

中性子干渉計の高感度化の研究

2010/2/2

東北大学大学院理学研究科

物理学専攻

鈴木 善明

目次

- ◆イントロダクション
- ◆干渉計による新物理
- ◆中性子干渉計用ミラーの設計
- ◆ミラーのアライメント機構
- ◆まとめとプラン

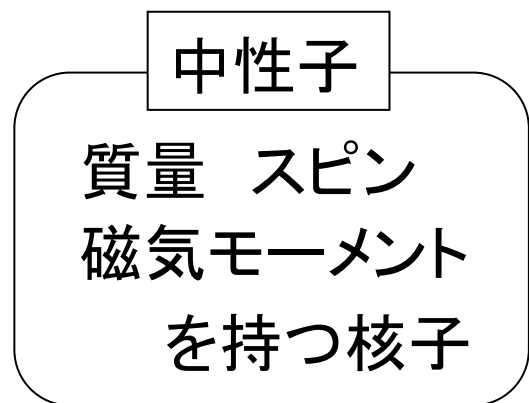
目次

- ◆イントロダクション
- ◆干渉計による新物理
- ◆中性子干渉計用ミラーの設計
- ◆ミラーのアライメント機構
- ◆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 $\lambda_n = \frac{2\pi}{k} = \frac{h}{p}$



中性子源

相互作用

カウンター

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



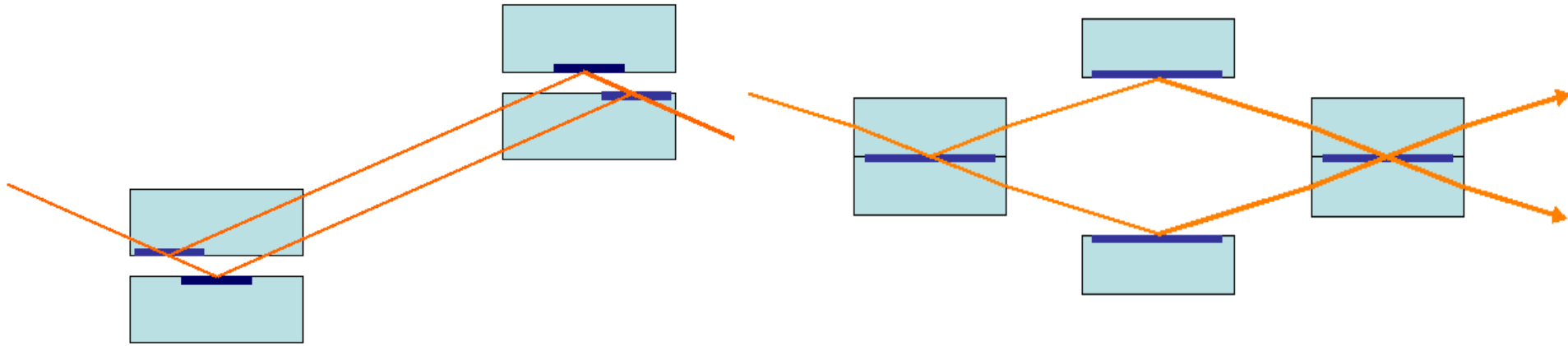
名称	エネルギー	波長	速度	温度	応用
高速中性子	500 keV 以上	40 fm	10^7 m/s	6×10^9 K	核物理、 宇宙物理
熱外中性子	10 eV	0.01 nm	44,000 m/s	1×10^5 K	共鳴吸収
熱中性子	25 meV	0.18 nm	2200 m/s	300 K	回折、干渉計
冷中性子	2 meV	0.6 nm	600 m/s	23 K	散乱、干渉計
極冷中性子 VCN	50 μ eV	4 nm	100 m/s	0.6 K	ラジオグラフィ
超冷中性子 UCN	300 neV	50 nm	8 m/s	3 mK	EDM、 中性子寿命

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

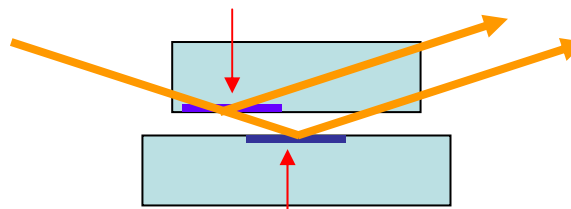
Jamin型

Mach-Zehnder型



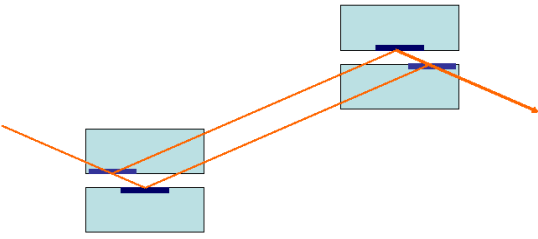
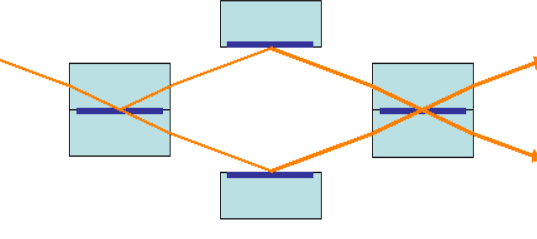
ビームスプリッティングエタロン

ハーフミラー



全反射ミラー

特徴

	 Jamin	 Mach-Zehnder
素子数	2	4
アライメント自由度	2×2	3×4
ミラーサイズ	小	大
2経路の分離距離	小	大
全体の形の自由度	小	大



Jamin型の方が有利な点



Mach-Zehnder型の方が有利な点

目次

- ◆ イントロダクション
- ◆ 干渉計による新物理
- ◆ 中性子干渉計用ミラーの設計
- ◆ ミラーのアライメント機構
- ◆ まとめとプラン

短距離相互作用

- 未知の短距離相互作用が存在するとき、重力ポテンシャルが以下のように変更を受けると考えられる。

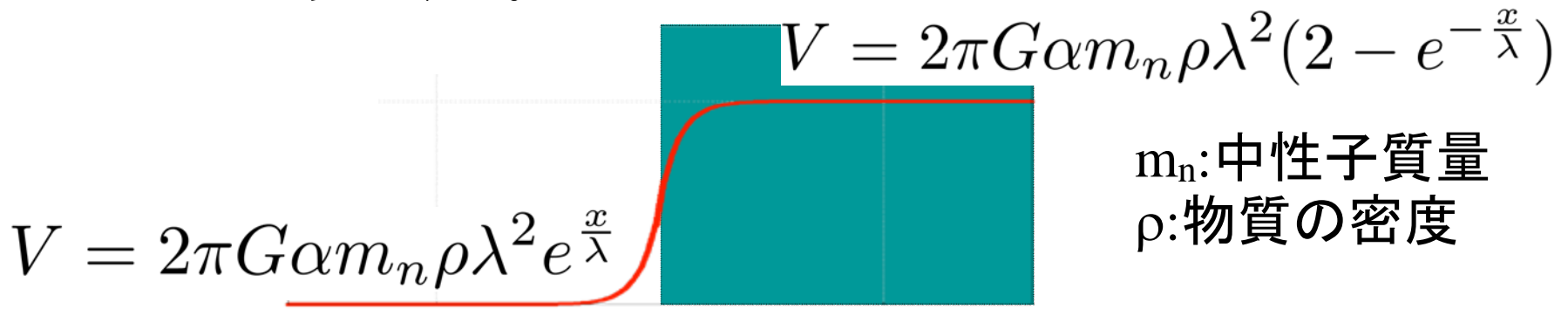
$$V(r) = -\frac{GMm}{r} (1 + \alpha e^{-r/\lambda})$$

G:重力定数、

M,m:相互作用する物質の質量

α :相互作用の強さ、 λ :有効距離

物質境界面で、有効距離 λ と同程度のスケールで滲み出すようなポテンシャルが発生する。

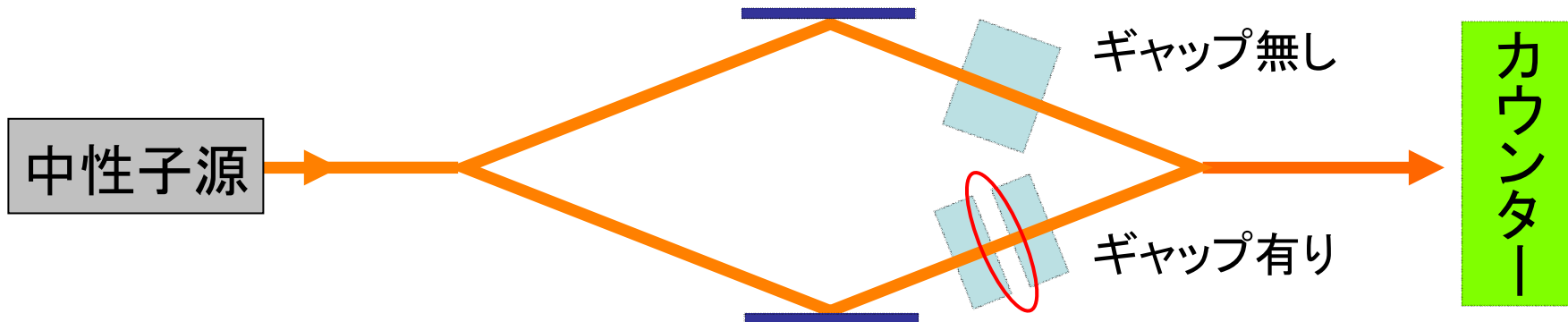


m_n :中性子質量

ρ :物質の密度

- 短距離での重力相互作用は0.1mm以下は未検証。
- Large Extra Dimensionなどが短距離相互作用の存在を予言。

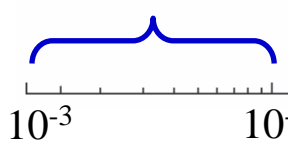
量子パラメータ共鳴実験



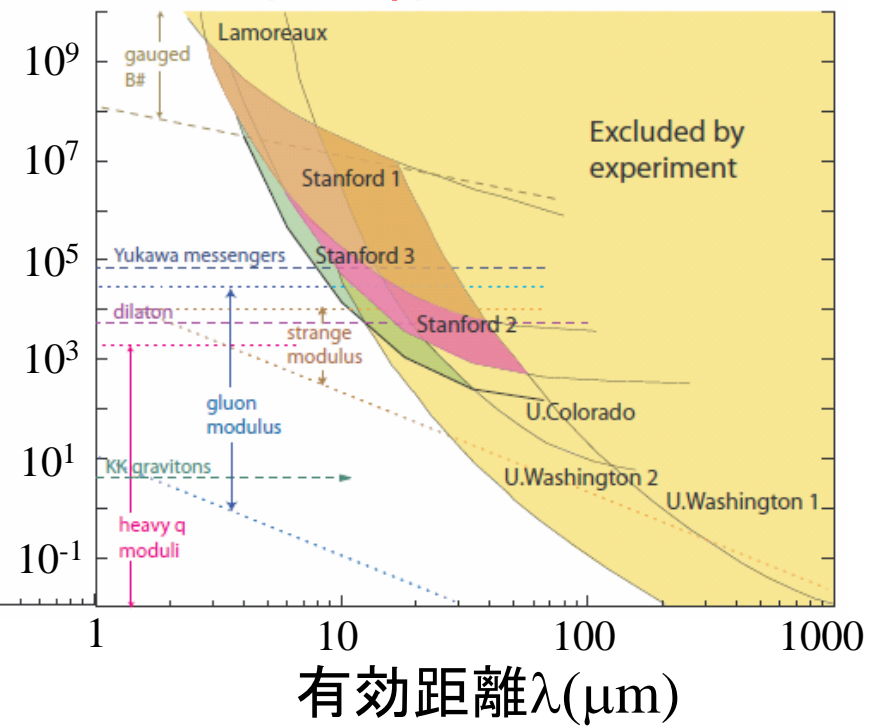
量子パラメータ共鳴による
位相の増進

出典: V.Gudkov, H.M.Shimizu, G.L.Greene,
arXiv:0709.3226 [hep-ph] (2007)

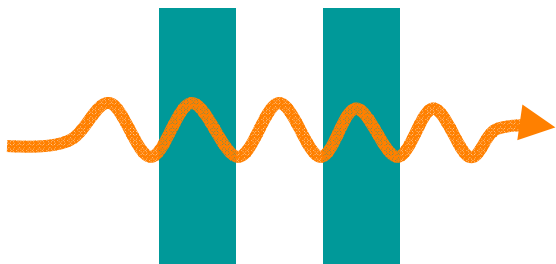
ターゲットとしている領域
(1~10nm)



