

データ収集システムの実際

J-PARC 高強度全散乱装置 (NOVA) の
データ収集システムの構築体験から

高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所
大下 英敏

先端エレクトロニクスDAQセミナー 2011/07/28@KEK

まずは中性子回折について説明します。

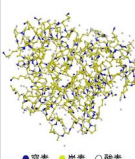
内容

- (1) 中性子を用いた物質の構造解析
- (2) J-PARC高強度全散乱装置の検出器システム
- (3) J-PARC高強度全散乱装置のデータ収集システム

中性子で物質構造解析をするメリット

中性子線はX線で観察することのできない構造特性を明らかにする
X線に比べると、慢性的に強度不足、また、中性子照射施設は限られる
⇒ 中性子線を用いた構造解析とX線を用いた構造解析は相補的

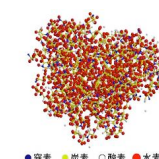
X線で見た構造



●窒素 ●炭素 ○酸素

タンパク質 (ミオグロビン) の構造

中性子で見た構造

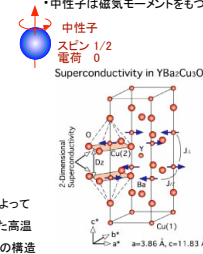


●窒素 ●炭素 ○酸素 ●水素

中性子線は磁気モーメントをもつ

●中性子
スピン 1/2
電荷 0

Superconductivity in YBaCuO₇



中性子によって
解明された高温
超伝導体の構造

核分裂反応とスポレーション(核破碎)反応

原子炉

• 核分裂反応の例
 $^{235}\text{U} + n \rightarrow ^{95}\text{Y} + ^{139}\text{I} + 2n$
 ウランが熱中性子を吸収し、原子核分裂する。
 その際に**2~3個の中性子**を発生

加速器

• スポレーション反応の例
 中、高エネルギー陽子が原子核に衝突し、原子核を破碎する。
数十個の中性子を放出
 放出される中中性子の内訳
 ~10% 核外カスケードによって生成する
 ~90% 衝突した原子核の励起状態からの蒸発過程で生成する

図1 スポレーションと核分裂反応の概略 [1]

[1] 鬼柳善明, 波紋, Vol.11, No.2, p.40 (2001)

物質・生命科学実験施設 (MLF)

Proton beams, Hg (mercury) target + H₂ moderator, NOVA, Muon Experimental Area, No. 1 Experimental Hall, No. 2 Experimental Hall.

http://j-parc.jp/MatLife/ja/index.html

MLFでは**物質構造科学、生命科学、基礎物理分野**の研究がおこなわれ
 - 23本の中性子ビームラインと4本のミュオンビームライン

MLFは世界最大級の**パルス中性子源** : 5×10^8 n/s @1MW, BL21
 - 中性子源: 水銀ターゲット
 - 減速材: 超臨界水素
 - 3種類のモデレータ構造 (coupled, decoupled, poisoned)

Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC)

高エネルギー加速器研究機構 (KEK) と日本原子力研究開発機構 (JAEA) との共同プロジェクト

3種類の加速器施設
 ・ 線形加速器・3 GeV シンクロトロン・50 GeV シンクロトロン
 2次ビーム(中中性子、μ粒子、k粒子、ニュートリノ)の利用

J-PARCでは**物質構造科学、生命科学、素粒子・原子核物理学**の研究をおこなう

http://j-parc.jp/Acc/ja/index.html

The beam power of several facilities

飛行時間法による中性子回折実験

パルス中性子源では、飛行時間法によって**中性子波長弁別**がおこなえる
 ⇒ 中性子源から時刻0で放出された中性子は波長(エネルギー)に依って試料位置や検出器位置に到達する時間が異なる
 飛行時間法はTime-of-Flight (TOF) methodと呼ばれる
 検出器ではブラッグ条件に従い回折された中性子による**ブラッグピーク**があらわれる

