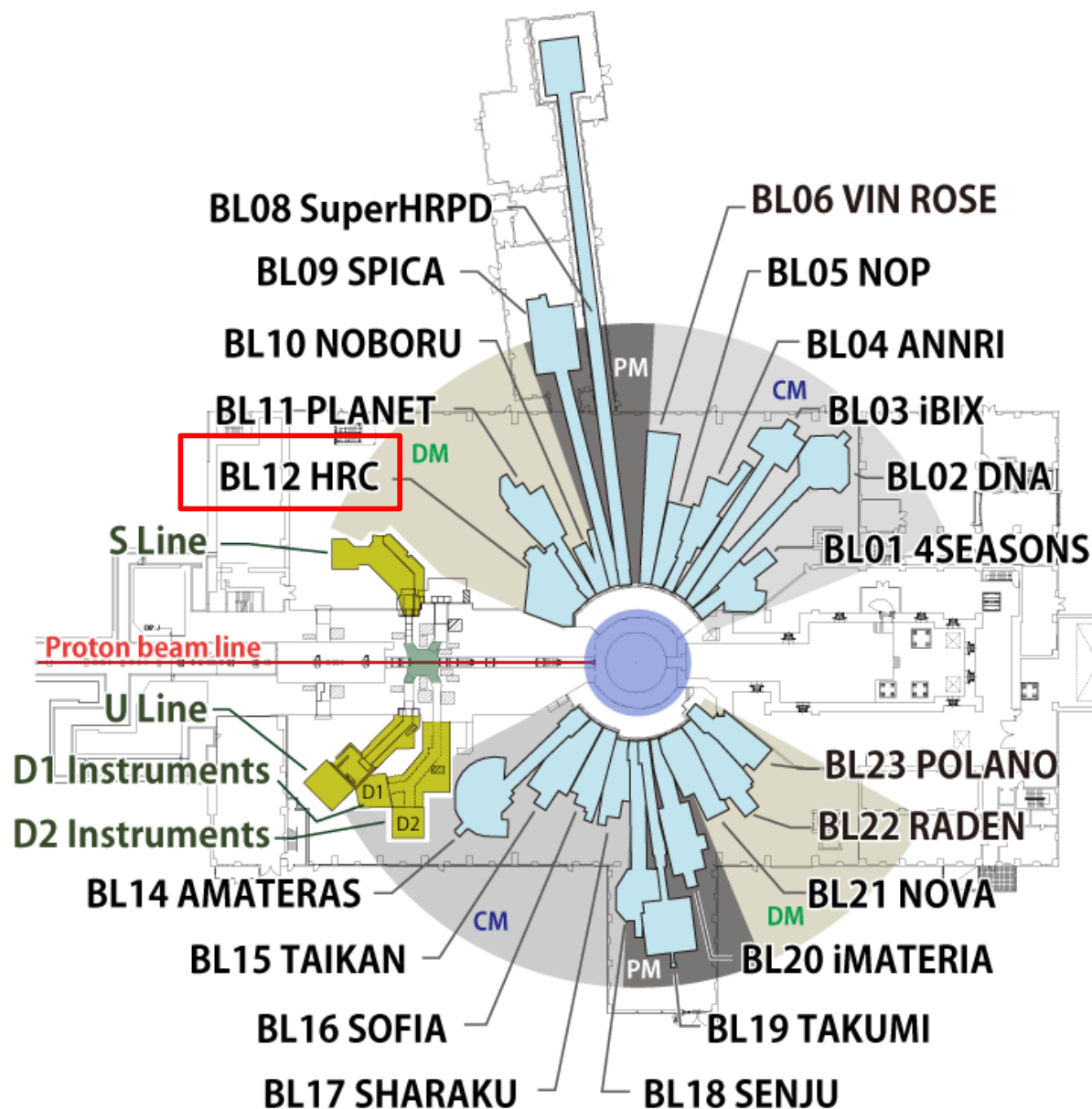


中性子ビームライン

高エネルギー加速器研究機構
物質構造科学研究所

伊藤晋一

物質・生命科学実験施設 (MLF)



BL12にHRCを例にとり、中性子散乱実験による実験研究や装置構成について紹介する

BL12 HRC
高分解能チョッパー分光器
High Resolution Chopper
Spectrometer

中性子ビームライン

高分解能チョッパー分光器HRCによる 中性子非弾性散乱実験

1. 中性子非弾性散乱
2. 高分解能チョッパー分光器HRC
3. HRCの構成機器
4. 中性子ブリルアン散乱
5. おわりに

中性子の性質と中性子散乱実験

・電荷 0

バルクでの散乱、物質内部まで進入
原子番号には依存しない核散乱断面積
→ 結晶構造の研究

・スピン 1/2

核散乱断面積と同程度の磁気散乱断面積
→ 磁気構造の研究

・質量 1.675×10^{-27} kg

波長とエネルギーが固体の格子間隔・素励起と同程度
→ ダイナミクス(運動状態)の研究

$$\lambda = \frac{h}{mv}, \quad E = \frac{1}{2}mv^2$$

$$\lambda = 1.8 \text{ \AA}$$

$$E = 25 \text{ meV}$$

$$v = 2200 \text{ m/s}$$

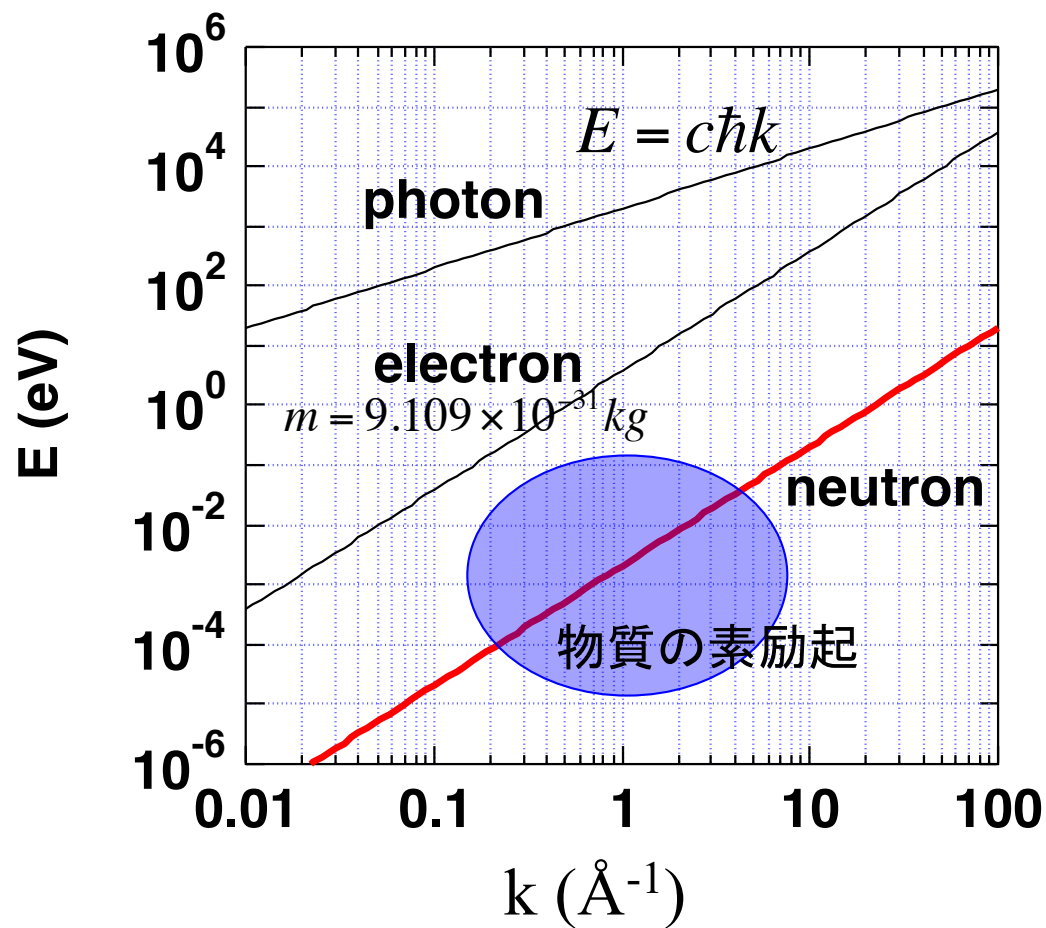
$$1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$$

$$= 0.1 \text{ nm}$$

$$1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

中性子非弾性散乱実験 — 物質の素励起の検出

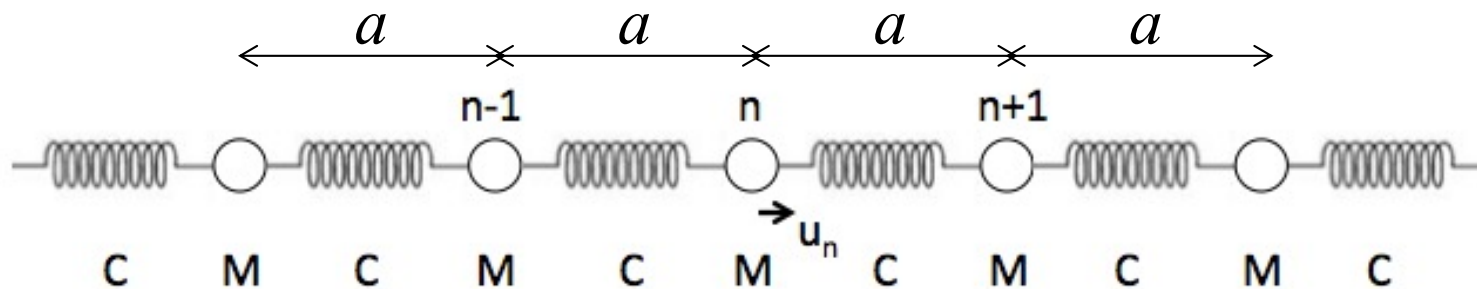
$$\lambda = \frac{h}{mv}, \quad E = \frac{1}{2}mv^2, \quad k = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad E = \frac{\hbar^2 k^2}{2m}, \quad m = 1.675 \times 10^{-27} \text{ kg}$$



| E (meV) | λ (Å) | k (Å ⁻¹) |
|---------|---------------|----------------------|
| 0.1 | 29 | 0.22 |
| 1 | 9 | 0.69 |
| 10 | 2.9 | 2.2 |
| 25* | 1.8 | 3.5 |
| 100 | 0.9 | 6.9 |

* $E = k_B T, T = 290 \text{ K}$

原子の運動状態 - 物質中の波 - 格子振動



運動方程式

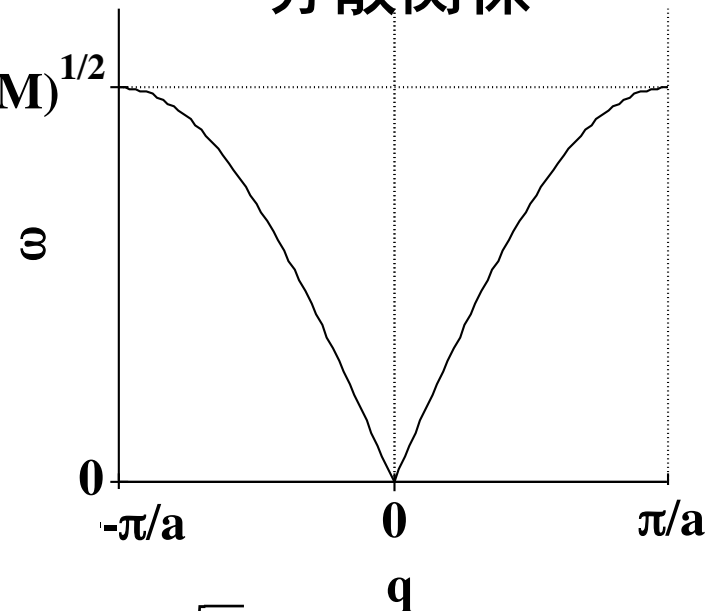
$$M \frac{d^2 u_n}{dt^2} = -C(u_n - u_{n+1}) - C(u_n - u_{n-1})$$

解 $u_n = u \cos(naq - \omega t) \quad (u \neq 0)$

$$\omega = \sqrt{\frac{4C}{M} \left| \sin \frac{aq}{2} \right|} \quad \left(k = \frac{2\pi}{\lambda} \right)$$

q: 波数、 ω : 振動数
qと ω の関係: 分散関係

分散関係

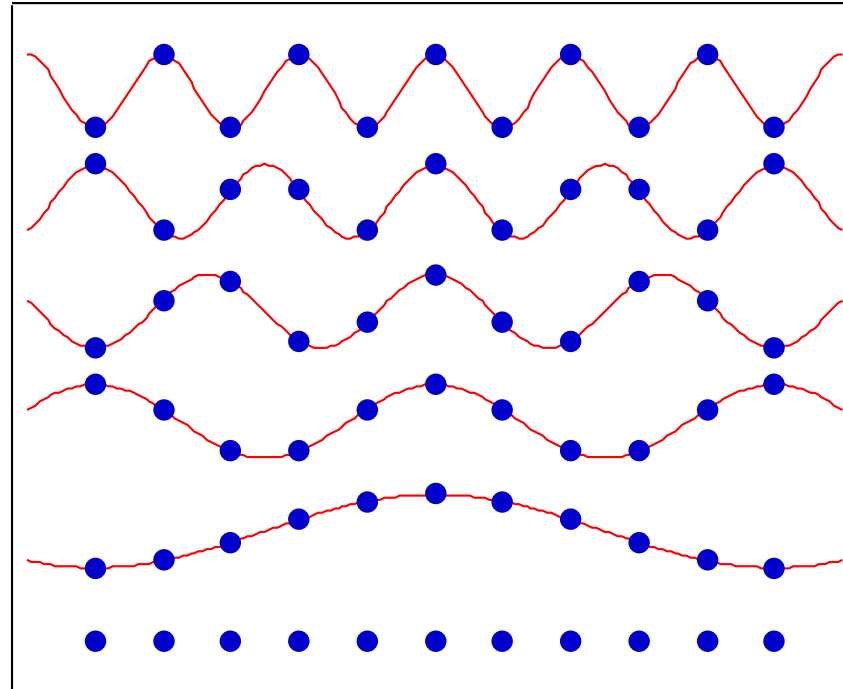
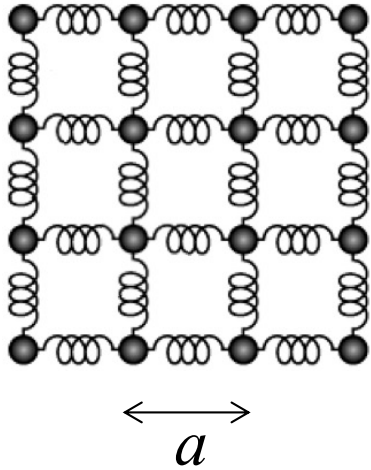


$$\omega = \sqrt{\frac{4C}{M} \left| \sin \frac{aq}{2} \right|} \approx \sqrt{\frac{C}{M}} |qa| = c|q| \quad (|aq| \ll 1)$$

c: 音速

分散関係(波数と振動数の関係)

格子振動



$$\lambda = 2a, \quad q = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{a} \times 0.5$$

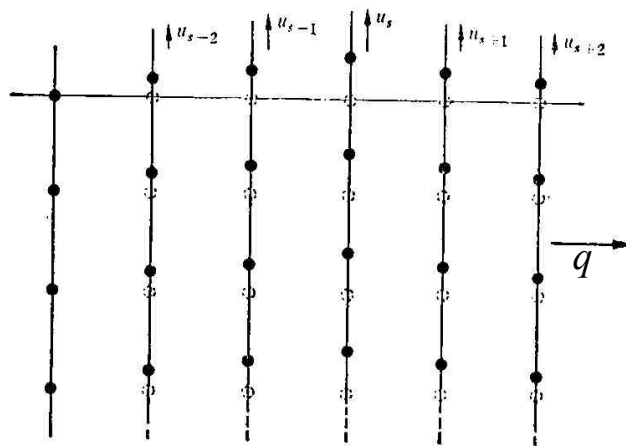
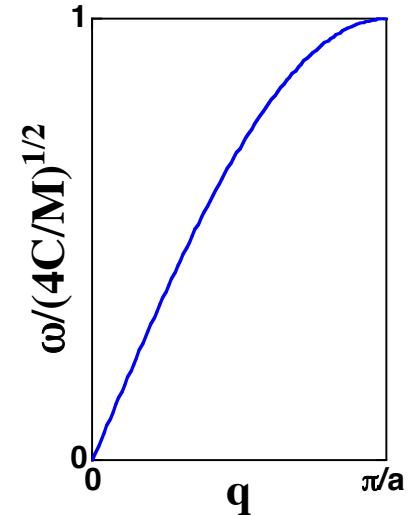
$$\lambda = \frac{10}{4}a, \quad q = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{a} \times 0.4$$

$$\lambda = \frac{10}{3}a, \quad q = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{a} \times 0.3$$

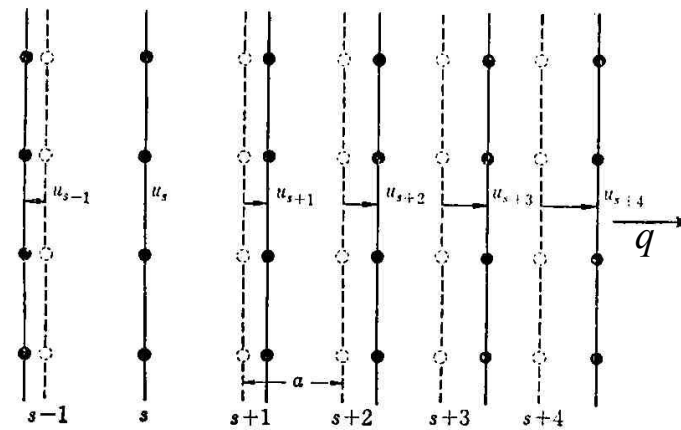
$$\lambda = 5a, \quad q = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{a} \times 0.2$$

$$\lambda = 10a, \quad q = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{a} \times 0.1$$

分散関係

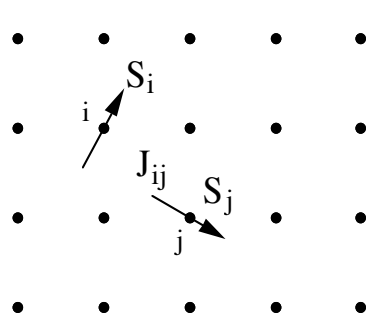


横波



縦波

原子の運動状態 - 物質中の波 - スピン波

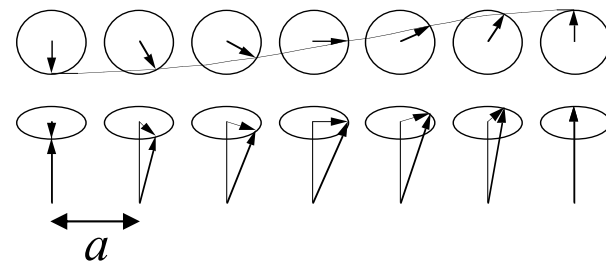


交換相互作用

$$H = - \sum_{\langle i,j \rangle} 2J_{ij} \vec{S}_i \vec{S}_j = -2J \sum_i \vec{S}_i \vec{S}_{i+1}$$

J_{ij} : exchange constant

運動方程式 $i\hbar \frac{d\vec{S}_i}{dt} = [\vec{S}_i, H]$



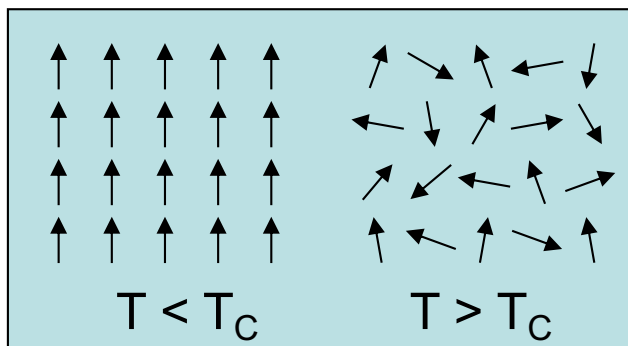
強磁性体

$J > 0$

T_C : キュリー温度

(強磁性)

(常磁性)



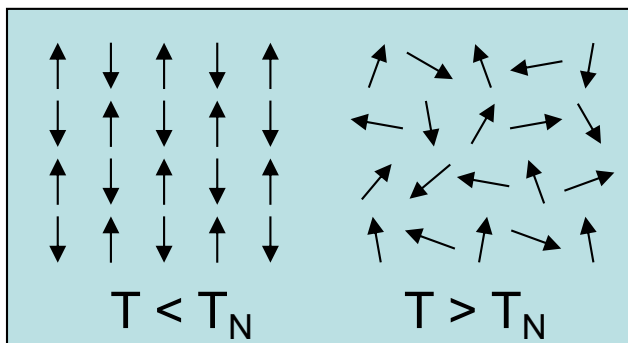
反強磁性体

$J < 0$

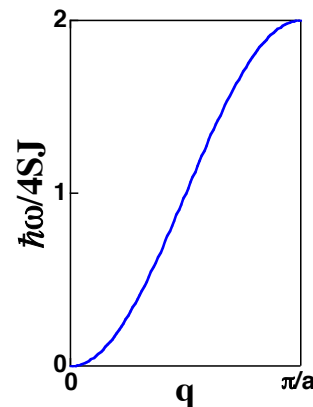
T_N : ネール温度

(反強磁性)

(常磁性)

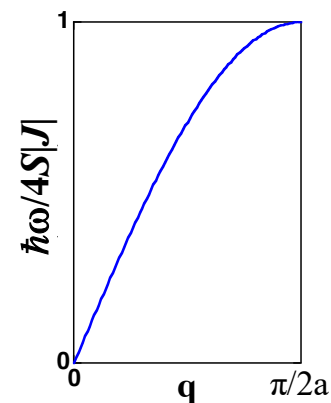


分散関係



$$\hbar\omega = 4SJ(1 - \cos aq)$$

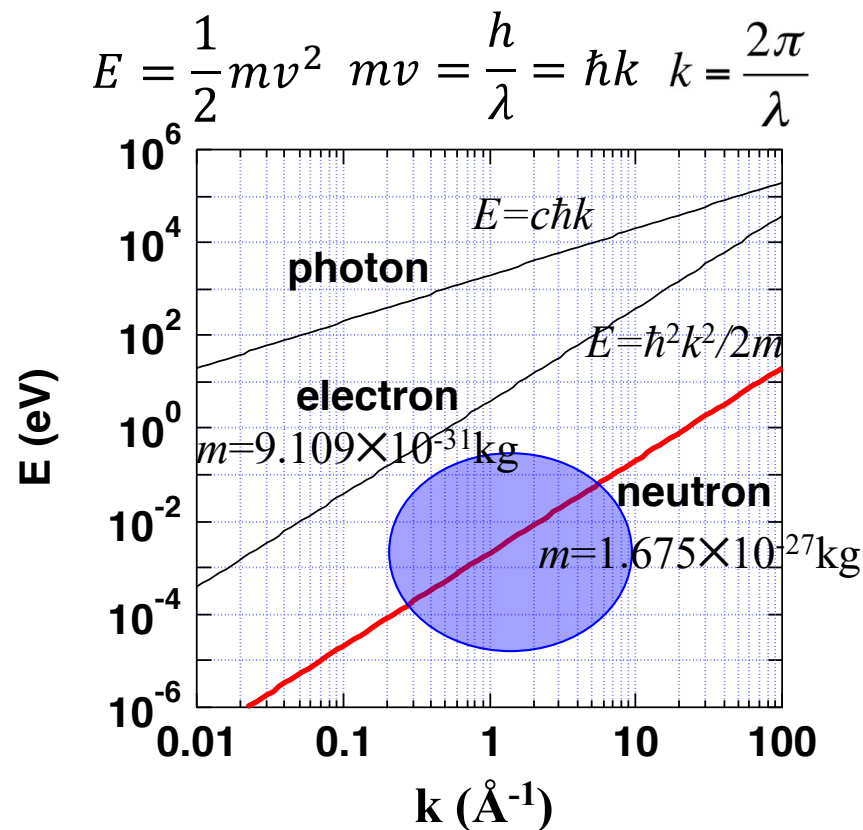
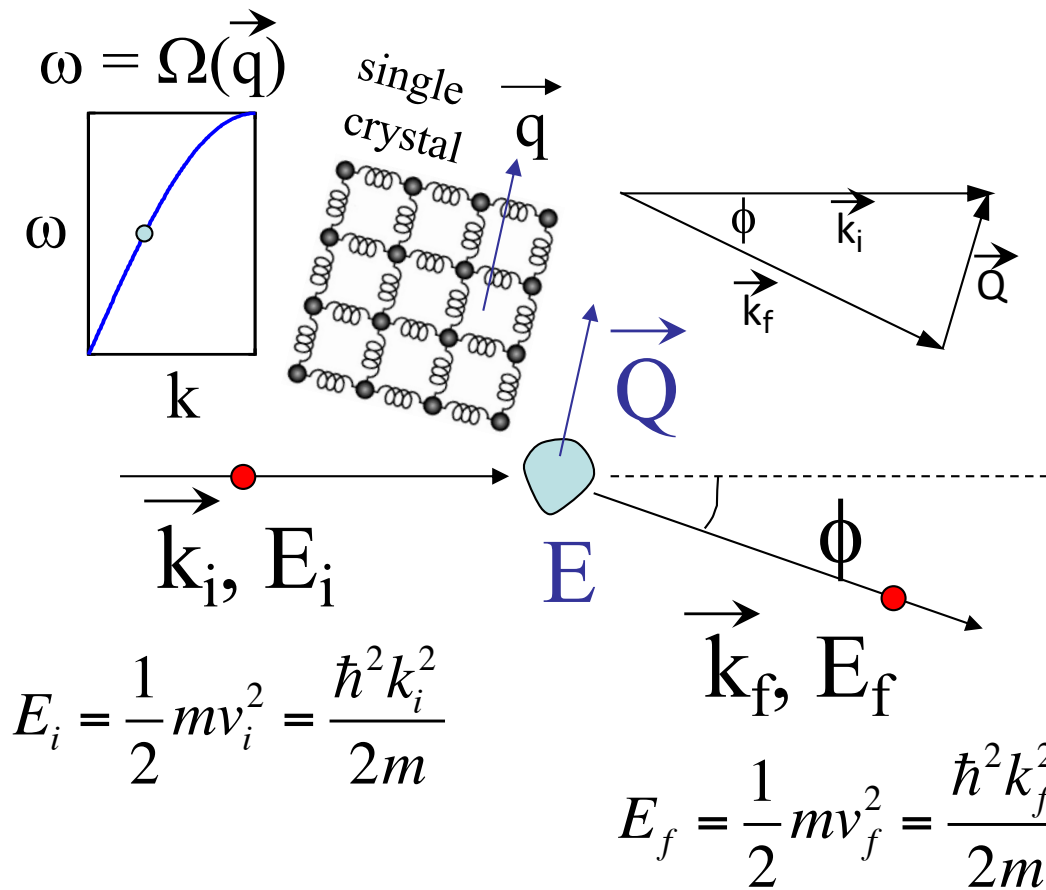
$$\sim q^2 \quad (aq \ll 1)$$



