

中性子検出器の光電子増倍管の時間特性に関する報告

田中佳奈

2008.11.11.

概要

プロトタイプ中性子検出器を用いて、オフラインでの宇宙線測定を行った。以下の8種類のフォトマルについて時間特性を調べた結果、HVを上げることによって時間分解能が向上し、H7195、R7724ASSYでは110ps、XP2262Bでは130psの時間分解能が得られた。また、ライトガイドの有無、ライトガイドのUVTの有無に関する考察も行った。この結果をもとに、NEBULA用の光電子増倍管、構成要素を決定する。

1 実験条件

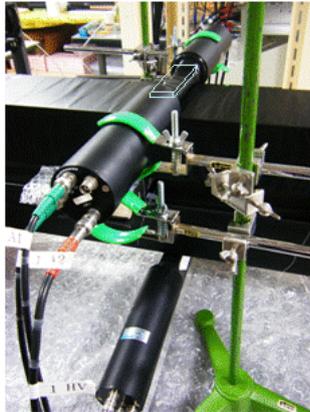
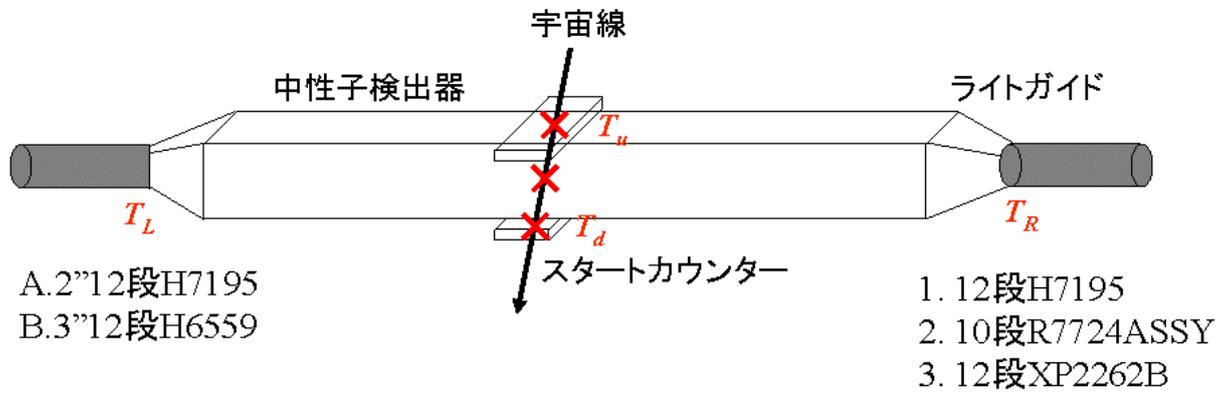
プロトタイプ中性子検出器を用いてオフラインでの宇宙線測定を行った。実験のセットアップを模式的に図1、構成要素を表1に示す。

中性子検出器は大きさ $10 \times 12 \times 180\text{cm}$ のものが2本あり、両側に $10 \times 12 \times 10\text{cm}$ のライトガイドが付いている。中性子検出器の左側はセメントでフォトマルA,Bを固定、右側はグリッドと固定具で表2に示す8種類のフォトマル(1,2-1,2-2,2-3,3-1,3-2)を固定しており、付け替え可能である。

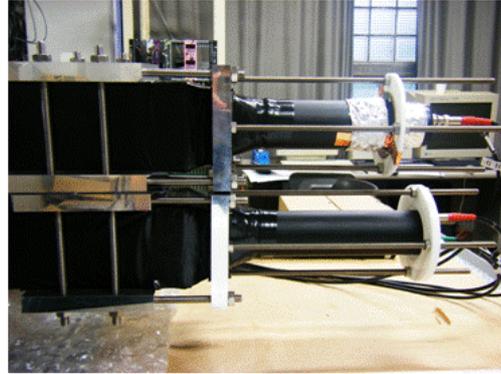
スタートカウンターは $1 \times 3 \times 14\text{cm}$ のシンチレータと両読みのフォトマルから成っており、中性子検出器の上下を挟み、3cm面で宇宙線を捕えている。

宇宙線測定のための回路図は図2、回路を構成する装置は表3であり、宇宙線を特定するためのトリプルコインシデンスを取っている。中性子検出器NEUTは2本同時に測定可能である。スタートカウンターはCFD(スレッシュホールド40mV)で、NEUTはLeading Edge Discriminatorで読み出しており、スタートカウンターの時間分解能は50ps程度であった。

フォトマル2-1ではライトガイドの有無に関する考察、フォトマル2-3ではライトガイドのUVTの有無に関する考察も行った。



スタートカウンター



右側:固定具の様子

図 1: 宇宙線測定のための実験のセットアップ

品物	素材	形状
NUET 用		
プラスチックシンチレータ	EJ200	$10^H \times 12^D \times 180^W$ cm
ライトガイド (2inch 用)	ルサイト、UVT あり	$\phi 4.6 \times 10^H \times 12^D$ cm、長さ 10cm
ライトガイド (2inch 用)	ルサイト、UVT なし	$\phi 4.6 \times 10^H \times 12^D$ cm、長さ 10cm
ライトガイド (3inch 用)	ルサイト、UVT あり	$\phi 6.3 \times 10^H \times 12^D$ cm、長さ 10cm
スタートカウンター用		
プラスチックシンチレータ	EJ200	$1^H \times 3^D \times 15^W$ cm