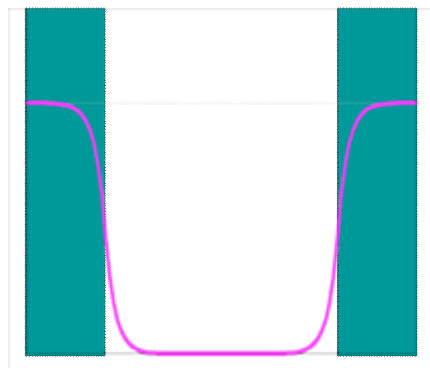
相互作用の強さ α



ギャップがある物質への入射



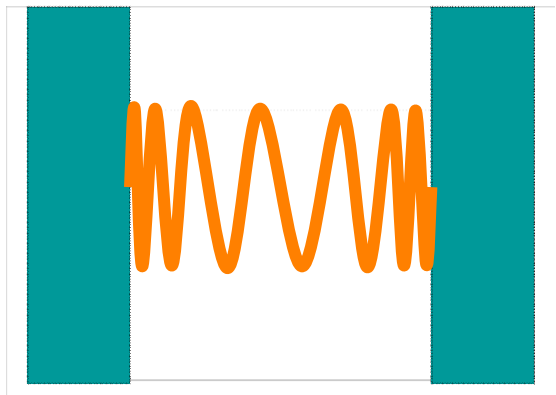
短距離力のポテンシャルによってギャップ部分での波数に変化



$$k^2 = k(x)^2 = k_0^2 \left\{ 1 + \eta \cosh\left(\frac{x}{\lambda}\right) \right\}$$

k_0 :真空中での波数 $\eta = 2a^2 e^{-\frac{L}{2\lambda}} / k_0^2$

L:ギャップの長さ



ギャップがある物質へ中性子波が入射した場合、短距離力のポテンシャルによってギャップ部での中性子波は境界面に近づくほど細くなる。

ギャップ部分での透過率

この系には、短距離力によるものではない、通常の井戸型ポテンシャルも存在する。短距離力によるポテンシャルはこの井戸型ポテンシャルに比べて非常に弱い。

それぞれのポテンシャルによる透過係数を

t_s : 井戸型ポテンシャル
 t_w : 短距離力ポテンシャル
 T : 全体のポテンシャル

と書くと、

$$T \sim t_s t_w$$

と近似できる。

(短距離力によるポテンシャルは非常に弱いので、 $|t_w|^2 \doteq 1$)

共鳴条件

位相は指数関数の肩に乗っており、積をとると和になるので、

$$Arg(T) = Arg(t_s) + Arg(t_w) + \dots$$

短距離力による微小なポテンシャル

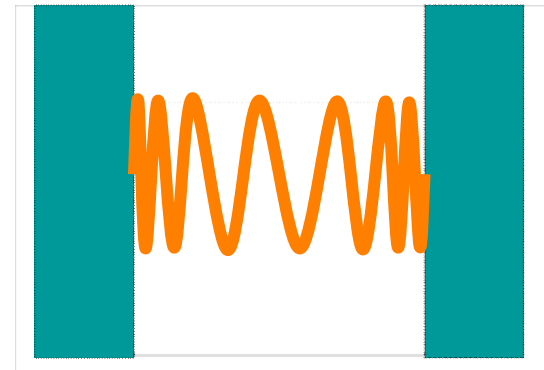
- ▶ 透過率には大きな影響を与えない
- ▶ わずかに透過波の位相を変える

ある条件を満たすとき位相のパラメータ共鳴が起こり、位相が大きく進む。

その条件は

$$\lambda_n \simeq \frac{4L}{n}$$

λ_n : 中性子波長
L: ギャップの長さ
n: 自然数



出典:

V.Gudkov,
H.M.Shimizu,G.L.Greene,
arXiv:0709.3226 [hep-ph] (2007)

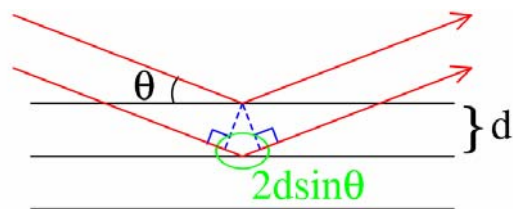
➡ この共鳴による位相のずれを観測することによって短距離力の存在が明らかになる可能性がある。

目次

- ◆イントロダクション
- ◆干渉計による新物理
- ◆中性子干渉計用ミラーの設計
- ◆ミラーのアライメント機構
- ◆まとめとプラン

中性子用のミラーの設計

中性子は非常に透過力が高い → ブラッグ反射を利用



ブラッグの条件

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (n \text{は整数})$$

- 波長が長くなると熱中性子のようにSi単結晶は使えないため、薄膜多層膜を利用して周期構造を作る。
- 機械的強度を保つためには薄膜の1層あたりの厚さは10nm程度。
- これらを最適化すると、入射角は 10° 程度。→冷中性子では 1°
- 波長 $\lambda = 6 \text{ nm}$ 、入射角 $\theta = 10^\circ$ (0.17 rad)とすると、周期構造の幅 $d = 17.3 \text{ nm}$ と求まる。

NiとTiの中性子に対する屈折率を考慮し、ポテンシャルの周期構造の幅が17.3 nmになるような膜厚を計算した。

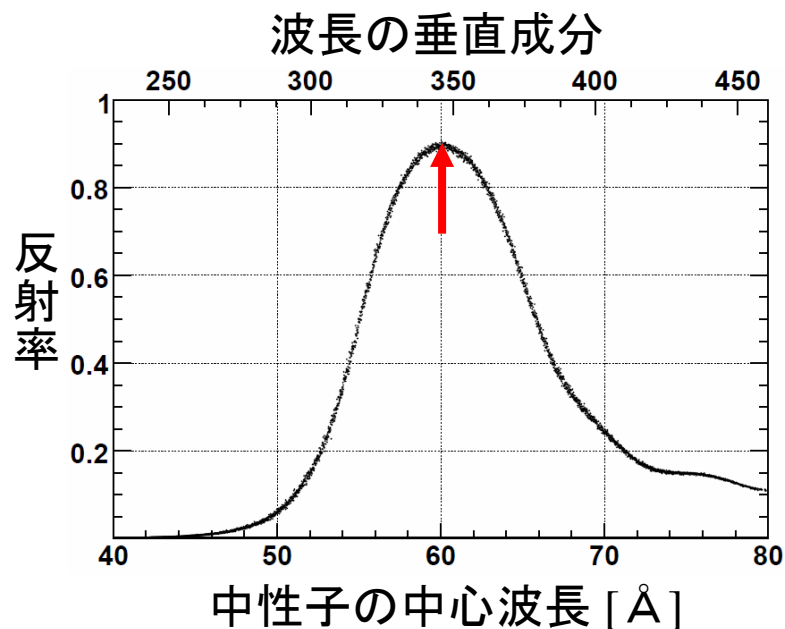
	1層の膜厚 [nm]
Ni	10.8
Ti	8.3

設計したミラーの反射率

計算した膜厚を元に、光学ポテンシャル法を用いてミラーを設計した。世界最大強度のVCN源であるILLのビームを仮定し、中心波長6nm、波長分布の幅は5.3% (FWHM)、発散角は10mradとした。

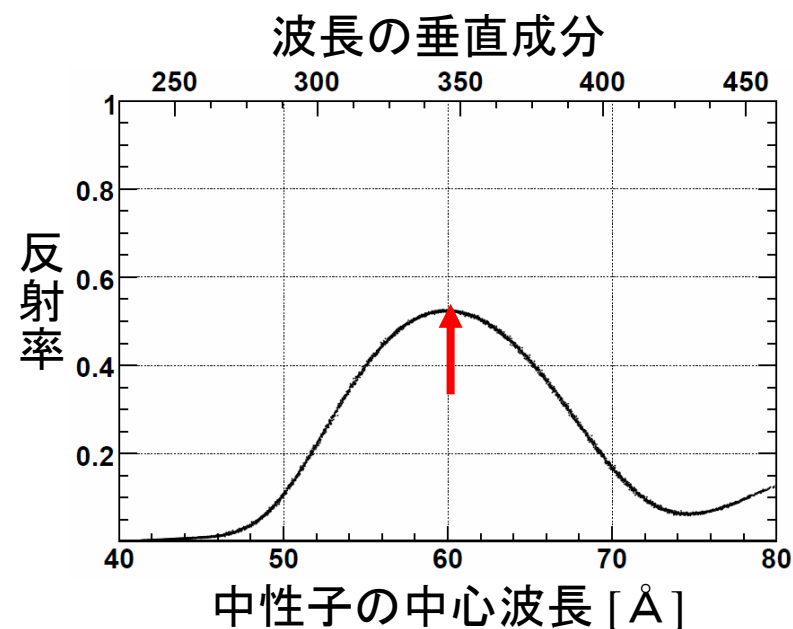
全反射ミラー

20層 Ni:10.5nm/ Ti:8.2nm



ハーフミラー

8層 Ni:10.3nm/ Ti:7.8nm



同様のミラーは既に実績があるので試作の必要はない。

目次

- ◆ イントロダクション
- ◆ 干渉計による新物理
- ◆ 中性子干渉計用ミラーの設計
- ◆ **ミラーのアライメント機構**
- ◆ まとめとプラン

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

$$\sum_{i=L,T} (\sigma_{ki} L_i)^2 = 2$$

L:ビーム進行方向、T:その垂直方向

L_L :L方向の可干渉長、 L_T :T方向の可干渉長

σ_{kL} :L方向の波数の分散、 σ_{kT} :T方向の波数の分散

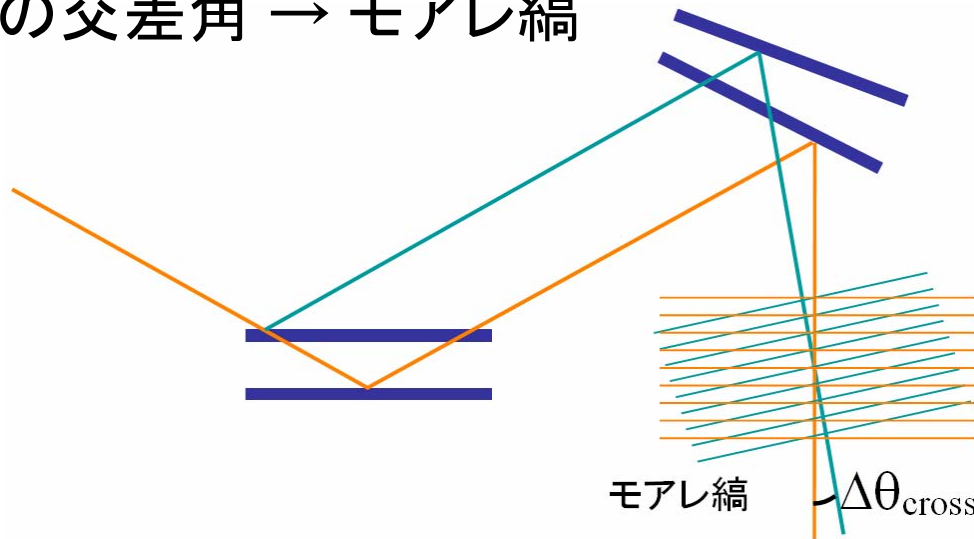
中心波長6nm、波長分布の幅(FWHM)5.3%を仮定し、一方の方向の可干渉長をゼロの場合のL方向、T方向の可干渉長を計算した。

