{-3}$
- $n \rightarrow p e^- \bar{\nu}_e \gamma < 6.9 \times 10^{-3}$
- $n \rightarrow p \nu_e \bar{\nu}_e$



物質研究のための中性子検出器

ほとんど全ての中性子がTrue Signalです。



数え落しを嫌います



Date(2006/01/26) by(H.M.Shimizu)

Title(低エネルギー陽子・中性子検出器)

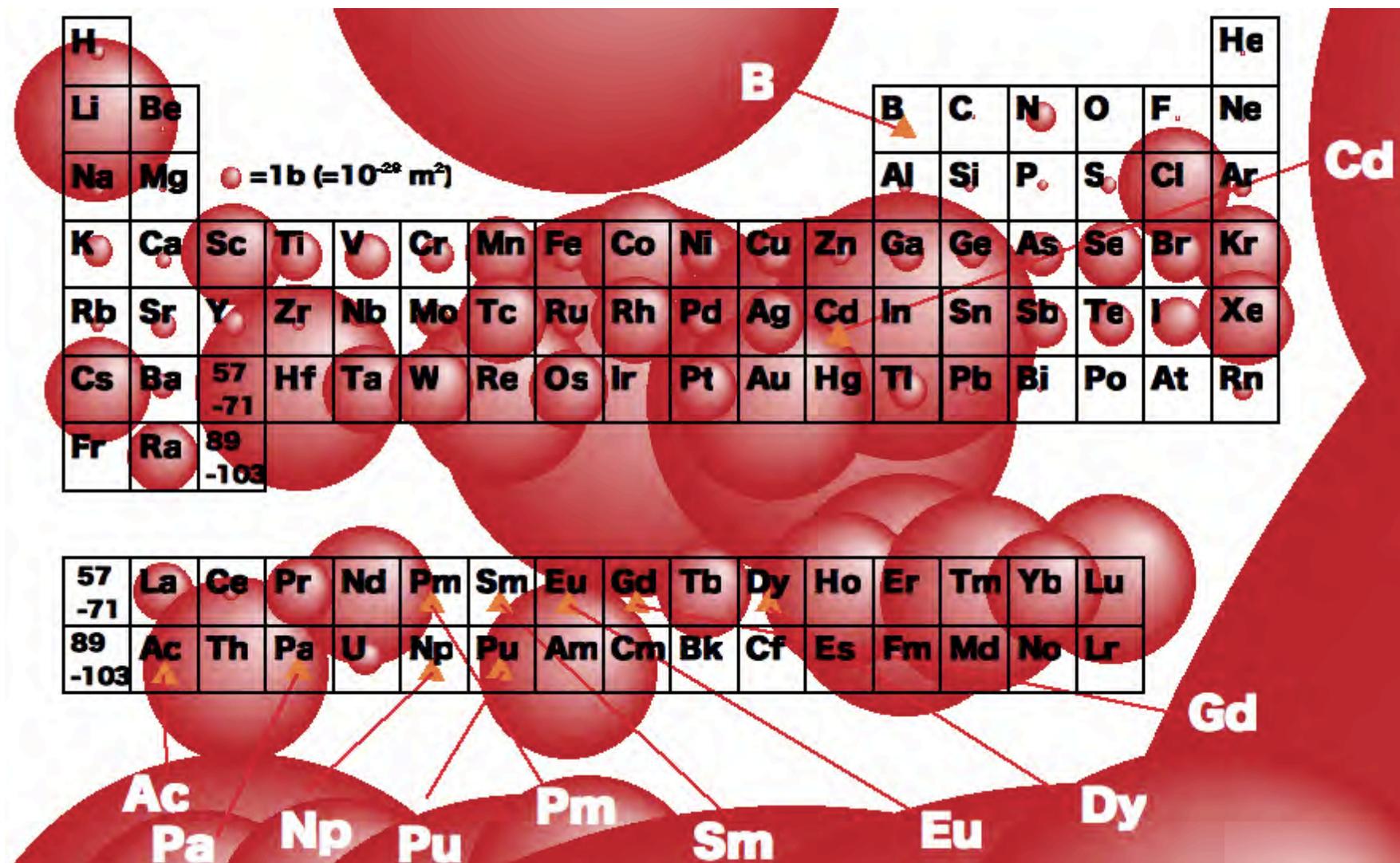
Conf(RCNP研究会「マイクロパターン検出器の開発と展望」) At(Mihogaoka)

Class(Presentation) Language(Japanese)

物質研究のための中性子検出器

中性子を吸収すると、大抵は γ 線を放出します。

図は、熱中性子($T=25\text{meV}$)に対する吸収断面積です。吸収断面積は $1/v$ に比例します。



Date(2006/01/26) by(H.M.Shimizu)

Title(低エネルギー陽子・中性子検出器)

Conf(RCNP研究会「マイクロパターン検出器の開発と展望」) At(Mihogaoka)

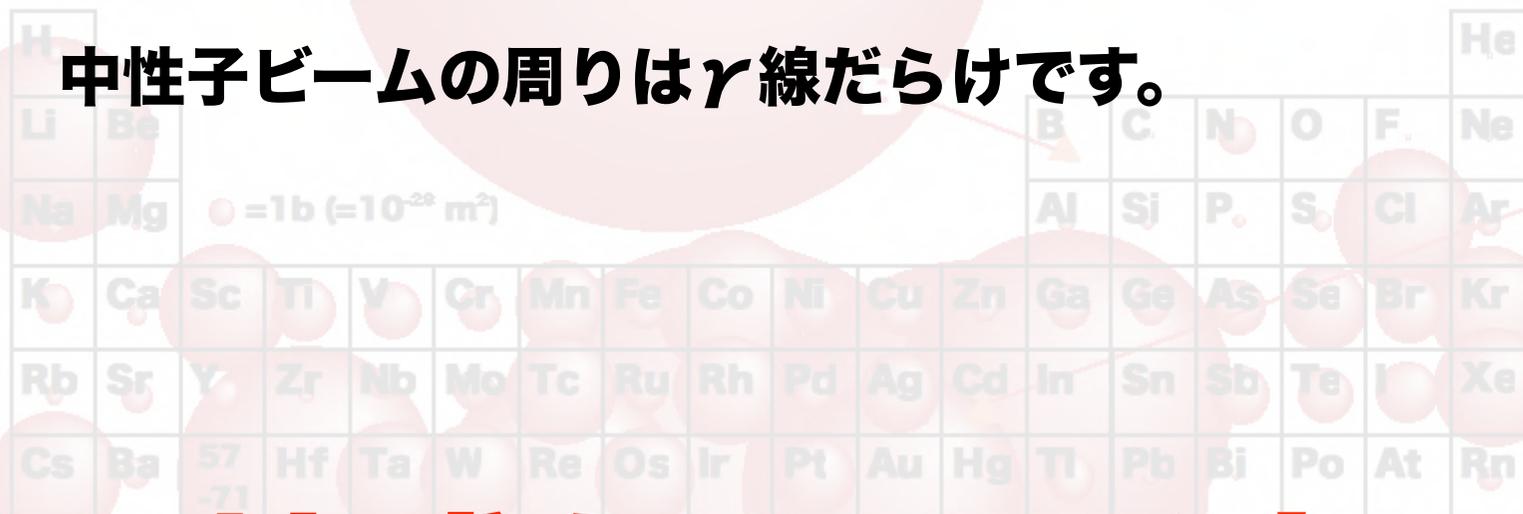
Class(Presentation) Language(Japanese)

物質研究のための中性子検出器

中性子を吸収すると、大抵は γ 線を放出します。

図は、熱中性子($T=25\text{meV}$)に対する吸収断面積です。吸収断面積は $1/v$ に比例します。

中性子ビームの周りは γ 線だらけです。



γ 線に鈍感なものが良い



Date(2006/01/26) by(H.M.Shimizu)

Title(低エネルギー陽子・中性子検出器)

Conf(RCNP研究会「マイクロパターン検出器の開発と展望」) At(Mihogaoka)

Class(Presentation) Language(Japanese)

物質研究のための中性子検出器

位置と時間のみ



数え落しを嫌う



γ 線に鈍感なものが良い



二つの信号を関連づける必要は無いが高速であるものが望ましい

パイプライン処理が適当

Recoveryが速いのが良い

検出体に強い制限

検出体は軽元素系物質か物質量が少ないものが良い
できれば荷電粒子が出てほしい



Date(2006/01/26) by(H.M.Shimizu)

Title(低エネルギー陽子・中性子検出器)

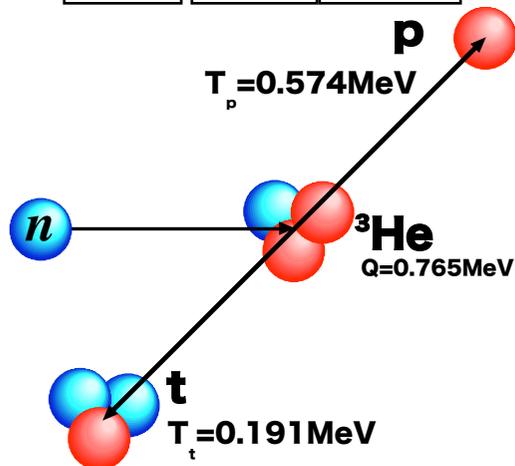
Conf(RCNP研究会「マイクロパターン検出器の開発と展望」) At(Mihogaoka)

Class(Presentation) Language(Japanese)

中性子検出に使える核反応

① $n+{}^3\text{He}\rightarrow p+t$

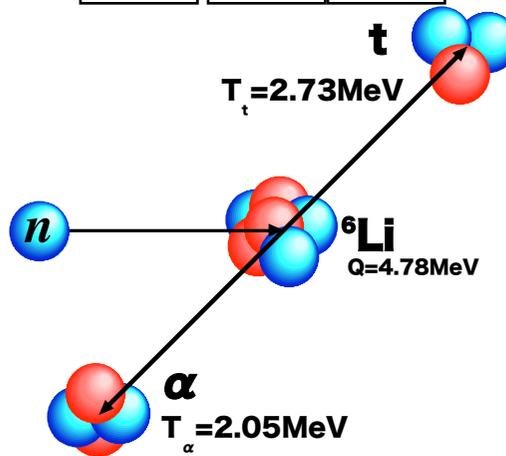
He 2	³He 0.000138% 5333b	⁴He 99.999862 % 0.0b
----------------	---	--



$\sigma = 5333\text{b}$

② $n+{}^6\text{Li}\rightarrow t+\alpha$

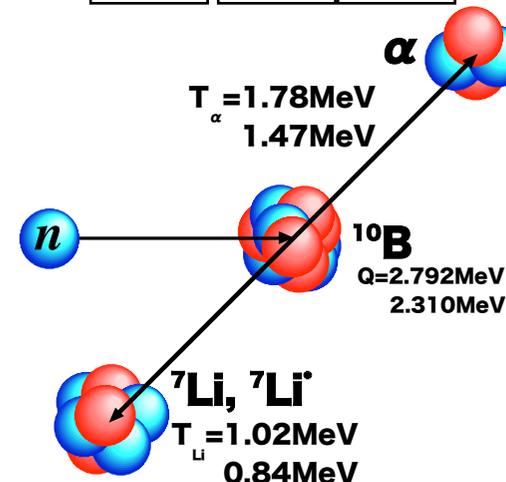
Li 3	⁶Li 7.5% 940b	⁷Li 92.5% 0.0454b
----------------	---------------------------------------	---



$\sigma = 940\text{b}$

③ $n+{}^{10}\text{B}\rightarrow\alpha+{}^7\text{Li}$

B 5	¹⁰B 20.0% 3837b	¹¹B 80.0% 0.0055b
---------------	---	---



$\sigma = 3837\text{b}$

Single Wire Proportional Chamber + resistance-division readout
 Multi Wire Proportional Chamber

LiF/ZnS
 Lithium Glass Scintillator

BF₃ Scintillator

◎ 長期安定性の実績

◎ 低いγ線感度

× 遅い

× 位置分解能が悪い

× γ線感度

× 遅い?