$$\hbar\omega = 4S|J||\sin aq|$$

$$\sim q \quad (aq \ll 1)$$

中性子非弾性散乱



$E = E_i - E_f$ エネルギー遷移：素励起の振動数

$\vec{Q} = \vec{k}_i - \vec{k}_f$ 散乱ベクトル：素励起の波動ベクトル

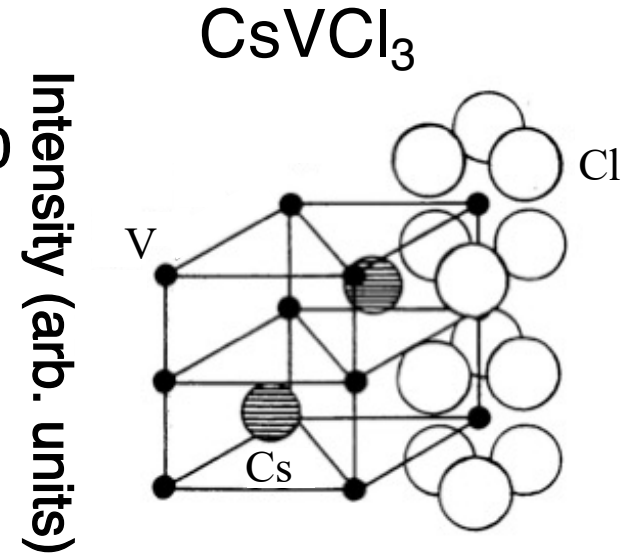
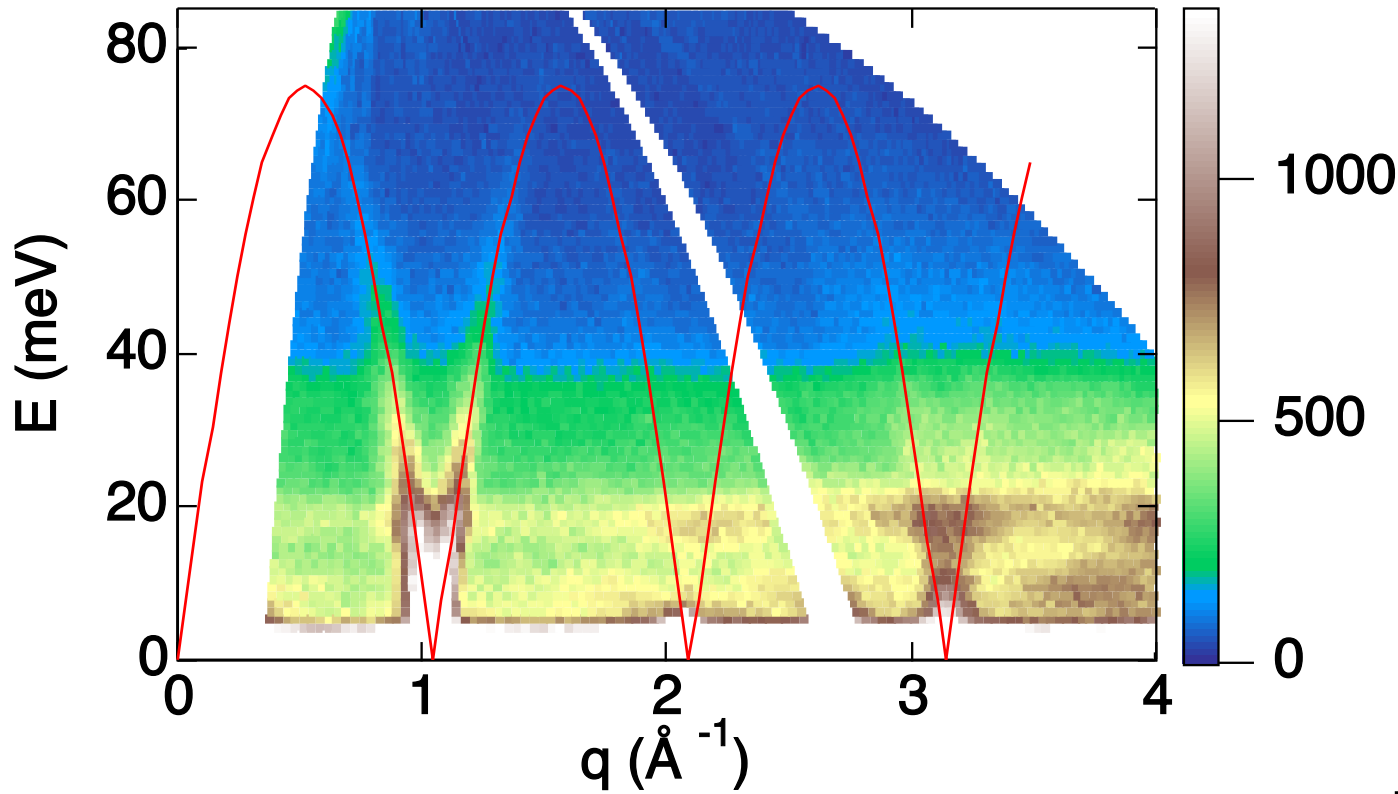
$$S(\vec{Q}, E) \sim \delta(E - \hbar\Omega(\vec{Q}))$$

中性子は右の条件を満たすとき散乱される

$$\begin{cases} E = \hbar\omega \\ \vec{Q} = \vec{q} \end{cases}$$

反強磁性体CsVCl₃の磁気励起

S. Itoh et al., Phys. Rev. Lett. 74 (1995) 2375, J. Phys. Soc. Jpn. 81 (2012) 084706.



量子効果

$$H = -2J \sum_k \vec{S}_k \vec{S}_{k+1}$$

$$\hbar\omega = 4S|J| |\sin aq|$$

$$4S|J| = 75.0 \text{ meV}$$

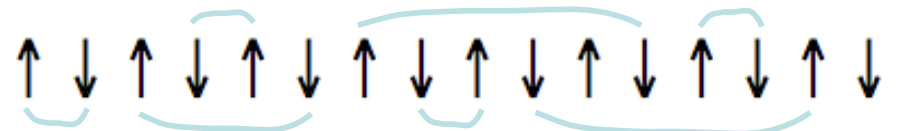
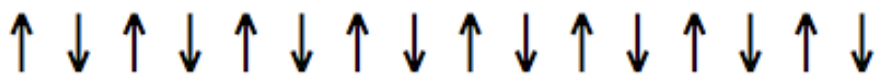
$$S = 3/2 \text{ for } V^{2+}$$

$$|J| = 12.5 \text{ meV}$$

$$4RS|J| = 75.0 \text{ meV}$$

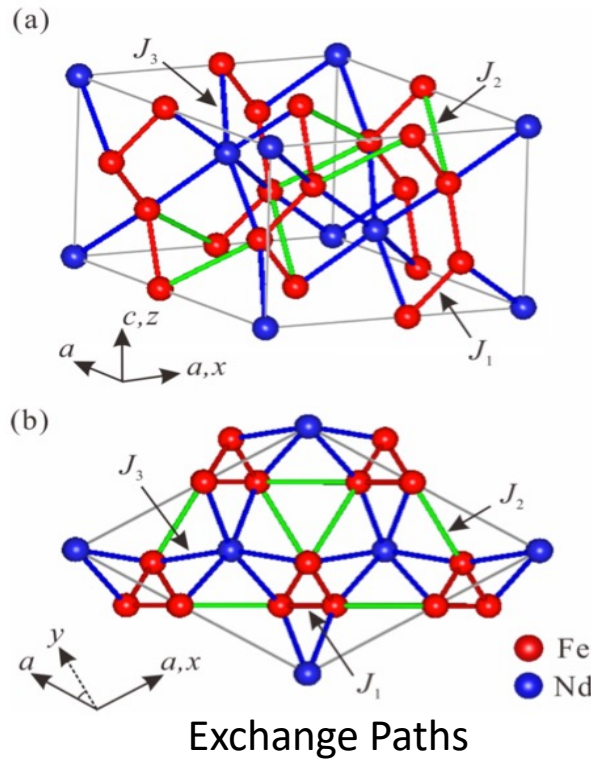
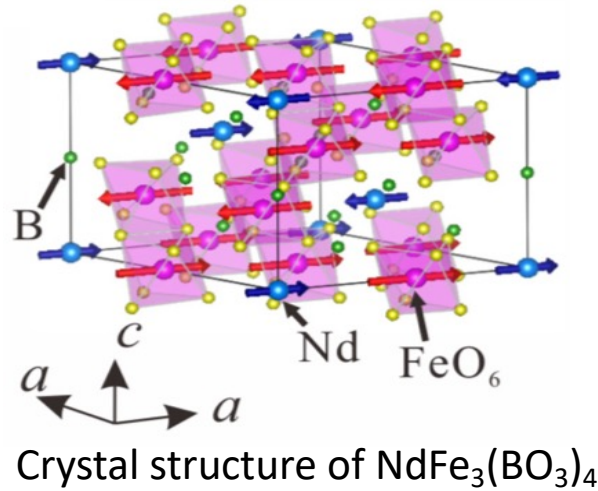
$$|J| = 9.9 \text{ meV (磁化測定)}$$

$$R = 1.26 \pm 0.2$$



マルチフェロイック物質 $\text{NdFe}_3(\text{BO}_3)_4$

S. Hayashida et al., Phys. Rev. B 92 (2015) 054402.

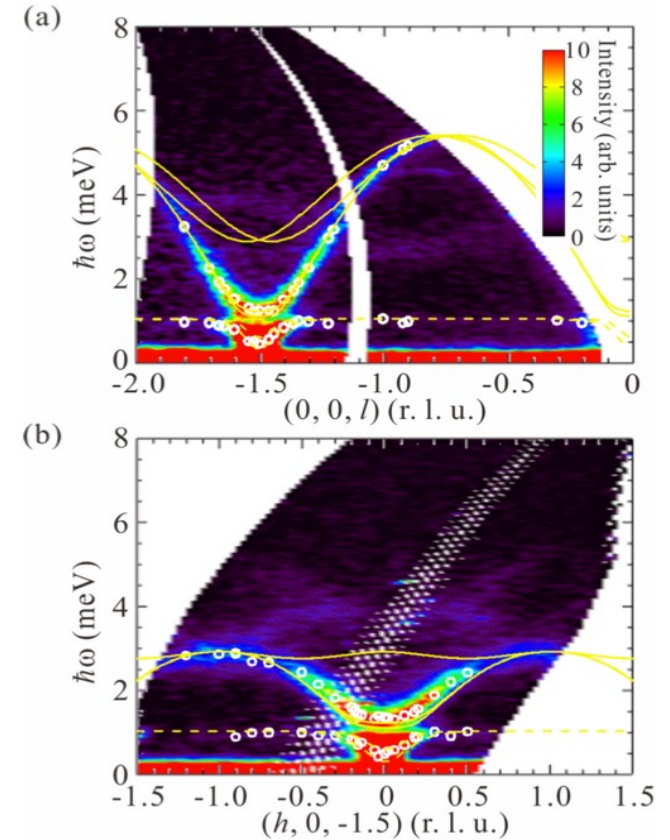


$$H = -\sum_{nn} J_1 \mathbf{S}_i \cdot \mathbf{S}_j - \sum_{nnn} J_2 \mathbf{S}_i \cdot \mathbf{S}_j - \sum_{nn} J_3 \mathbf{S}_i \cdot \mathbf{J}_k - \sum_k D (J_k^x)^2$$

$$\text{Fe: } \mathbf{S}_i = (S_i^x, S_i^y, S_i^z)$$

$$\text{Nd: } \mathbf{J}_i = (J_i^x, J_i^y, J_i^z)$$

| J_1 (meV) | J_2 (meV) | J_3 (μeV) | D (μeV) (fixed) | χ^2 |
|-------------|-------------|--------------------------|--------------------------------|----------|
| -0.482 | -0.054 | 7.9 | 23.5 | 0.993 |



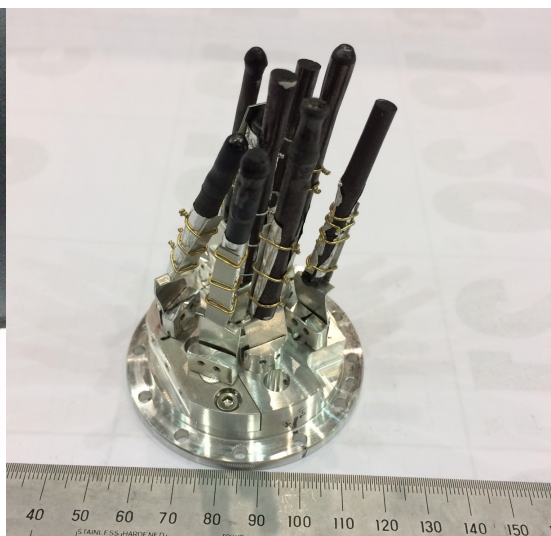
マルチフェロイック物質は磁気秩序と強誘電性を同時に示すものである。 Fe^{3+} の磁気秩序化により結晶構造が低対称化し、電気分極を発生させる。

Nd^{3+} は、結晶場(D)で決まる磁気異方性を持ち、 Fe^{3+} と Nd^{3+} の相互作用(J_3)をとおして、 Fe^{3+} の秩序化を制御し、マルチフェロイック特性を発現することを表わしている。

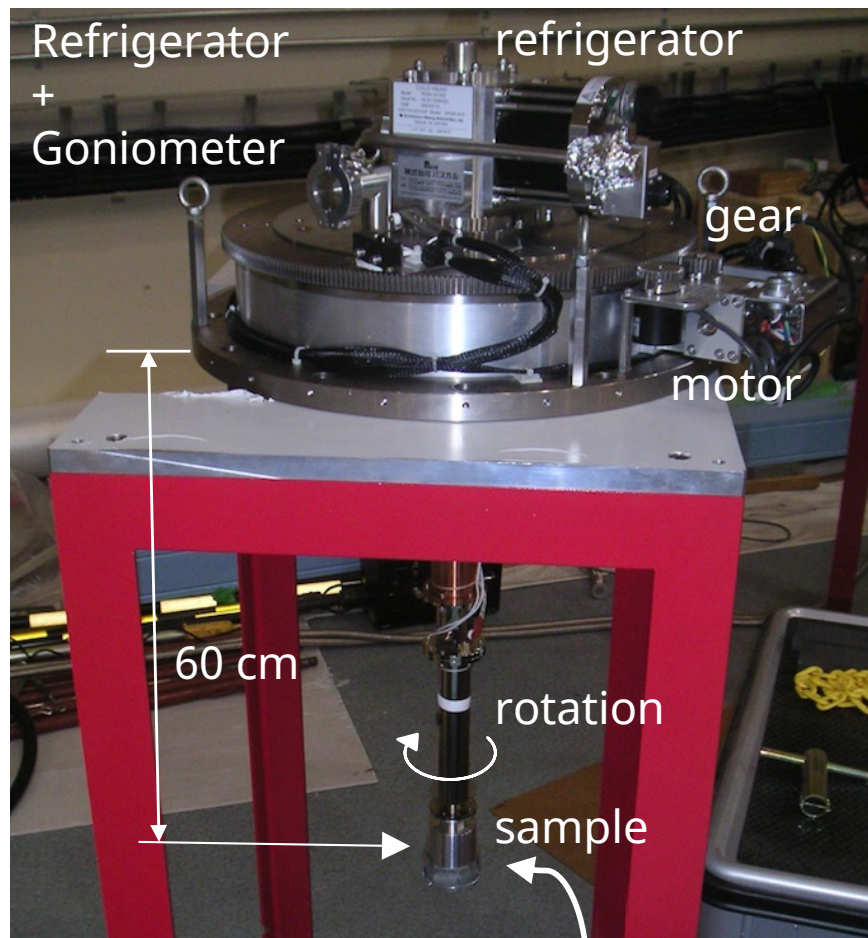
試料:大型単結晶



Fe_{0.7}Mn_{0.3} 40g
Aligned
crystal

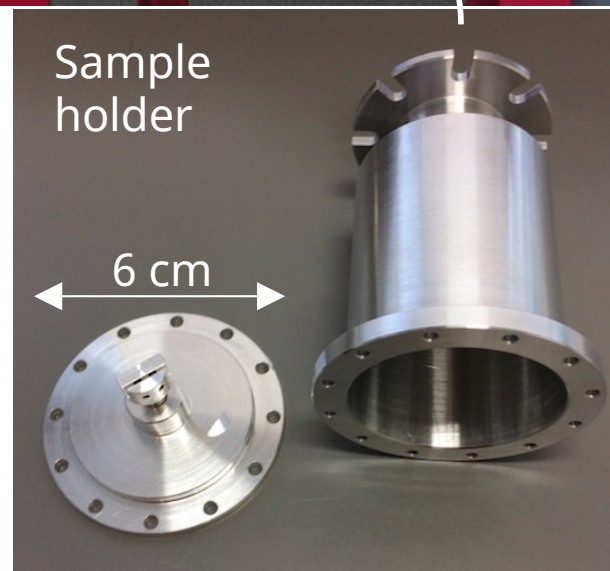


Nd₂Mo₂O₇ 48g
Co-aligned
crystals

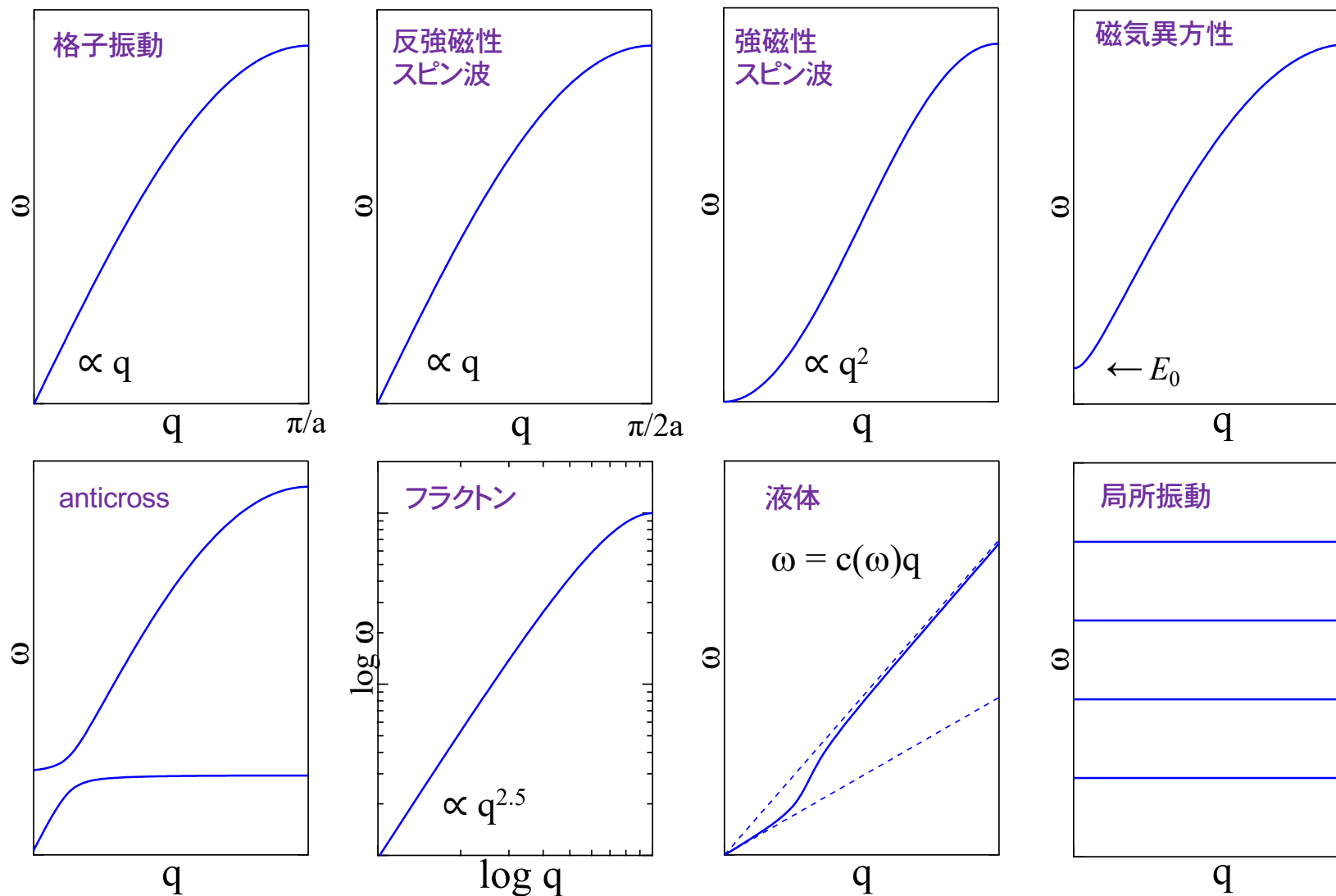


Sample
holder

6 cm



多彩な分散関係



分散関係は原子間相互作用で決まる
原子間相互作用により物性が発現する

中性子ビームライン

高分解能チョッパー分光器HRCによる 中性子非弾性散乱実験

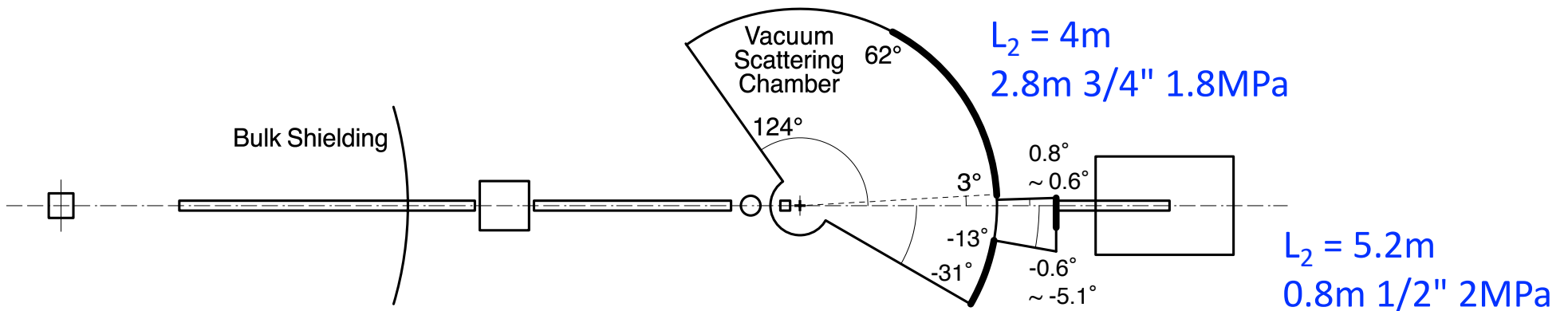
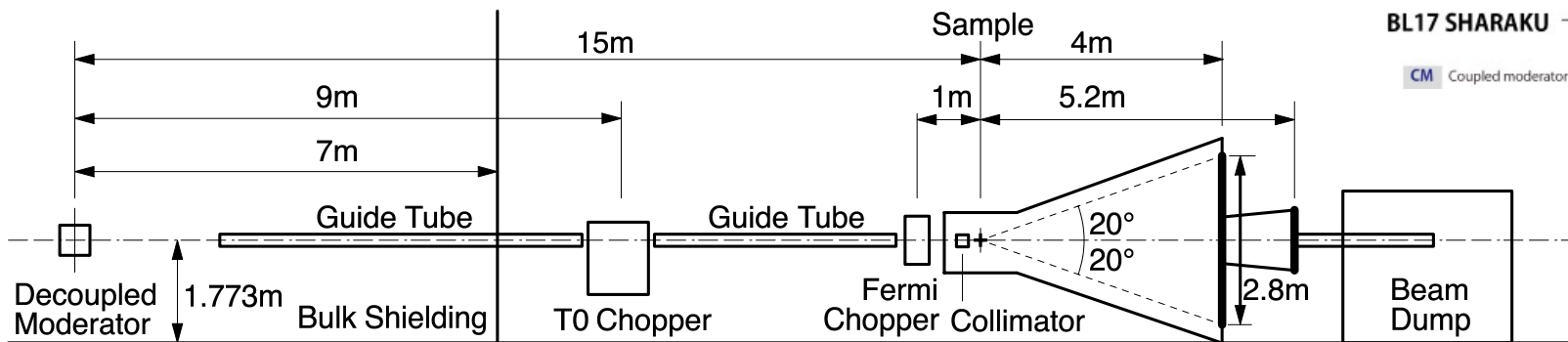
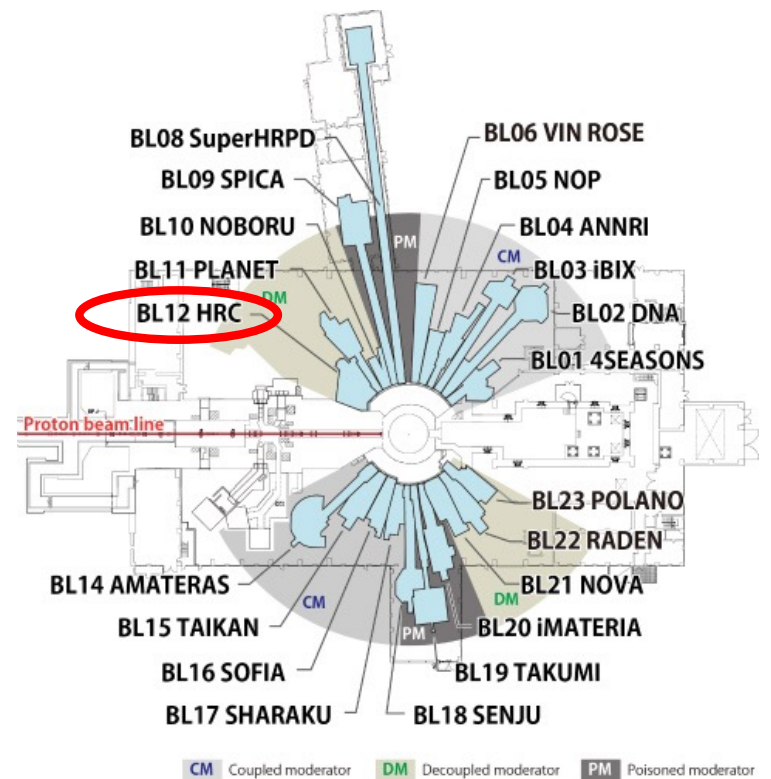
1. 中性子非弾性散乱
2. 高分解能チョッパー分光器HRC
3. HRCの構成機器
4. 中性子ブリルアン散乱
5. おわりに

