

LHC加速器の鉛鉛衝突におけるALICE実験 PHOS検出器エネルギー較正法

広島大学理学部物理科学科
クォーク物理学研究室

B054249 坂口 拓明

指導教官	杉立 徹	教授
主査	志垣賢太	准教授
副査	大川正典	教授

平成21年2月10日

要旨

2008年9月10日より、欧州合同原子核機構（CERN）が有する大型ハドロン衝突型加速器（LHC）が稼動した。その稼動に伴い展開される実験のうちのひとつに、重イオン衝突に特化したものとして「ALICE」実験がある。現在の宇宙においてクォークは核子内に閉じ込められているが、高エネルギー加速器によって実現される高温・高密度の状態においてはその閉じ込めから開放され、クォーク・グルーオン・プラズマ（QGP）相と呼ばれる未知の相が発現すると考えられている。ALICE実験はそのQGP相の観測を目的としており、QGP相からの熱輻射で発生する熱光子を観測する電磁カロリメータ「PHOS（PHOton Spectrometer）」検出器を備えている。

本研究ではPHOS検出器のエネルギー較正手法の確立を目指した。シミュレーションを用いて鉛鉛衝突を発生させ、生成された物質から放射された粒子を本検出器で観測するまでを再現した。そこから得られる最小電離粒子（MIP）のエネルギー損失および中性パイ中間子の質量スペクトルに着目し、これらを用いた本検出器の検出素子間のエネルギー較正手法について考察する。その結果として、エネルギースペクトルで同定される最小電離損失のエネルギーピークを用いた較正が有効であることを示し、一方で中性パイ中間子の質量スペクトルに現れる質量ピークを用いた較正もまた有効であることを示す。

目次

1	序論	11
1.1	はじめに	11
1.2	単位系について	11
1.3	標準理論について	11
1.3.1	4つの相互作用と標準理論	12
1.3.2	クォークの閉じ込めと量子色力学	13
1.4	物質中の荷電粒子のエネルギー損失について	13
1.4.1	物質を構成する原子中の電子と荷電粒子との非弾性散乱	14
1.4.2	最小電離粒子 (Minimum Ionizing Particle ; MIP)	14
1.4.3	電磁シャワー	15
1.4.4	電磁カロリメータ	16
1.5	パイ中間子について	16
2	研究背景	18
2.1	LHC 加速器	18
2.2	ALICE 実験	18
2.3	PHOS 検出器	20
2.3.1	PHOS モジュール	20
2.3.2	PWO	21
2.3.3	APD	22
2.3.4	データ処理系概要	22
2.3.5	エネルギー情報のデジタル化	22
2.3.6	clustering	23
2.4	本研究における較正、較正係数について	23
3	シミュレーション	24
3.1	本研究におけるイベントジェネレータ	24
3.2	本研究におけるシミュレーションのパラメータ	24
3.2.1	核種	24
3.2.2	衝突径数	25
3.2.3	衝突事象数	25
3.2.4	較正係数	25
3.3	本研究におけるシミュレーションの概要	26
4	結果	27
4.1	解析に有効なクラスターのエネルギー分布について	27
4.2	解析に有効な中性パイ中間子の質量分布について	27
4.3	較正係数が 1.0MeV/ch である場合のシミュレーション結果	28

4.3.1	クラスターのエネルギー分布	28
4.3.2	中性パイ中間子の質量分布	29
4.4	較正係数が 1.0MeV/ch でない場合のシミュレーション結果	31
4.4.1	クラスターのエネルギー分布 (較正係数が 0.8MeV/ch である場合)	31
4.4.2	クラスターのエネルギー分布 (較正係数が 0.9MeV/ch である場合)	32
4.4.3	クラスターのエネルギー分布 (較正係数が 1.1MeV/ch である場合)	34
4.4.4	クラスターのエネルギー分布 (較正係数が 1.2MeV/ch である場合)	35
4.4.5	中性パイ中間子の質量分布 (較正係数が 0.8MeV/ch である場合)	37
4.4.6	中性パイ中間子の質量分布 (較正係数が 0.9MeV/ch である場合)	39
4.4.7	中性パイ中間子の質量分布 (較正係数が 1.1MeV/ch である場合)	41
4.4.8	中性パイ中間子の質量分布 (較正係数が 1.2MeV/ch である場合)	43
5	解析	45
5.1	解析手法	45
5.1.1	クラスターのエネルギー分布の解析手法	45
5.1.2	中性パイ中間子の質量分布の解析手法	45
5.1.3	系統誤差について	46
5.2	最小電離粒子の損失エネルギー解析結果	47
5.2.1	解析スペクトル	47
5.2.2	数値解析	78
5.2.3	最小電離損失ピーク値と較正係数との関係性	82
5.3	中性パイ中間子の質量解析結果	85
5.3.1	解析スペクトル	85
5.3.2	数値解析	96
5.3.3	中性パイ中間子質量ピーク値と較正係数との関係性	99
6	考察と結論	100

表 目 次

1	4つの相互作用	12
2	クォークとレプトンの世代	12
3	4つの相互作用とゲージボソン	13
4	主な物質の放射長と臨界エネルギー	16
5	中性パイ中間子 (π^0) の性質	17
6	代表的な無機シンチレータの比重、放射長、モリエール半径	21
7	代表的な無機シンチレータの発光量	22
8	本研究で用いた HIJING シミュレーションの概要	26
9	最小電離粒子の損失エネルギー (較正係数 = 0.8MeV/ch)	78
10	最小電離粒子の損失エネルギー (較正係数 = 0.9MeV/ch)	79
11	最小電離粒子の損失エネルギー (較正係数 = 1.0MeV/ch)	79
12	最小電離粒子の損失エネルギー (較正係数 = 1.1MeV/ch)	80
13	最小電離粒子の損失エネルギー (較正係数 = 1.2MeV/ch)	81
14	中性パイ中間子の質量 (較正係数 = 0.8MeV/ch)	96
15	中性パイ中間子の質量 (較正係数 = 0.9MeV/ch)	96
16	中性パイ中間子の質量 (較正係数 = 1.0MeV/ch)	97
17	中性パイ中間子の質量 (較正係数 = 1.1MeV/ch)	97
18	中性パイ中間子の質量 (較正係数 = 1.2MeV/ch)	98