Date(2006/01/26) by(H.M.Shimizu)

Title(低エネルギー陽子・中性子検出器)

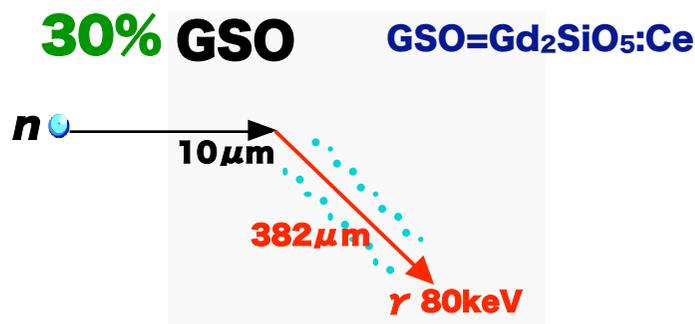
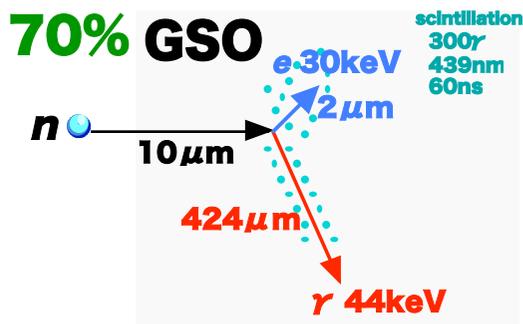
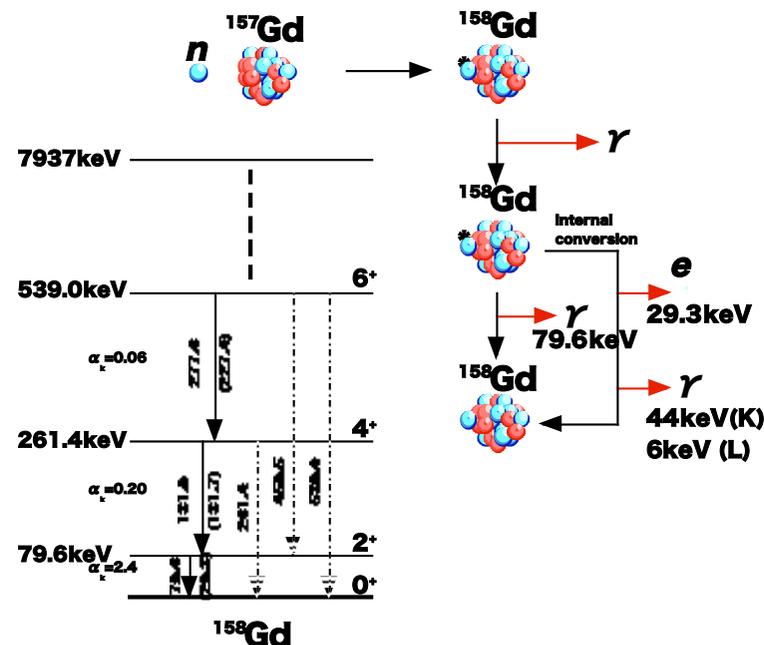
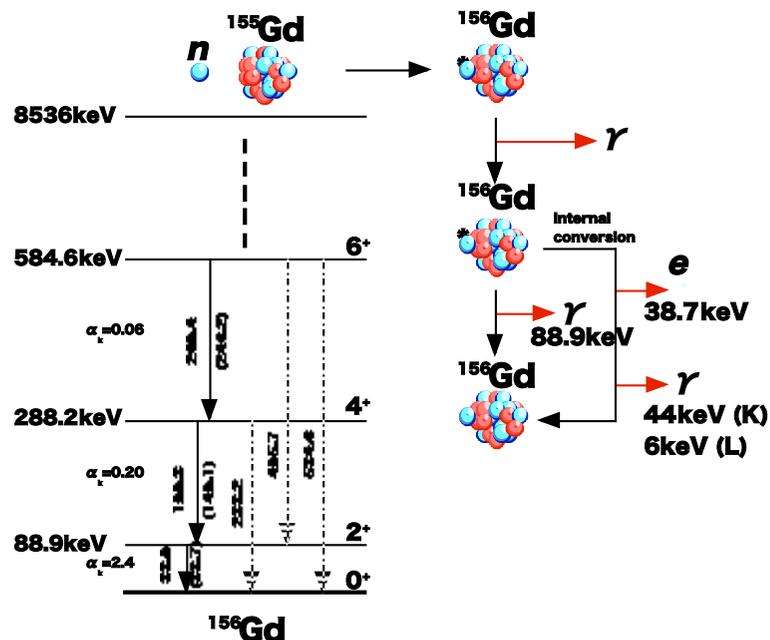
Conf(RCNP研究会「マイクロパターン検出器の開発と展望」) At(Mihogaoka)

Class(Presentation) Language(Japanese)

中性子検出に使える核反応

④ n+Gd

Gd	¹⁵² Gd	¹⁵⁴ Gd	¹⁵⁵ Gd	¹⁵⁶ Gd	¹⁵⁷ Gd	¹⁵⁸ Gd	¹⁶⁰ Gd
64	0.2%	2.1%	14.8%	20.6%	15.7%	24.8%	21.8%
48890b	735b	85b	60900b	1.5b	254000b	2.2b	0.77b



Date(2006/01/26) by(H.M.Shimizu)

Title(低エネルギー陽子・中性子検出器)

Conf(RCNP研究会「マイクロパターン検出器の開発と展望」) At(Mihogaoka)

Class(Presentation) Language(Japanese)

中性子検出器の開発の方向性

ガス(^3He)

高計数率化 → MSGCなど

位置分解能 → 多チャンネル化

シンチレータ

γ 線感度低減 → 材料探索

光量増大

高計数率化 → 多チャンネル化

位置分解能 → マルチアノード

システム化

多チャンネル信号処理

システム化

多ユニットのシステム化

Host	Dopant (conc. mol%)	Density ρ (g/cm ³)	ρZ_{eff}^4 ($\times 10^{-6}$)	Abs. Length @ $\lambda=1.8\text{\AA}$ (mm)	Light Yield (photons/neutron)	Light Yield (photons/MeV γ)	α/β Ratio	λ_{em} (nm)	τ (ns)
^6Li -glass	Ce	2.5		0.52	~6,000	~4,000	0.3	395	75
^6LiI	Eu	4.1	31	0.54	50,000	12,000	0.87	470	1400
$^6\text{LiF/ZnS}$	Ag	2.6	1.2	0.8	160,000	75,000	0.44	450	>1000
LiBaF_3	Ce, K	5.3	35		3,500	5,000	0.14	190-330	1/34/2100
LiBaF_3	Ce, Rb	5.3	35		3,600	4,500	0.17	190-330	1/34/2400
$^6\text{Li}_6^{\text{dep}}\text{Gd}(\text{}^{11}\text{BO}_3)_3$	Ce	3.5	25	0.35	40,000	25,000	0.32	385, 415	200/800
$^6\text{Li}_6^{\text{dep}}\text{Gd}(\text{}^{11}\text{BO}_3)_3 + \text{Y}_2\text{SiO}_5$	Ce Ce	3.9		1	40,000 -	30,000		420 420	200/800 70
$\text{Cs}_2^6\text{LiYCl}_6$	Ce (0.1)	3.3		3.2	70,000 -	22,000 700	0.66	380 255-470	~1000 3
$\text{Cs}_2^6\text{LiYBr}_6$	Ce (1)	4.1		3.7	88,000	23,000	0.76	389,423	89/2500

C.W.E van Eijk, Nucl. Instrum. Methods A529 (2004) 260

Date(2006/01/26) by(H.M.Shimizu)

Title(低エネルギー陽子・中性子検出器)

Conf(RCNP研究会「マイクロパターン検出器の開発と展望」) At(Mihogaoka)

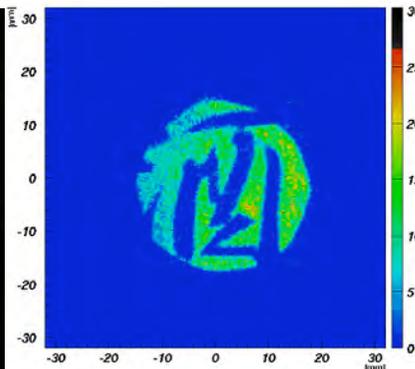
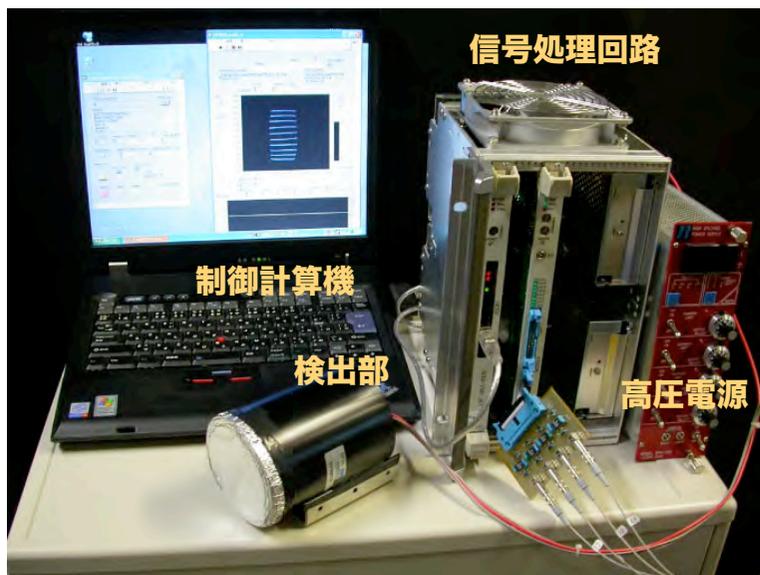
Class(Presentation) Language(Japanese)



