

# 発表内容

- 新型マルチパストムソンについて
- GAMMA10への導入について
- 研究スケジュール、今後の予定
- まとめ

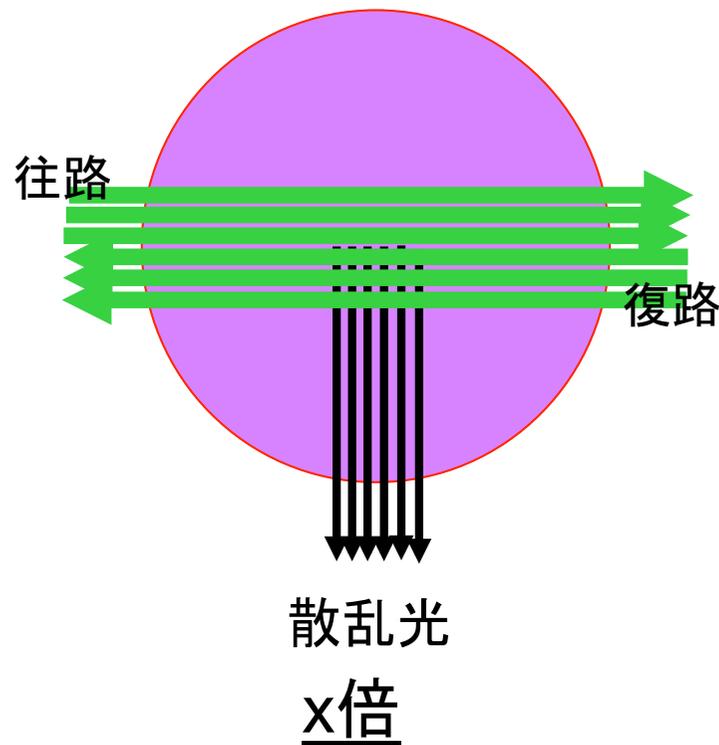
# はじめに

- プラズマの電子温度、電子密度分布を同時計測する、トムソン散乱計測はプラズマ計測における強力なツールとして認識されている。
- しかしながら、トムソン散乱計測の測定電子温度、電子密度領域の拡大や時間分解能の向上は、トムソン散乱用レーザーの出力や繰り返しに制限される。
- 低密度域への測定領域拡大や時間分解能向上が求められている。
- マルチパストムソン散乱計測手法を用いることで散乱光量の増加や測定電子温度領域の拡大が実現する。

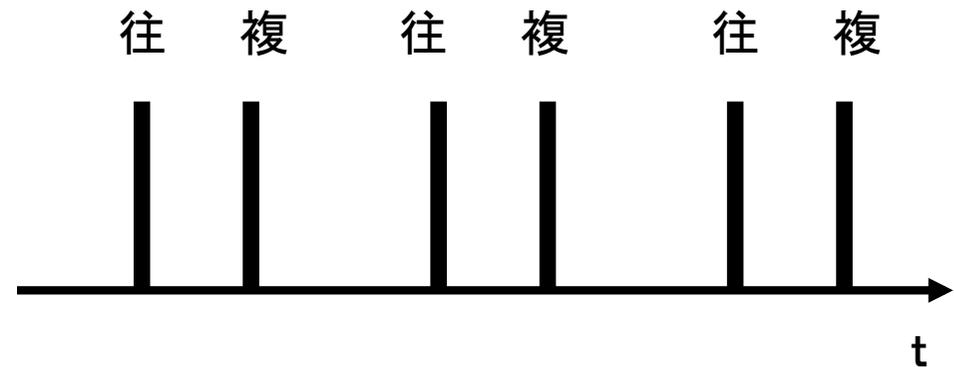
# マルチパストムソンとは

通常、プラズマ中を一方向しか通過しない、トムソン散乱計測用レーザー光を複数回往復させる。

## マルチパストムソンのメリット



散乱光の倍増



100Hz程度→kHzのオーダーへ  
(制限は受光系—ADCによる)

時間分解能の向上

# マルチパストムソン散乱計測導入のメリット

トムソン散乱計測の**マルチパス化**により、散乱光量の増大、測定時間分解能の向上、測定温度領域の拡大が期待できる。

- **散乱光量の増大**

→ 先行研究例 ( TEXTOR 、 JT60 )

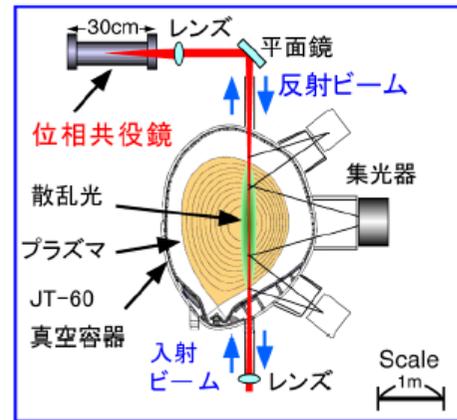
- **測定時間分解能の向上**

→ 究極的には数十ns間隔の測定データを取得可能  
(ADCの多段化、オシロスコープ使用等による)

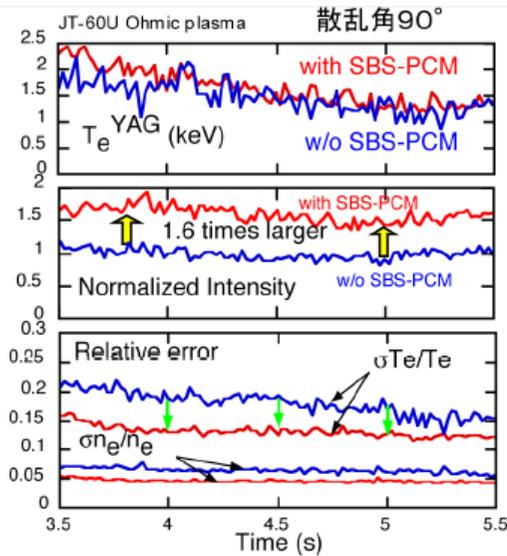
- LHDにおいては**測定電子温度領域の高温側への拡大**が図れる。

# 散乱光強度の増加例

## ○ JT60への導入例 (JAEA波多江、他)

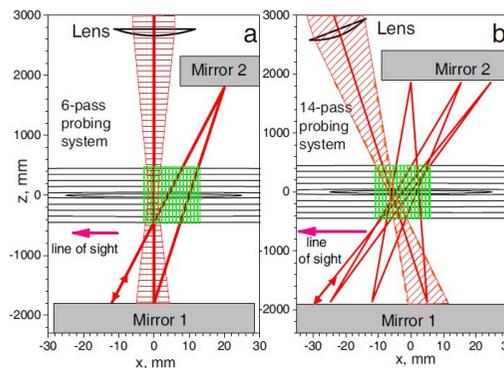
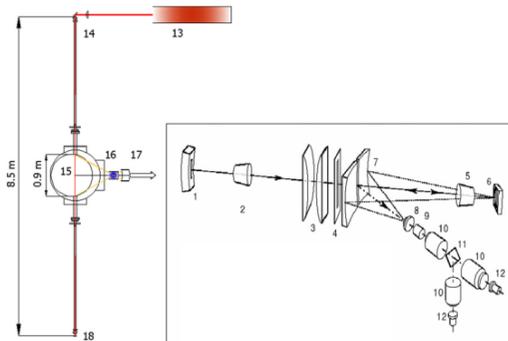


