NKS用 New hybrid electron veto counter の性能の評価

飯島正史

平成 15 年 4 月 19 日

目 次

1 実験の目的 **3**

2 KEK T1 ビームライン **6**

3 pulse height correction **9**

4 位置分解能 **11**

5 時間分解能 **17**

6 veto カウンターとしての性能評価 **23**

7 考察 **26**

8 Appendix:TDC の channel 数の位置情報への変換 **27**

9 謝辞 **31**

図 目 次

1 Neutral Kaon Spectrometer 3
2 NKS 鳥瞰図 4
3 Hybrid Counter の概観 5
4 KEK-PS 東カウンターホール 6
5 T1 ビームラインで観察される粒子 7
6 ビームのサイズ 8
7 T530 実験のセットアップ 8
8 Time Walk effect 9
9 pulse height correction 10
10 π^+ の位置分解能 (カウンター左側) 12
11 π^+ の位置分解能 (カウンター右側) 13
12 *proton* の位置分解能 (カウンター左側) 14
13 *proton* の位置分解能 (カウンター右側) 15
14 位置分解能の beam hit position 依存性 16
15 π^+ の時間分解能 (カウンター左側) 18
16 π^+ の時間分解能 (カウンター右側) 19
17 *proton* の時間分解能 (カウンター左側) 20
18 *proton* の時間分解能 (カウンター右側) 21
19 時間分解能の beam hit position 依存性 22
20 ビーム入射位置による event 数の違い (P=1.2GeV) 23
21 ビーム入射位置による event 数の比の違い 24
22 理論値の求め方 25
23 時間と位置の関係 (T1 ラインのビーム) 27
24 時間と位置の関係 (T1 ラインのビーム) 28

25　時間と位置の関係 (β 線源) 29

1　実験の目的

現在核理研では K0 実験という中性 K 中間子の生成について研究するプロジェクトがあり、そこには K^0 中間子を分光するための NKS(Neutral Kaon Spectrometer) という分光装置が置かれている。この実験では 1.2GeV の電子ビームから制動放射で得られる γ 線を NKS 内のターゲットに当て、ストレンジネスをもつ Λ 粒子および K^0 中間子を生成している。

$$\gamma + n \longrightarrow K^0 + \Lambda \tag{1}$$

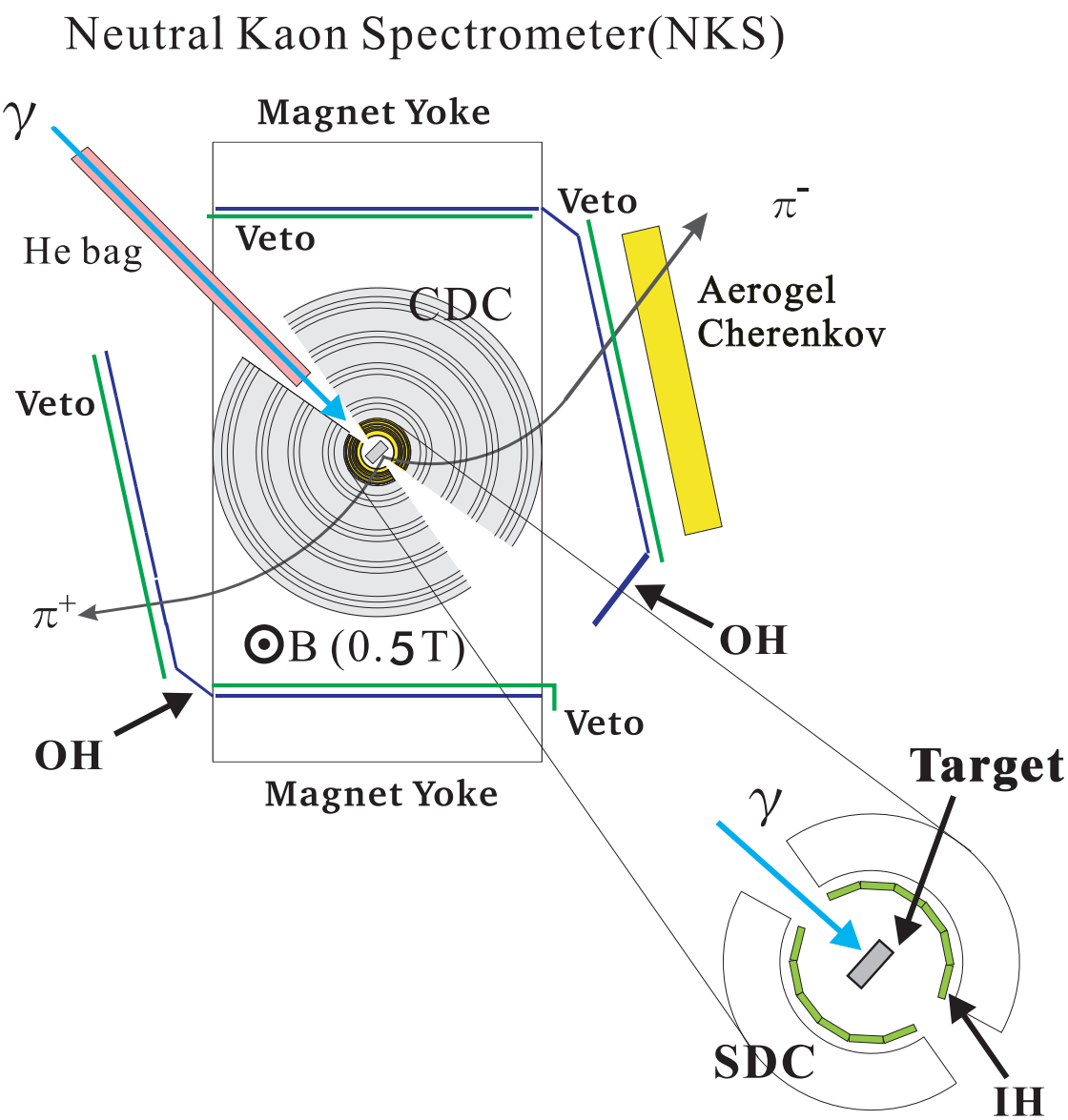

図 1: Neutral Kaon Spectrometer

我々は、この K^0 が崩壊して得られる π^+ および π^- を観測し, K^0 や Λ の情報を得たいが、これらの

ほかにも、バックグラウンドとして γ 線からの電子対生成で得られる e^+ や e^- も観測されてしまう。

$$K^0 \longrightarrow \pi^+\pi^- \tag{2}$$

$$\gamma \longrightarrow e^+e^- \tag{3}$$

この e^+ と e^- によるトリガーレートを落すために、図 1 に Veto で示されているプラスチックシンチレータが導入されている。

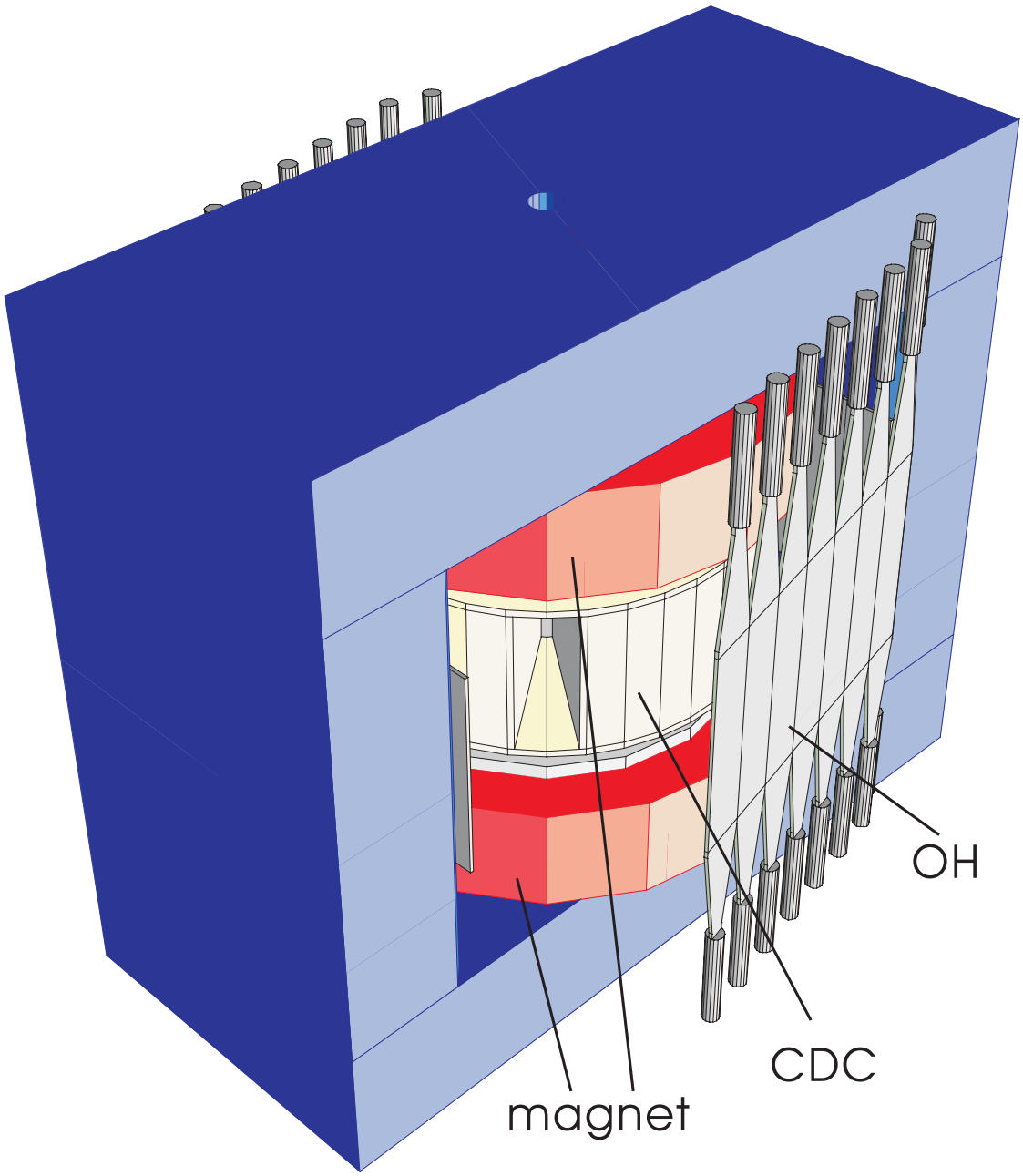

図 2: NKS 鳥瞰図

この Veto シンチレータは図 2 中の OH(Outer Hodoscope) で示されるカウンターに接着して置かれている。この OH は図 1 の IH で示されるプラスチックシンチレータとともにトリガーを構成し、TOF、位置を決定するために使われている。

我々はこの OH と Veto の役目を 1 つのカウンターで行なうことができないものかと考え、図 3 に示すようなシンチレーションカウンターを製作した。この counter を今後 Hybrid Counter と呼ぶことにし、時々HC と略記する。

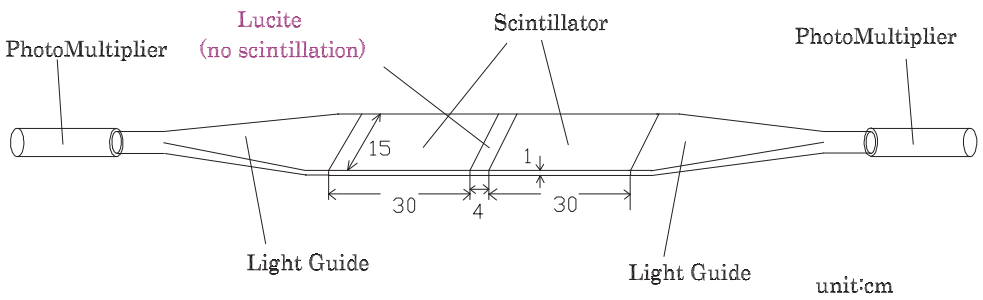

図 3: Hybrid Counter の概観

図の中央の lucite 部分が Veto の役割、lucite の左右の 2 枚のシンチレータが OH の役割を果たす。(Hybrid Counter は図 2 中の OH と大きさ、形ともほぼ同じで、中央部に lucite が入っているかいないかの点で異なる。)

