

カスガイドおよび UCN ガイドは未搭載であった。またドップラーシフター後方の検出器は中性子ビームモニターの代わりに抵抗分割型 2 次元検出器 (RPMT) [57] が使用されていた。

データ取得システムについては 3.2 節、中性子検出器については 3.3 節、スーパーミラーガイドについては 3.4 節、ワイドバンドモノクロミラーおよびフォーカスガイドについては 3.5 節、ドップラーシフターについては 3.6 節においてそれぞれ詳しく説明する。

## 3.2 データ取得システム

データ取得には 760-PRU06PIK および 16-Input PHA & LIST Module A3100 [58] を使用した。A3100 は LIST 測定用のメモリと PHA 測定用のメモリを個別に内蔵しており、どちらか単独だけでなく両方同時の測定が可能である。LIST 測定では 0~+10 V のユニポーラーパルスを入力に対し、A3100 が挿入されているスロット番号、入力チャンネル番号、波高の AD 変換値、ピーク位置のクロック数、および反転ビット値を整数値の LIST イベントデータとして PC に記録する。例として図 3.6 にデータの抜粋を示す。ADC ゲインの分解能は 256~8192 ch の範囲が、クロック数のタイムベースは 5 ns~1  $\mu$ s の範囲が選択可能である。入力パルスに求められる最小立ち上がり時間は 200 ns, 最小パルス幅は 500 ns である。測定モードには TSI (Time Stamp Information) と TLI (Time Lag Information) があり、TSI では装置立ち上げからの絶対時間のクロック数が記録されるのに対し TLI では直前の信号入力からの相対時間のクロック数が記録される。また TLI では反転ビット値として信号入力のたびに 0 と 1 が交互に記録され、時間窓を利用した実験を行う際のタグとして機能する。TSI では反転ビット値は 0 のみが記録される。PHA 測定結果は PC 上の制御プログラムにリアルタイムで表示される。ADC ゲインの分解能、タイムベース、測定モードは制御プログラムを通して入力チャンネルごとに個別にプログラムすることが可能である。今回の実験では全チャンネルとも ADC ゲインを 8192 ch, タイムベースを 1  $\mu$ s に設定し、TSI で測定を行った。

### 3.2.1 LIST データ解析手法

中性子の TOF 実験では LIST データの解析は以下のように行う。図 3.6 に示されるようにデータファイルには各チャンネルの測定結果が A3100 への到達順に書き出されている。そこでまずキッカーパルス信号を見つけ、そのクロック数を時間原点として記録する。そしてその後続く検出器信号のクロック数と時間原点との差分をとり、AD 変換値およびこの時点までのキッカーパルス番号とともにメモリ上に保存する。この操作を次のキッカーパルスのデータに行き当たるまで繰り返し、次のキッカーパルスを発見したらメモリ上に保存してある数値を別のファイルに書き出したのち時間原点を次のキッカーパルスのクロック数に刷新し、キッカーパルス番号に 1 加算する。以上の処理をデータ末尾まで繰り返すことで絶対時間で書き出されたデータファイルが TOF のクロック数で記述されたデータファイルに変換される。この変換されたデータファイルに対して解析をかけ、PHA 測定結果のスペクトルを参考に AD 変換値によるカットをかけてバックグラウンド除去を行い TOF のヒストグラムをとることで中性子の TOF スペクトルを得る。単位時間あた

