

中性子光学(NOP)

極冷中性子用干渉計の設計

2010/3/23

東北大学 鈴木善明

佐貫智行

京都大学 北口雅暁

KEK 清水裕彦

And NOP Collaboration

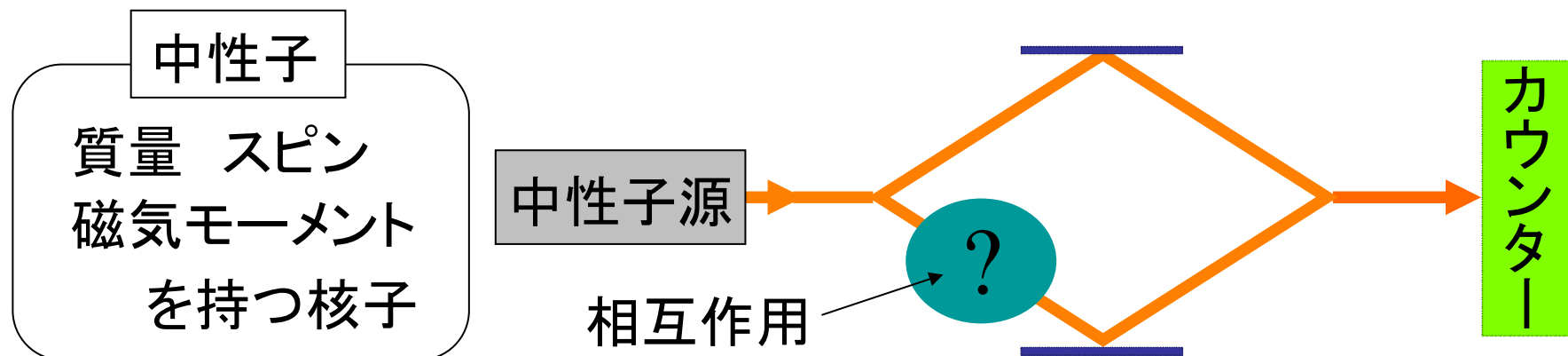
目次

- ◆イントロダクション
- ◆素子のアライメント要求精度
- ◆アライメント機構
- ◆まとめとプラン

中性子干渉計

- 中性子も波動性を持ち、干渉計を組むことが可能

中性子のド・ブロイ波長 $\lambda_n = \frac{2\pi}{k} = \frac{h}{p}$



中性子干渉計
重力、スピン
磁気相互作用 核力
の測定

更なる高感度化によって新物理発見の可能性も

量子パラメータ共鳴を利用した未知短距離相互作用 (nmスケール) の探索etc.

中性子干渉計

- 中性子干渉計で2経路の間に生じる位相差 $\Delta\phi$

$$\Delta\phi = 2\pi \frac{m_n \lambda_n L}{h^2} \Delta E$$

m_n : 中性子質量、 λ_n : 中性子波長、
 L : 相互作用する経路の長さ、 ΔE : 相互作用の差




- より波長の長い中性子の利用
- 干渉計の大型化



極冷中性子の利用

極冷中性子

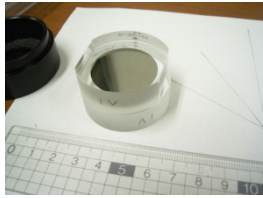


名称	エネルギー	波長	速度	温度	応用
高速中性子	500 keV 以上	40 fm	10^7 m/s	6×10^9 K	核物理、 宇宙物理
熱外中性子	10 eV	0.01 nm	44,000 m/s	1×10^5 K	共鳴吸収
熱中性子	25 meV	0.18 nm	2200 m/s	300 K	回折、干渉計
冷中性子	2 meV	0.6 nm	600 m/s	23 K	散乱、干渉計
極冷中性子 VCN	50 μ eV	4 nm	100 m/s	0.6 K	ラジオグラフィ
超冷中性子 UCN	300 neV	50 nm	8 m/s	3 mK	EDM、 中性子寿命

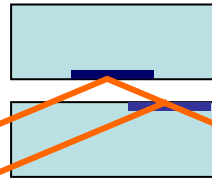
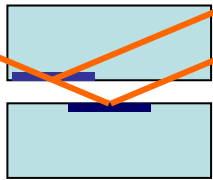
本研究ではILL(Institut Laue-Langevin)の
PF2-VCNビームライン(中心波長6nm)を想定