Time-of-Flight ~ wavelength of neutron

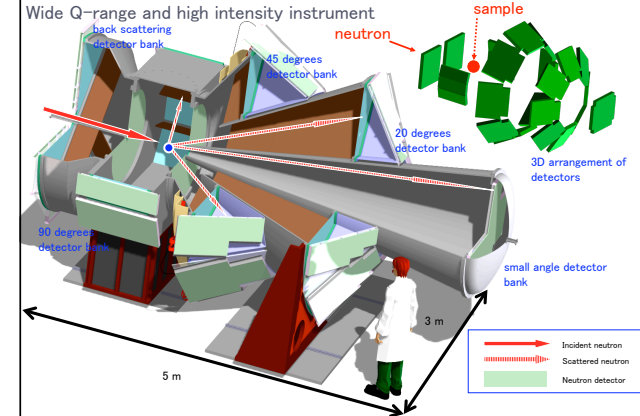
NOVA first diffraction data
 2009/05/28
 Diamond powder @90 deg. detector

NOVAにおける水素貯蔵材料の研究

- NOVAは、NEDOの水素貯蔵材料先端基盤事業の支援を受け、水素燃料電池に応用できる**水素貯蔵材料の研究**をおこなっている
⇒ 水素を含む物質の構造解析は中性子回折実験で可能となる
- 水素貯蔵材料の研究として、**水素吸蔵、放出過程のメカニズム**を観察する
⇒ 過渡現象的な測定は高強度ビーム実験で可能となる
- NOVAでは、結晶、アモルファス、ガラス、液体と構造の小さなものから大きなものまで測定可能なので、金属の水素貯蔵材料から非金属の水素貯蔵材料の研究がおこなえる

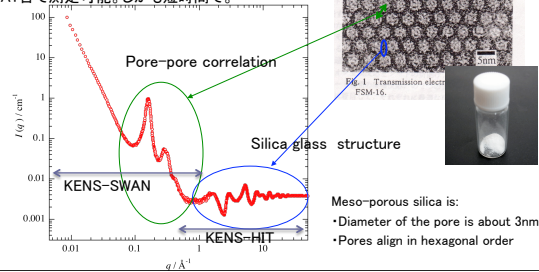


Conceptual design of NOVA



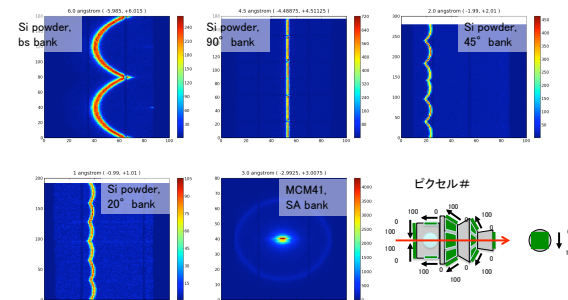
NOVAの特長

NOVAでは構造の小さなものから大きなものまで(同時に)測定可能
⇒ **測定可能なQ ($\propto 1/d$) 範囲が広い**
メソポーラスシリカの原料であるシリカガラスの構造(小さな構造)と規則正しい細孔構造(大きな構造)を同時に測定できる。
しかも**短時間**で。
⇒ かつて、2台の分光器で測定したデータがNOVA1台で測定可能。しかも短時間で。



NOVAにおける中性子回折実験(1)

NOVAで**粉末試料**(例えば、Si powderやMCM41)を測定した場合、各バンクの検出器には波長 λ 、散乱角 2θ に依存した**デバイリング**が見れる

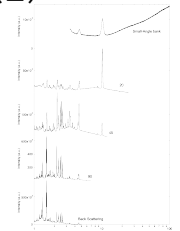


NOVAにおける中性子回折実験(2)

検出器バンクの
Q分解能と測定可能なQ領域がわかる

Q分解能: high-angleほど高い
測定可能なQ領域: small-angleほど広い

試料の**小さい構造を**観察するには
sa bankを使用し、**大きい構造を**
観察するには**bs bank**を使用する



Detector bank	2θ [deg]	Sample-detector [m]	ΔQ/Q [%]	Q-range [Å ⁻¹] (range/Δ)
Small-angle	0.7°	4	7 (4°/50)	0.01 ~ 3 (0.8° ~ 628)
20deg	12.6°	2.8°/3.0	2.5 (1.7°/3.9)	0.2 ~ 26 (0.2° ~ 31)
45deg	33°/57	1.7°/1.9	1.2 (0.9°/1.5)	0.4 ~ 90 (0.1° ~ 116)
90deg	72°/108	1.2°/1.3	0.6 (0.5°/0.7)	1 ~ 82 (0.08° ~ 6.3)
High-angle	135°/170	1.0°/1.4	0.3 (0.3°/0.99)	1.4 ~ 100 (0.06° ~ 4.5)