KENS-RIKEN

回路

検出器本体部分



陽極抵抗分割読出型画像
検出システム

1mm以下の位置分解能を手軽に実現
できます。検出システムとして出来上
がっているのので、簡便に使用できます。



光直結読出型アンダーカメラ

シンチレーション光を直接マルチアノード光電子増倍管で検出するアンダー方式の画像検出器です。波長変換クロスファイバーを利用するのに比べて、発光量が少ないシンチレータ素材でも高計数率動作し、バックグラウンドに強い動作をします。

位置分解能1mm程度
→発光の重心計算が必要
ASICを伴う
システム化が必須



波長変換クロスファイバー読出

交差する波長変換ファイバーでシンチレーション光をマルチアノード光電子増倍管に導くタイプです。位置分解能450 μ mが達成されています。

Date(2006/01/26) by(H.M.Shimizu)

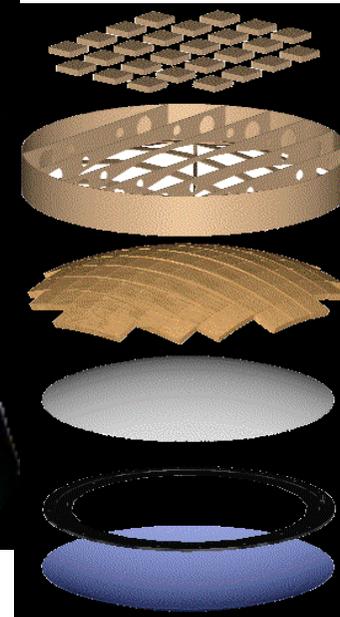
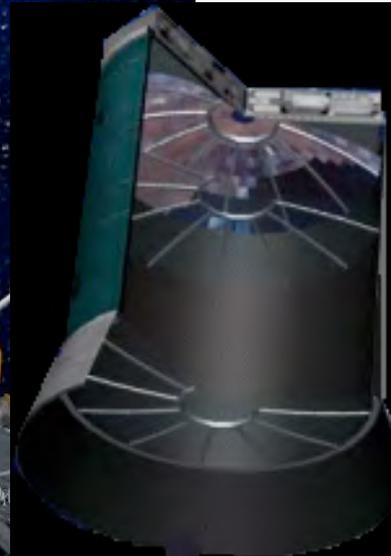
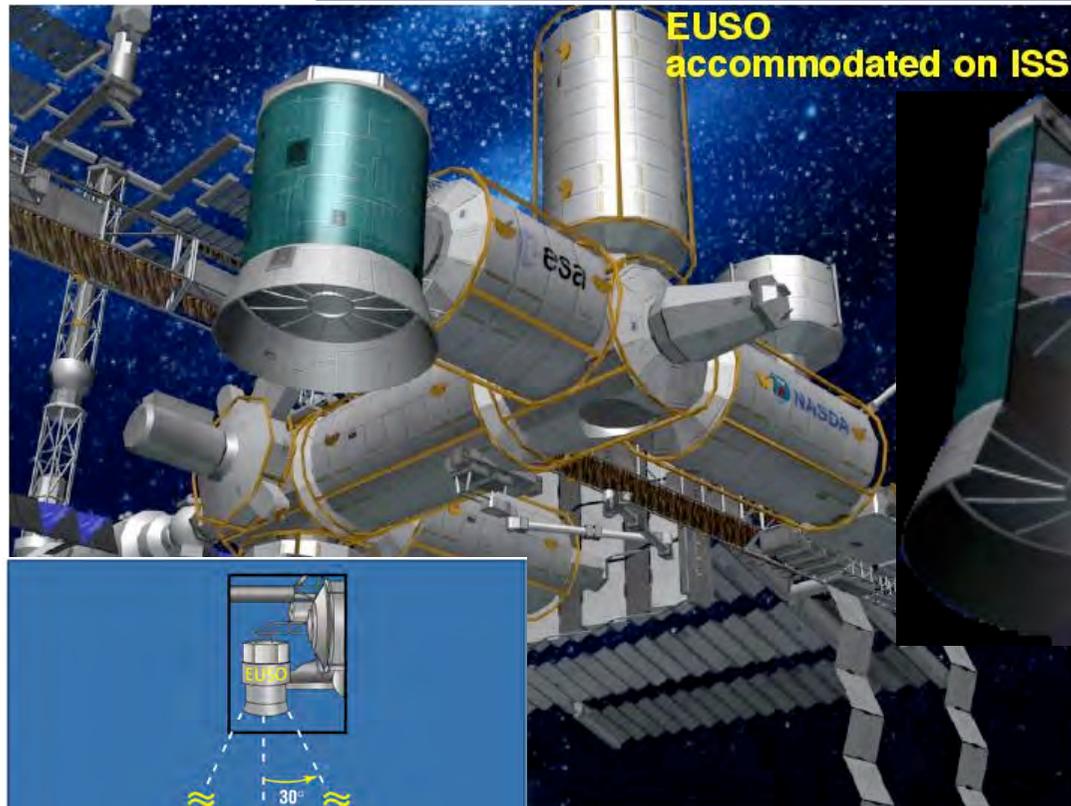
Title(低エネルギー陽子・中性子検出器)

Conf(RCNP研究会「マイクロパターン検出器の開発と展望」) At(Mihogaoka)

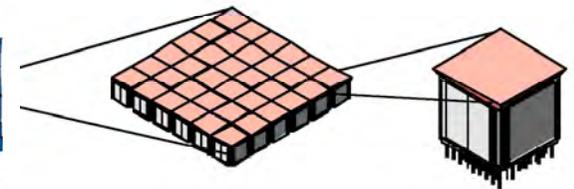
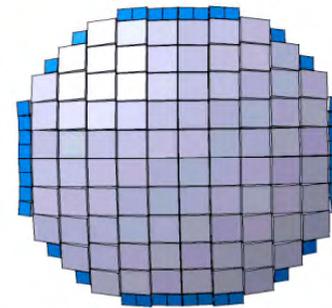
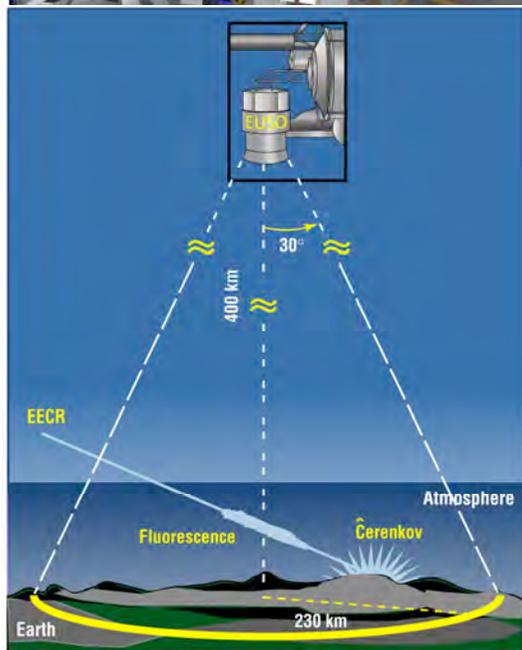
Class(Presentation) Language(Japanese)

EUSO

Extreme Universe Space Observatory
for Extremely High Energy Cosmic Ray Observation



Electronics
Focal Surface Support Structure
Focal Surface
Fresnel Lens 2
Entrance pupil
Fresnel Lens 1



Date(2006/01/26) by(H.M.Shimizu)

Title(低エネルギー陽子・中性子検出器)

Conf(RCNP研究会「マイクロパターン検出器の開発と展望」) At(Mihogaoka)

Class(Presentation) Language(Japanese)

概ねのスペック

チャンネル数：10k-1M channel
 計数率：10kcps-1Mcps (10Mcps)
 密度：1-400 channel/cm²

	粉末結晶解析		超高分解能粉末結晶解析	生物用単結晶回折	反射率計	小角散乱		全散乱		高分解能チョッパ
検出器バンク	背面	小角・中角				極小角	小角・広角			
全有感面積	5.0m ²		15.5m ²	1.1m ²	0.04m ²	0.4×0.4m ²	2.2+3m ²	7.0m ²		40.0m ²
ピクセル数	33,000		13,000	1,100,000	40,000	640,000	88,000 +120,000	280,000		40.0m ²
ピクセルサイズ	0.3×5.0cm ²	0.3×20cm ²	0.1×0.1cm ²	0.1×0.1cm ²	0.1×0.1cm ²	0.05×0.05cm ²	0.5×0.5cm ²	0.5×0.5cm ²	0.5×16cm ²	1..2×1.2cm ²
最高中性子エネルギー	1.0eV		0.5eV	0.17eV	0.013eV	0.33eV	0.33eV	5.0eV		2.0eV
中性子波長領域	0.28-8.0Å		0.4-8.0Å	0.7-3.85Å	2.5-9.0Å	0.5-9.0Å	0.5-9.0Å	0.12-8.8Å		
中性子検出効率	90%@λ=1Å		90%@λ=1Å	20%@λ=1Å		80%@λ=1Å	80%@λ=1Å	90%@λ=1Å		80%@λ=1Å
ピクセル最大計数率	1.0×10 ⁴ n/s		1.0×10 ⁴ n/s	1.0×10 ³ n/s	1.0×10 ⁷ n/s (直接ビーム)	1.0×10 ⁶ n/s		1.0×10 ⁶ n/s	本来はもっと必要	1.0×10 ⁶ n/s (Brg)
検出器計数率				3.0×10 ³ n/s/cm ²	1.0×10 ⁹ n/s (直接ビーム)		1.0×10 ⁶ n/s			1.0×10 ⁶ n/s(フ ラッグ測定)
データ転送率	62.8 GB/h		26.6 GB/h	0.1 GB/h	3.5 GB/h	0.1 GB/h		11.5 GB/h		1.8 GB/h
優先項目	低予算(3000万円/m ² データ転送率)、信頼度		低予算(3000万円/m ² データ転送率)、信頼度	大立体角カバー、不感領域極小、球形・円筒形配置	広い計数ダイナミックレンジ、γ線識別能力	広い計数ダイナミックレンジ、高位置分解能、(高計数能力)	5mm程度の位置分解能、低価格	計数長期安定度、計数能力、検出効率		低ノイズ、安定度、低予算3000万円/m ² 、γ線識別能力