● 位相共役鏡で反射された光は  
入射光と同じ光路を逆進



- 位相共役鏡を用いた2往復システム
- 散乱光強度**1.6倍**、電子温度、電子密度計測の相対誤差**2/3**

## ○ TEXTORへの導入例 (M Yu Kantor, et al. Plasma Phys. Control. Fusion 51 (2009) 055002)



- 共焦点ミラーによるマルチパスシステム(最大7パス)
- 散乱光強度**2から3倍**

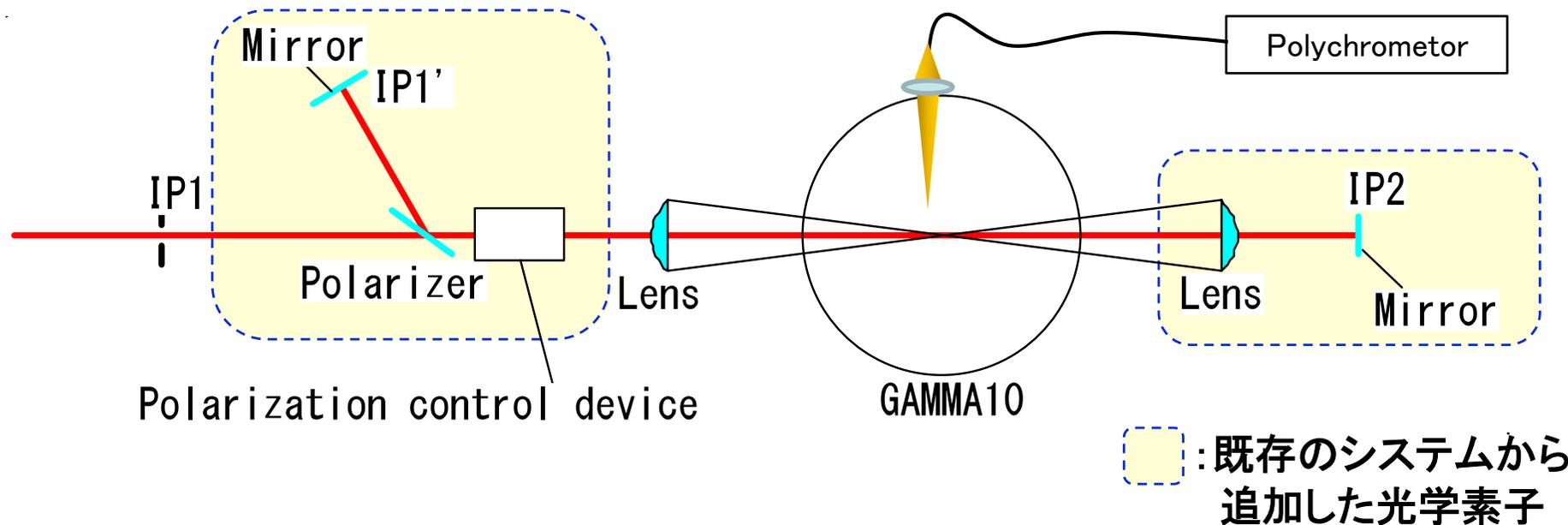
# 偏光制御と像転送光学系による マルチパストムソンシステム

これまでマルチパストムソン散乱計測には、**位相共役鏡**を用いる方法や**共焦点ミラー**を用いる方法が提案されてきた。これらは非常に有効であるが**レーザー光源**や**アライメント**に対する厳しい要求がネックとなる。



より簡単な構成でマルチパストムソンシステムを構築するために、固体レーザーで一般的に用いられている**偏光制御**と**像転送光学系**によるマルチパストムソンシステムを検討した。

# 像転送と偏光制御による 新型マルチパストムソンシステム



新型マルチパストムソン散乱システムの概念図

## 特徴

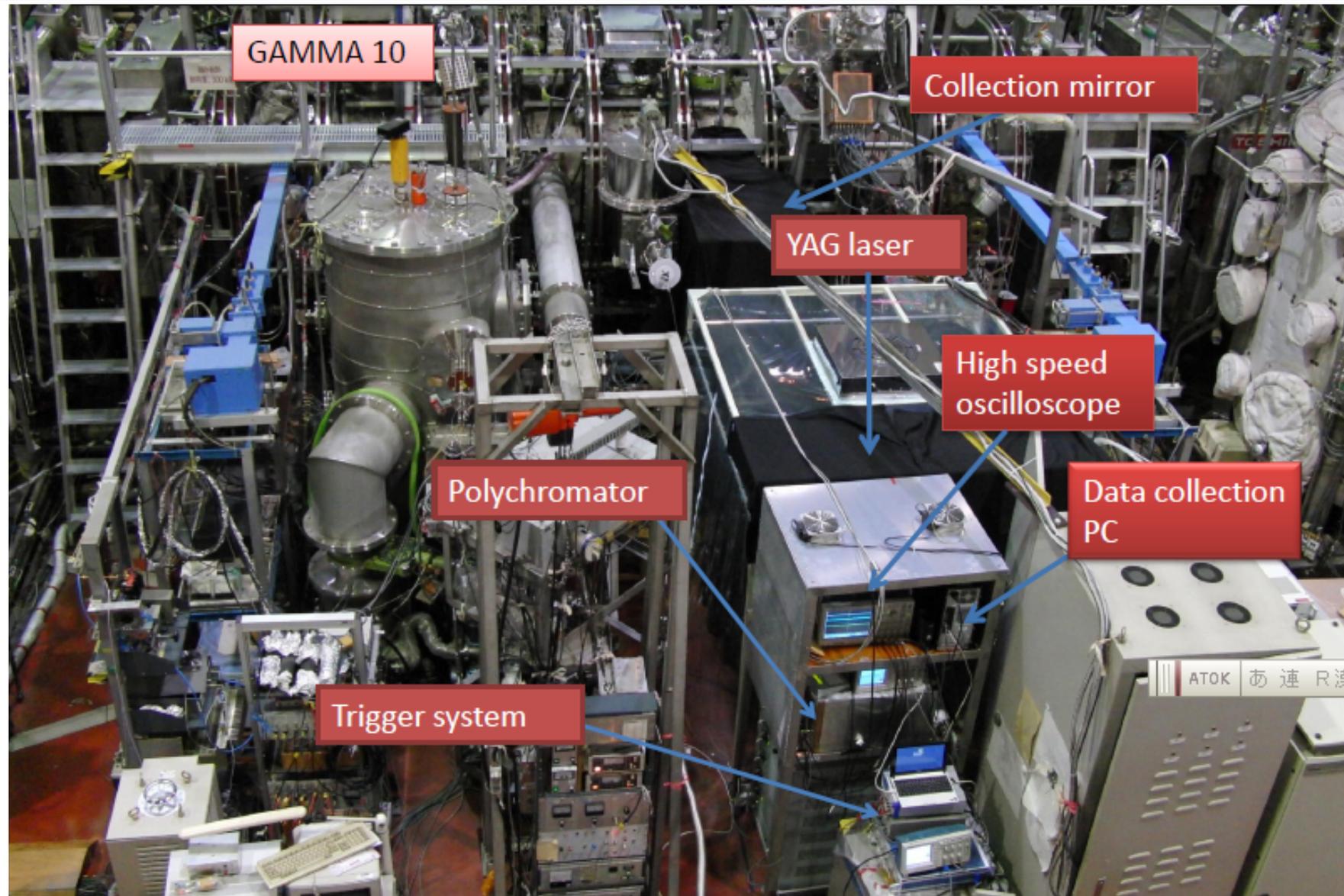
- ・ レーザーへの要求性能が低い、汎用性大
- ・ マルチパス光路が同軸
- ・ 光学ロスで減衰するまで往復回数制限なし