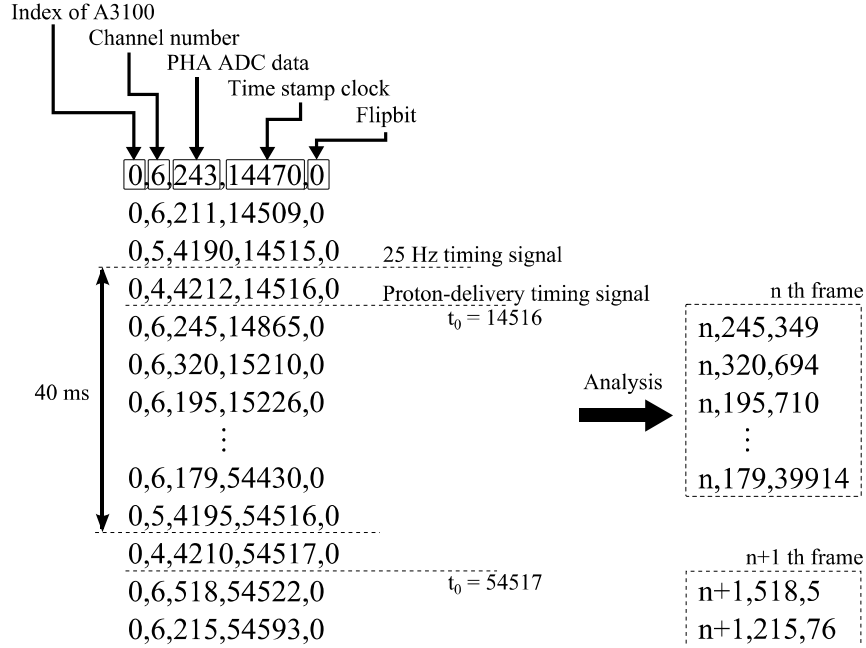


図 3.6: リストデータの内容抜粋および解析後のデータセット例示。 $t_0$  は解析時の TOF 時間原点を表わす。

りの測定結果を求める場合は、MR 入射や加速器トラブルによるビーム停止時間を排除し理想的な 25 Hz 運転の結果に変換するためにキッカーパルス番号の最大値にビームの繰り返し周期 40 ms をかけて実効測定積算時間とみなし、この数値で実験結果を除算する。なお 25 Hz タイミング信号はビームの時間安定性の確認等の絶対時間に基づいたデータ解析が必要な場合に備えて記録しており、TOF 解析には使用しない。

### 3.3 中性子検出器

ここでは実験に用いた検出器の特徴について説明する。

#### 3.3.1 UCN 検出器

UCN の検出には A. V. Strelcov によって作成された "UCN DUNia-10" を使用した。これは UCN 実験において一般的に使用される検出器である。この検出器は比例係数管であり、ガスチャンバーにはヘリウム 3 ガスが  $2.7 \times 10^3$  Pa まで封入されたのち、メタン 1%、アルゴン 99% の混合ガス (p1 ガス) が  $1.1 \times 10^5$  Pa まで封入されている。ヘリウム 3 ガスの分圧が非常に小さく設計されているのはバックグラウンドとなりうる高速な中性子の検出効率を下げるためである。検出器の入射窓は直径 90 mm であり、直径 130 mm、高さ 50 mm の円柱状のガスチャンバーの底面に位置している。入射窓は厚さ 0.1 mm の純粋なアルミニウムであり、真空中で使用するために検出器の外から金属製の梁で支えられている。ガスチャンバーの中央には梁と同じ方向に太さ  $50 \mu\text{m}$  の 1 本のタングステン製アノードワイヤーが張られており、実験中は +1 kV が印加される。検出器上部には  $\pm 12$  V

の外部電源で動作するプリアンプの回路基板が内蔵されており、回路は取り外し可能な金属製のキャップで覆われ静電遮蔽されている。このプリアンプの回路素子のなかにマイクロフォニックノイズに敏感なものがあり、ドップラーシフター運転時のモーターの振動や検出器の固有振動を拾ってノイズを発生させていたため、我々は機械振動から来る低周波に感度を持たないプリアンプ回路を新たに作成し既存の回路基板と交換した。また信号増幅率も大きくし、中性子入射に対して波高  $+2\text{ V}$ 、幅  $5\text{ }\mu\text{s}$  のモノポーラパルスが出力されるようにした。検出器の概形と測定系の配線図は図 3.7 に示すようなものになる。