目次

1	最小電離損失	15
2	LHC 加速器・航空写真	18
3	LHC 加速器で行われる実験	19
4	ALICE 実験装置・概略図	20
5	PHOS モジュール (5 機)	21
6	PWO 結晶	21
7	クラスターのエネルギー分布 (較正係数 = 1.0MeV/ch, 衝突径数 = 0fm)	28
8	クラスターのエネルギー分布 (較正係数 = 1.0MeV/ch, 衝突径数 = 8fm)	28
9	クラスターのエネルギー分布 (較正係数 = 1.0MeV/ch, 衝突径数 = 16fm)	29
10	中性パイ中間子の質量分布 (較正係数 = 1.0MeV/ch, 衝突径数 = 0fm)	29
11	中性パイ中間子の質量分布 (較正係数 = 1.0MeV/ch, 衝突径数 = 8fm)	30
12	中性パイ中間子の質量分布 (較正係数 = 1.0MeV/ch, 衝突径数 = 16fm)	30
13	クラスターのエネルギー分布 (較正係数 = 0.8MeV/ch, 衝突径数 = 0fm)	31
14	クラスターのエネルギー分布 (較正係数 = 0.8MeV/ch, 衝突径数 = 8fm)	31
15	クラスターのエネルギー分布 (較正係数 = 0.8MeV/ch, 衝突径数 = 16fm)	32
16	クラスターのエネルギー分布 (較正係数 = 0.9MeV/ch, 衝突径数 = 0fm)	32
17	クラスターのエネルギー分布 (較正係数 = 0.9MeV/ch, 衝突径数 = 8fm)	33
18	クラスターのエネルギー分布 (較正係数 = 0.9MeV/ch, 衝突径数 = 16fm)	33
19	クラスターのエネルギー分布 (較正係数 = 1.1MeV/ch, 衝突径数 = 0fm)	34
20	クラスターのエネルギー分布 (較正係数 = 1.1MeV/ch, 衝突径数 = 8fm)	34
21	クラスターのエネルギー分布 (較正係数 = 1.1MeV/ch, 衝突径数 = 16fm)	35
22	クラスターのエネルギー分布 (較正係数 = 1.2MeV/ch, 衝突径数 = 0fm)	35

23	クラスタのエネルギー分布 (較正係数 = 1.2MeV/ch, 衝突径数 = 8fm)	36
24	クラスタのエネルギー分布 (較正係数 = 1.2MeV/ch, 衝突径数 = 16fm)	36
25	中性パイ中間子の質量分布 (較正係数 = 0.8MeV/ch, 衝突径数 = 0fm)	37
26	中性パイ中間子の質量分布 (較正係数 = 0.8MeV/ch, 衝突径数 = 8fm)	37
27	中性パイ中間子の質量分布 (較正係数 = 0.8MeV/ch, 衝突径数 = 16fm)	38
28	中性パイ中間子の質量分布 (較正係数 = 0.9MeV/ch, 衝突径数 = 0fm)	39
29	中性パイ中間子の質量分布 (較正係数 = 0.9MeV/ch, 衝突径数 = 8fm)	39
30	中性パイ中間子の質量分布 (較正係数 = 0.9MeV/ch, 衝突径数 = 16fm)	40
31	中性パイ中間子の質量分布 (較正係数 = 1.1MeV/ch, 衝突径数 = 0fm)	41
32	中性パイ中間子の質量分布 (較正係数 = 1.1MeV/ch, 衝突径数 = 8fm)	41
33	中性パイ中間子の質量分布 (較正係数 = 1.1MeV/ch, 衝突径数 = 16fm)	42
34	中性パイ中間子の質量分布 (較正係数 = 1.2MeV/ch, 衝突径数 = 0fm)	43
35	中性パイ中間子の質量分布 (較正係数 = 1.2MeV/ch, 衝突径数 = 8fm)	43
36	中性パイ中間子の質量分布 (較正係数 = 1.2MeV/ch, 衝突径数 = 16fm)	44
37	最小電離損失ピーク (較正係数 = 0.8MeV/ch, 衝突径数 = 0fm, 背景粒子 = 指数関数)	48
38	最小電離損失ピーク (較正係数 = 0.8MeV/ch, 衝突径数 = 0fm, 背景粒子 = 2次関数)	48
39	最小電離損失ピーク (較正係数 = 0.8MeV/ch, 衝突径数 = 0fm, 背景粒子 = 3次関数)	49
40	最小電離損失ピーク (較正係数 = 0.8MeV/ch, 衝突径数 = 0fm, 背景粒子 = 4次関数)	49
41	最小電離損失ピーク (較正係数 = 0.8MeV/ch, 衝突径数 = 8fm, 背景粒子 = 指数関数)	50
42	最小電離損失ピーク (較正係数 = 0.8MeV/ch, 衝突径数 = 8fm, 背景粒子 = 2次関数)	50
43	最小電離損失ピーク (較正係数 = 0.8MeV/ch, 衝突径数 = 8fm, 背景粒子 = 3次関数)	51
44	最小電離損失ピーク (較正係数 = 0.8MeV/ch, 衝突径数 = 8fm, 背景粒子 = 4次関数)	51
45	最小電離損失ピーク (較正係数 = 0.8MeV/ch, 衝突径数 = 16fm, 背景粒子 = 指数関数)	52