2タイプの干渉計

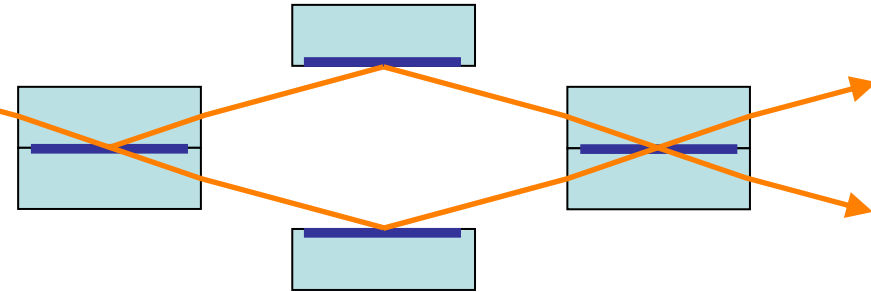
Jamin型



エタロン



Mach-Zehnder型



- 素子のアライメントが楽。

- 素子のアライメントが厳しい。
- 全体の形の自由度が大きい。
- ミラーを大きくはることができる。
- 2経路を大きく分離できる。

可干渉長

可干渉長：干渉縞のコントラストが $1/e$ に落ちるような光路差

$$\sum_{l,t} (\sigma_{kl} L_l)^2 = 2$$

l: ビーム進行方向, t: 垂直方向

$L_{l,t}$: l,t方向の可干渉長, $\sigma_{kl,t}$: l,t方向の波数の分散

干渉計の2経路の光路差が可干渉長を超えないように干渉計の素子をアライメントする必要がある。

- $L_t = 0$ の時の L_l 、 $L_l = 0$ の時の L_t をそれぞれ計算。
- 中心波長6nm、波長分布の幅(FWHM)5.3%を仮定。

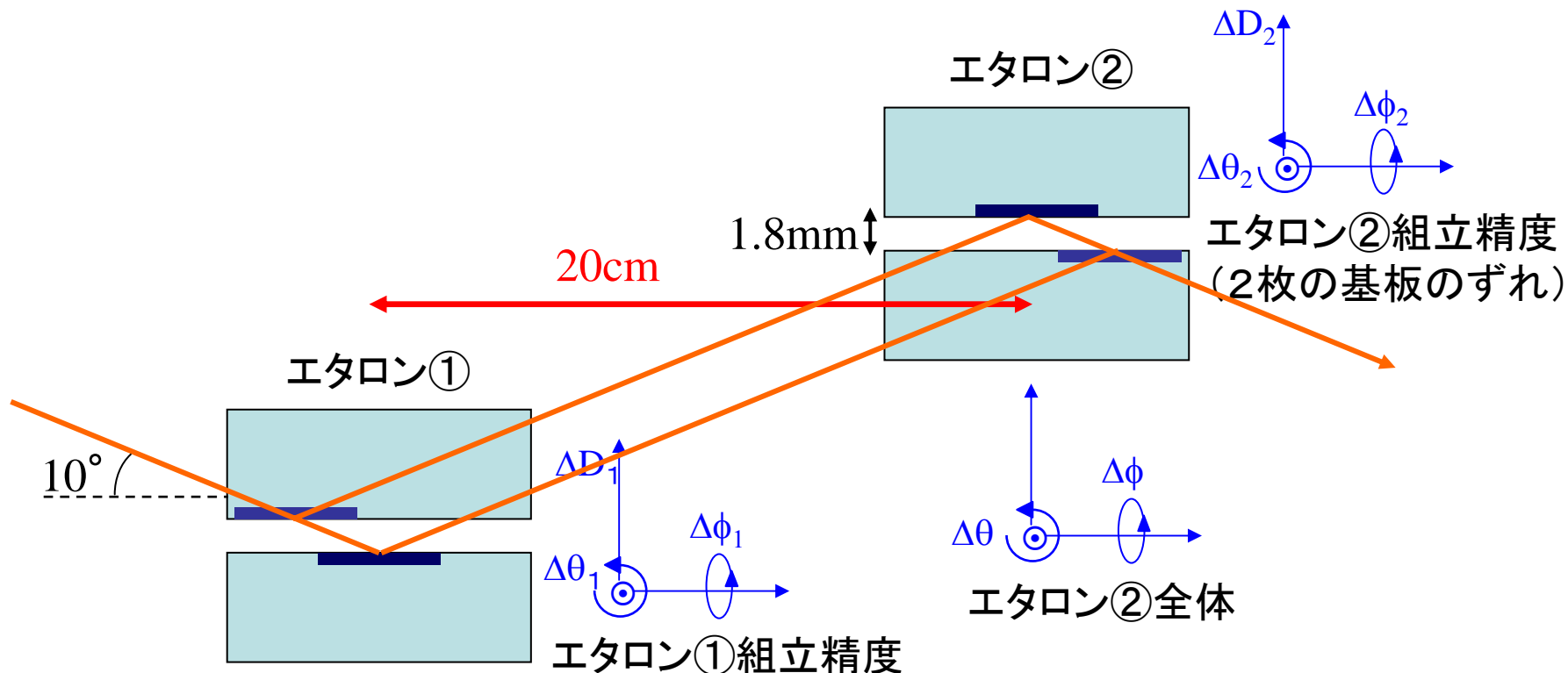
	L_l [m]	L_t [m]
Jamin	2.55×10^{-8}	8.96×10^{-7}
Mach-Zehnder	2.55×10^{-8}	4.03×10^{-7}

Jamin型のアライメント要求精度

エタロン組立精度
十分な精度の実績
がある。

エタロン①と②の相
対アライメント精度

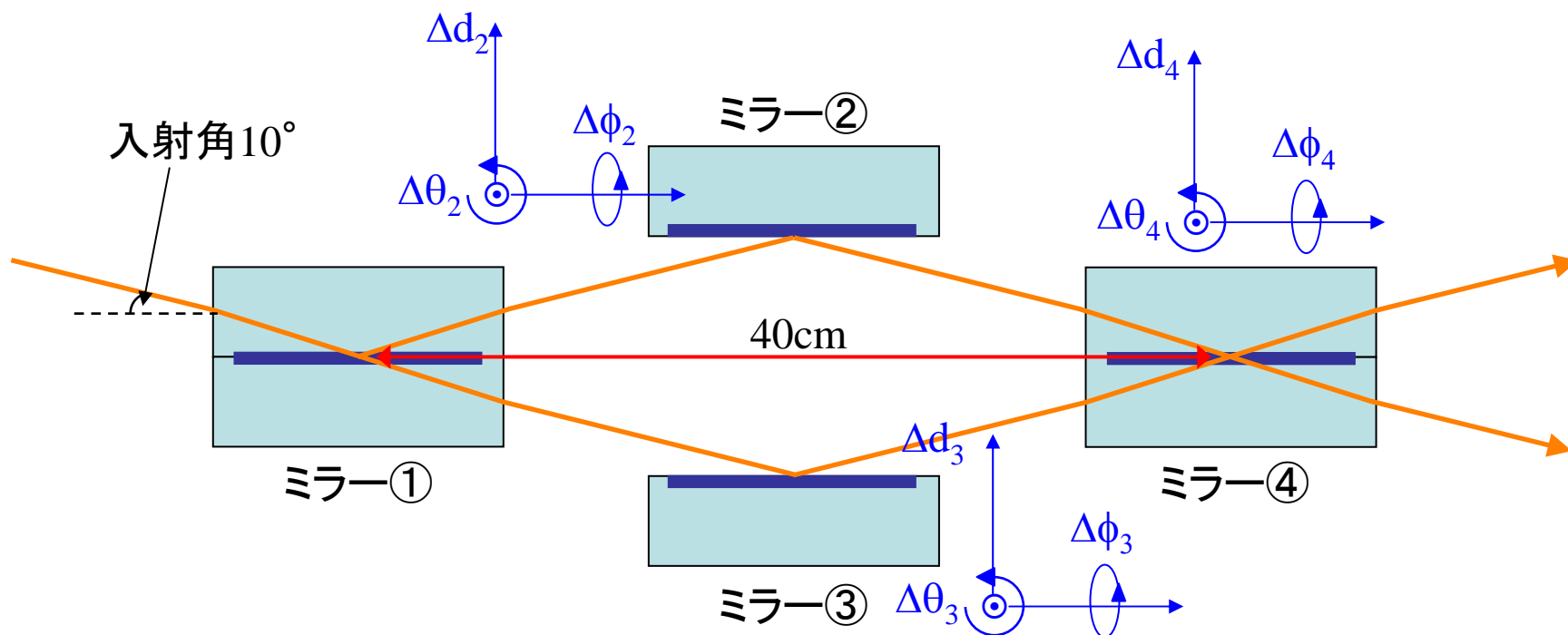
	エタロン①	エタロン②
$\Delta D_{1,2}$	$\pm 6.8 \times 10^{-8}$ [m]	$\pm 6.8 \times 10^{-8}$ [m]
$\Delta \theta_{1,2}$	$\pm 1.4 \times 10^{-6}$ [rad]	$\pm 1.9 \times 10^{-6}$ [rad]
$\Delta \phi_{1,2}$	$\pm 8.2 \times 10^{-6}$ [rad]	$\pm 1.1 \times 10^{-5}$ [rad]
$\Delta \theta$	$\pm 7.7 \times 10^{-6}$ [rad]	
$\Delta \phi$	$\pm 2.9 \times 10^{-4}$ [rad]	