	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}

干渉計の2経路の光路差がこの値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。

2経路間の交差角の上限

2経路の間の交差角 → モアレ縞



モアレ縞の明部と暗部が一つの検出器の有感領域に納まってしまふと干渉縞が潰れてしまう。

➡ 干渉縞が潰れてしまわないための交差角の上限を計算した。

干渉計の2経路の交差角がこの値を超えないように干渉計の素子のアライメントをする必要がある。

有感領域	$\Delta\theta_{\text{cross}}$ [rad]
1.5mm	4.0×10^{-6}
5mm	1.2×10^{-6}

各ミラーのアライメント要求精度

干渉計の素子であるミラーが理想的な位置からずれると2経路の間に光路差や交差角が生じ干渉縞のコントラストが落ちる。

2種類の干渉計についてそれぞれの素子(ミラー)の各パラメータを単体で動かした時のリミットとして

- 2経路の光路差が可干渉長に達する時の値
- モアレ縞の間隔が検出器の有感領域と等しくなる時の値

を計算した。

この2つのリミットの内、より小さい方をそのパラメータのアライメント要求精度としてまとめた。

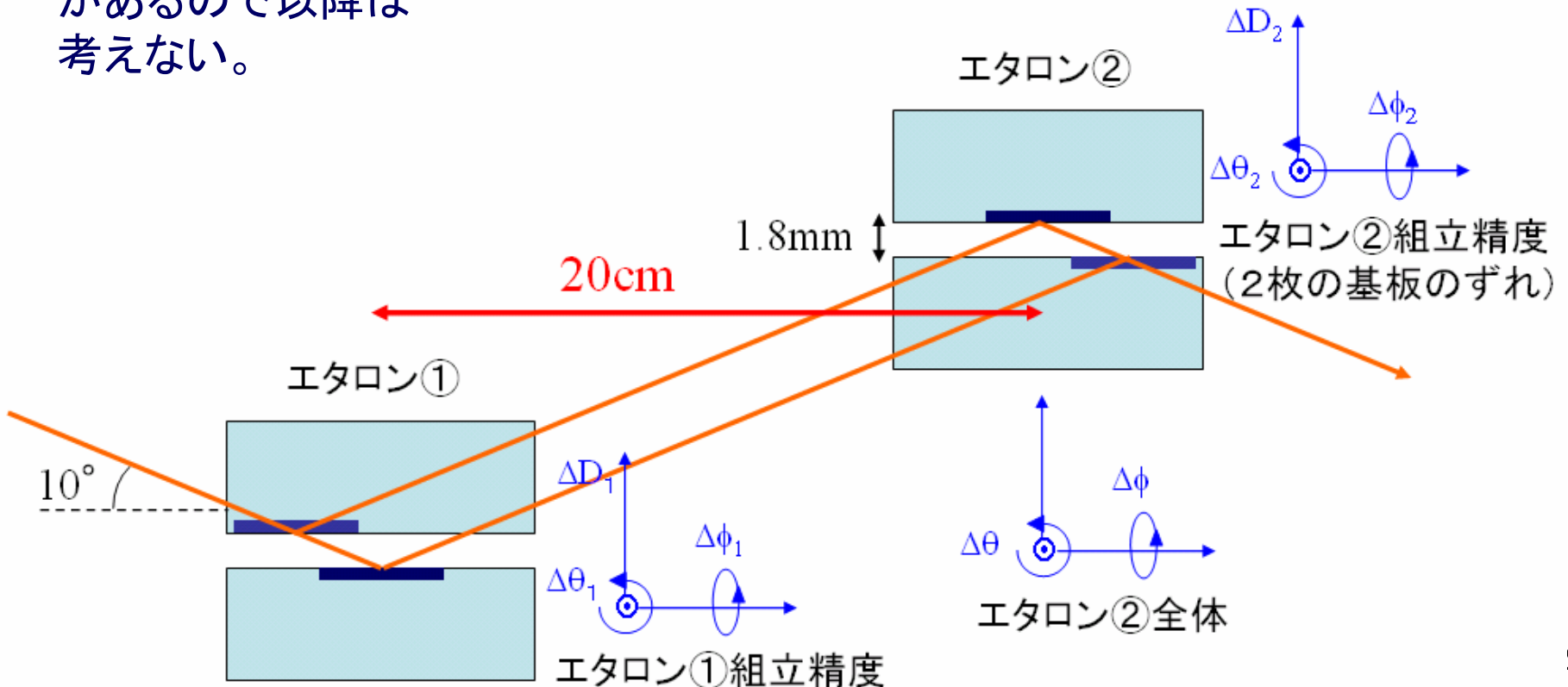
Jamin

アライメント精度

エタロン組立精度

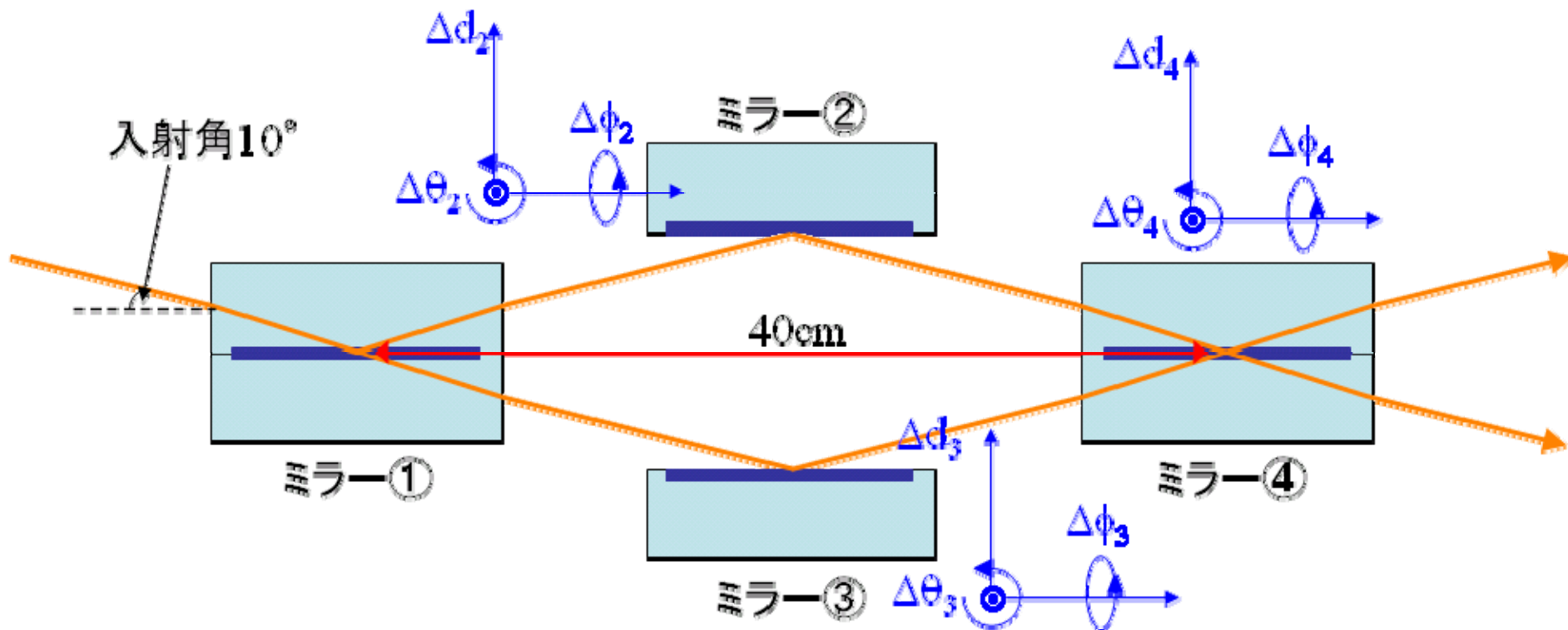
十分な精度の実績
があるので以降は
考えない。

	エタロン①	エタロン②
$\Delta\theta$	/	$\pm 7.7 \times 10^{-6}$ [rad]
$\Delta\phi$		$\pm 2.9 \times 10^{-4}$ [rad]
$\Delta D_{1,2}$	$\pm 6.8 \times 10^{-8}$ [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]

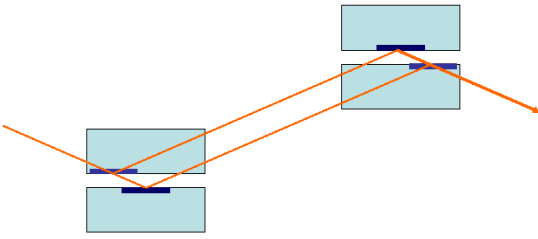
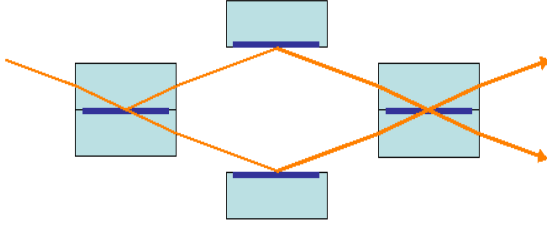


Mach-Zehnder

	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]



アライメント要求精度のまとめ

	 <p style="text-align: center;">Jamin</p>	 <p style="text-align: center;">Mach-Zehnder</p>
素子数	2	4
アライメント自由度	2×2	3×4
位置(平行移動)	/	
角度	7.7×10^{-6} [rad]	6.0×10^{-7} [rad]

- 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経路の間の光路差を合わせるのは非常に難しい。

➡ 白色干渉法を利用

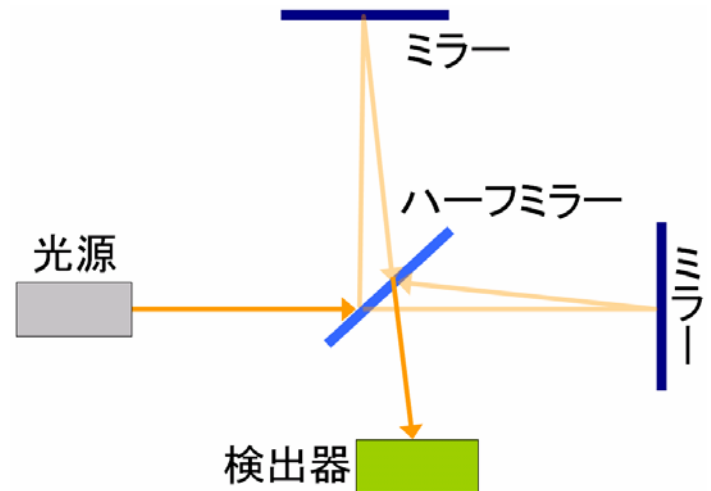
波長分布の幅が広い光(白色光)は干渉長が極端に短い。光路差がその可干渉長以下になったときだけ十分な干渉が起こるので、これを利用すれば光路差がほぼゼロになったときが分かる。