46	最小電離損失ピーク (較正係数 = 0.8MeV/ch, 衝突径数 = 16fm, 背景粒子 = 2次関数)	52
47	最小電離損失ピーク (較正係数 = 0.8MeV/ch, 衝突径数 = 16fm, 背景粒子 = 3次関数)	53
48	最小電離損失ピーク (較正係数 = 0.8MeV/ch, 衝突径数 = 16fm, 背景粒子 = 4次関数)	53
49	最小電離損失ピーク (較正係数 = 0.9MeV/ch, 衝突径数 = 0fm, 背景粒子 = 指数関数)	54
50	最小電離損失ピーク (較正係数 = 0.9MeV/ch, 衝突径数 = 0fm, 背景粒子 = 2次関数)	54
51	最小電離損失ピーク (較正係数 = 0.9MeV/ch, 衝突径数 = 0fm, 背景粒子 = 3次関数)	55
52	最小電離損失ピーク (較正係数 = 0.9MeV/ch, 衝突径数 = 0fm, 背景粒子 = 4次関数)	55
53	最小電離損失ピーク (較正係数 = 0.9MeV/ch, 衝突径数 = 8fm, 背景粒子 = 指数関数)	56
54	最小電離損失ピーク (較正係数 = 0.9MeV/ch, 衝突径数 = 8fm, 背景粒子 = 2次関数)	56
55	最小電離損失ピーク (較正係数 = 0.9MeV/ch, 衝突径数 = 8fm, 背景粒子 = 3次関数)	57
56	最小電離損失ピーク (較正係数 = 0.9MeV/ch, 衝突径数 = 8fm, 背景粒子 = 4次関数)	57
57	最小電離損失ピーク (較正係数 = 0.9MeV/ch, 衝突径数 = 16fm, 背景粒子 = 指数関数)	58
58	最小電離損失ピーク (較正係数 = 0.9MeV/ch, 衝突径数 = 16fm, 背景粒子 = 2次関数)	58
59	最小電離損失ピーク (較正係数 = 0.9MeV/ch, 衝突径数 = 16fm, 背景粒子 = 3次関数)	59
60	最小電離損失ピーク (較正係数 = 0.9MeV/ch, 衝突径数 = 16fm, 背景粒子 = 4次関数)	59
61	最小電離損失ピーク (較正係数 = 1.0MeV/ch, 衝突径数 = 0fm, 背景粒子 = 指数関数)	60
62	最小電離損失ピーク (較正係数 = 1.0MeV/ch, 衝突径数 = 0fm, 背景粒子 = 2次関数)	60
63	最小電離損失ピーク (較正係数 = 1.0MeV/ch, 衝突径数 = 0fm, 背景粒子 = 3次関数)	61
64	最小電離損失ピーク (較正係数 = 1.0MeV/ch, 衝突径数 = 0fm, 背景粒子 = 4次関数)	61

65	最小電離損失ピーク (較正係数 = 1.0MeV/ch, 衝突径数 = 8fm, 背景粒子 = 指数関数)	62
66	最小電離損失ピーク (較正係数 = 1.0MeV/ch, 衝突径数 = 8fm, 背景粒子 = 2次関数)	62
67	最小電離損失ピーク (較正係数 = 1.0MeV/ch, 衝突径数 = 8fm, 背景粒子 = 3次関数)	63
68	最小電離損失ピーク (較正係数 = 1.0MeV/ch, 衝突径数 = 8fm, 背景粒子 = 4次関数)	63
69	最小電離損失ピーク (較正係数 = 1.0MeV/ch, 衝突径数 = 16fm, 背景粒子 = 指数関数)	64
70	最小電離損失ピーク (較正係数 = 1.0MeV/ch, 衝突径数 = 16fm, 背景粒子 = 2次関数)	64
71	最小電離損失ピーク (較正係数 = 1.0MeV/ch, 衝突径数 = 16fm, 背景粒子 = 3次関数)	65
72	最小電離損失ピーク (較正係数 = 1.0MeV/ch, 衝突径数 = 16fm, 背景粒子 = 4次関数)	65
73	最小電離損失ピーク (較正係数 = 1.1MeV/ch, 衝突径数 = 0fm, 背景粒子 = 指数関数)	66
74	最小電離損失ピーク (較正係数 = 1.1MeV/ch, 衝突径数 = 0fm, 背景粒子 = 2次関数)	66
75	最小電離損失ピーク (較正係数 = 1.1MeV/ch, 衝突径数 = 0fm, 背景粒子 = 3次関数)	67
76	最小電離損失ピーク (較正係数 = 1.1MeV/ch, 衝突径数 = 0fm, 背景粒子 = 4次関数)	67
77	最小電離損失ピーク (較正係数 = 1.1MeV/ch, 衝突径数 = 8fm, 背景粒子 = 指数関数)	68
78	最小電離損失ピーク (較正係数 = 1.1MeV/ch, 衝突径数 = 8fm, 背景粒子 = 2次関数)	68
79	最小電離損失ピーク (較正係数 = 1.1MeV/ch, 衝突径数 = 8fm, 背景粒子 = 3次関数)	69
80	最小電離損失ピーク (較正係数 = 1.1MeV/ch, 衝突径数 = 8fm, 背景粒子 = 4次関数)	69
81	最小電離損失ピーク (較正係数 = 1.1MeV/ch, 衝突径数 = 16fm, 背景粒子 = 指数関数)	70
82	最小電離損失ピーク (較正係数 = 1.1MeV/ch, 衝突径数 = 16fm, 背景粒子 = 2次関数)	70
83	最小電離損失ピーク (較正係数 = 1.1MeV/ch, 衝突径数 = 16fm, 背景粒子 = 3次関数)	71