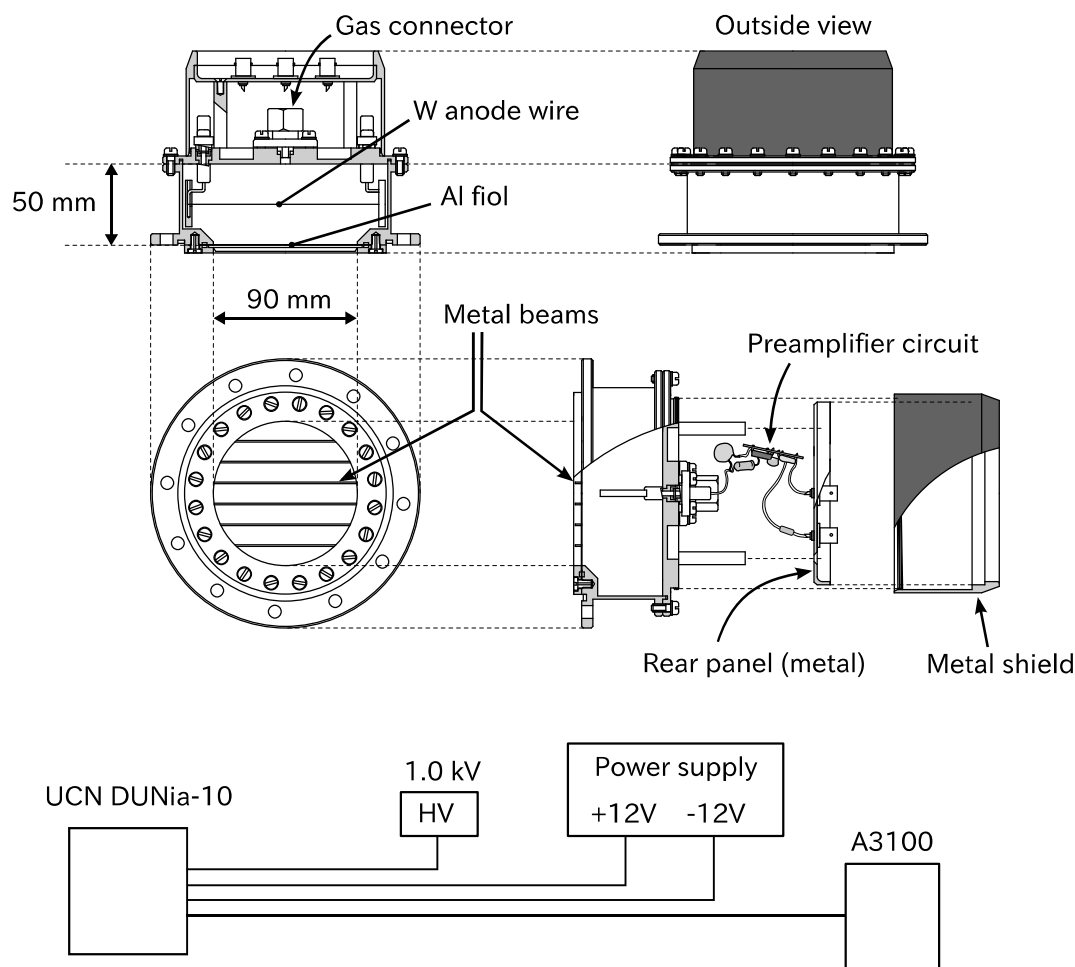


図 3.7: UCN DUNia-10 の概形および測定系の配線図。

UCN DUNia-10 の検出効率は  $1\text{ MPa}$  のヘリウム 3 ガスが封入された比例係数管 "RS-P4-0812-223" と比較することで求められた。RS-P4-0812-223 の形状は直径  $25.4\text{ mm}$ 、厚さ  $0.5\text{ mm}$  のステンレス管である。検出効率比較は低発散ブランチにおいて  $\text{B}_4\text{C}$  粉末入りゴムシート ( $\text{B}_4\text{C}$  ゴム) によって  $\phi 4.5\text{ mm}$  に絞ったビームを用いて行われた。図 3.8 に UCN DUNia-10 で得た波長スペクトルを RS-P4-0812-223 で得た波長スペクトルによって除算した結果を示す。測定時の TOF 距離は  $17.6\text{ m}$  であり、MR 停止期間中に測定が行われたため  $40\text{ ms}$  周期のビームのフレームオーバーラップにより  $0.2\text{--}1.1\text{ nm}$  のみが測定された。プロットされた検出効率比  $r(\lambda)$  は厚さ  $0.1\text{ mm}$  のアルミニウムによる中性子減衰率