電子および陽電子は γ 線の前方にピークを持つので、磁場によってビームと同じ高さの水平面内にその多くが放出される。したがって図 3 のカウンターを縦方向にして使用すれば、その平面を lucite 部分で覆うことができ、e^+ や e^- によるトリガーレートを落すことが可能である。

また、Hybrid Counter には左右に PMT があるので、シンチレータ部分を通過した粒子の位置を求めることも可能で、CDC(Cylindrical Drift Chamber)(図 2) とともに粒子の飛跡を追跡するために使用することができる。そのためある程度の位置分解能が HC には要求される。

さらに、 IH との間の TOF(time of flight) を用いて粒子の分類を行なわなければならないために時間分解能も重要な要素になってくる。

なお、使用したシンチレータの種類は BC408、PMT は両側とも H7195、lucite は Light Guide と同じ材料の UVT アクリルである。

2 KEK T1 ビームライン

前に述べた理由から、HC については、

- ビームを lucite 部分に当てたときの、シンチレーション光の光量
- scintillator 部分にビームを当てたときの位置分解能
- 時間分解能

の 3 つのパラメータを評価しなければならない。

これらの値を評価するために、私は 2002 年 12 月に KEK-PS(Proton Synchrotron), T1 ビームラインで行なわれた T530 実験に参加し、Hybrid Counter の性能評価を行なった。ここでは T1 ラインのビームの性質について簡単に説明する。

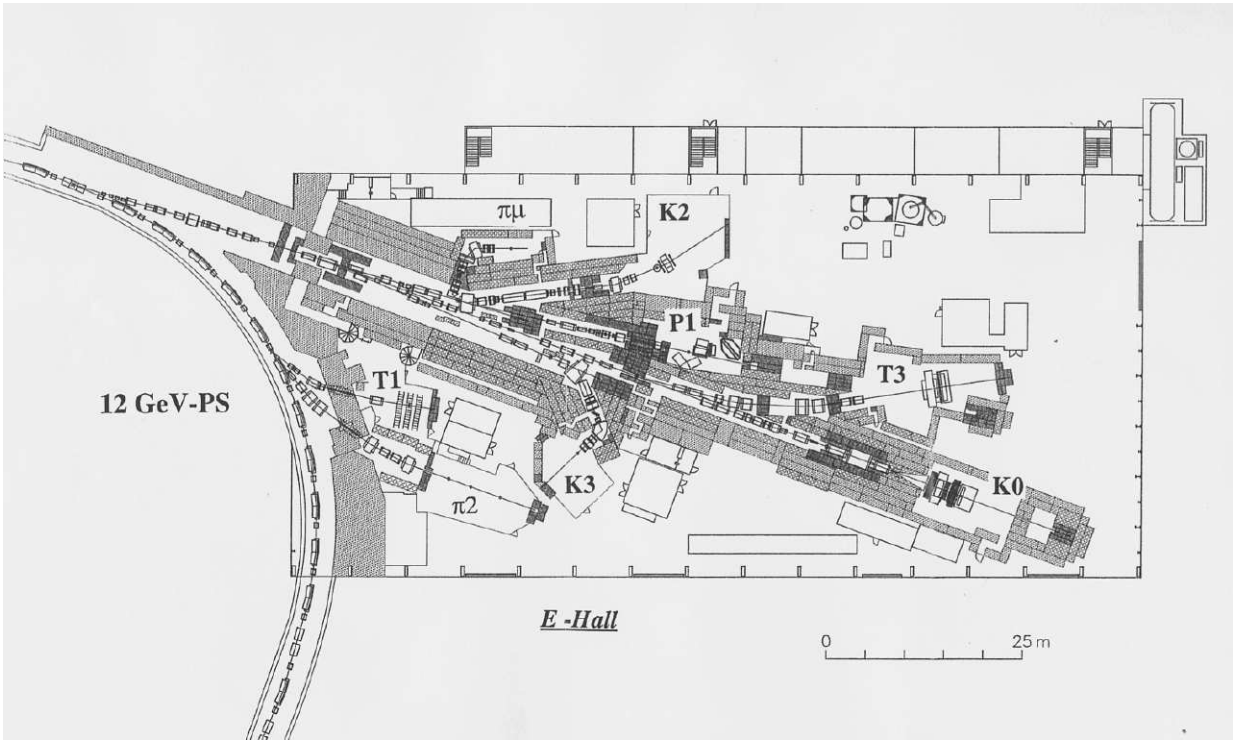

図 4: KEK-PS 東カウンターホール

T1 ラインでは陽子シンクロトロンで 12GeV に加速された陽子を内部標的に当て、そこで発生する 2 次粒子をビームとして取り出している。T1 ラインでは、観測する粒子の運動量を決めることができるが、我々は、1.05GeV,1.20GeV,1.35GeV の 3 通りの値の運動量を主に用いて実験を行なった。

T1 ラインにどんな粒子が入ってくるのかは TOF(time of flight) 法を用いて見積もることができる。TOF 法とは、 2 つの scintillation 検出器間を飛行する粒子の速度をはかり、その速度の値から粒子の質量を計算し、その粒子の種類を特定しようという方法である。(TOF についての説明は時間分解能の解析の所を見て下さい。)

ある 2 つの scintillation counter 間を飛行する粒子の質量 m と運動量 P の関係は、

$$m^2 = P^2\left\{\left(\frac{c}{L}\Delta TOF + 1\right)^2 - 1\right\} \tag{4}$$

となる。ただし、L は 2 つの scintillation counter 間の距離である。運動量が $P = 1.2GeV$ のときの質量分布は図 5 のようになる。

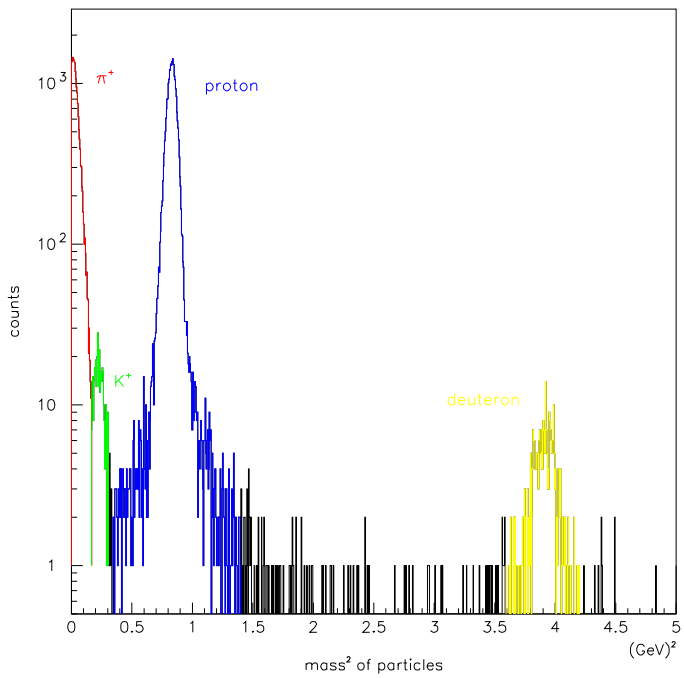

図 5: T1 ビームラインで観察される粒子

T1 ラインには主に π^+,K^+,p,d の 4 つの種類の粒子が来ていることが分かる。このうち K0 実験でも重要な π^+ を中心にした解析を行なえばよいであろう。また、K0 実験では、TOF を用いて陽子と π^+ のイベントを分類しなければならないので、陽子イベントについても解析を行なわなければならない。

また、今回の実験ではビームのサイズは 4 つの hodoscope counter によって決まる大きさである。hodoscope counter は 1 と 2、3 と 4 がそれぞれ組をなしている。両方の組ともに図 6 に示されるような正方形の形をしている。

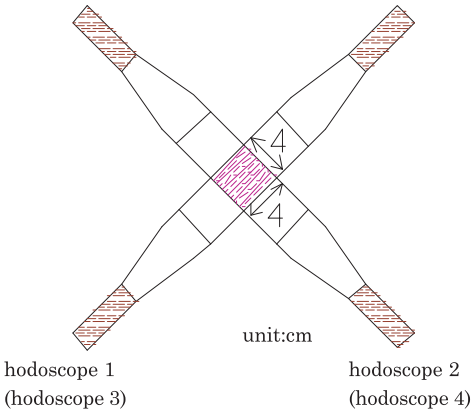

図 6: ビームのサイズ

KEK でのセットアップの概観を図 7 に示す。

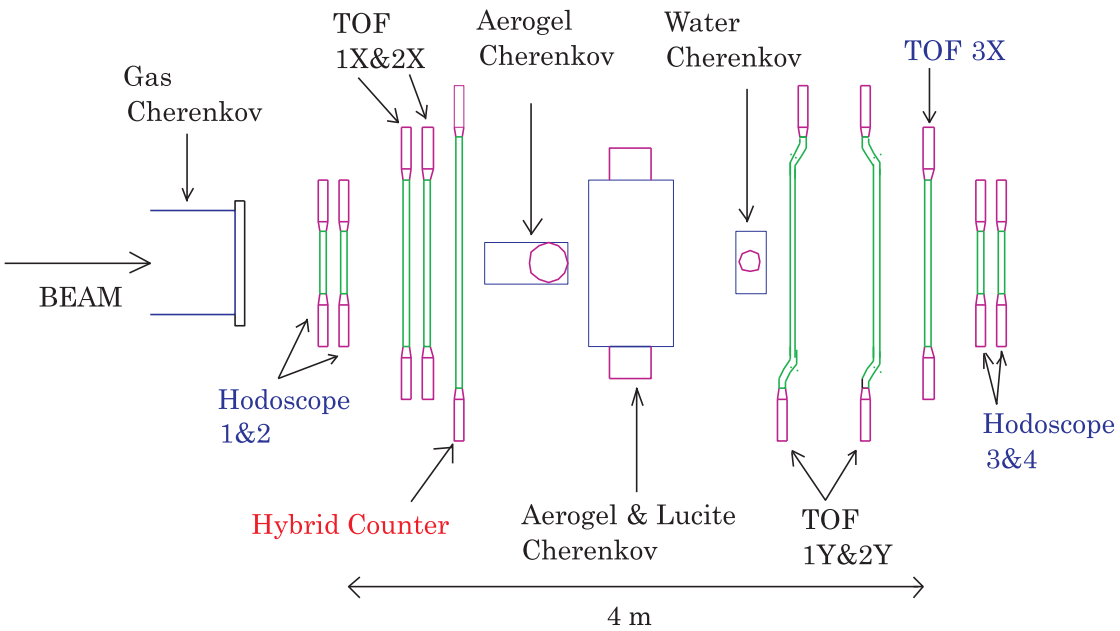

図 7: T530 実験のセットアップ

図 7 のように、Hodoscope,TOF Counter などの scintillation counter や aerogel や water などの Cherenkov counter がある。これらのカウンターのうちトリガーに使われているカウンターや、Hybrid Counter の解析に使用したカウンターの名称を青色で表示した。我々は Hodoscope1 と 2 と TOF counter 3 の左右それぞれの PMT の論理積をトリガーとして使った。

$$\mathrm{TRIGGER} = \mathrm{eh1R} \otimes \mathrm{eh1L} \otimes \mathrm{eh2R} \otimes \mathrm{eh2L} \otimes \mathrm{tof3R} \otimes \mathrm{tof3L} \tag{5}$$