84	最小電離損失ピーク (較正係数 = 1.1MeV/ch, 衝突径数 = 16fm, 背景粒子 = 4 次関数)	71
85	最小電離損失ピーク (較正係数 = 1.2MeV/ch, 衝突径数 = 0fm, 背景粒子 = 指数関数)	72
86	最小電離損失ピーク (較正係数 = 1.2MeV/ch, 衝突径数 = 0fm, 背景粒子 = 2 次関数)	72
87	最小電離損失ピーク (較正係数 = 1.2MeV/ch, 衝突径数 = 0fm, 背景粒子 = 3 次関数)	73
88	最小電離損失ピーク (較正係数 = 1.2MeV/ch, 衝突径数 = 0fm, 背景粒子 = 4 次関数)	73
89	最小電離損失ピーク (較正係数 = 1.2MeV/ch, 衝突径数 = 8fm, 背景粒子 = 指数関数)	74
90	最小電離損失ピーク (較正係数 = 1.2MeV/ch, 衝突径数 = 8fm, 背景粒子 = 2 次関数)	74
91	最小電離損失ピーク (較正係数 = 1.2MeV/ch, 衝突径数 = 8fm, 背景粒子 = 3 次関数)	75
92	最小電離損失ピーク (較正係数 = 1.2MeV/ch, 衝突径数 = 8fm, 背景粒子 = 4 次関数)	75
93	最小電離損失ピーク (較正係数 = 1.2MeV/ch, 衝突径数 = 16fm, 背景粒子 = 指数関数)	76
94	最小電離損失ピーク (較正係数 = 1.2MeV/ch, 衝突径数 = 16fm, 背景粒子 = 2 次関数)	76
95	最小電離損失ピーク (較正係数 = 1.2MeV/ch, 衝突径数 = 16fm, 背景粒子 = 3 次関数)	77
96	最小電離損失ピーク (較正係数 = 1.2MeV/ch, 衝突径数 = 16fm, 背景粒子 = 4 次関数)	77
97	最小電離粒子のエネルギー損失と較正係数との関係 (衝突径数 = 0 fm)	82
98	最小電離粒子のエネルギー損失と較正係数との関係 (衝突径数 = 8 fm)	83
99	最小電離粒子のエネルギー損失と較正係数との関係 (衝突径数 = 16 fm)	84
100	中性パイ中間子質量ピーク (較正係数 = 0.8MeV/ch, 衝突径数 = 16fm, 背景粒子 = 指数関数)	86
101	中性パイ中間子質量ピーク (較正係数 = 0.8MeV/ch, 衝突径数 = 16fm, 背景粒子 = 2 次関数)	86
102	中性パイ中間子質量ピーク (較正係数 = 0.8MeV/ch, 衝突径数 = 16fm, 背景粒子 = 3 次関数)	87

103	中性パイ中間子質量ピーク (較正係数 = 0.8MeV/ch, 衝突径数 = 16fm, 背景粒子 = 4次関数)	87
104	中性パイ中間子質量ピーク (較正係数 = 0.9MeV/ch, 衝突径数 = 16fm, 背景粒子 = 指数関数)	88
105	中性パイ中間子質量ピーク (較正係数 = 0.9MeV/ch, 衝突径数 = 16fm, 背景粒子 = 2次関数)	88
106	中性パイ中間子質量ピーク (較正係数 = 0.9MeV/ch, 衝突径数 = 16fm, 背景粒子 = 3次関数)	89
107	中性パイ中間子質量ピーク (較正係数 = 0.9MeV/ch, 衝突径数 = 16fm, 背景粒子 = 4次関数)	89
108	中性パイ中間子質量ピーク (較正係数 = 1.0MeV/ch, 衝突径数 = 16fm, 背景粒子 = 指数関数)	90
109	中性パイ中間子質量ピーク (較正係数 = 1.0MeV/ch, 衝突径数 = 16fm, 背景粒子 = 2次関数)	90
110	中性パイ中間子質量ピーク (較正係数 = 1.0MeV/ch, 衝突径数 = 16fm, 背景粒子 = 3次関数)	91
111	中性パイ中間子質量ピーク (較正係数 = 1.0MeV/ch, 衝突径数 = 16fm, 背景粒子 = 4次関数)	91
112	中性パイ中間子質量ピーク (較正係数 = 1.1MeV/ch, 衝突径数 = 16fm, 背景粒子 = 指数関数)	92
113	中性パイ中間子質量ピーク (較正係数 = 1.1MeV/ch, 衝突径数 = 16fm, 背景粒子 = 2次関数)	92
114	中性パイ中間子質量ピーク (較正係数 = 1.1MeV/ch, 衝突径数 = 16fm, 背景粒子 = 3次関数)	93
115	中性パイ中間子質量ピーク (較正係数 = 1.1MeV/ch, 衝突径数 = 16fm, 背景粒子 = 4次関数)	93
116	中性パイ中間子質量ピーク (較正係数 = 1.2MeV/ch, 衝突径数 = 16fm, 背景粒子 = 指数関数)	94
117	中性パイ中間子質量ピーク (較正係数 = 1.2MeV/ch, 衝突径数 = 16fm, 背景粒子 = 2次関数)	94
118	中性パイ中間子質量ピーク (較正係数 = 1.2MeV/ch, 衝突径数 = 16fm, 背景粒子 = 3次関数)	95
119	中性パイ中間子質量ピーク (較正係数 = 1.2MeV/ch, 衝突径数 = 16fm, 背景粒子 = 4次関数)	95
120	中性パイ中間子の質量と較正係数との関係 (衝突径数 = 16 fm)	99
121	非線形性の補正関数	101

1 序論

この節では、研究の本題に入る前の一般的な事項について述べる。

1.1 はじめに

私達人類が深い関心を抱き続けている疑問のひとつに、「私達を取り巻く自然が、どのような究極要素（素粒子）によって構成されているのか」というものがある。21世紀現在、この宇宙は物質を構成する粒子（フェルミ粒子）と、相互作用を媒介する粒子（ボース粒子）から成り立っていると考えられており、フェルミ粒子としては「クォーク」や「レプトン」、ボース粒子としては「ゲージボソン」と呼ばれる素粒子の分類が考えられている。