を  $\tau_A$ , 厚さ 0.5 mm のステンレスによる中性子減衰率を  $\tau_B$ , UCN DUNia-10 の検出効率を  $\epsilon_A$ , RS-P4-0812-223 の検出効率を  $\epsilon_B$  とすると以下の式で表される。

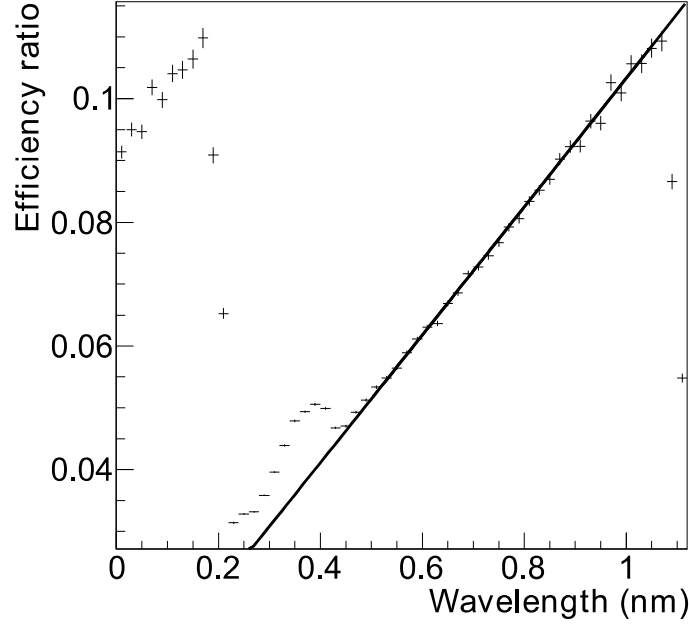


図 3.8: RS-P4-0812-223 に対する UCN DUNia-10 の検出効率比。

$$r(\lambda) = \frac{\tau_A \epsilon_A}{\tau_B \epsilon_B} = \frac{\exp(-p_0 \lambda)(1 - \exp(-p_1 \lambda))}{\exp(-p_2 \lambda)(1 - \exp(-p_3 \lambda))}, \quad (3.3.1)$$

ここで  $p_0, p_1$  はそれぞれ UCN DUNia-10 の入射窓の減衰係数、ヘリウム 3 ガスの反応係数、 $p_2, p_3$  はそれぞれ RS-P4-0812-223 のステンレス管の減衰係数、ヘリウム 3 ガスの反応係数である。このうち  $p_0$  および  $p_2$  は以下の計算式を用いて解析的に求めた。

$$p_i = \frac{\sigma_i D_i N_A d_i}{A_i \lambda_i}, \quad i = 0, 2, \quad (3.3.2)$$