表 1: 宇宙線測定のために用いたスタートカウンター、中性子検出器

スタート用	特徴	型番	シリアル No.	TTS	かけた HV	リーク電流
	浜松 12 段	H1161	RC6347	?	-1490V	694 μ A
	浜松 12 段	H7195	RD0657	1.1ns	-1570V	737 μ A
	浜松 12 段	H1161	RC5386	?	-1630V	761 μ A
	浜松 12 段	H1161	RC5738	?	-1820V	847 μ A
NEUT 用 (セメント)	特徴	型番	シリアル No.	TTS	最大 HV	最大リーク電流
A	浜松 12 段	H7195	RD4392	1.1ns	-2700V	1.23mA
B	浜松 3inch	H6559	CA0416	1.5ns	-2500V	620 μ A
NEUT 用 (グリス)	特徴	型番	シリアル No.	TTS	最大 HV	最大リーク電流
1	浜松 12 段	H7195	RD4556	1.1ns	-2700V	1.23mA
2-1	浜松 10 段	R7724ASSY	BA2082	1.2ns	-2000V	829 μ A
2-2	浜松 10 段	R7724ASSY	BA3231	1.2ns	-2000V	829 μ A
2-3	浜松 10 段	R7724ASSY	BA3232	1.2ns	-2000V	829 μ A
3-1	photonis12 段	XP2262B	40200	?	-2500V	?
3-2	photonis12 段	XP2262B	40176	?	-2500V	?

表 2: フォトマルの種類

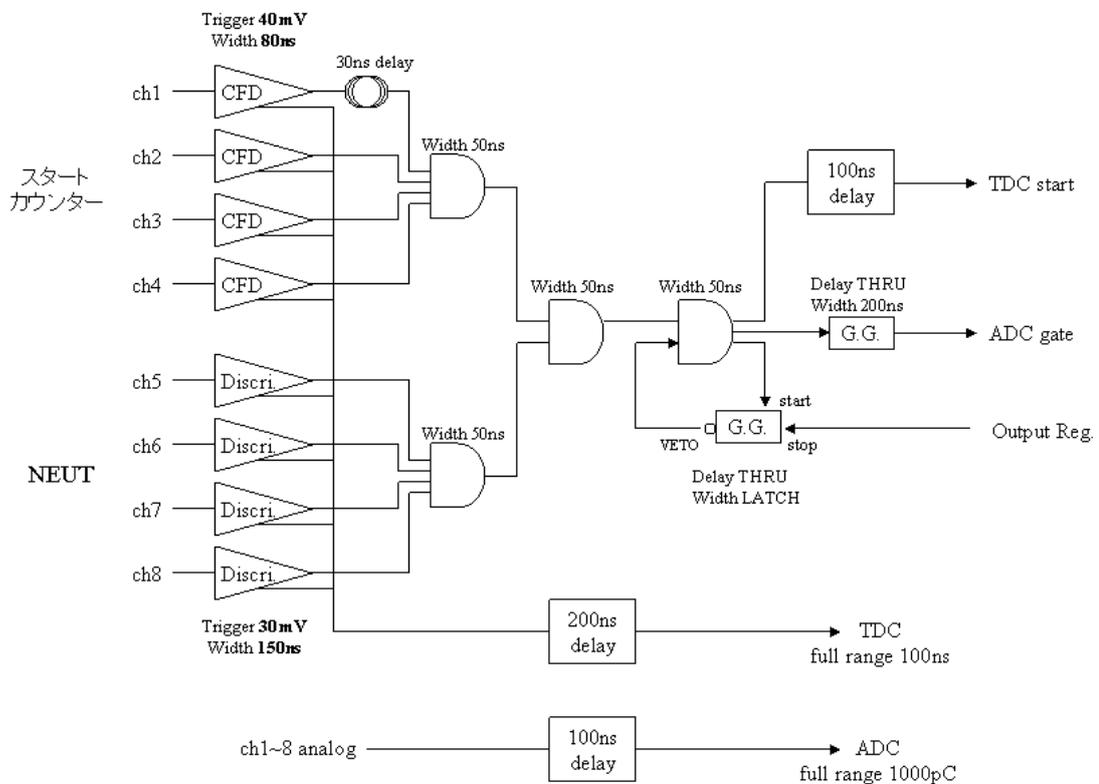


図 2: 宇宙線測定のための回路図

NIM 規格装置	会社	型番	+6V	-6V
CFD	TENNELIC	TC454 QUADCFD	205mA	1.7A
Discri.	林栄 PHILLIPS	MODEL710 OCTAL DISCRI	415mA	420mA
スプリッター	林栄 REPIC	8ch ANALOG SPRITTER	-	-
200ns logic delay	テクノランド	N-RL209-2 200ns 16CH LOGIC DELAY	?	1.1A
Coinc.	林栄 PHILLIPS	MODEL754 QUAD FOUR-FOLD LOGIC UNIT	22mA	400mA
FANIN/OUT	林栄 PHILLIPS	MODEL740 QUAD LINEAR FANIN/OUT	425mA	425mA
G.G.	テクノランド	N-RY007 2CH GATE&DELAY GENERATOR	360mA	1.1A
HV	林栄	MODEL RPH-030 QUAD HV	?	?
		計	1.63A	5.145A
CAMAC 規格装置	型番	備考		
ADC	C009 16CH チャージ積分型 ADC	full range 1000pC		
TDC	KC3781A OCTAL TDC	full range 100ns		
Output Regi	C-RP202 16CH Output Register			
Crate Ctrl.	TOYO CC/7700 CRATE CONTROLLER			

