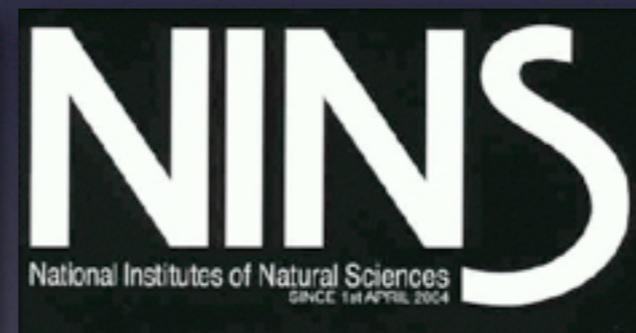
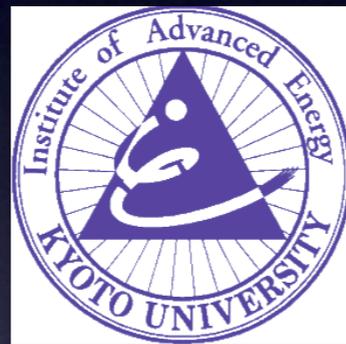


核融合プラズマのための Nd:YAGトムソン散乱計測装置に 最適なデータ処理システムの開発

南貴司@ 計測システム検討会2013.7.10-11

共同研究者: 山田一博、舟場久芳、伊藤康彦、中西秀哉、波多江仰紀



私に物理研究においてデータ処理の大切さを教えて頂いた故曄道恭先生に感謝しご冥福をお祈りします。

本研究は核融合科学研究所・一般共同研究NIFS12KEMH001 研究課題「高繰り返しNd:YAGトムソン計測のための新しいデータ処理システムの開発」及び日本原子力機構トカマク国内重点化共同研究「長時間放電に対応した高繰り返しトムソン散乱計測のためのデータ処理システムの検討」のサポートを受けています。

アウトライン

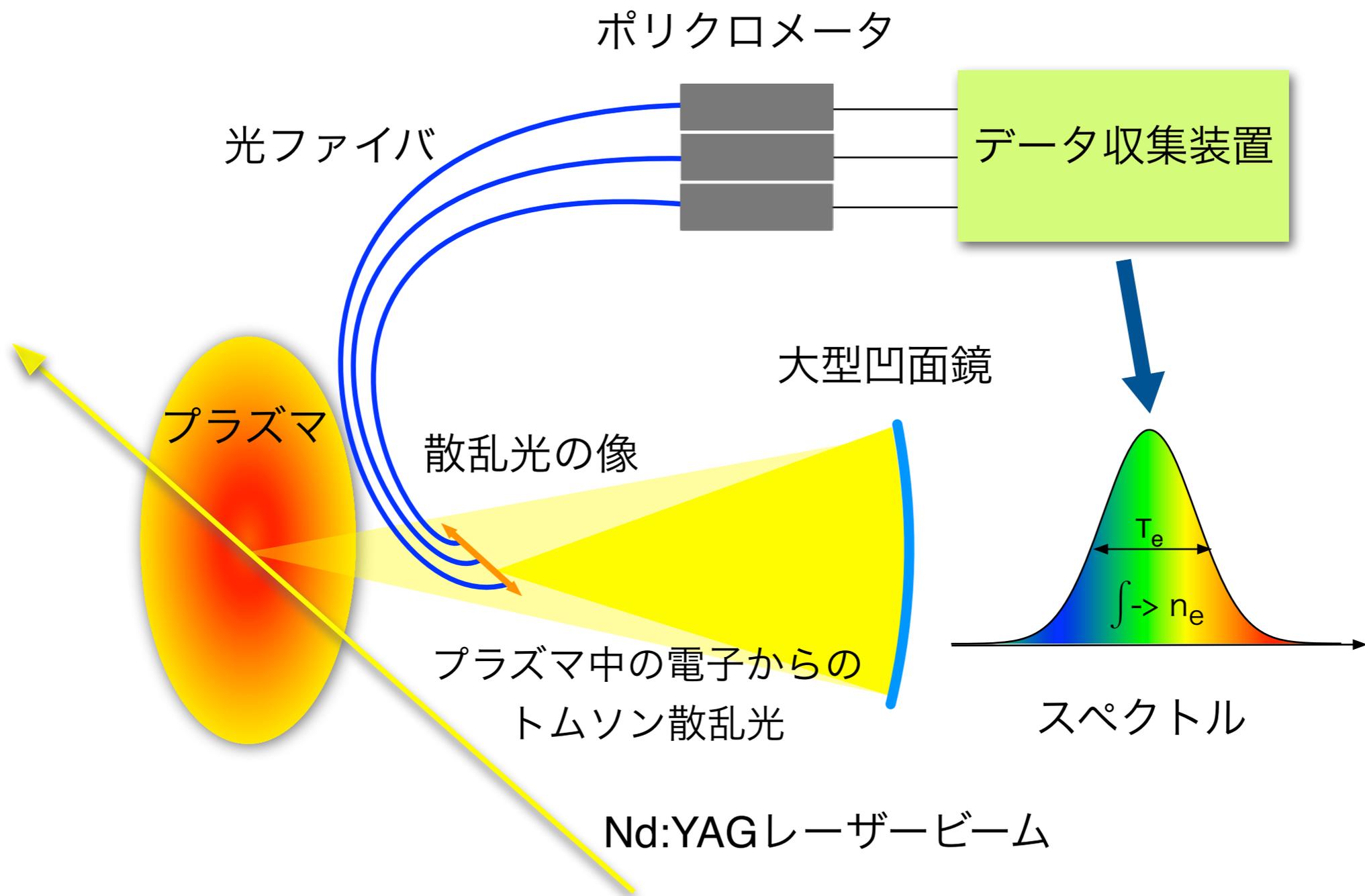
- Nd:YAG Thomson散乱計測とは？
- 背景と動機
- 高速ADコンバータをYAG Thomsonに適応することの利点
 - 高速ADコンバータによるYAG Thomson測定精度の改善
- 新しく開発する高速ADコンバータの動作
- SiTCPを使ったデータ転送
- 現在の開発状況
- まとめ