$$\text{可干渉長} \\ \sum_{i=L,T} (\sigma_{ki} L_i)^2 = 2$$

- 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

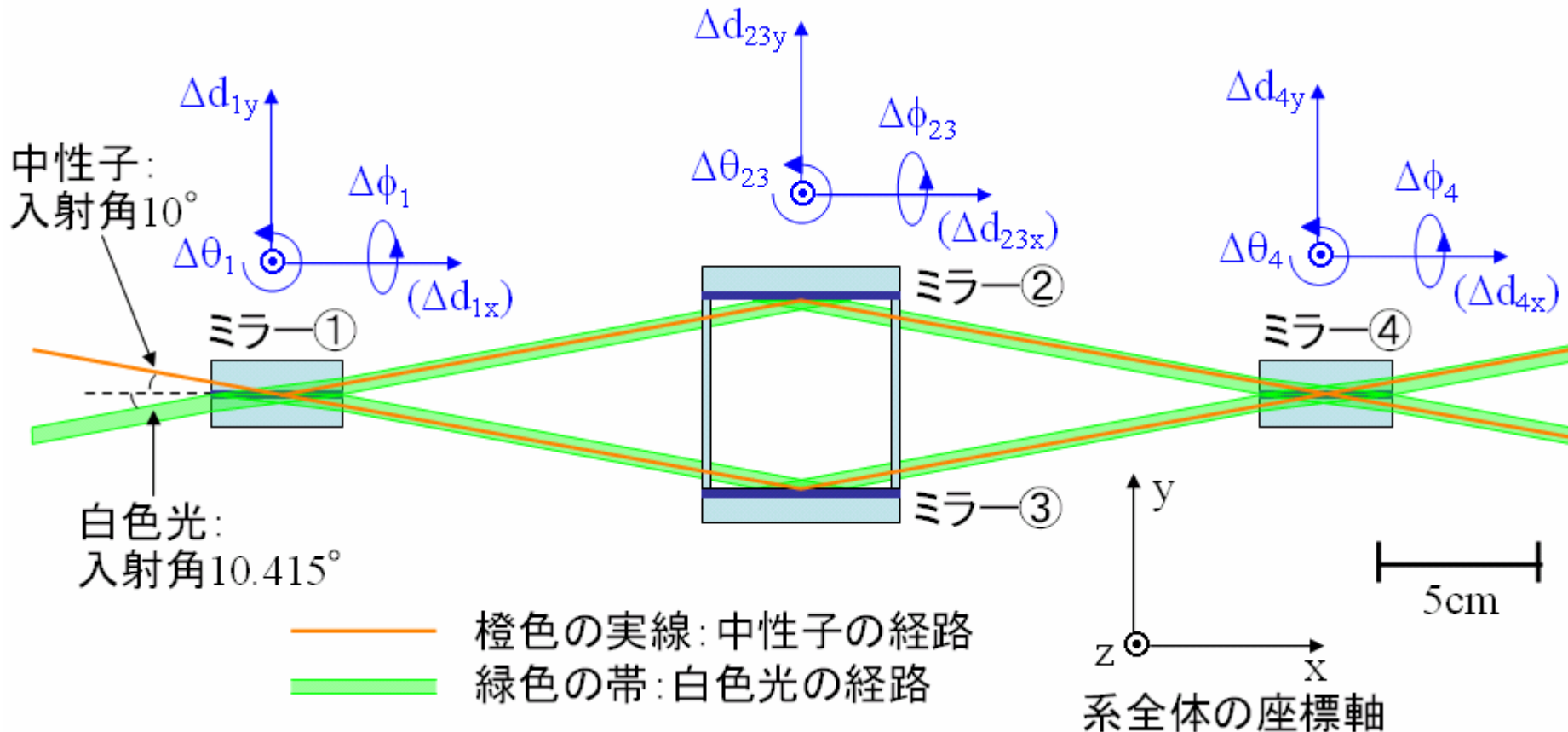
- 垂直方向分解能0.1nm~2nm

この手法を中性子干渉計に導入する



Mach-Zehnder型干渉計への応用

中性子の屈折率は0.998、光の屈折率は1.46と異なるが、白色光の入射角を調整すると中性子とほぼ同じ経路を通すことが出来る。



2つの経路差を2nm以内で合わせられるはずであるから、26nmの可干渉長に対して十分な精度である。

目次

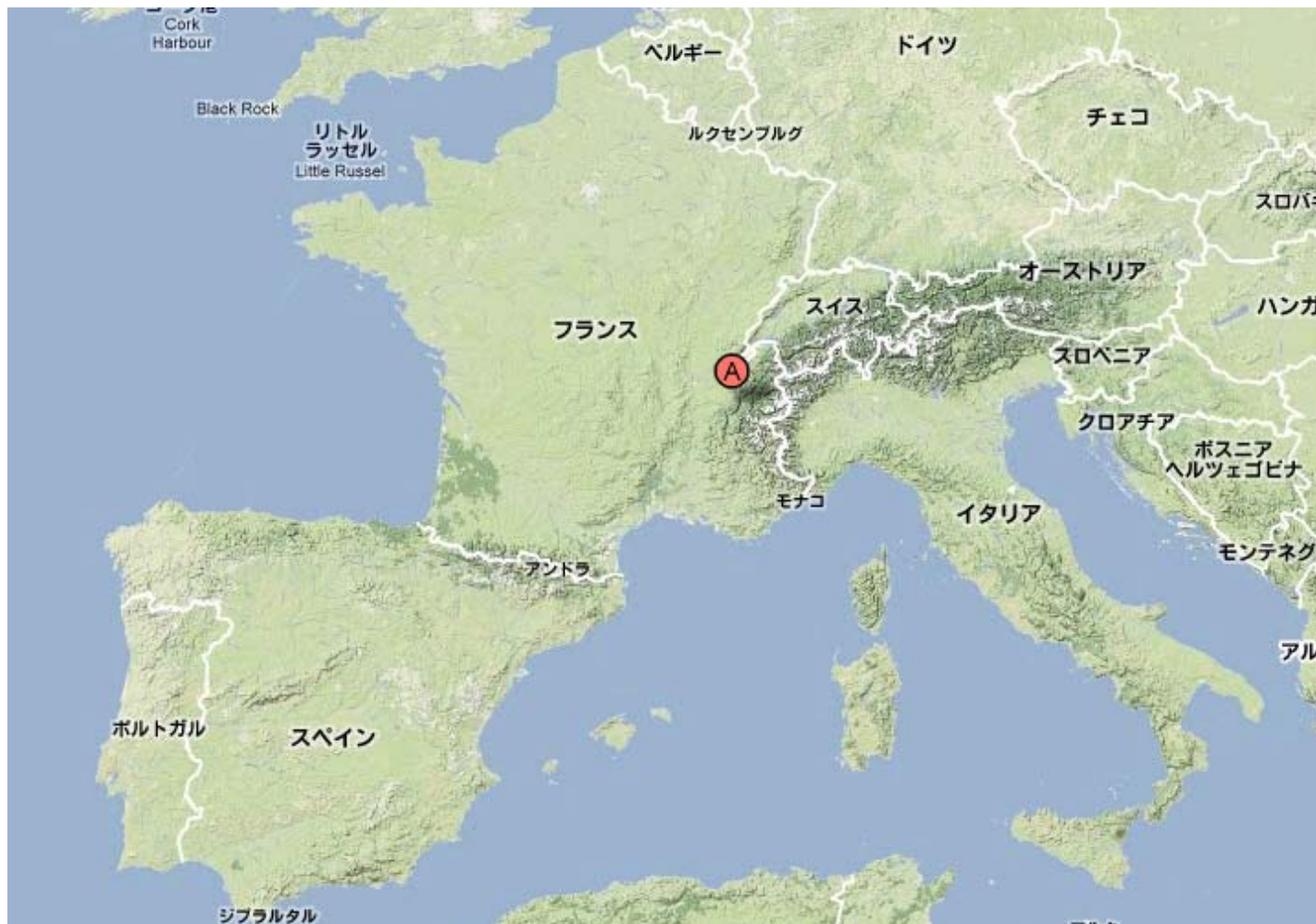
- ◆イントロダクション
- ◆干渉計による新物理
- ◆中性子干渉計用ミラーの設計
- ◆ミラーのアライメント機構
- ◆まとめとプラン

まとめとプラン

- 中性子干渉計の更なる高感度化を目指してミラーやエタロンなどの設計を行った。
- Jamin型、Mach-Zehnder型についてミラーのアライメント要求精度を計算した。
- Mach-Zehnder型のアライメント要求精度が厳しいことが分かった。
- 白色干渉法を用いたアライメント機構を考案し、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。
- その後量子パラメータ共鳴を利用した未知短距離相互作用の探索実験を目指す。

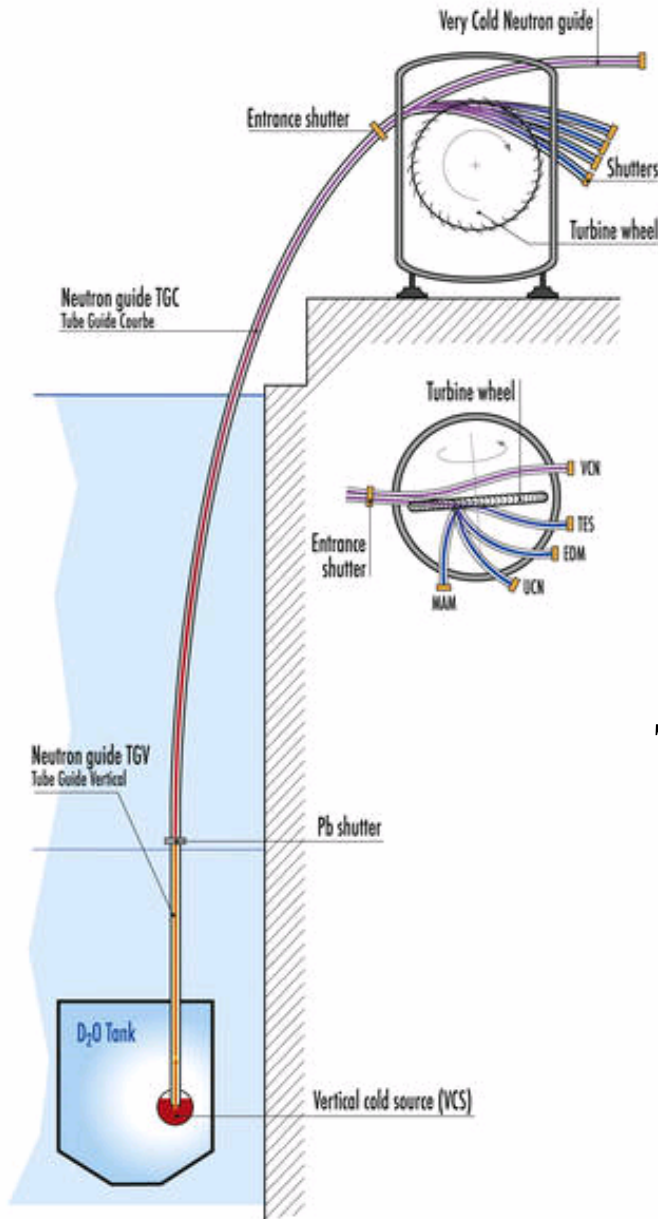
Back Up

ILL (Institut Laue-Langevin)



フランス、グルノーブル

ILL (Institut Laue-Langevin)



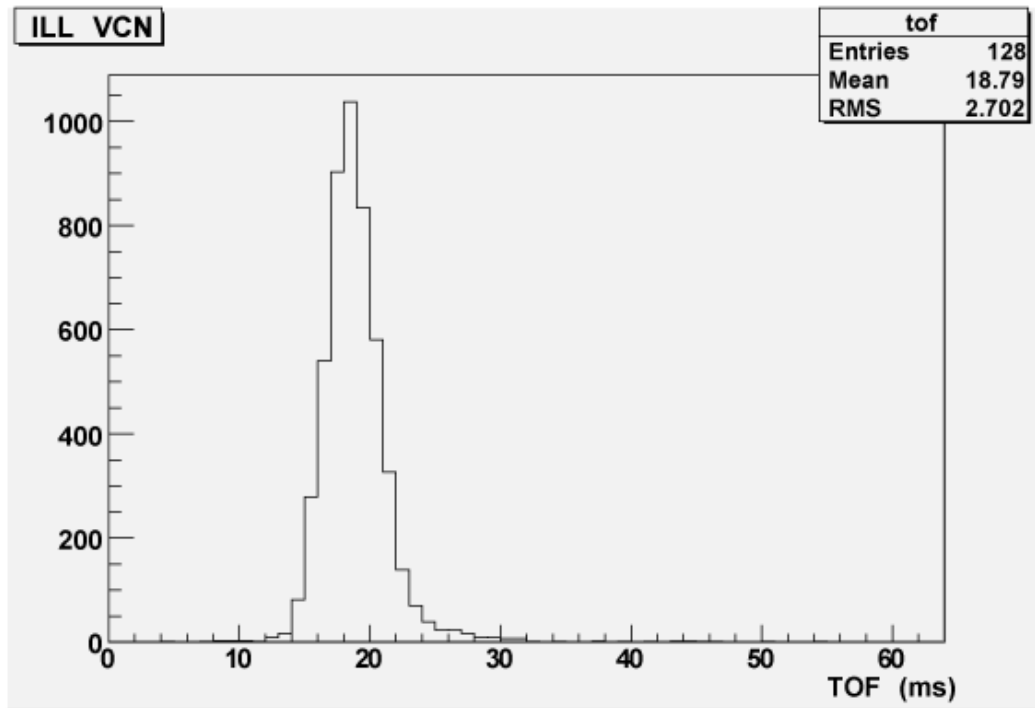
VNC beam

Height: 7cm

Wide: 3.4cm

The flux at $v = 40 \text{ m/s}$ (100 \AA) is about $10^5 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}(\text{m/s})^{-1}$ ($= 0.4 \times 10^5 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{\AA}^{-1}$).