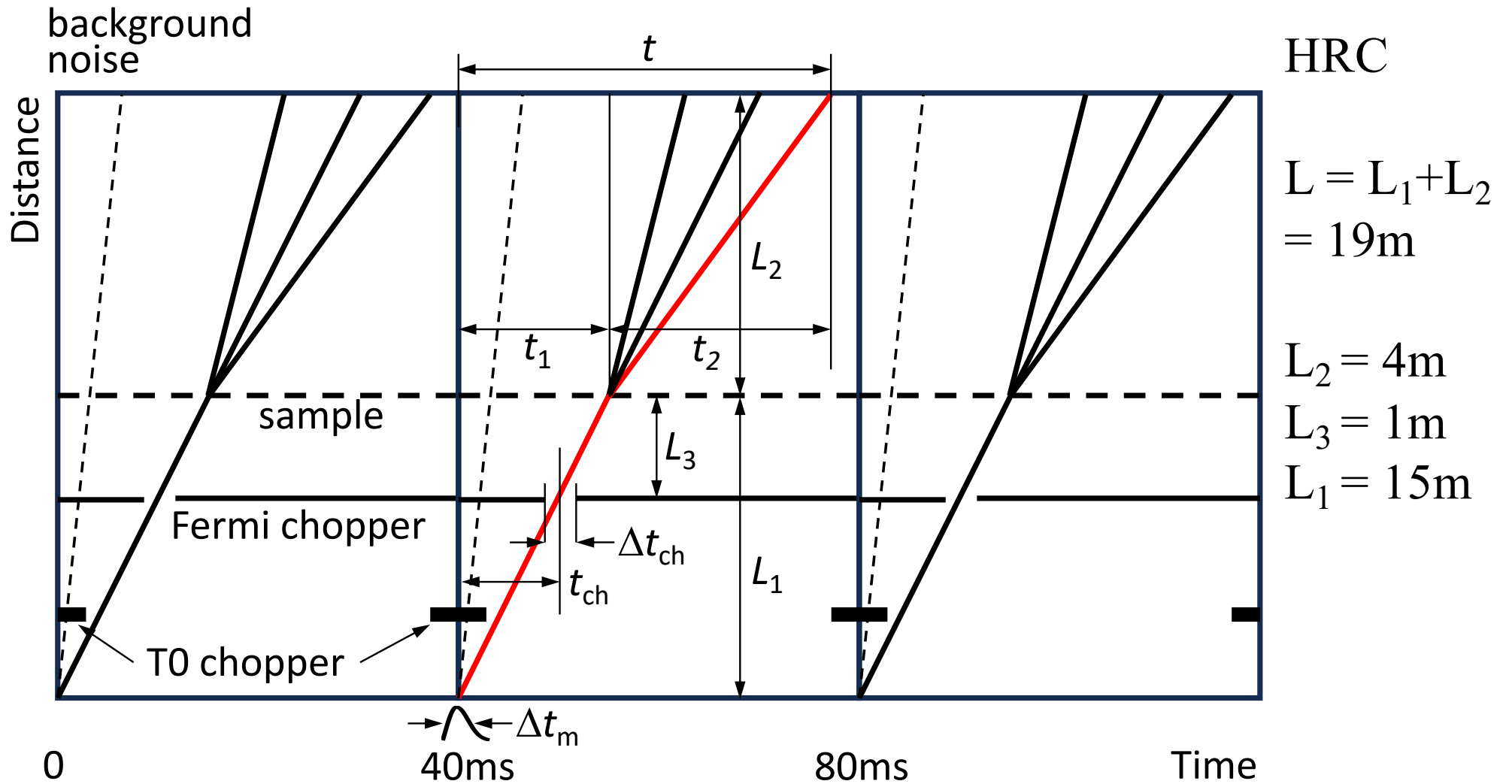
高分解能チョッパー分光器

High Resolution Chopper Spectrometer (HRC)

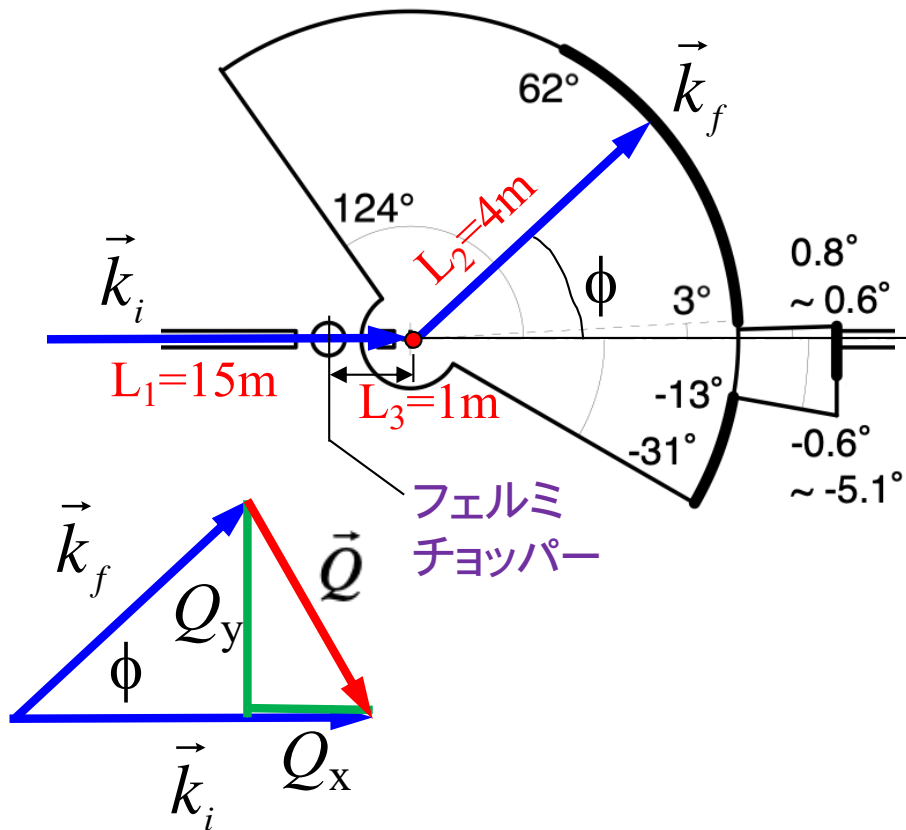
物質のダイナミクス(素励起)を高分解能かつ広いエネルギー運動量空間で探査する中性子非弾性散乱装置

- ・広いエネルギー運動量空間 $E_i = 3 \text{ meV} - 2 \text{ eV}$
- ・高いエネルギー分解能 $\Delta E/E_i = 2 - 5\%$
- ・独特な検出器配置





| | | | |
|-------------------------|---------------------------|--------------------------------|---------------------------|
| $E_i = 1 \text{ eV}$ | $v_i = 13.8 \text{ km/s}$ | $\Delta t_m = 2.5 \mu\text{s}$ | $L/v_i = 1.37 \text{ ms}$ |
| $E_i = 100 \text{ meV}$ | $v_i = 4.37 \text{ km/s}$ | $\Delta t_m = 7.9 \mu\text{s}$ | $L/v_i = 4.34 \text{ ms}$ |
| $E_i = 10 \text{ meV}$ | $v_i = 1.38 \text{ km/s}$ | $\Delta t_m = 25 \mu\text{s}$ | $L/v_i = 13.7 \text{ ms}$ |



$$E = E_i - E_f \quad \text{エネルギー遷移}$$

$$\vec{Q} = \vec{k}_i - \vec{k}_f \quad \text{散乱ベクトル}$$

$$E_i = mv_i^2/2 = \hbar^2 k_i^2/2m \quad \text{入射中性子}$$

$$E_f = mv_f^2/2 = \hbar^2 k_f^2/2m \quad \text{散乱中性子}$$

$$\hbar k_i = mv_i$$

$$\hbar k_f = mv_f$$

$$t = t_1 + t_2$$

$$v_i = L_1/t_1 = (L_1 - L_3)/t_{ch}$$

$$v_f = L_2/t_2$$

$$Q_x = k_i - k_f \cos \phi$$

$$Q_y = k_f \sin \phi$$

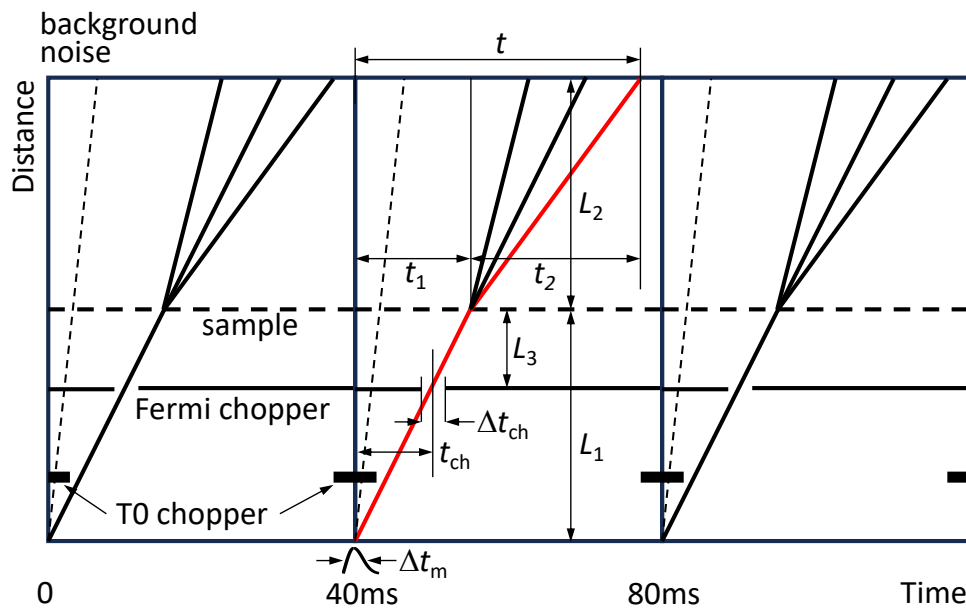
$$Q^2 = k_i^2 + k_f^2 - 2k_i k_f \cos \phi$$

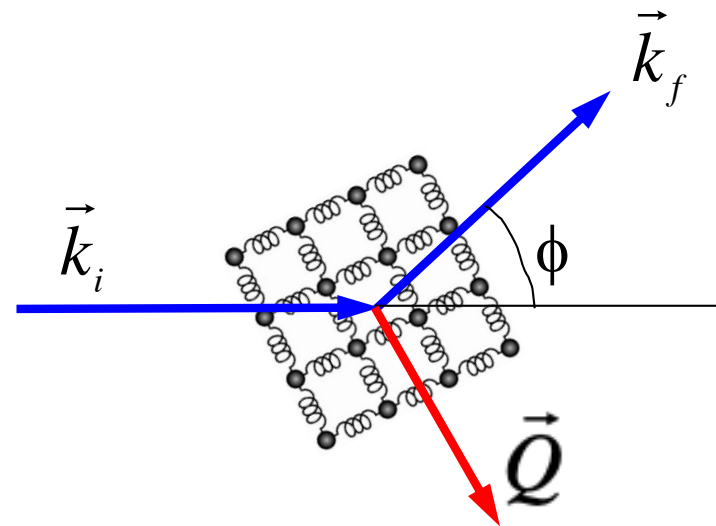
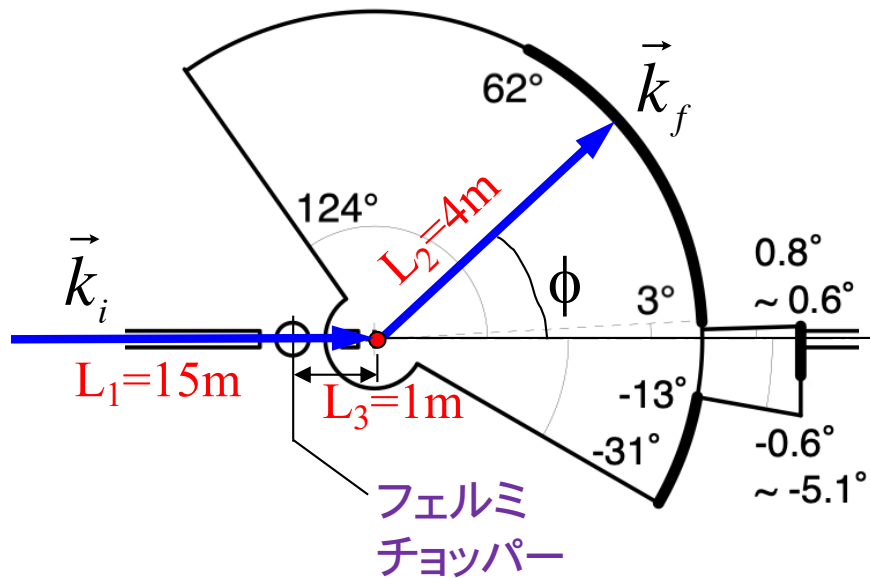
$$(\phi_v = 0, Q_z = 0)$$

実験条件 $E_i(t_{ch})$

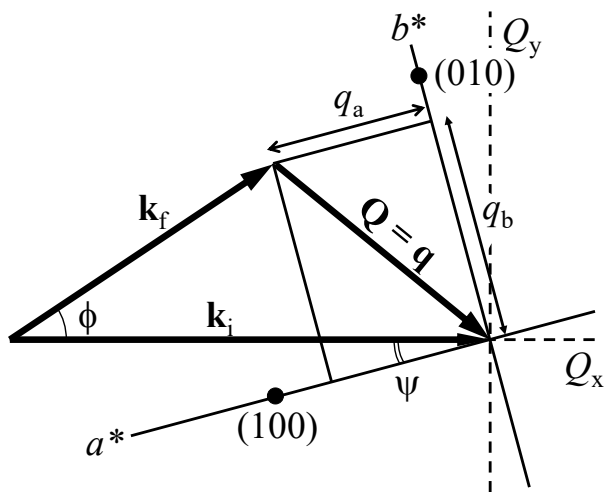
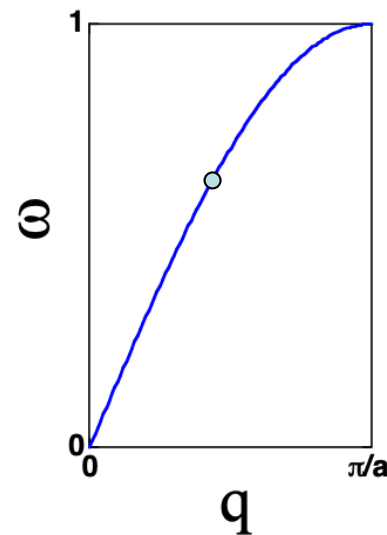
飛行時間 t (測定)

検出位置 ϕ, ϕ_v (測定)





分散関係



$$q_a = k_i \cos \psi - k_f \cos (\phi - \psi)$$

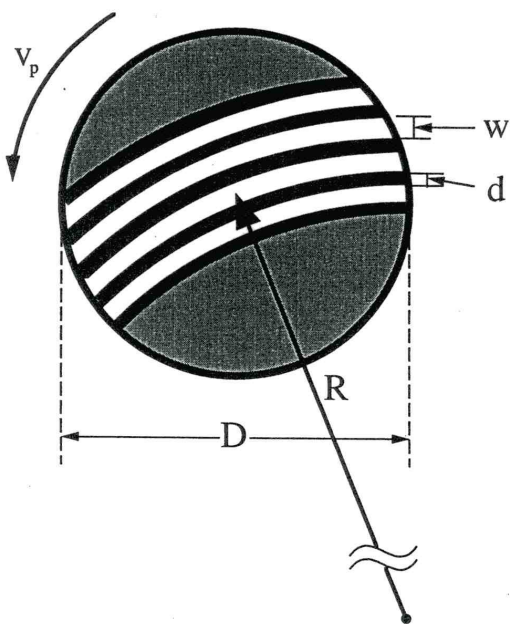
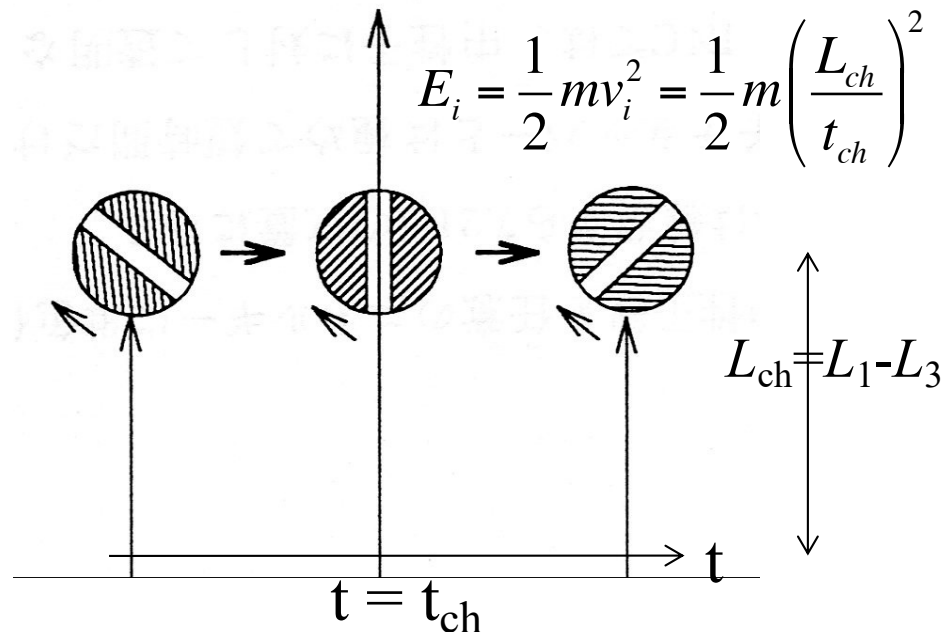
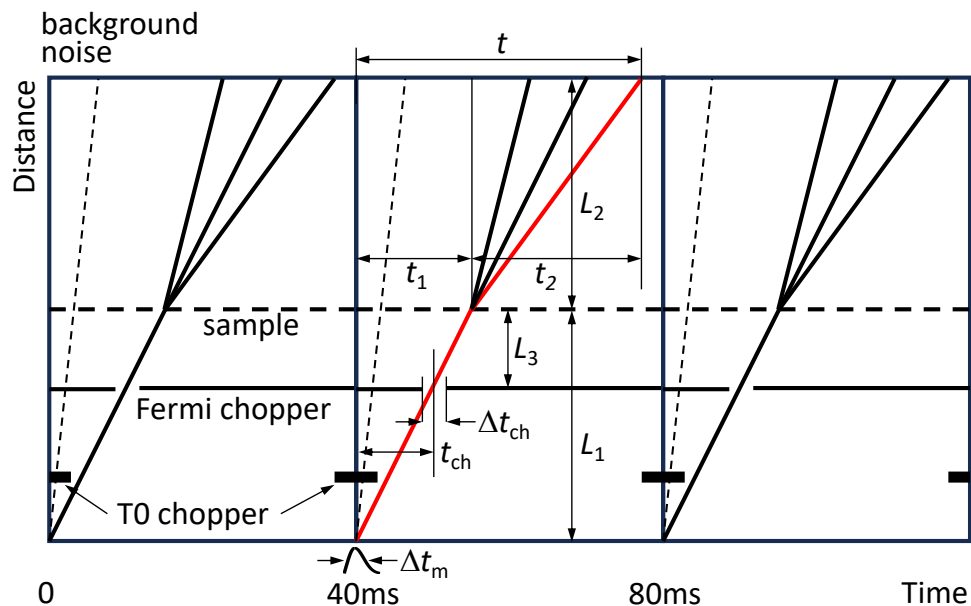
$$q_b = k_i \sin \psi + k_f \sin (\phi - \psi)$$

中性子は右の条件を満たすときに散乱される

$$\begin{cases} E = \hbar\omega \\ \vec{Q} = \vec{q} \end{cases}$$

フェルミチョッパー

入射中性子エネルギー E_i とエネルギー分解能 ΔE を決定



$$\Delta t_m (\mu s) = \frac{2.5}{\sqrt{E_i (eV)}}$$

$$\Delta t_{ch} = \frac{w}{2\pi D f}$$

$$w = 1 \text{ mm}$$

$$D = 100 \text{ mm}$$

$$f = 600 \text{ Hz}$$

$$\Delta t_{ch} = 2.6 \mu s$$

$(E_i = 1 \text{ eV})$

$$\frac{\Delta E}{E_i} = \left[\left(\frac{2\Delta t_m}{t_{ch}} \left(1 + \frac{L_3}{L_2} \right) \right)^2 + \left(\frac{2\Delta t_{ch}}{t_{ch}} \left(1 + \frac{L_1}{L_2} \right) \right)^2 \right]^{1/2}$$

$$= 2.5\% \text{ for } \Delta t_{ch} = \Delta t_m \text{ (HRC)}$$

装置性能の実現するためには、 Δt_{ch} の30%以下の精度で中性子発生タイミングに同期制御する必要があります。 $\Delta t_{ch} = 1 \mu s$ をめざす。

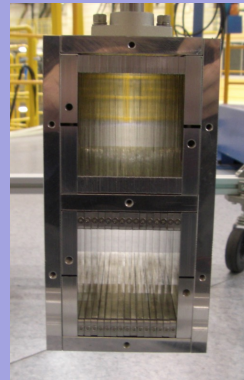
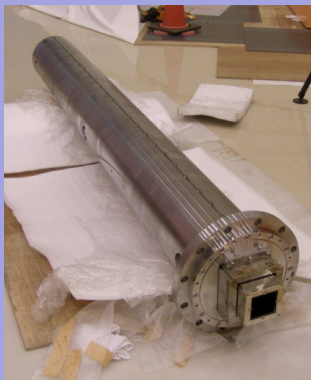
中性子ビームライン

高分解能チョッパー分光器HRCによる 中性子非弾性散乱実験

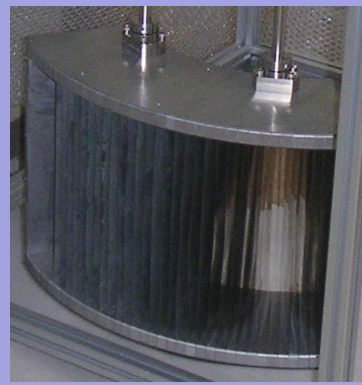
1. 中性子非弾性散乱
2. 高分解能チョッパー分光器HRC
3. HRCの構成機器
4. 中性子ブリルアン散乱
5. おわりに

HRCの 構成機器

ガイド管



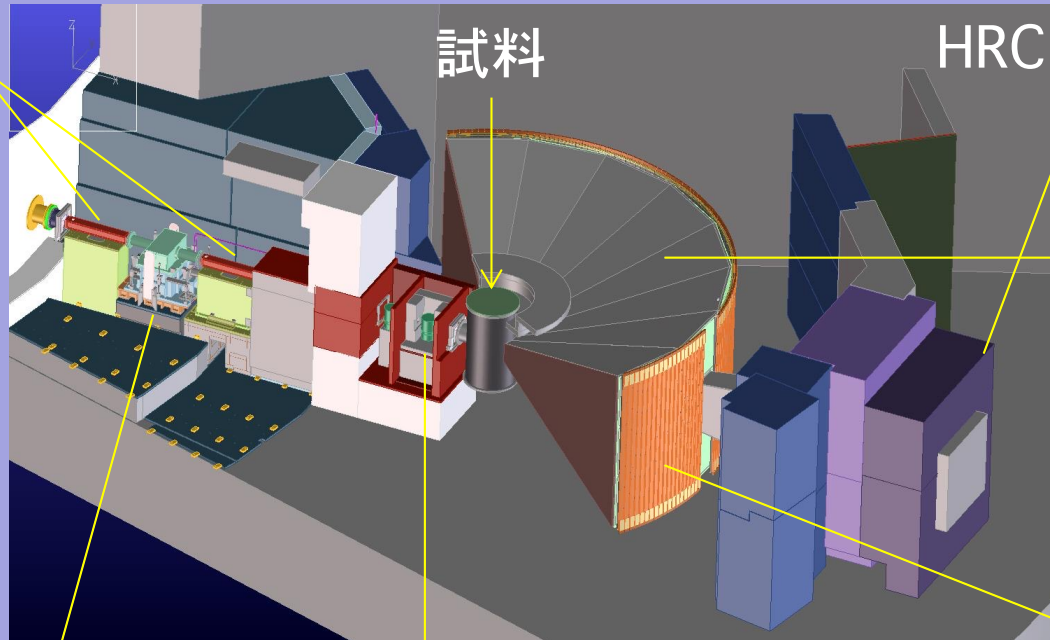
入射コリメーター



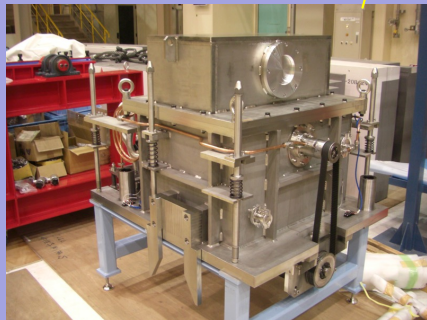
オシレーティング
コリメーター



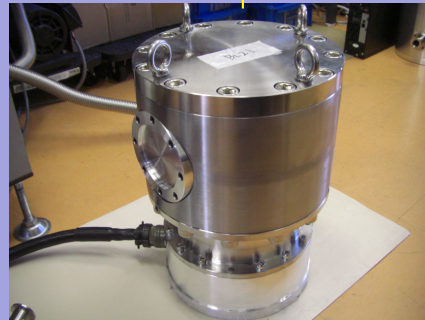
ビームダンプ・キャビン・デッキ



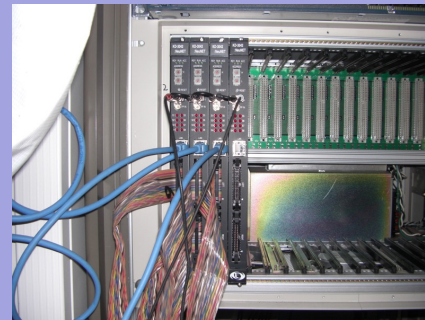
分光器遮蔽体・真空散乱槽



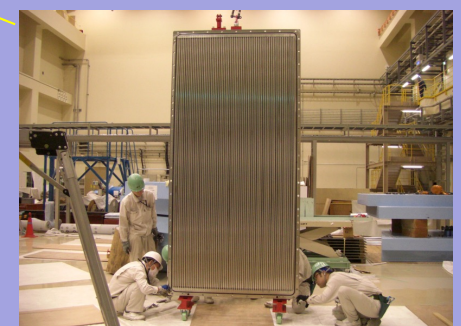
T0チョッパー



フェルミチョッパー

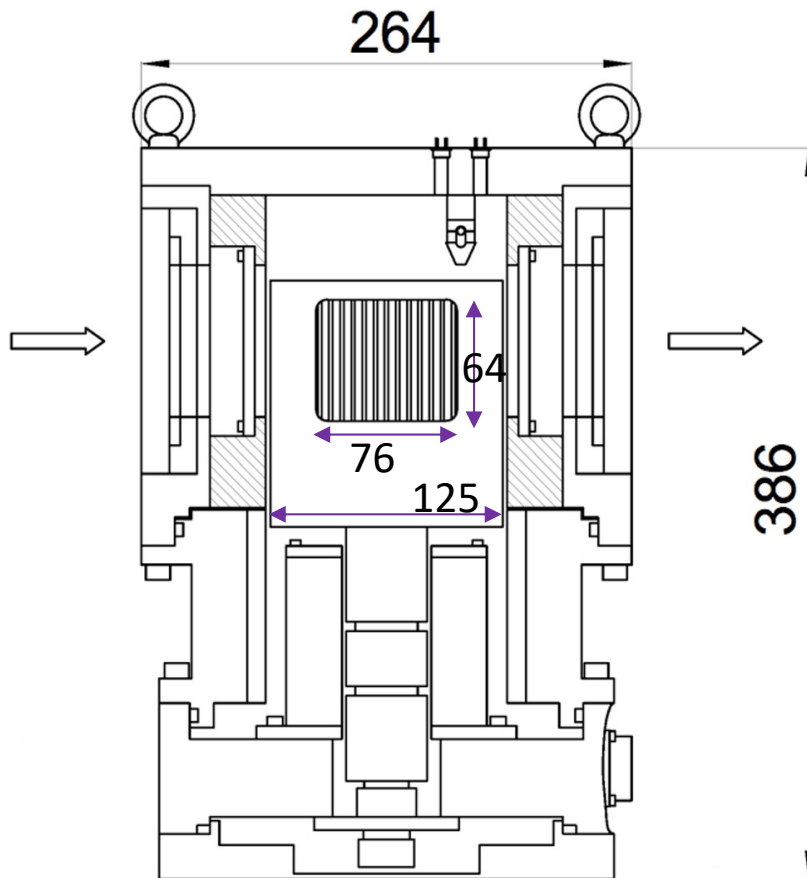
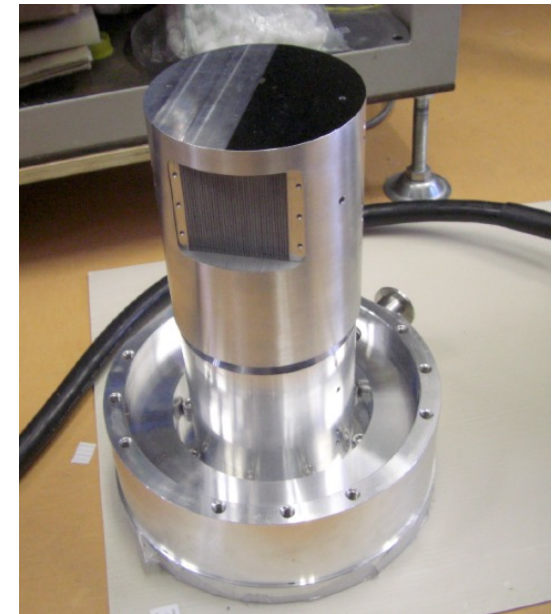
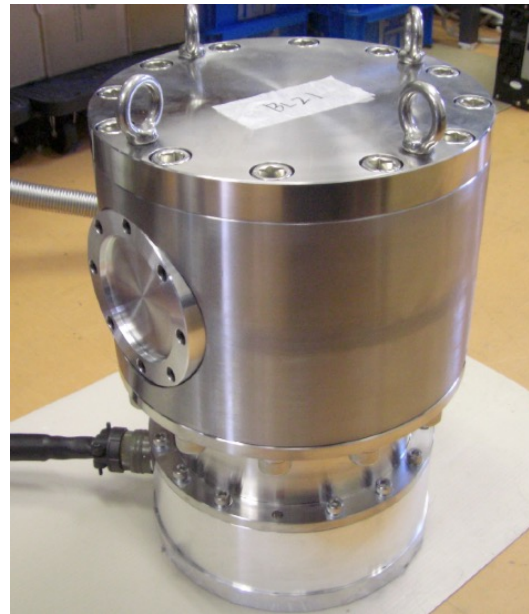
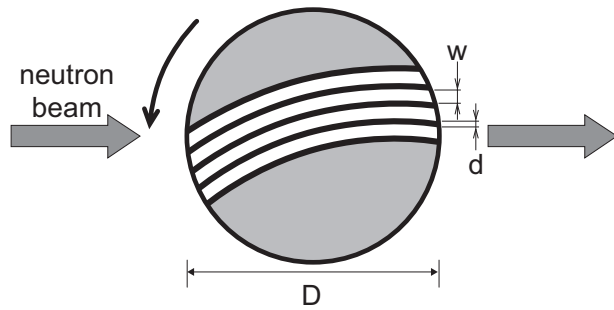