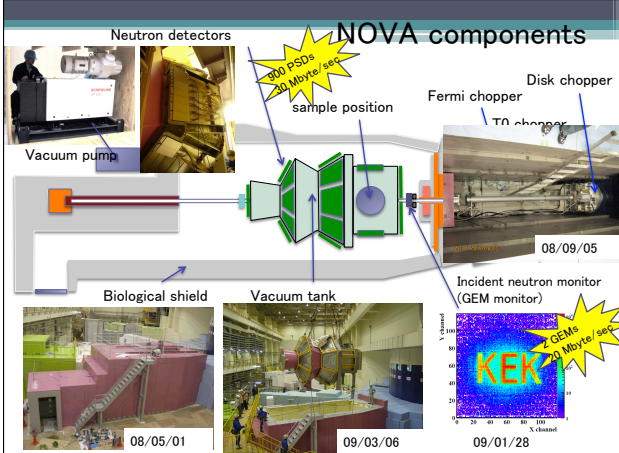
moderator - sample = 15 m wavelength of neutron : 0.12 Å ~ 8 Å

PSD installation

2009/11 ~700 PSDs
2010/04 +200 PSDs
total ~900 PSDs



NOVA components



Neutron detectors (200 PSDs, 20 Mbyte/sec)

sample position

Fermi chopper

Disk chopper

TO chopper

Vacuum pump

Biological shield

Vacuum tank

Incident neutron monitor (GEM monitor)

08/09/05

08/05/01

09/03/06

09/01/28

2 GEMs, 20 Mbyte/sec

中性子を用いた物質の構造解析のまとめ

- 物質の構造解析をおこなう上で、中性子にはX線にない特性がある
- 大強度パルス中性子源であるJ-PARCと高強度全散乱装置 (NOVA) を建設
⇒ 結晶、非結晶、液体、ガラスの短時間構造解析
- NOVAにおける要請
900 PSDs with Max 30M byte/sec
2 GEMs with Max 20M byte/sec

ここからはNOVAの検出器システムについて説明します。

NOVAでは、回折中性子検出用に³HeガスPSD
入射中性子検出用にGEM中性子ビームモニターを使用

データ転送部分は同一の技術(SiTCP+DAQ MW)を使用

J-PARCにおけるPSDシステム

KENS, J-PARCにおけるPSDシステムは歴代、佐藤氏(KEK)の開発したシステムを使用している

現在では、佐藤システム+SiTCP+DAQミドルウェアのシステムが主流
⇒ ~20 units (=160 PSDs)まではスループットに影響がない

NEUNET
ネットワークインターフェイスを持つ、検出位置演算モジュール
8 PSD分のデータ処理が可能

GateNET
ネットワークインターフェイスを持つ、T0分配モジュール
NEUNETにT0シグナルを分配する

数字のバイト
高速書き込み
Lamarc
SiTCP
1GBASE TCP
switcher
NEUNET
100MBASE TCP
PSD支持箱
GateNET
ビーム番号
識別

佐藤 邦夫, "中性子数乱実験用 位置敏感検出器, PSDシステムの開発"

Position Sensitive Detector (PSD)

中性子回折実験では、³Heガスを充てんしたPSDが使われてきた
中性子感度、中性子-γ線弁別能力、動作安定性などでメリット
近年の³Heガスの価格高騰と加速器施設の大強度化が問題

検出原理: $n + {}^3\text{He} \rightarrow t + p + 0.764\text{MeV}$

検出位置の導出は高抵抗の陽極ワイヤーの両端から読みだしたアナログ出力の比を取って導出する

$x/L = Q2/(Q1+Q2)$

http://www.canberra.com/literature/936.asp

佐藤 邦夫, "中性子数乱実験用 位置敏感検出器, PSDシステムの開発"

Gas electron multiplier (GEM)

Gas electron multiplier (GEM) [2] はmicro pattern gas detectors (MPGDs)の一種。

[2] F. Sauli, Nucl. Instr. and Meth. A 386 (1997) 531.