表 3: 回路を構成する装置一覧

2 解析

2.1 ADC のペDESTAL

ADC のペDESTALを表 4 に示す。

ADC	ペDESTAL [ch]
ch1	120
ch2	115
ch3	112
ch4	100
ch5	96
ch6	98
ch7	101
ch8	112

表 4: ADC のペDESTAL (run61-347)

2.2 TDC のキャリブレーション

TDC のキャリブレーション結果を表 5 に示す。

端子	校正式 $x[\text{ch}],y[\text{ns}]$
ch1	$y=0.0247x+8.305$
ch2	$y=0.0248x+8.276$
ch3	$y=0.0249x+7.7005$
ch4	$y=0.0246x+8.2265$
ch5	$y=0.0242x+8.4631$
ch6	$y=0.0249x+8.367$
ch7	$y=0.0248x+8.6955$
ch8	$y=0.0251x+8.7981$

表 5: TDC のキャリブレーション

2.3 時間分解能の求め方

時間分解能を求めるための解析方法の概要を図 3 に示す。

まずバックグラウンドを消去するために解析的に ADC のスペクトルに gate をかけ、以下のようにスルー補正を行い、ガウス関数をフィットさせ、時間分解能 1σ を求めた。

中性子検出器の上下を挟むスタートカウンターの、上シンチレータの時刻を $T_u = (T_1 + T_2)/2$ 、下シンチレータの時刻を $T_d = (T_3 + T_4)/2$ とする。また NEUT の左右のフォトマルで検出された時刻を T_L, T_R とする。TDC から得られるデータはこれらの時刻の「差」である。例えば、 $T = T_u - T_d$ 、 $T_{NR} = (T_u + T_d)/2 - T_R$ などの時間差が得られ、実験

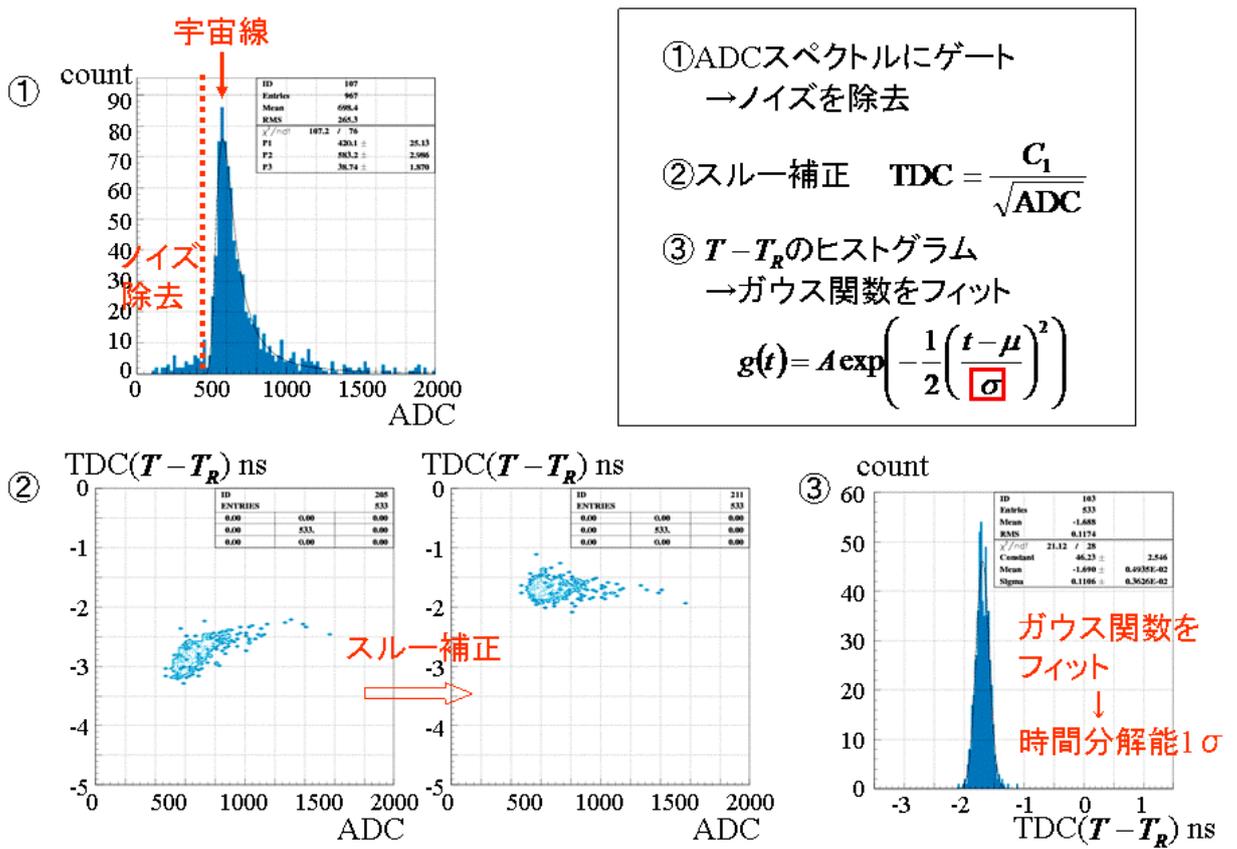


図 3: 時間分解能の求め方

的には T 、 T_{N_R} の 1 次元ヒストグラムにガウス関数をフィットさせることで T 、 T_{N_R} の誤差すなわち時間分解能 ΔT 、 ΔT_{N_R} を求めることができる。これらの時間分解能はそれぞれ $\Delta T = \sqrt{\Delta T_u^2 + \Delta T_d^2}$ 、 $\Delta T_{N_R} = \sqrt{(\Delta T_u^2 + \Delta T_d^2)/4 + \Delta T_R^2}$ と表せるから、 ΔT_u 、 ΔT_d を消去して NEUT の片読みの時間分解能 $\Delta T_R = \sqrt{\Delta T_{N_R}^2 - \Delta T^2/4}$ を求めることができる。左も同様に $\Delta T_L = \sqrt{\Delta T_{N_L}^2 - \Delta T^2/4}$ と求められる。左右が同じフォトマルであった場合、NEUT で検出された時刻は $T_N = (T_L + T_R)/2$ と表せるから、時間分解能は $1/\sqrt{2}$ 倍高くなると予想される。