# 新型マルチパストムソン散乱計測システム 研究体制

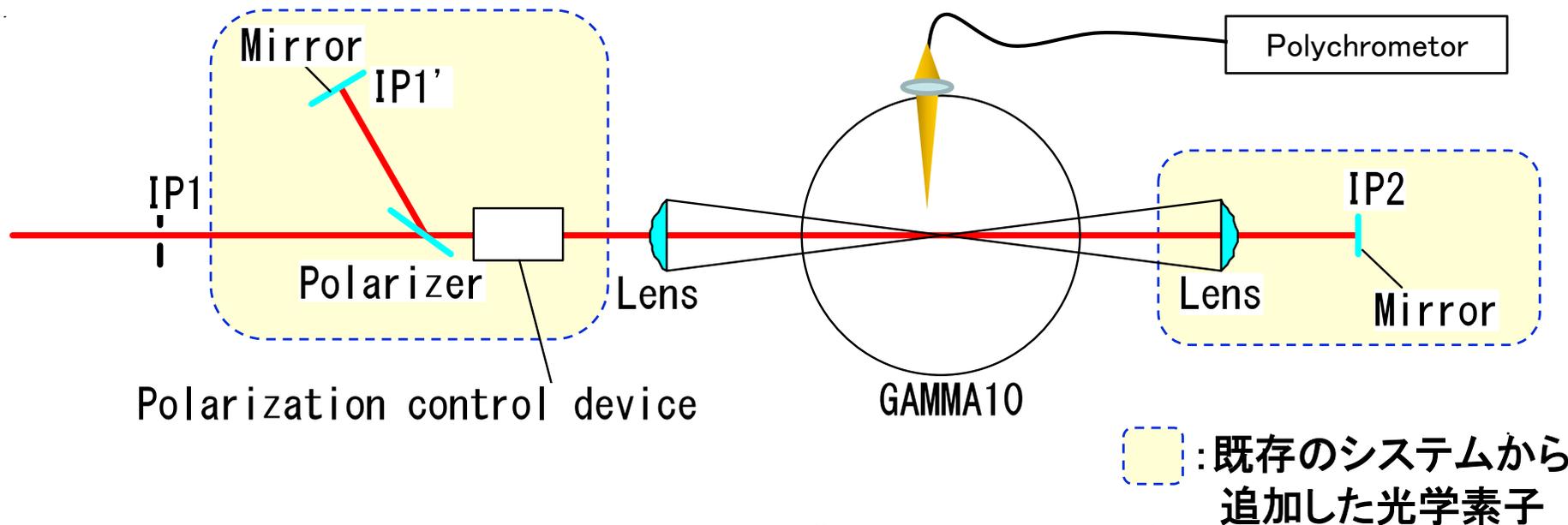
LHD計画共同研究「新型マルチパストムソン散乱計測システムの開発」  
NIFS11KOAHO25

氏名	所属
吉川正志 (代表)	筑波大学・大学院数理物質科学研究科
今井 剛	筑波大学・大学院数理物質科学研究科
坂本瑞樹	筑波大学・大学院数理物質科学研究科
中嶋洋輔	筑波大学・大学院数理物質科学研究科
森本真人	筑波大学・大学院数理物質科学研究科
川端一男	核融合科学研究所
山田一博	核融合科学研究所
安原 亮 (世話人)	核融合科学研究所
舟場久芳	核融合科学研究所
南 貴司	京都大学・エネルギー理工学研究所

# GAMMA10トムソン散乱システム



# 像転送と偏光制御による 新型マルチパストムソンシステム



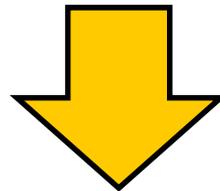
新型マルチパストムソン散乱システムの概念図

## 特徴

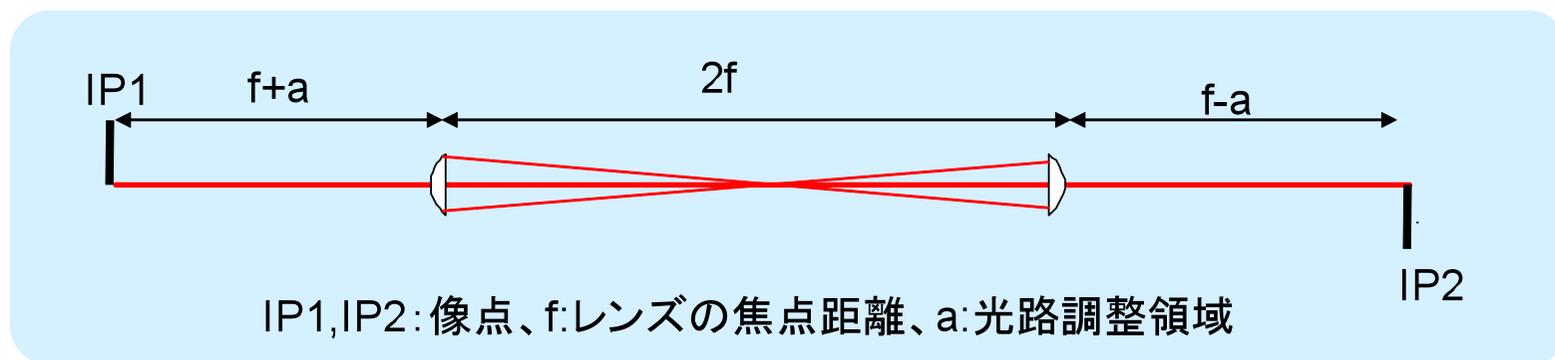
- ・ レーザーへの要求性能が低い汎用的なマルチパスシステム
- ・ マルチパス光路が同軸
- ・ 光学ロスで減衰するまで往復回数の制限なし

# 像転送によるビーム品質の保持

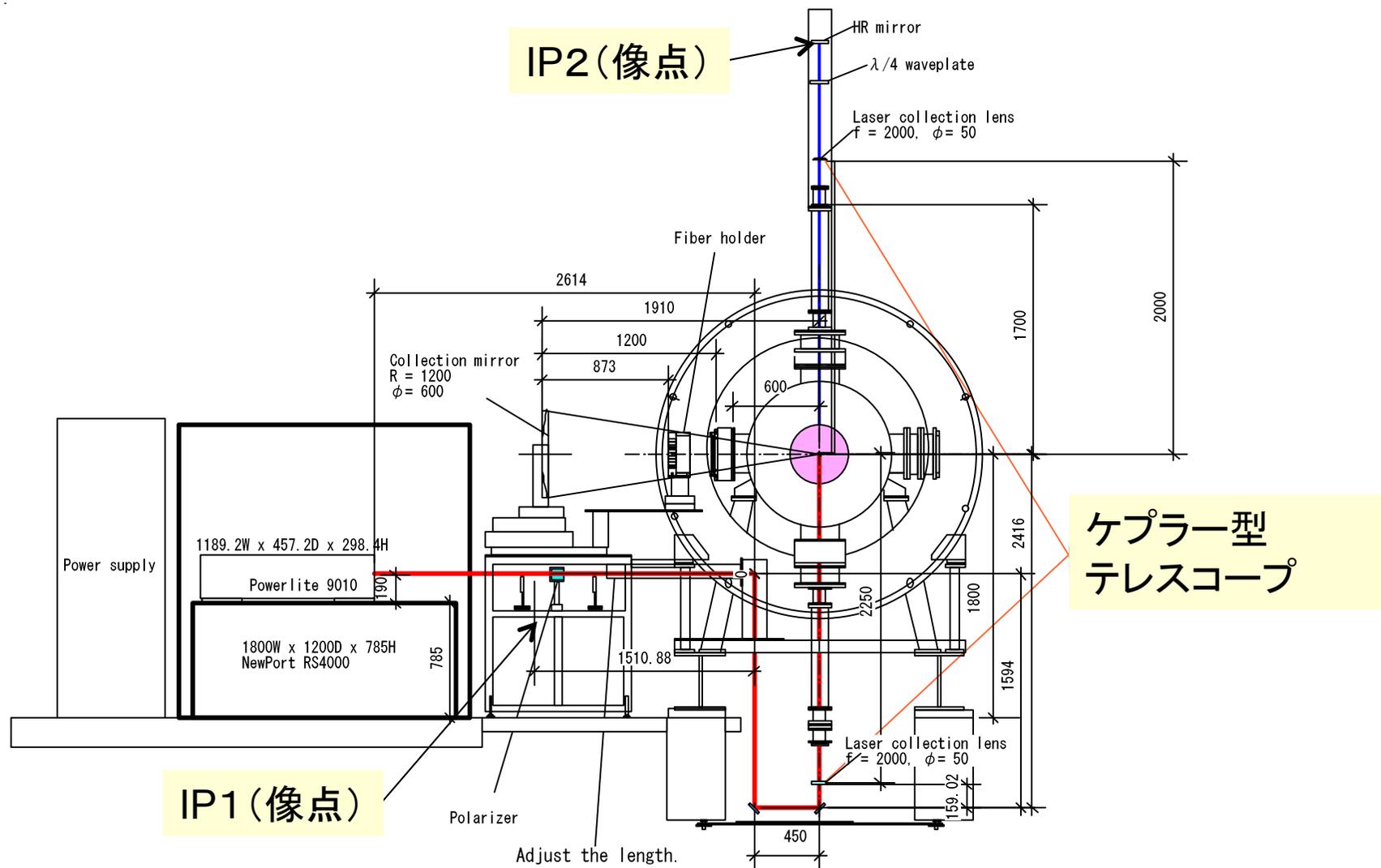
高次モードを持つレーザー光を長距離伝搬させると、フレネル回折によってエネルギー損失や光学素子へのダメージが生じてしまう。