物性屋さん、生物屋さんにはユーザーです。

新しい検出器の導入には慎重

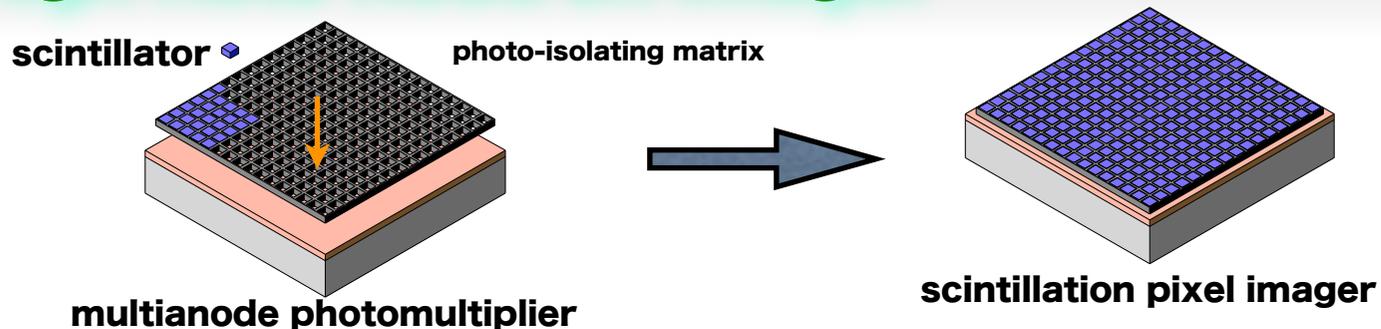
Date(2006/01/26) by(H.M.Shimizu)

Title(低エネルギー陽子・中性子検出器)

Conf(RCNP研究会「マイクロパターン検出器の開発と展望」) At(Mihogaoka)

Class(Presentation) Language(Japanese)

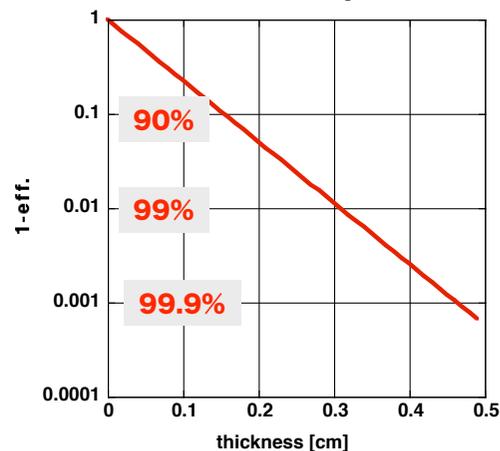
High Rate Neutron Imager



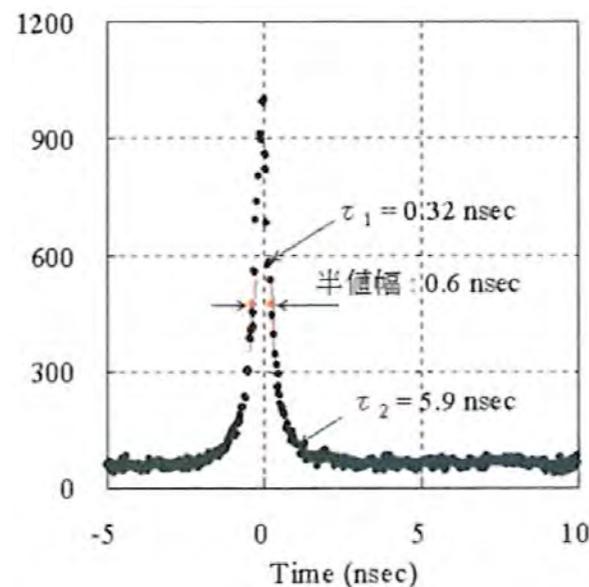
Li₂B₄O₇:Cu single crystal



Thermal Neutron Absorption Efficiency



transparent in $160 \leq \lambda \leq 3600$ nm



pulse width ~ 0.6-0.75 ns

	λ_{em} [nm]	Photon Yield		decay [ns]	ρZ_{eff}^4
		n	γ		
LBO:Cu	380	100	200	2	7×10^3
Li Glass	395	6000	4000	75	1.2×10^6
LiZnS:Ag	450	160000	75000	1000	1.2×10^6

light yield ~ 50-100 photon/neutron

fast but faint

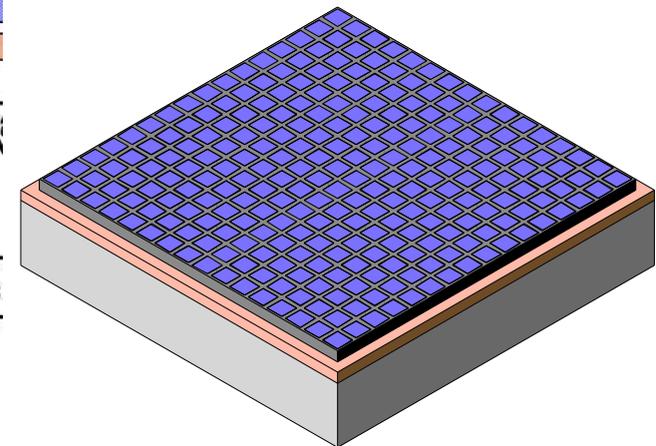
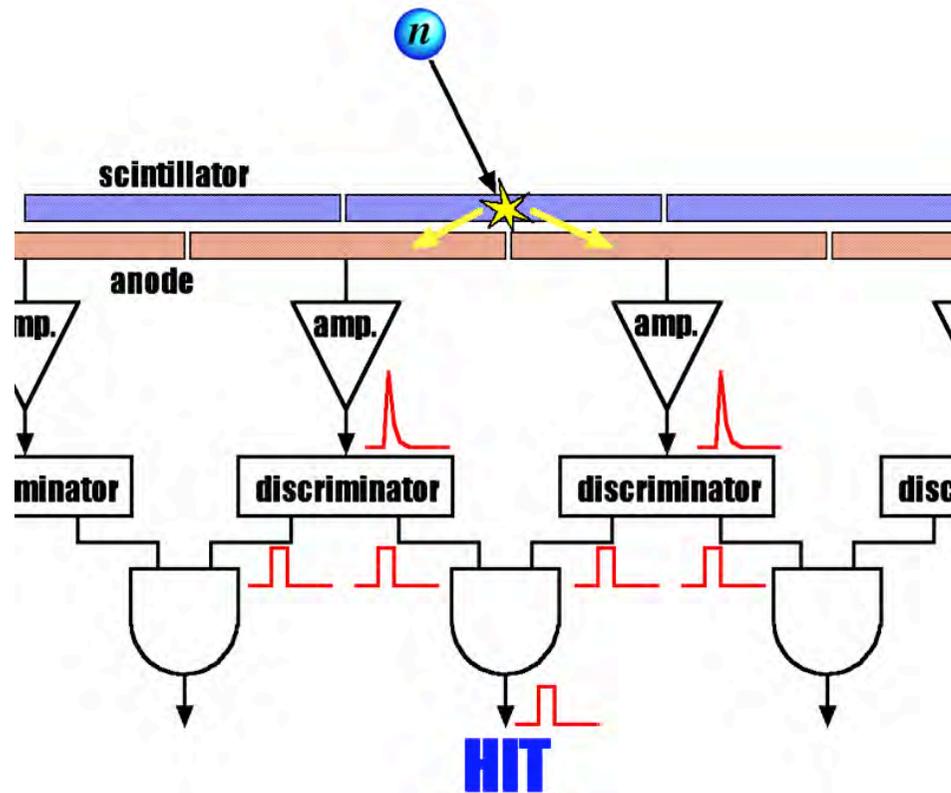
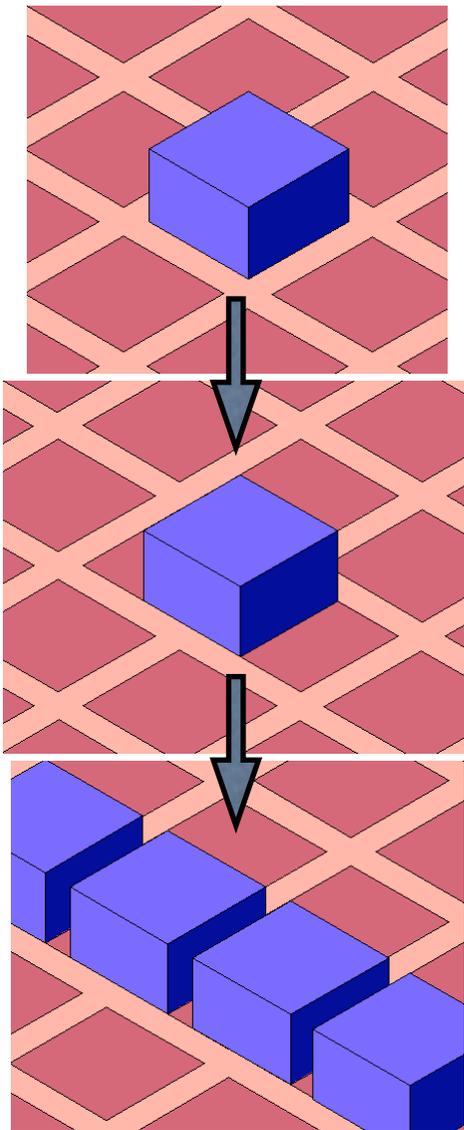
Date(2006/01/26) by(H.M.Shimizu)

Title(低エネルギー陽子・中性子検出器)

Conf(RCNP研究会「マイクロパターン検出器の開発と展望」) At(Mihogaoka)

Class(Presentation) Language(Japanese)

High Rate Neutron Imager



enabling pulse counting imaging

flux $\sim 10^{10} \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

$\Delta x \sim 3 \text{ mm}$

tile-shape and all-side buttable

finer segmentation with optical mag. (non-butttable)

Imaging Direct Beam Monitor?