トムソン散乱計測とは？

プラズマの性質を決定する基本パラメータは**温度と密度**

プラズマ中の電子による電磁波の散乱を計測することにより、

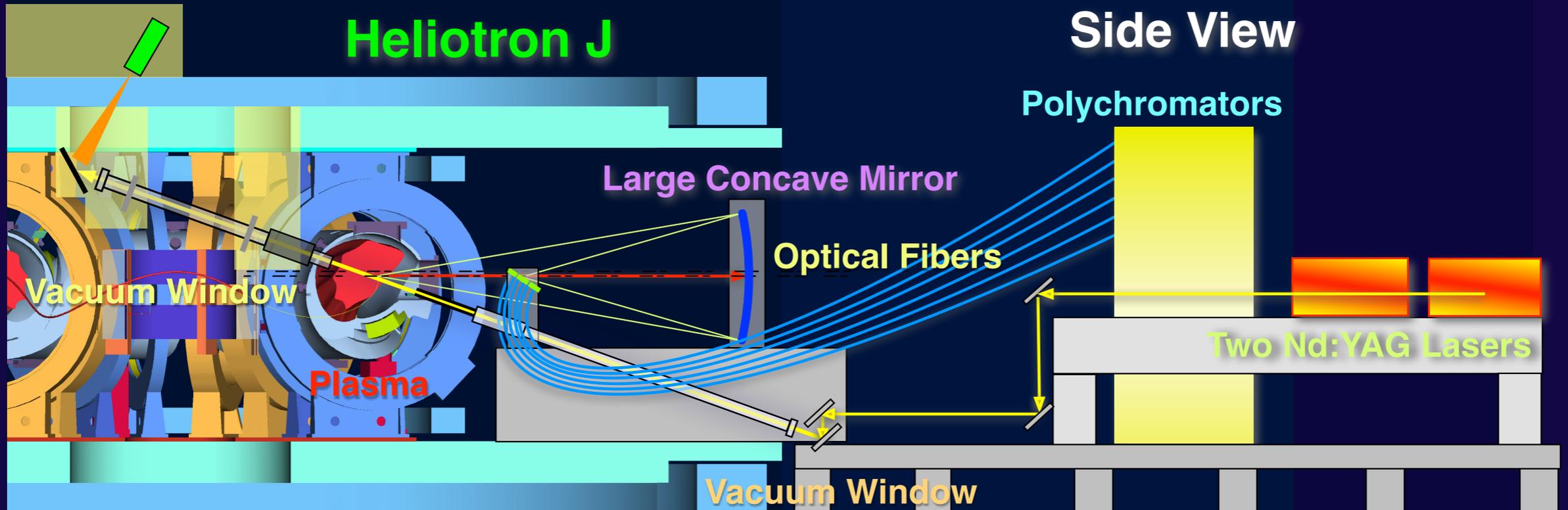
ドップラー広がりから電子温度を総散乱光量から電子密度をもとめる。



Heliotron JのNd:YAGトムソン散乱計測装置全体構成

Beam Dump and
Beam Location Monitor for Beam Alignment

Heliotron J



Top View

Two Nd:YAG Lasers

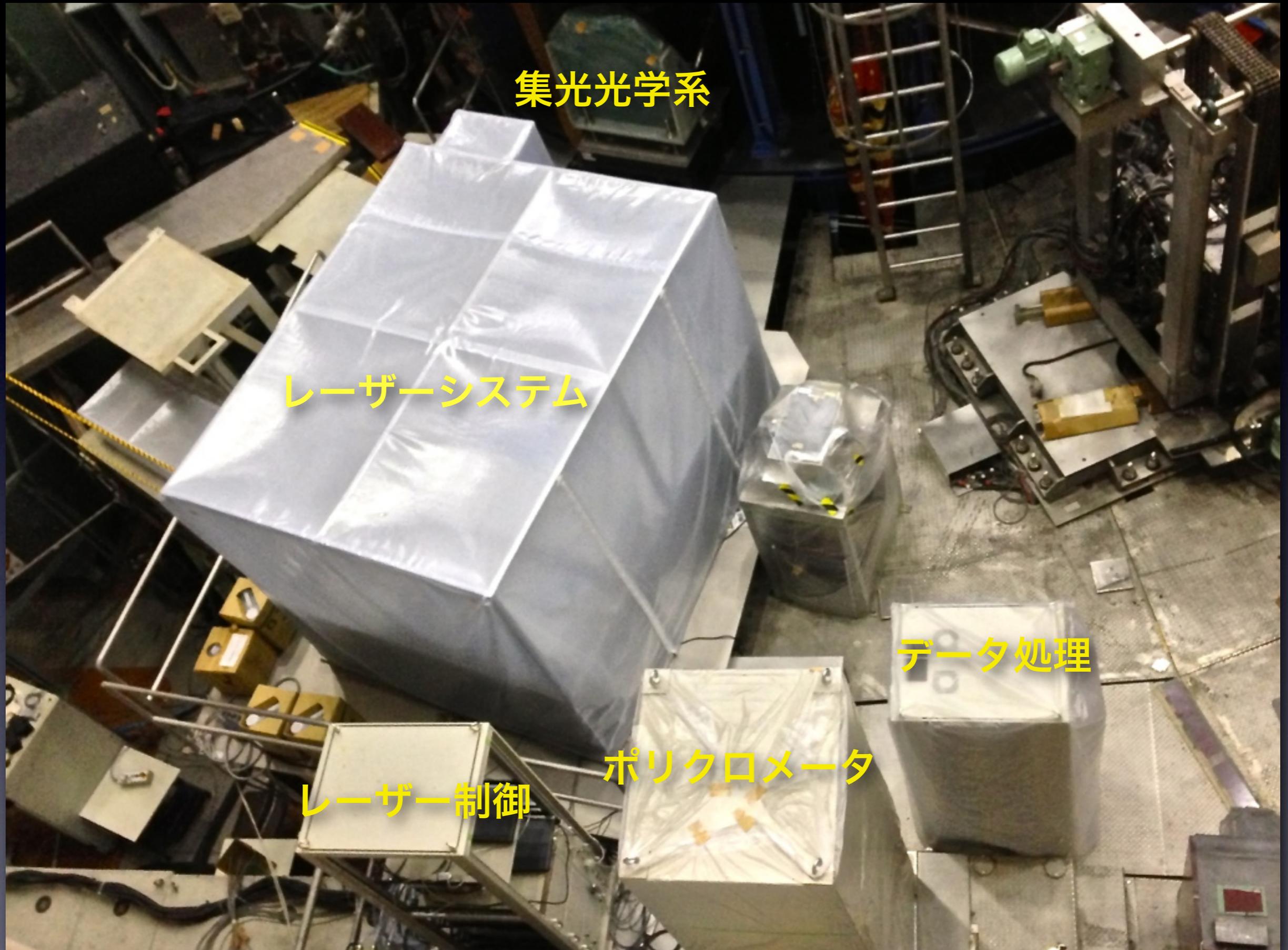
Large Concave Mirror

Heliotron J

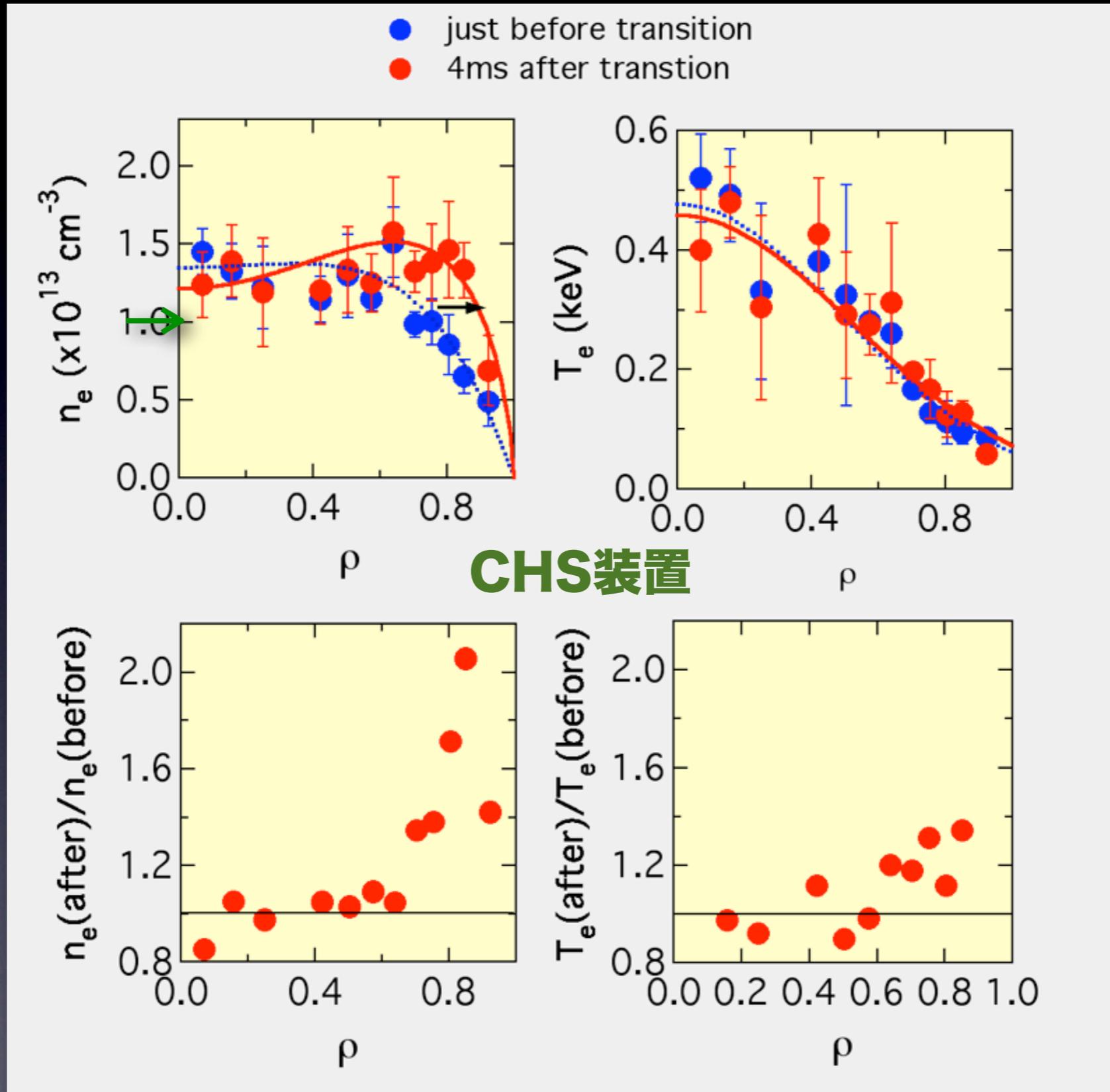
Polychromators

This top view diagram illustrates the layout of the main components. Two Nd:YAG lasers are positioned at the top left, with their beams directed towards the Heliotron J. A large concave mirror is located between the lasers and the Heliotron J, reflecting the scattered light. The Heliotron J is shown as a central component. Polychromators are positioned to the left of the Heliotron J, receiving light from the mirror. The entire setup is supported by a series of vertical columns.

Heliotron JのNd:YAGトムソン散乱計測装置



トムソン散乱計測装置による電子の温度分布と密度分布



電子温度、密度の分布の時間発展を計測

背景と動機

- 従来Nd:YAG Thomson散乱計測の高速散乱信号のデータ取り込みに用いられて来たのは**電荷積分型ADコンバーター**である。しかし**電荷積分型ADコンバーター**は素粒子分野で利用するために開発された製品で必ずしもNd:YAG Thomson散乱計測に適したシステムではない。