エレクトロニクス

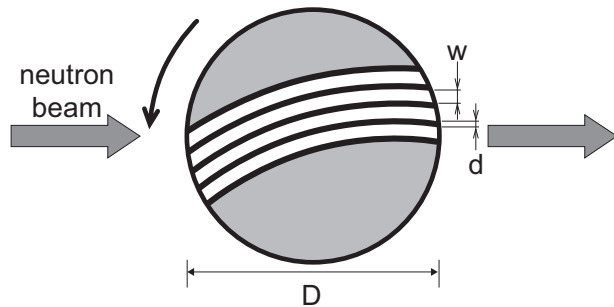


検出器

フェルミチョッパー



フェルミチョッパー



$$w = 2.4 \text{ mm}, D = 100 \text{ mm}, f = 600 \text{ Hz}$$

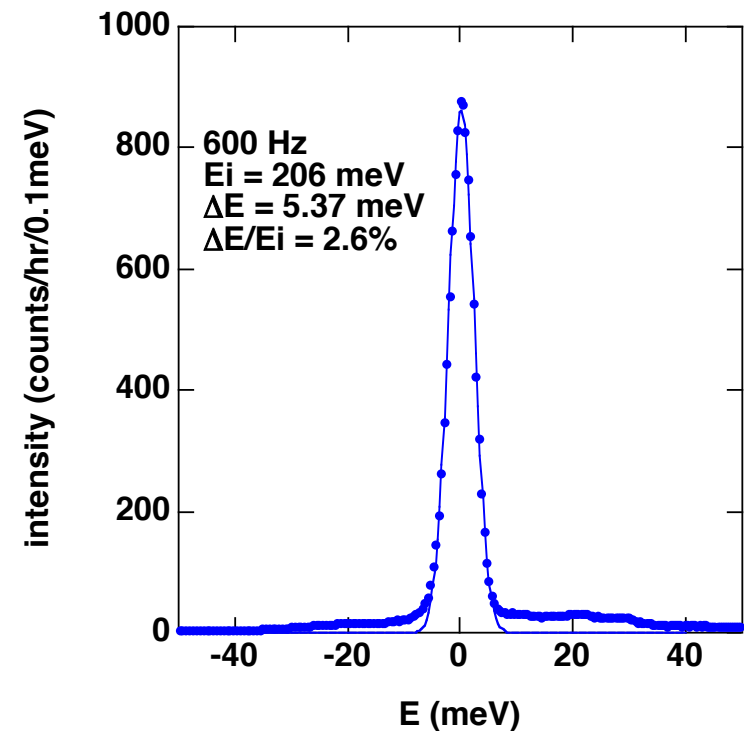
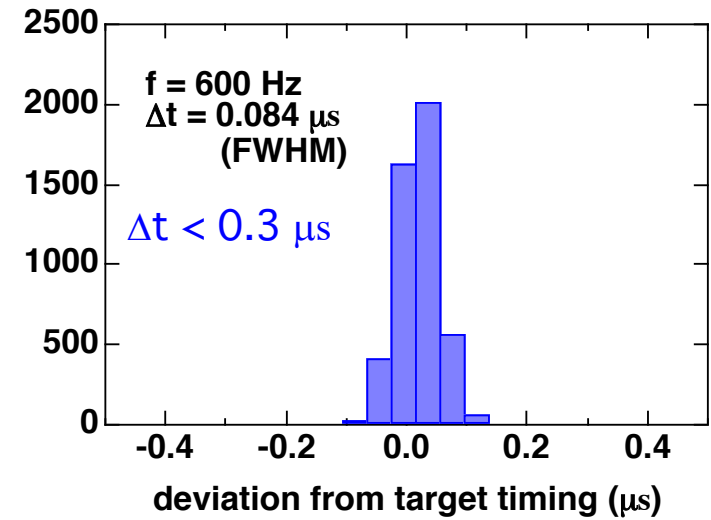
$$\Delta t_{ch} = \frac{w}{2\pi Df} = 6.4 \mu\text{s}$$

$$E_i = 200 \text{ meV}$$

$$\Delta t_m (\mu\text{s}) = \frac{2.5}{\sqrt{E_i (\text{eV})}} = 5.6 \mu\text{s}$$

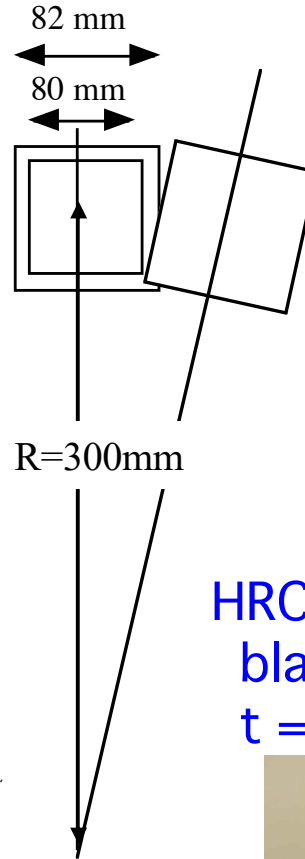
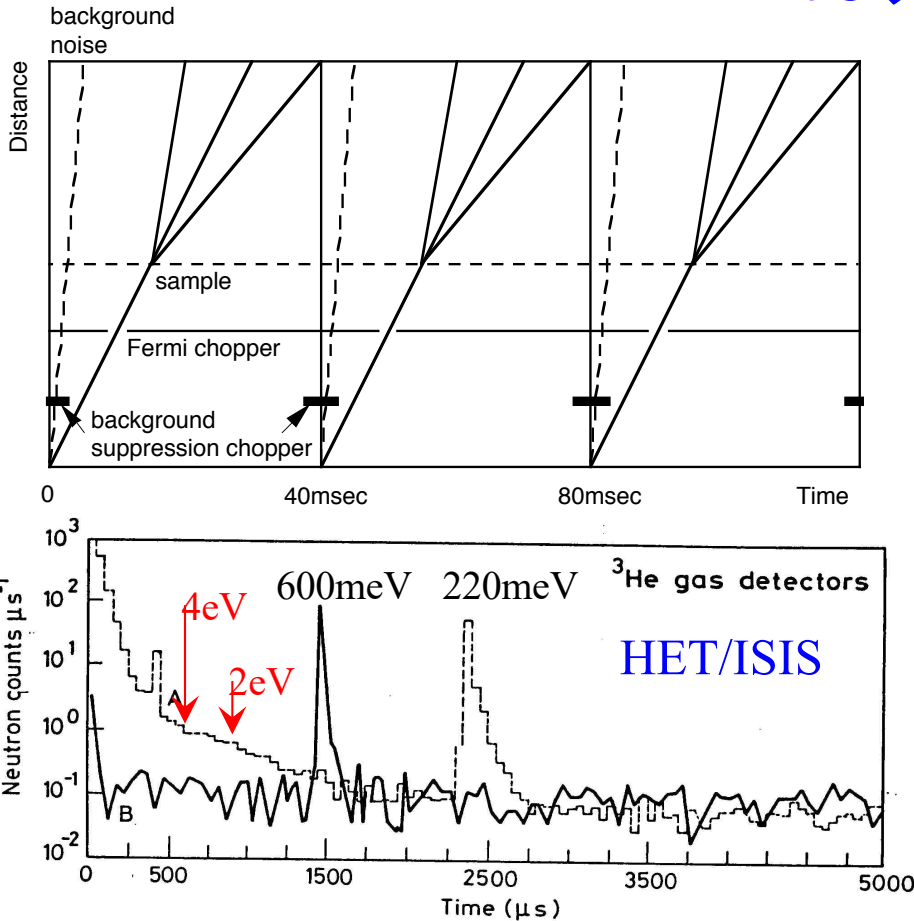
$$\frac{\Delta E}{E_i} = \left[\left(\frac{2\Delta t_m}{t_{ch}} \left(1 + \frac{L_3}{L_2} \right) \right)^2 + \left(\frac{2\Delta t_{ch}}{t_{ch}} \left(1 + \frac{L_1}{L_2} \right) \right)^2 \right]^{1/2}$$

$$= 2.5\% \text{ for } \Delta t_{ch} = \Delta t_m \text{ (HRC)}$$



標準分解能を確認

T0チョッパー



$$\Delta t = \Delta w / 2\pi R f$$

$$w = 80 \text{ mm}, \Delta w = \pm 1 \text{ mm},$$

$$R = 300 \text{ mm}, f = 100 \text{ Hz}$$

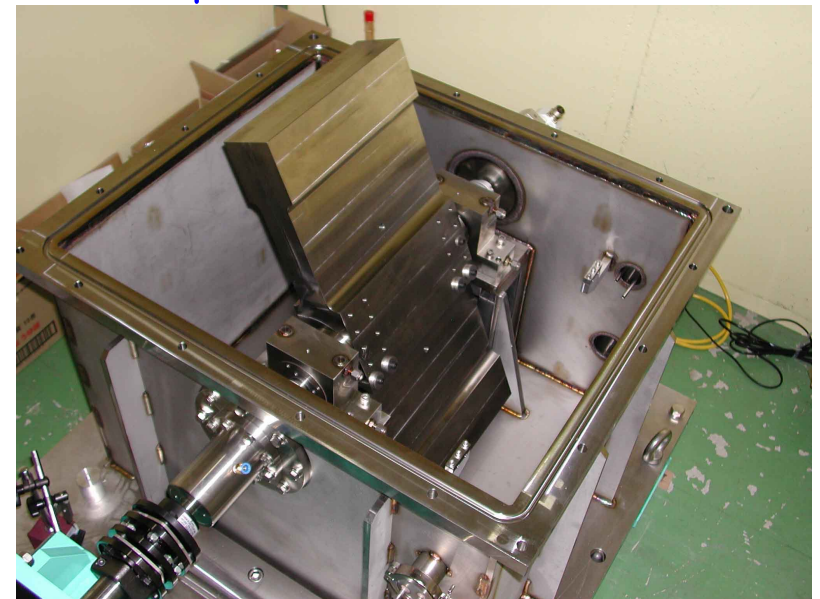
$$\Delta t = \pm 5 \mu\text{s}: \text{制御精度}$$

$$t = (w + \Delta w) / 2\pi R f, E = m(L/t)^2 / 2$$

$$E \leq 2 \text{ eV}: L \geq 8 \text{ m}$$

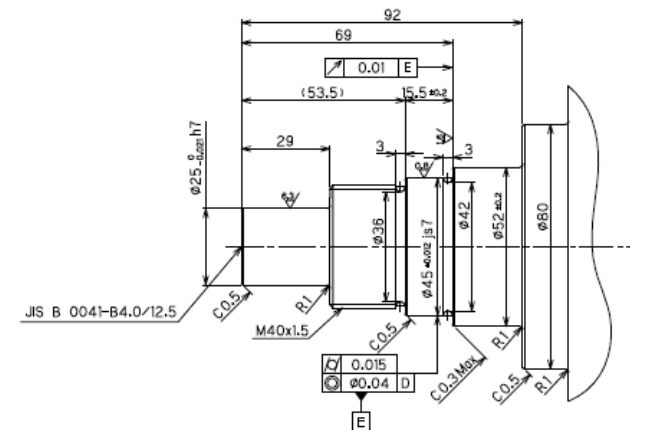
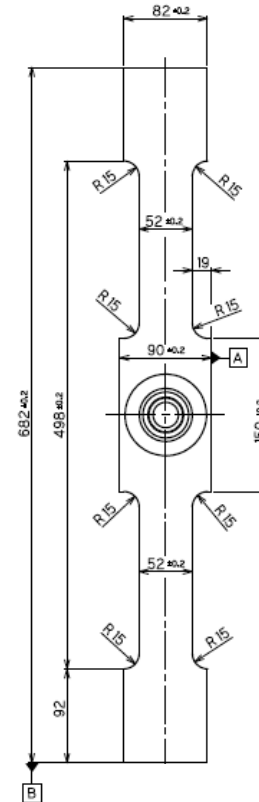
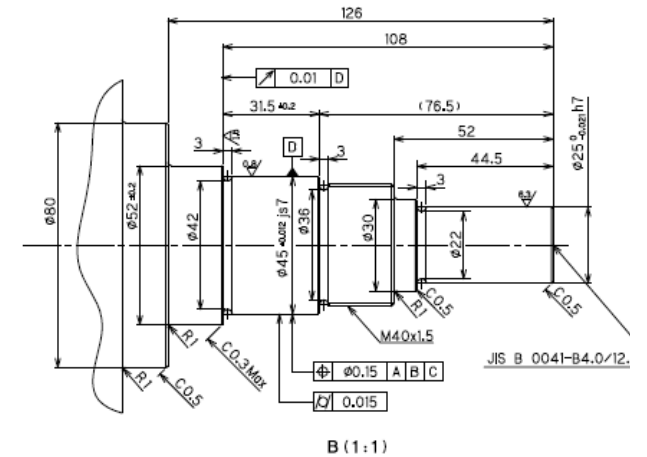
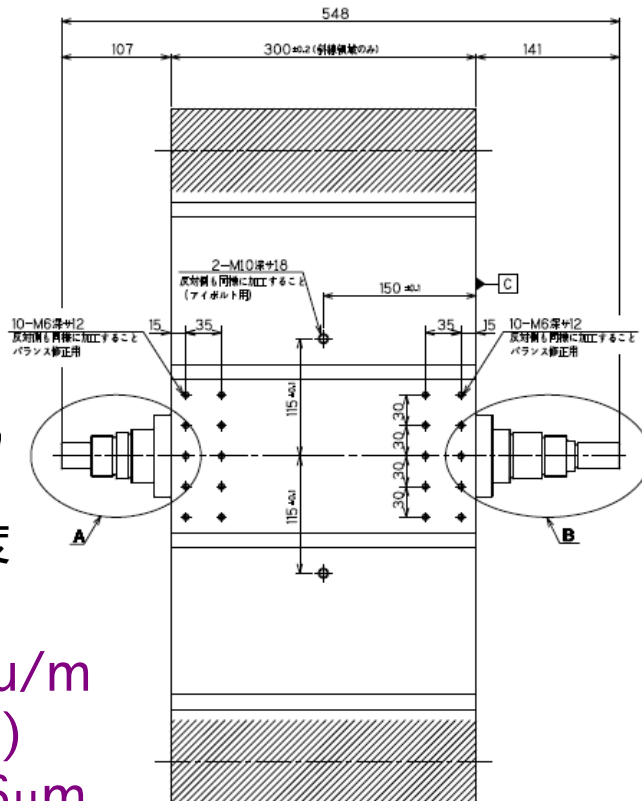
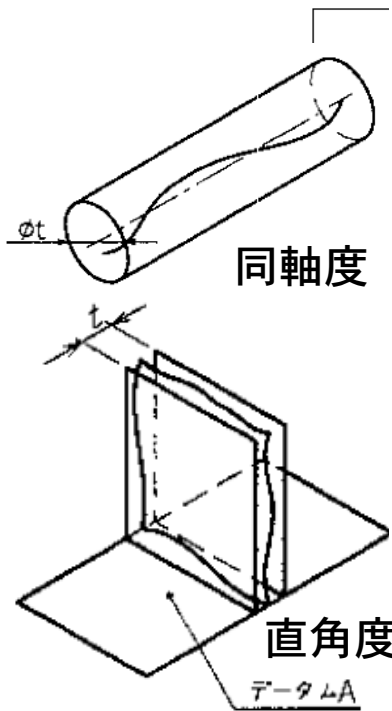
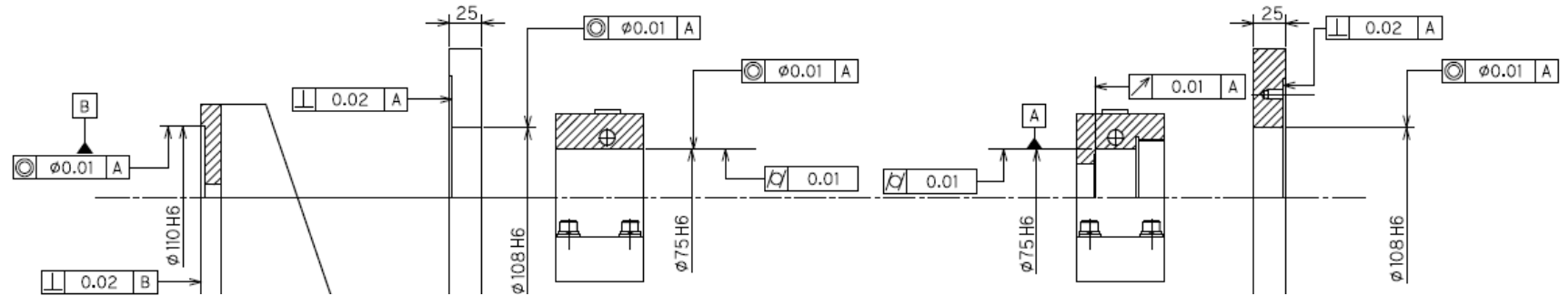
HRC: $w = 76 \text{ mm}, L = 9.0 \text{ m}, E \leq 2.5 \text{ eV}$
 blade: $78 \text{ mm} \times 78 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$
 $t = 408 \mu\text{s}$

回転数 100Hz, 制御精度 $\pm 5 \mu\text{s}$
 年間運転時間 4000時間, 連続運転時間 1000時間
 ローター: Inconel X750, 120kg, 4.7 kgm^2
 モーター: AC servo, 10kW, 50Hz, 空冷
 軸受: 水冷、真空: 1Pa
 軸受(径45mm ϕ , 100Hz): 玉軸受+真空用グリース



T0チョッパー

機械加工：公差（～10μm）、回転バランス（G1）



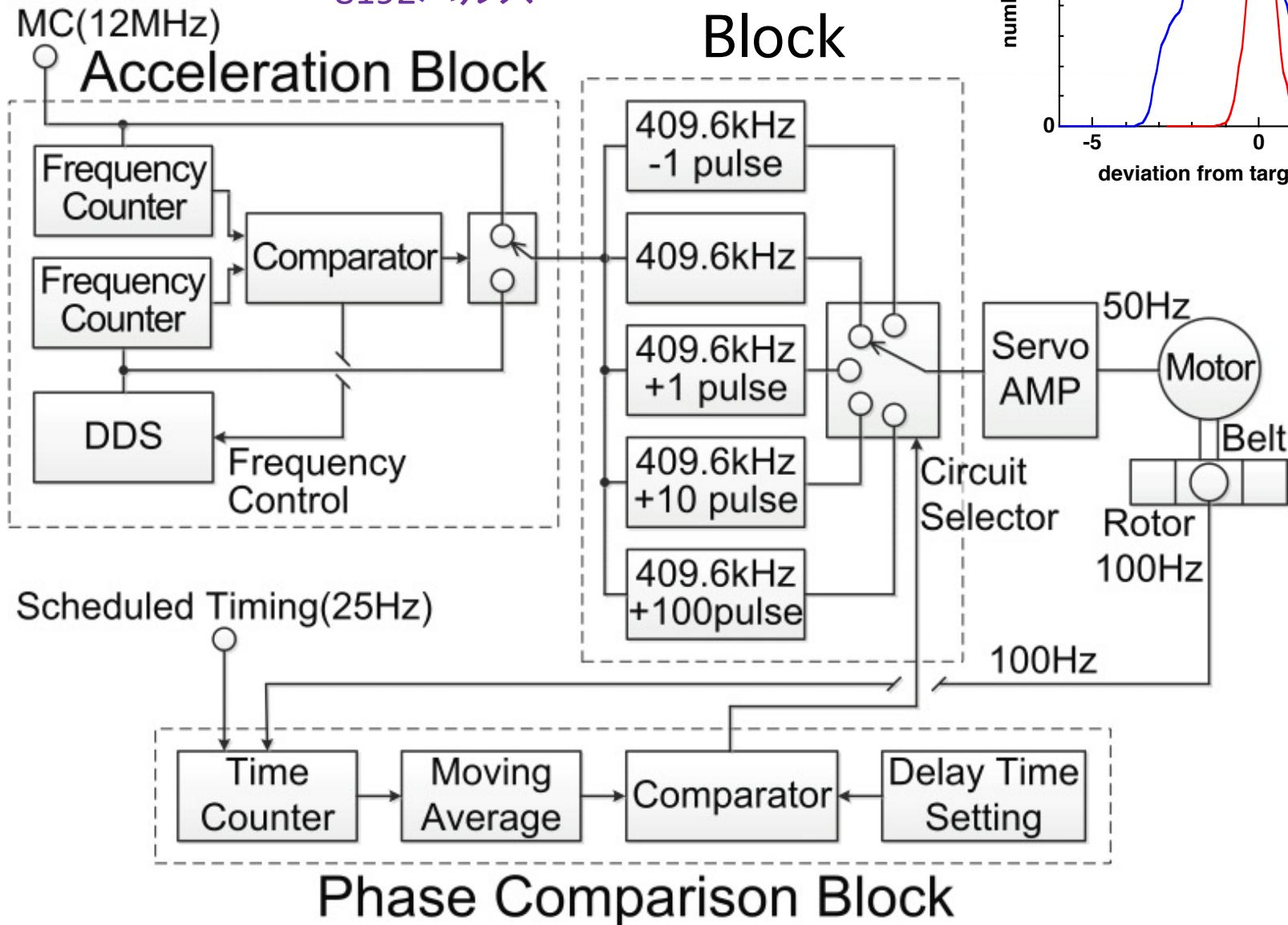
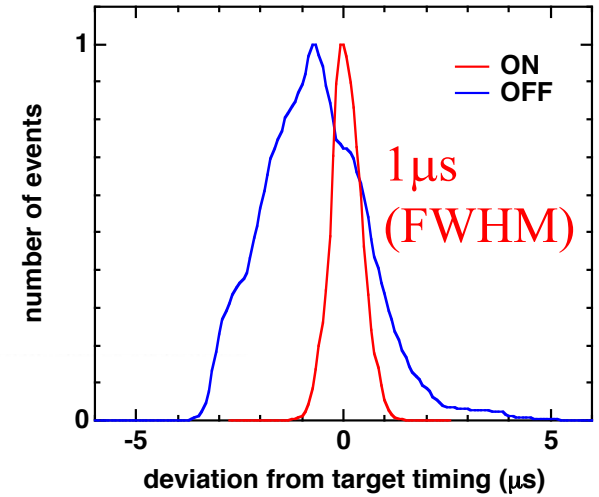
釣合い良さ = $2\pi fu/m$
 = 1mm/s (G1)
 $u = 120\text{kg} \times 1.6\mu\text{m}$