ここで  $\sigma_i$  は中性子の反応断面積、 $D_i$  は物質の密度、 $N_A$  は Avogadro 数、 $d_i$  は物質の厚み、 $A_i$  は原子量、 $\lambda_i$  は断面積を測定した中性子の波長である。 $\sigma_0$  には文献 [59] より  $10 \text{ m s}^{-1}$  (40 nm) の中性子に対する温度 298 K でのアルミニウムの全断面積 59.2 b を使用し、 $p_0 = 9.1 \times 10^{-4} \text{ nm}^{-1}$  を得た。また  $\sigma_2$  にはステンレスの代わりに文献 [60] より熱中性子 (0.18 nm) に対する鉄の吸収断面積 2.56 b を使用し、 $p_2 = 6.0 \times 10^{-2} \text{ nm}^{-1}$  を得た。これらを代入し、 $p_1$  と  $p_3$  を未知パラメータとした式 (3.3.1) を用いてデータセットに対して 0.50–1.04 nm の範囲で図 3.8 に示すようなフィットを行った。フィット結果はデータセットとよく一致し、最確値  $p_1 = (1.001 \pm 0.004) \times 10^{-1} \text{ nm}^{-1}$ ,  $p_3 = 7.7 \pm 0.6 \text{ nm}^{-1}$  が得られた。温度 298 K, 圧力  $2.7 \times 10^3 \text{ Pa}$ , 厚さ 50 mm のヘリウム 3 ガスの反応係数は  $9.5 \times 10^{-2} \text{ nm}^{-1}$  なので、 $p_1$  は理論値と 5% の誤差で一致している。以上の結果から、本論文での解析では UCN DUNia-10 のガスチャンバー内部の検出効率として波長  $\lambda \text{ nm}$  に

対する以下の式を使用した。

$$\epsilon(\lambda) = 1 - \exp(-0.100\lambda), \quad (3.3.3)$$

本論文の解析中では考慮していないが、UCN DUNia-10 の検出効率は位置依存性を持っている。図 3.9 に  $\phi 4.5$  mm のビームを入射した入射窓上での位置 (図上部)、得られた波高スペクトル (1-1 および 2-1)、検出器中央からワイヤー上を沿うように位置を変えた場合の計数率変化 (1-2)、検出器中央を始点にワイヤーに垂直な方向に位置を変えた場合の計数率変化 (2-2) を示す。検出効率の評価に使用したデータセットは測定点 (b) で取得したものである。同図 (1-2), (2-2) の結果が示すように検出効率は検出器中央付近が最も高く、ワイヤーの端やワイヤーから離れる方向に向かうと検出効率が低下する。とくにワイヤーから離れる方向での低下が大きく、ワイヤーから 35 mm 離れた測定点 (g) では中央の測定点 (b) に対して計数率が 20% 低下する。またこの点では同図 (2-1) に示されるように波高分布の中心値が測定点 (b) に対して 25% 小さくなっており、さらに波高分布が低エネルギー側に大きなテールを引いている。ほかの測定点でもピーク中心値の減少と計数率の減少に正の相関がみられる。これらのことから、計数率低下の原因は電荷収集効率が低下し検出信号の一部が MCA の LLD を下回ったことで中性子の数え落としが生じたためと推測される。直径 130 mm の大きな円筒内に直径方向に渡した 1 本のワイヤーのみで電場を張っているためチャンバー内の電場の一様性が低く、電子が収集される経路に対するガス増幅の依存性が大きいのだと推測される。

### 3.3.2 その他の検出器

UCN DUNia-10 のほかに、実験では中性子ビームモニター ”MNH10/4.2F” [56] および抵抗分割型 2 次元検出器 (RPMT) [57] を使用した。

MNH10/4.2F は CANBERRA 製の比例計数管であり、高フラックス中性子ビームの測定を目的として設計されている。検出器は A5 アルミニウムで作成されており、入射窓の有効面積は 100 mm (H)  $\times$  42 mm (W), 入射窓厚み 2 mm, ガスチャンバー厚み 40 mm の直方体形状をしている。チャンバー内部には少量のヘリウム 3 ガスが混ぜられたメタン 10%, アルゴン 90% の混合ガス (p10 ガス) が圧力  $1.3 \times 10^5$  Pa で封入されている。ガスチャンバー内壁にホウ素ないしホウ素化合物が付着しているため検出効率はビーム入射位置に対して依存性を持っており、検出器中心の検出効率で規格化してランダムに 10% 以上変化することが確認されている。しかし本論文では検出効率の位置依存性は考慮せず、波長  $\lambda$  nm に対する検出効率  $\epsilon_{BM}$  として入射位置に関わらず以下の式を用いた。