- 素粒子分野で開発されたシステムを、そのまま無理やり転用するのではなく**Nd:YAGトムソン散乱計測に最適な性能と機能を有する高速散乱光信号取り込み装置を開発**したい。
- Nd:YAGトムソン散乱計測装置は、Heliotron J, LHD, JT-60SA, ITER, GAMMA10, QUESTなど、多くの磁場閉じ込め実験装置で採用されている。各研究機関個別で開発するより共同で開発し方が有利なので**大学、原子力機構、NIFSで共同開発**を行いたい。

Nd:YAGトムソン散乱計測に必要とされるデータ処理装置

- Nd:YAGトムソン散乱計測は干渉フィルターポリクロメータによって散乱信号を計測
 - 信号数=空間点 (ポリクロメータの台数x波長チャンネル数)
 - 空間点: 20-200 (HeliotronJでは25)
 - 波長チャンネル: 3-8 (HeliotronJでは6)
 - 空間(200)x波長(5以上)=**1000チャンネル以上** (HeliotronJでは150)
- Nd:YAGトムソン散乱計測はレーザー入射時間(数100ns) に比べてレーザー入射間隔が長い (平均数ms)
 - プラズマの放電時間: 100ms-100min (HeliotronJでは200ms)
 - 散乱信号のパルス幅: 10ns-200ns (HeliotronJでは~100ms)
 - 平均パルス間隔: 100 μ 秒-100m秒 (HeliotronJでは~10ms)
- 多チャンネルであるため低コストかつコンパクトな高速のデータ取得装置が必要

High Speed Nd:YAG Thomson Scattering Analog to Digital Converter (HYADC)

HYADCはYAG Thomsonの散乱光信号波形をパイプライン型ADコンバータで高速変換する方式

HYADCの利点

- 散乱光に対するサンプリングデータ量を増やすことができ取得できる情報量が増加するため**計測測定精度を大幅に向上**させることができる。
- 散乱光とほぼ同時刻に生成した背景光信号を使って**高精度かつ容易に背景光除去が行える**。
- 散乱光の波形情報が直接得られるので(つまりオシロスコープと同等の機能を有するので)ゲートタイミング調整時などの**YAGThomson散乱計測器の運用上、種々の作業が正確かつ容易に実行できる**。
- **マルチパルスThomson散乱計測においてパルス入射間隔が短い場合や複数のパルスが重なった場合でも高精度で測定データの解析が可能である**。