3 pulse height correction

位置分解能や時間分解能を求める際には pulse height correction という作業を行なわなければならない。この作業を行なわなければならない原因は、我々が T530 実験で用いた leading edge 方式の discriminator に起因している (図 8)。この方式の discriminator は、アナログ信号の大きさがある閾値を越えたその時点でデジタル信号を発生する。このため、図 8 のように、波高の高いアナログ信号と低いアナログ信号とでは、対応するデジタル信号の立ち上がりのタイミングに時間差が生じてしまう。この差をオフライン解析で修正する作業が pulse height correction である。

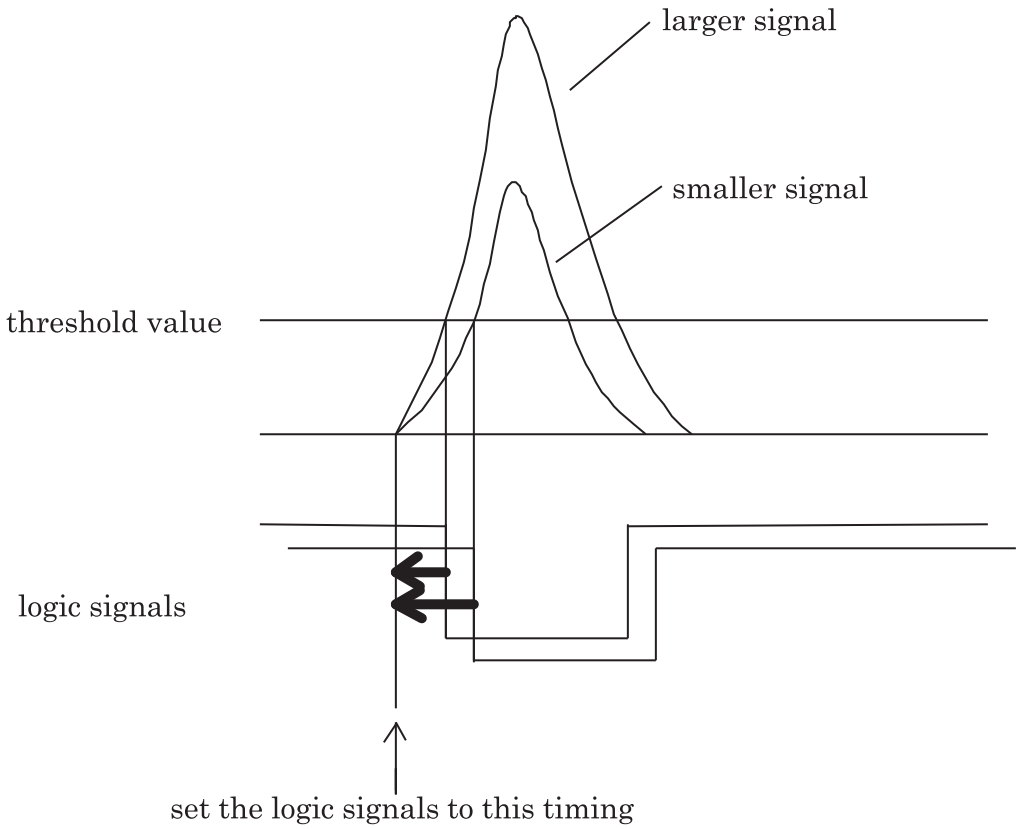

図 8: Time Walk effect

アナログ信号の波高の情報が ADC に、デジタル信号の立ち上がりの timing の情報が TDC に反映されると考え、これらの相関図を取ると、図 9 左上のようになる。この曲線を適当な関数で近似し、直線に直すと図 9 右上のようになり、それに伴って分解能も図 9 左下から右下のように向上する。

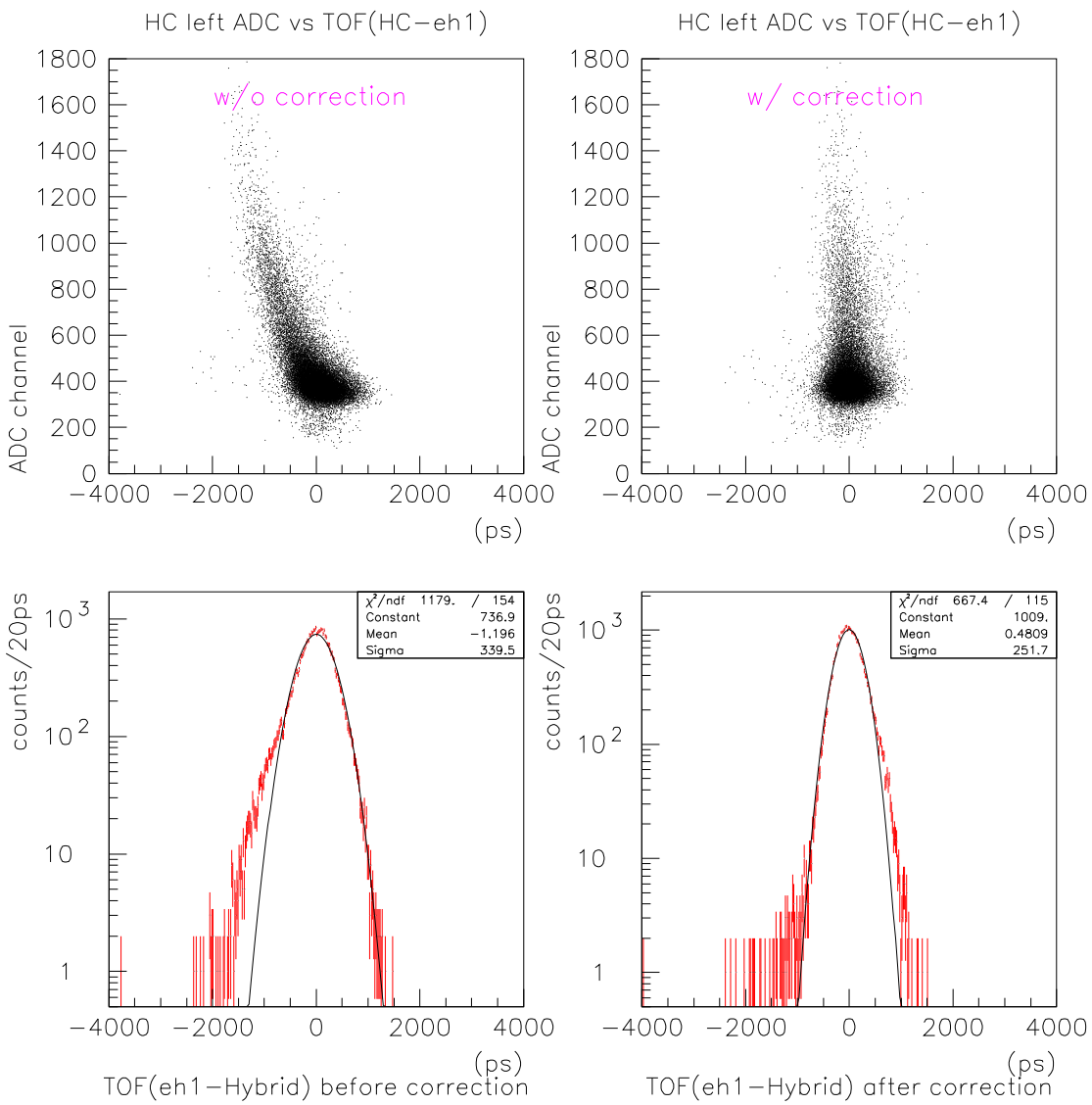

図 9: pulse height correction

4　位置分解能

一般に scintillation counter で粒子が当たった位置はカウンター中を光が伝わる速度を v として、左右の TDC の値の引き算により求められる。

$$x = \frac{v}{2}(t_L - t_R) \tag{6}$$

この x に対して分散 σ[cm] を求め、位置分解能とする。

この位置分解能 sigma をカウンターのいろいろな位置で求めてやると図 10 から図 13 のようになる。(運動量 1.2GeV) なお右側の図は HC の ADC と beam hit position の相関図 (pulse height 補正済) で, 右側の図を x 軸上に射影すると左側の図が得られる。

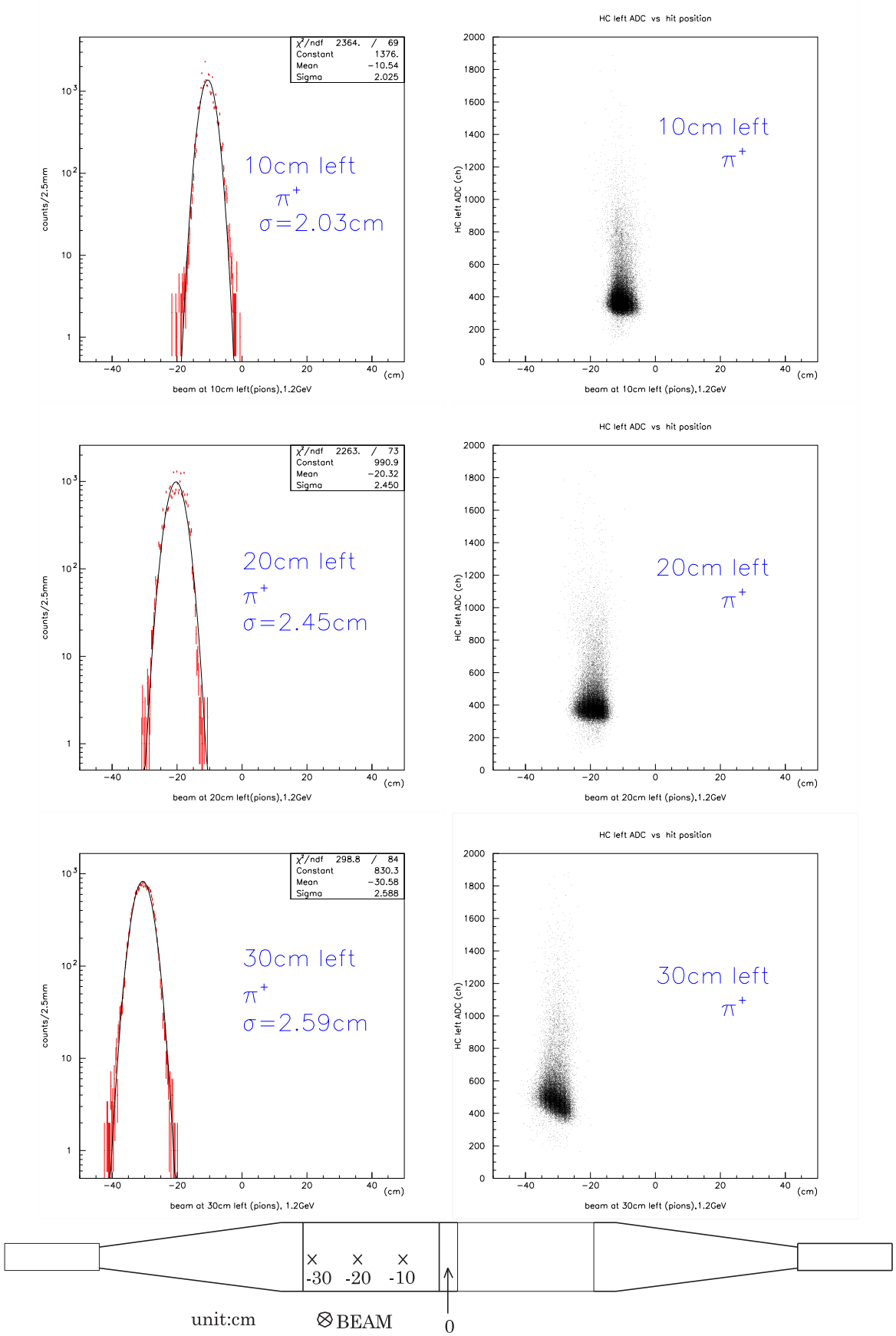

図 10: π^+ の位置分解能 (カウンター左側)