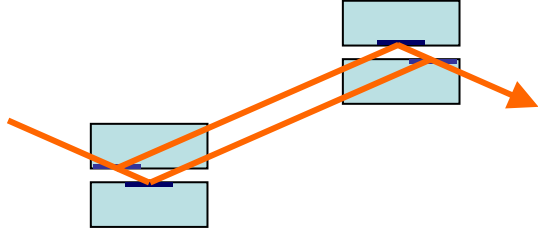
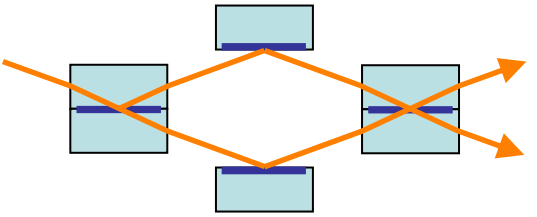
Mach-Zehnder型のアライメント要求精度

	ミラー②,③	ミラー④
Δd	$\pm 7.0 \times 10^{-8}$ [m]	$\pm 7.0 \times 10^{-8}$ [m]
$\Delta \theta$	$\pm 6.0 \times 10^{-7}$ [rad]	$\pm 6.0 \times 10^{-7}$ [rad]
$\Delta \phi$	$\pm 3.5 \times 10^{-6}$ [rad]	$\pm 3.5 \times 10^{-6}$ [rad]

← Challenge



最も厳しいアライメント要求精度のまとめ

	Jamin	Mach-Zehnder
		
位置(平行移動)		7.0×10^{-8} [m]
角度	7.7×10^{-6} [rad]	6.0×10^{-7} [rad]

- アライメントすべき素子数はJaminが2、Mach-Zehnderが4。
- 位置(平行移動)のアライメントは Jamin型は不要だが Mach-Zehnder型は必要。
- Mach-Zehnder型は角度のアライメントの要求精度がJamin型の10倍近く厳しい。

アライメントの方法

2経路の光路長を一致させるのは非常に難しい。

➡ 白色干渉法を利用して光路差を測定

- 波長(波数)分布幅が広い白色光を使用。
- 白色光は可干渉長が極端に短い。
- 光路差がその極端に短い可干渉長以下の時に強い干渉が起こる。

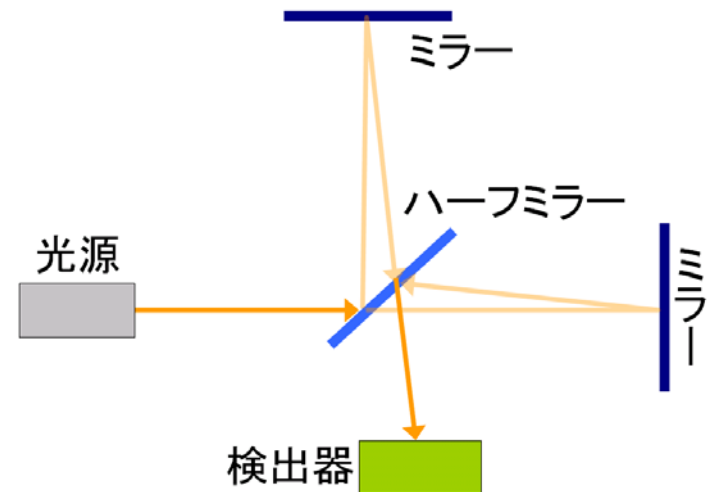
可干渉長

$$\sum_{l,t} (\sigma_{ki} L_i)^2 = 2$$

• Michelson型干渉計を利用して表面形状を探る装置として実用化されている

• 垂直方向分解能0.1nm~2nm

この手法を中性子干渉計にアライメント機構として導入する



Mach-Zehnder型干渉計への応用

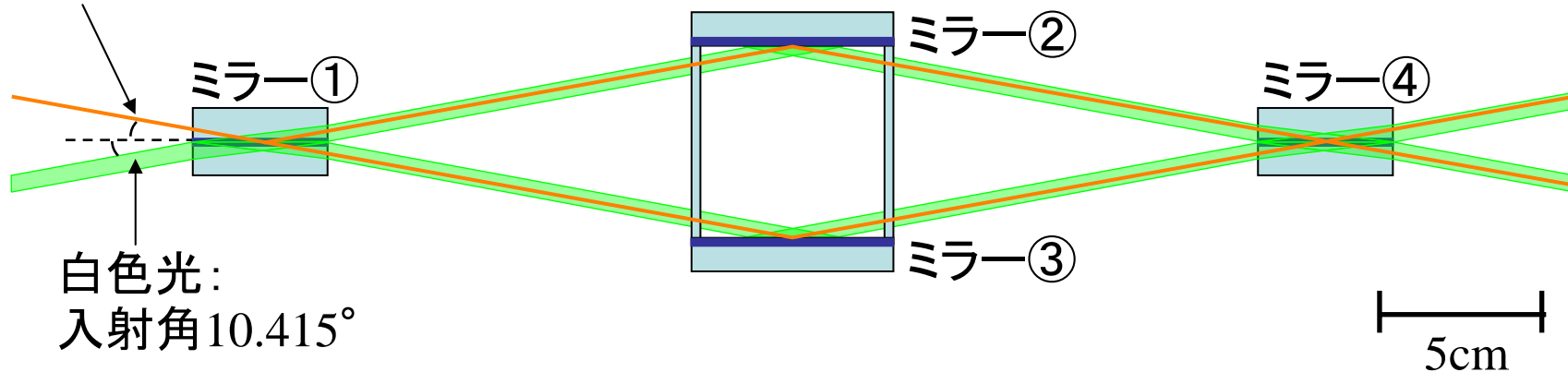
ミラーの基盤 (SiO_2) に対する屈折率

中性子	0.998
光	1.46



入射角を調整することでほぼ同じ経路を通すことが可能。

中性子:
入射角 10°



— 橙色の実線: 中性子の経路
— 緑色の帯: 白色光の経路

2経路の経路長の差を2nm以内で合わせられるはず

➡ 26nmの可干渉長に対して十分な精度が実現可能。

まとめとプラン

- Jamin型、Mach-Zehnder型について素子のアライメント要求精度を計算した。
- Mach-Zehnder型は経路のアレンジのしやすさはあるが、アライメント要求精度が厳しいことが分かった。
- Mach-Zehnder型のアライメント要求精度を満たすために白色干渉法を用いたアライメント機構を考案し、M-Z型極冷中性子干渉計実現の可能性を示した。
- 今後は白色干渉法を用いたアライメント機構の有用性を実機で示し、長波長のVCN干渉計を実現する。