## ケプラー型テレスコープ光学系による像転送

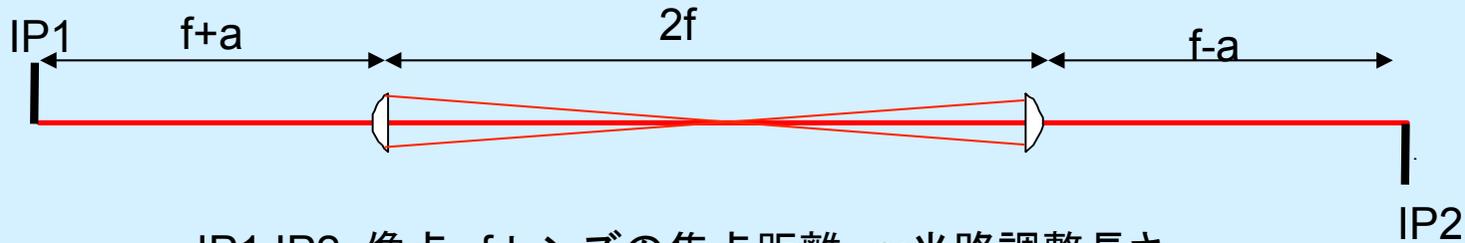


# 像転送光学系を導入したガンマ10 トムソン散乱システムの光学パス



像転送を行うことで、ビームパターンが保存される

# 光学系の伝搬解析(光線行列)



IP1,IP2: 像点、f: レンズの焦点距離、a: 光路調整長さ

IP1からIP2への像転送

$$\begin{pmatrix} r_2 \\ s_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & f-a \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 2 \cdot f \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & f-a \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} r_1 \\ s_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -r_1 \\ -s_1 \end{pmatrix}$$

IP2からIP1への像転送

$$\begin{pmatrix} r_1 \\ s_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & f-a \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 2 \cdot f \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & f-a \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} r_2 \\ s_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -r_2 \\ -s_2 \end{pmatrix}$$

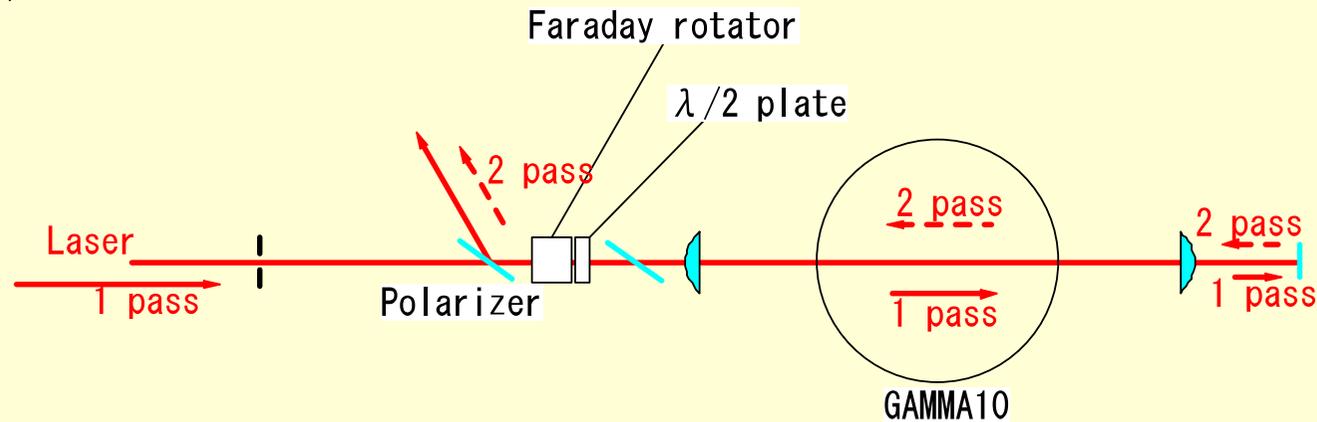
$r_i, s_i$  はそれぞれの像点での光線の位置と向き

ABCDマトリクスによって像転送の成立が確認された。

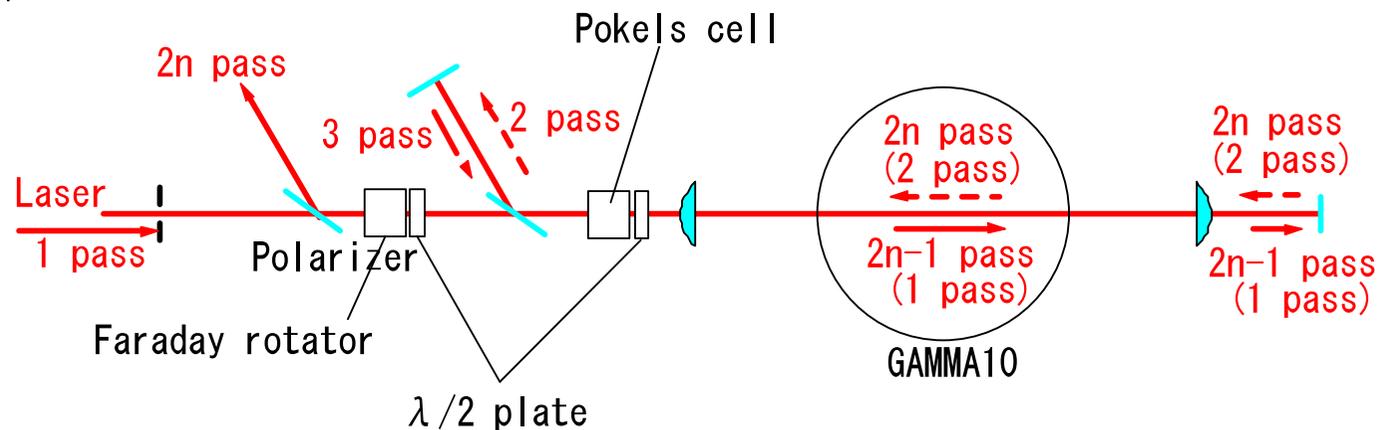
焦点距離 $f$ を2000mm、光路調整長さ $a$ を1700mmとすることで、ガンマ10のトムソン散乱計測システムにケプラー型望遠鏡光学系が適応可能である。