$$\epsilon_{BM}(\lambda) = 1 - \exp(-2.4 \times 10^{-4}\lambda). \quad (3.3.4)$$

検出器の概形と測定系の配線図は図 3.10 に示すようなものになる。

RPMT は浜松ホトニクス製の光電子増倍管 R3292 を基にした 2 次元中性子検出器である。検出器の直径は 127 mm であり、有効直径は 90 mm である。光電面には厚さ 0.25 mm の ZnS:Ag/6LiF シンチレーター [61] が厚さ 400  $\mu$ m のアルミニウム板によって押さえつけられて固定されている。電子増幅には 12 段のコースメッシュ型ダイノードを用いており、X, Y 方向のクロスワイヤーアノードの出力をそれぞれ抵抗分割して X1, X2, Y1, Y2

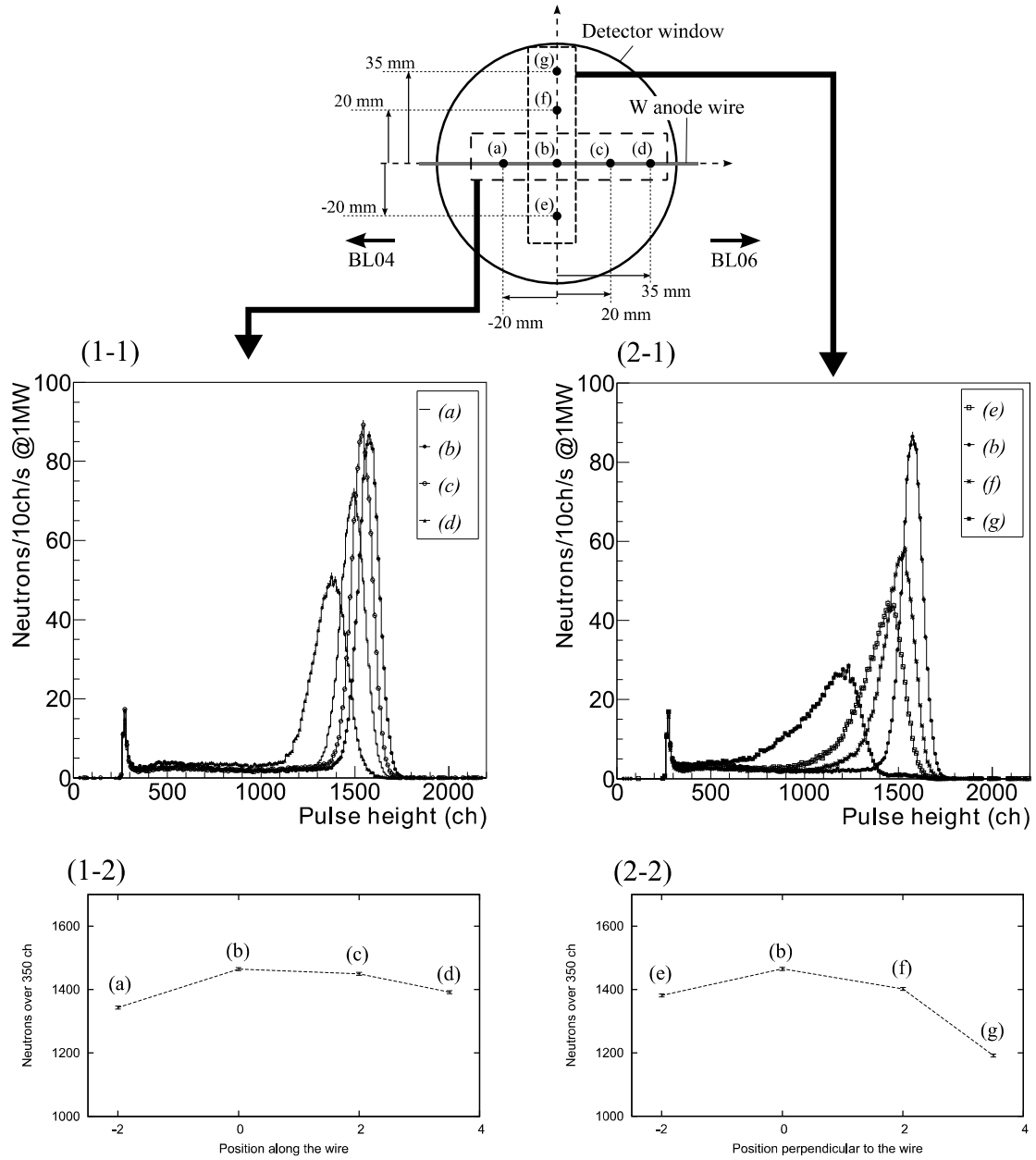


図 3.9: UCN DUNia-10 の VCN ビーム入射位置に対する波高分布比較。図上部はビーム下流側から見た検出器窓上でのビーム入射位置を示している。図中央の (1-1) は入射位置をアノードワイヤー上にとった場合の波高分布の変化を、(2-1) は入射位置をアノードワイヤーと垂直にとった場合の変化をそれぞれ表わす。図下部の (1-2), (2-2) はそれぞれの波高分布の 350 ch 以上の全計数の変化を表わす。