Cu clad
Polyimide sheet

GEMの特長:

- ガスゲイン >10⁵ (トリプルGEMの場合)
- エネルギー分解能 18% FWHM @5.9 keV
- 位置分解能 < 60μm (rms) (荷電粒子に対して)
- 入射頻度特性 >10⁵ Hz/mm²
- 検出器サイズ >1000 cm² (~30 cm × ~30 cm)
- 周辺電極・読出し基板デザインを自由に選べる
- 低価格、頑丈

http://gdd.web.cern.ch/GDD/

中性子の検出原理

中性子反応 $n(^{10}\text{B},\alpha)^7\text{Li}$ で生成した荷電粒子を検出

$$^{10}_5\text{B} + ^1_0\text{n} \rightarrow \begin{cases} ^7_3\text{Li} + ^4_2\alpha + 2.79\text{MeV} (6\%) \\ ^7_3\text{Li}^* + ^4_2\alpha + 2.31\text{MeV} (94\%) \end{cases}$$

$$^7_3\text{Li}^* \rightarrow ^7_3\text{Li} + 0.48\text{MeV} (\gamma)$$

中性子検出器構造

中性子検出用に ^{10}B をアルミ板に蒸着
 ^{10}B 層 $0.05 \mu\text{m} \rightarrow$ 中性子感度 0.1%
 チェンバーガス: $\text{Ar}/\text{CO}_2 = 70:30$
 0.8 mmピッチの2次元読出し(ストリップ)基板
 実効ガスゲイン: ~ 400 倍

Ar/CO₂ = 70:30 Cathode plane with ¹⁰B
 GEM 1 E_g = 1.5 kV/cm (1 mm), E_r = 2.4 kV/cm (2 mm)
 GEM 2 E_g = 5.6 kV/cm (1 mm)
 Readout pad
 GEM1 ΔV_{GEM} = 400 V
 GEM2 ΔV_{GEM} = 350 V

SiTCP

FPGA(Field Programmable Gate Arrays)上に実装されたTCPソフトウェア的に処理されるネットワークプロトコルをハードウェア的に処理できるようにしたもの

巷に出回っているTCP/IPチップに比べて、データ転送能力、回路規模(検出器の小型化)など物理実験で十分に使用できる採用実績も豊富

ユーザーとしては、FPGA上に実装できるオンボード処理を活用できる(ファイルフォーマットの変更、ピンアサインの変更、イベントセレクションなど) ⇒ **FPGAのデザイン必要**

SiTCPの転送能力
 ~1.1 MHz @100 Mbps
 最大データ量: ~90 MB/sec
 ⇒ ~324 GB/hour

検出器プロトタイプ

コンパクトな二次元検出器

従来の巨大なCAMACシステムやVMEシステムを必要としない

測定器開発室で開発された技術を応用 (<http://rd.kek.jp>)

検出器プロトタイプの構成:

- (1) Micro Pattern Gas Detector, GEM
- (2) Application Specific Integrated Circuit (ASIC)
 "FE2007"と呼ばれる専用のASICを使用。
 Y. Fujita, et al. "Performance of Multi-Channel and Low Power Front-End ASIC for MPGD m-PIC Readout", IEEE NSS 2007.
- (3) Hardware-based TCP processor ("SiTCP")
 T. Uchida, IEEE TNS 55 (2008) 1631.
- (4) DAQ middleware

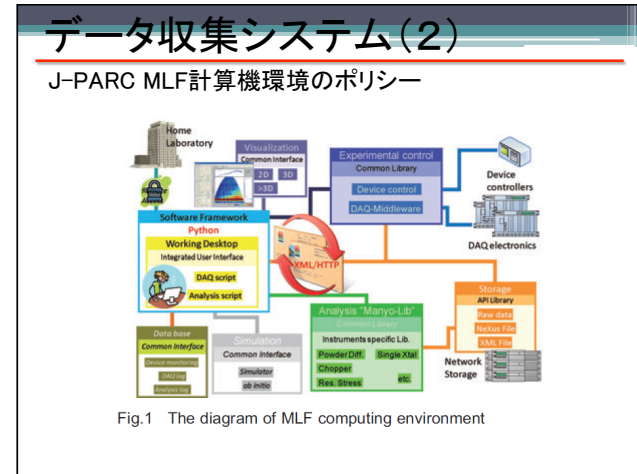
Detector specification:

- Detector size: 660 mm x 350 mm x 170 mm
- Active area: 100 mm x 100 mm
- Readout channel: 120 ch x 120 ch with 0.8 mm pitch
- T₀ input is equipped.