スルーとは、図 4 に示すように、パルスハイトによって、真の到達時刻にずれが生じる現象である。スルーの補正を以下の手順で行った。

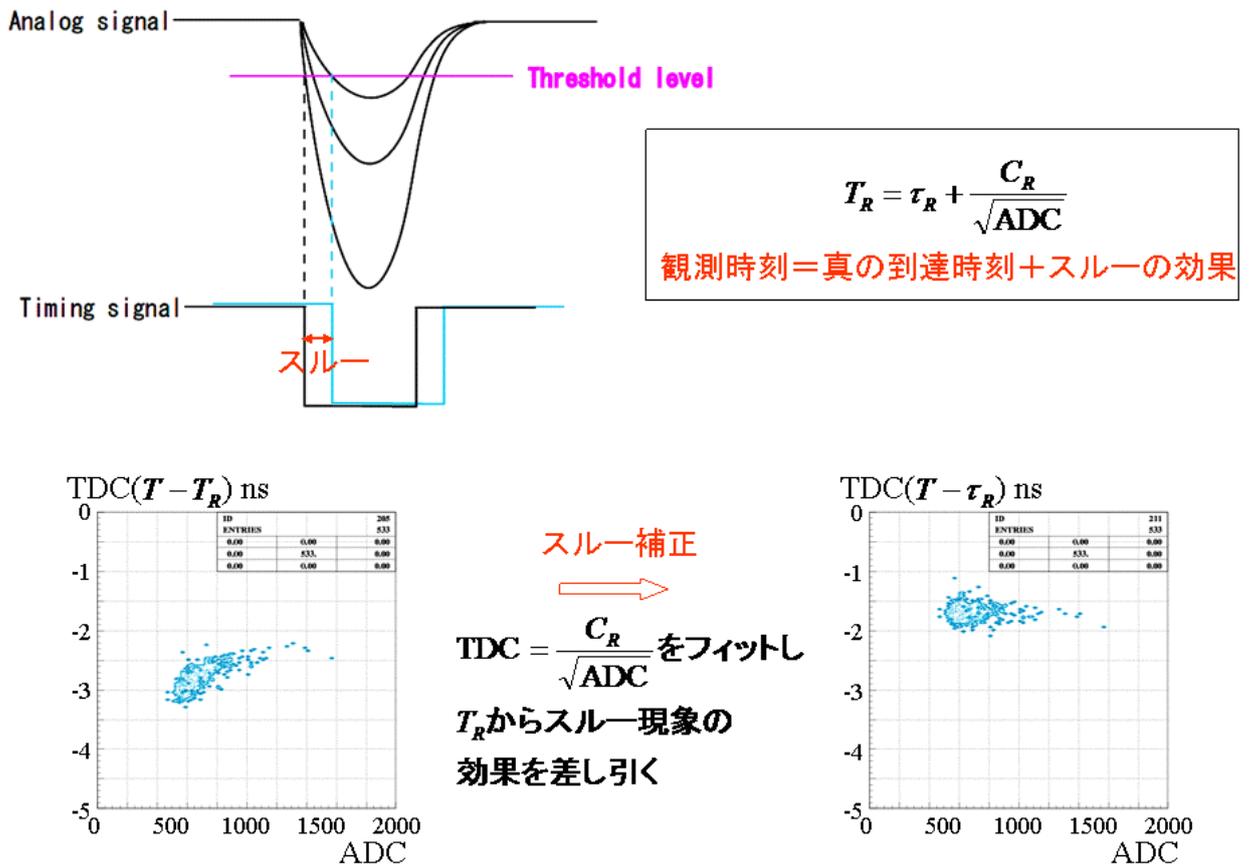


図 4: スルー補正の仕方

スタートカウンタのスルー補正： $T = T_u - T_d = (T_1 + T_2)/2 - (T_3 + T_4)/2$ の時間分解能 ΔT を考える。スルーの効果を $C_1/\sqrt{A_1}$ という関数で表せるとし、 T_1 の真の到達時刻は $\tau_1 = T_1 - C_1/\sqrt{A_1}$ だとする (T_2, T_3, T_4 も同様)。適当に選んだ係数 C_1, C_2, C_3, C_4 を用いて、

$\tau = (\tau_1 + \tau_2)/2 - (\tau_3 + \tau_4)/2 = T - \{(C_1/\sqrt{A_1} + C_2/\sqrt{A_2})/2 - (C_3/\sqrt{A_3} + C_4/\sqrt{A_4})/2\}$ の時間分解能 $\Delta\tau$ を求め、 $\Delta\tau$ が最小になるように係数を選んで時間分解能 $\Delta\tau$ を決定した。