1.2 単位系について

本研究では、エネルギーの単位として電子ボルト [eV] を使用する。1eV は電子を 1 ボルトの電圧で加速した時に得られるエネルギーに相当する。さらにその延長としてメガ電子ボルト [MeV]、ギガ電子ボルト [GeV]、テラ電子ボルト [TeV] を以下のように定義する。

$$1\text{MeV} = 1 \times 10^6\text{eV}$$

$$1\text{GeV} = 1 \times 10^9\text{eV}$$

$$1\text{TeV} = 1 \times 10^{12}\text{eV}$$

また、本研究では単位系として自然単位系を使用する。これは、プランクの定数 h を 2π で割った \hbar と、真空中の光速 c の 2 つを基本単位とする単位系である。ここで、例えば質量は c^2 を掛けるとエネルギーの単位となるため、 eV/c^2 の単位で表すことができる。自然単位系は c を単位とするため、全ての物理量をエネルギーの次元で表わすことができるという点で便利である。以下簡単のために質量の単位を MeV あるいは GeV、運動量の単位を GeV で表す。

1.3 標準理論について

本研究の目的は高エネルギー衝突実験において発現する QGP 相を観測するために、検出器のエネルギー較正を行うことである。この小節では、その前提となる標準理論について述べる。

1.3.1 4つの相互作用と標準理論

現在のこの宇宙を支配している相互作用は「重力相互作用」、「電磁相互作用」、「弱い相互作用」、「強い相互作用」とそれぞれ呼ばれる4つの相互作用であり、これら4つの相互作用を統一的に記述することが現代の物理学者たちの目指す大きな目標の一つである。以下表に、4つの相互作用とその性質について示す。

相互作用	到達距離	相対的な強さ (結合定数)
重力相互作用	∞	$\sim 10^{-39}$
電磁相互作用	∞	$\sim 10^{-2}$
弱い相互作用	$\sim 10^{-17}\text{m}$	$\sim 10^{-5}$
強い相互作用	$\sim 10^{-15}\text{m}$	1

表 1: 4つの相互作用

現在の物理学では重力相互作用を除く3つの相互作用を記述する理論として「標準理論」と呼ばれる理論が有力視されている。標準理論は強い相互作用を説明する「量子色力学」、電磁相互作用と弱い相互作用を説明する「ワインバーグ・サラム理論」、クォークの「世代」を説明する「小林・益川理論」から構成されており、その理論による予言はほとんど実験結果と一致している。

標準理論によるモデルでは現在、クォークおよびレプトンは3世代6種類が考えられている。クォークもレプトンもフェルミ粒子であるという点で共通しているが、それらの違いはクォークには強い相互作用が働くがレプトンには働かないという点である。量子色力学によると強い相互作用の働く粒子は「色荷 (color charge)」をもっており、クォークには色荷があるがレプトンには色荷がないということになる。以下表に、第3世代までのクォークとレプトンを示す。

世代	クォーク (色荷有り)	レプトン (色荷無し)
1	アップクォーク ; u ダウルクォーク ; d	電子 ; e 電子ニュートリノ ; ν_e
2	チャームクォーク ; c ストレンジクォーク ; s	ミュー粒子 ; μ ミューニュートリノ ; ν_μ
3	トップクォーク ; t ボトムクォーク ; b	タウ粒子 ; τ タウニュートリノ ; ν_τ

表 2: クォークとレプトンの世代

また、標準理論によるモデルには媒介粒子 (ゲージボソン) の存在も含まれている。ゲージボソンについて、現代の物理学では相互作用は量子化された場、ゲージボソンが交換されることによって働くと考えられている。それらの種類として

は「グラビトン」、「フォトン」、「ウィークボソン」、「グルーオン」と呼ばれるものが考えられており、それぞれ重力相互作用、電磁相互作用、弱い相互作用、強い相互作用を媒介するが、グラビトンについてはまだ実験的に発見されていない。以下表に、4つの相互作用とそれに対応するゲージボソンを示す。

相互作用	媒介粒子
重力相互作用	(グラビトン)
電磁相互作用	フォトン
弱い相互作用	ウィークボソン
強い相互作用	グルーオン

表 3: 4つの相互作用とゲージボソン

1.3.2 クォークの閉じ込めと量子色力学

前述の通りクォークには強い相互作用が働くが、そのゲージボソンであるグルーオンにも実は強い相互作用が働く。したがって、これらの粒子の振る舞いは量子色力学で記述される。例えばクォークやグルーオンは核子を構成しているが、このようにクォークやグルーオンから構成されていて、強い相互作用の影響を受ける粒子を「ハドロン」と呼ぶ。

量子色力学の要請より、色荷が無色ではない粒子は単体では存在し得ない。ここでクォークやグルーオンは無色ではない色荷を持っているため、単独では存在できない。一方、ハドロンは複数のクォークやグルーオンが複合して互いの色荷を打ち消しあっているから存在できると考えられている。いわばハドロン中のクォークやグルーオンは閉じ込められた状態であり、単体で取り出すことができない。

それらの粒子の性質を調べるためには閉じ込められたクォークが開放された状態 (QGP 相) からの熱輻射から情報を得るのが有効とされており、PHOS 検出器はその輻射粒子 (熱光子) を観測するために設計されている。

1.4 物質中の荷電粒子のエネルギー損失について

粒子のエネルギーを測定する方法としては、粒子がある過程においてどれだけエネルギーを損失したかを知る方法が現在広く使われている。この小節では、荷電粒子がどのようにエネルギーを損失し、それをどのようにして測定するかについて述べる。