T0チョッパー

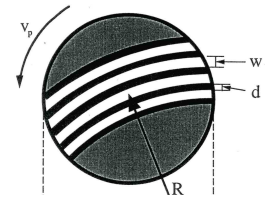
位相制御

モーター
1回転 =
8192パルス

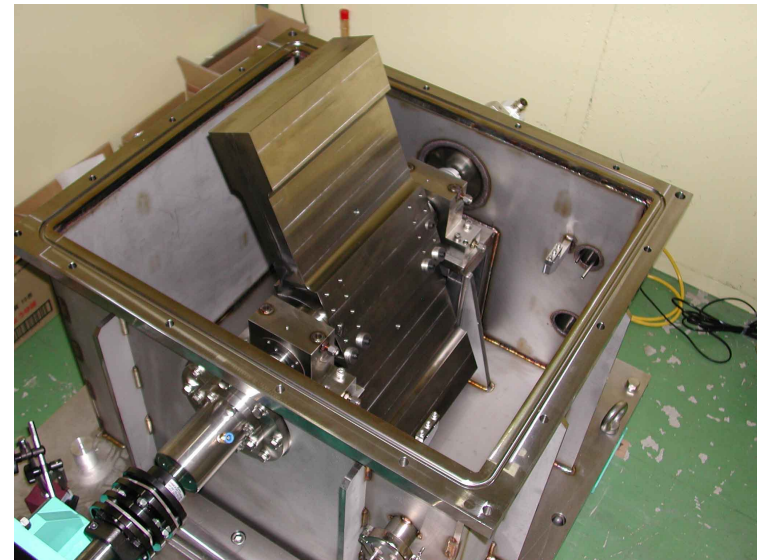
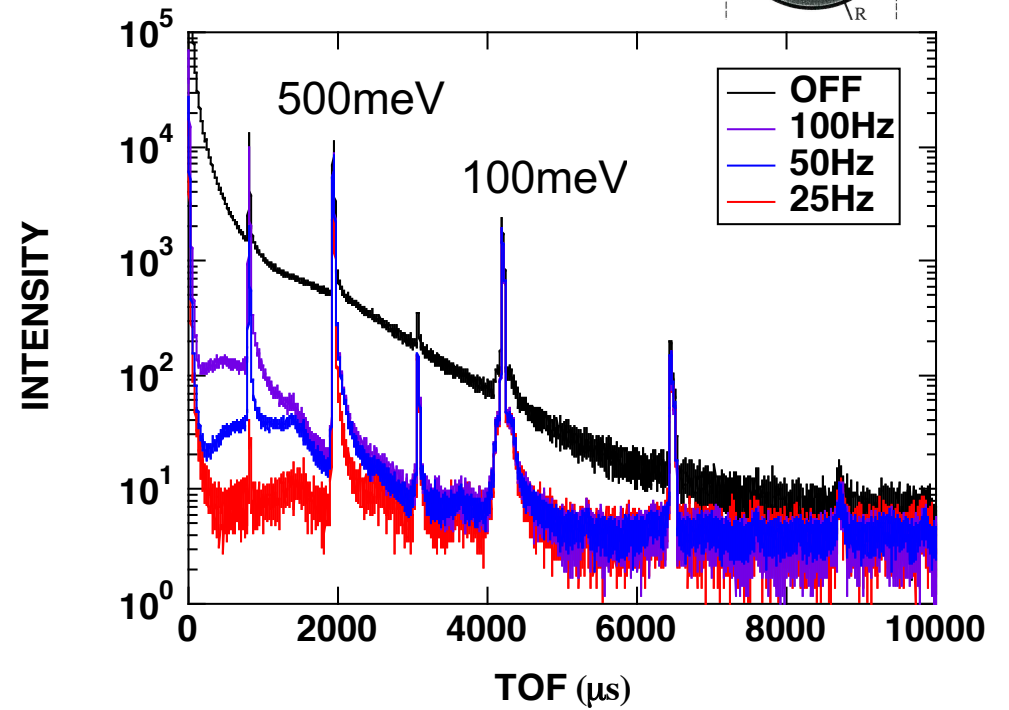
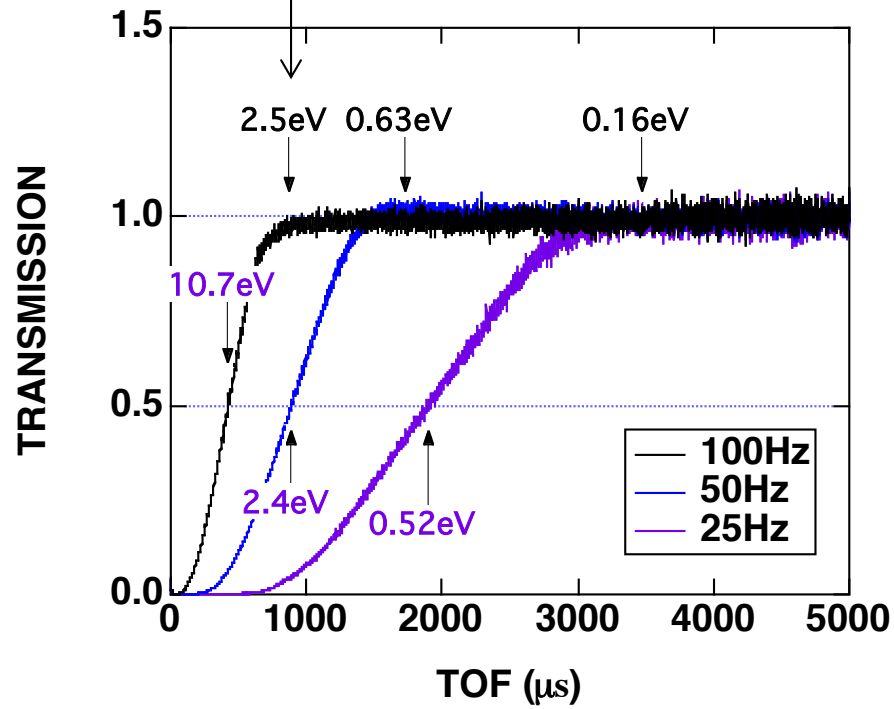
Pulse
Generation
Block



T0チョッパー

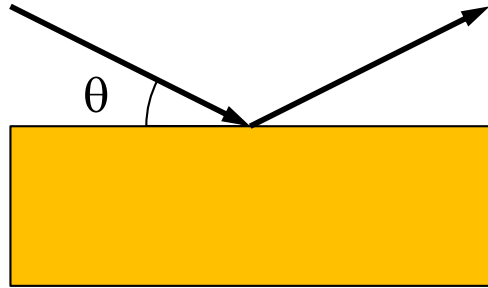


$$408\mu\text{s} \times 19\text{m} / 9\text{m} = 860\mu\text{s}$$



ガイド管

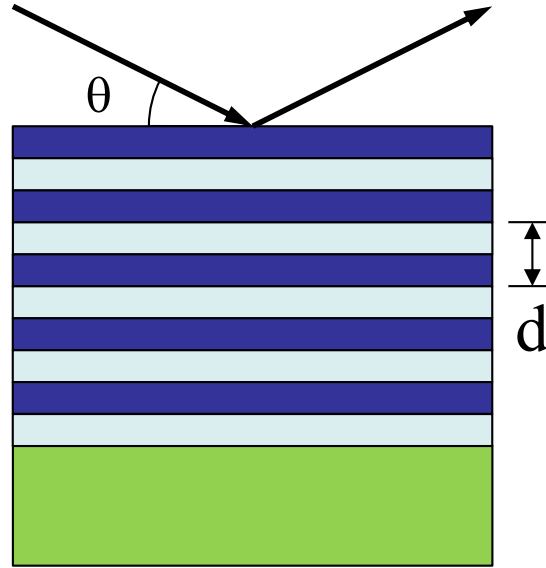
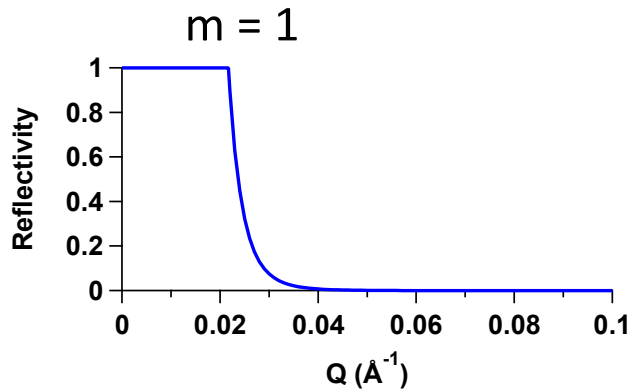
スーパーミラー



全反射

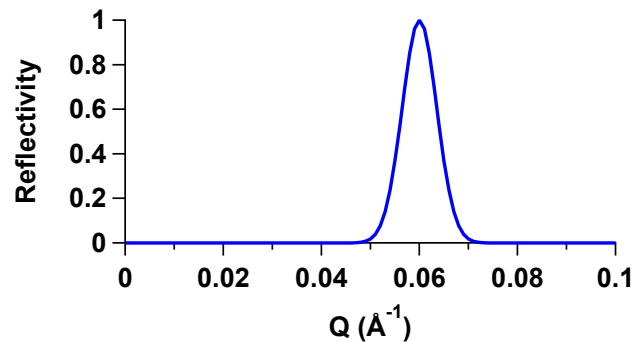
$$\theta < \theta_c \quad (Q < Q_c)$$

$$\text{Ni: } Q_c = 0.0217 \text{ \AA}^{-1}$$

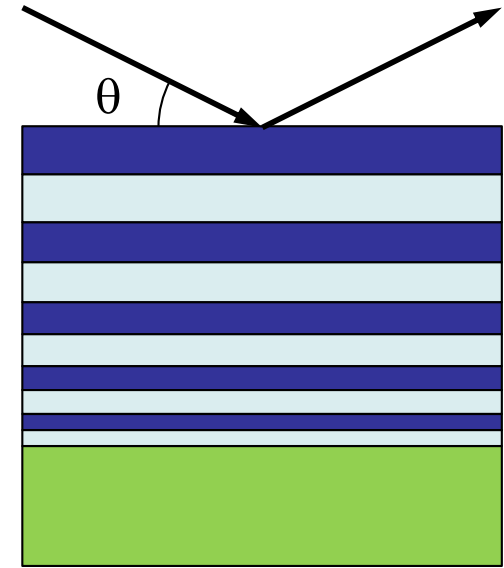


多層膜

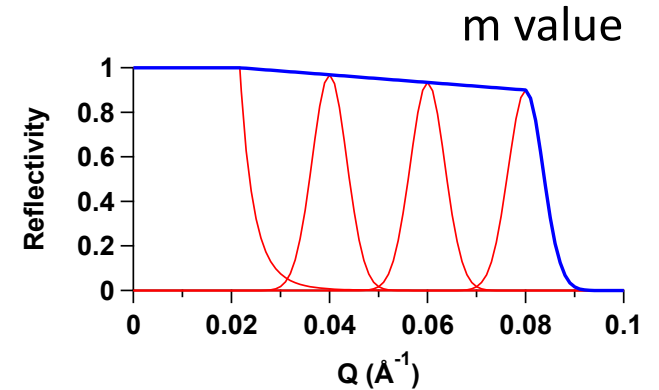
$$\lambda = 2d \sin\theta$$



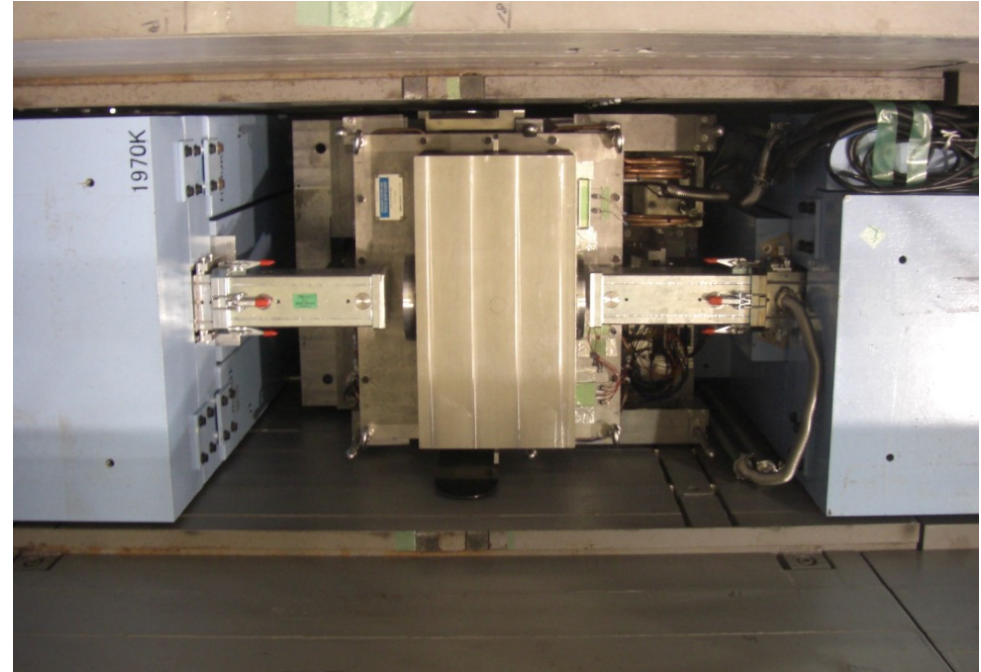
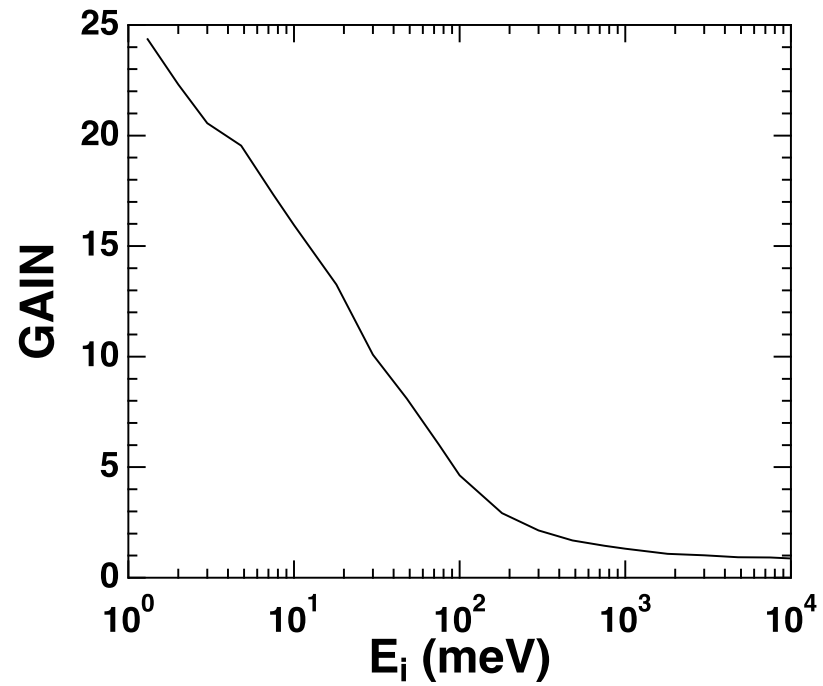
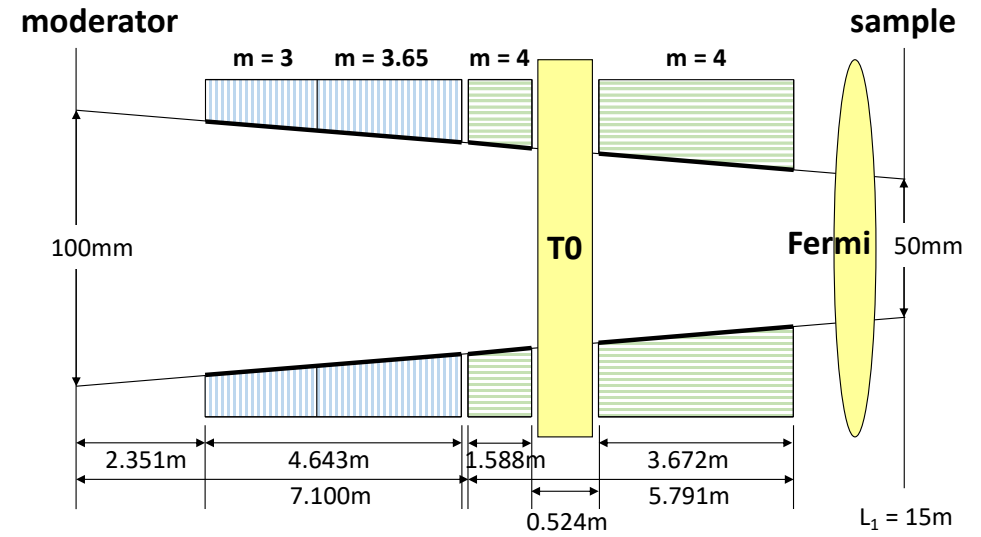
$$Q = 4\pi \sin\theta / \lambda$$



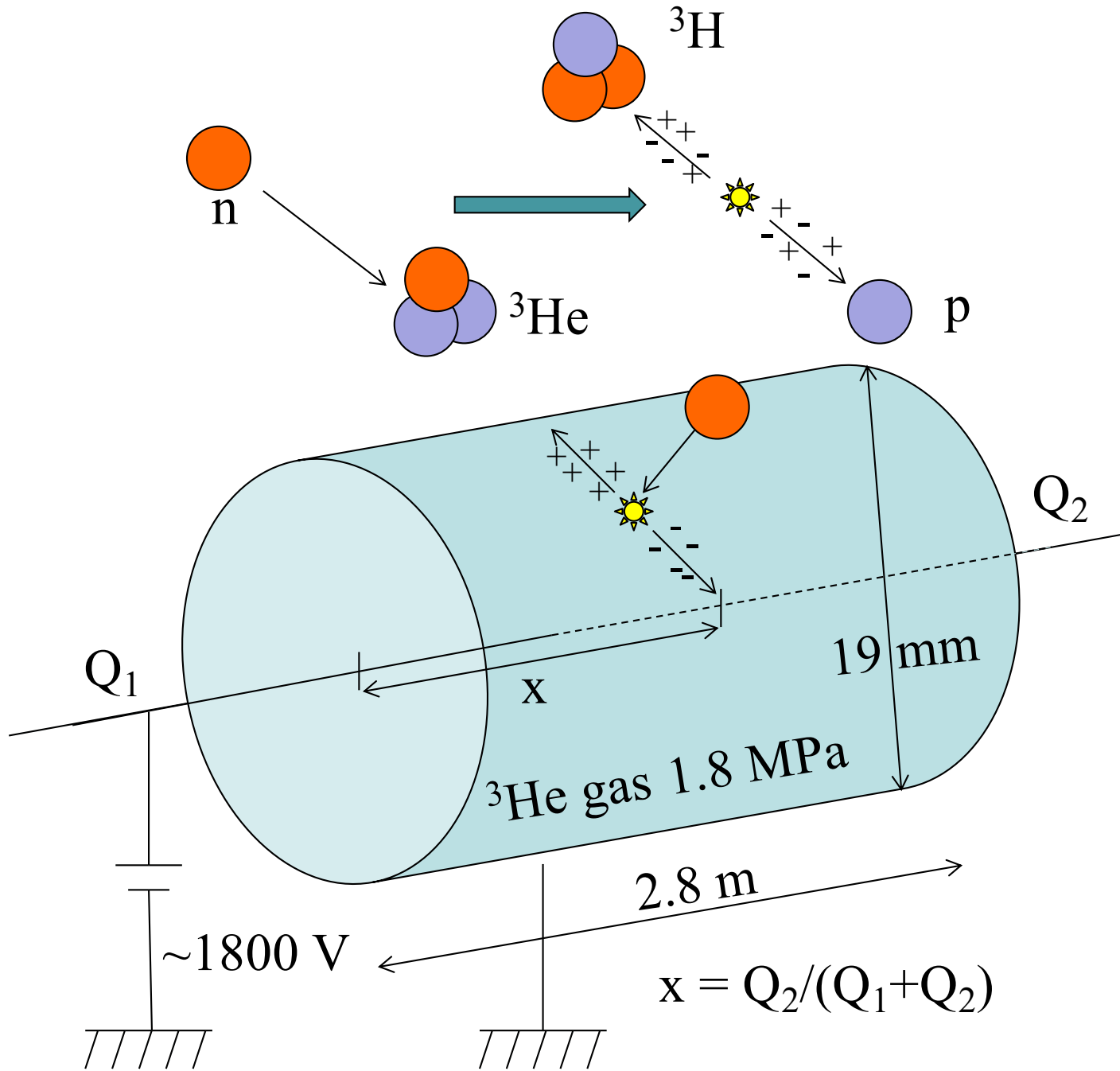
スーパーミラー

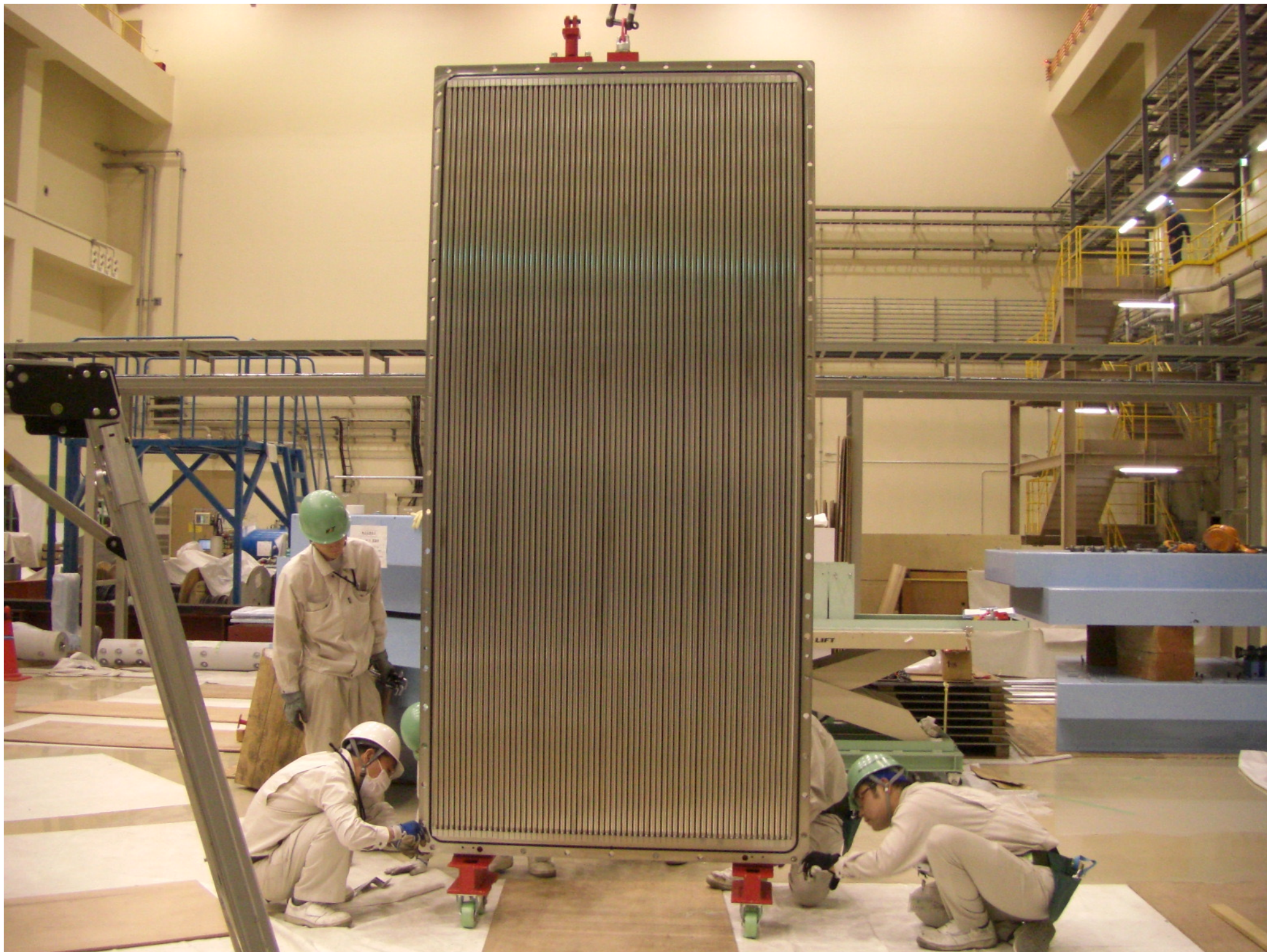


ガイド管



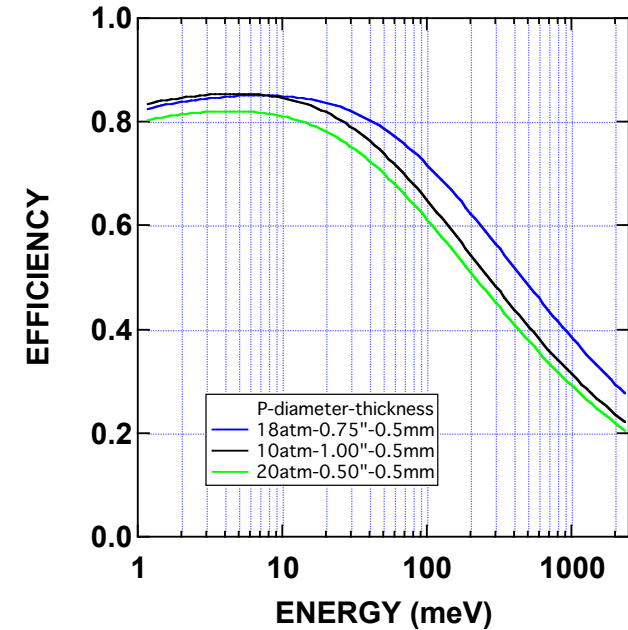
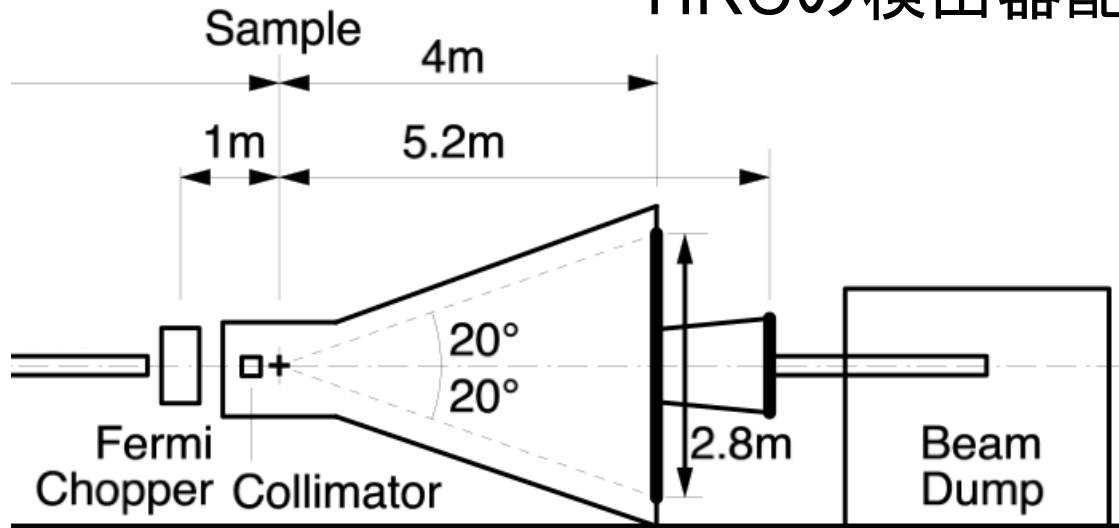
中性子検出器