NEUT のスルー補正：スタートカウンターのスルー補正で求められた補正後の $\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4$ を用いて、 $T_{NR} = (\tau_u + \tau_d)/2 - T_R$ の時間分解能 ΔT_{NR} を考える。スルーの効果を $C_R/\sqrt{A_R}$ という関数で表せるとし、 T_R の真の到達時刻は $\tau_R = T_R - C_R/\sqrt{A_R}$ だとする。適当に選んだ係数 C_R を用いて、 $\tau_{NR} = (\tau_u + \tau_d)/2 - \tau_R = (\tau_u + \tau_d)/2 - (T_R - C_R/\sqrt{A_R})$ の時間分解能 $\Delta\tau_{NR}$ を求め、 $\Delta\tau_{NR}$ が最小になるように係数を選んで時間分解能 $\Delta\tau_{NR}$ を決定した。 $\Delta\tau_{NL}$ についても同様に求めた。

2.4 ランダウピークの読み取り方、電荷量の求め方

ADC のランダウピークの読み取り方、各パルスの電荷量の求め方について示す。CERN に入っているランダウ関数 $f(x)$ を用いて、ADC で得られたエネルギースペクトルに、

$$L(x) = P_1 \cdot f\left(\frac{x - P_2}{P_3}\right) \quad (1)$$

をフィットさせた。 P_1 は規格化係数、 P_2 はピーク値、 P_3 は標準偏差を表す。

ADC の full range は $4000ch=1000pC$ であるから、ADC のピークに対応する電荷量は

$$Q[pC] = 1000pC \times \frac{P_2[ch]}{4000ch} \quad (2)$$

と求めることができる。また、この電荷量は厚さ 10 cm のプラスチックシンチレータ内の宇宙線のエネルギー損失 $1.936 \text{ MeVee/cm} \times 10 \text{ cm}=19.36\text{MeVee}$ に対応する (Particle Data Group 参照)。

3 時間分解能の HV 依存性

図 6～8 に、各フォトマルのライトガイド (UVT、ルサイト) ありの場合の、左図に HV に対する時間分解能、右図に ADC ピークに対する時間分解能を示す。浜松のカタログ図 5 が示すように、一般に時間分解能は走行時間の広がりである TTS や上昇時間と共に、HV の平方根に反比例して改善していく。図 6～8 の緑の線はこの関係を表したものである。

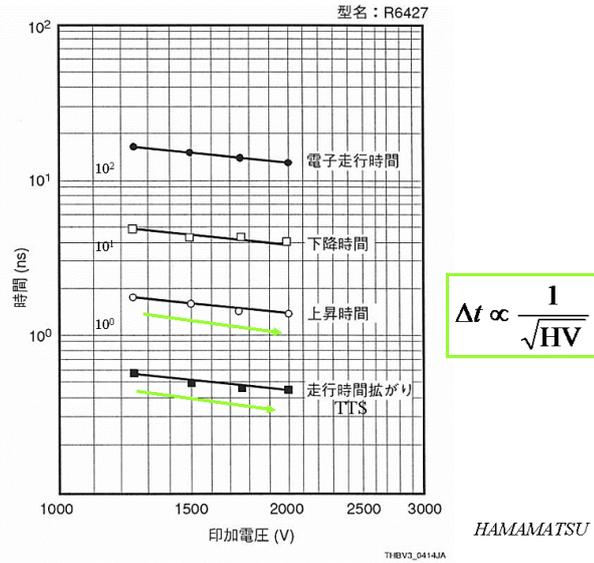


図 5: HV と TTS 等の時間の関係 (浜松のカタログより)

セメントで固定した A,B を比較すると 3inch より 2inch の方が高い時間分解能が得られることがわかった。これは、TTS が短いためだと考えられる。

またグリスで固定した 1～3 のフォトマルを比較すると、1、2 のフォトマルは 110ps 程度の時間分解能が得られるのに対して、3 のフォトマルは 130ps 程度の時間分解能が得られた。