# 偏光によるマルチパストムソン

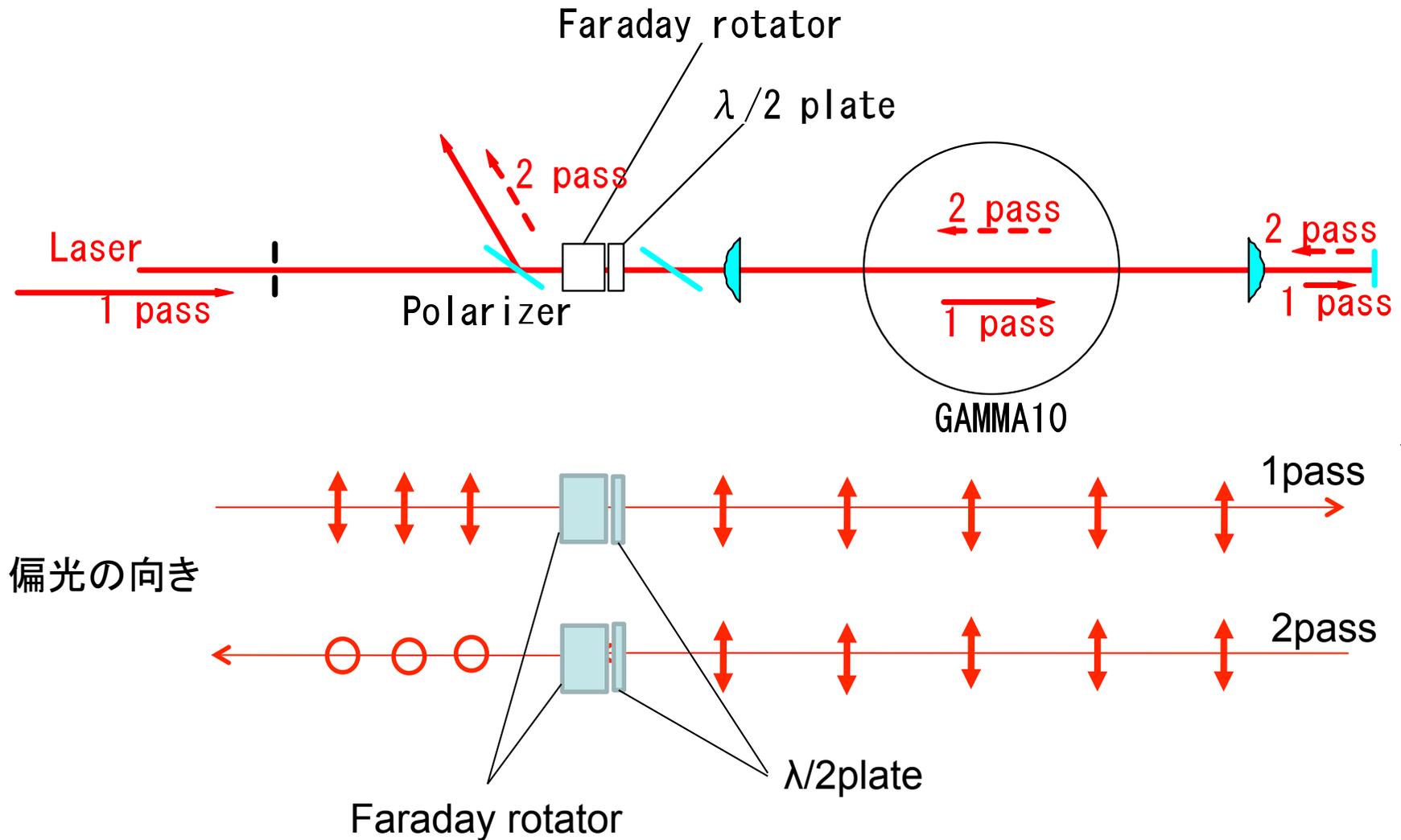
2パス・・・主要光学部品：ファラデーアイソレーター



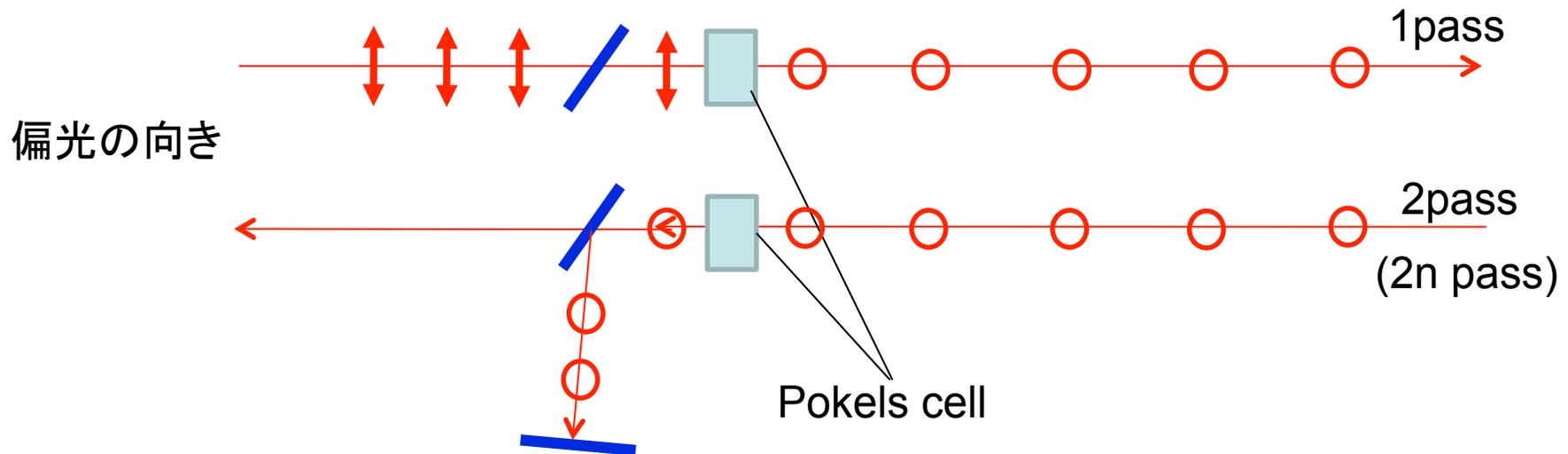
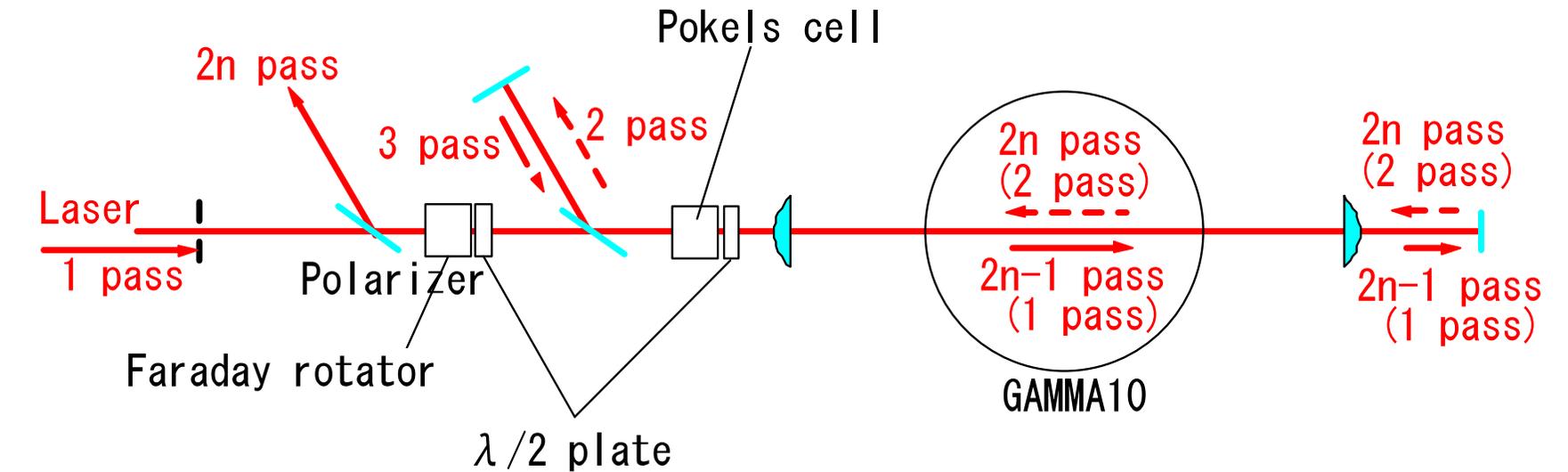
Nパス (N=2n, n=1, 2, 3, ...) 主要光学部品：ポッケルスセル



# 偏光によるマルチパストムソン 2パスシステム



# 偏光によるマルチパストムソン 2パスシステム



# Jones matrix による偏光解析

Jones Matrix:

偏光光学システムに入射、出射する偏光の解析手法

偏光光学素子を表す Jones matrix

$$\begin{pmatrix} A_2 \\ A_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} A_1 \\ A_1 \end{pmatrix}$$