検出器システムのまとめ

- NOVAの検出器システムを構築するため、³HeガスPSDを約900本、2台のGEM中性子ビームモニターをインストール
- 検出器システムのデータ転送にはSiTCP+DAQ MWの技術を使用
 ⇒ DAQ MWについてはデータ収集システムで説明
- J-PARC MFLFにおける性能評価、安定動作が確認されている

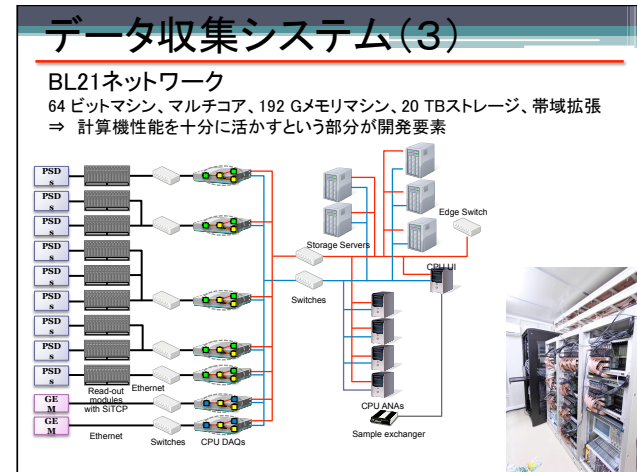
ここからはデータ収集システムについて説明します。



データ収集システム(1)

システム構築の際に考慮すべきこと

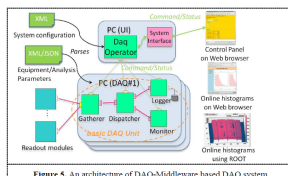
- 装置からの要請
 - ⇒物理的には、スループット、データサイズなど
 - ⇒機能的には、測定と解析の並列化などの使い方
- J-PARC MLFにおける決まりごと
 - ⇒標準化されたソフトウェアの利用 (DAQ MW、Manyo-lib、IROHA)
- データ収集システムの網羅する領域
 - 検出器からデータ取得～データバックアップ



DAQミドルウェア(1)

DAQミドルウェア ネットワーク分散環境下でコンポーネントを組み上げて DAQシステムを構築するソフトウェア・フレームワーク

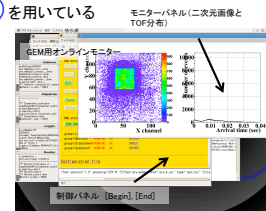
- 基本的な機能をもつコンポーネントはあらかじめ用意されている
- Gathererコンポーネント、Dispatcherコンポーネント、Monitorコンポーネント、Loggerコンポーネント
- 各コンポーネントを制御するオペレータ(CPU-UI)が必要
- コンポーネントの設定、システム構成の設定はXMLファイルとして記述する
- システムの拡張が容易



DAQミドルウェア(2)

- ネットワーク分散可能なDAQソフトウェアであるが、**複数の計算機を用いてDAQシステムを構築する場合**や**オンライン処理**をおこなう場合にも有用である

- NOVAでもオンラインモニターを活用している
- DAQミドルウェアの制御はGUI上からおこなうことが可能
- ⇒ 実際の運用では、DAQミドルウェアに加えて、試料交換器制御、解析処理を総括して制御する**フレームワーク(IROHA)**を用いている



解析用のソフトウェア

MLF共通の解析用ソフトウェアとして、**Manyo-lib(万葉ライブラリ)**が開発整備されている
中性子用オブジェクト指向データ解析システム・フレームワークである

MLFで測定されるデータを意識したクラス作りがなされている
データコンテナ、ネットワーク分散処理環境、並列化機能、データ解析演算子
特に大量の測定データのヒストグラム化、ヒストグラム同士の演算に強い