Date(2006/01/26) by(H.M.Shimizu)

Title(低エネルギー陽子・中性子検出器)

Conf(RCNP研究会「マイクロパターン検出器の開発と展望」) At(Mihogaoka)

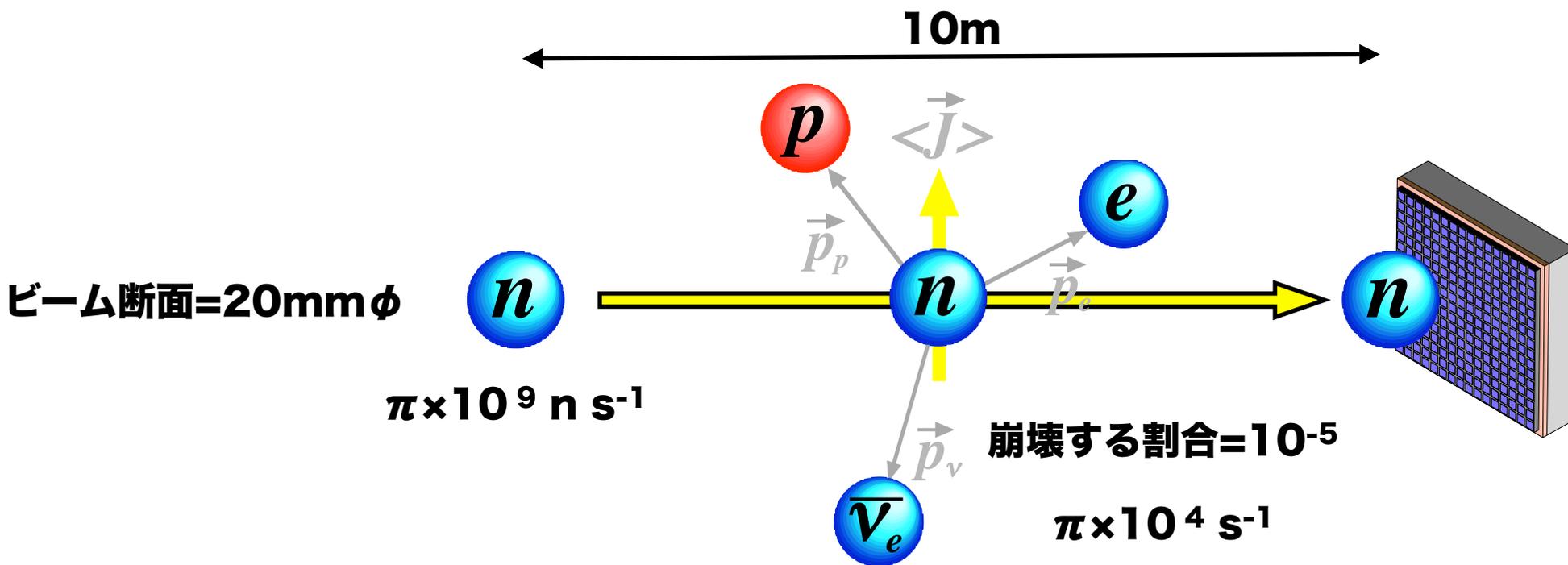
Class(Presentation) Language(Japanese)

冷中性子

$$\lambda = 4\text{\AA}$$

$$E = 5\text{meV}$$

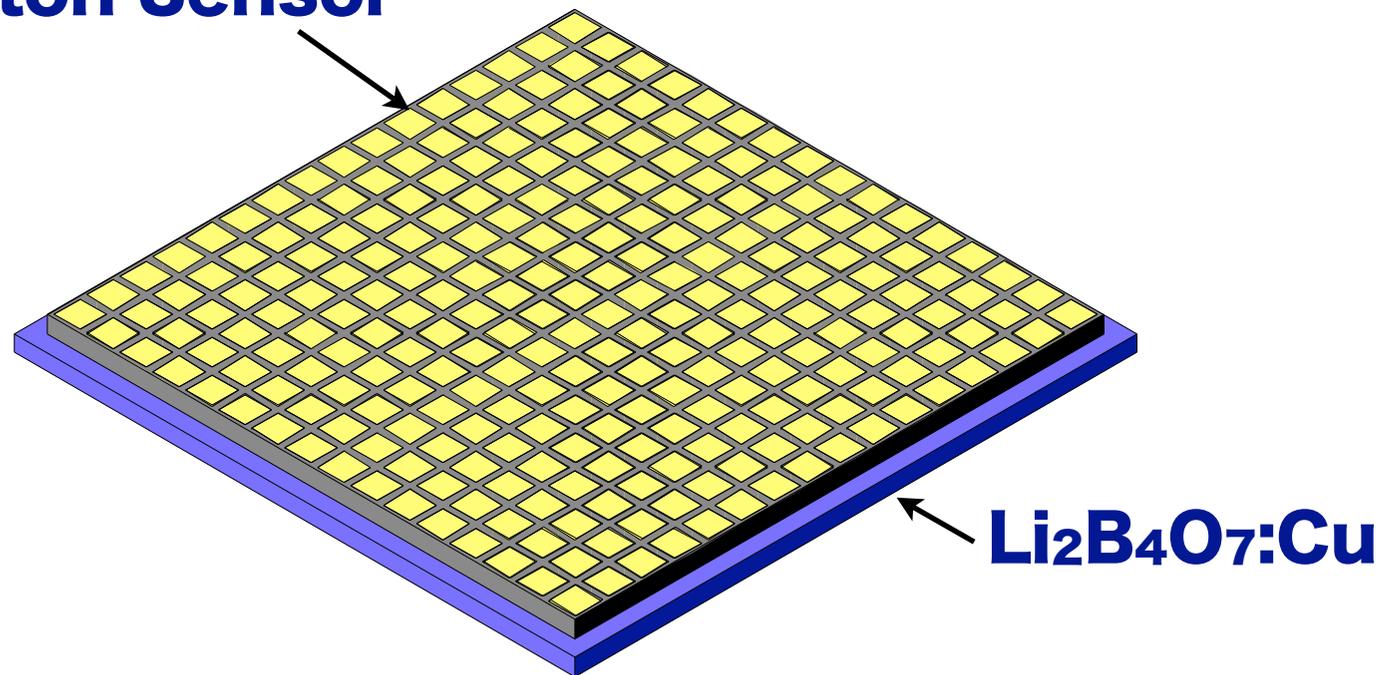
$$v = 1000\text{m/s}$$



統計精度 $\leq 10^{-3}$ \longleftrightarrow 測定時間 ≥ 55 日

じゃ、いっそのこと

Photon Sensor



Date(2006/01/26) by(H.M.Shimizu)

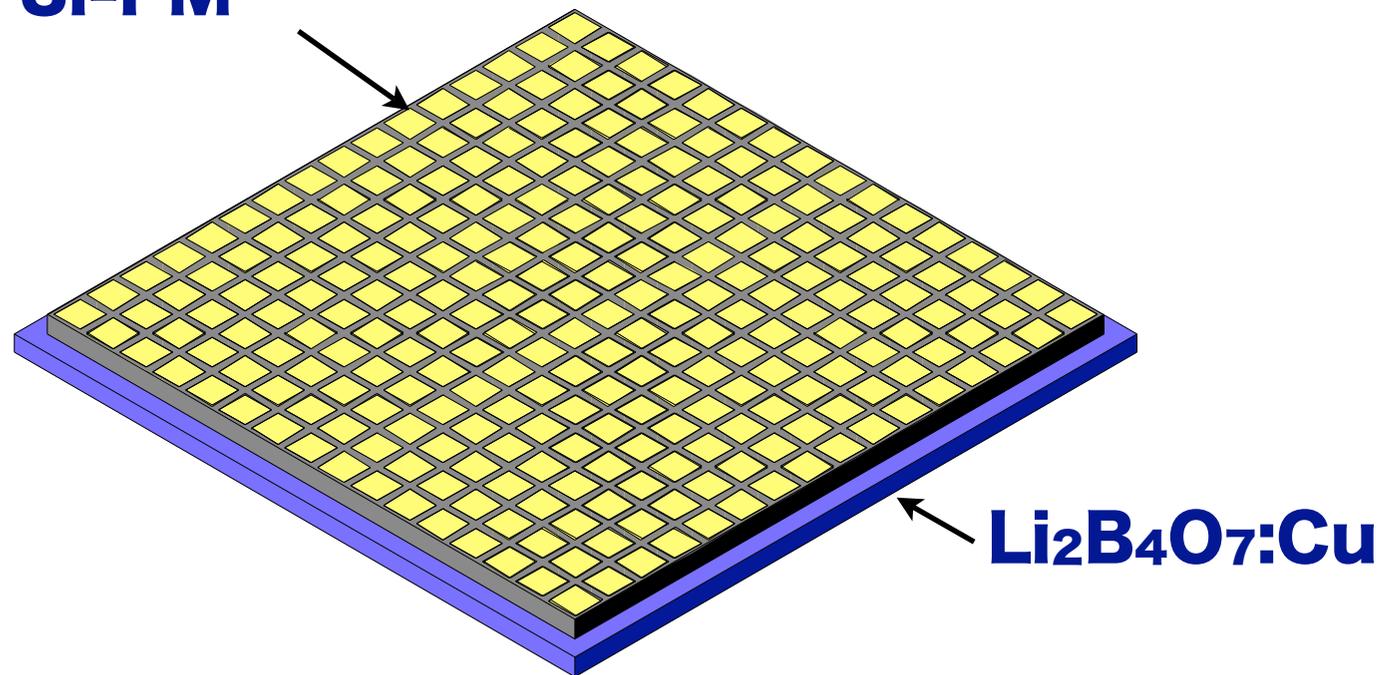
Title(低エネルギー陽子・中性子検出器)

Conf(RCNP研究会「マイクロパターン検出器の開発と展望」) At(Mihogaoka)

Class(Presentation) Language(Japanese)

じゃ、いっそのこと

何でしたら **Si-PM**



Date(2006/01/26) by(H.M.Shimizu)

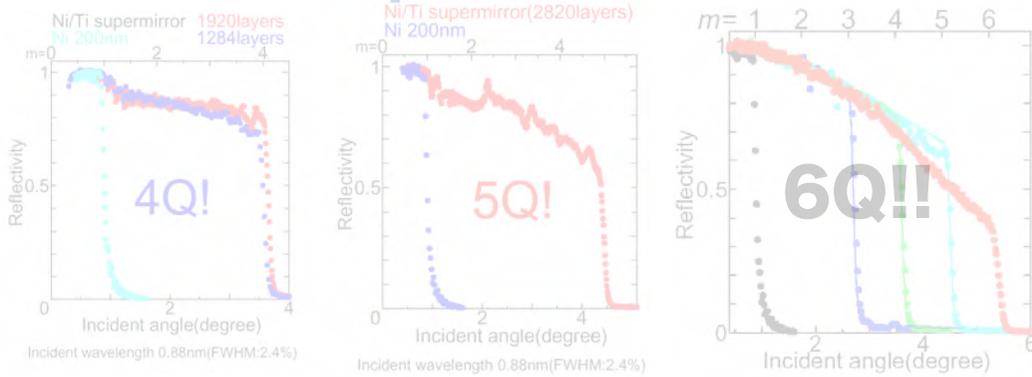
Title(低エネルギー陽子・中性子検出器)

Conf(RCNP研究会「マイクロパターン検出器の開発と展望」) At(Mihogaoka)

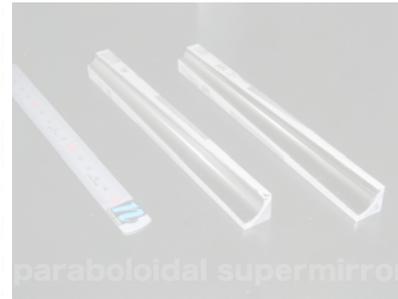
Class(Presentation) Language(Japanese)

Device Level Achievements

Reflective Optics M.Hino et al. (Kyoto Univ.)



K.Ikeda et al. (RIKEN)



Imaging Detector

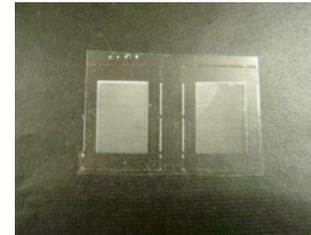
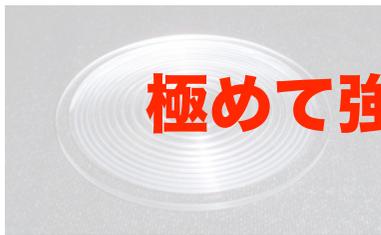
K.Hirota (RIKEN)
S.Sato (KEK) et al.