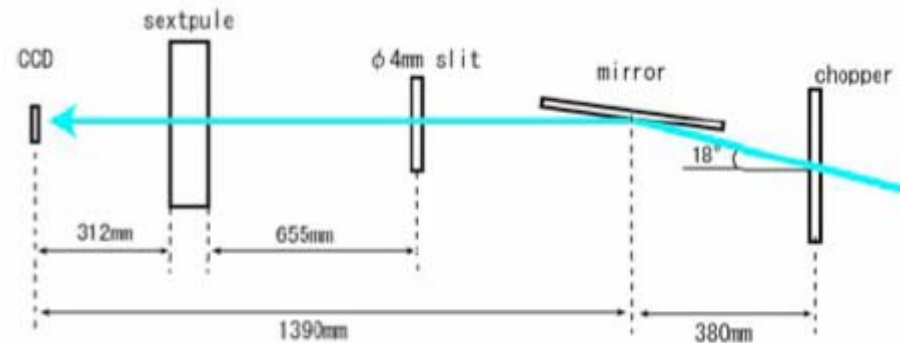
ILL (Institut Laue-Langevin)



TOF = 18.8 msec
→ $V = 96.0\text{m/s}$

VCN flux
4909 count / 100 sec

^3He detector efficiency 36%
→ $136.4 \pm 1.9 \pm 4.1$ Hz



検出器

中性子比例計数管（東芝電子管デバイス）

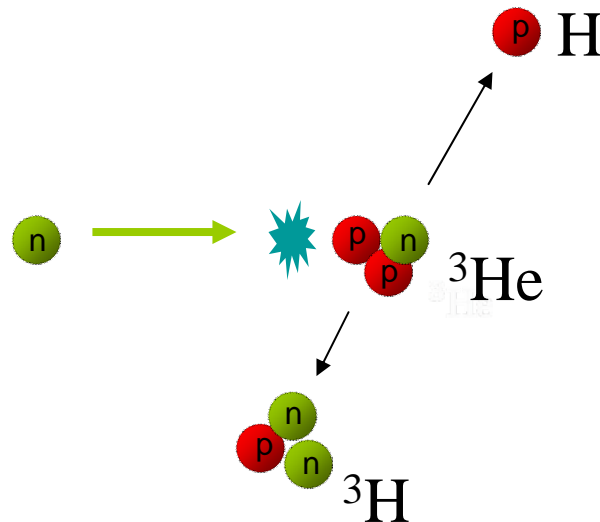
ガス： ^3He , 0.4MPa

全長：245~595 mm

有効長さ：150~500 mm

直径：25.5 mm

動作電圧：1,550~1,850 VDC



光学ポテンシャル法

中性子に対する物質の屈折率と波数

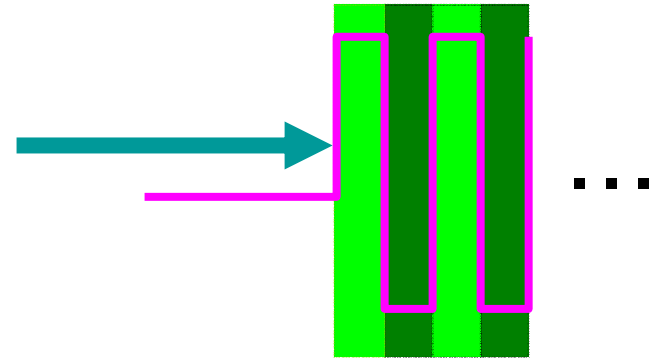
$$k_j^2 = n_j^2 k_0^2 = k_0^2 - \frac{2mV_j}{\hbar^2}$$

シュレディンガー方程式

$$\frac{d^2 \Psi_j}{dx^2} + k_j^2 \Psi_j = 0$$

これを解くと

$$\begin{pmatrix} \Psi_j(x) \\ \Psi_j'(x) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(k_j x) & \frac{1}{k_j} \sin(k_j x) \\ -k_j \sin(k_j x) & \cos(k_j x) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Psi_j(0) \\ \Psi_j'(0) \end{pmatrix}$$
$$\parallel$$
$$M_j$$



光学ポテンシャル法

これに接続条件を使って書き下していくと

$$\begin{pmatrix} \Psi_{j+1}(0) \\ \Psi'_{j+1}(0) \end{pmatrix} = M_j M_{j-1} \cdots M_2 M_1 \begin{pmatrix} \Psi_1(0) \\ \Psi'_1(0) \end{pmatrix}$$
$$\begin{pmatrix} te^{ik_{n+1}x_n} \\ ik_{n+1}te^{ik_{n+1}x_n} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{ik_0x_0} + re^{-ik_0x_0} \\ ik_0(e^{ik_0x_0} - re^{-ik_0x_0}) \end{pmatrix}$$
$$M \equiv M_j M_{j-1} \cdots M_2 M_1$$

Mを計算し、方程式を解くことでrを求めて反射率を出す。

$$r = \frac{k_{n+1}k_0B + C - i(k_{n+1}A - k_0D)}{k_{n+1}k_0B - C + i(k_{n+1}A + k_0D)} \times \frac{e^{ik_0x_0}}{e^{-ik_0x_0}}$$

$$R = |r|^2$$

磁気多層膜

ここでは光学ポテンシャル(V_{op})のみの場合を考えているが、内部磁場によるポテンシャル(V_{mag})を持つ物質も存在し、磁気多層膜のミラーを作ることが出来る。

磁化の方向と平行、反平行なスピンをもつ中性子に対する磁性体のポテンシャルは

$$V_{\text{op}} \pm V_{\text{mag}}$$

となる。



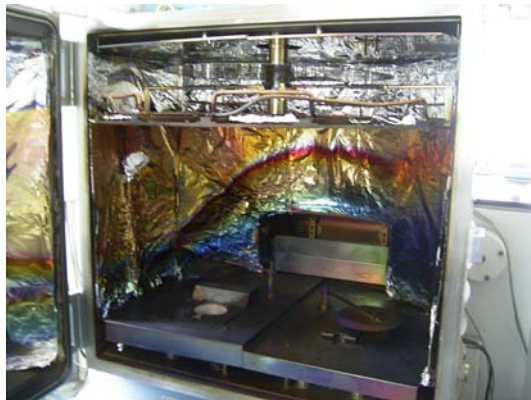
これを利用すれば、平行スピンに対しては正のポテンシャル、反平行スピンに対してはポテンシャルがゼロのものを作ることができる。



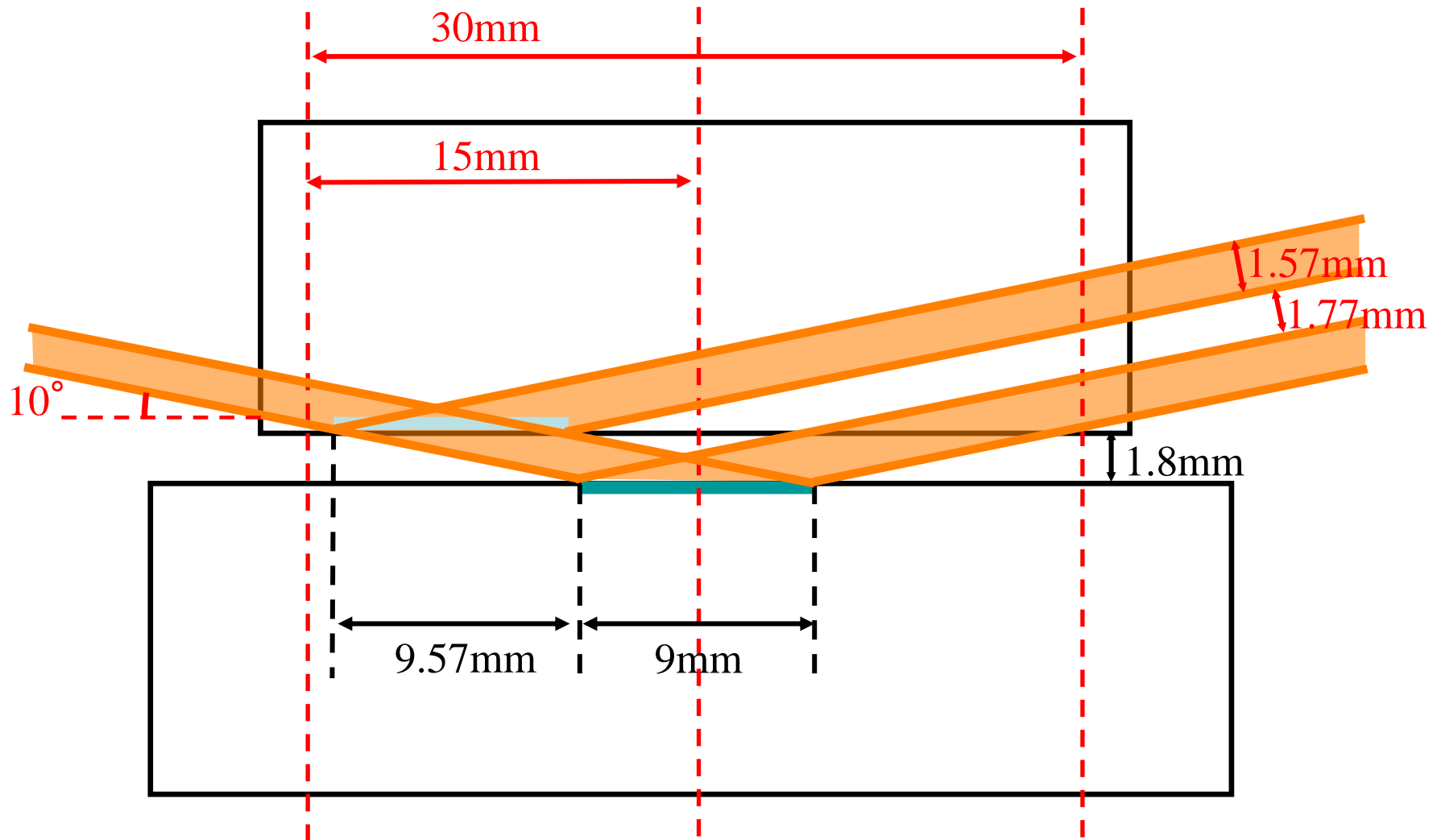
これを利用すればスピンを選択的に反射する磁気多層膜ミラーが作成でき、ビームをスピンが平行、反平行なものに分けることが出来る。