DIII-DのYAG Thomson散乱計測のデータ処理に伴う 測定誤差モデルを使ってHYADCの測定精度向上を評価

APDや増幅回路の統計的な揺らぎを評価

レーザーは t_0 に入射 背景光は一定とする
計測信号には背景光信号が含まれるので別の時間に置いて計測した背景光信号を減ずる。

$$S = (T + B) - B$$

$$\sigma_S^2 = \sigma_T^2 + 2(\sigma_B^2 - \sigma_{B12}) + \sigma_0^2$$

T: トムソン散乱光信号

B: 背景光信号

σ_{B12} : 2ゲート間の相互相関

σ_0 : 無信号時の回路ノイズ

$$\tau_F = R_F (C_D + C_E)$$

R_F : 電流電圧変換抵抗

C_D : APDの浮遊容量

C_E : 回路の浮遊容量

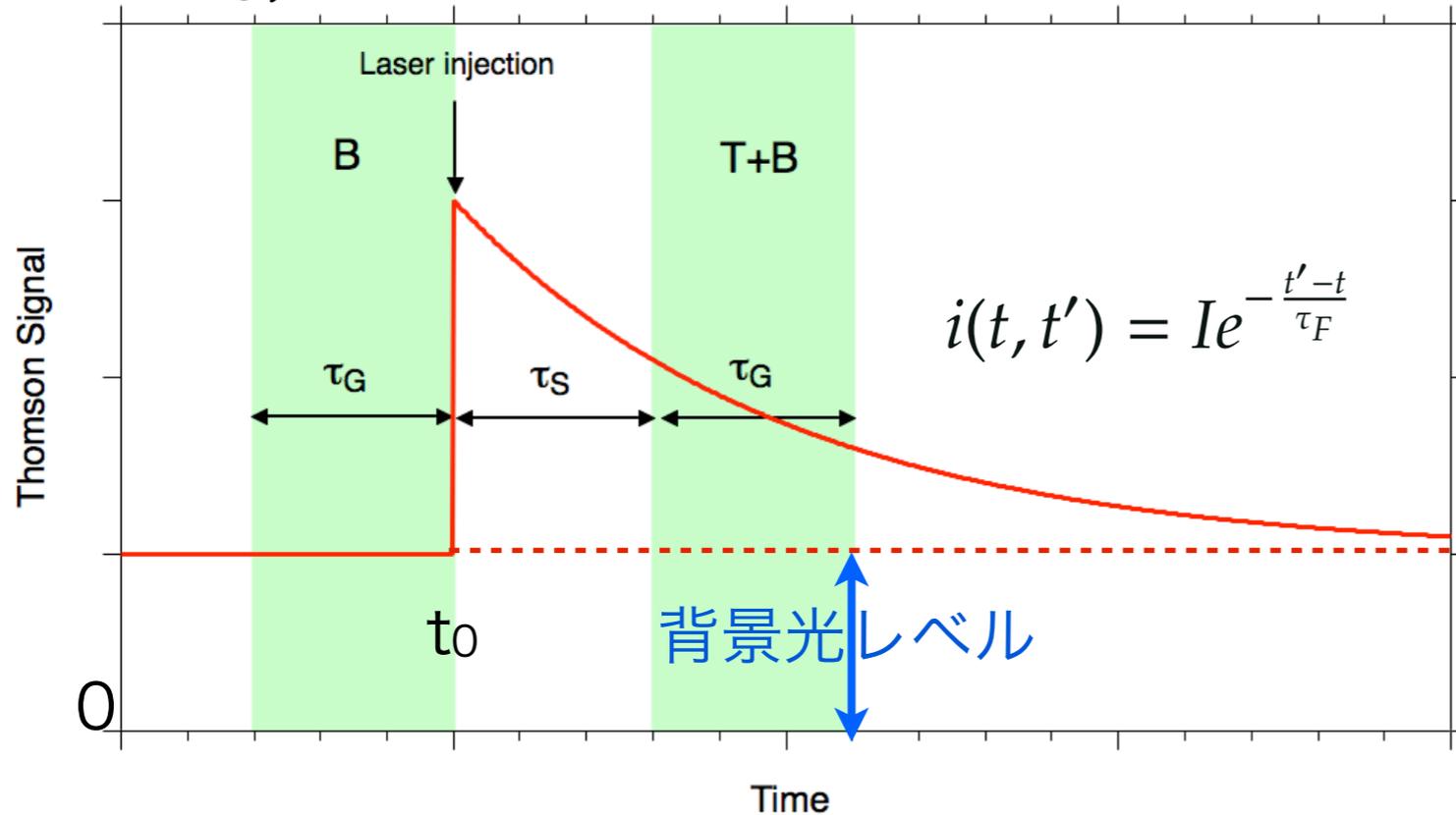
Q_p : トムソン散乱光電子数

F: APDの増倍率変動

R_{Qb} : 背景光散乱光比

$\delta S_0/S$: 無信号時のN/S比

$$S = \int_t^{t+\tau_G} A e^{-\frac{t-t_0}{\tau_F}} dt = A\tau_F \left(e^{\frac{\tau_G}{\tau_F}} - 1 \right) e^{-\frac{t-t_0+\tau_G}{\tau_F}} = ACe^{-\frac{t}{\tau_F}}$$

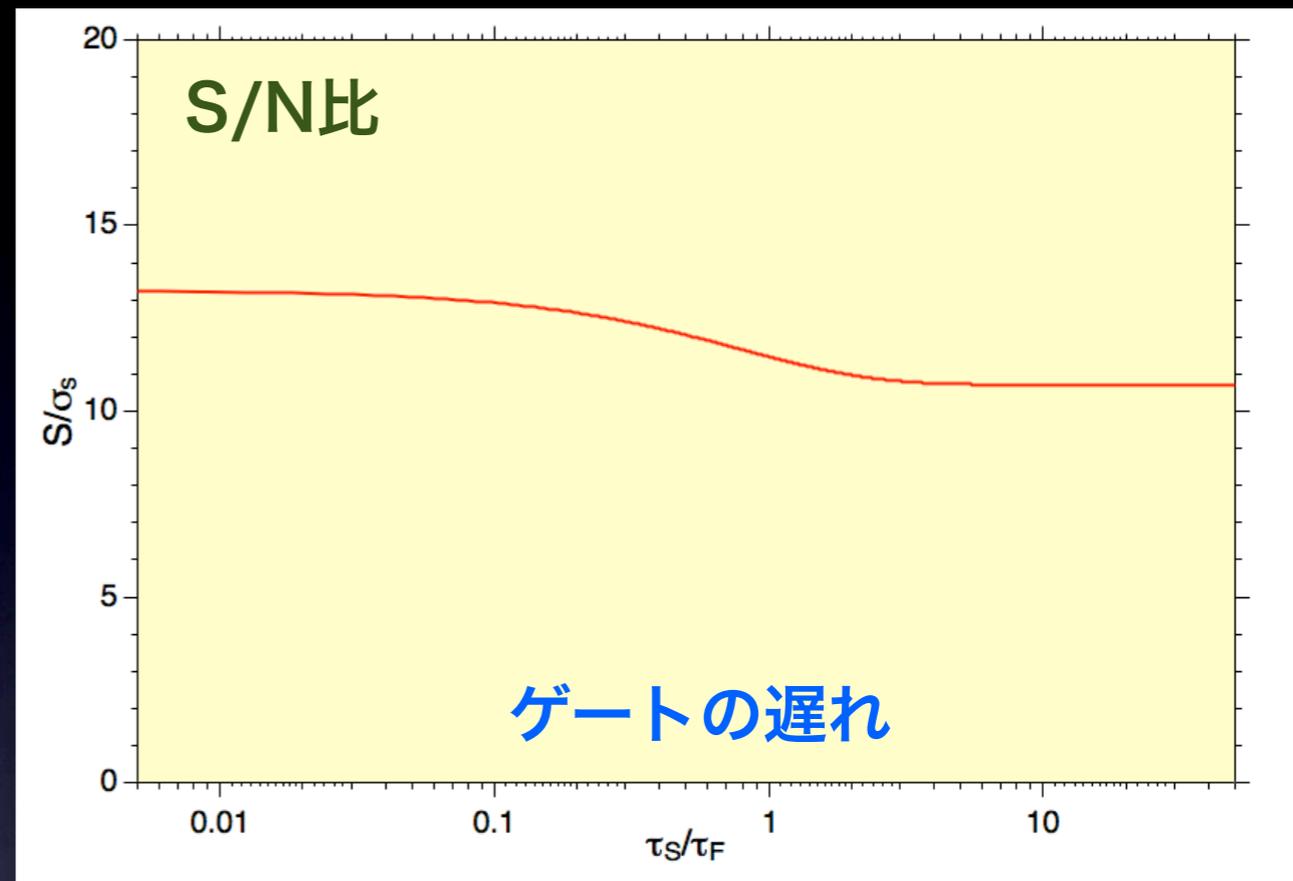
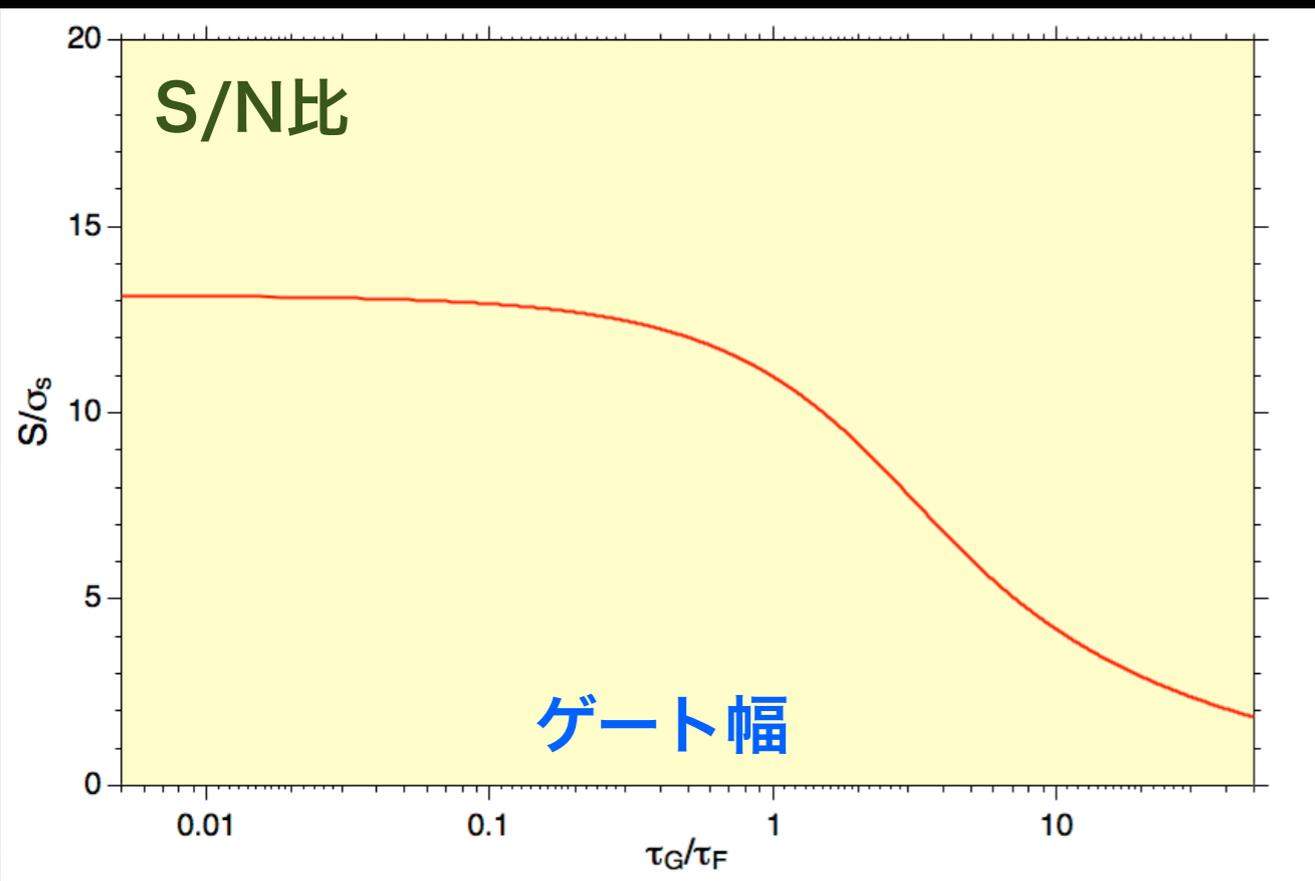