RPMT



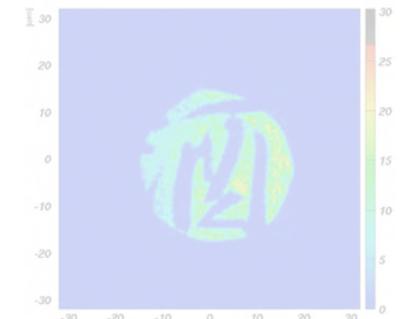
Compound Refractive Optics

Biconcave Fresnel-shape Coaxial Double Biconcave Microprism



極めて強い曲げ力

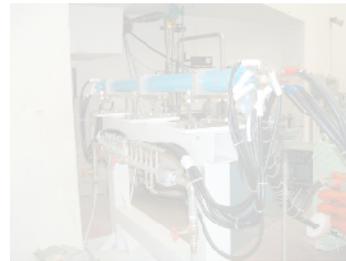
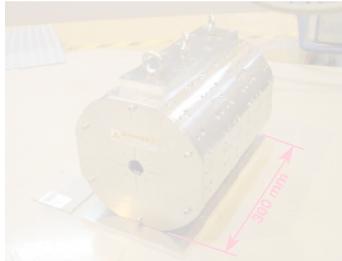
T.Adachi et al. (RIKEN) T.Shinohara et al. (RIKEN)



0.5-0.8mm spatial resolution

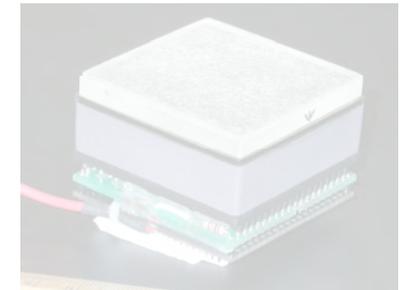
Magnetic Optics

Superconducting Permanent Pulsed Variable Permanent



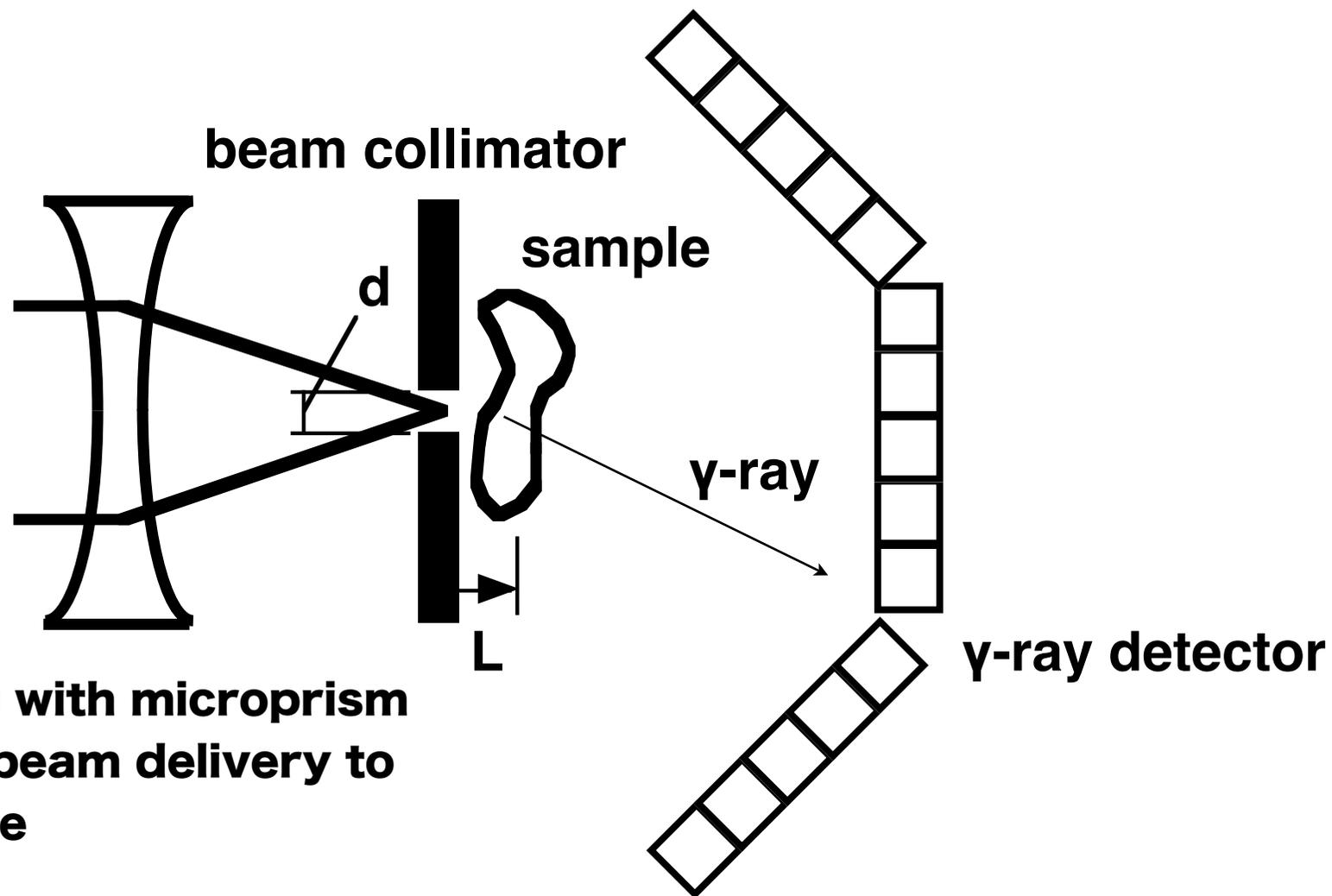
H.M.Shimizu (RIKEN), T.Oku, J.Suzuki (JAERI) Y.Iwashita et al. (Kyoto Univ.)

FPPMT



Date(2006/01/26) by(H.M.Shimizu)
Title(低エネルギー陽子・中性子検出器)
Conf(RCNP研究会「マイクロパターン検出器の開発と展望」) At(Mihogaoka)
Class(Presentation) Language(Japanese)

Neutron Scanning Microscope



crude focusing with microprism
for enhancing beam delivery to
the slit aperture

imaging of boron atoms in cells



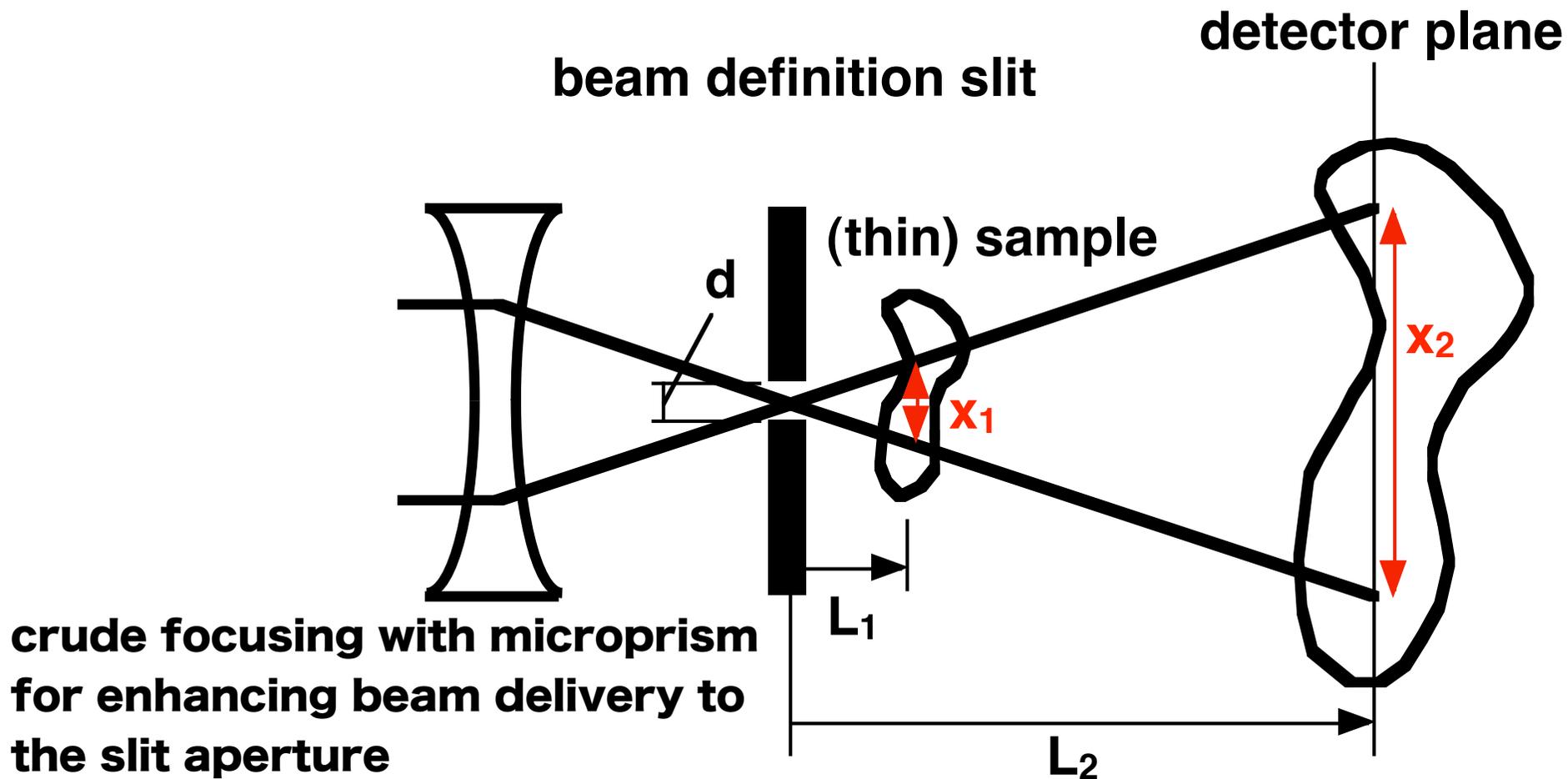
Date(2006/01/26) by(H.M.Shimizu)