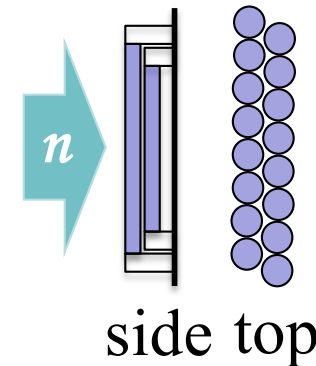
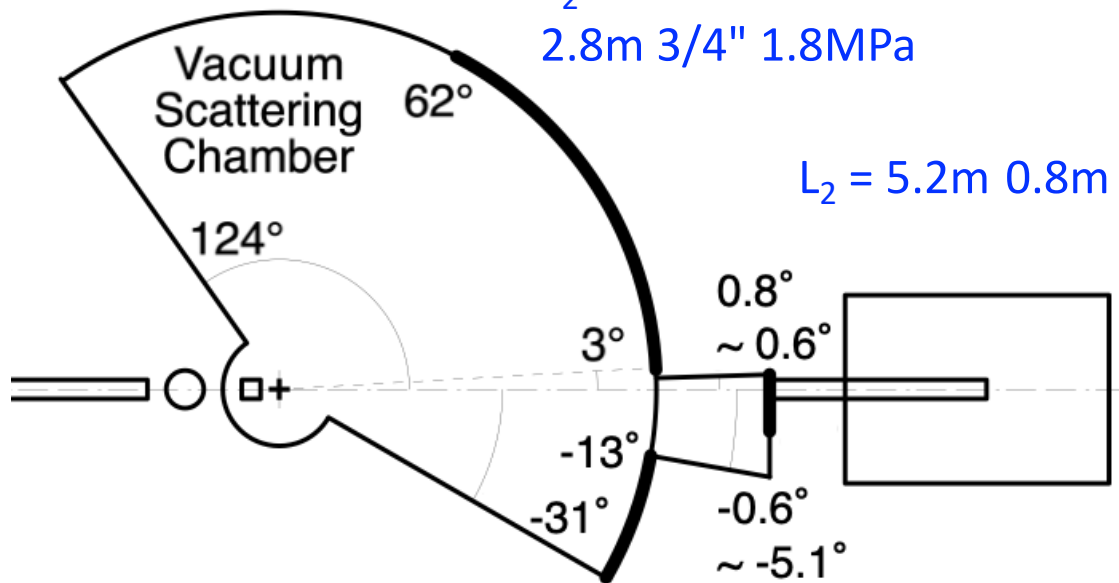


中性子検出器

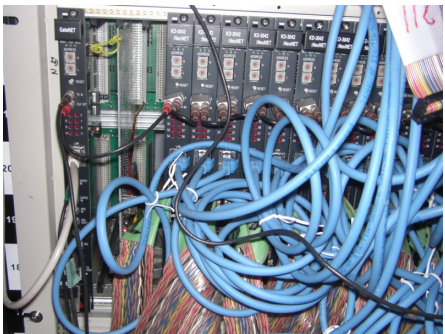
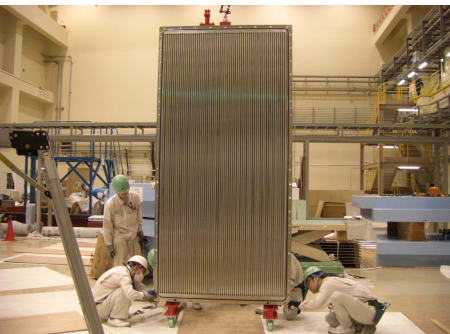
HRCの検出器配置



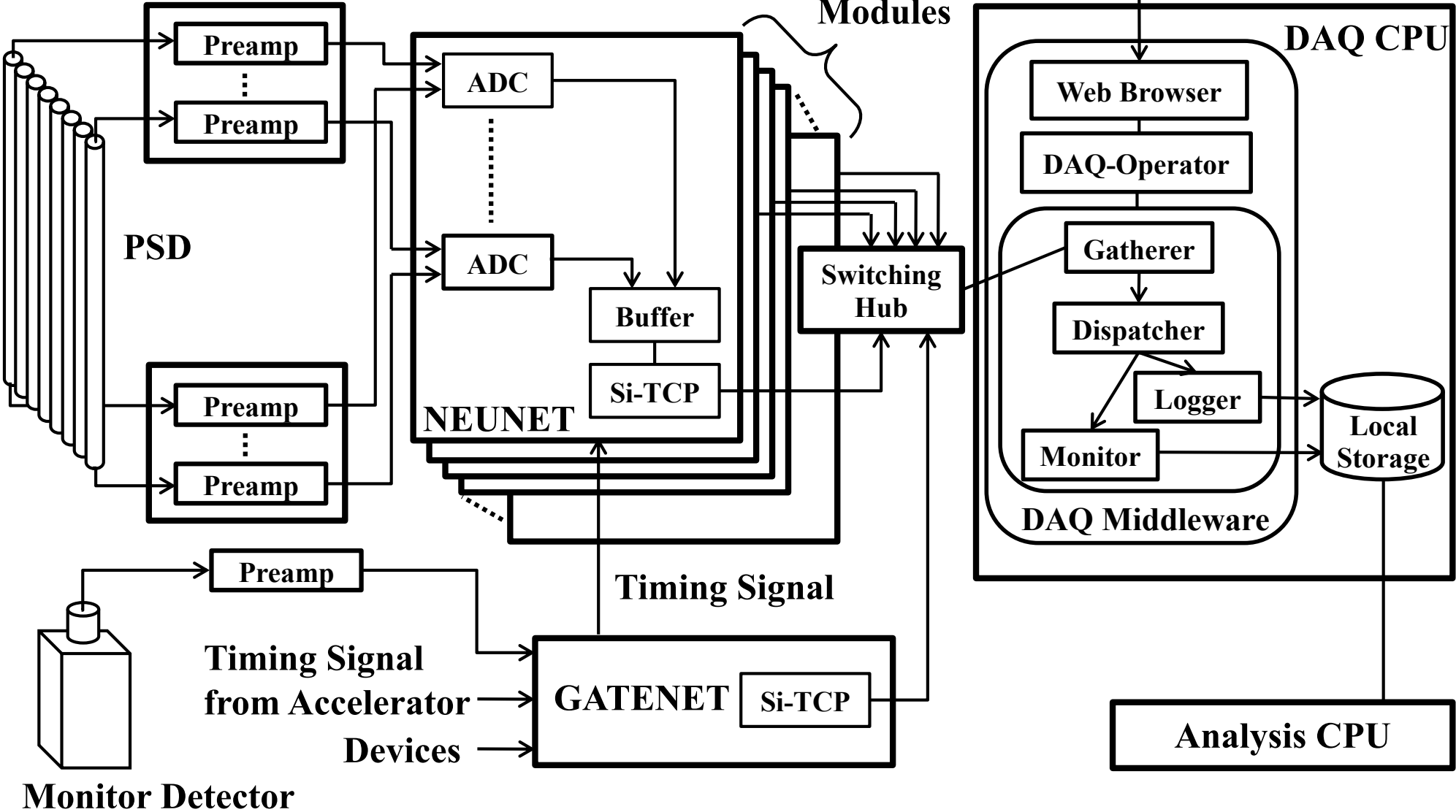
$L_2 = 4\text{m}$
2.8m 3/4" 1.8MPa



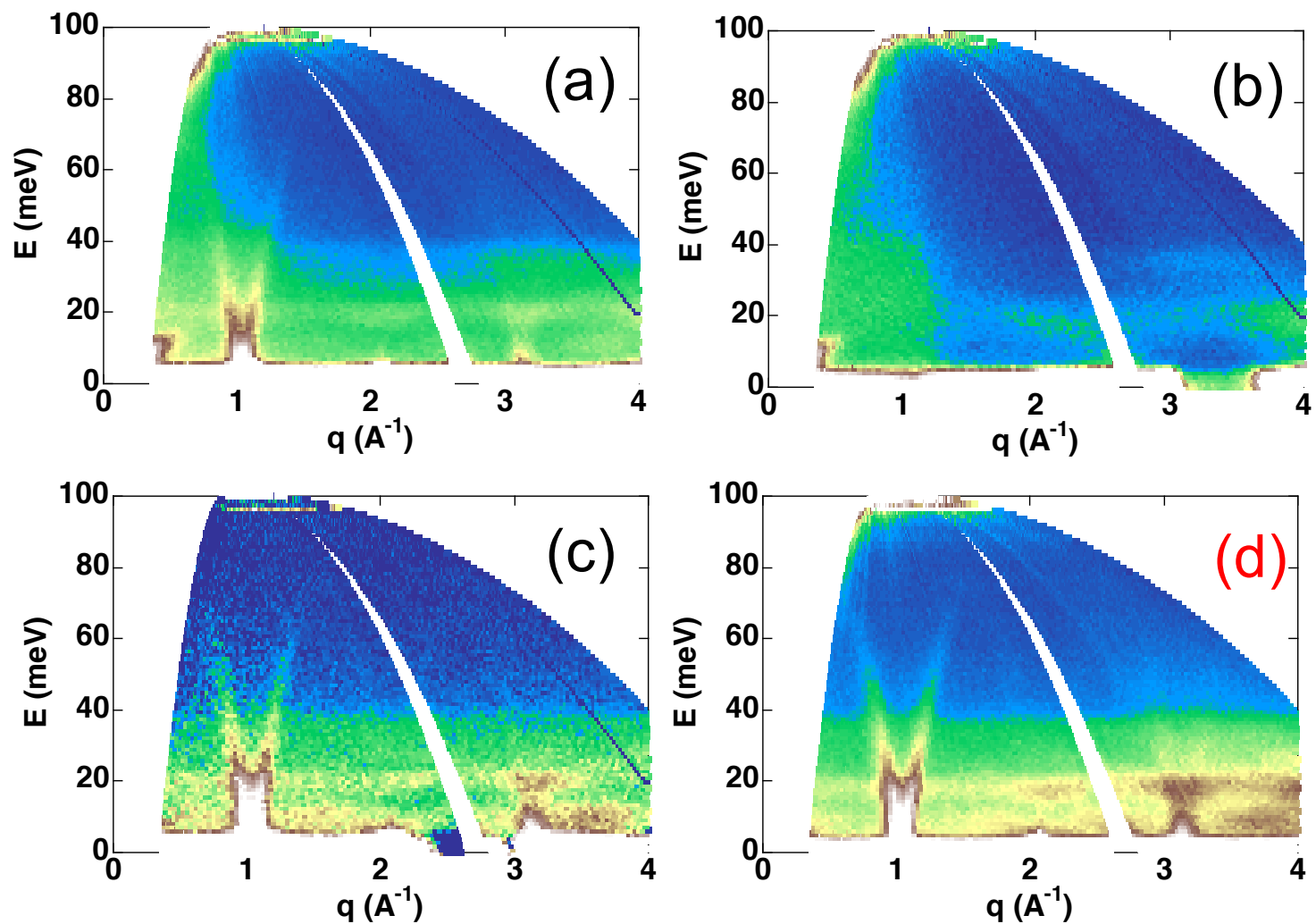
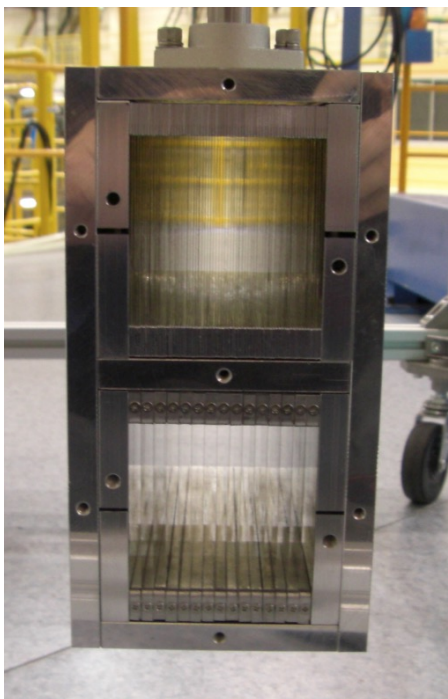
検出器エレクトロニクス



NEUNET
Modules



入射コリメーター



collimator
1.5° for L2 = 4m
0.3° for NBS

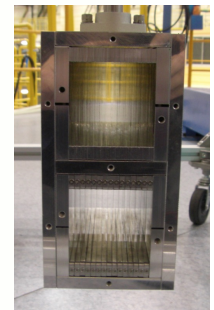
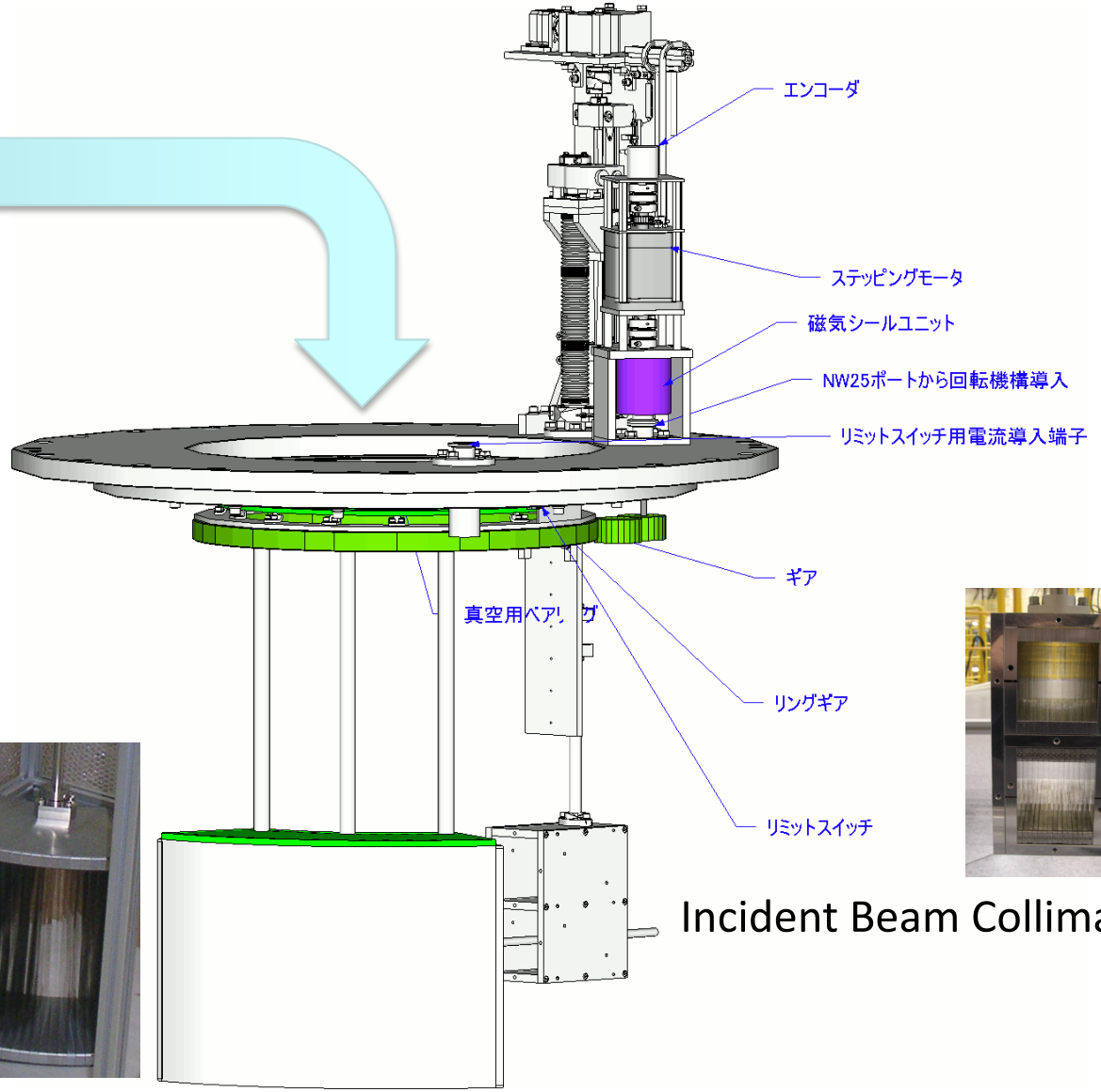
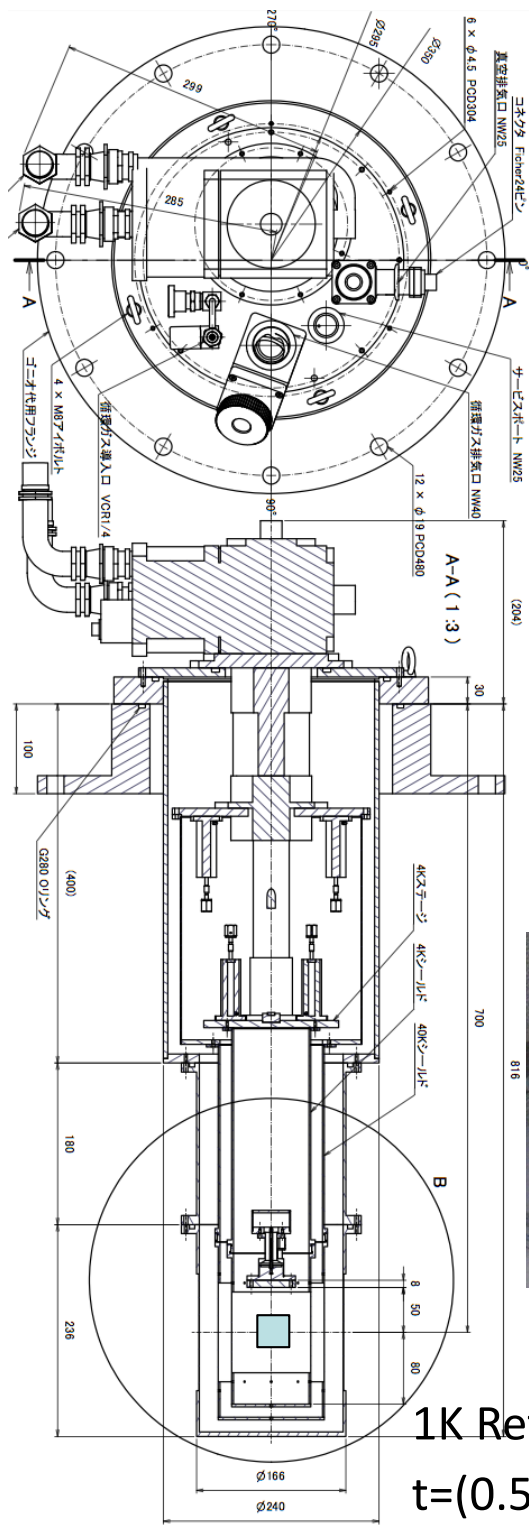
CsVCl₃ on HRC T = 20 K, E_i = 100 meV

(a),(b): no collimator, (c)=(a)-(b)

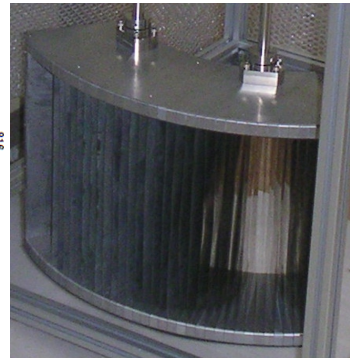
(d): 1.5° collimator

Intensities (color scale) in (a),(b),(d) are normalized by measuring time.

オシレーティングコリメーター



Incident Beam Collimator

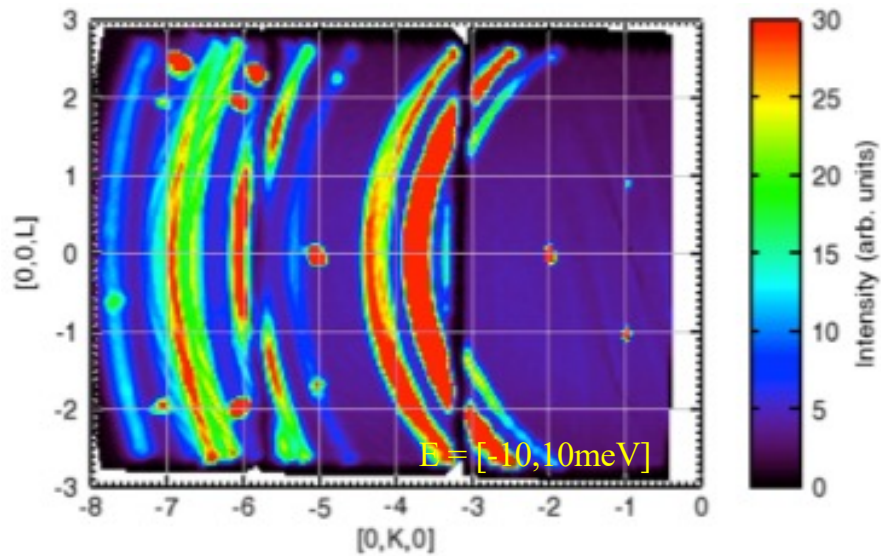


Oscillating Collimator

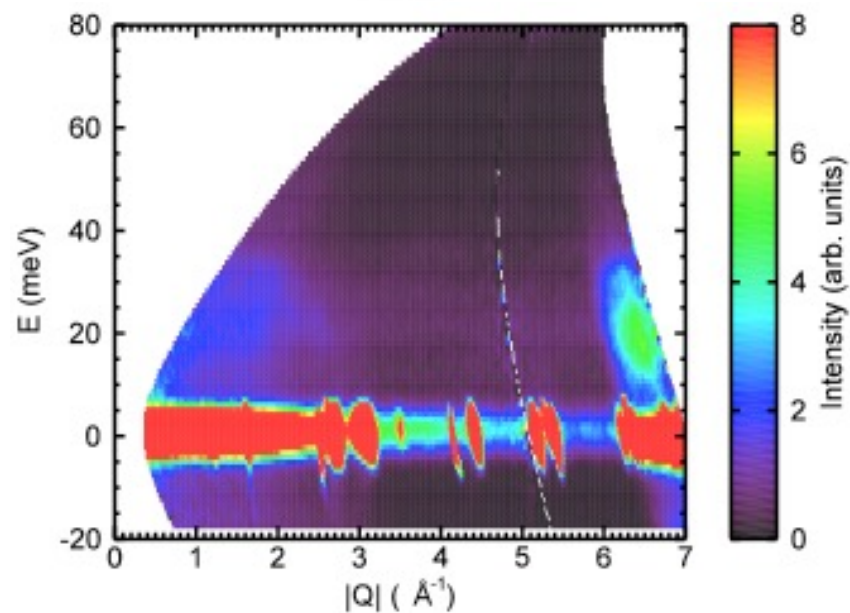
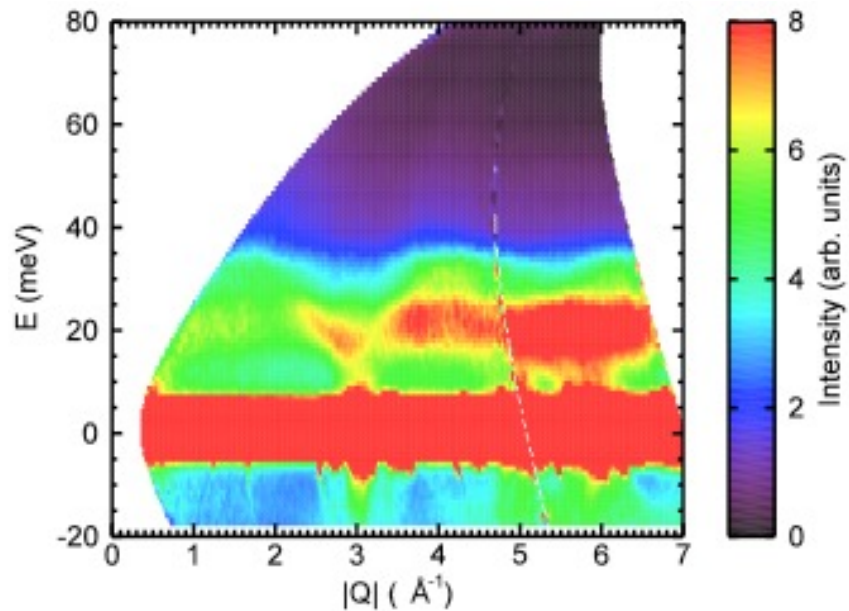
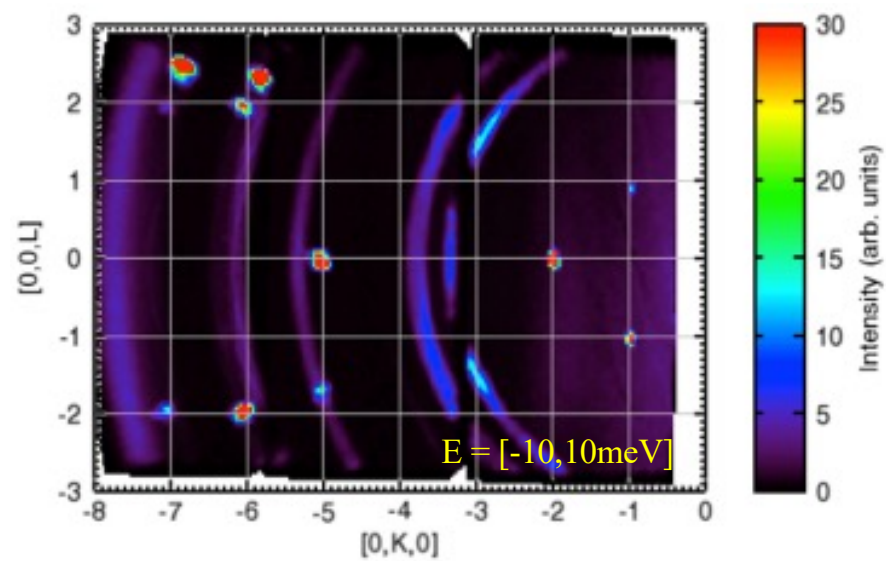
1K Refrigerator ($T_{\min} = 0.6 \text{ K}$)
 $t = (0.5 + 0.1 + 0.1) \times 2 = 1.4 \text{ mm}$