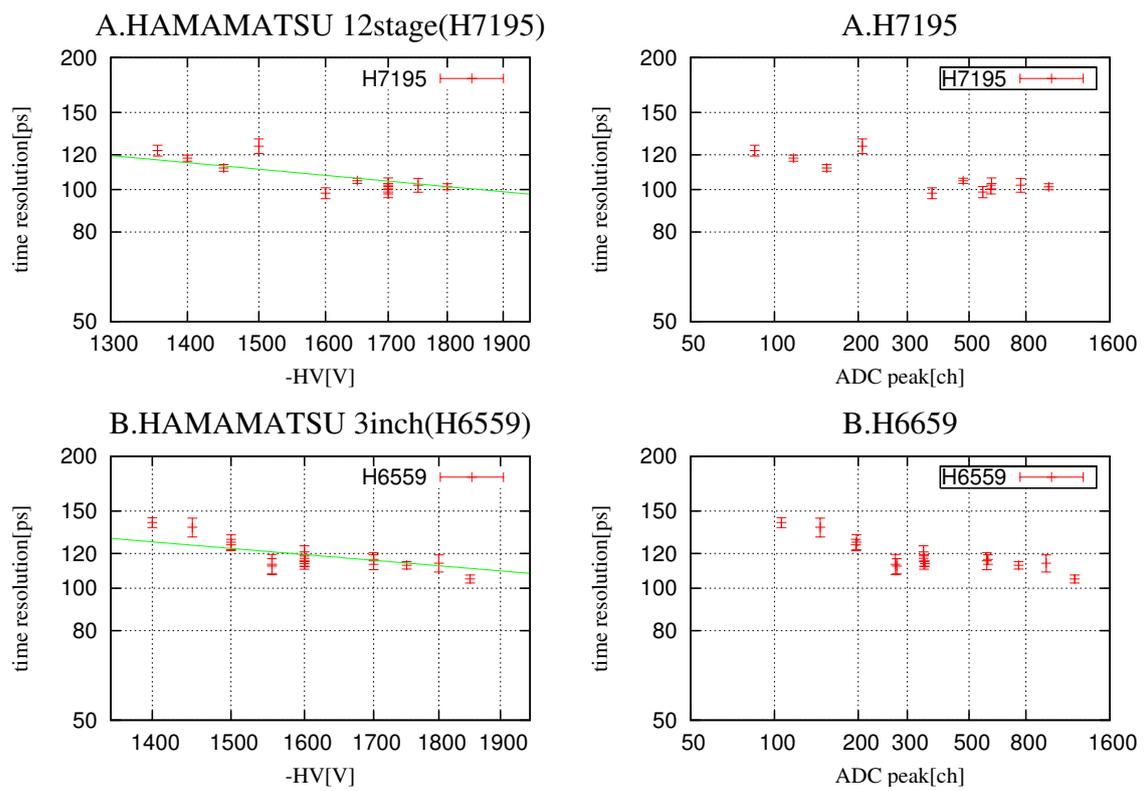


図 6: 時間分解能の HV 依存性 (左図: HV vs 時間分解能、右図: ADC ピーク vs 時間分解能)

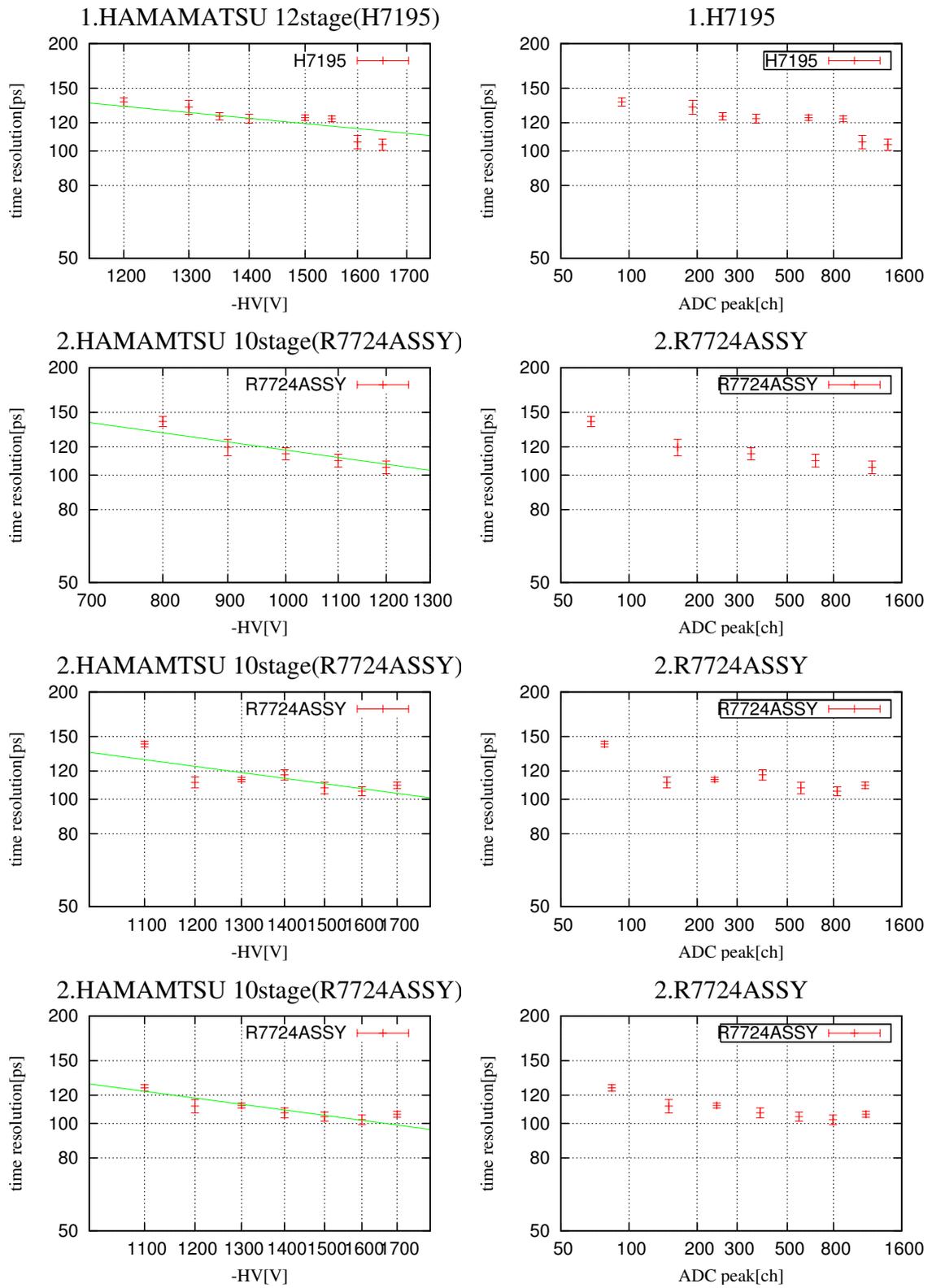


図 7: 時間分解能の HV 依存性 (左図: HV vs 時間分解能、右図: ADC ピーク vs 時間分解能)