真空蒸着装置

エタロン基盤への多層膜ミラーの蒸着は京都大学原子炉実験所の真空蒸着装置を使用する予定。



設計したエタロン

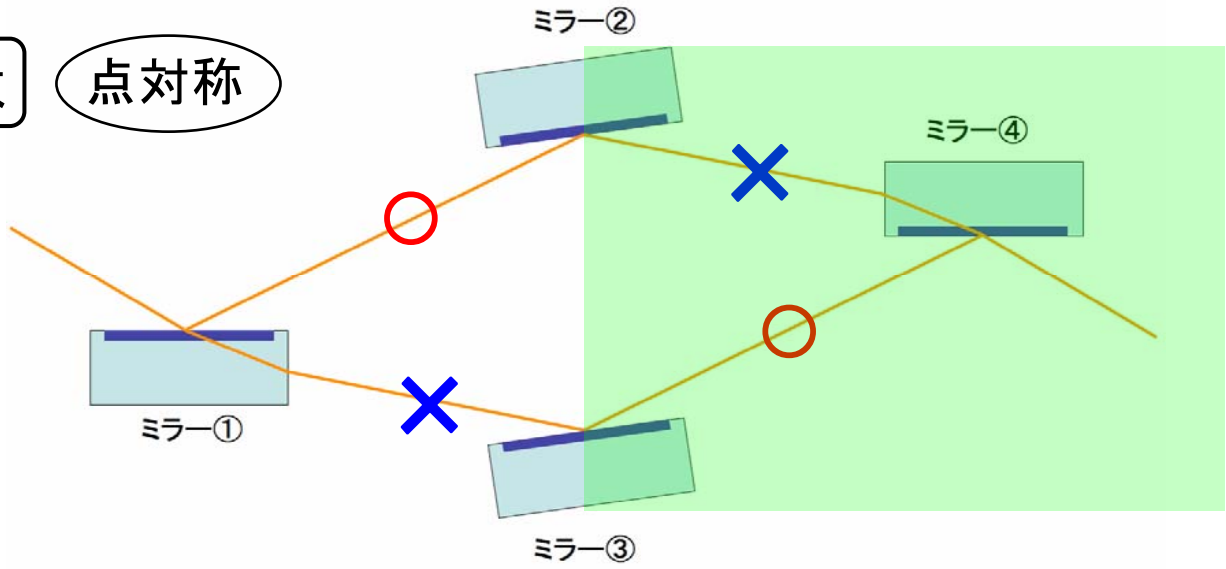


M-Z:4枚基板と6枚基板

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

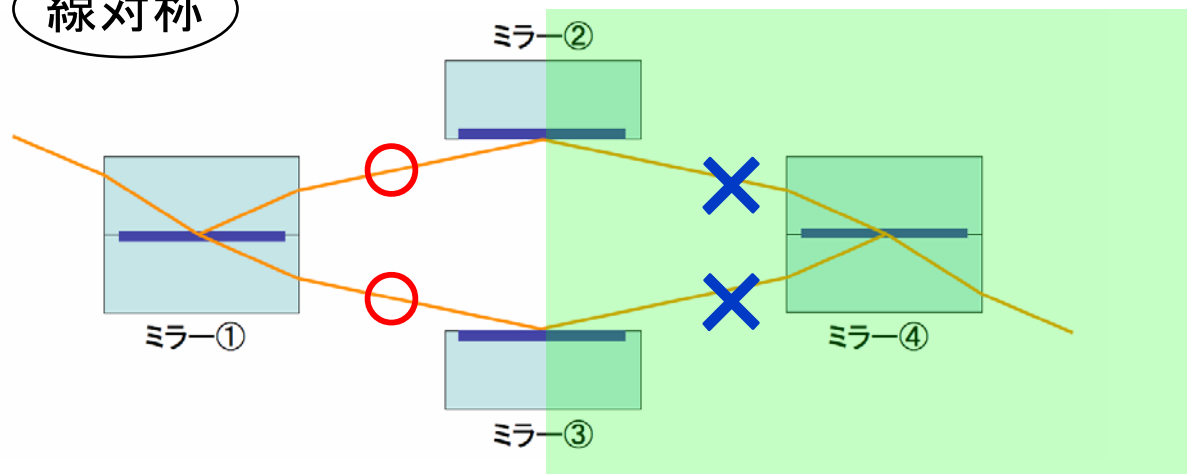
点対称



○ 同士、 × 同士が上と下の経路で対象になる部分

基板6枚

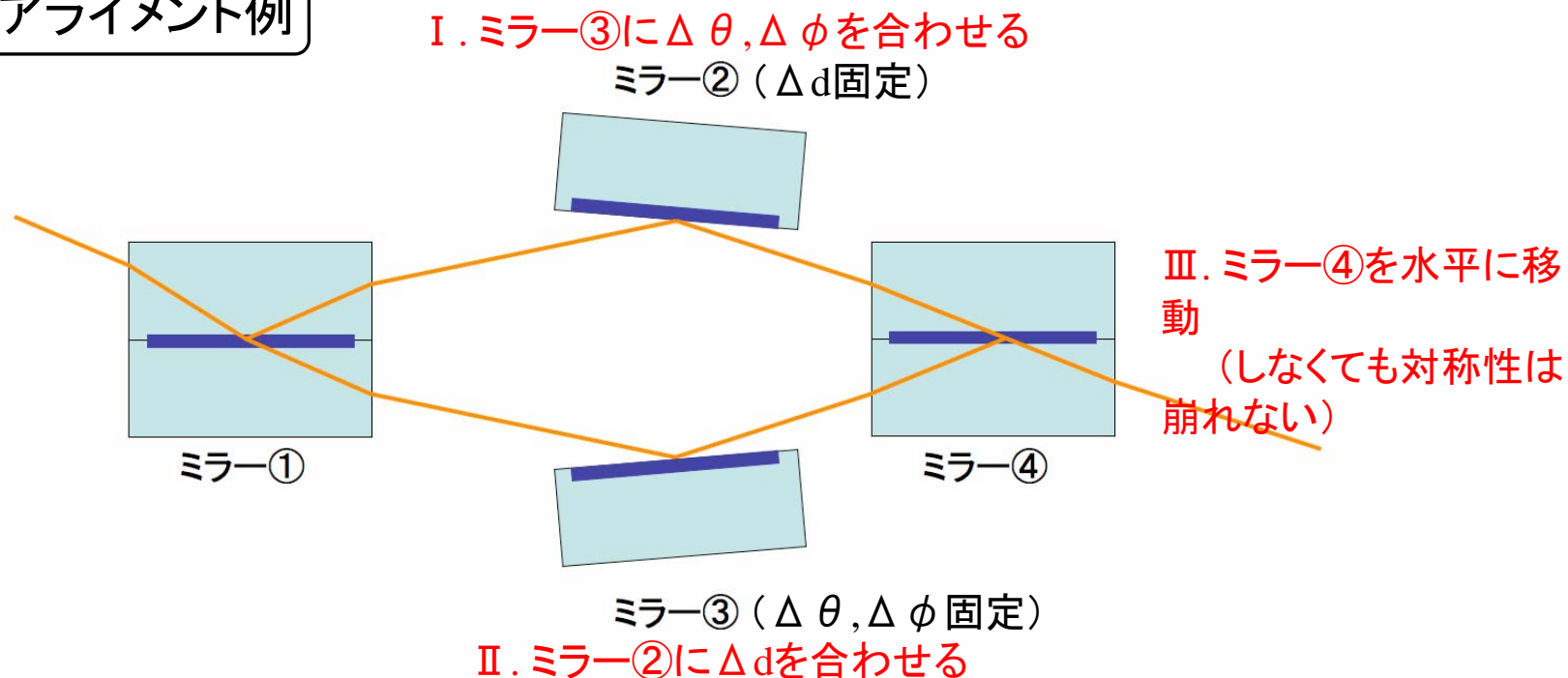
線対称



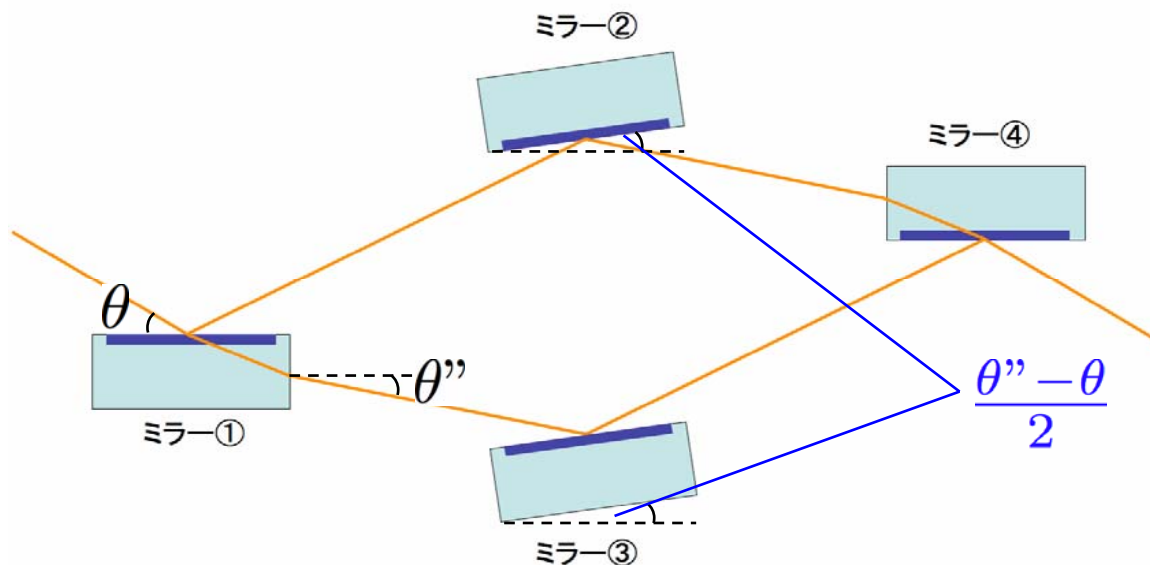
ミラー②、③のアライメントで
変化する部分

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

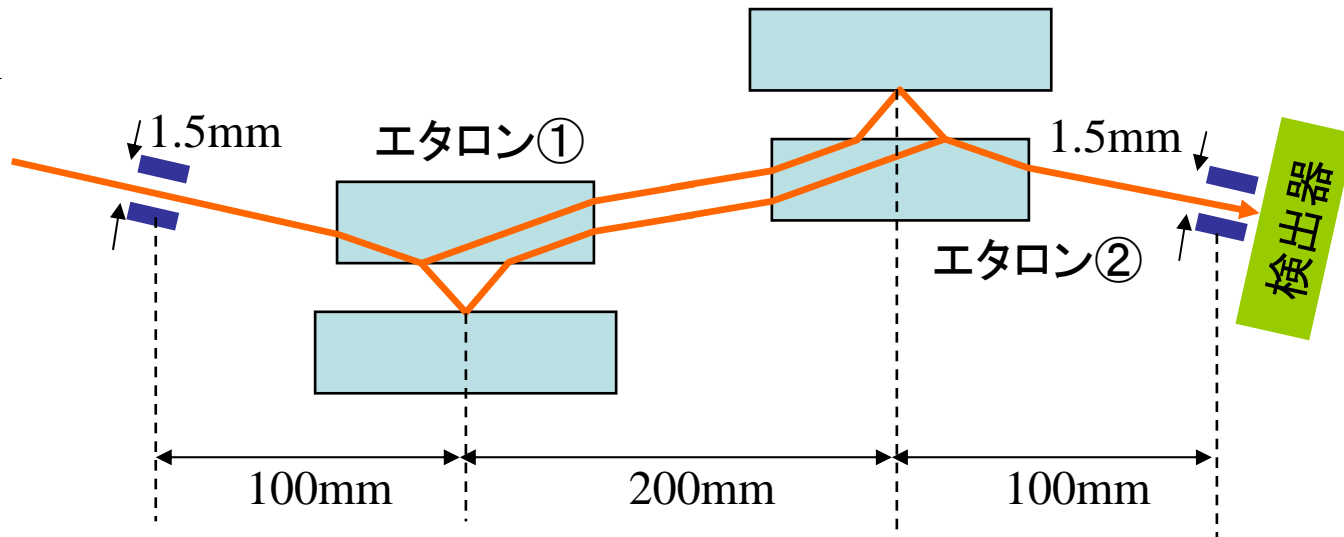


ミラー②、③の基準の位置は入射角、屈折率に依存する。そのため入射角のずれとミラーの位置のずれは等価であり、ビームの発散によって入射角がばらつくものにはむかない。また同じ系でレーザーを入射させる場合も、屈折率の違いがミラーの位置のずれと等価であり、干渉させるのは難しい。

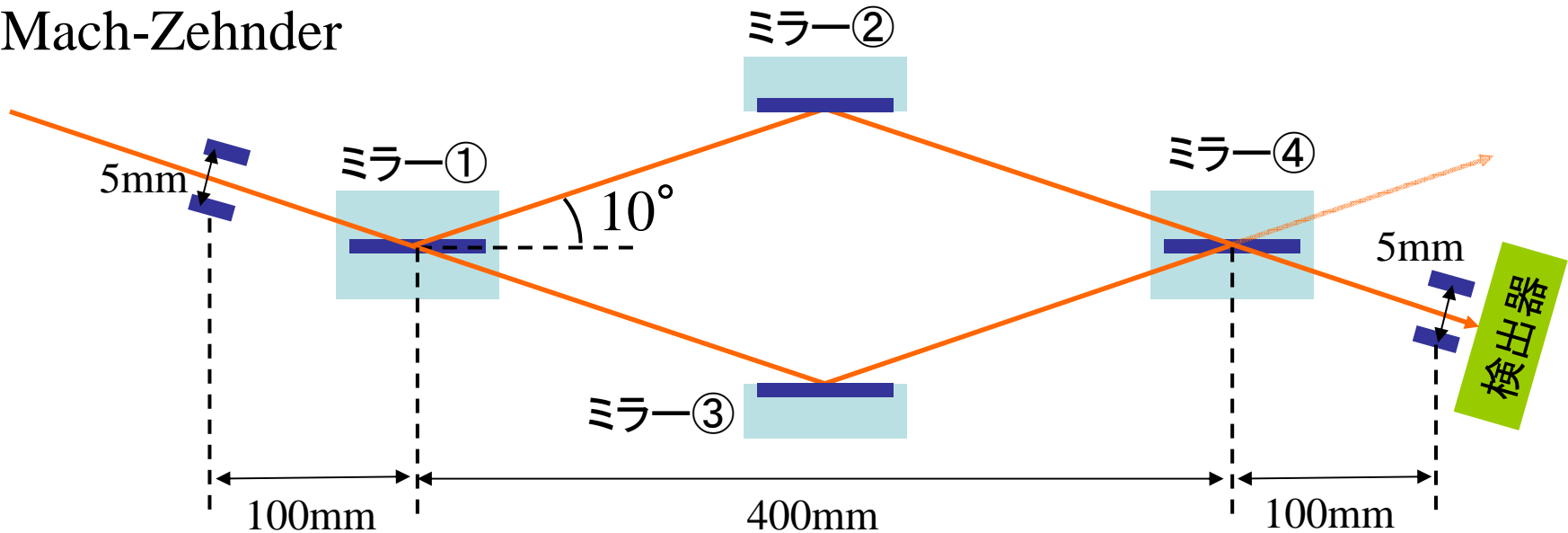
一方で、基板6枚(線対称型)ではミラー①の平面に対して②、③が対称でさえあればよく、入射角、屈折率に依存しないのでこの問題は生じない。