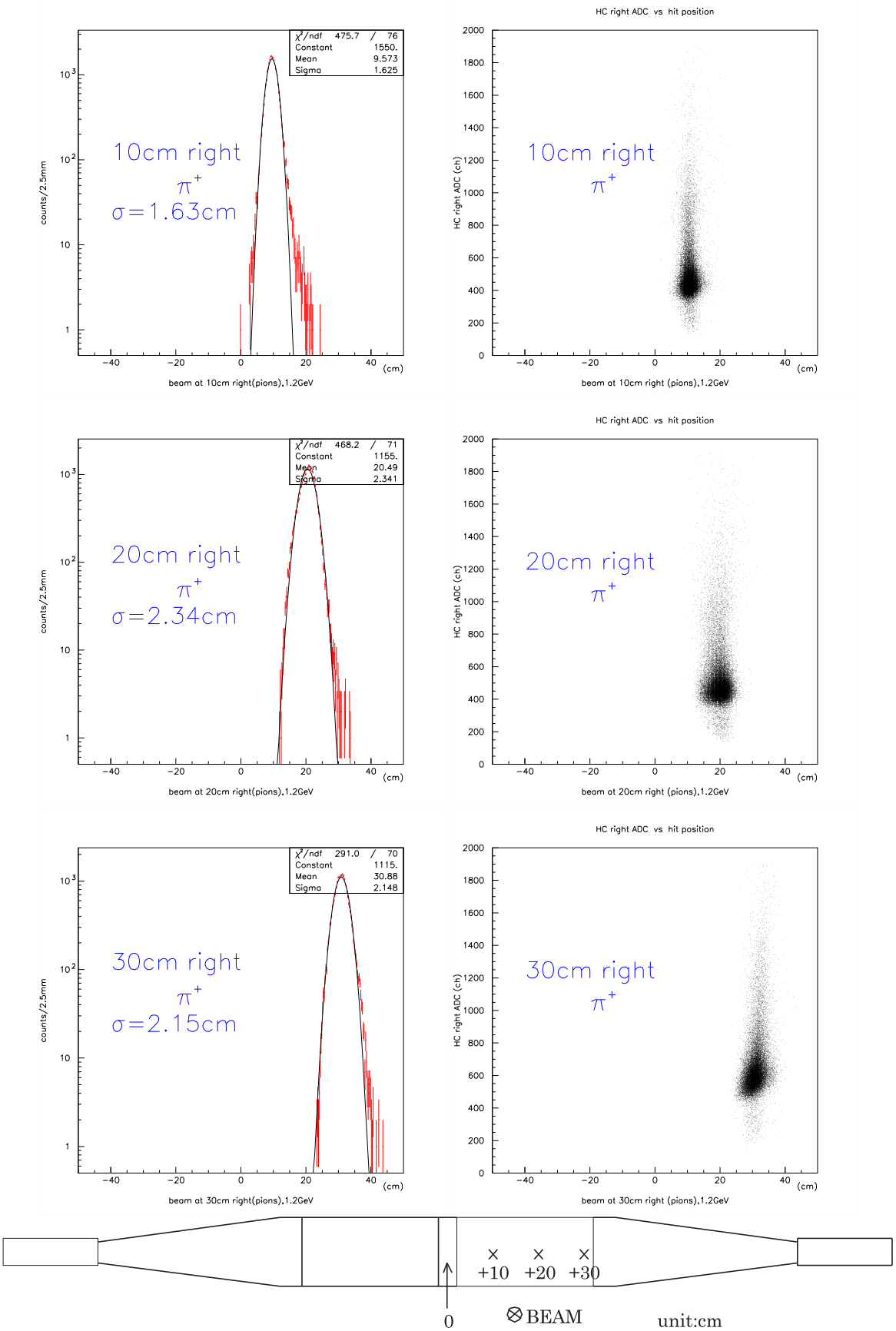

図 11: π^+ の位置分解能 (カウンター右側)

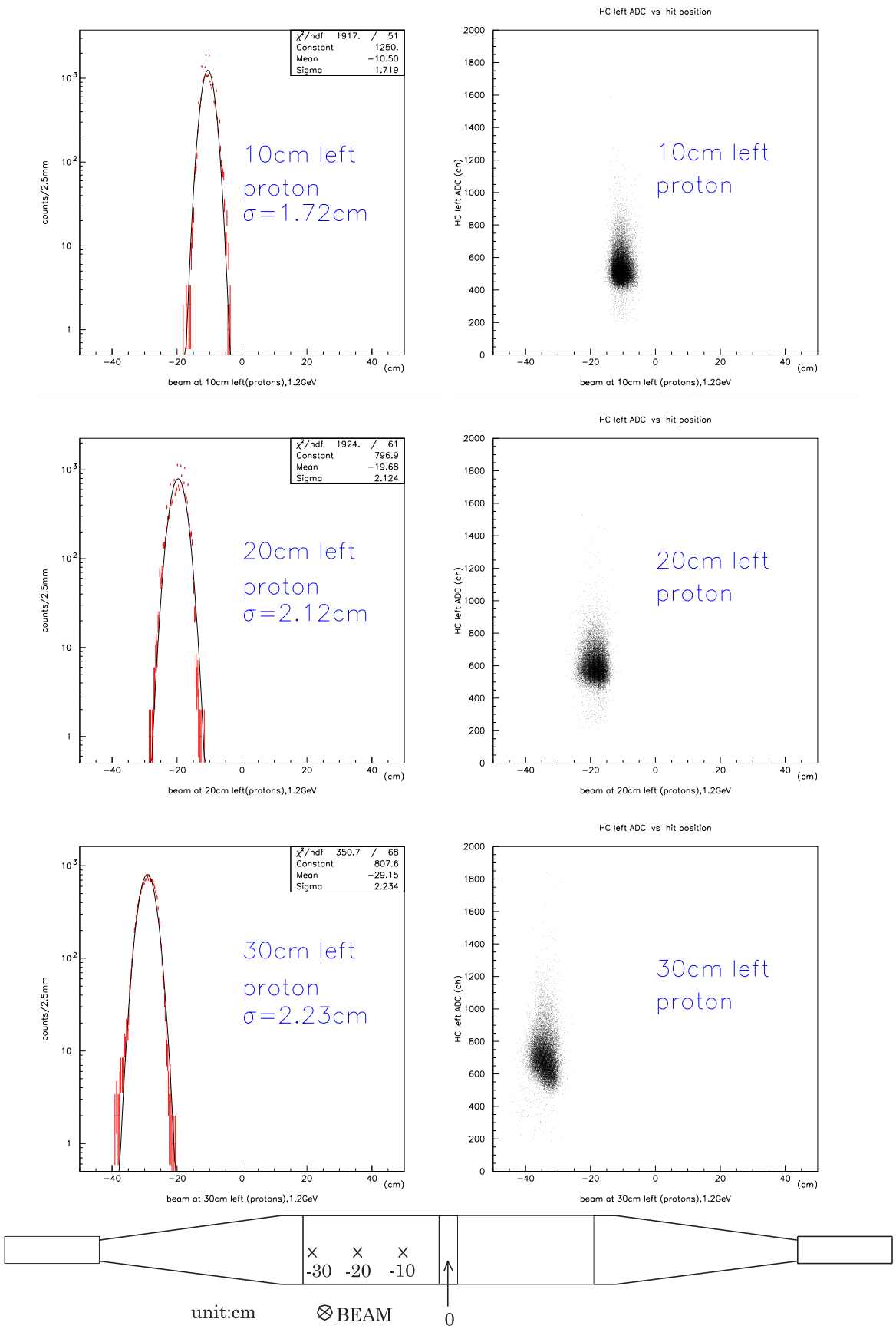

図 12: *proton* の位置分解能 (カウンター左側)

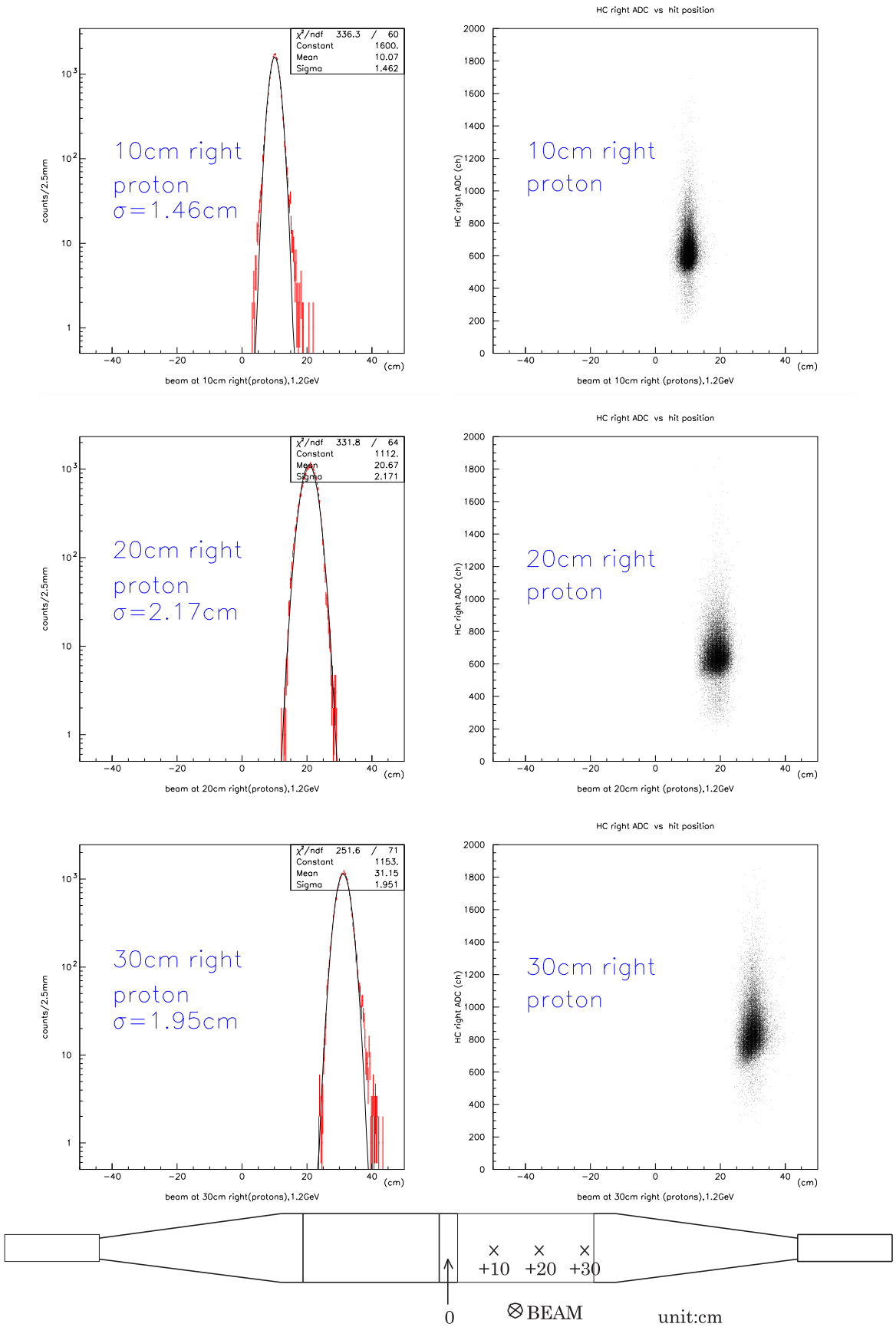

図 13: *proton* の位置分解能 (カウンター右側)