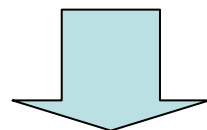
Back Up

複数のパラメータが動く場合

アライメントの要素を直動と回転の2つで考察。

直動と回転の精度のペアを決める。

➡ その精度で各パラメータを動かす ➡ ガウス分布 3σ

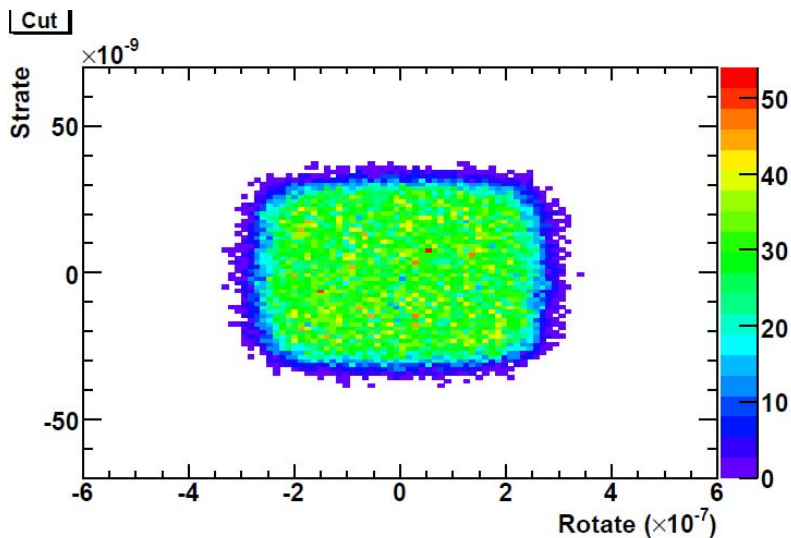
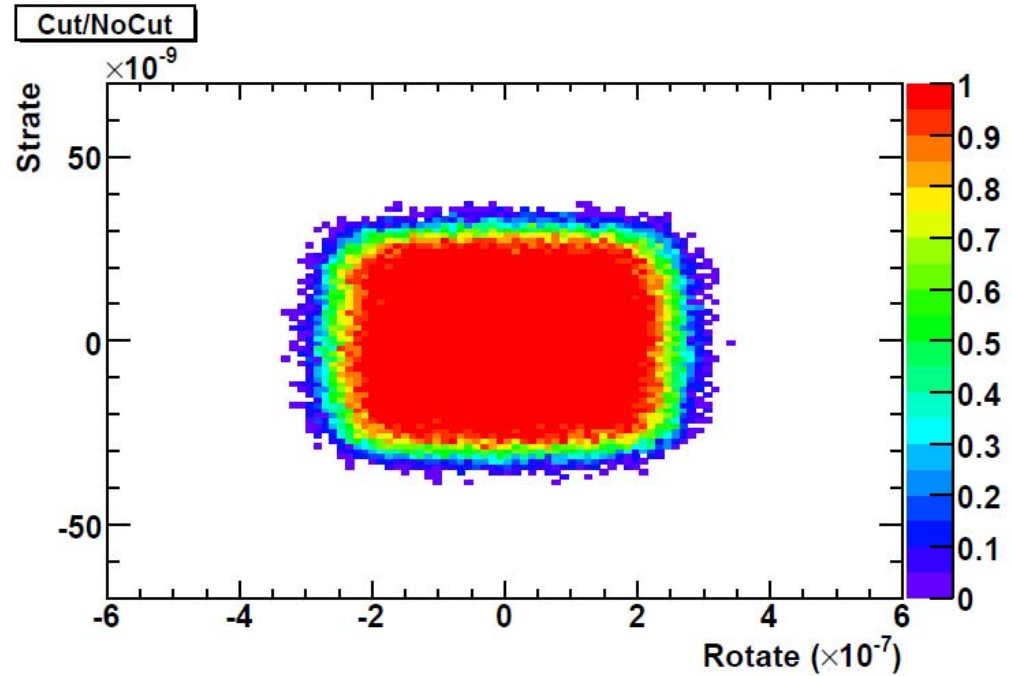
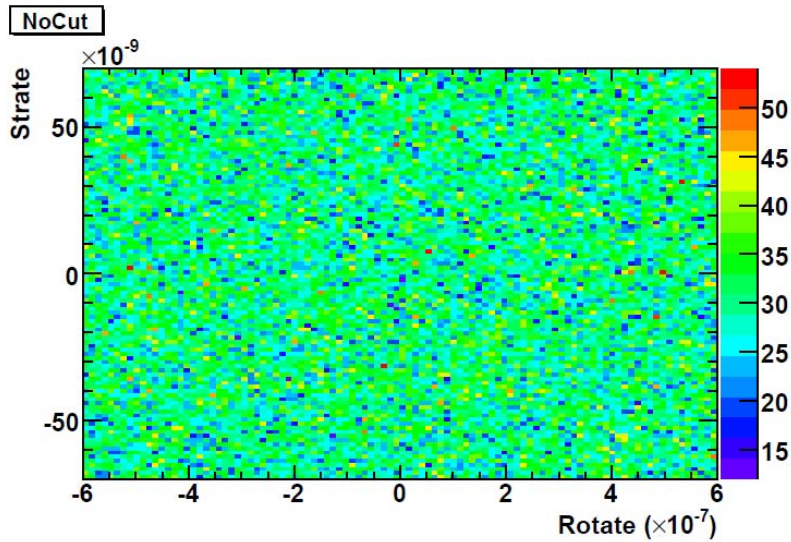