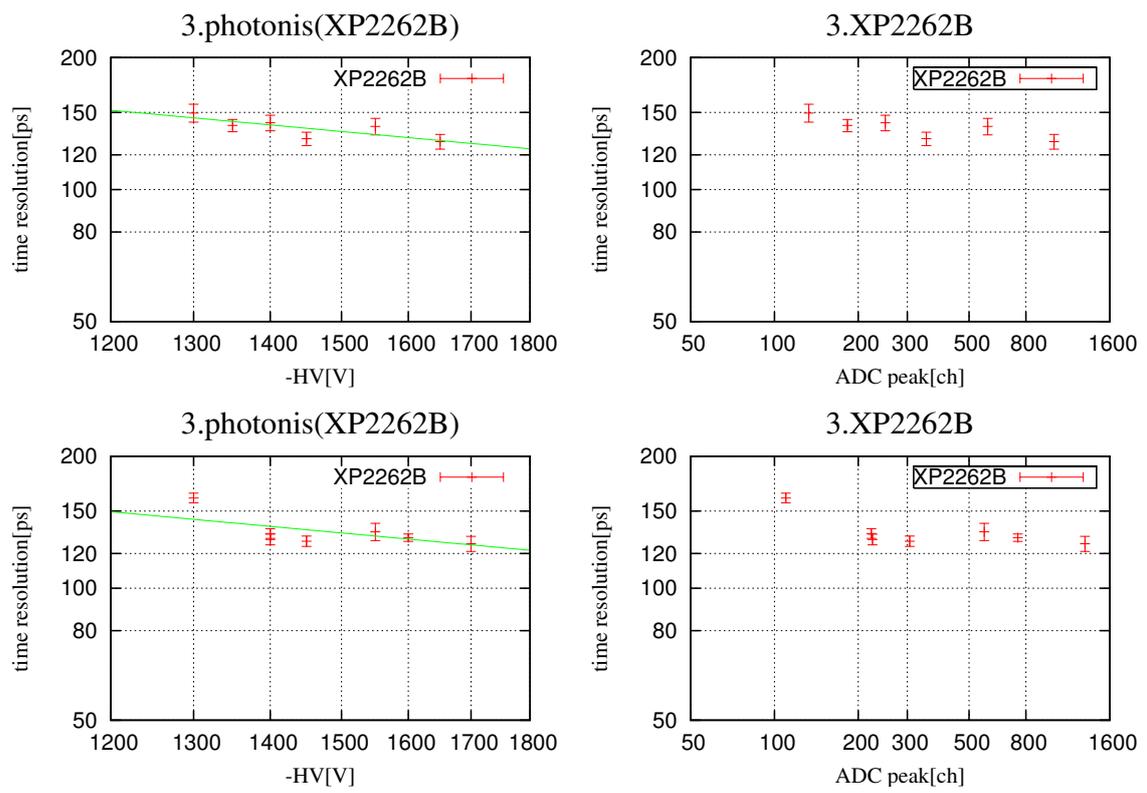


図 8: 時間分解能の HV 依存性 (左図: HV vs 時間分解能、右図: ADC ピーク vs 時間分解能)

4 ライトガイドの有無による時間特性の違い

フォトマル 2-1(R7724ASSY) を用いて、ライトガイドあり・なしの場合の時間分解能について考察した。その結果、ライトガイドをつけた方が高い時間分解能が得られた。これは集光率が上がるためだと考えられる。

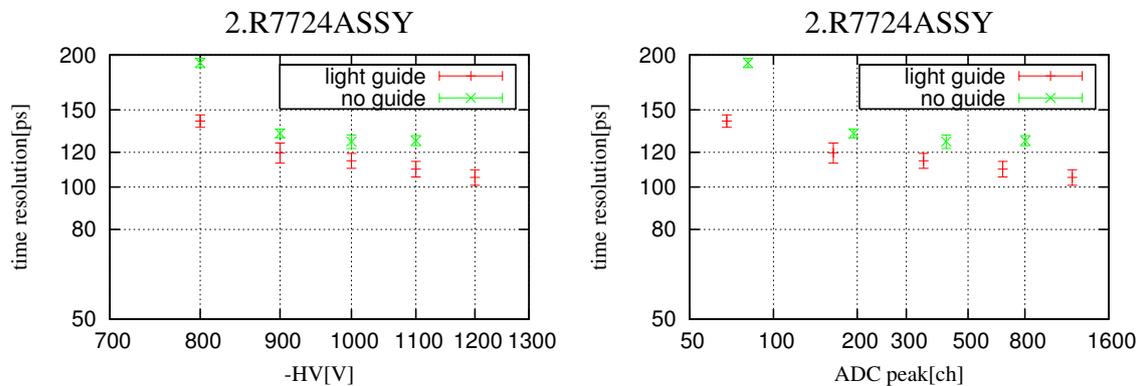


図 9: ライトガイドの有無

5 UVT の有無による時間特性の違い

これまでは全て UVT(紫外線透過型) のライトガイドを用いてテストを行ってきた。フォトマル 2-3(R7724ASSY) を用いて、ライトガイドの UVT の有無による時間分解能について考察した。その結果、UVT の有無による違いはほとんどないことがわかった。