オシレーティングコリメーター

オシレーティングコリメーターなし



オシレーティングコリメーターあり

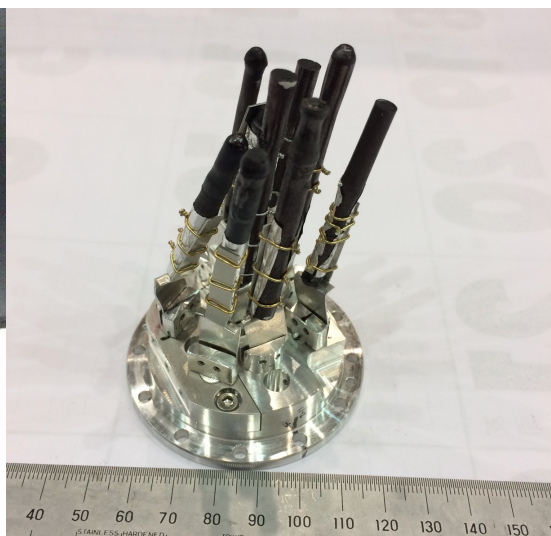


試料環境

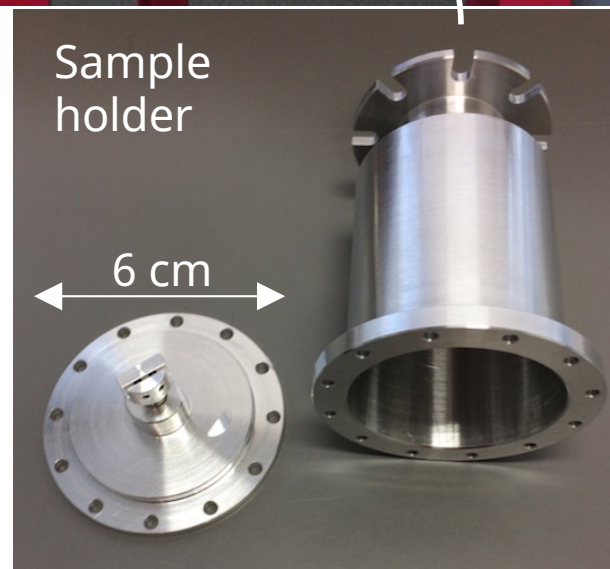
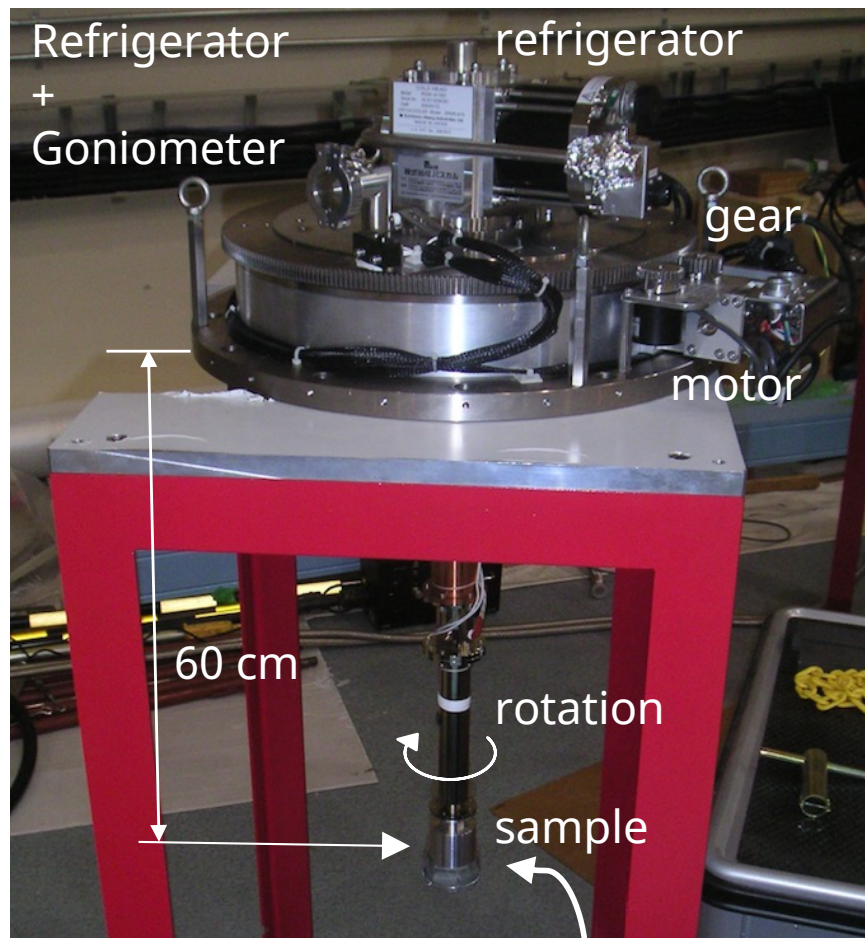
試料: 大型單結晶



$\text{Fe}_{0.7}\text{Mn}_{0.3}$ 40g
Aligned
crystal

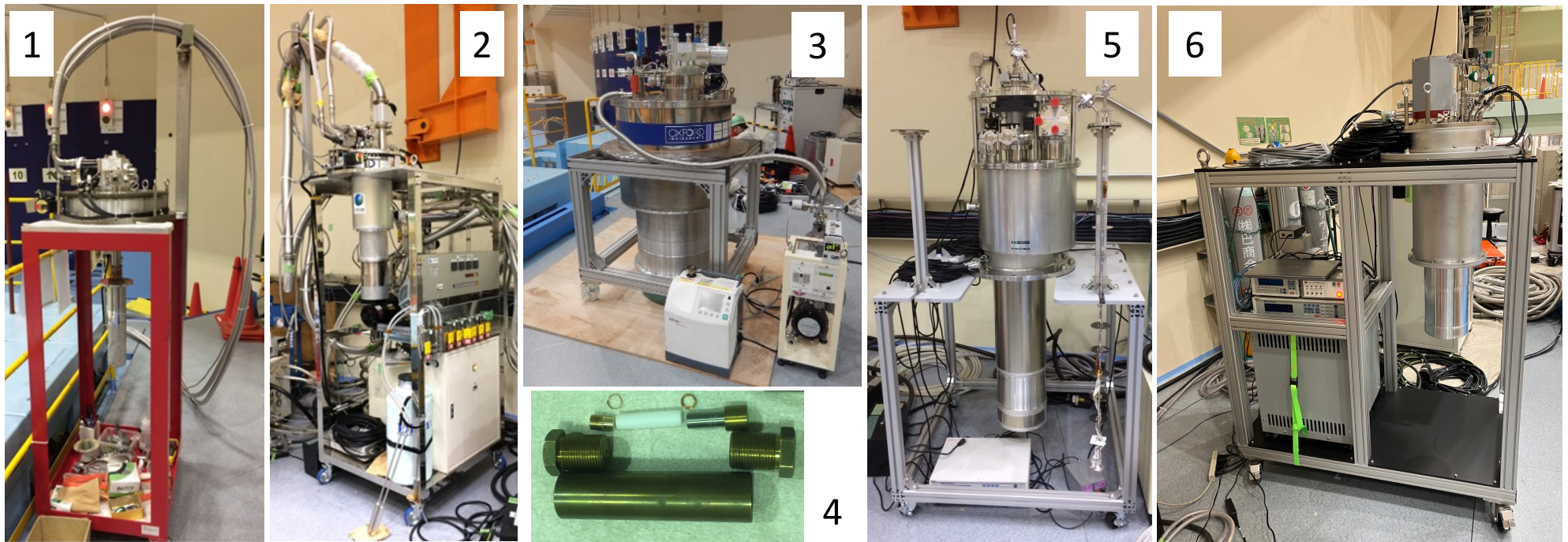


$\text{Nd}_2\text{Mo}_2\text{O}_7$ 48g
Co-aligned
crystals



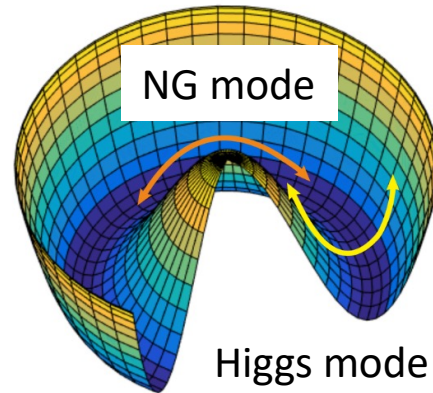
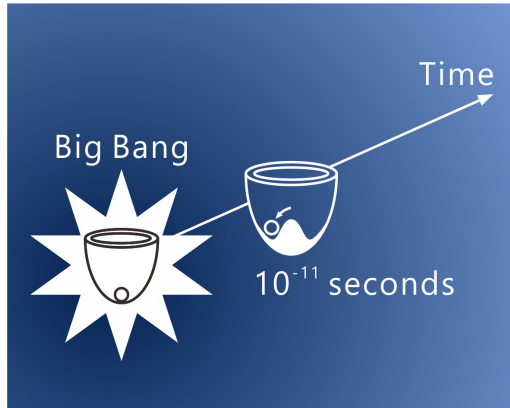
試料環境

| 試料環境 | 制御範囲 | 利用可能時期 | |
|----------------------------|---|-----------|---|
| GM冷凍機 | $T = 4 - 300 \text{ K}$ | 通年 | 1 |
| 1K冷凍機 | $T = 0.6 - 300 \text{ K}$ | 通年 | 2 |
| 超伝導電磁石 | $H \leq 5 \text{ T}, T = 0.3 - 300 \text{ K}$ | 1 - 4月 | 3 |
| 圧力セル (シリンダー型) | $P \leq 1.2 \text{ GPa}$ | 1 - 4月 | 4 |
| Cryofurnace | $T = 4 - 700 \text{ K}$ | コミッショニング中 | 5 |
| ^3He sorption型冷凍機 | $T = 0.3 - 300 \text{ K}$ (100時間持続) | コミッショニング中 | 6 |

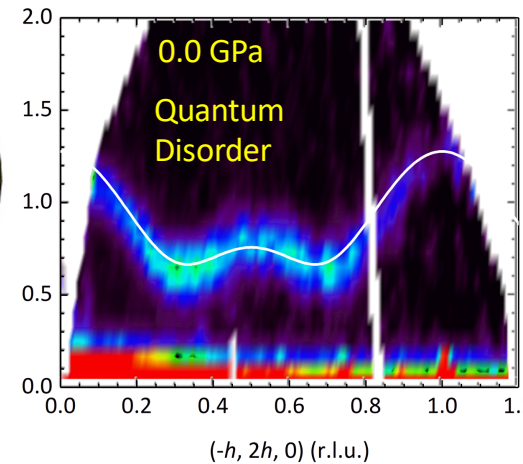


多重試料環境での非弾性散乱実験

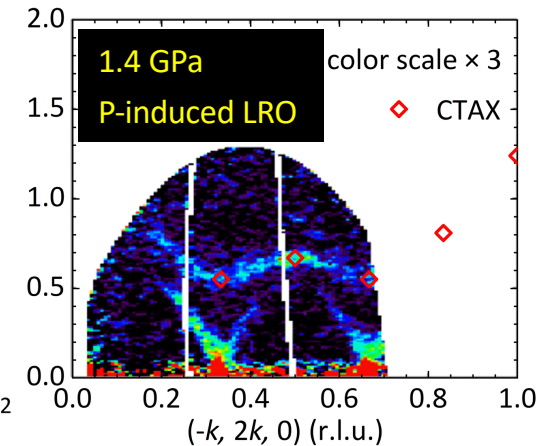
S. Hayashida et al., Sci. Adv. 5 (2019) eaaw5639.



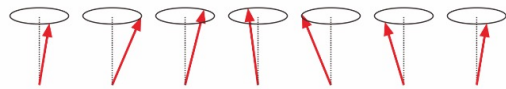
大気圧下スペクトル



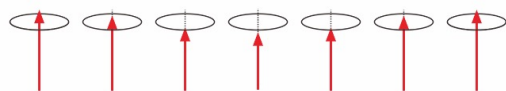
圧力下スペクトル



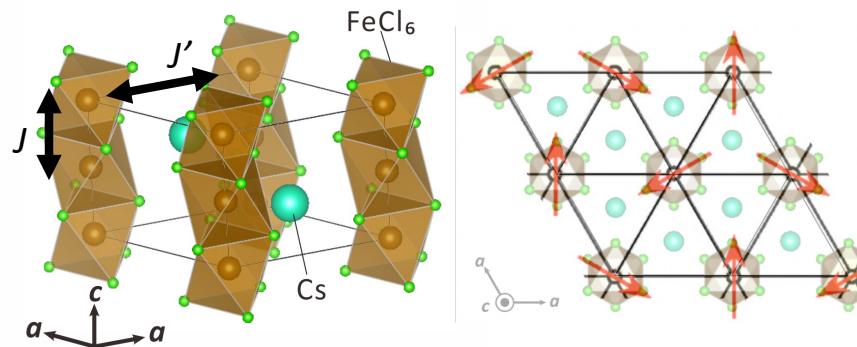
T-mode (Nambu-Goldstone)
位相モード



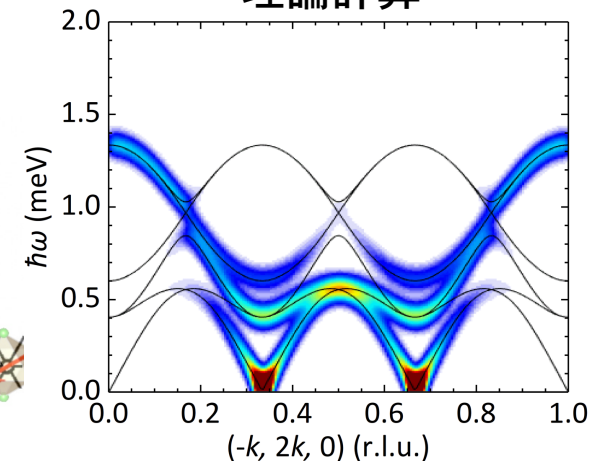
L-mode (Higgs)
振幅モード



CsFeCl₃の結晶構造

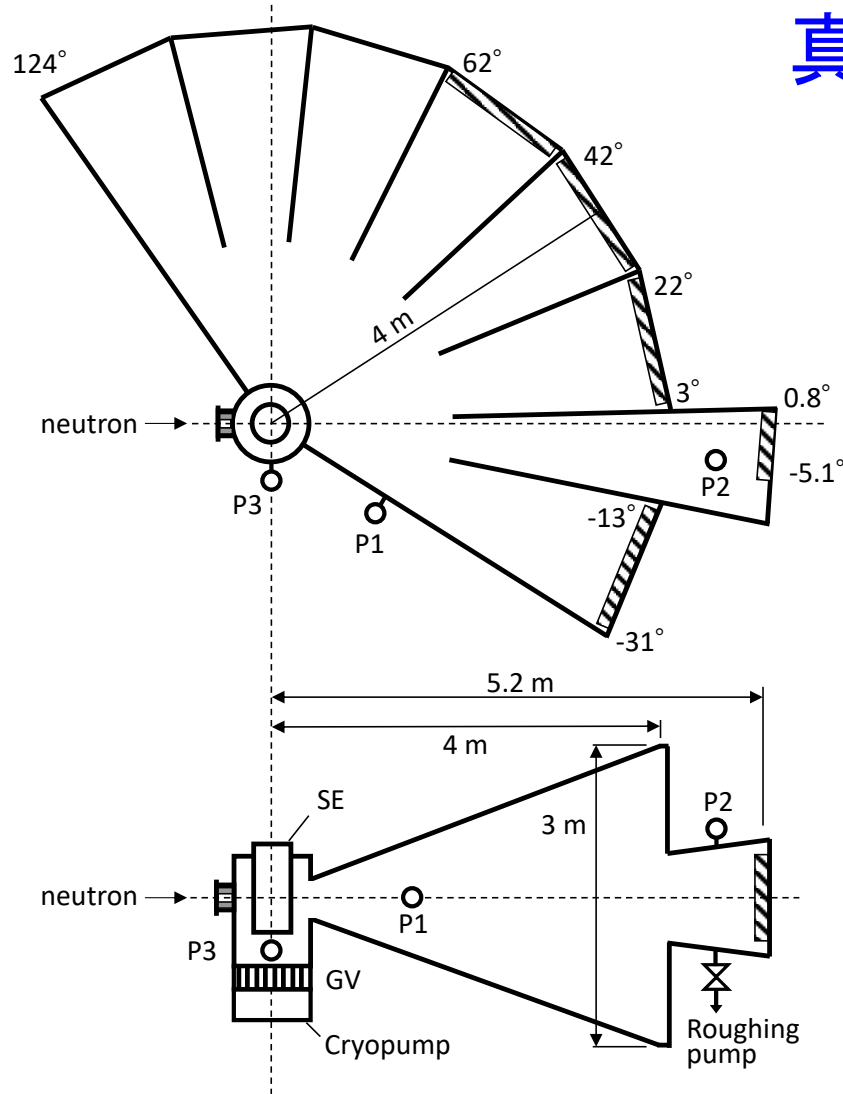


理論計算



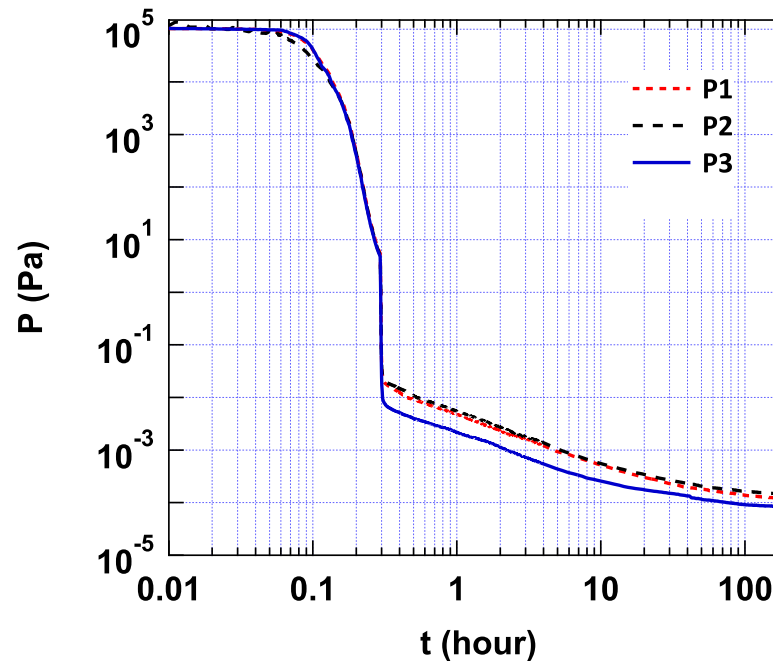
自発的対称性が破れた系における量子臨界点近傍のスピン集団励起では、非自明なHiggs振幅(L)モードが存在する。三角格子磁性体CsFeCl₃の圧力誘起磁気秩序相におけるスピン励起を観測し、そのモード解析を行った。non-collinearな磁気構造をもつフラストレーション系のため、NGモードとHiggsモードの混成が生じることが明らかとなった。

真空散乱槽



容積 50 m³

B₄Cレジン板 (B₄C微粒子をエポキシ系接着剤で整形後、加熱してエポキシ系接着剤を飛ばす):
試料から散乱した中性子のみを検出するため、
他の経路から来る真空散乱槽内の散乱を遮蔽



粗引き

スクロールポンプ (排気速度 630 m³/h)

+メカニカルブースターポンプ (排気速度 2050 m³/h) を 2 組 設置

クライオポンプ

口径 750 mm、排気速度 28 m³/s、交差圧力 350 Pa m³

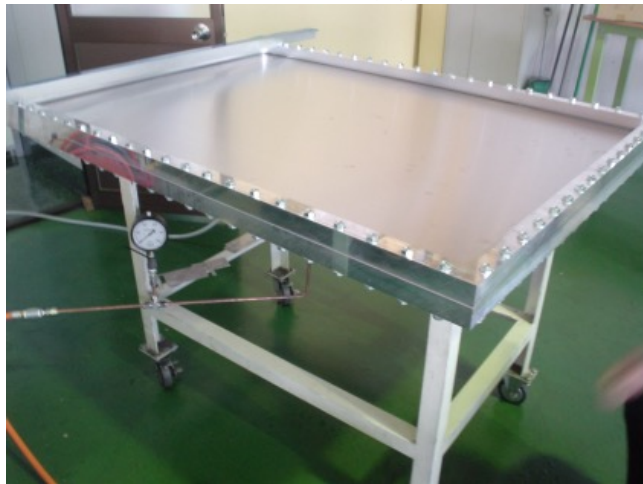
50 m³ の真空容器では切替時圧力は 7 Pa 以下、5 Pa とする

大面積アルミ窓

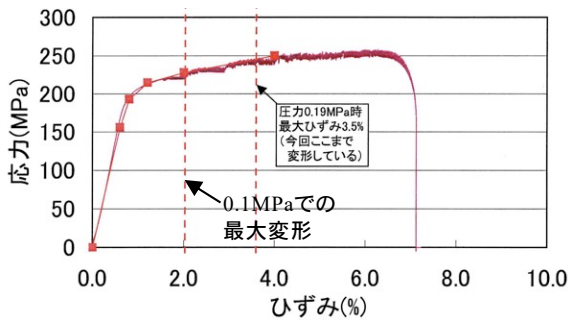
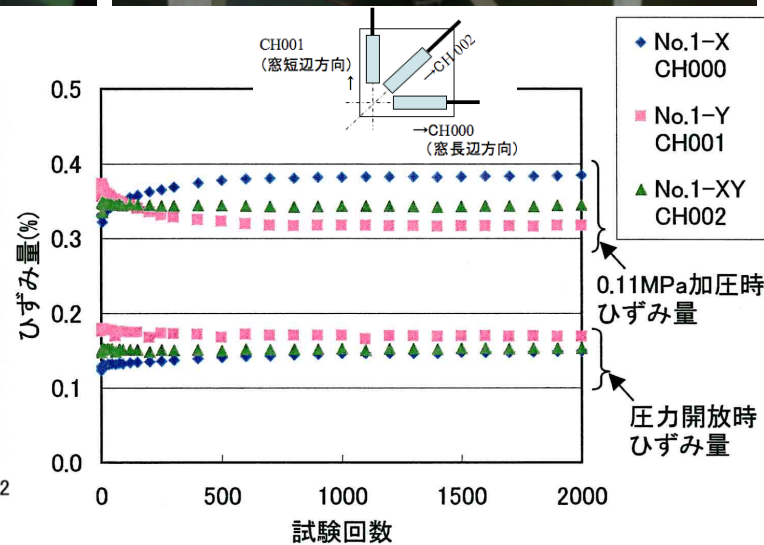
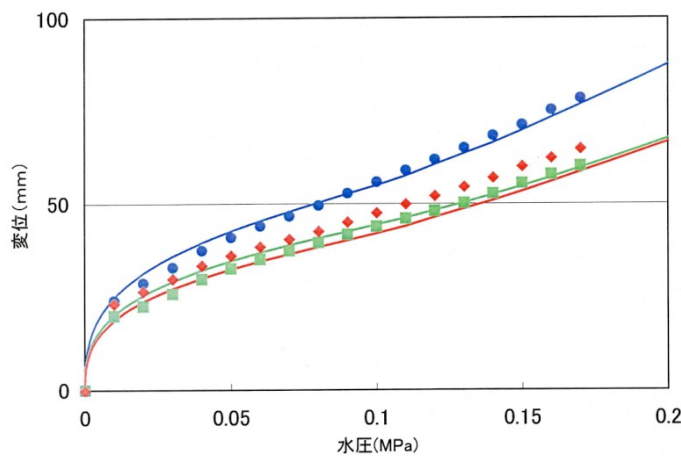
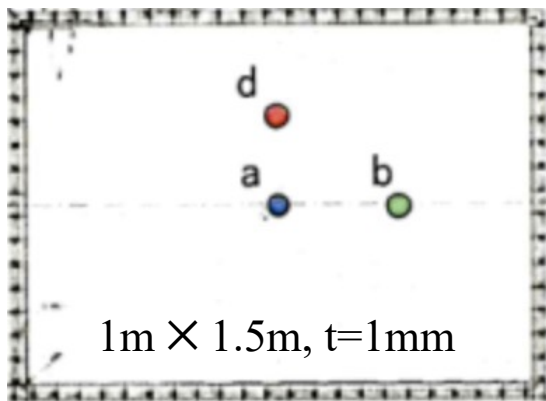
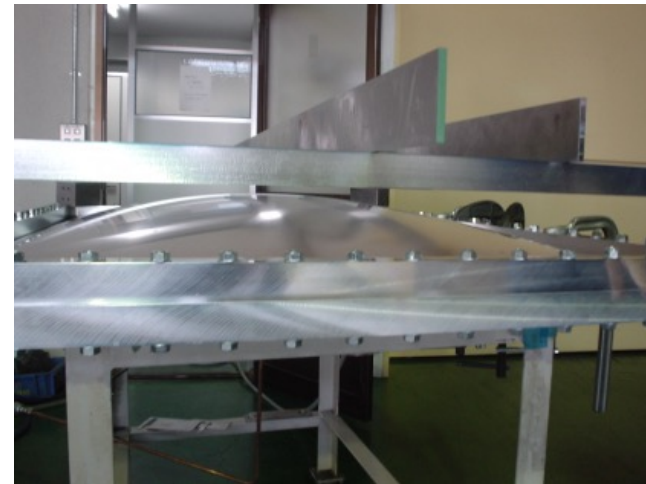
設置された様子



耐圧試験前



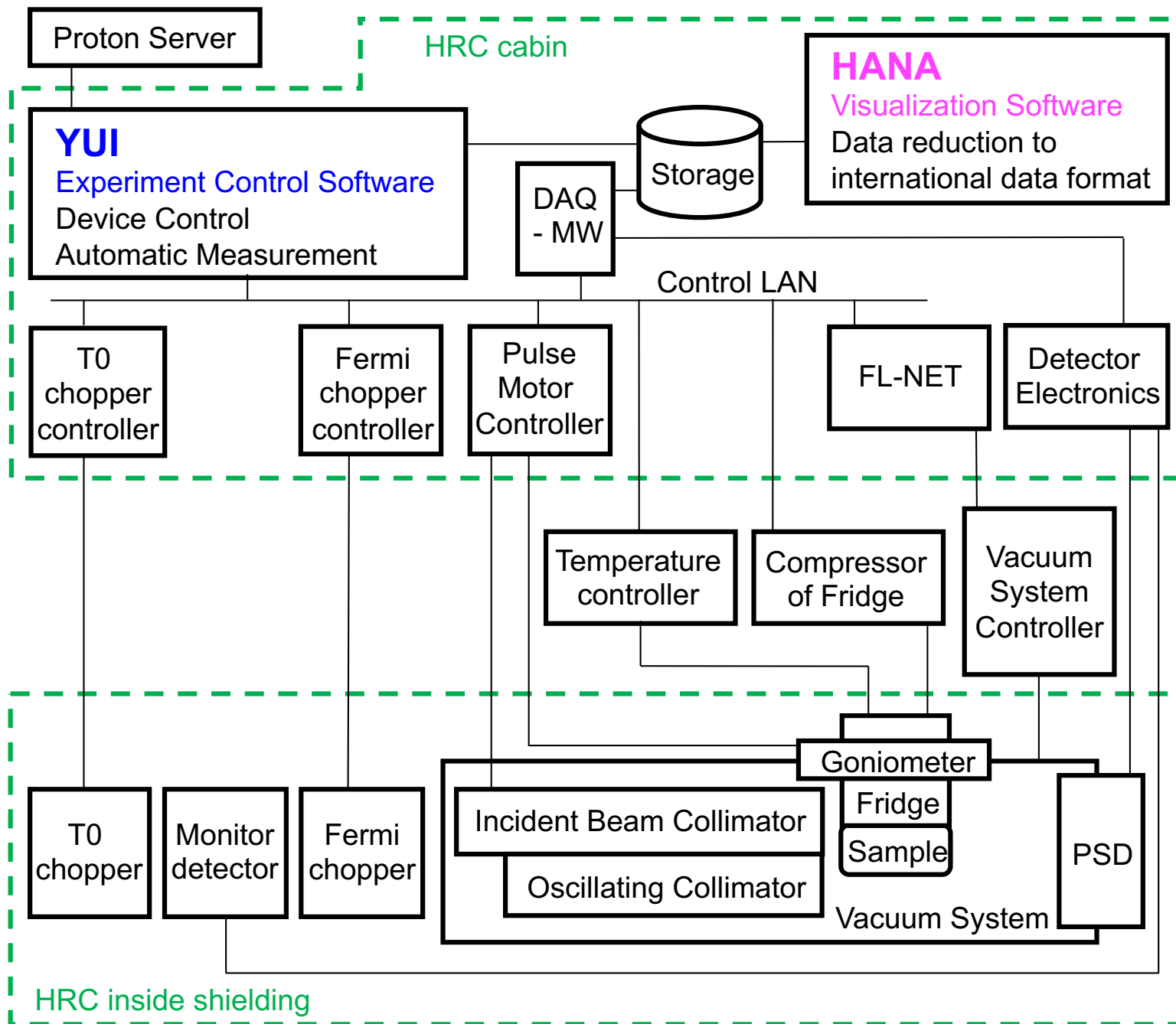
耐圧時アルミ窓変形状態



実機相当模型
850 × 920 × 1.5

繰り返し試験
1回目 7191回
2回目 9425回
3回目 8324回
(要求仕様1000回)