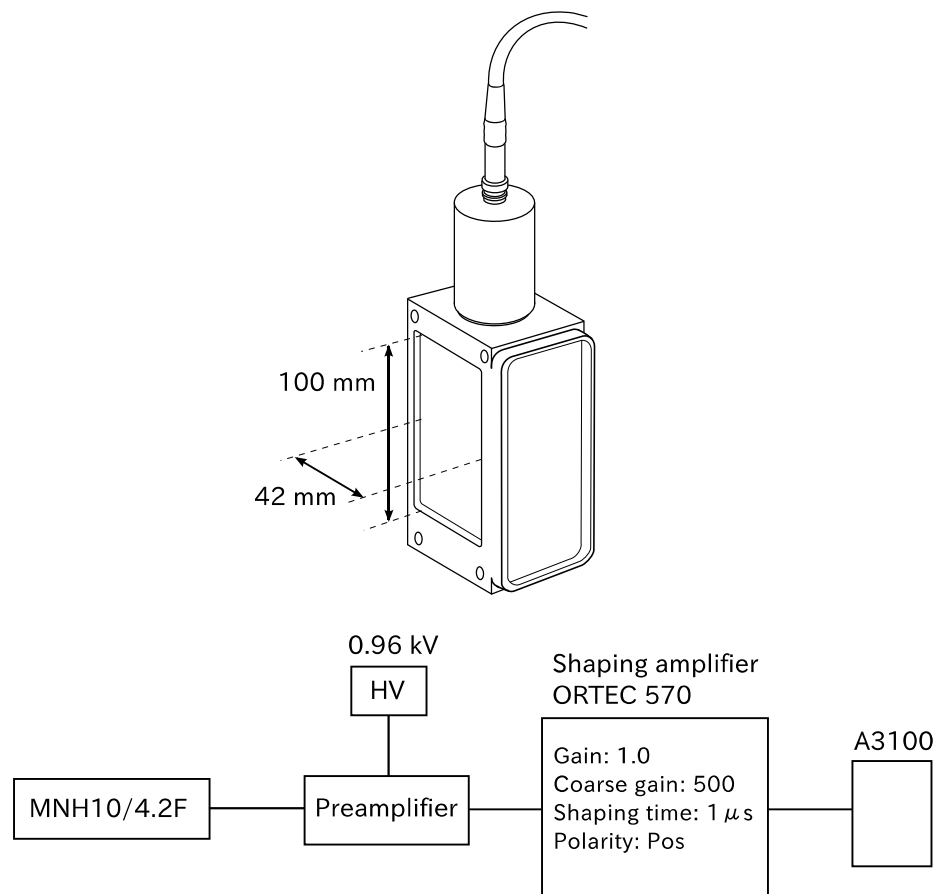


図 3.10: MNH10/4.2F の概形および測定系の配線図。

合計 4 つの出力ケーブルから読み取り、X1～Y2 の信号出力が  $1 \mu\text{s}$  以内に同時に得られた際に波高の比率から電荷の重心位置を決定する。たとえば ADC で読み取った X1 の波高を  $I_{x1}$ 、X2 の波高を  $I_{x2}$  とすると  $I_{x1}/(I_{x1} + I_{x2})$  が入射中性子の X 座標となる。検出器中心付近の位置分解能は  $1 \text{ mm}$  以下である。この検出器はゲインの低下等が原因で周囲ほど像がゆがみ検出効率が低くなる傾向があるが、本論文では RPMT 中央で  $\phi 4 \text{ mm}$  のビームを測定して求めた検出効率で全体の検出効率を代表させ、波長  $\lambda \text{ nm}$  に対する検出効率  $\epsilon_{PMT}$  として以下の式を用いた。

$$\epsilon_{PMT}(\lambda) = 1 - \exp(-0.59\lambda). \quad (3.3.5)$$