$$\frac{S}{\sigma_S} = \sqrt{\frac{Q_p}{F \left[\left\{ \frac{2(t_G - D)}{D^2} - e^{-t_S} \right\} R_{Qb} + 1 \right] + \left(\frac{\delta S_0}{S} \right)^2 Q_p}}$$

$$t_G = \frac{\tau_G}{\tau_F} \quad t_S = \frac{\tau_S}{\tau_F} \quad D = 1 - e^{-t_G}$$

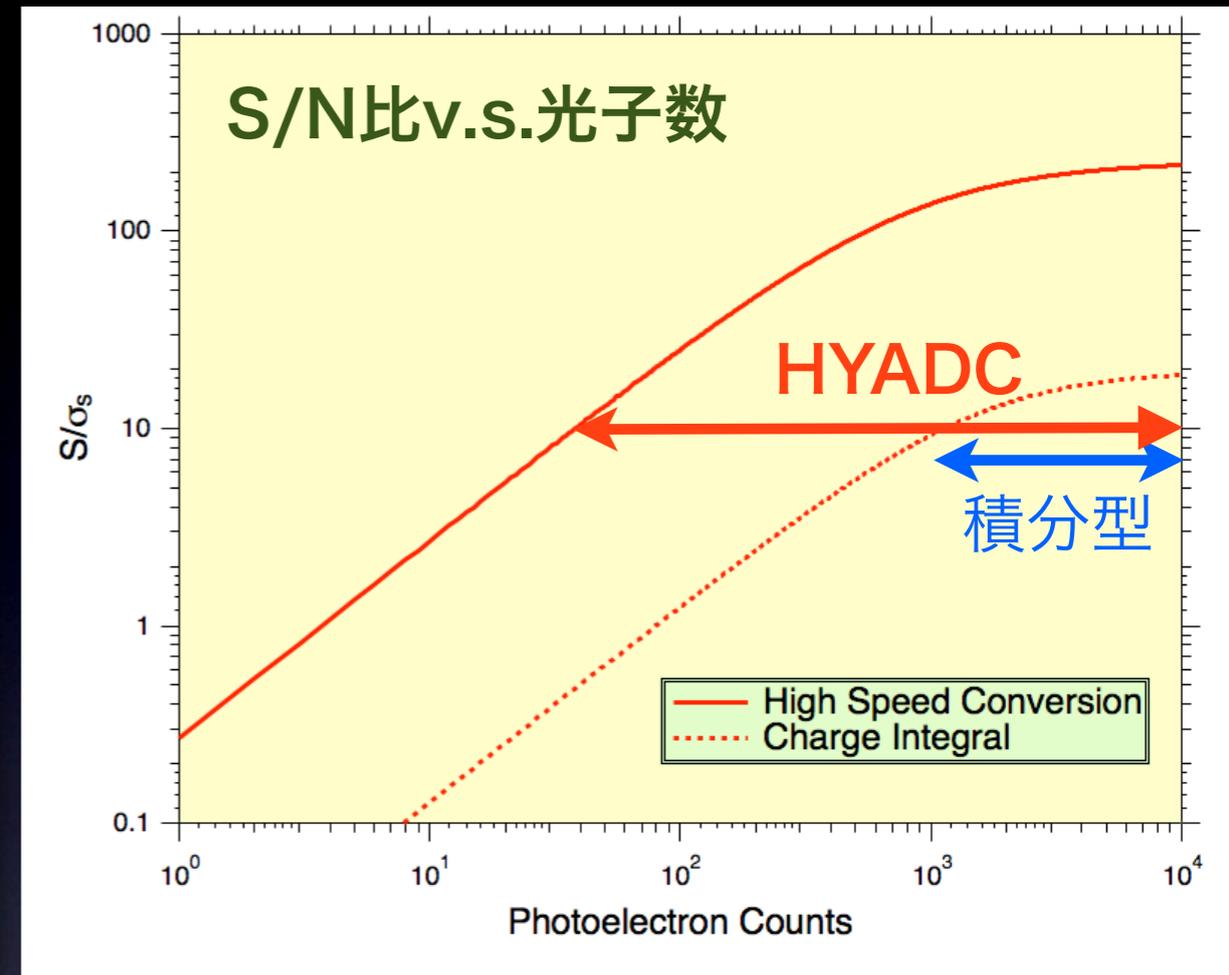
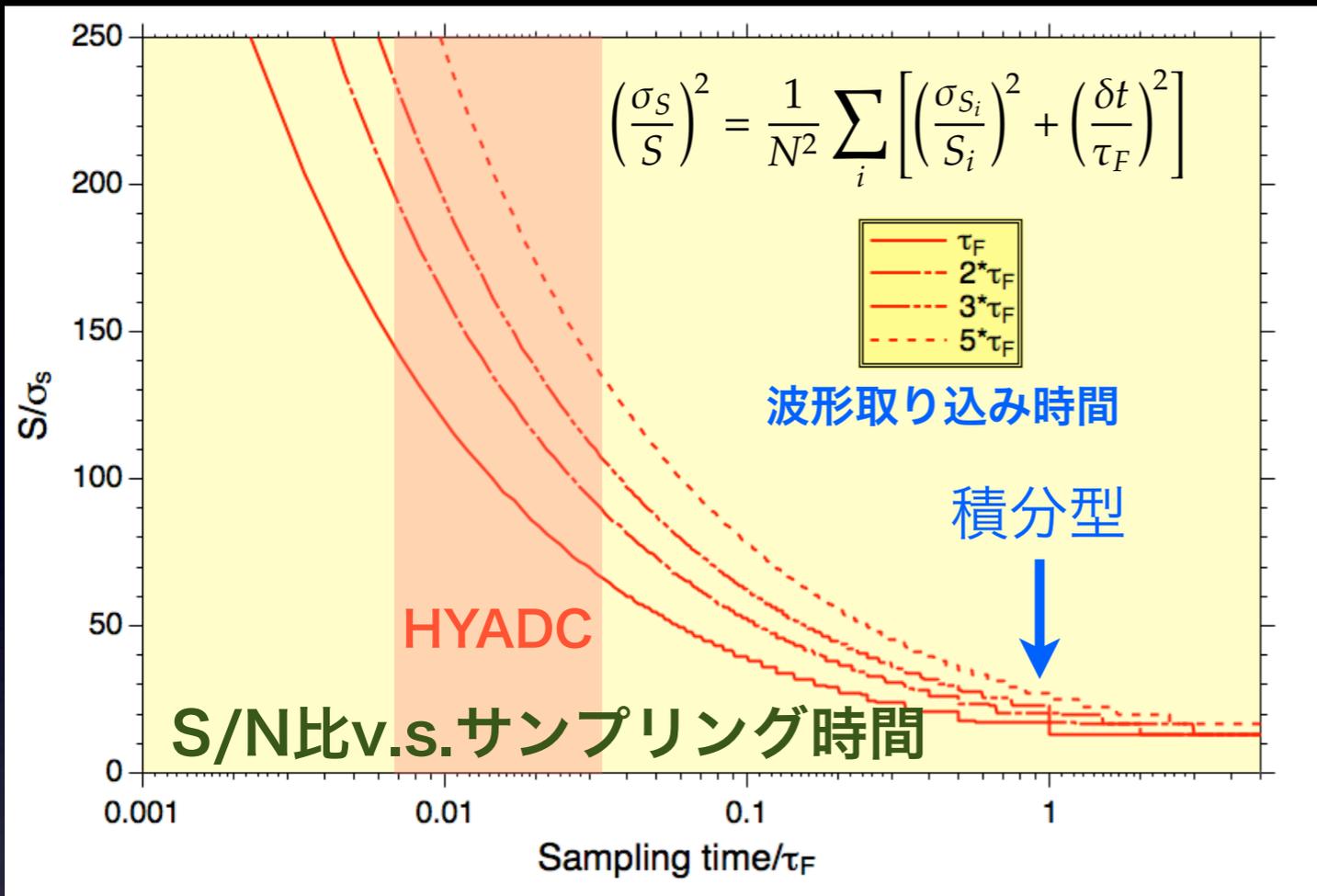
S/N比の評価式