多数の直動と回転の精度のペアに

光路差 $<$ 可干渉長

のカットをかける。

Mach-Zehnder型



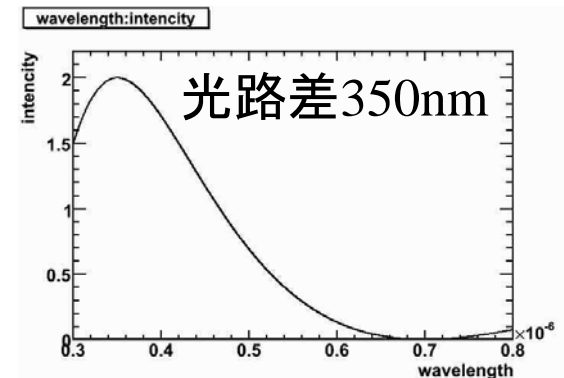
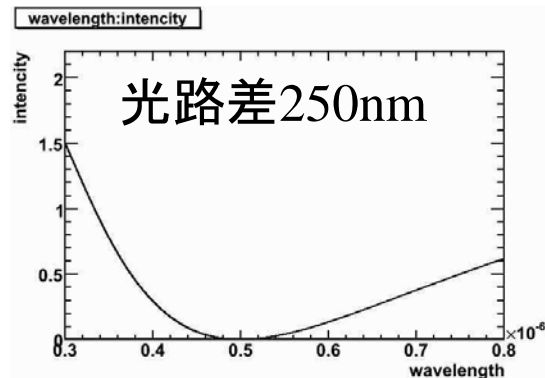
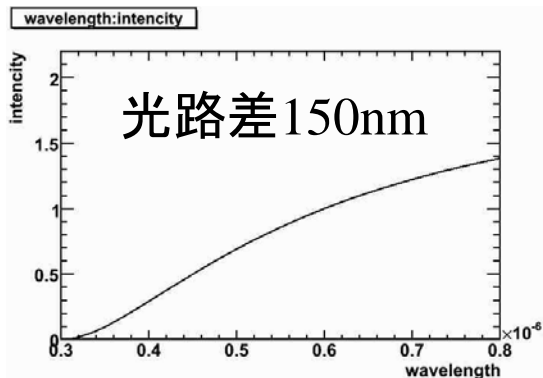
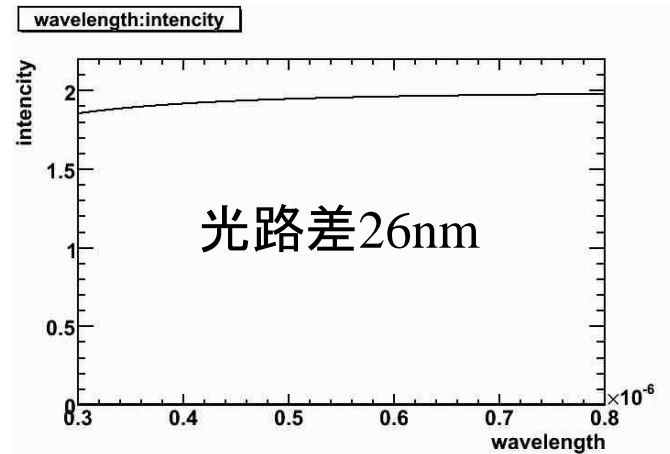
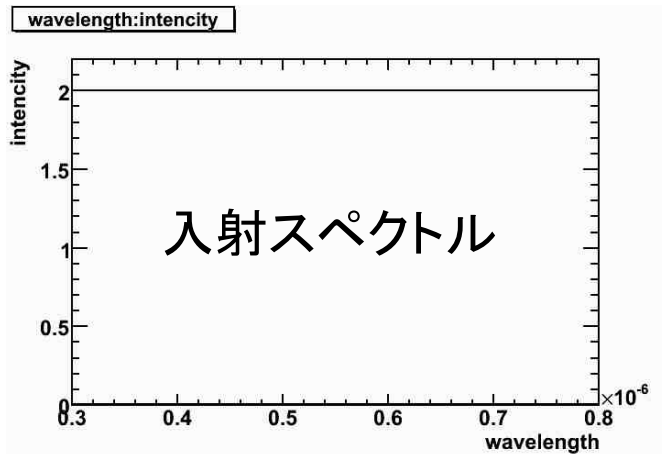
直動 $< 3.0 \times 10^{-8}$ [m]

回転 $< 2.5 \times 10^{-7}$ [rad]

白色干渉

検出されるスペクトル $\propto |f(\lambda)|^2 (1 + \cos(\frac{2\pi}{\lambda} \Delta L))$

$f(\lambda)$: 入射スペクトル

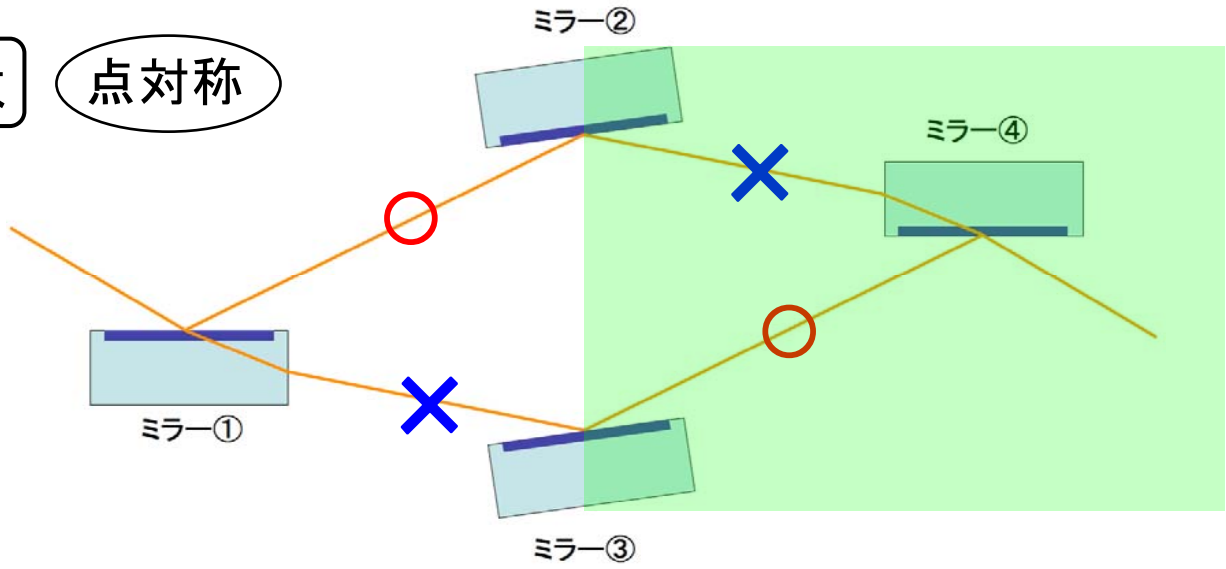


M-Z:4枚基板と6枚基板

Mach-Zhender型はミラー4枚をそれぞれアライメントすればよいので基板4枚で組めるが、最初と最後のハーフミラーは基板2枚でミラーをはさんだエタロン型のミラーを使ったほうが利点が多い。それについて考察する。