位置分解能の値のビーム入射位置に対する変化をグラフにしてやると図 14 のようになる。(運動量 1.2GeV)

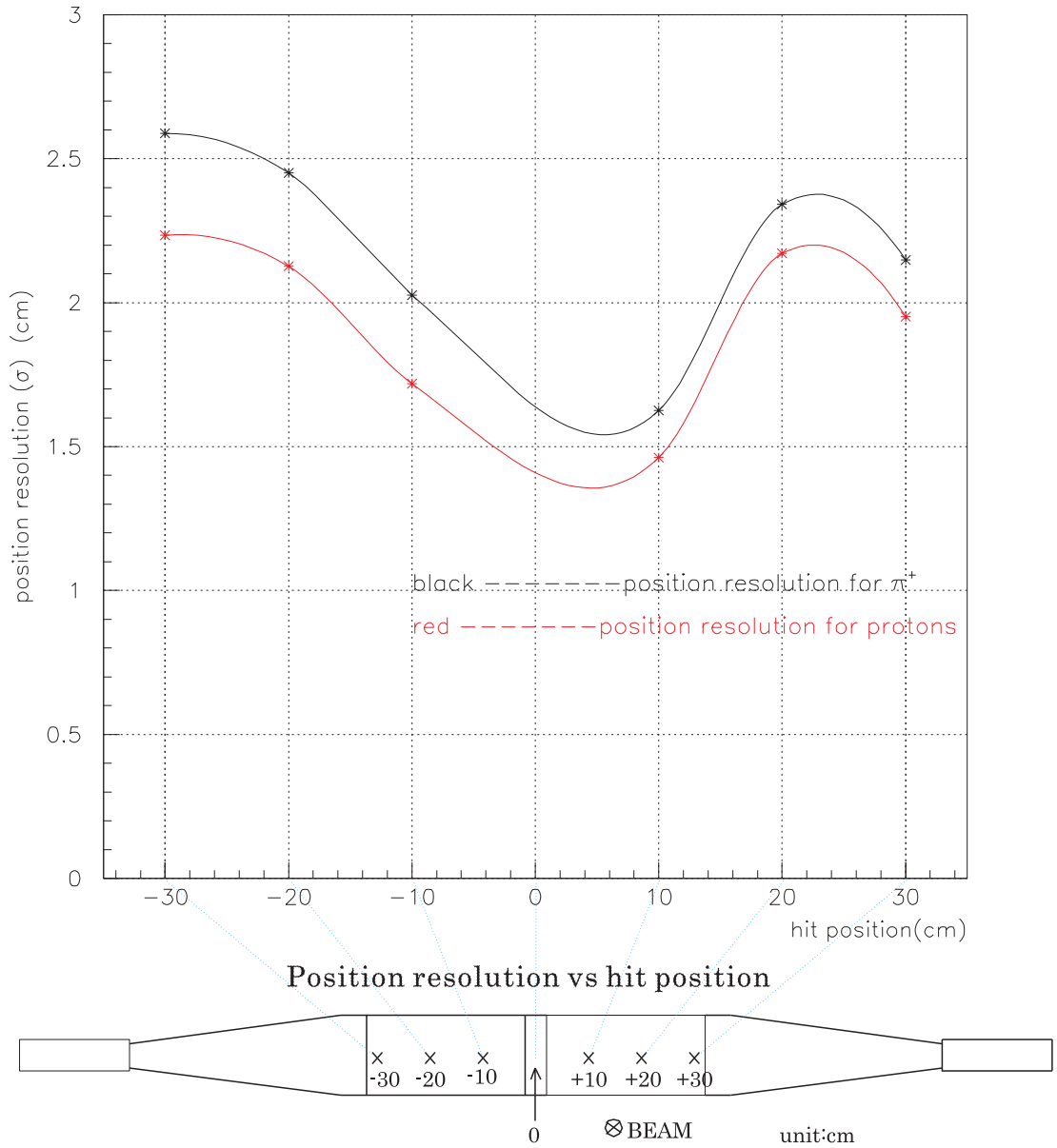

図 14: 位置分解能の beam hit position 依存性

位置分解能はカウンターの端の方よりも中央に近い部分の方が良いという結果が出た。また、カウンター左側よりも右側の方が分解能が良いという非対称性も見て取れる。

5 時間分解能

時間分解能は Hybrid Counter と hodoscope 1 の間の粒子の飛行時間 (TOF) から求めた。まず、左右の PMT の平均をとってシンチレータの時間を定義した。

$$T \equiv \frac{1}{2}(T_R + T_L) \tag{7}$$

すると、各シンチレータ間の TOF は、

$$TOF = T_{HC} - T_{eh1} \tag{8}$$

となる。この TOF に対して分散 (σ)[ps] を求めてやり、時間分解能とする。なお、hodoscope 1 counter と Hybrid Counter の間の距離は 78.4cm である。

ビームをカウンターの色々な位置に当て、時間分解能を求めてやると、図 15 から図 18 のようになる。(運動量 1.2GeV) なお、右側の図は pulse height 補正後の HC の ADC と TOF(eh1-HC) の相関図で、この図を x 軸上に射影すると左側の図が得られる。

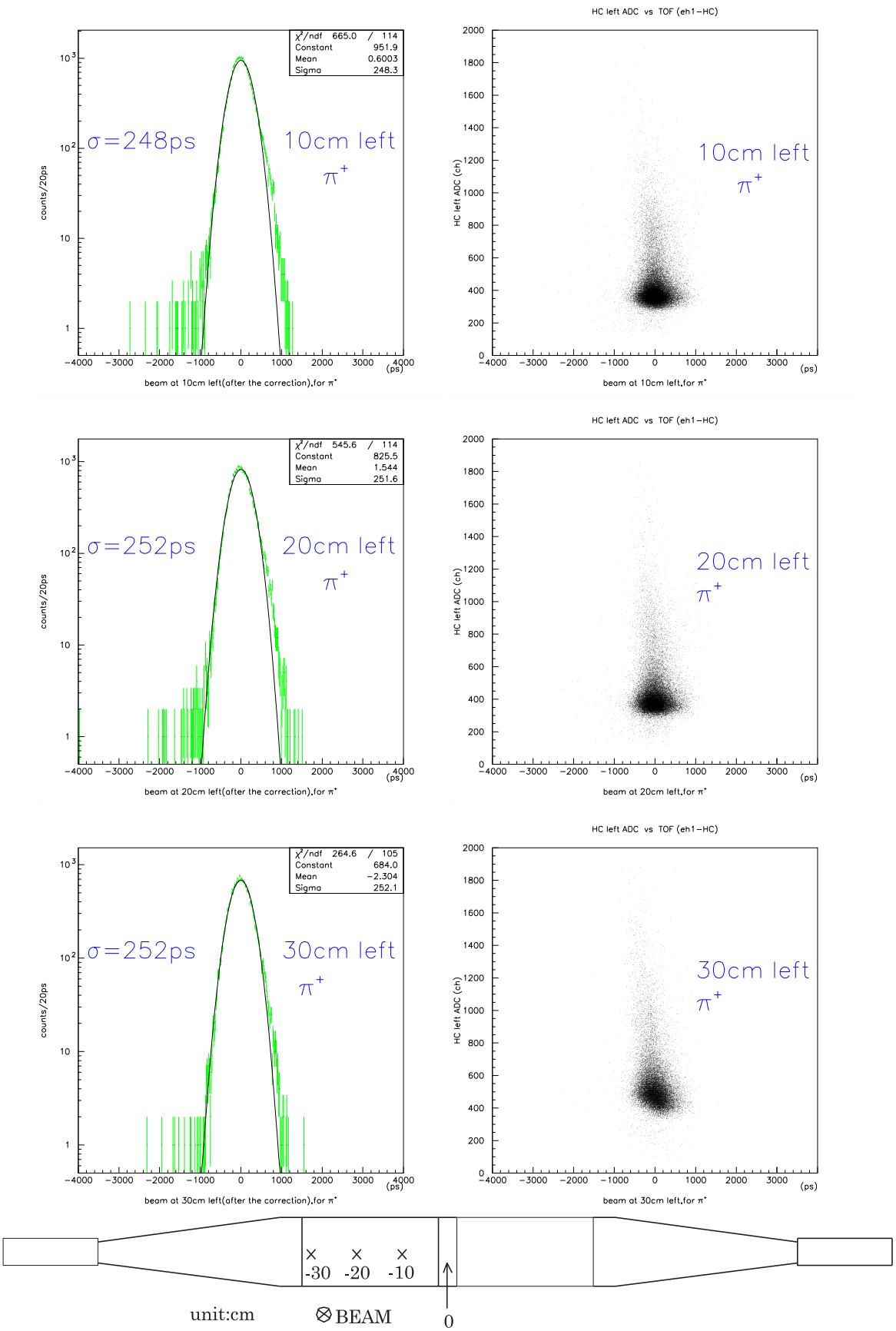

図 15: π^+ の時間分解能 (カウンター左側)

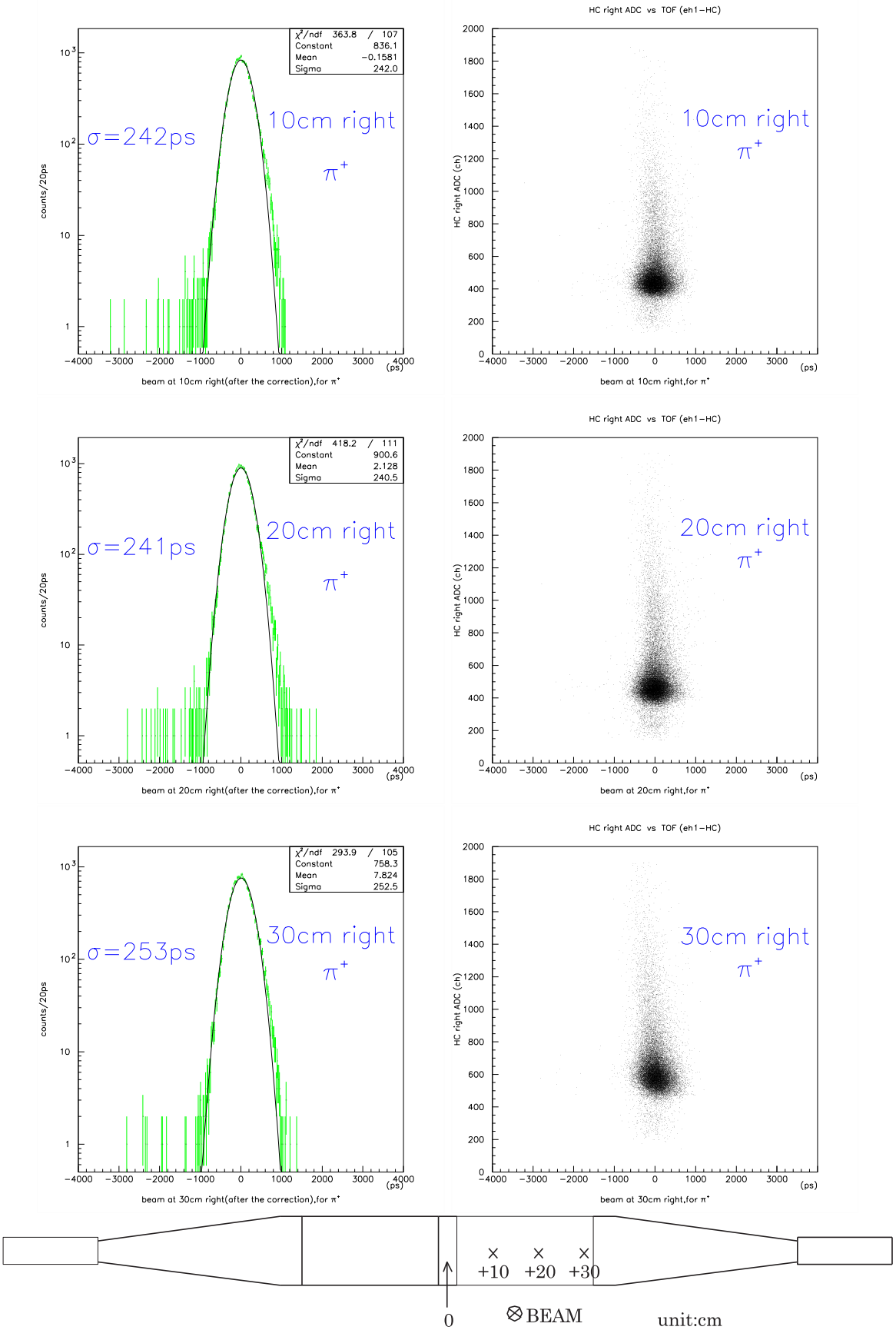

図 16: π^+ の時間分解能 (カウンター右側)