1.4.1 物質を構成する原子中の電子と荷電粒子との非弾性散乱

一般的な電子と荷電粒子との散乱はモット散乱の公式で記述されるが、さらに荷電粒子の物質中におけるエネルギー損失はベーテ・ブロッホの式で与えられる。特にこの式をエネルギー測定器に応用する際には、単位長さ当たりの重さ ($\xi = \rho x$) についてのエネルギー損失について考えるのが便利である。その場合、ベーテ・ブロッホの式は以下のように表される。

$$-\frac{dE}{d\xi} = D \frac{Z}{A} \left(\frac{z}{\beta} \right)^2 \left[\ln \left(\frac{2mc^2 \gamma^2 \beta^2}{I} \right) - \beta^2 \right] \quad (1)$$

$dE/d\xi$: $d\xi = \rho dx$ 当たりのエネルギー損失
ρ	: 物質の密度
dx	: 粒子の移動距離
D	: $D = 4\pi N_A \gamma_e^2 mc^2 = 0.3071 \text{MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{gr}$
N_A	: アヴォガドロ数 $N_A = 6.022 \times 10^{23}/\text{gr}$
γ_e	: 電子の古典半径 $\gamma_e = 2.82 \times 10^{-13} \text{cm}$
Z, A	: 物質の原子番号、原子質量
ze	: 粒子の電荷量
e	: 電子の電荷量 $e = 1.602 \times 10^{-13} \text{C}$
β	: 光速に対する粒子の速度比 $\beta = v/c$
v	: 粒子の速度
c	: 真空中の光速 $c = 299,792,458 \text{m/s}$
γ	: ローレンツ因子 $\gamma = 1/\sqrt{1-\beta^2}$
I	: 物質の平均イオン化ポテンシャル

1.4.2 最小電離粒子 (Minimum Ionizing Particle ; MIP)

ベーテ・ブロッホの式の特徴としては、エネルギー損失の大きさが粒子の質量によらず、電荷の自乗 z^2 に比例し、速度について β^{-2} に比例することが挙げられる。この特徴のために、粒子の速度がほとんど光速に近い $\beta \approx 0.96$ 程度になると、電荷 ze が等しければ、粒子の種類によらず $dE/d\xi$ がほぼ一定値となる。一方、 β が小さい時は $1/\beta^2$ に比例して $dE/d\xi$ は大きな値となる。

$\gamma \approx 3$ 程度の時、エネルギー損失はほぼ一定値の最小値 (最小電離損失値 ; minimum ionization loss) をとり、そのような粒子を「最小電離粒子 (Minimum Ionizing Particle ; MIP)」と呼ぶ。例えば電荷 e の粒子 (陽子、パイ中間子、ミュオンなど) については以下のようになることが分かっている。

$$-\frac{dE}{d(\rho x)_{min}} \approx 1.5 \text{MeV}/\text{gcm}^{-2} \quad (2)$$

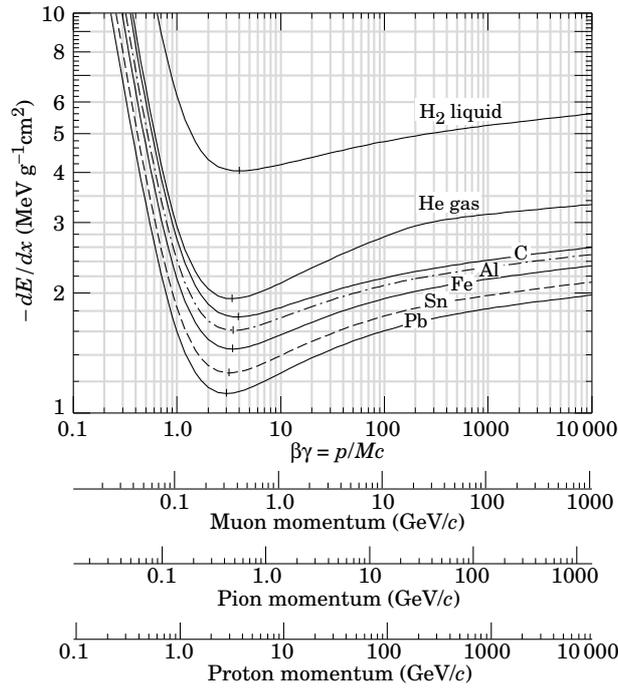


図 1: 最小電離損失

1.4.3 電磁シャワー

高エネルギーの電子が物質中に入射すると、物質中の原子との相互作用である制動放射と呼ばれる現象により、エネルギーの一部を失って光子を生み出す。高エネルギーの電子においては制動放射によるエネルギー損失が支配的であるが、エネルギーが低くなってくるとエネルギー損失はイオン化によるものが主になる。これらの異なるエネルギー損失が等しくなるようなエネルギーを「臨界エネルギー」と呼ぶ。一方、高エネルギーの光子は電子陽電子対を生成する。そのため、高エネルギーの電子が物質中に入射すると、制動放射と電子陽電子対生成が繰り返され、多量の電子陽電子対が生成される。このような現象をカスケードシャワーの中で特に「電磁シャワー」と呼ぶ。電子陽電子対の生成は、電子が臨界エネルギーに達するまで行われ、以後は発生した電子陽電子対がイオン化損失によってエネルギーを失っていく。

1.4.4 電磁カロリメータ

電磁カロリメータとはカスケードシャワーを利用して粒子のエネルギーを測定する検出器の総称であり、無機シンチレータと有機シンチレータに大別される。ALICE 実験 PHOS 検出器には無機シンチレータが採用されているため、ここでは特に無機シンチレータについて述べる。

シンチレータとは、粒子がその内部を通過する際に損失したエネルギーを蛍光（シンチレーション）発光により測定する検出器である。無機シンチレータは有機シンチレータと比べて発光量が多く、エネルギーの分解能に優れるという利点がある。また無機シンチレータは放射長、モリエール半径が短く、入射粒子の全エネルギーを測定する電磁カロリメータとしてよく用いられる。放射長とは粒子が物質中に入射した後そのエネルギーが $1/e$ (e : ネイピア数) になるまでに入射面に垂直な方向にすすむ距離であり、モリエール半径とはその時の入射面に平行な方向の広がりの半径である。したがって放射長、モリエール半径が短い無機シンチレータは、高エネルギーの粒子を狭い領域で測定するのに適しているといえる。特に鉛ガラスは密度が大きく、放射長も短いため、放射長の 15 から 20 倍の長さをもつ鉛ガラスカロリメータの中では、ほとんどの電子や光子は全エネルギーを落とす。