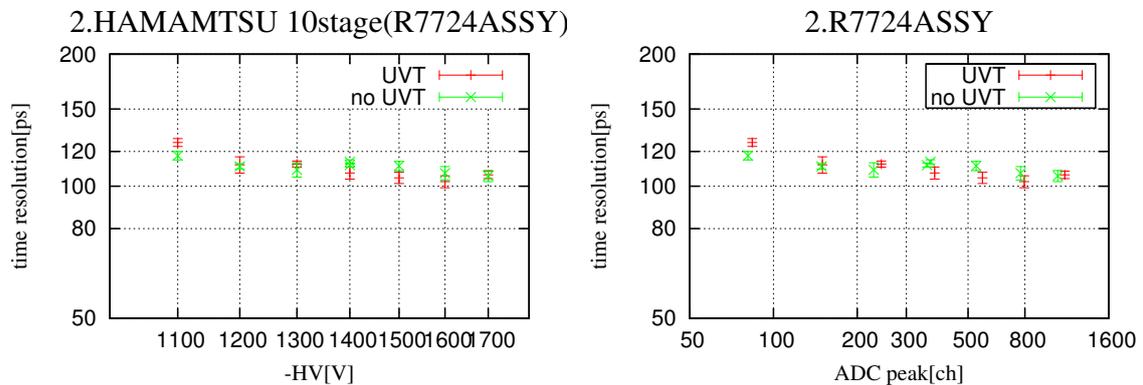
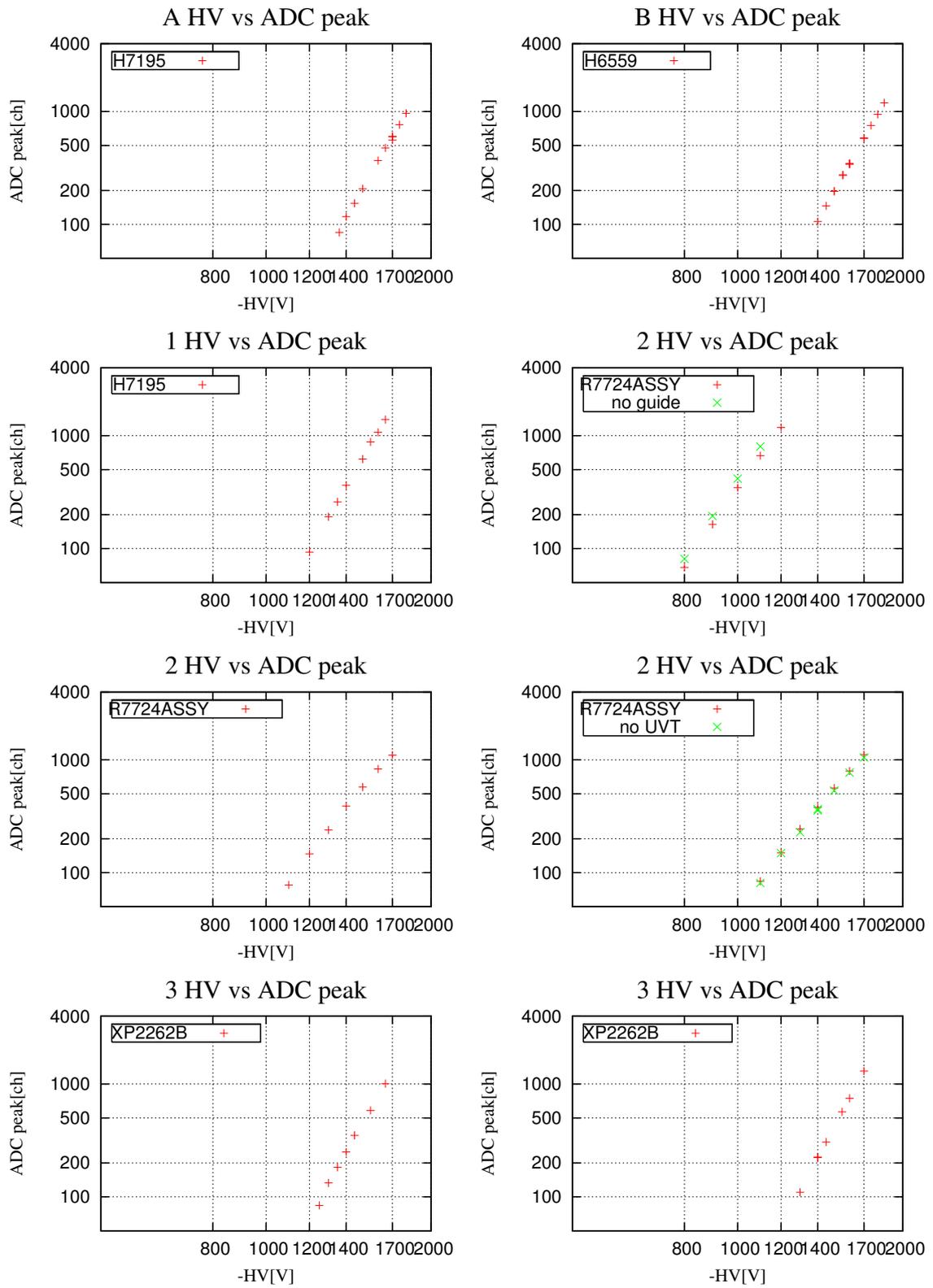


図 10: UVT の有無

6 gain

図 11 に、各フォトマルの HV vs ADC ピークの図を示す。



☒ 11: HV vs ADC peak

7 結論と今後

本実験の結果から、NEBULA 用の光電子増倍管として、時間分解能が高く、比較的安価な R7724ASSY を用いること、またライトガイドをつけることとした。ライトガイドの UVT に関しては、特に指定しない。

今後は、アナログ信号に用いる delay の長さ (本実験では 100ns) を変更し、パルスハイトや時間分解能の変化を調べ、実際に理研の実験で使用する際のアテネータに関する見積もりを行う。また、中村研究室で開発中のドリフトチェンバーと組み合わせて、宇宙線の軌跡をトラックし位置分解能を上げた時の、エネルギー分解能、時間分解能について考察する予定である。将来的には高エネルギー陽子ビームを用いた ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ 反応によって、オンラインでの中性子検出器の時間分解能、検出効率のテストを行う予定である。