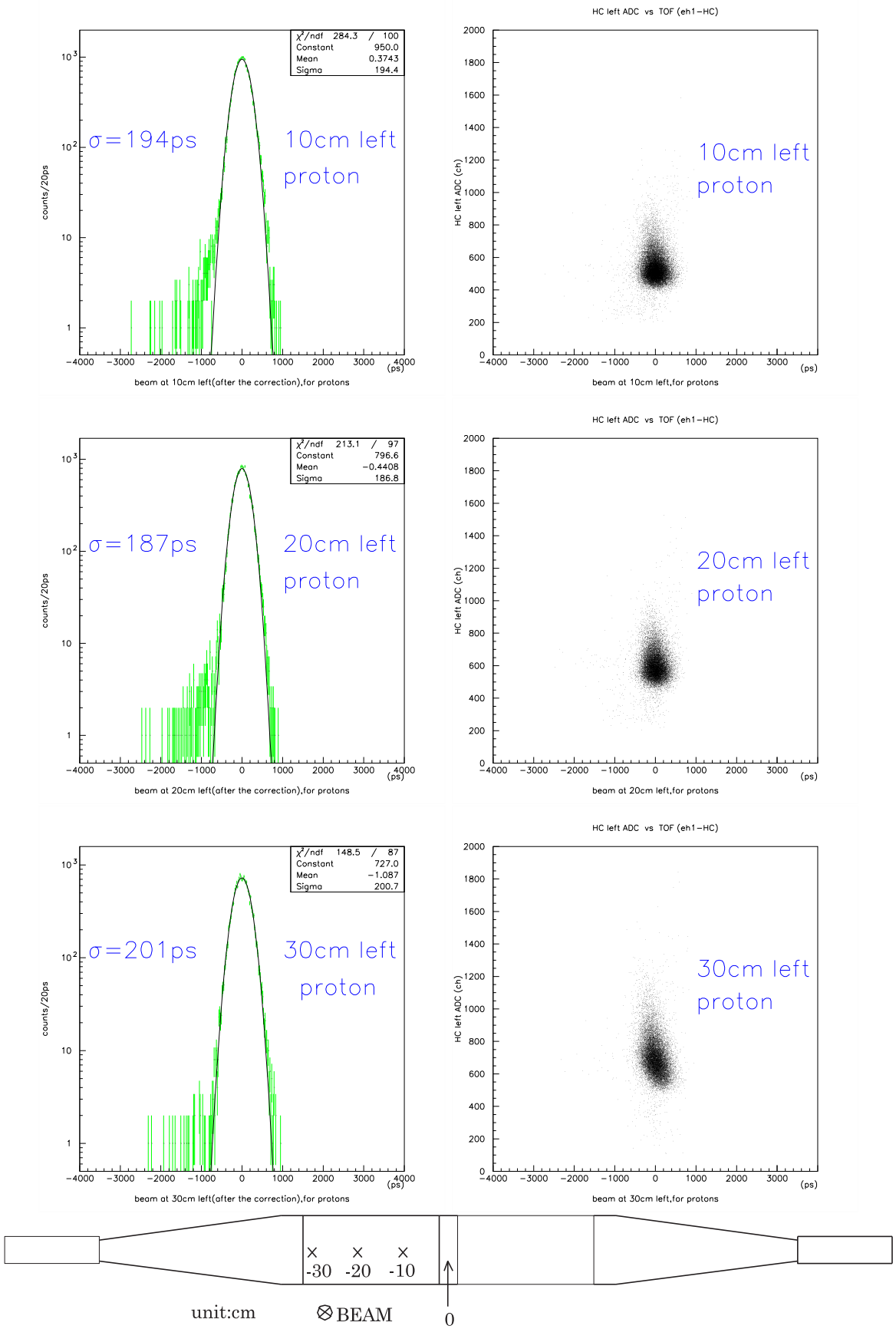

図 17: *proton* の時間分解能 (カウンター左側)

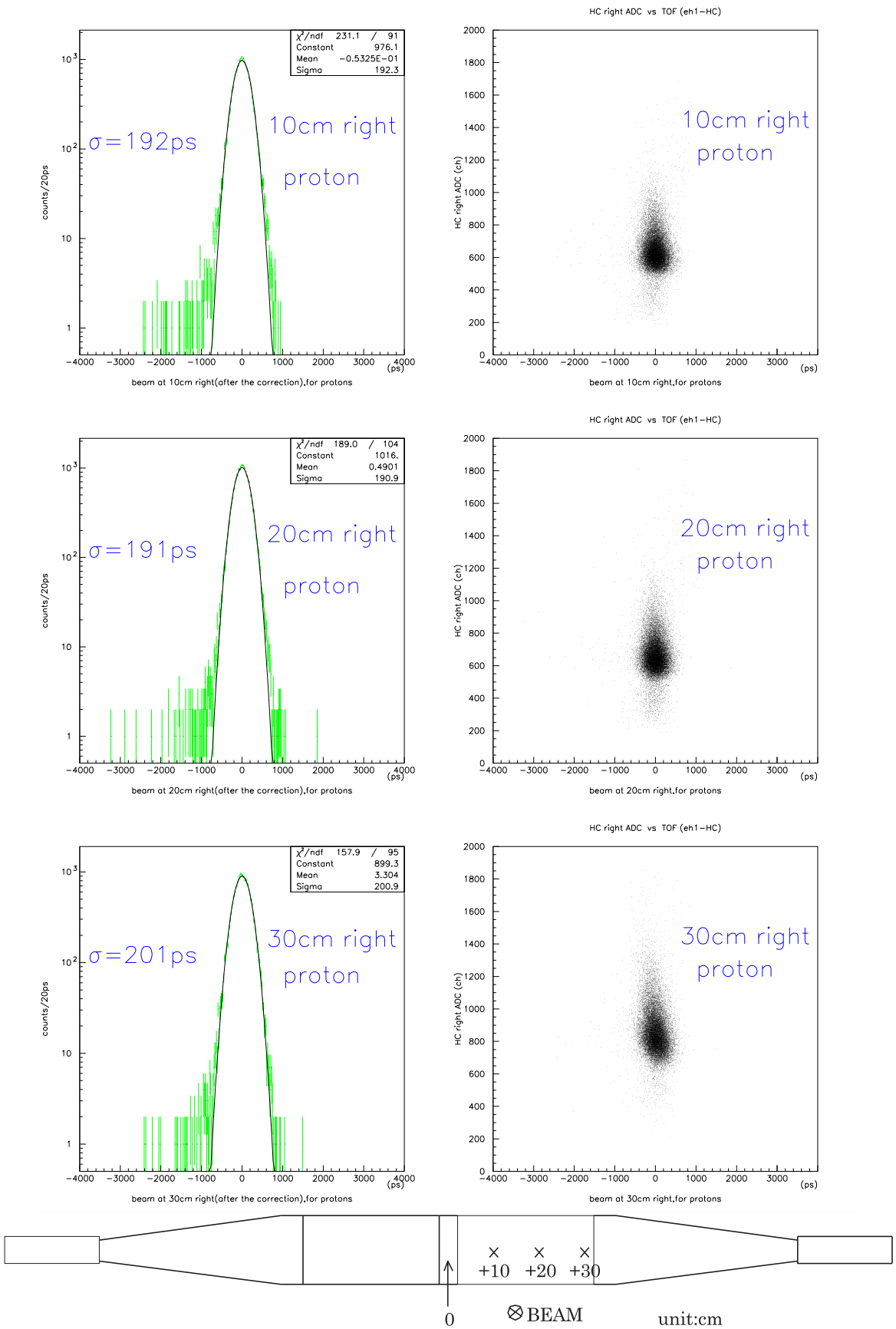

図 18: *proton* の時間分解能 (カウンター右側)

時間分解能の値の beam hit position に対する変化をグラフにしてやると図 19 のようになる。

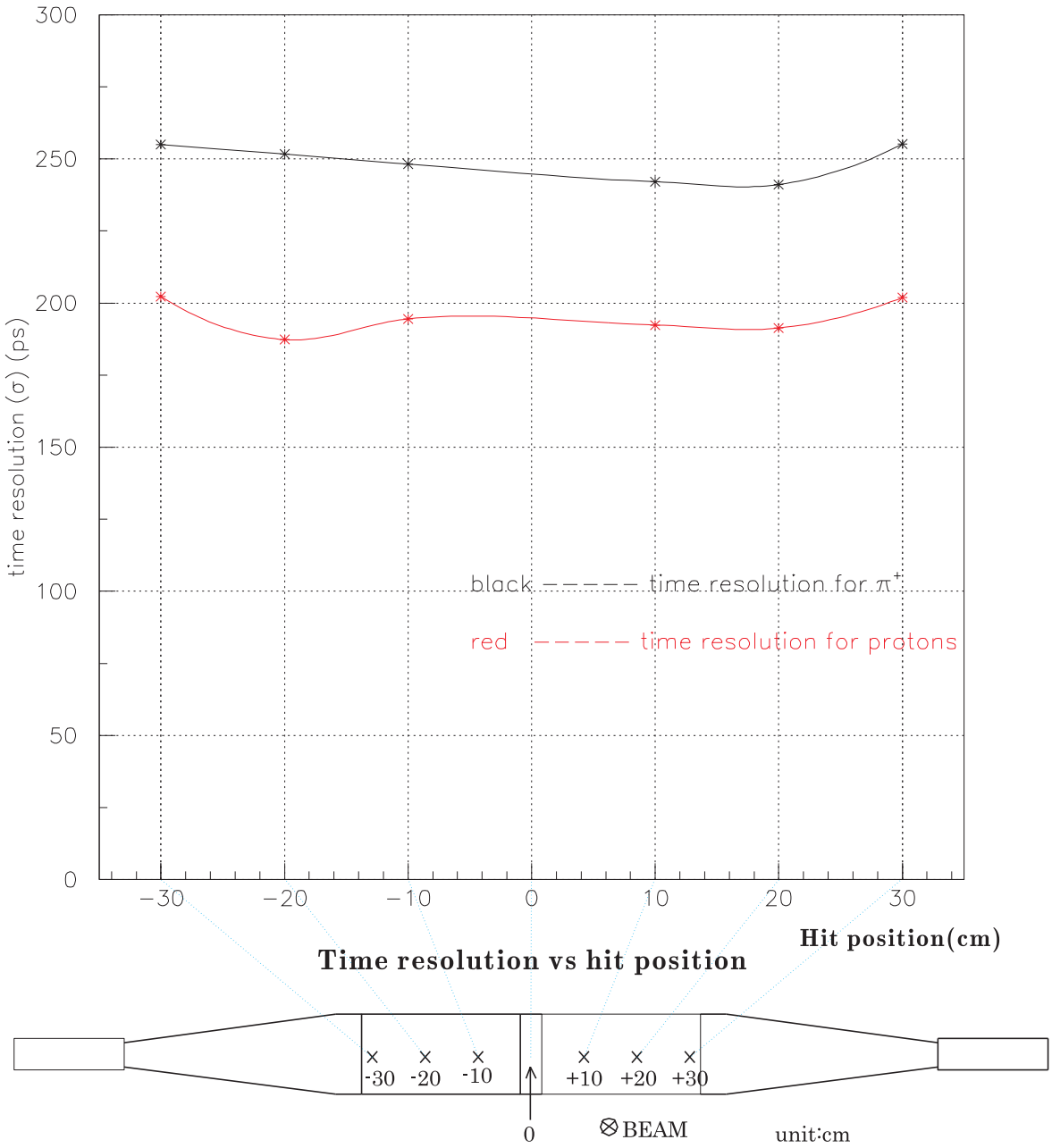

図 19: 時間分解能の beam hit position 依存性

位置分解能とは異なり、時間分解能のほうは、ビームをカウンターのどの部分に当ててもおおよそ同じ値を取るということがわかった。

しかし、図 19 に示された時間分解能の値は真の Hybrid Counter 自身の分解能ではなく、hodoscope 1 counter と Hybrid Counter の分解能の 2 乗和の $\sqrt{\ }$ である。