以下に、主な物質の放射長と臨界エネルギーを示す。

物質	放射長 (gr)	臨界エネルギー (MeV)
H ₂ (液体)	69.3	382
C	44.4	102
Al	24.3	47
Fe	13.8	23.9
Pb	5.83	6.9

表 4: 主な物質の放射長と臨界エネルギー

1.5 パイ中間子について

ハドロンは、フェルミ粒子である「バリオン」とボース粒子である「メソン」に大別される。代表的なバリオンとしては陽子 (p) や中性子 (n) があり、代表的なメソンとしてはパイ中間子 (π^0 , π^\pm) がある。クォークはフェルミ粒子であるため半整数のスピンを持ち、グルーオンはボース粒子であるため整数のスピンを持つ。したがって、フェルミ粒子を構成するには少なくともクォークが奇数個である必要があり、バリオンの場合クォーク 3 個から構成されている。一方、ボース粒子を構成するにはクォークが偶数個である必要があり、メソンの場合 1 個ずつ

のクォークと反クォークから構成されている。ここで反クォークとは、クォークの反粒子である。

以下表に、パイ中間子の中で特に、本研究と関わりの深い中性パイ中間子の性質について示す。ここで、表中の γ は光子を表している。

電荷	0
質量	$134.98 \text{ MeV}/c^2$
平均寿命	$8.4 \times 10^{-17} \text{ s}$
構成するクォーク	$(u\bar{u} - d\bar{d})/\sqrt{2}$
崩壊モード	2γ (98.80%)

表 5: 中性パイ中間子 (π^0) の性質

2 研究背景

この節では、研究を行う背景となる LHC 加速器、ALICE 実験、PHOS 検出器、および本研究における較正の定義について述べる。

2.1 LHC 加速器

加速器とは電場等により荷電粒子を加速する機器である。加速手法や形状により様々な種類の加速器が存在するが、それらの中でも LHC 加速器は衝突型円形加速器と呼ばれる種類の加速器である。LHC 加速器はスイス・ジュネーブ郊外にフランスとの国境をまたいで建設されており、地下 100m を走るトンネルの周長は 27km、重心系の衝突エネルギーは最大で 14TeV である。

以下に LHC 加速器の航空写真を示す。写真内の赤い円が、地下に建設された LHC 加速器を示している。



図 2: LHC 加速器・航空写真

2.2 ALICE 実験

LHC で展開される実験として ATLAS (A Toroidal LHC ApparatuS)、CMS (Compact Muon Solenoid)、LHCb (Large Hadron Collider beauty)、ALICE (A

Large Ion Collider Experiment) 等がある。

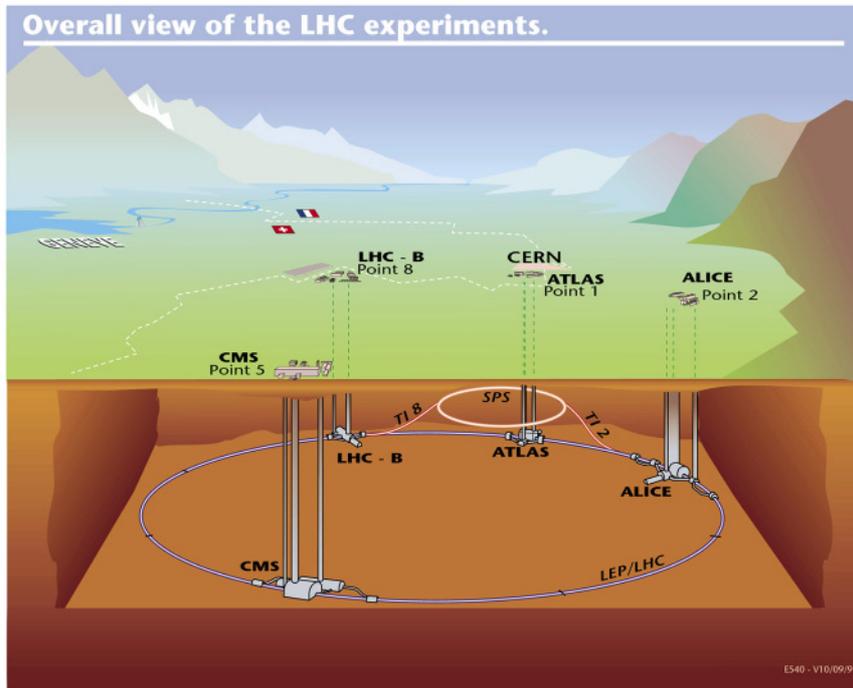


図 3: LHC 加速器で行われる実験

ALICE 実験はこれらの中で唯一重イオン衝突の研究に特化した実験であり、ビッグバン直後の状態を研究室内で再現、観測することを目的としている。

LHC 加速器における重イオン衝突は太陽中心部の 100,000 倍以上の温度を作り出す。このような状態においては核子中のクォークは閉じ込めから解放され、ビッグバン直後の非常に高温であった宇宙にかつて存在したと考えられる QGP 相が発現される。ALICE 実験によって QGP 相が観測されれば、現在の宇宙を構成している物質がビッグバンからの宇宙の膨張、冷却を経てどのようにして生成されたかを知る手がかりになるのではないかと考えられている。