基板4枚

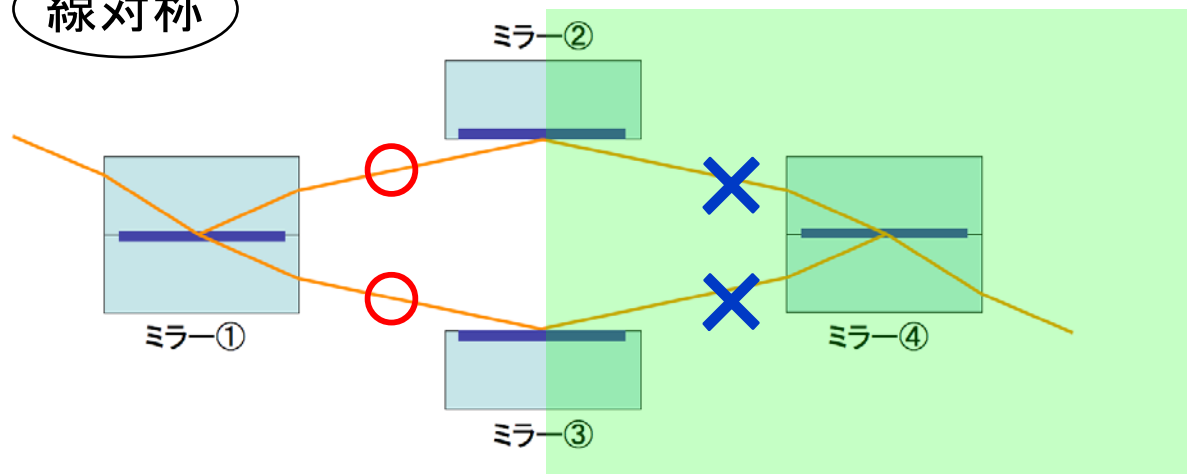
点対称



○ 同士、 × 同士が上と下の経路で対象になる部分

基板6枚

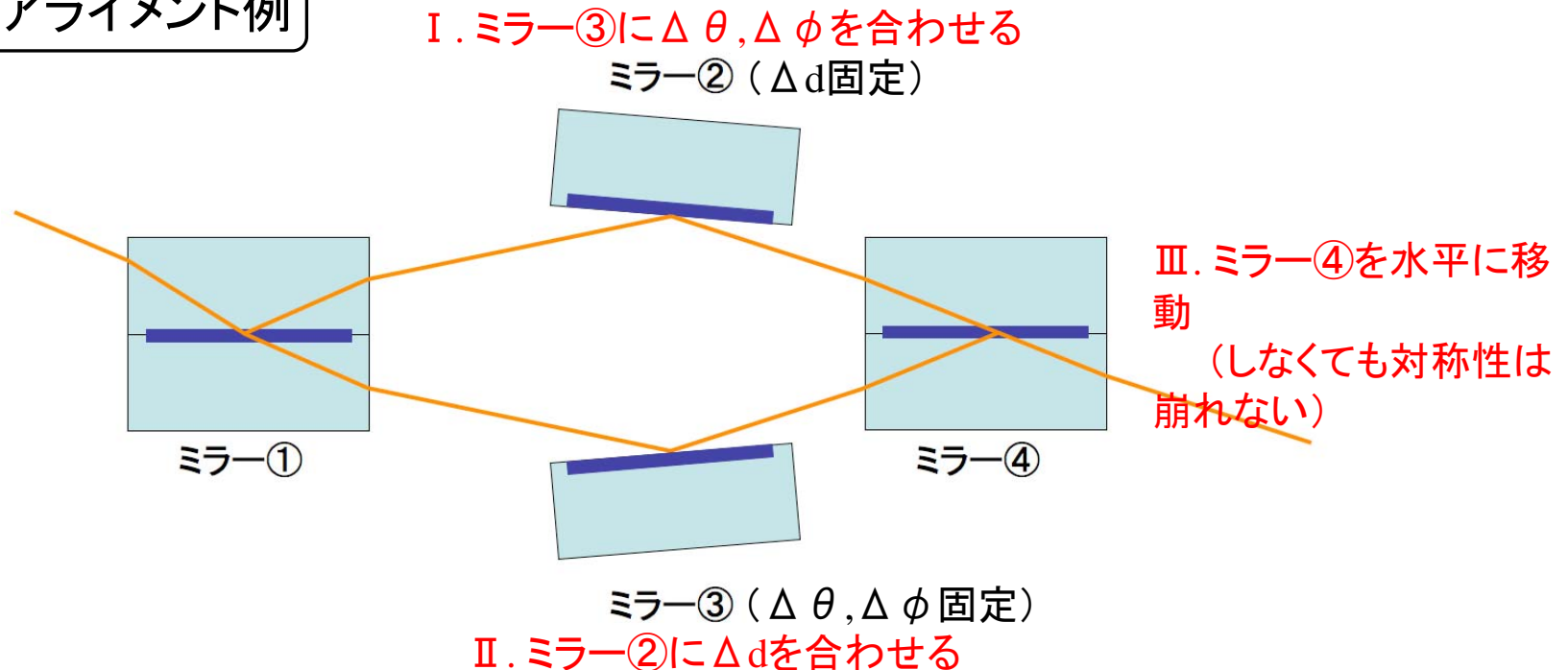
線対称



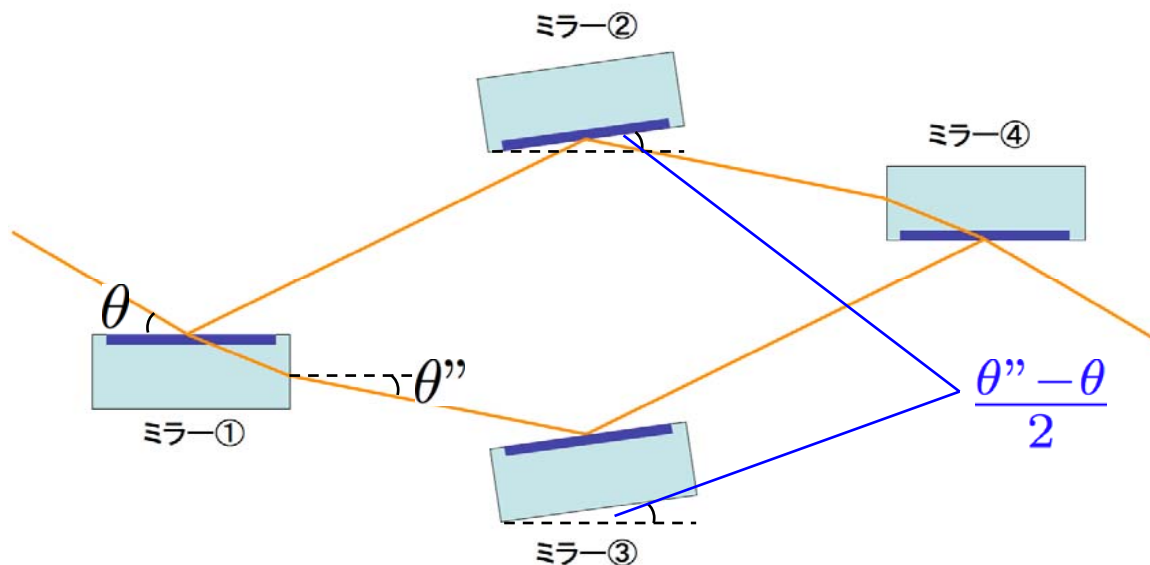
ミラー②、③のアライメントで
変化する部分

基板4枚だと完全に対称になる形(光路差、ビーム分離、交差角が0)となるのは1通りだけで、全てのパラメータを制御する必要がある。一方で、基板6枚なら上下のパスが線対称になっているため、ミラー②、③が対象になってさえいけばよい。そのため、極端な例では、片方のミラーを完全に固定して、もう片方のミラーをそれに合わせてアライメントすれば対称な形に出来る。