HRC Experiment Control Environment

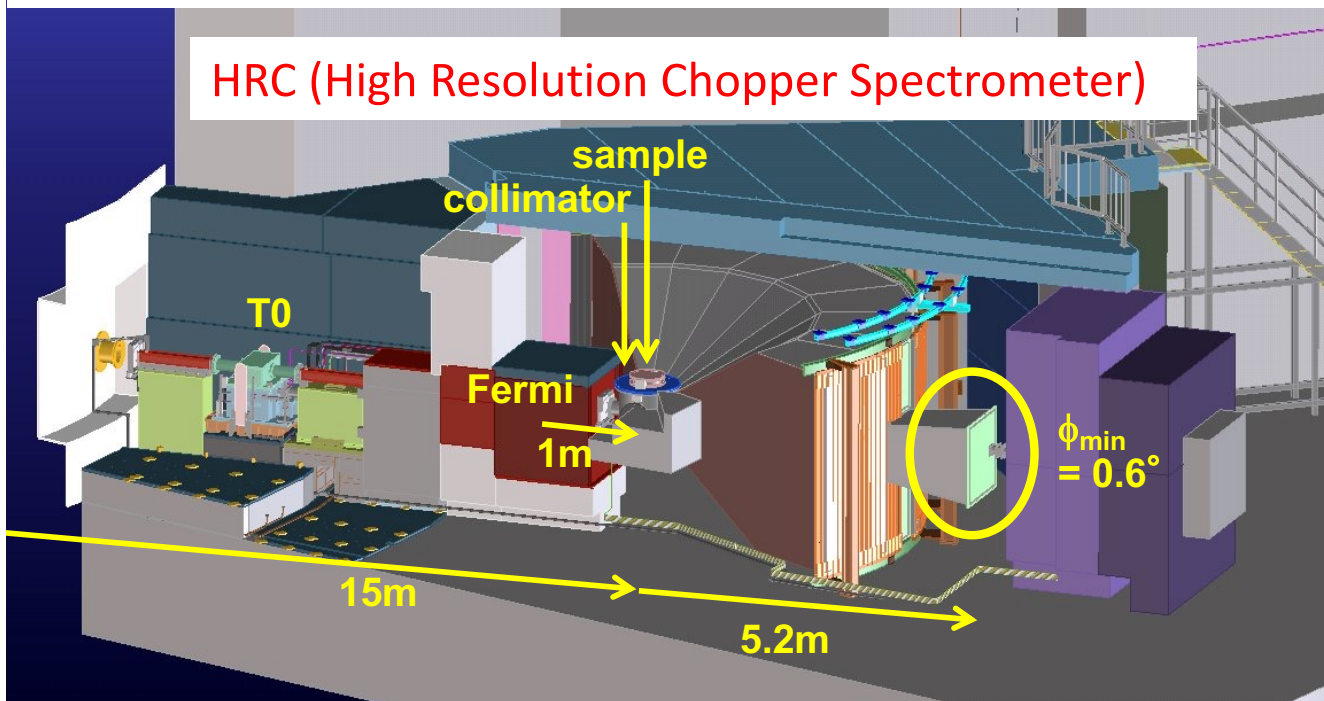
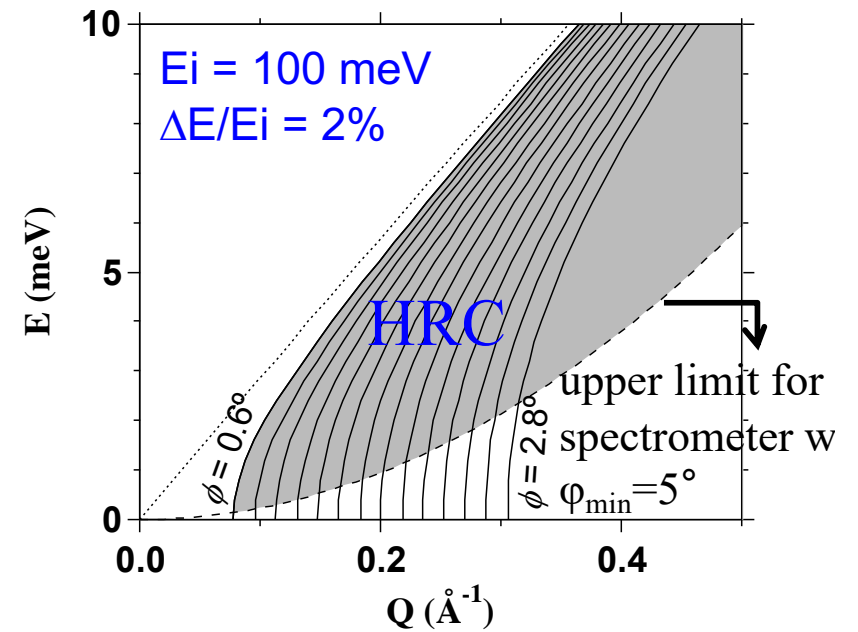
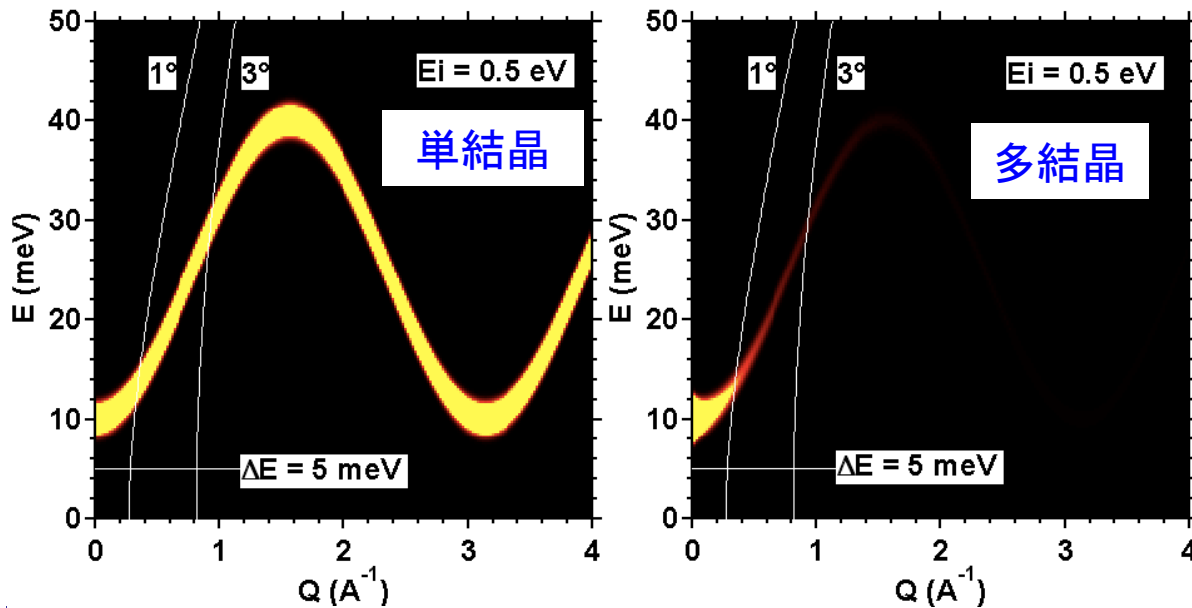


中性子ビームライン

高分解能チョッパー分光器HRCによる 中性子非弾性散乱実験

1. 中性子非弾性散乱
2. 高分解能チョッパー分光器HRC
3. HRCの構成機器
4. 中性子ブリルアン散乱
5. おわりに

HRCにおける中性子ブリルアン散乱実験



HRC :

Low angle down to 0.6°

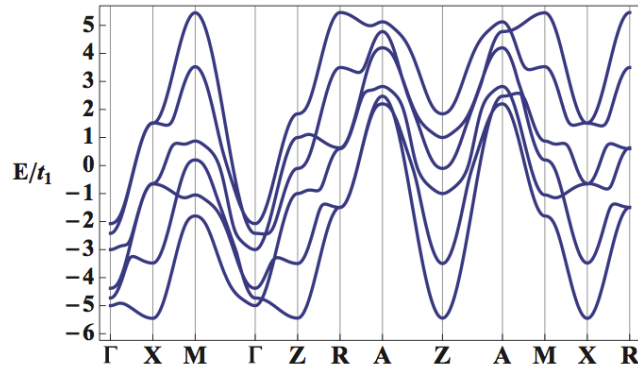
High energy $E_i = 0.1 - 0.3 \text{ eV}$

High resolution $\Delta E/E_i = 2\%$

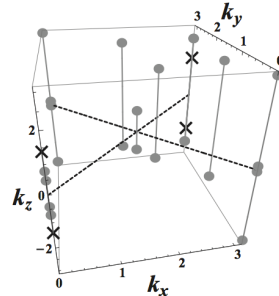
多結晶、粉末、非晶質、液体の(000)近傍でのスピン波や格子振動

金属強磁性体SrRuO₃におけるワイルフェルミオン

S. Itoh, Y. Endoh, T. Yokoo, S. Ibuka, J.-G. Park, Y. Kaneko, K. S. Takahashi, Y. Tokura, N. Nagaosa, Nature Communications 7, 11788 (2016).

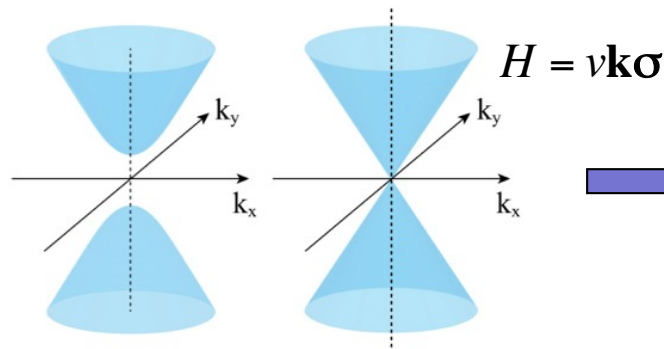
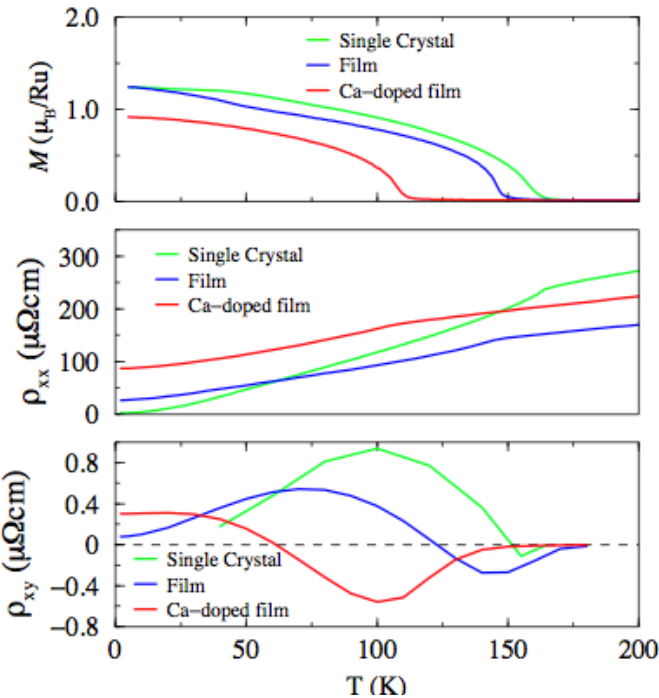


Y. Chen et al., PRB 88 (2013) 125110.

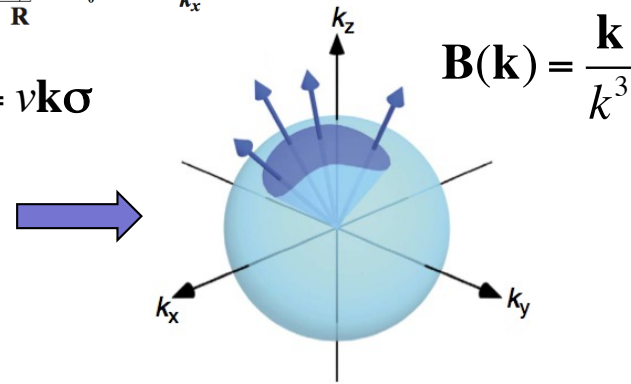


第1ブリルアンゾーンに22組のモノポールと反モノポールの対がある

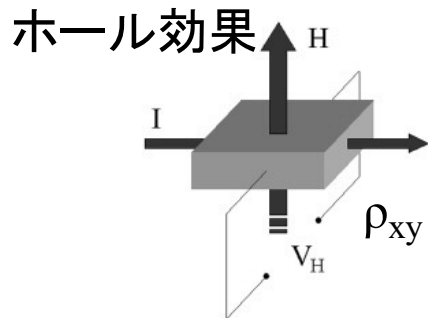
Z. Fang et al., Science 302 (2003) 92.



スピン軌道相互作用によるバンド交差 (Weyl fermion)



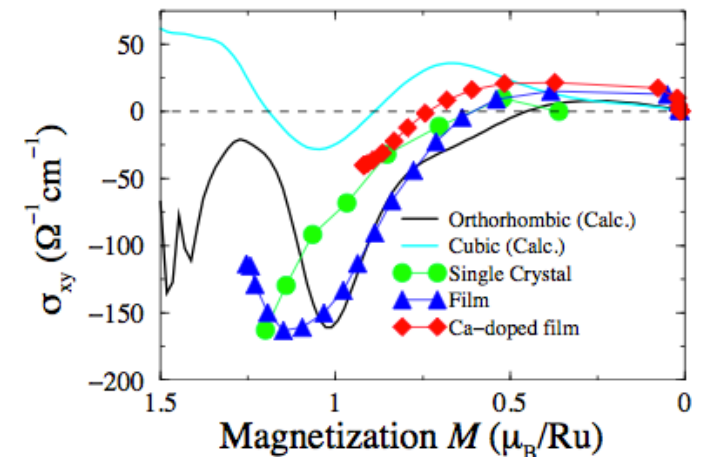
運動量空間におけるモノポール: 仮想磁場(ベリー曲率)



$$\rho_{xy} = V_y / I_x = R_0 H$$

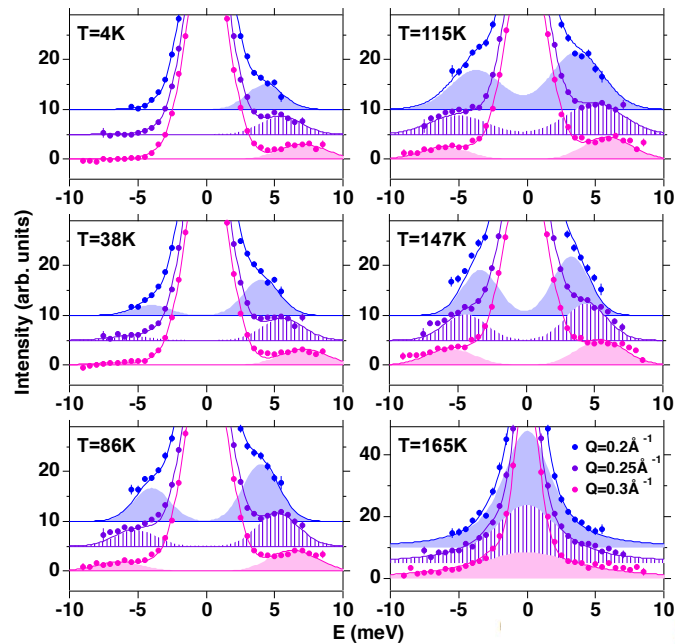
異常ホール効果
強磁性体: $\rho_{xy} = R_0 H + R_s M$

$$\sigma_{xy} = \frac{e^2}{\hbar L^2} \sum_{\mathbf{k}, n} f(E_{n\mathbf{k}}) B_{n,z}(\mathbf{k})$$

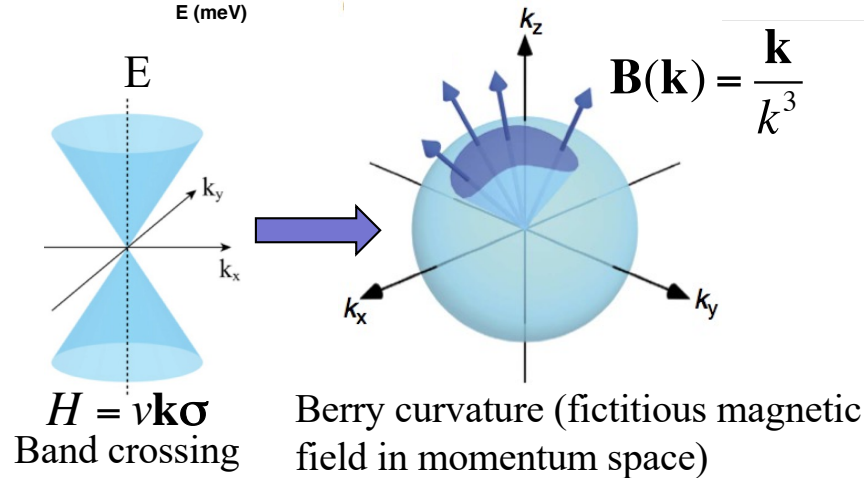
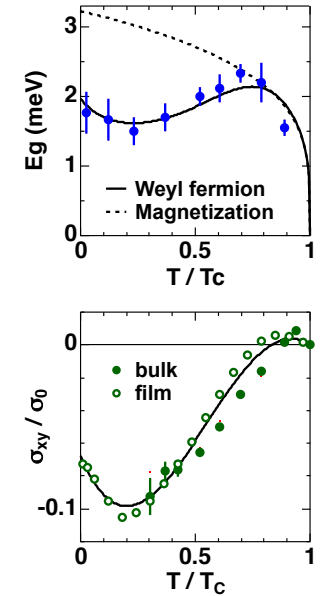
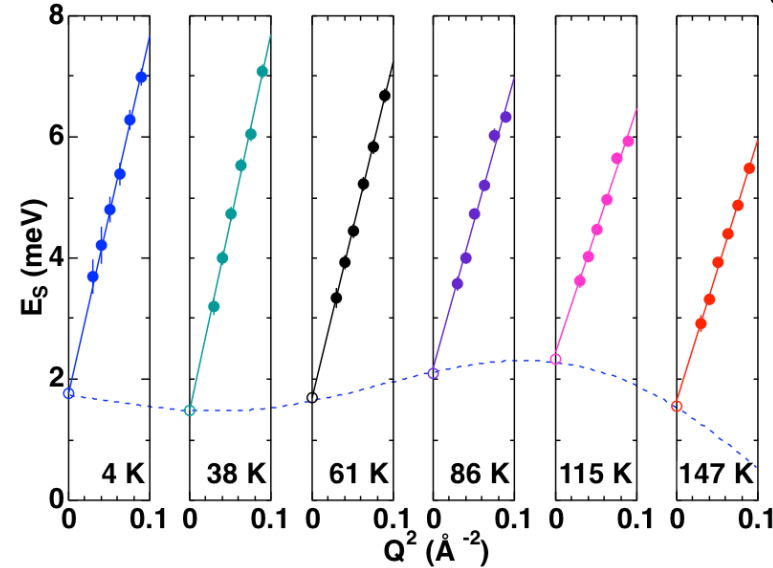


金属強磁性体SrRuO₃におけるワイルフェルミオン

S. Itoh, Y. Endoh, T. Yokoo, S. Ibuka, J.-G. Park, Y. Kaneko, K. S. Takahashi, Y. Tokura, N. Nagaosa, Nature Communications 7, 11788 (2016).



Spin wave energy $E(Q) = DQ^2 + E_g$

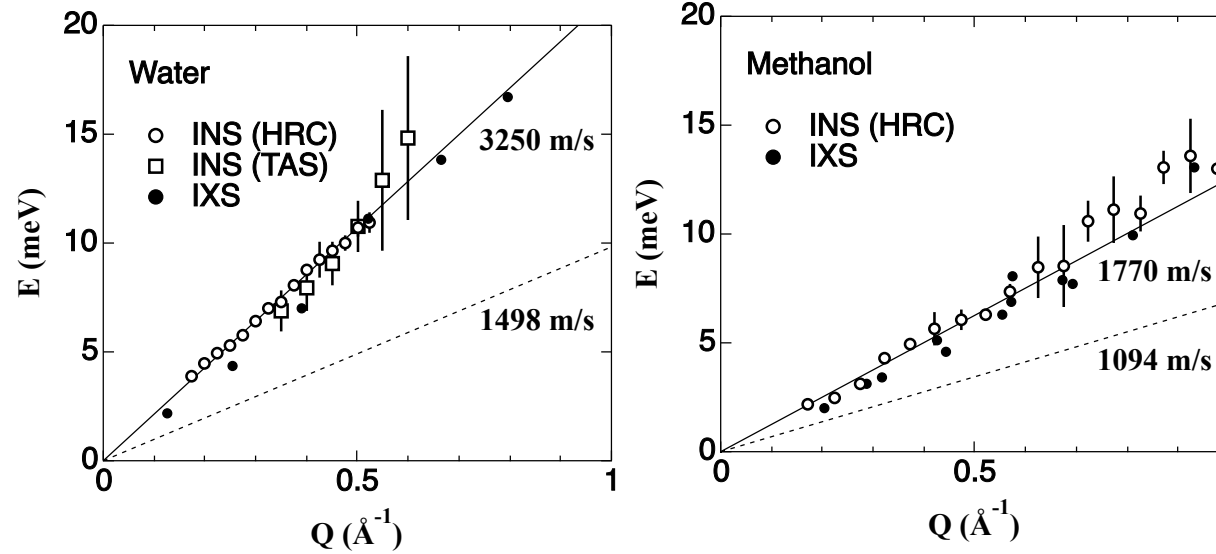


$$E_g(T) = \frac{a(M(T)/M_0)}{1 + b(M(T)/M_0)(\sigma_{xy}(T)/\sigma_0)}$$

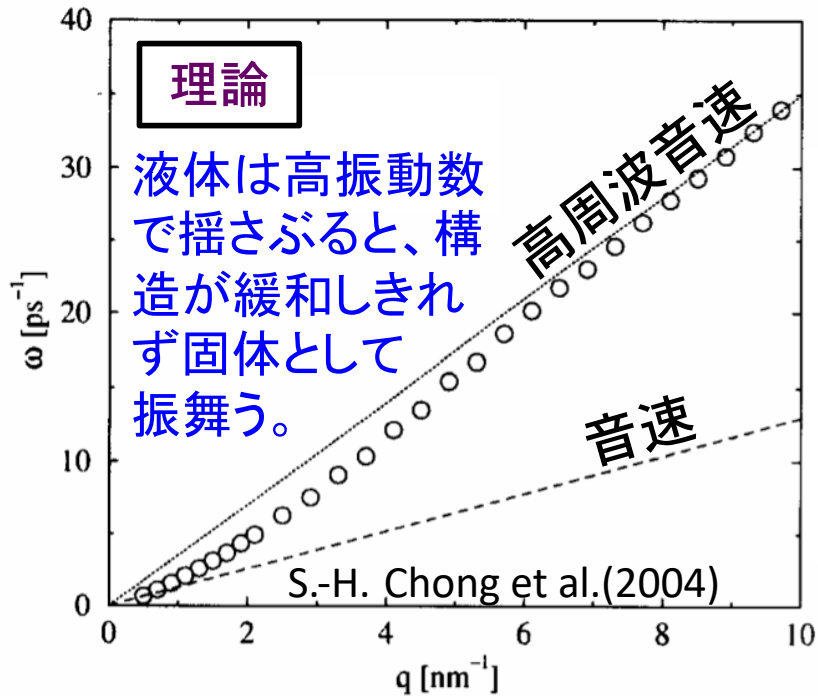
$$\sigma_{xy} = \frac{e^2}{\hbar L^2} \sum_{\mathbf{k}, n} f(E_{n\mathbf{k}}) B_{n,z}(\mathbf{k})$$

電子の波動関数の位相(ベリー位相)によって生じる仮想的磁場が中性子非弾性散乱の観測量であることを示した。

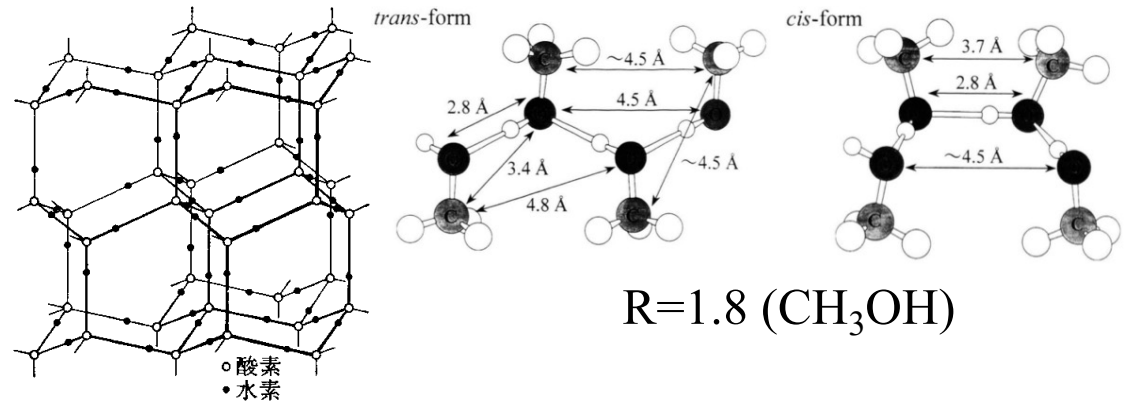
液体のネットワーク構造



Neutron: K. Yoshida, T. Yamaguchi, T. Yokoo, S. Itoh, J. Molecular Liquids 222 (2016) 395,
X-ray: T. Yamaguchi et al., J. Phys. Chem. Sol. 66 (2005) 2246; K. Yoshida et al., Chem. Phys. Lett. 440 (2007) 210.



高周波音速と音速の比(R)は液体のネットワーク構造による



R=1.3 for CCl₄*, (CH₃)₂CO, C₆H₆
*T. Kamiyama, et al., JPSJ73, 1615 (2004)

中性子ビームライン

高分解能チョッパー分光器HRCによる 中性子非弾性散乱実験

1. 中性子非弾性散乱
2. 高分解能チョッパー分光器HRC
3. HRCの構成機器
4. 中性子ブリルアン散乱
5. おわりに