検出器の概形と測定系の配線図は図 3.11 に示すようなものになる。

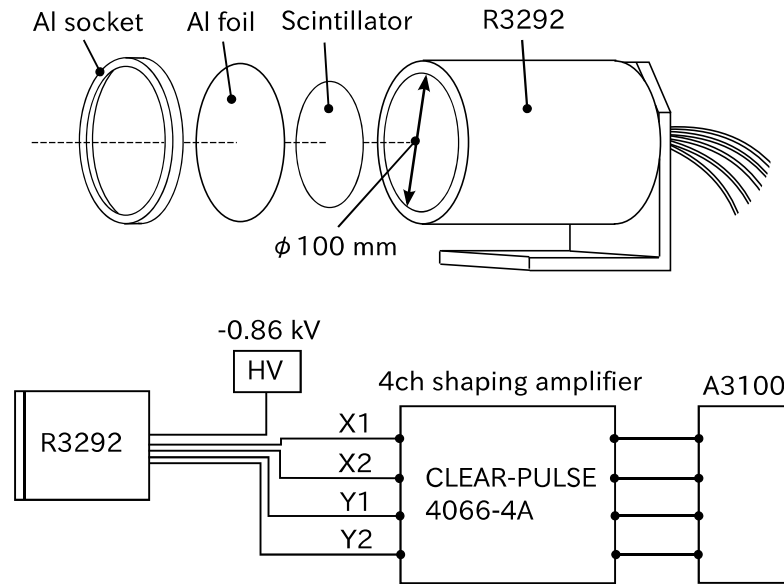


図 3.11: RPMT の概形および測定系の配線図。

## 3.4 スーパーミラーガイド

ここではスーパーミラーガイドの挿入によって増加した非偏極ブランチのビーム発散角とフラックスについて説明する。

### 3.4.1 発散角測定結果

スーパーミラーガイド挿入によって増加したビーム発散角分布は厚さ  $0.5 \text{ mm}$  のカドミウム板に開いた  $\phi 1 \text{ mm}$  のピンホールからのビームを RPMT で測定することで行われた。装置のセッティングを図 3.12 に示す。ピンホールと検出器面との水平距離は  $400 \text{ mm}$  とした。測定点は非偏極ブランチ出口の中心および上下  $\pm 19 \text{ mm}$ 、左右  $\pm 14 \text{ mm}$  の 9 か所とした。像の中心位置は出口中央のピンホール像で粒子数の最も多い地点が検出画像の中