DIII-Dのモデルによる計算結果



- ▶ 信号の減衰時間よりゲート幅を短くすることでS/N比が向上する。
- ▶ ゲートの遅れが大きくなってもS/N比の劣化は少ない。
 - ▶ ただし、遅れが大きい場合は背景光量一定の仮定が成り立たない、また信号そのものが減少する。
- ▶ このことは短いゲート幅で多数のサンプリングを行うことにより測定精度の向上をはかることができることを示している。

HYADCによる測定精度(S/N比)の向上は10倍以上



サンプリング時間(数)を短く(多く)することによってS/Nを改善 10-20倍S/N比を改善することが可能

▶ 高速変換型ADコンバータは従来の電荷積分型にくらべて**数10倍S/Nを改善することが可能である。**

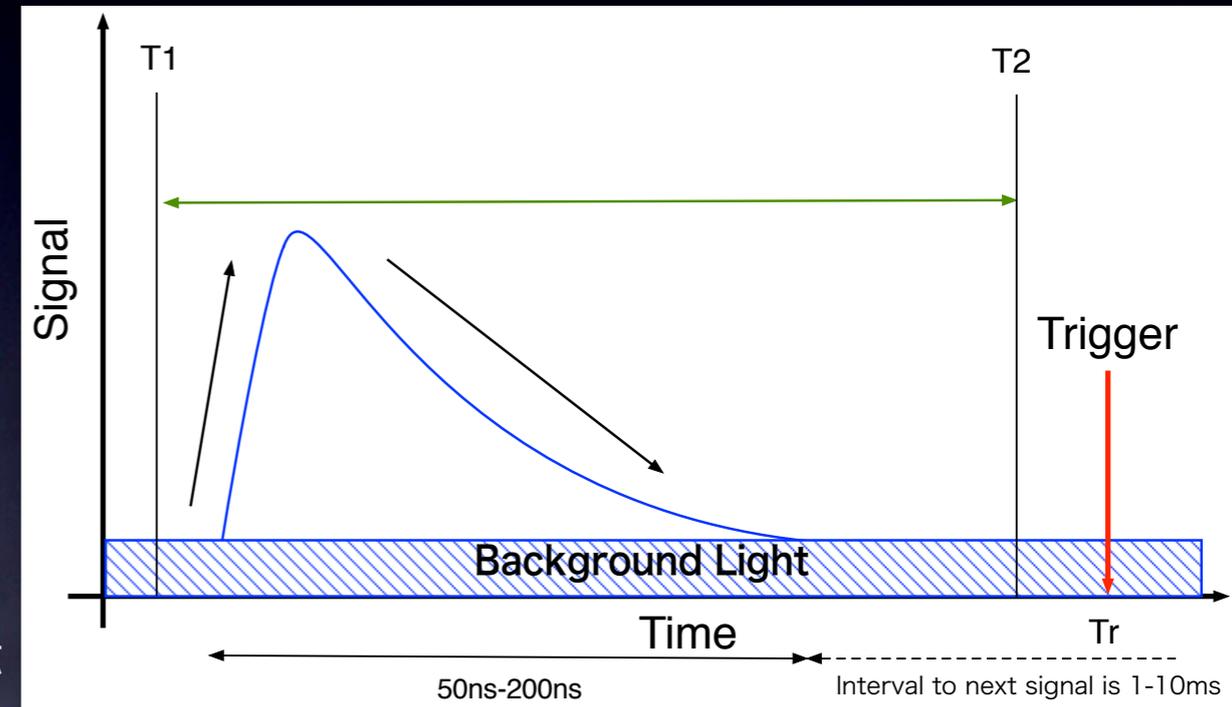
▶ その結果、電荷積分型で約1000光子数であった**S/N=10の精度で計測可能な領域が数10光子数まで拡大する。**

長時間放電においてもストレージコストを下げるため ハードウェアにより散乱光検出前後の時間帯のみメモリに記憶

HYADCの内部動作

- (1)放電開始トリガーによりADコンバータの動作を開始する。
- (2)散乱光が生じている時間(~100ns)前後の時間帯を十分保存可能なリングバッファメモリにより放電開始からデータを記憶し続ける。リングバッファの大きさは2000ワード程度(~4 μ sec)。
- (3)メモリフルになったら上書きすることによってリングバッファメモリに常時、最新のAD変換データを保存しておく。
- (4)レーザー入射トリガーから取り込み停止トリガーを生成し保存すべき時間帯T1, T2を算出し、時間帯に相当するAD変換データのみをリングバッファメモリからメインメモリ転送する。
- (5)メインメモリに記憶されているデータをデータストレージに転送。