ヒストグラムデータは散乱実験データフォーマットであるNeXus形式として保存される
⇒ <http://www.nexusformat.org/>

ユーザーレベルでは、PythonコードからManyo-libを呼び出して使用する
描画ツールはGnuplot, matplotlibなど

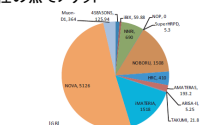
マルチスレッドに対応している

NOVA測定データのバックアップ

NOVAの測定データは**J-PARC - KEK間特別ルート**を利用して転送され、
KEK共通計算機システム(KEKCC)の**大容量記憶システム(HPSS)**に保存する

J-PARC-KEK間特別ルート:
特別ルートは途中のNAT(ネットワークアドレス変換)やFW(ファイアーウォール)を取り除くことで高速通信が可能
ただし、帯域の広い別経路を利用するわけではない

大容量記憶システム(HPSS):
階層性ストレージシステム
磁気ディスクと磁気テープを利用頻度に応じて使い分ける
ストレージとして磁気テープの利用は経済性、安定性の点でメリット



データ収集システムのまとめ

- 構築する上で、装置からの要請+MLF共通ルールが存在
- データ収集システムの網羅する範囲は
検出器からデータ取得~データバックアップ
- 多くの時間を割いたことは、計算機性能を十分に活用するということ

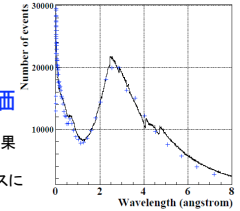
全体のまとめ

- 中性子を用いた物質の構造解析
⇒ J-PARC MLFの建設により、中性子を用いた物質構造解析が飛躍的に発展することが期待される
- J-PARC高強度全散乱装置の検出器システム
⇒ J-PARC全散乱装置 (NOVA) にインストールされた検出器はSiTCPなどのKEK技術を使用して開発された
- J-PARC高強度全散乱装置のデータ収集システム
⇒ NOVAのデータ収集システムはDAQ MW等の技術を使用して構築され、計算機性能を活かすように最適化されている

GEM検出器による典型的な波長分布

2009/11より **中性子ビームモニターとしてBL21で運用**を開始した

BL21で測定された **波長分布の妥当性を評価** するため、実測データとシミュレーション結果を比較した
⇒ 黒ヒストグラム: 実測データ、青+: シミュレーション結果



シミュレーションとして、予測される中性子ビームフラックスに対するGEM検出器の中性子反応率Rを求めた

$$R = \int \phi(E) N \sigma(E) dE$$

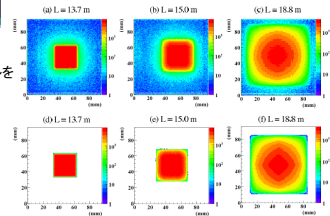
ここで、 $\phi = \int \phi(E) dE$ は中性子フラックス、N は蒸着された¹⁰Bの原子数
 $\sigma(E)$ は中性子の反応断面積である
中性子フラックスのシミュレーションデータは公開されている [*].

[*] M. Harada, "Pulse characteristics estimation for 23 neutron beam lines at J-SNS"
<http://parc.jp/MatLife/en/instrumentation/data/Pulse.paper.pdf>

実測された波長分布はシミュレーション結果ともよく一致

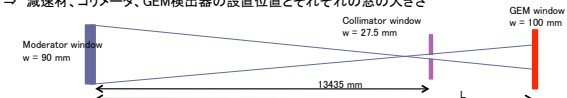
ビームプロファイル

GEM検出器を用いて、BL21のビームプロファイルを測定した



上段3枚: 実測されたビームプロファイル
下段3枚: モンテカルロシミュレーションで求めたビームプロファイル

モンテカルロシミュレーションでは **ビームラインの幾何学的な構造のみ考慮** し
⇒ 減速材、コリメータ、GEM検出器の設置位置とそれぞれの窓の大きさ



実測されたBL21のビームプロファイルはビームラインの幾何学的構造を考慮した **モンテカルロシミュレーションとよく一致** する
BL21のビームプロファイルはビームラインの幾何学的構造として説明できる