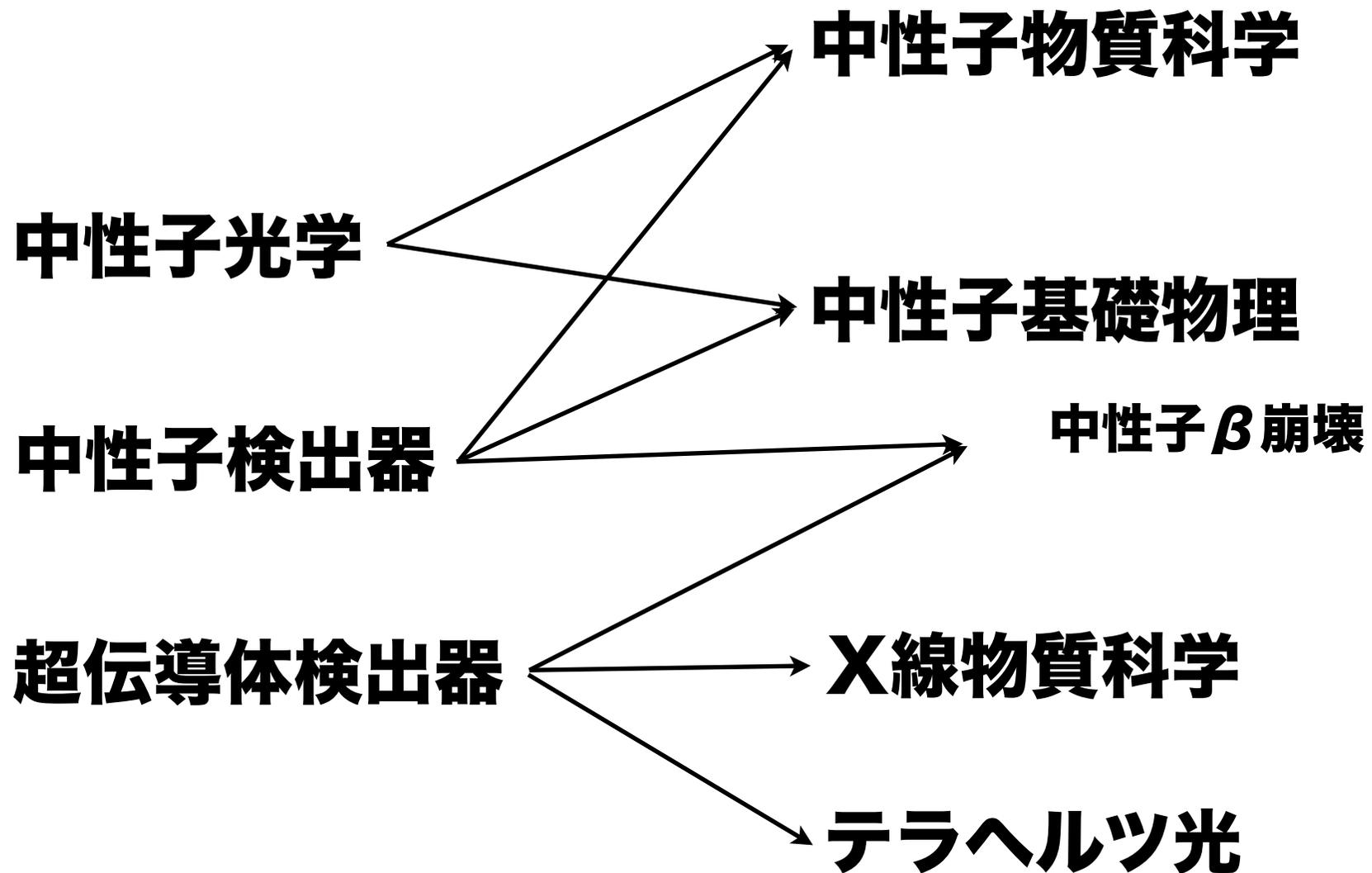
Title(低エネルギー陽子・中性子検出器)

Conf(RCNP研究会「マイクロパターン検出器の開発と展望」) At(Mihogaoka)

Class(Presentation) Language(Japanese)

Neutron Pinhole Imaging Microscope





Date(2006/01/26) by(H.M.Shimizu)

Title(低エネルギー陽子・中性子検出器)

Conf(RCNP研究会「マイクロパターン検出器の開発と展望」) At(Mihogaoka)

Class(Presentation) Language(Japanese)

On-site 中性子源



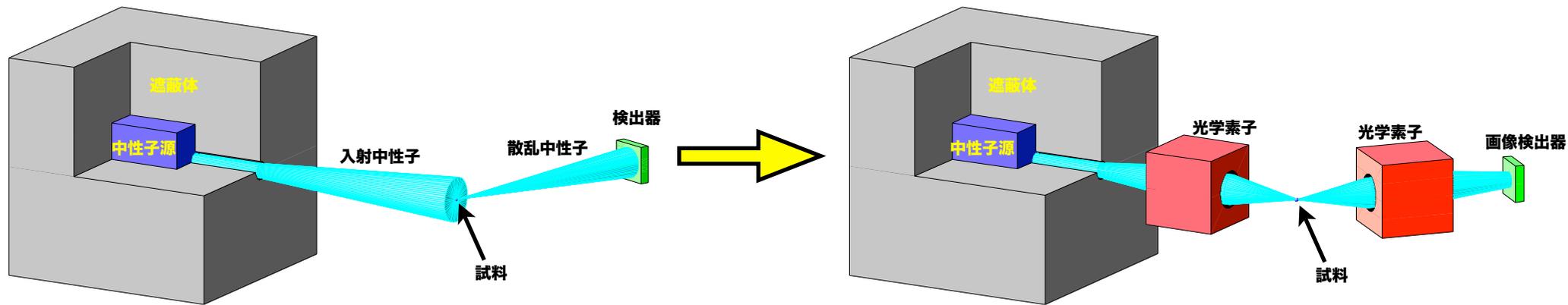
Date(2006/01/26) by(H.M.Shimizu)

Title(低エネルギー陽子・中性子検出器)

Conf(RCNP研究会「マイクロパターン検出器の開発と展望」) At(Mihogaoka)

Class(Presentation) Language(Japanese)

中性子光学・検出器がもたらしたもの⇔中性子利用効率の向上



	従来		先進的中性子光学
中性子利用効率	低	→	高
大規模中性子研究施設	○	→	◎
中小規模中性子源	×	→	○

← 当面の応用先

中性子光学・検出器が開拓した全く新規の応用先

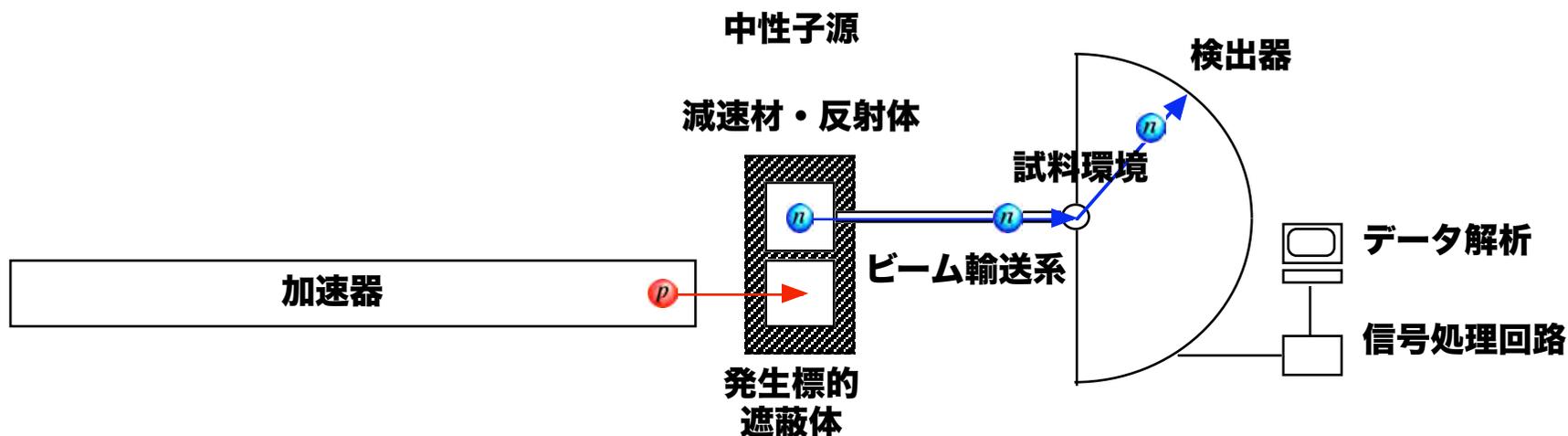
中小規模中性子源⇔中性子光学



大規模中性子源の建設を進める日本にとって

中性子科学研究体制の拡充は急務の課題

中性子光学の飛躍的發展によって、小さな予算規模で実現する可能性が登場した。



IAEA-TECDOC-1439 “Development Opportunities for Small and Medium Scale Accelerator-driven Neutron Sources”, Vienna, 18-21 May 2004

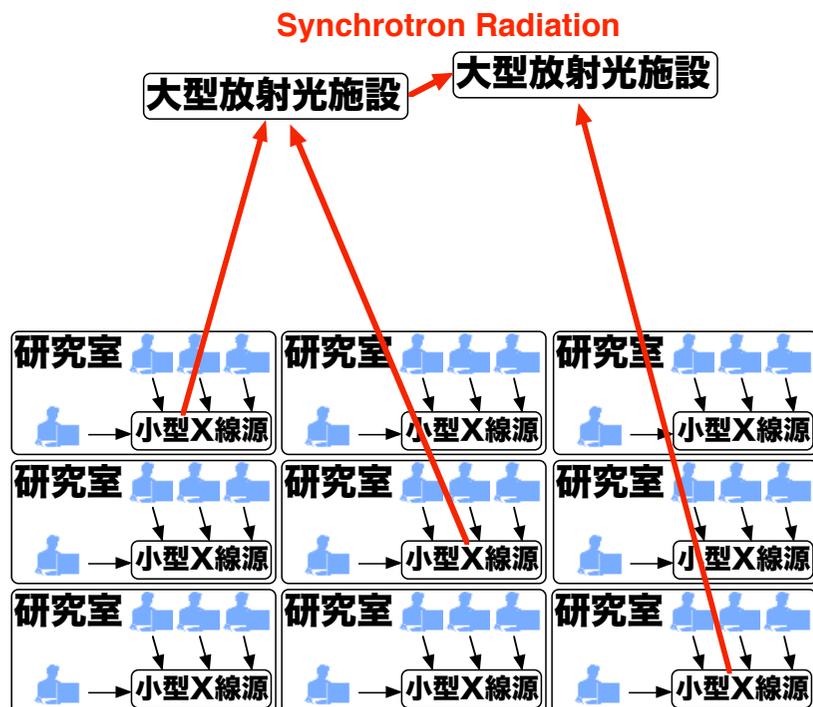
Low Energy Neutron Source (LENS), Indiana University, USA

中性子基盤ネットワーク（北大他）、On-site小型中性子源（京大他）

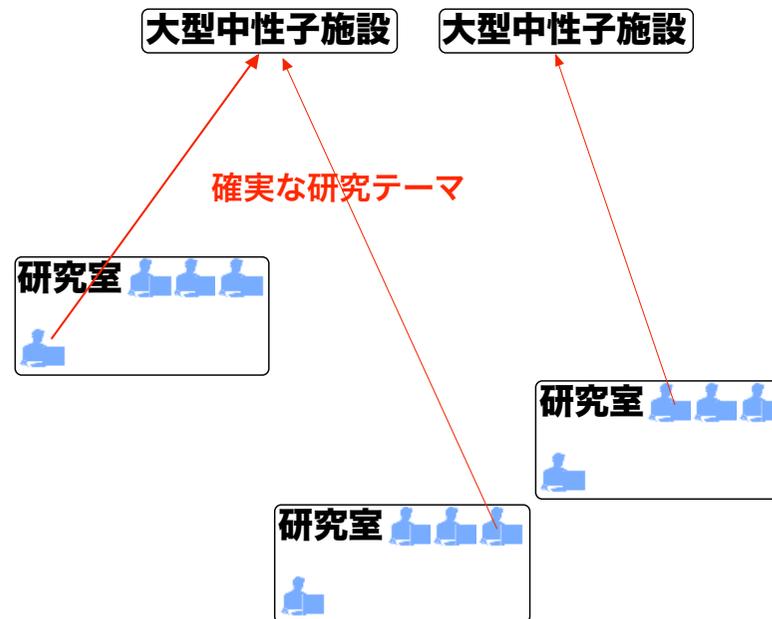
大学研究者の手元に中性子源を!!