出力光の偏光状態

入力光の偏光状態

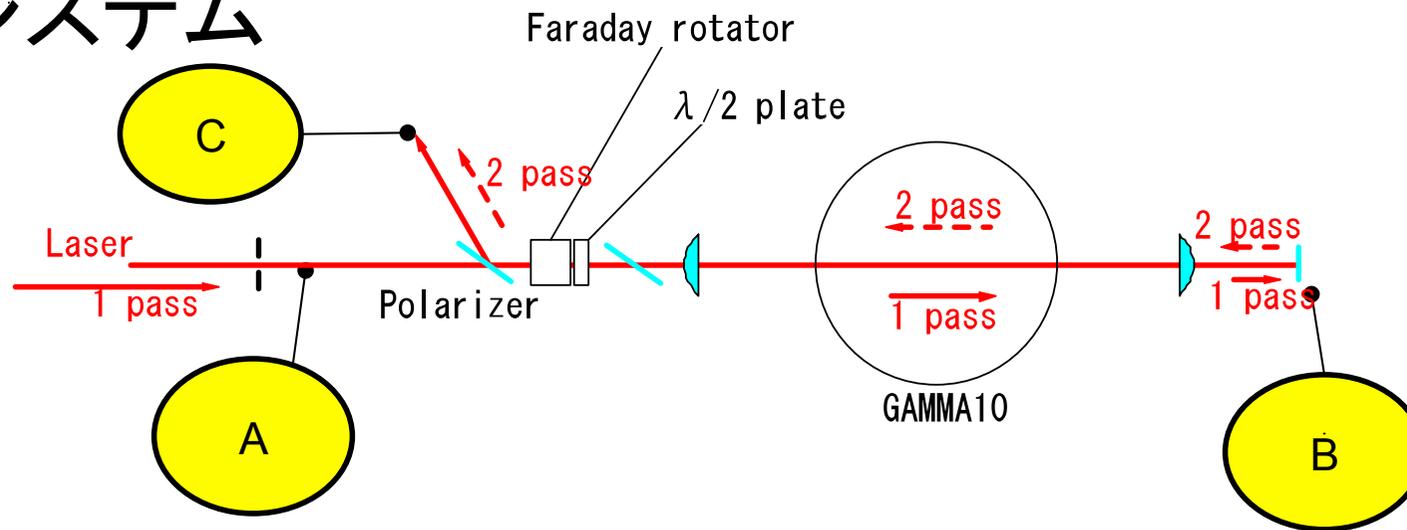
種々の偏光状態、偏光素子を表す Jones matrix

$$1/2\lambda\text{板} : HWP = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix}, \quad 45^\circ\text{Faraday回轉子} : F = \begin{pmatrix} \cos(\pi/4) & \sin(\pi/4) \\ -\sin(\pi/4) & \cos(\pi/4) \end{pmatrix}$$

$$\text{ポラライザ} : PL = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad \text{P偏光} : P = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \text{S偏光} : S = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

# Jones matrix による偏光解析

## 2パスシステム



往路: AからBへ

$$PL \cdot HWP \cdot F \cdot PL \cdot P = P \quad \rightarrow P \text{ 偏光から } P \text{ 偏光}$$

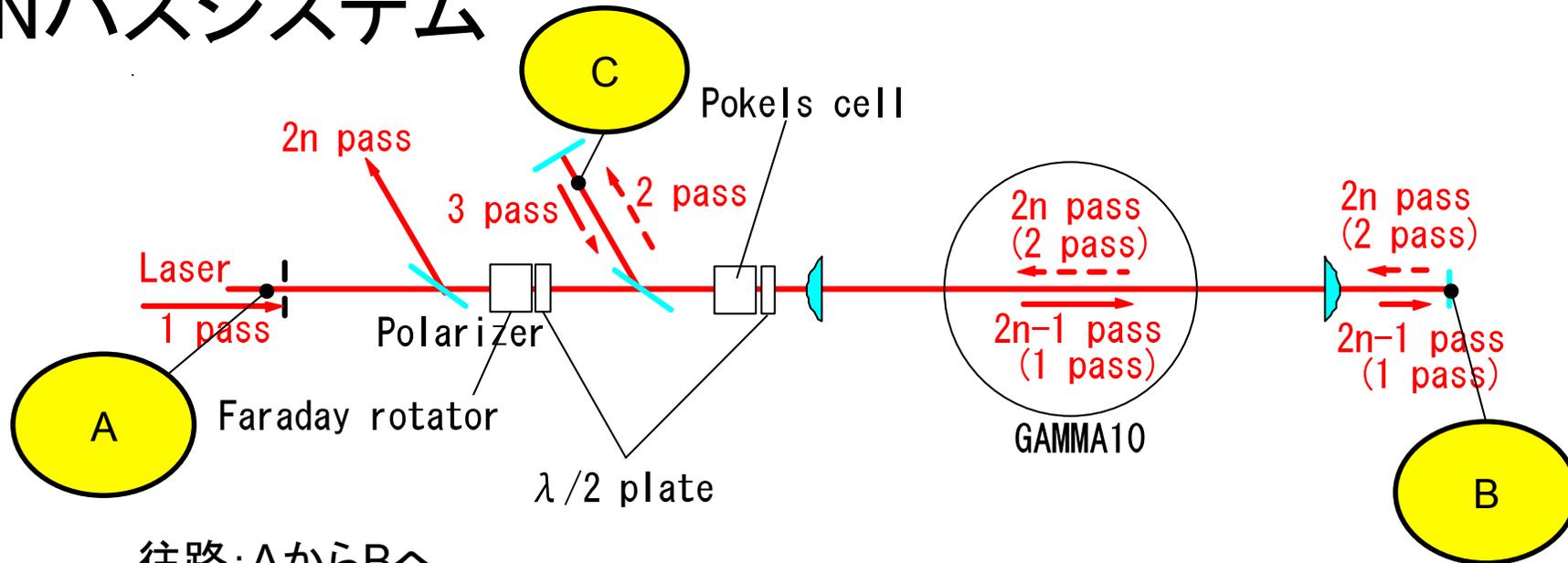
復路: BからCへ

$$PL \cdot F \cdot HWP^{-1} \cdot PL \cdot P = S \quad \rightarrow P \text{ 偏光から } S \text{ 偏光}$$

HWP:  $1/2\lambda$  波長板  
 F: ファラデー回転子 ( $45^\circ$ )  
 PL: ポラライザ  
 P: P偏光、S: S偏光

# Jones matrix による偏光解析

## Nパスシステム



往路: AからBへ

$$PL \cdot HWP \cdot F \cdot PL \cdot P = P \quad \rightarrow P \text{偏光から} P \text{偏光}$$

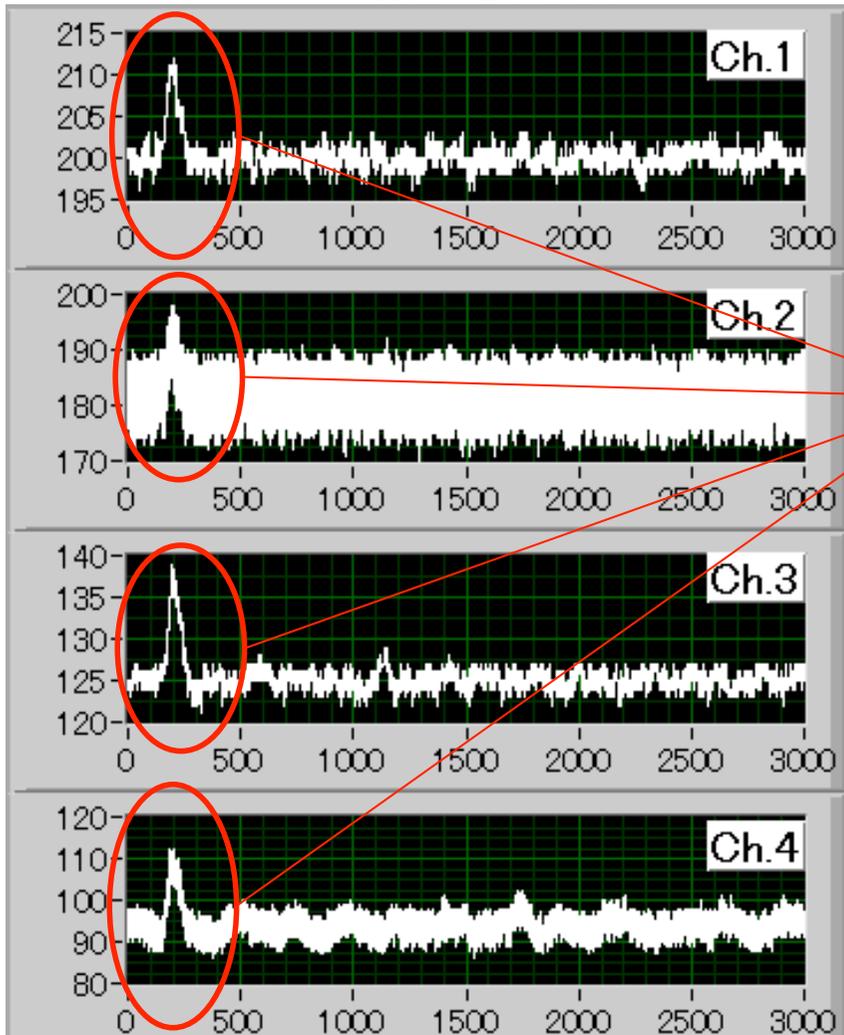
復路: BからCへ (ポッケルスセルの電源オン)

$$PL \cdot F \cdot HWP^{-1} \cdot PL \cdot P = S \quad \rightarrow \text{ポッケルスセルで} P \text{偏光から} S \text{偏光}$$