$$\sigma_{\rm tof}^2 = \sigma_{eh1}^2 + \sigma_{HC}^2 \tag{9}$$

6　veto カウンターとしての性能評価

ビームがカウンター中央部の lucite 部分にあてて実験したときにシンチレーション光を出さないことが、このカウンターが electron veto カウンターとして使えるかを判断する最も重要なポイントとなる。この点を評価するために、次の値を計算する。

$$d = \frac{\text{HC の TDC,ADC がともに存在するような event 数}}{\text{全ての event 数}} \tag{10}$$

ここで式 (10) の event 数は、分子、分母とも図 6 の 4 つの hodoscope counter でカットをかけたあとのものである。図 20 の左側が「全ての event」に対応し、右側が「TDC,ADC がともに存在するような event」に対応する。

ei6graphs.eps

図 20: ビーム入射位置による event 数の違い (P=1.2GeV)

また、面積が event 数なので、図 20 の右側の図の斜線部の面積を左側の斜線部の面積で割算すると式 (10) 中の d という値が得られる。

d の値の、ビームの hit position に対する変化をグラフにしてやると図 21 のようになる。

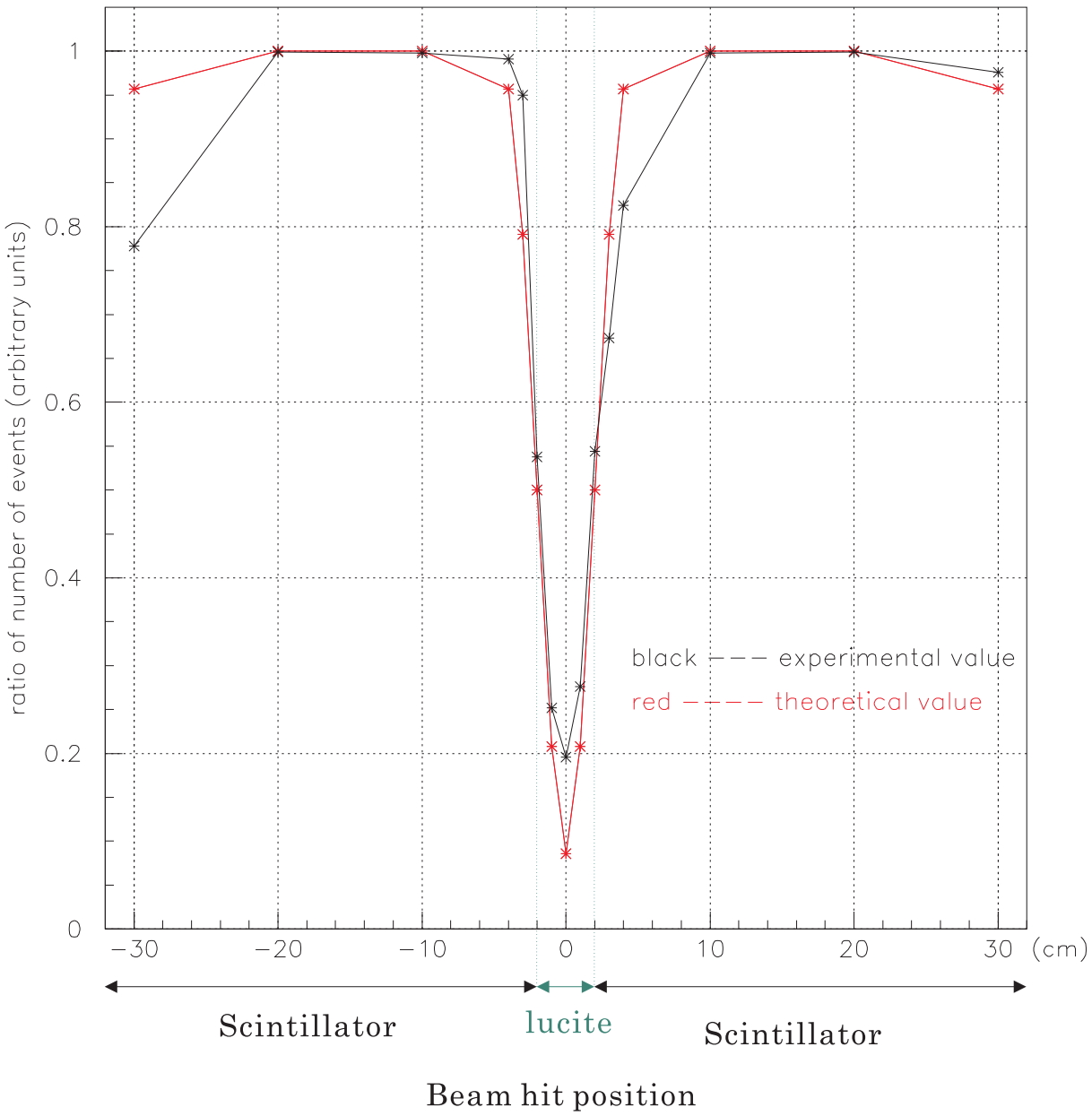

図 21: ビーム入射位置による event 数の比の違い

lucite 部分にビームを当てたときはシンチレーション光イベントの割合が急激に減少していることが分かる

ここで、理論値は次のように計算した。ビームが hodoscope により図 6 の正方形で決定されるとしてこの正方形を Hybrid Counter 上に投影した。そして、図 22 のように、この投影された正方形と scintillator 部分が重なった部分の面積を $S(x)(cm^2)$ とした。$S(x)/16$ という値を理論値としてプロットした。

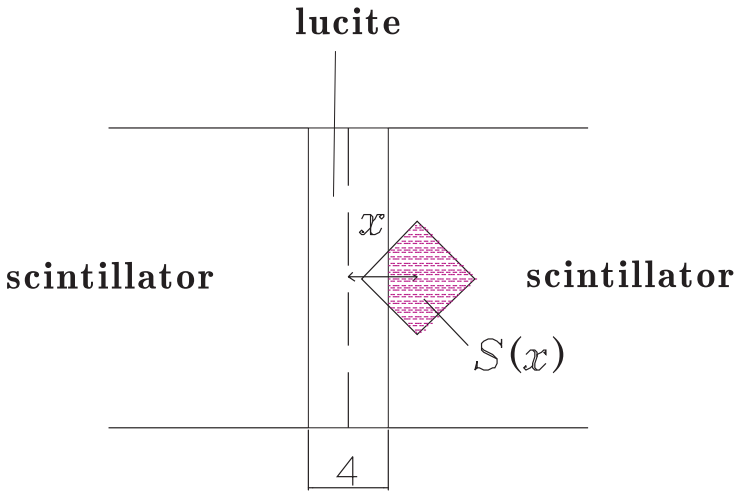

図 22: 理論値の求め方

$$S(x) = \begin{cases} 2x^2 + 1.372 & (|x| < 0.8284) \\ (|x| + 0.8284)^2 & (0.8284 \leq |x| < 2) \\ 16 - (|x| - 4.8284)^2 & (2 \leq |x| < 4.8284) \\ 16 & (4.8284 \leq |x|) \end{cases} \tag{11}$$

また、理論値が $\pm 30\mathrm{cm}$ のところで 1 ではないのは、これらの位置がシンチレータとライトガイドの境界に近いからである。

7　考察

図 21 をみると、lucite 部分に入って来た粒子は高い効率でカットできていることがわかる。また、位置分解能は hit position によって値が多少変わるが、約 2cm と予想した程度である。また、時間分解能も π^+ で 200ps(TOF) 程度で、Hybrid Counter の大きさ等を考えればこの程度であろう。

結論として、この Counter を NKS に導入すれば、electron veto の能力、位置分解能、時間分解能それぞれについて十分な能力を発揮すると思われる。

8 Appendix:TDC の channel 数の位置情報への変換

位置分解能を求めるためにはまず TDC の channel 数を cm という位置を表す単位に変えてやらなければならない。

$$\text{TDC channel} \longrightarrow \text{時間 (ps,ns)} \longrightarrow \text{位置 (cm)} \tag{12}$$

channel 数を時間に直すには TDC calibration を行なえばよい。

ここでは時間を位置に変換する操作について詳述する。私は T1 ビームラインのビームを Hybrid Counter のいろいろな部分に当て、左右の TDC の差とビームの hit position の関係を取ることにより、時間を位置に変換する係数を見積もった。それが図 23 である。この直線の傾きを式 (6) の $\frac{2}{v}$ として、TDC の差 (ns) を位置に変換した。