Nd:YAGトムソン散乱計測はレーザー入射時間(数100ns以下)に比べてレーザー入射間隔が長い(平均数ms~数10ms)



本方式による1放電あたりのデータ量

Heliotron J: 22.5x150ch.x0.2s=675 Kbyte/shot

JT-60SA: 22.5x1000ch.x100s=2.25 Gbyte/shot

ITER: 22.5x1000ch.x2000s=45 Gbyte/shot

比較：本方式を用いなかった場合

Heliotron J: 0.75x150ch.x0.2s=22.5 Gbyte/shot

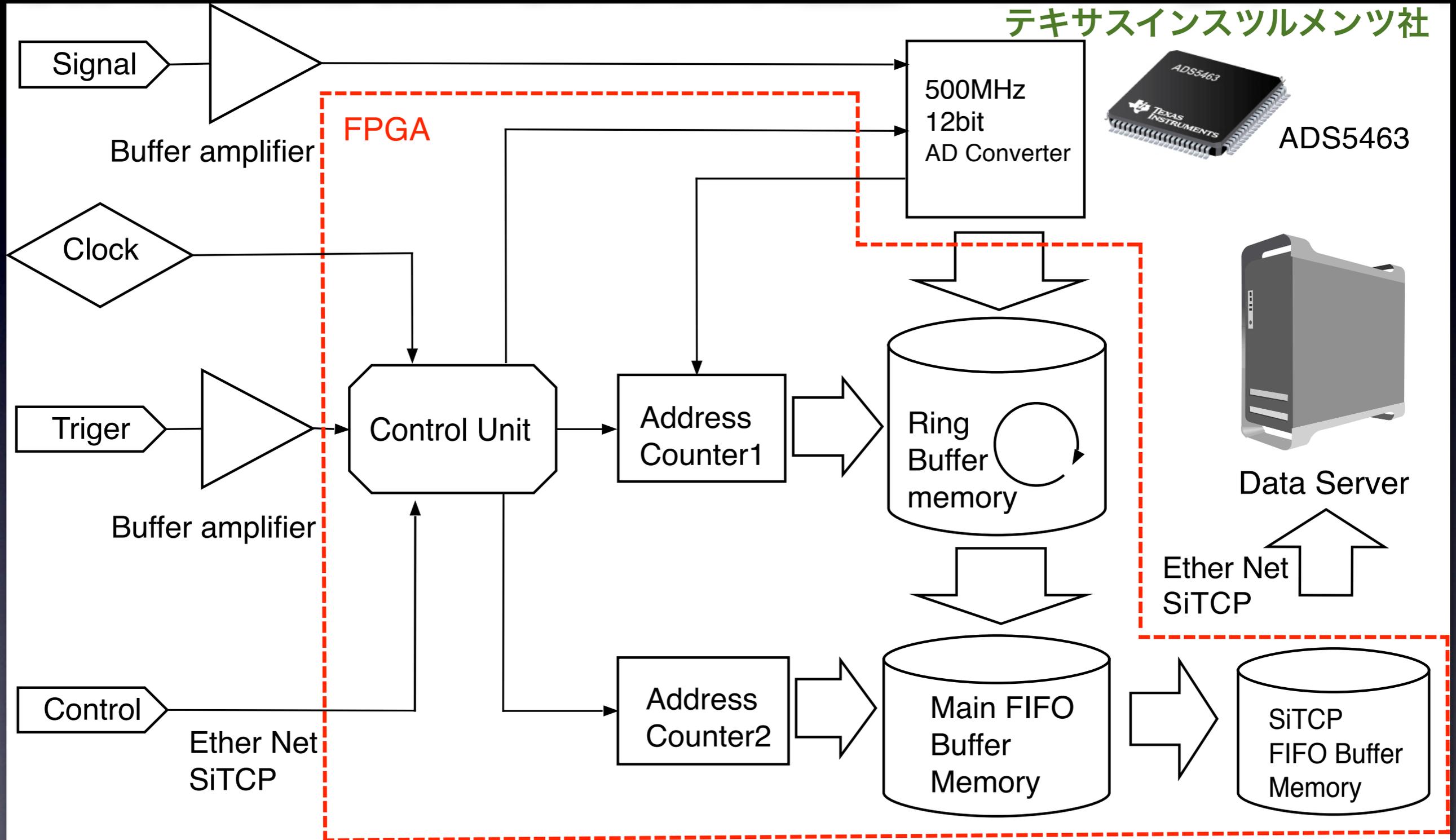
JT-60SA: 0.75x1000ch.x100s=75 Tbyte/shot

ITER: 0.75x1000ch.x2000s=1500 Tbyte/shot

HYADCの内部構成

高精度、高速サンプリングかつ安価なADコンバータchipを用いる

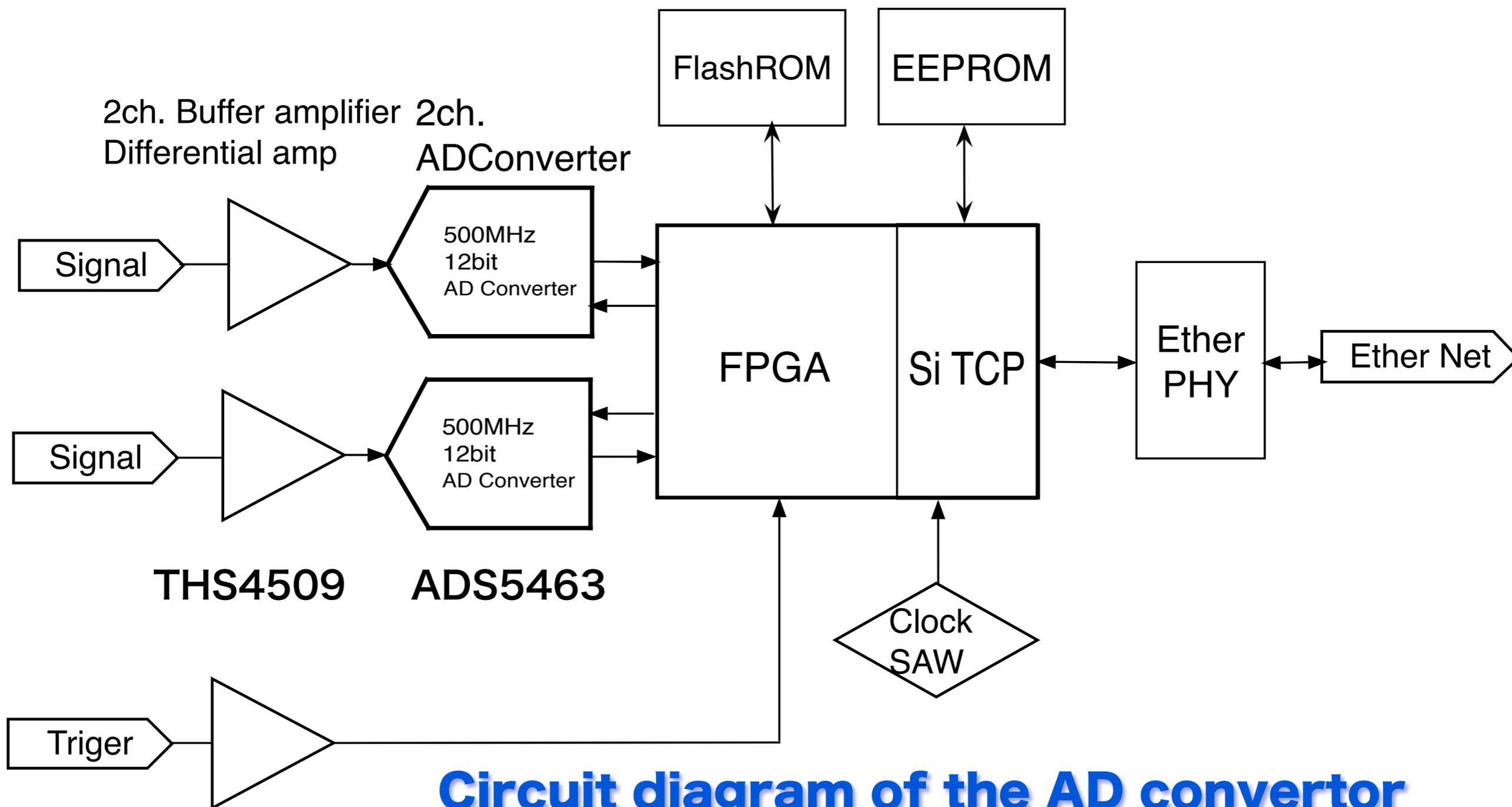
ADS5463: 12bits 500MHzサンプリング周波数 パイプライン型ADコンバータ