BC間でレーザー光が閉じ込められる。

# GAMMA10トムソン散乱計測に対するメリット

各波長チャンネルから得られた  
トムソン散乱信号例

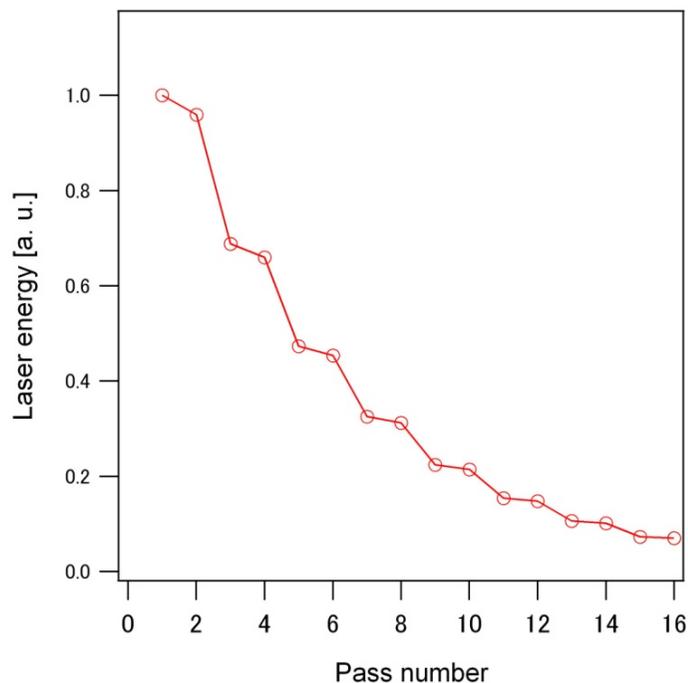


マルチパス化による**散乱光量の増大**でGAMMA10トムソン散乱計測の**信頼性が大幅に向上**する可能性がある。

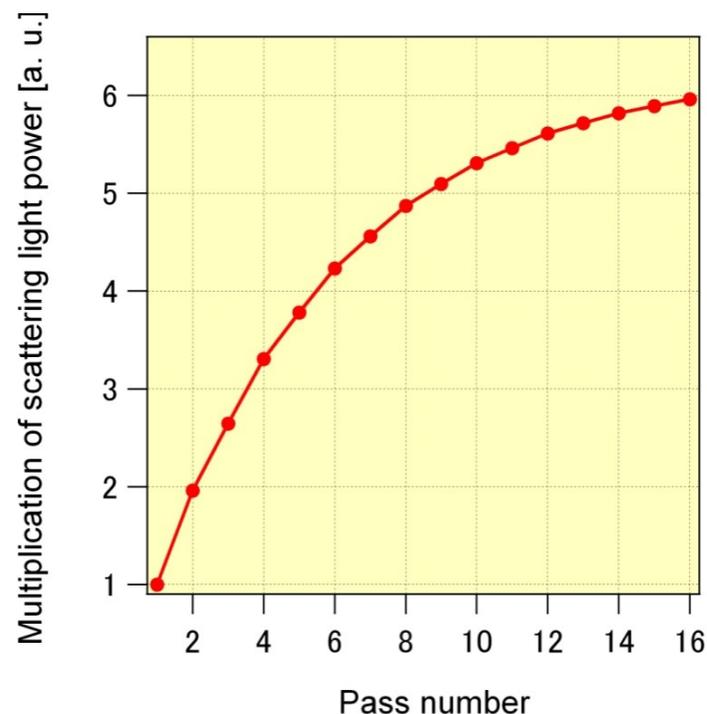
- ・電子密度  $(2.5 \pm 0.8) \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$
- ・電子温度 40 eV、80eV(P/B-ECH)
- ・電子温度誤差13%