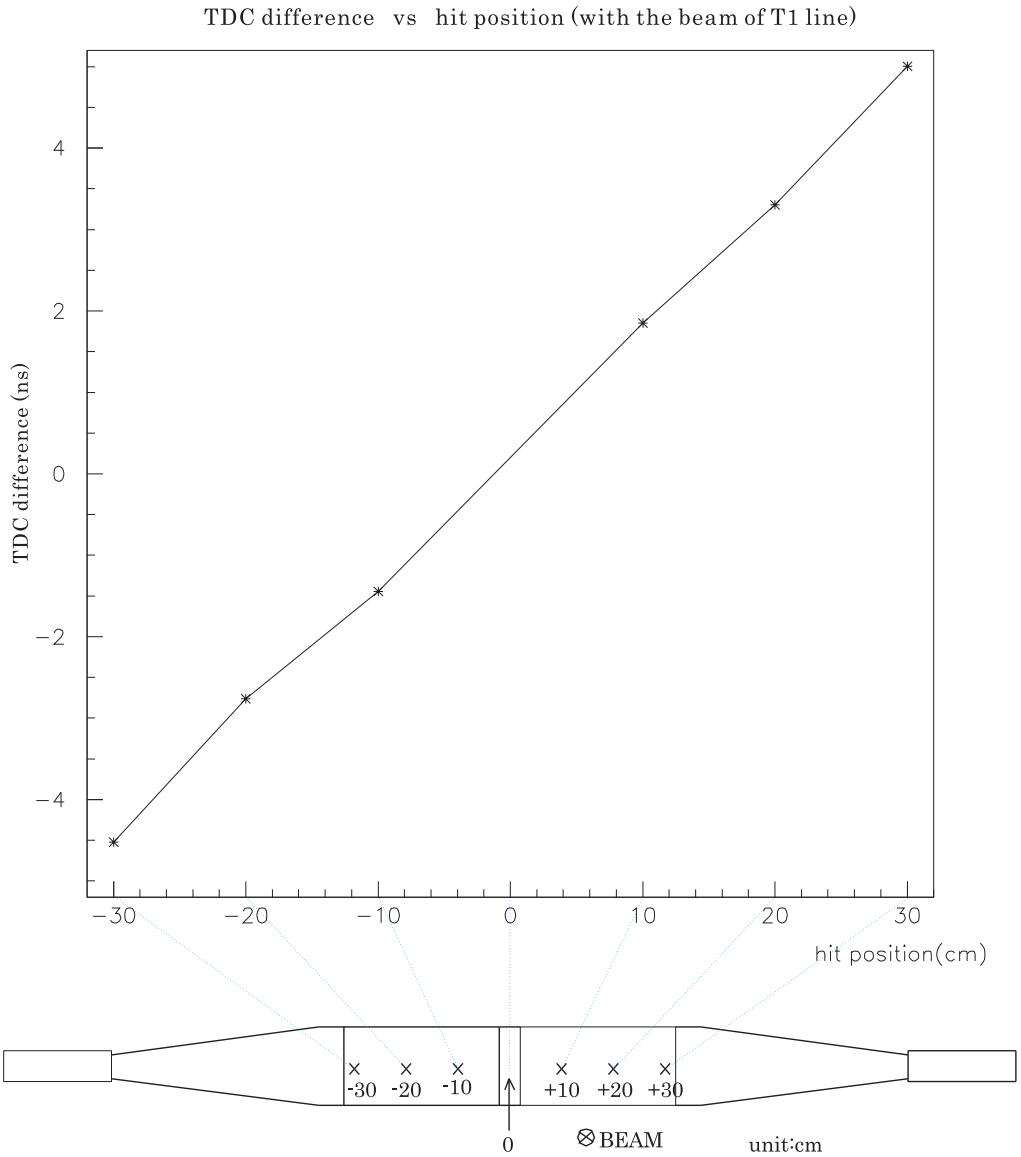

図 23: 時間と位置の関係 (T1 ラインのビーム)

図 23 では、中央の lucite 近傍の点がプロットされていないが、これも一緒にプロットすると図 24 のようになる。

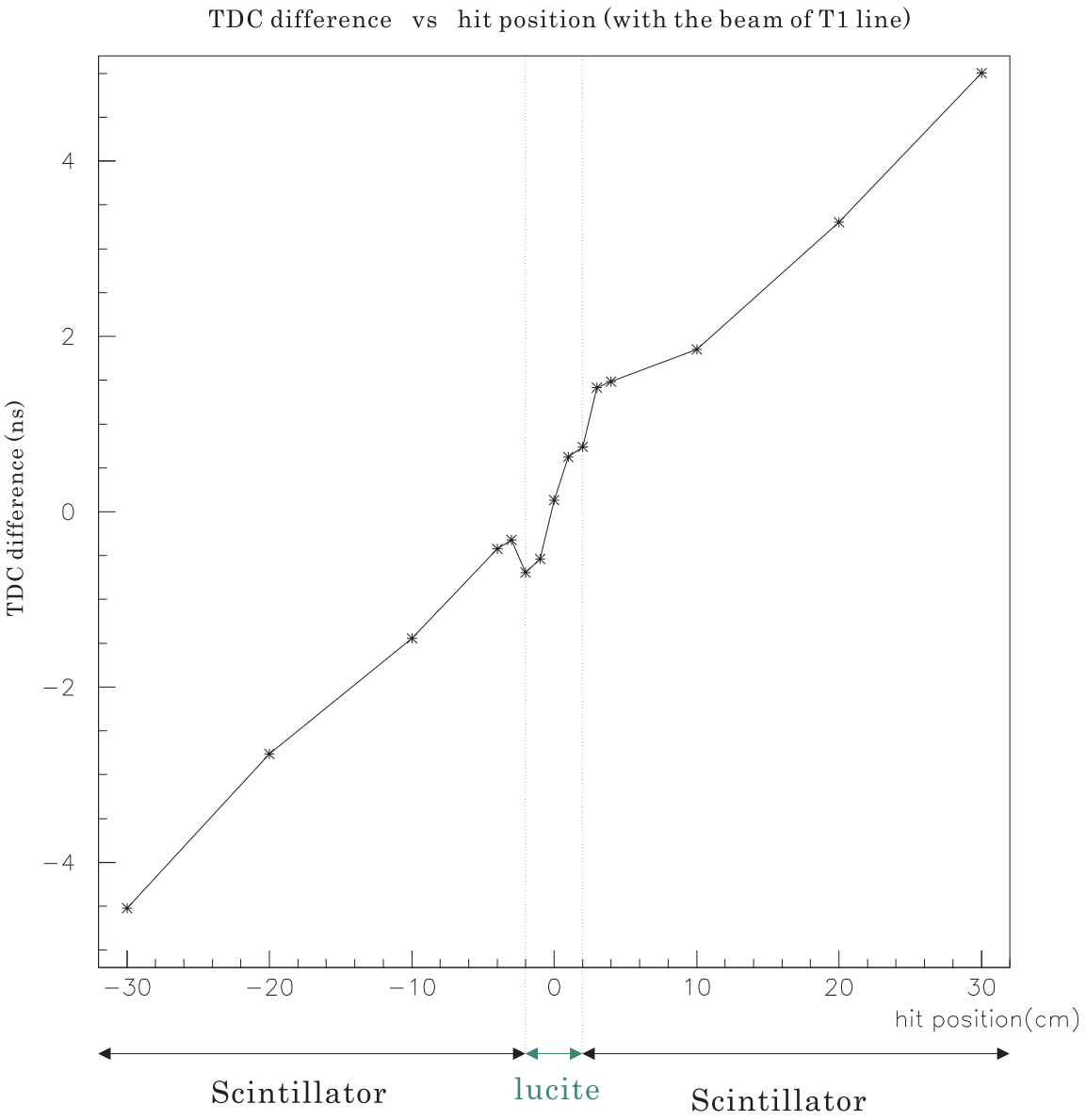

図 24: 時間と位置の関係 (T1 ラインのビーム)

また、collimate された $^{90}\mathrm{Sr}/^{90}\mathrm{Y}$ の β 線源を用いて同じことを行なうと、図 25 のようになった。

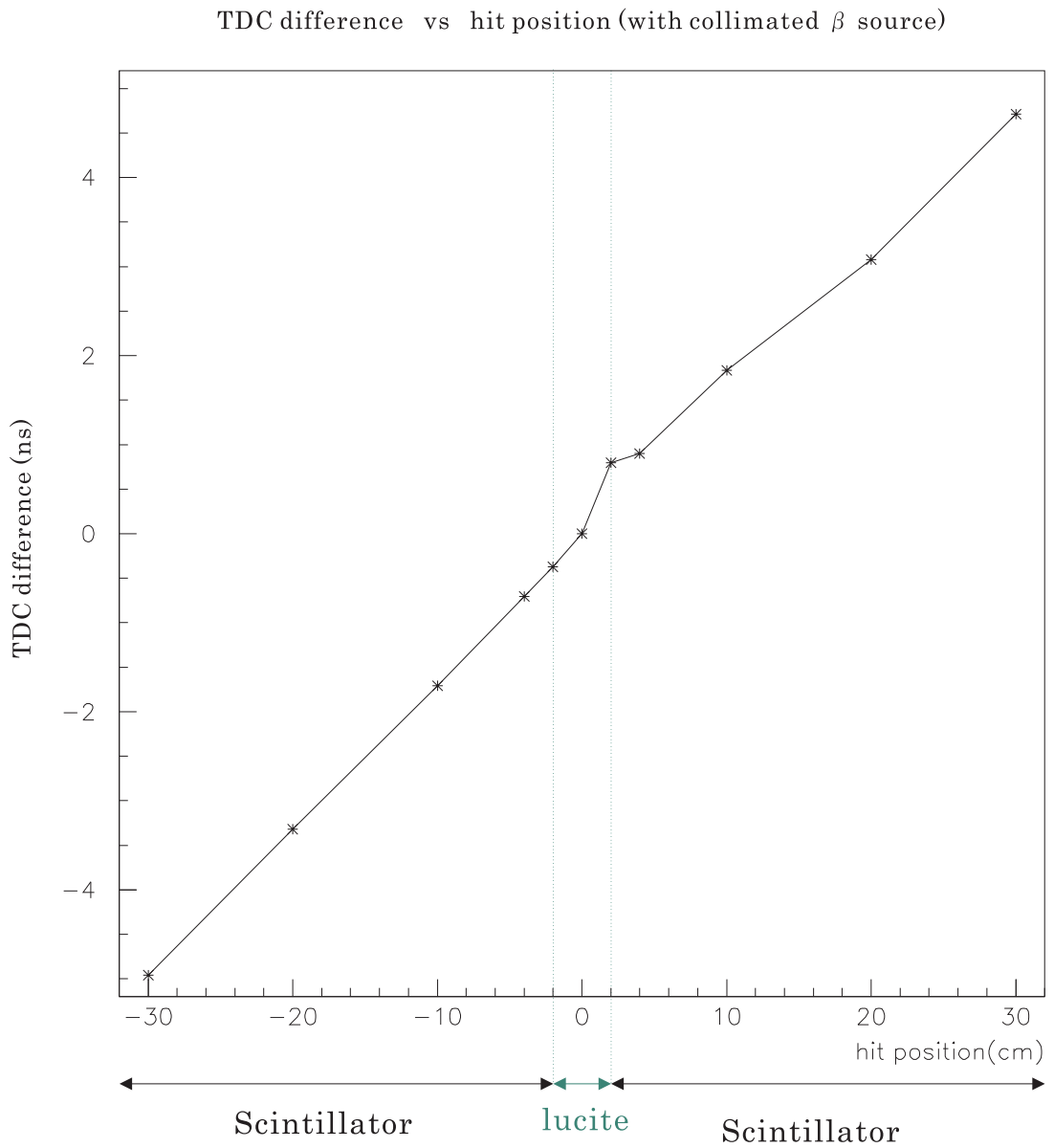

図 25: 時間と位置の関係 (β 線源)

lucite 部分では光の伝搬速度が多少遅くなっているようである。
トリガーは Hybrid Counter の左右の PMT の論理積を使用した。

$$\mathrm{TRIGGER} = \mathrm{HC\ right} \otimes \mathrm{HC\ left} \tag{13}$$

参考文献

[1] W.R.Leo Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments

[2] Glenn F.Knoll 放射線計測ハンドブック (第 2 版)(木村逸郎、阪井英次 訳) 日刊工業新聞社

[3] 塚田暁、東北大学、修士論文 (2001)

[4] 伊藤健司、東北大学、修士論文 (2002)

9 謝辞

今回の論文を書くにあたり、たくさんの方々から御指導、御協力を頂きました。

まず、高橋俊行助手にはたくさんの貴重な助言を頂きました。シンチレーションカウンターの組み立て方や解析の仕方など全ての面でお世話になりました。どうもありがとうございました。

橋本治教授からも事あるごとに多くのご助言を頂いたことに感謝致します。KEK-PS での T530 実験では中村哲助教授と藤井優助手の両氏から貴重なアドバイスを頂きましたことを感謝いたします。

また学部 4 年の諸氏にも多くの御協力を頂いたことに感謝いたします。

Johan Haggblad 氏からも多大な協力を頂きました。Hybrid Counter は、氏の協力無くしては完成を見なかったでしょう。どうもありがとうございました。

川村直子氏にも日頃の生活で様々な点でお世話になりましたことを感謝いたします。