必要な全ての機能が一枚の基板上に実装可能で
HYADCをポリクロメータに内蔵することができる。

HYADCの回路構成

1 Unit: 2(AMP.+AD convertor)+1 FPGA+1 Ethernet PHY



Circuit diagram of the AD convertor

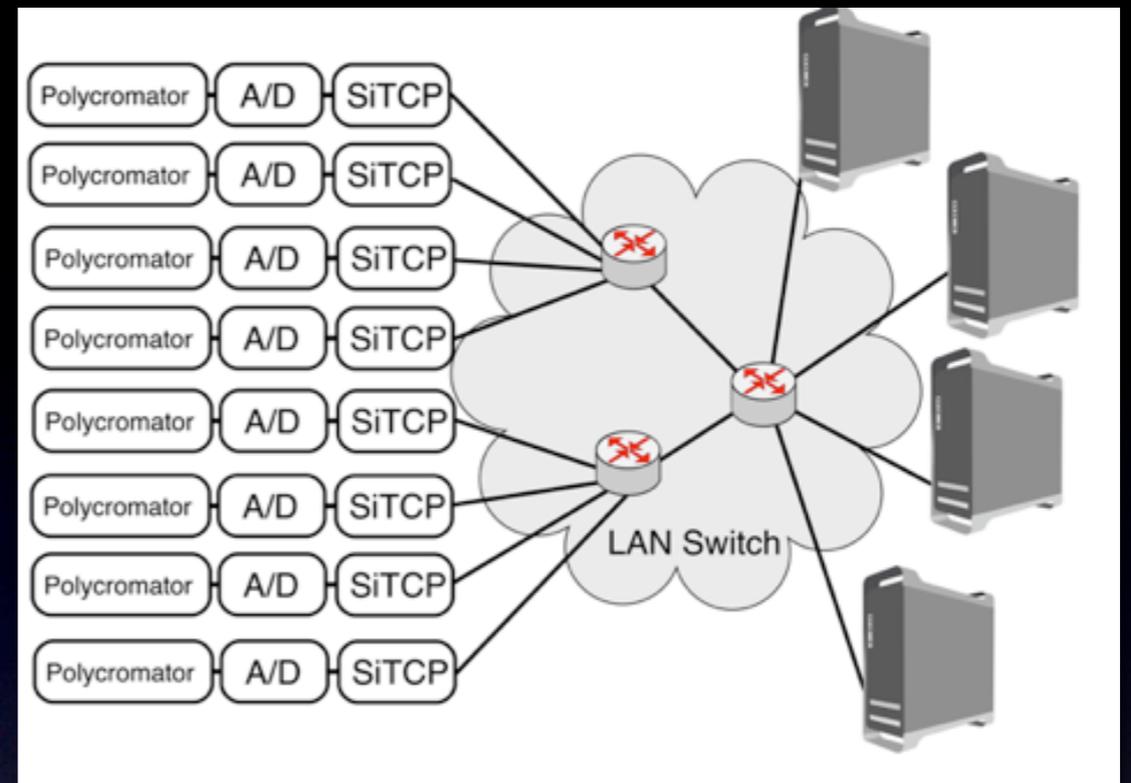
Buffer amplifier (Comparator)

SiTCPを利用したHYADCのデータ転送

KEK 内田智久先生により開発された次世代システム- **SiTCP**。CPUを使用せず(ソフトウェア処理によるのではなく) にワイヤロジック(論理回路)でTCP(Ethernet)によるデータ転送を行う。

利点

- 1) 全ての必要な部品が一枚の基盤上に実装できるので**ポリクロメータに内蔵可能**。ポリクロメータにケーブルを接続してデータ転送できる。
- 2) 最高Ethernetの**理論転送速度(1Gbps)の95%でデータ転送可能**ができ、将来YAGトムソン散乱計測結果を用いてプラズマの**実時間フィードバック制御に応用するのに十分な転送速度**である。



- (3) **LANスイッチ (ハブ) を使うだけで多回数ポリクロメータのための分散型高速データ処理システムの構築ができる。**
- (4) ITERで要求されるEPICS制御ソフトウェアに対応予定であり、ITER計測機器の仕様を満たせる。
- (5) **どんなOSでも実装可能なSocketを用いてプログラミングできるのでデータ処理ソフトウェアの開発が容易。**

HYADCの開発状況

- 共同開発検討作業により**基本仕様書 (Ver 0.6)** を策定
 - 1 Unit: 2ch.AD convertor+FPGA+Ethernet PHY構成に決定
 - FPGAのメモリ構成, レジスタ構成の検討
 - 内部動作および動作モードの検討
 - 構成部品の性能評価検討
 - 追加仕様の (オフセット調整機構など)検討
 - 核融合研の伊藤技官に設計開発を依頼
 - FPGAのためのHDL記述, 論理合成, 回路配置 (ほぼ完了)
 - 回路シミュレータによるタイミング解析 (作業中)
 - 評価ボードによる動作試験 (作業中)
 - 基盤設計 (予定)
 - 試作機の製作 (予定)
 - LHD装置において性能試験 (予定)
- 本年度中の試作機の完成をめざす!**

まとめ

- ▶ **HYADC**は、12bits 500MHzパイプライン型ADコンバータTI製ADS5463を用いて**散乱光信号を高速にデータ処理することにより測定精度(S/N比)を10倍以上改善することができる。**
- ▶ **HYADCはマルチパルスThomson散乱計測においては不可欠であり、背景光の除去も高精度で行える方式**である。
- ▶ **HYADC**はトムソン散乱光はポリクロメータの信号出力をRing Bufferに蓄えておきレーザー入射信号によるストップトリガーシステムで必要な時間帯のデータのみを取り出して記憶装置に取り込む。この方式によりITERやLHDの**20分以上の長時間放電においても多チャンネルのトムソン散乱計測の高速信号データの取り込みが可能**になる。
- ▶ **HYADC**のデータ転送システムはSiTCPによって行う。これによって**トムソン散乱計測データを使った実時間プラズマ制御（分布制御）への応用**に十分な高速データ転送が行え、かつ**容易に拡張性のある分散型多チャンネルシステムの構成**が可能になる。
- ▶ **HYDAC**はすべてのロジック回路すなわちADコンバータ制御回路、データ記録回路およびデータ転送回路を一個のFPGAチップに集約する。それによって**ポリクロメータに内蔵可能なコンパクトなデータ処理システム**を実現することができる。
- ▶ 概念設計作業は予定通り完了し開発作業に移行している。**本年度中の試作機の完成をめざす。**