アライメント例



基板4枚(点对称型)の弱点

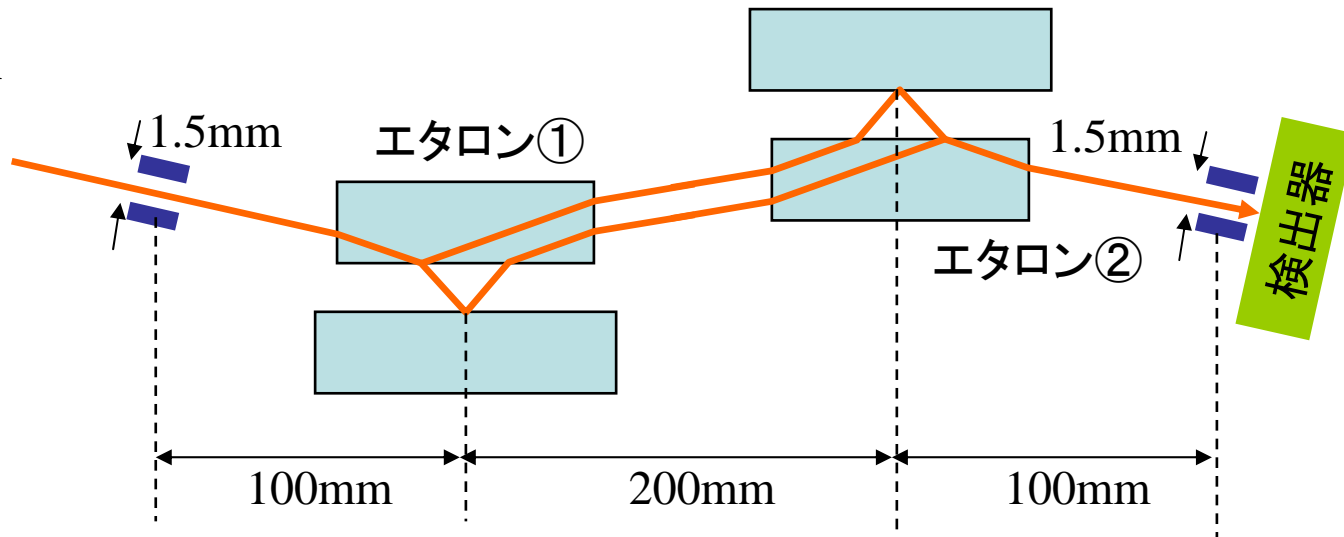


ミラー②、③の基準の位置は入射角、屈折率に依存する。そのため入射角のずれとミラーの位置のずれは等価であり、ビームの発散によって入射角がばらつくものにはむかない。また同じ系でレーザーを入射させる場合も、屈折率の違いがミラーの位置のずれと等価であり、干渉させるのは難しい。

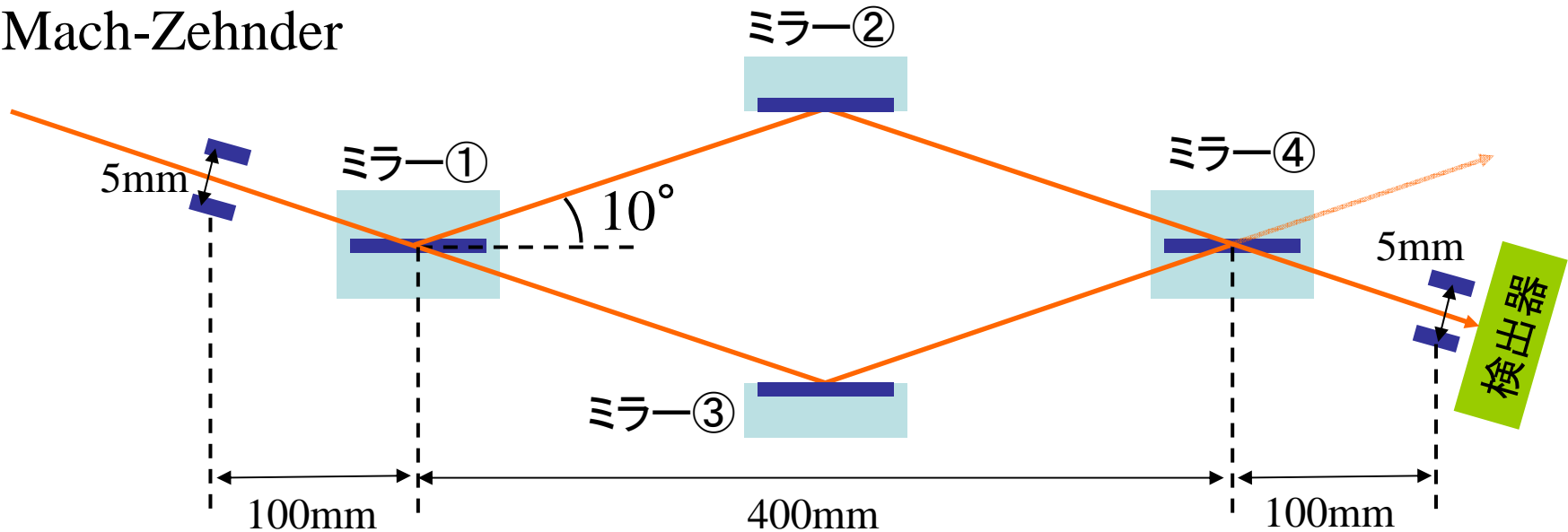
一方で、基板6枚(線対称型)ではミラー①の平面に対して②、③が対称でさえあればよく、入射角、屈折率に依存しないのでこの問題は生じない。