全体のセットアップ

Jamin

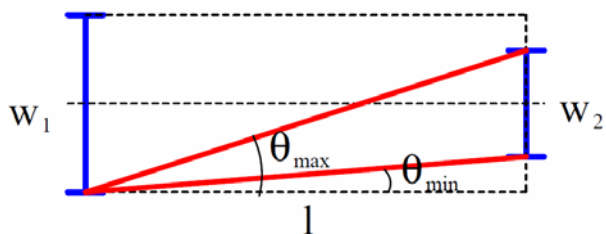


Mach-Zehnder

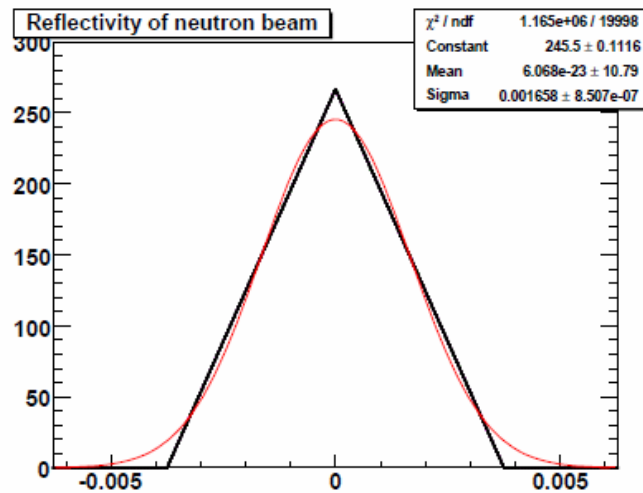
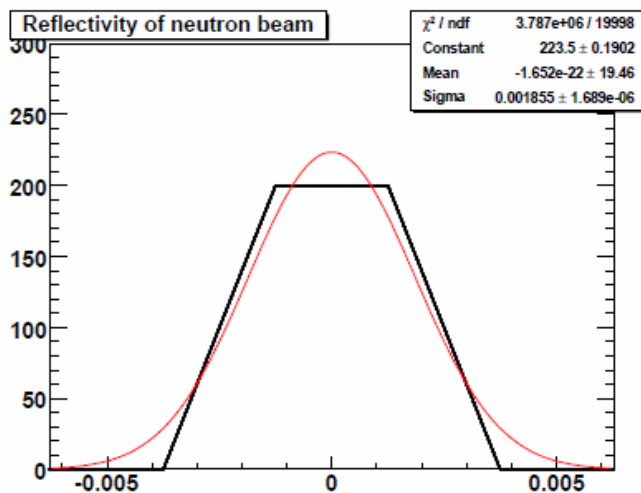


ビーム発散角

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。

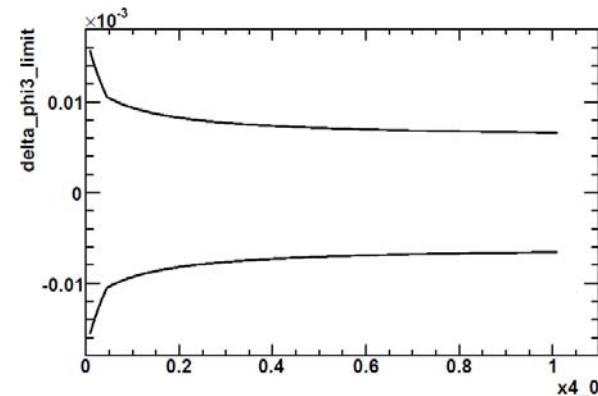
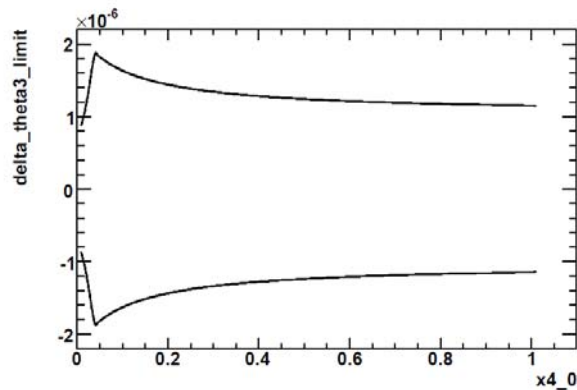
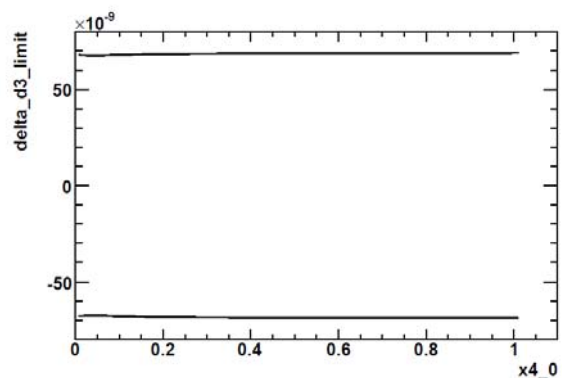


$$\begin{cases} f(\theta) = aw_2 & (|\theta| \leq \theta_{min}) \\ f(\theta) = a \left(\frac{1}{2}(w_1 + w_2) - l|\theta| \right) & (\theta_{min} \leq |\theta| \leq \theta_{max}) \\ f(\theta) = 0 & (\theta_{max} \leq |\theta|) \end{cases}$$

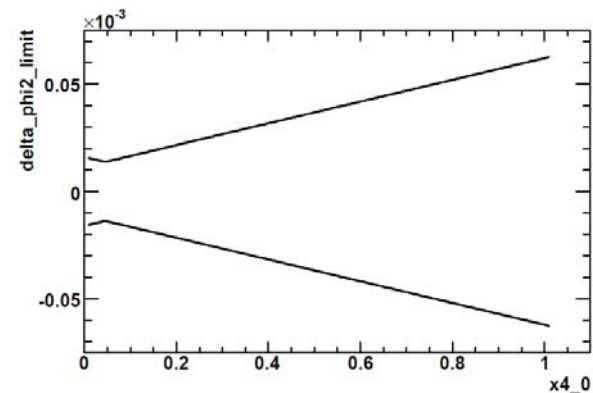
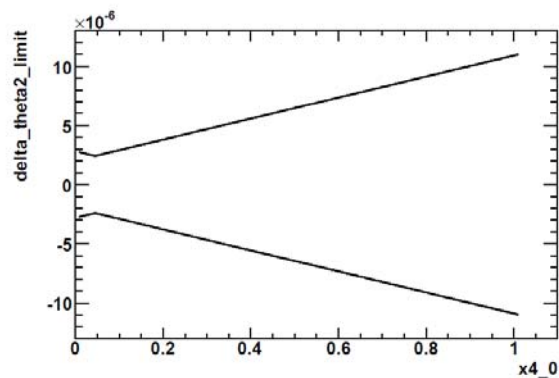
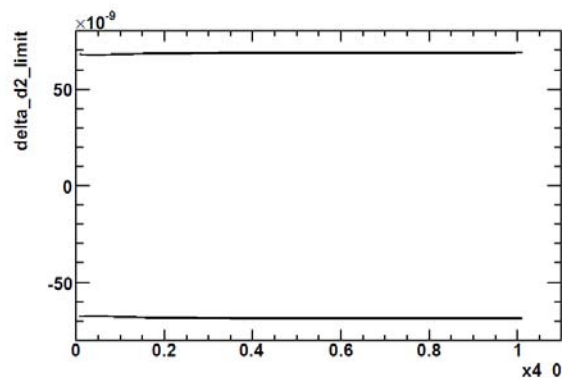


干渉計サイズ依存性

エタロン①組立制度

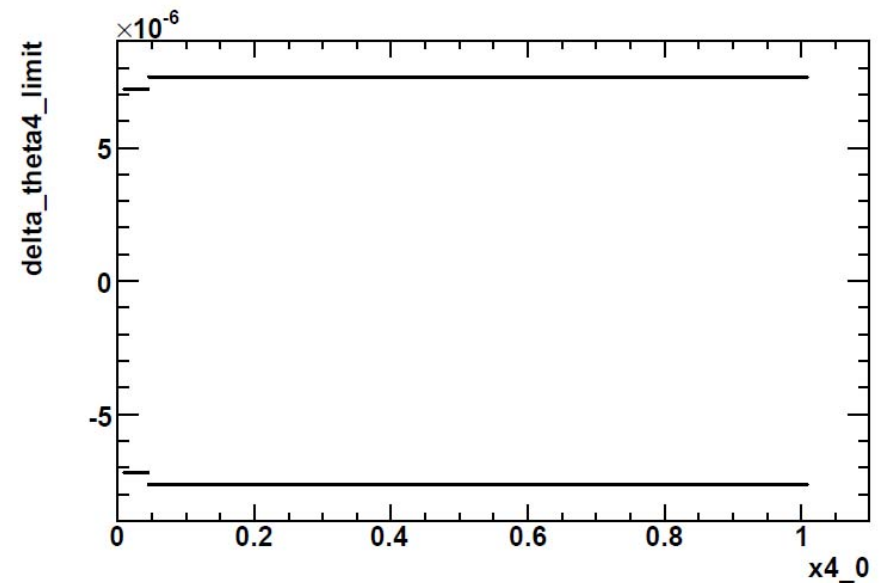
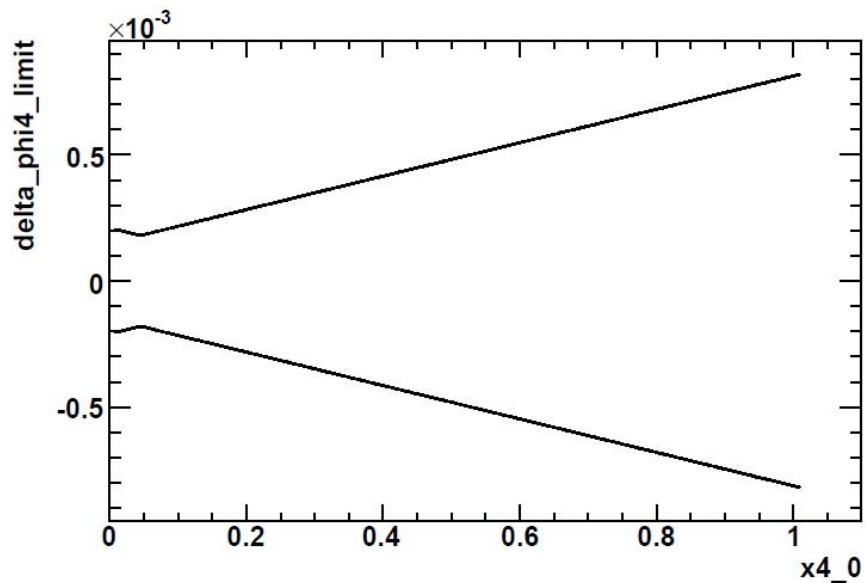


エタロン②組立制度



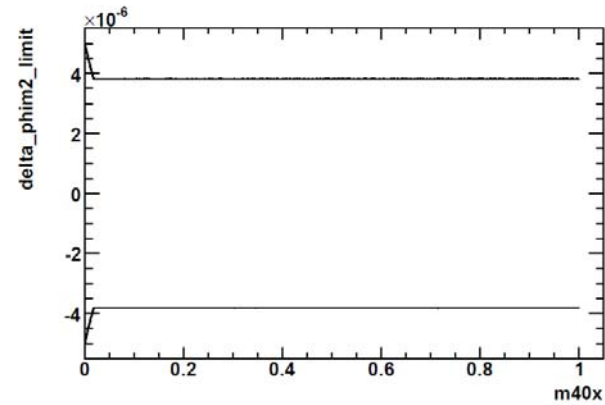
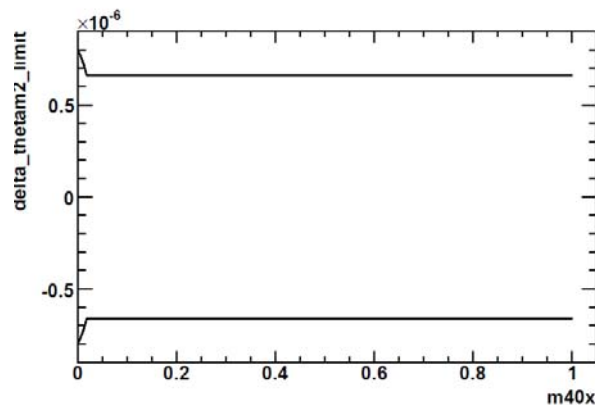
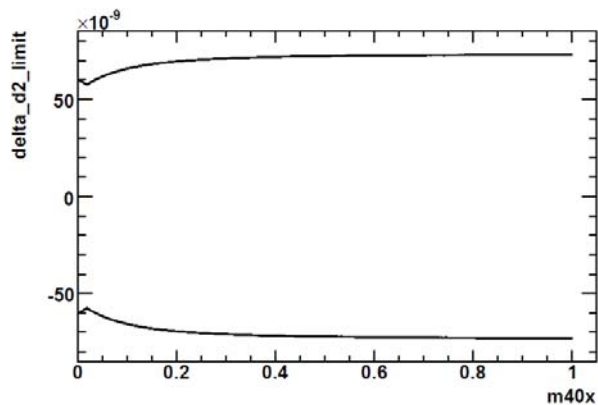
干渉計サイズ依存性