# マルチパス化による散乱光量増加

パス数とレーザー減衰率の関係

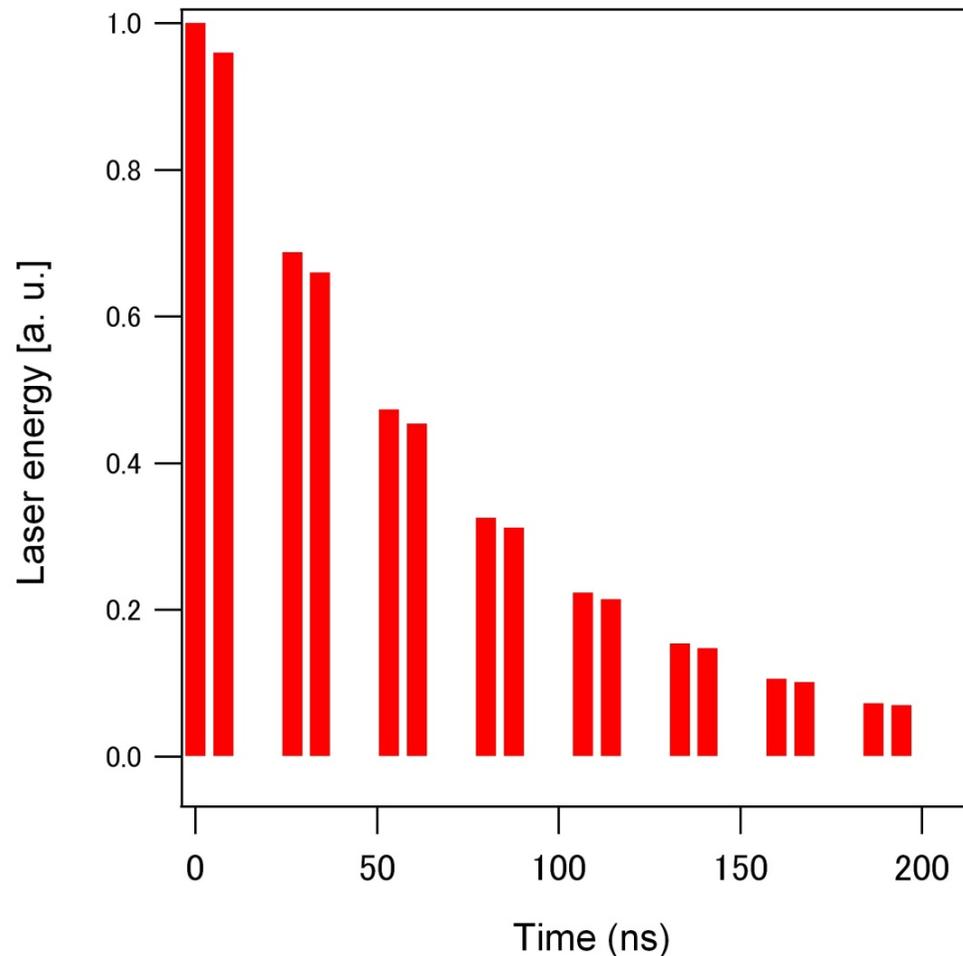


パス数と散乱光量の関係



2パスで約2倍、16パスで6倍程度の散乱光量の増加が見込める。

# マルチパストムソン方式による 高時間分解計測の可能性

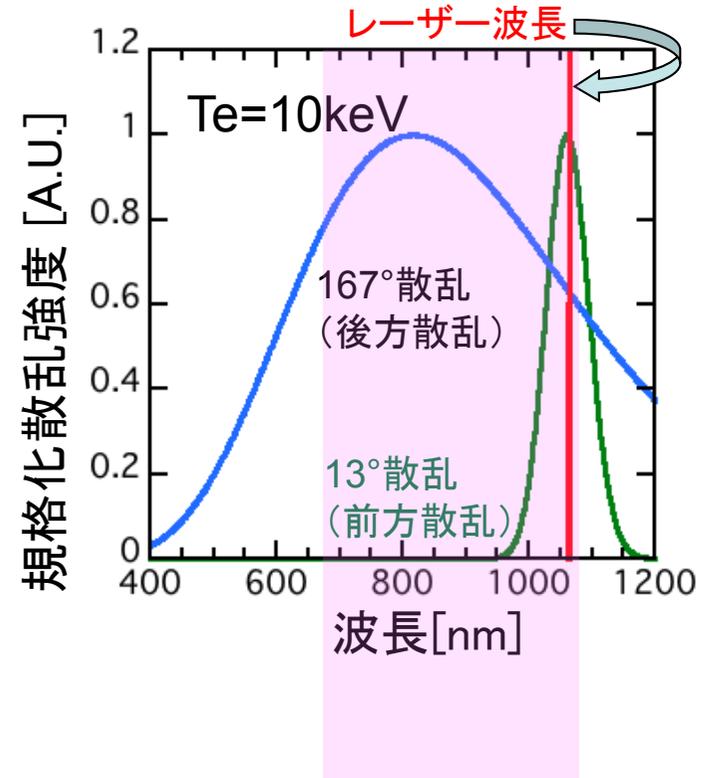
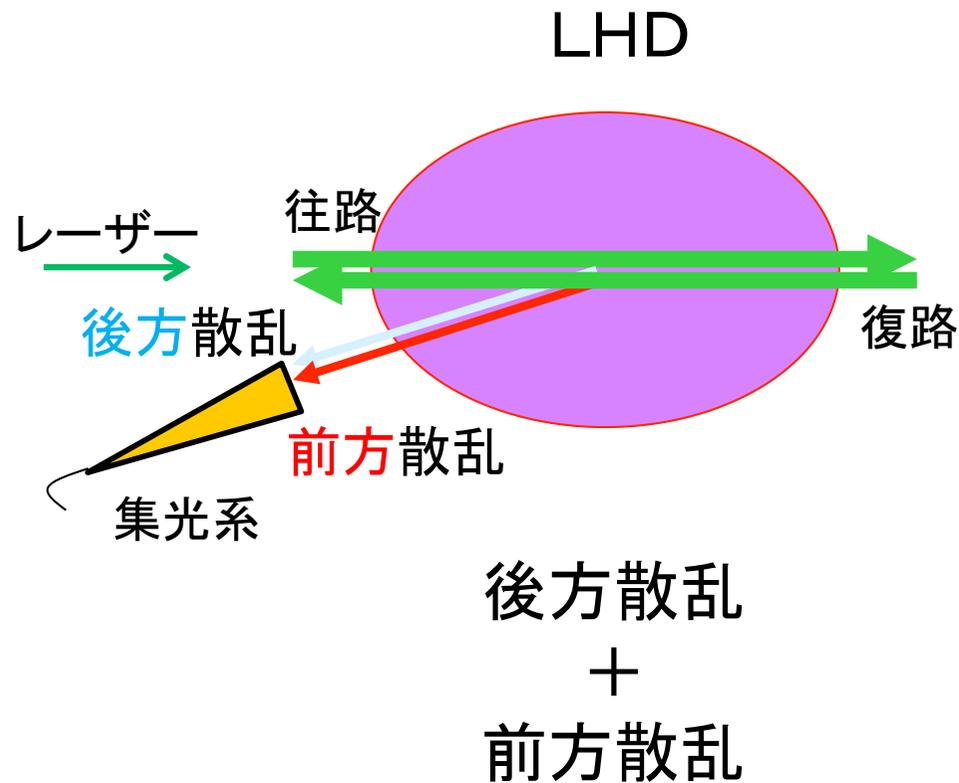


現在の光学システムは  
約200nsの時間スケール  
を16分割

光路長を稼ぐことにより  
時間スケールは延長可  
能

各パスのレーザーエネルギーと  
散乱光の発生タイミングの関係

# LHDに対して



ポリクロメーターの測定チャンネル

- ・後方散乱 スペクトルの広がり大
- ・前方散乱 スペクトルの広がり小

マルチパス化することによって、高温での測定領域を拡大することが可能

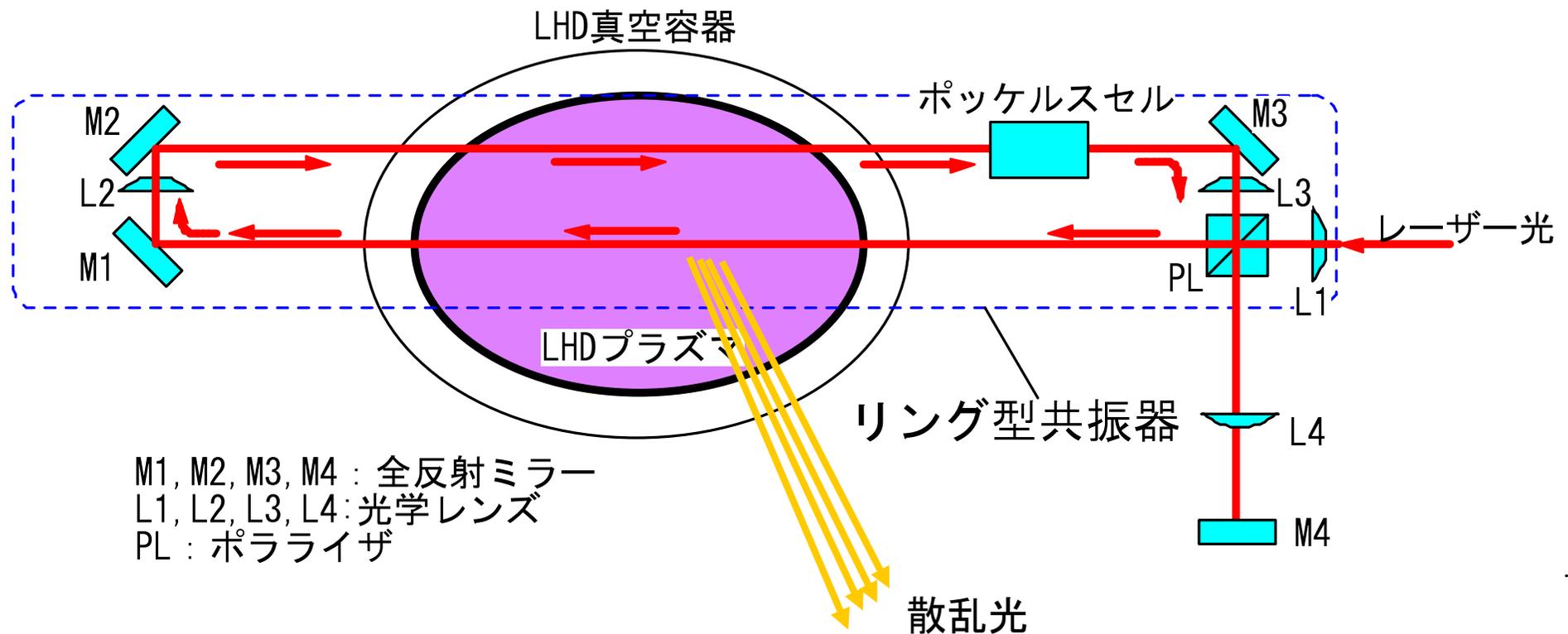
# 研究計画(3年間)

	H23年	H24年	H25年
往復パス	光学設計、機構設計 →		
	部品調達/検査 →		
	ガス散乱実験 →	ガス散乱実験 →	ガス散乱実験 →
	往復パスプラズマ計測	→	
複数パス	光学設計、機構設計 →		
		部品調達/検査 →	
		ガス散乱実験 →	
		複数パスプラズマ計測	→
			高時間分解計測デモ →

# まとめ

- ・ 散乱光量の増大、測定時間分解能の向上を目的にガンマ10において、新型マルチパストムソン計測システムを開発している。
- ・ 光線追跡及び偏光解析により偏光制御と像転送光学系による新型マルチパストムソンシステムの実現性を確かめた。
- ・ 散乱光量は、2パスで約2倍、16パスで6倍程度の散乱光量の増加が見込める。また数百ナノ秒の時間スケールを16分割した高時間分解能計測が可能であることを示した。
- ・ 今年度は2パスシステム、来年度はマルチパスシステムの実証を目標に研究を進める予定である。

# 偏光光学を利用したマルチパストムソン散乱概念



→今年度からGAMMA10を用いた実証研究を開始

LHD計画共同研究

「新型マルチパストムソン散乱計測システムの開発」H23-25年度