全体のセットアップ

Jamin

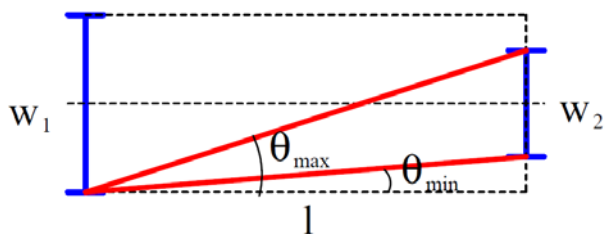


Mach-Zehnder

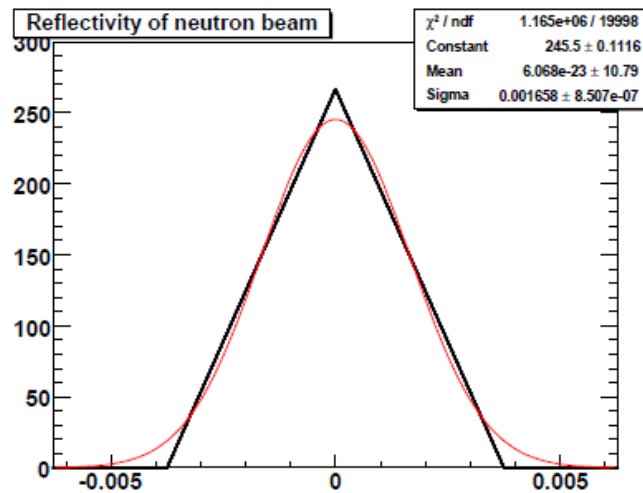
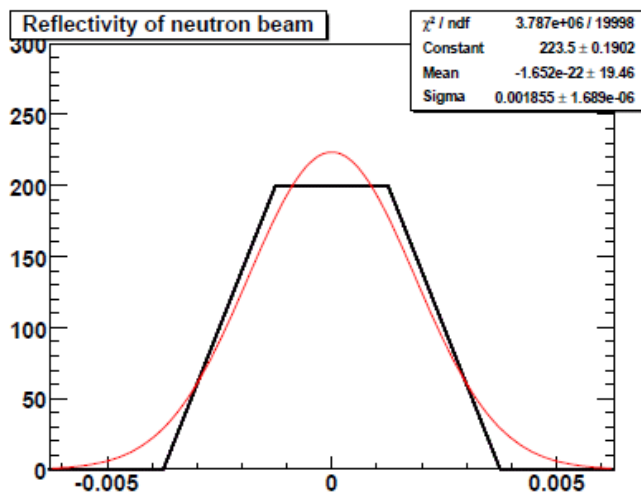


ビーム発散角

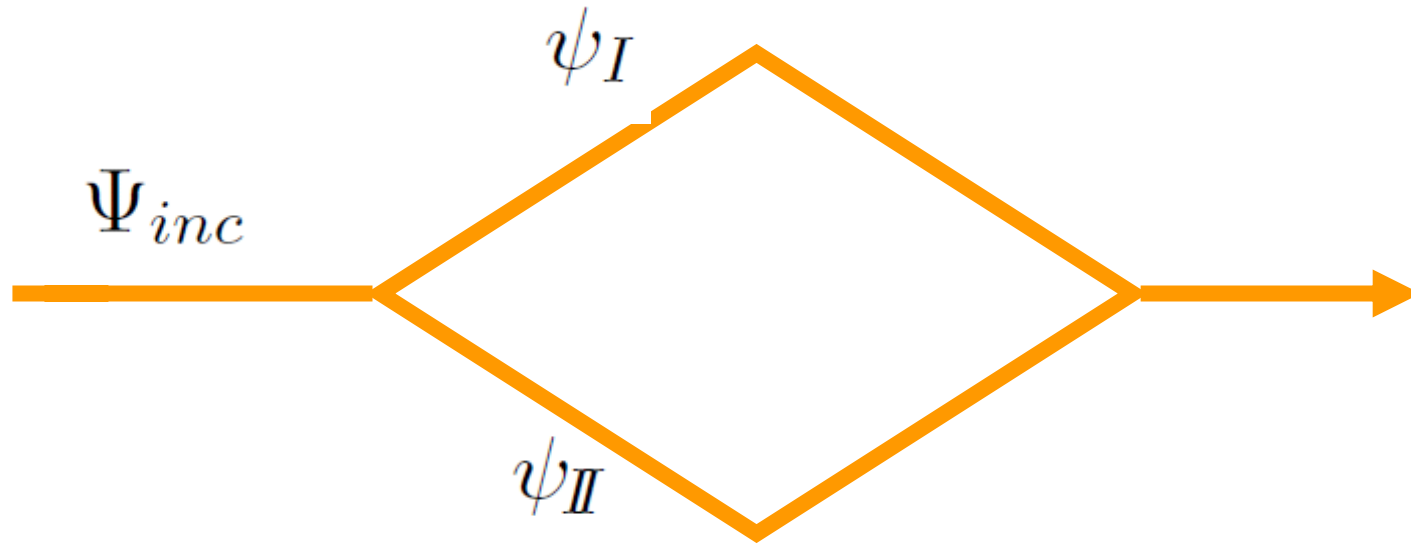
ビームは、Niのガイド管の臨界角内で大きく発散しながら出てくるため、スリットによって発散角が決まる。



$$\begin{cases} f(\theta) = aw_2 & (|\theta| \leq \theta_{min}) \\ f(\theta) = a \left(\frac{1}{2}(w_1 + w_2) - l|\theta| \right) & (\theta_{min} \leq |\theta| \leq \theta_{max}) \\ f(\theta) = 0 & (\theta_{max} \leq |\theta|) \end{cases}$$



中性子干渉



$$\Psi_{inc} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int g(k) \cdot e^{i(kx - \omega t)} dk,$$

$$g(k) \equiv \frac{1}{(2\pi\sigma_k^2)^{1/4}} \exp\left\{-\frac{(k - k_0)^2}{2(\sqrt{2}\sigma_k)^2}\right\}$$

2経路間の位相差

$$\phi(k, \xi) \sim \phi_0(\xi) + L_0(\xi) \cdot (k - k_0)$$

$$\phi_0(\xi) \equiv \phi(k_0, \xi), \quad L_0(\xi) \equiv \left. \frac{\partial \phi(k, \xi)}{\partial k} \right|_{k=k_0}$$

中性子干涉

$$\Psi_{sup} = \frac{N}{\sqrt{(\sqrt{2}\sigma_{x0})^2 + i\frac{\hbar}{m_n}t}} e^{i(k_0x - \omega_0t)}$$
$$\times \left\{ a'_I \exp \left\{ -\frac{(x - v_g t)^2}{2((\sqrt{2}\sigma_{x0})^2 + i\frac{\hbar}{m_n}t)} \right\} + a'_{II} e^{i\phi_0\xi} \exp \left\{ -\frac{((x + L_0(\xi)) - v_g t)^2}{2((\sqrt{2}\sigma_{x0})^2 + i\frac{\hbar}{m_n}t)} \right\} \right\}$$

$$I(\xi) = \int |\Psi_{sup}|^2 dx$$
$$= (a'_I{}^2 + a'_{II}{}^2) + 2a'_I a'_{II} \exp \left\{ -\frac{(2\pi)^2}{4} \left(\frac{\sqrt{2}\sigma_k}{k_0} \frac{L_0(\xi)}{\lambda_0} \right)^2 \right\} \cos(\phi_0(\xi))$$