エタロン相対角度

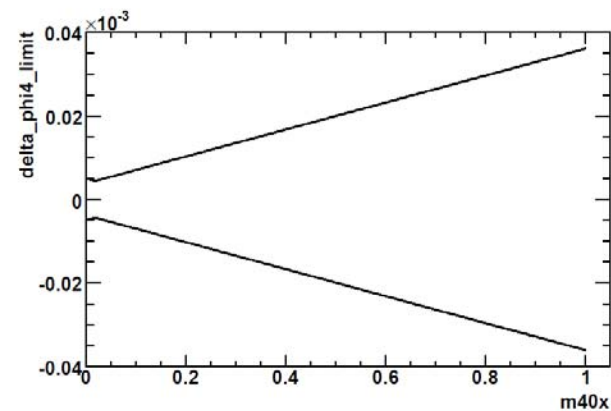
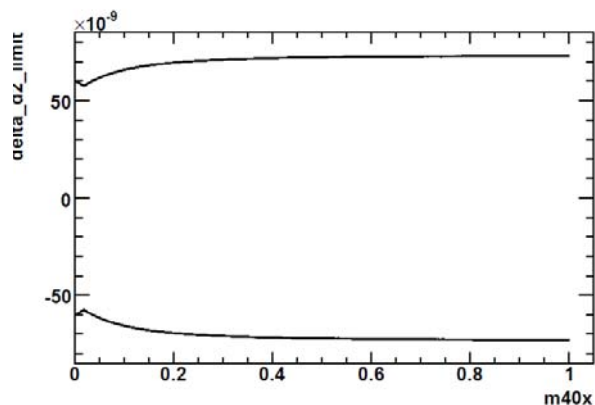
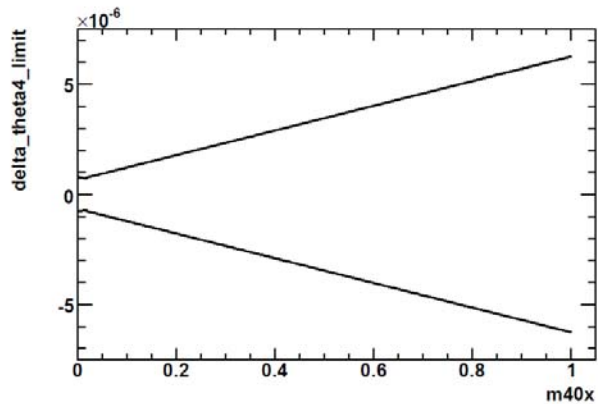


干渉計サイズ依存性

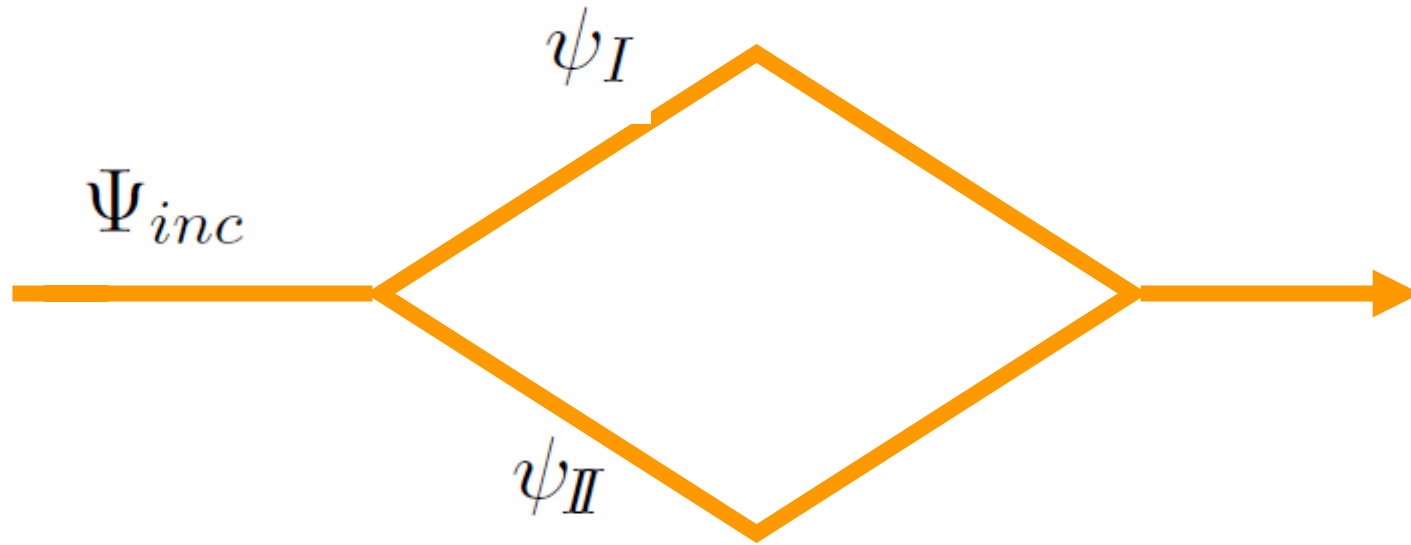
ミラー②、③



ミラー④



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

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

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

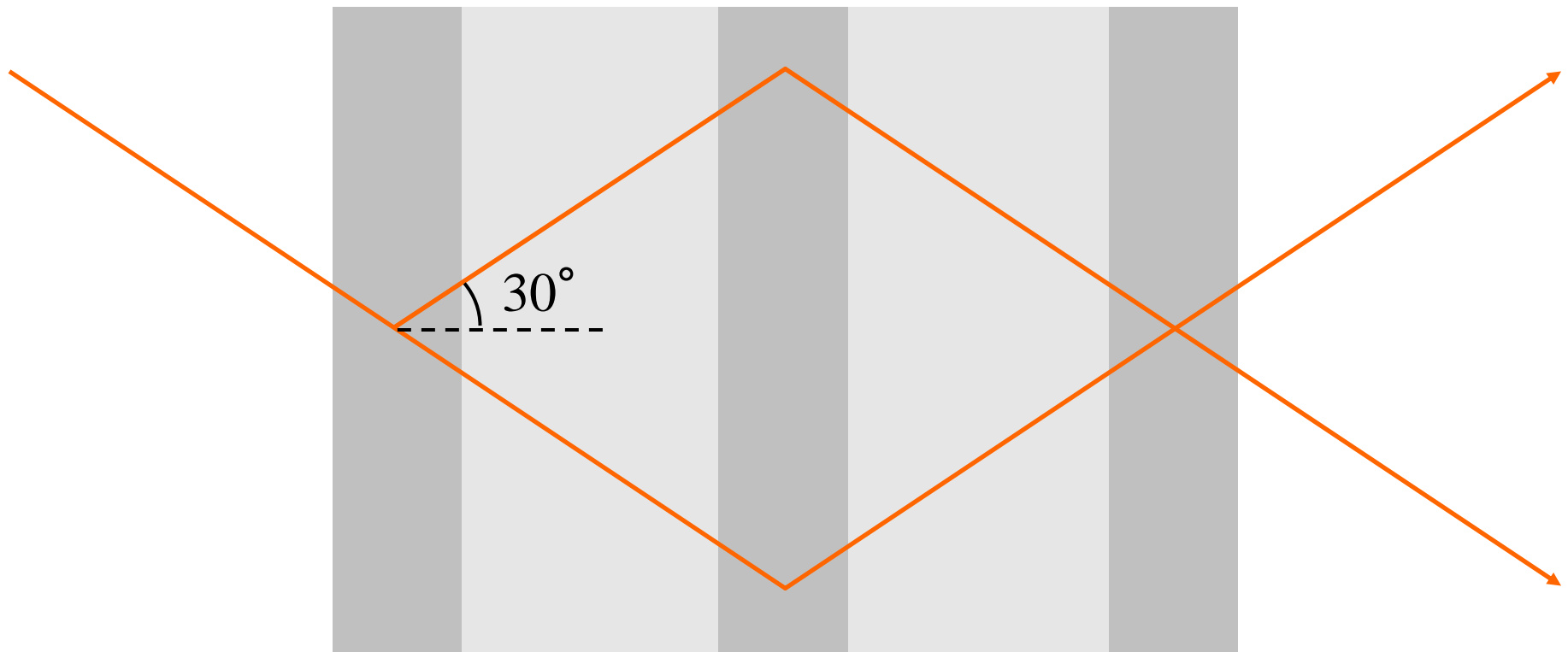
中性子干涉

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

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

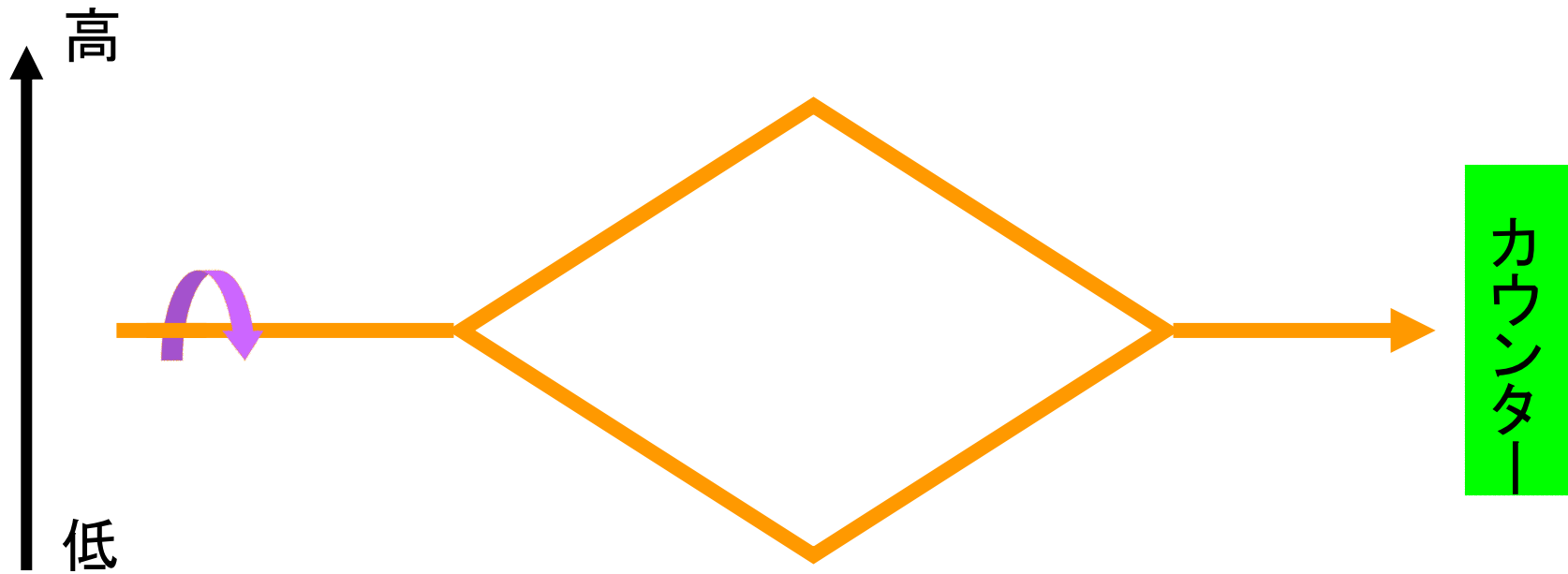
COW実験

中性子干渉実験の代表的な例として、シリコン単結晶の干渉計を用いて行われた、COW実験が挙げられる。



Si単結晶

COW実験

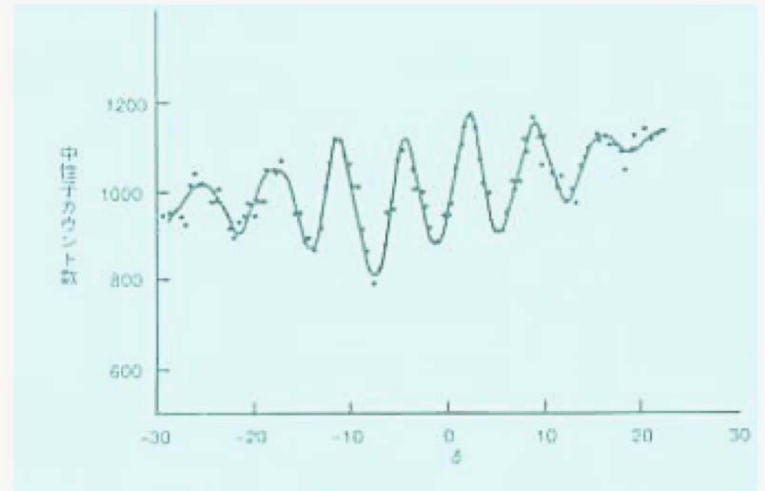


重力の強さが高さによって異なることを利用し、干渉計を回転させて、干渉の回転依存性を測定した。

COW実験

結果は、回転角に依存した干渉が観測された。

これにより、重力の高さによるわずかな差を見ることが出来る。



このように、中性子を用いた干渉実験は非常に小さな効果まで測定できる、高感度な実験である。