X線と中性子の研究体制

X線



中性子科学



長年の問題には取り組めても、奇抜なアイデアに基づく大発見が出にくい。



Date(2006/01/26) by(H.M.Shimizu)

Title(低エネルギー陽子・中性子検出器)

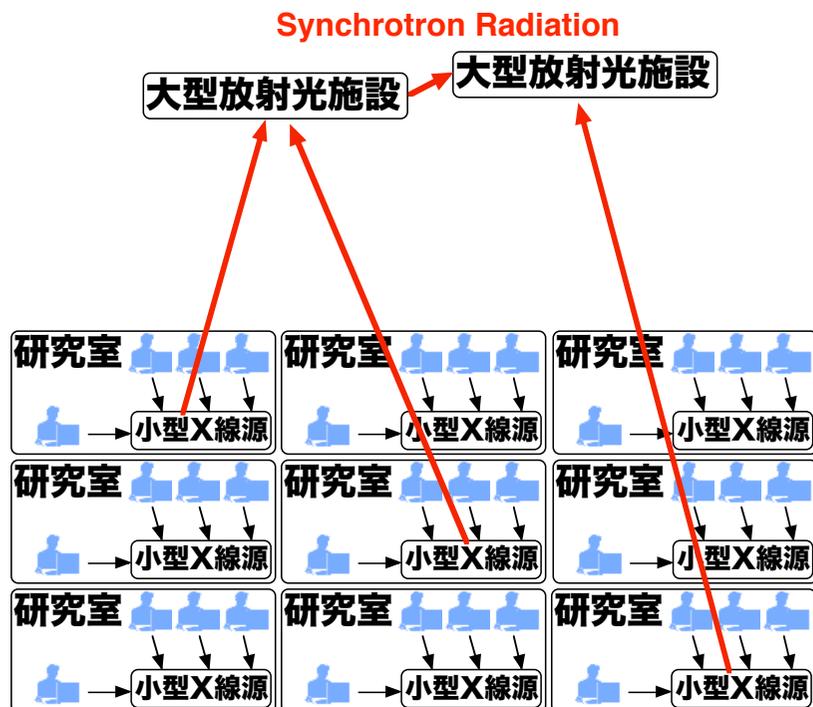
Conf(RCNP研究会「マイクロパターン検出器の開発と展望」) At(Mihogaoka)

Class(Presentation) Language(Japanese)

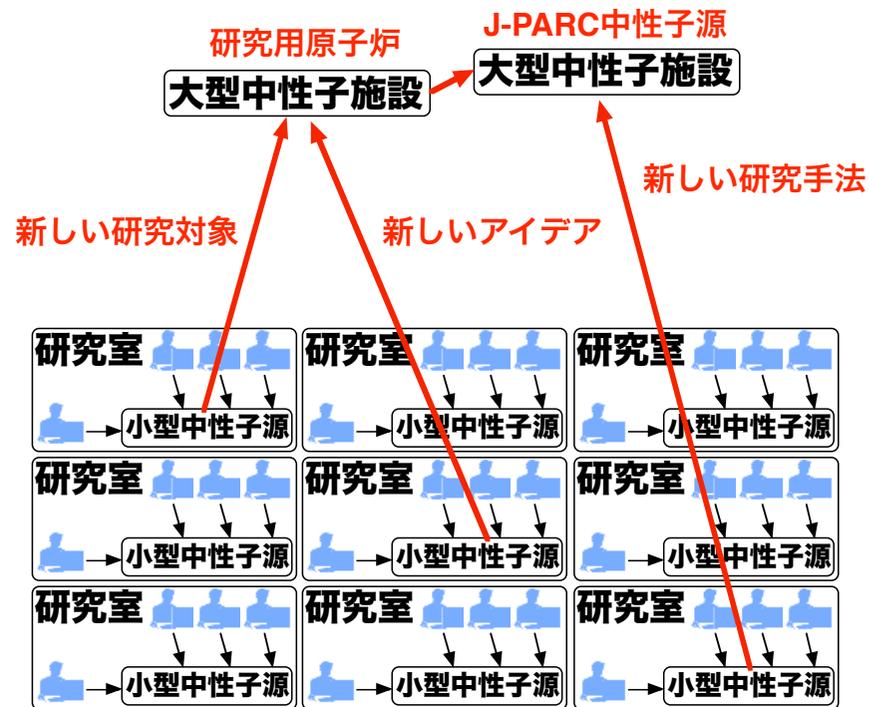
On-site中性子源による裾野の広い研究体制

継続的発展が可能な世界的に新しい研究体制

X線



中性子科学



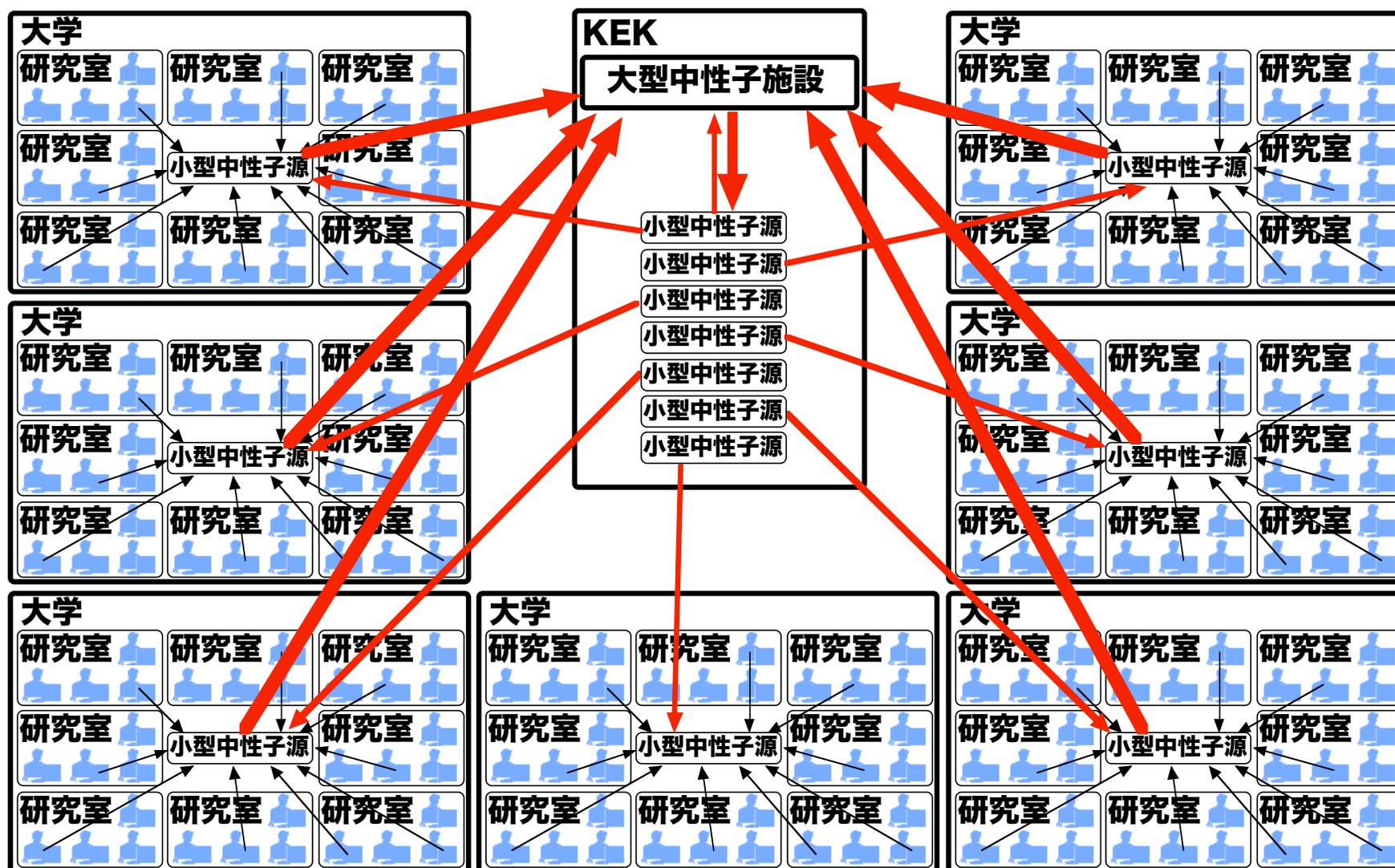
Date(2006/01/26) by(H.M.Shimizu)

Title(低エネルギー陽子・中性子検出器)

Conf(RCNP研究会「マイクロパターン検出器の開発と展望」) At(Mihogaoka)

Class(Presentation) Language(Japanese)

中性子科学の研究体制の例



Date(2006/01/26) by(H.M.Shimizu)

Title(低エネルギー陽子・中性子検出器)

Conf(RCNP研究会「マイクロパターン検出器の開発と展望」) At(Mihogaoka)

Class(Presentation) Language(Japanese)

中性子科学

集光型小角散乱	ナノ-マイクロ構造全般	蛋白高次構造観察
透過型回折撮像	材料工学、特に新物質合成	
集光型中性子スピンエコー	ナノ-マイクロ動的状態観察全般	
中性子光学・基礎物理	中性子実験技術、原子核・素粒子物理学	
集光型中性子回折	材料工学全般	
中性子顕微鏡	ミクロンレベルでの中性子像	
	細胞中のホウ素撮像→中性子捕獲医療におけるDDS	
集光型即発ガンマ線解析	微量元素・同位体分析	
開発研究	光学・検出器	

ビームの随時使用が飛躍的な進歩の可能性をもたらす