ALICE 実験装置の概略図を以下に示す。その大きさは高さ 16m、奥行き 26m、幅 16m、重さは 10,000t である。

前後のビームラインからビームが入射し、それらのビームが衝突、生成された粒子を観測することができる。最も外側を覆っている赤色の円柱状の殻は巨大な磁石であり、このために生成された粒子は磁場の影響を受けながら運動することとなる。PHOS 検出器は磁石内の中央やや下に位置している。



図 4: ALICE 実験装置・概略図

2.3 PHOS 検出器

本小節では、高性能光子検出器 PHOS 検出器の構成素子、データ処理系の概要について述べる。

2.3.1 PHOS モジュール

ALICE 実験で用いられる PHOS 検出器は、鉛タンゲステン酸結晶 (PWO) とアバランシェ・フォトダイオード (APD) を組み合わせた物 (以下「crystal」と呼ぶ) を基本的な検出素子としている。PHOS 検出器にはビーム軸方向に 56 列、それに垂直な方向に 64 列、計 3584 個の crystal が敷き詰められ、これが 1 機のモジュールとなる。実験では 5 機のモジュールが用いられ、それで方位角 100° 、擬ラピディティ $|\eta| < 1.2$ を覆う。

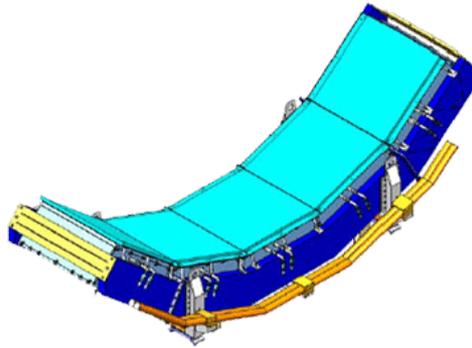


図 5: PHOS モジュール (5 機)

2.3.2 PWO

PWOはその組成式は PbWO_4 で表わされる。この結晶は他のシンチレータに比べて密度が大きく、放射長やモリエール半径が短いという特徴がある。以下に代表的な無機シンチレータの比重、放射長、モリエール半径を載せる。



図 6: PWO 結晶

物質	密度 (g/cm^3)	放射長 (cm)	モリエール半径 (cm)
NaI	3.67	2.59	4.5
CsI	4.53	1.85	3.8
BGO	7.13	1.12	2.4
PWO	8.28	0.89	2.0

表 6: 代表的な無機シンチレータの比重、放射長、モリエール半径

無機シンチレータとしてはNaIが歴史的に古くから使われたが、PWOはそれと比較して密度が大きく、放射長、モリエール半径が短い。PHOS 検出器に用いられるPWO結晶は大きさ $22 \times 22 \times 180\text{mm}^3$ である。入射方向の180mmは放射長の約20倍の長さであり、電磁シャワーを十分に発達させて全エネルギーを測定するのに十分な長さである。

PWOは以上のような利点を持つ一方、他と比較して発光量が少ないという欠点がある。しかし、PWOの発光量には温度依存性があり、低温になると発光量が増大するため、PWOを冷却するためにPHOS検出器は-25℃に冷却して使用される。

物質	発光量 (NaI 比)
NaI	1.00
CsI	0.40
BGO	0.15
PWO	0.01

表 7: 代表的な無機シンチレータの発光量

2.3.3 APD

APDのアバランシェとはフランス語で「雪崩」を意味し、この素子は電子雪崩を利用して入力信号を増幅する機能を持つ。同じく入力信号を増幅する素子として光電子増倍管(PMT)があるが、APDはPMTと比較して外部ノイズの影響を受けやすい、技術的な問題により受光面積が小さいといった短所を持つ一方、磁場に対して安定であるという長所を持つために強い磁場中で動作するPHOS検出器に適しているといえる。PHOS検出器に採用されたAPDの受光面積は $5 \times 5\text{mm}^2$ であり、その増幅率は10から 10^4 である。

2.3.4 データ処理系概要

crystalで得られたエネルギーの情報は、crystal32本につき1枚の「FEE (Front End Electronics card)」、FEE28枚につき1枚の「RCU (Readout Control Unit)」と呼ばれる素子で処理される。情報はさらに「LDC (Local Data Concentrator)」と呼ばれるコンピュータに移され、さらにネットワークを介して「GDC (Global Data Concentrator)」と呼ばれるコンピュータに保存される。このコンピュータの情報をもとに、実験により得られたデータはまず、加工されていないデータ、「Raw Data」という形式で得られる。さらにそのRaw Dataを、Data Base (DB)の情報を元に、解析しやすい形式にする処理を「Reconstruction」といい、そうやって得られた情報を「ESD (Event Summary Data)」と呼ぶ。

2.3.5 エネルギー情報のデジタル化

上記のデータ処理系においては、crystalで得られたエネルギーの情報はADCと呼ばれる回路によってデジタル化されている。このデジタル化されたエネルギー

の情報を「ADC count」と呼び、「ch (チャンネル)」という単位で表す。エネルギーの情報の、ADC count への変換倍率を「gain」[ch/MeV]といい、ADC count は以下の式で表わされる。

$$ADCcount[ch] = \text{エネルギー} [MeV] \times gain[ch/MeV] \quad (3)$$

このADC countの情報はReconstructionの過程において、ある変換係数[MeV/ch]によってエネルギーの情報に戻される。

2.3.6 clustering

crystalに入射した粒子は電磁シャワーを形成するが、その形成距離がcrystalの断面積と比較して長い場合には、あるcrystalから隣接するcrystalへと複数のcrystalにかけてシャワーが形成されることが起こり得る。このようにして信号を観測した複数のcrystalからなる集団を本研究では「cluster」と呼び、crystalがclusterを構成する過程を「clustering」と呼ぶ。

ところで、現状現実の検出器においては、回路に印加された電圧に起因する熱ノイズが発生する。PHOS検出器もその例外ではない。したがって、clusterを単に信号を観測したcrystalの集団と定義したのでは、熱ノイズと入射粒子の損失エネルギーとを区別することはできない。そのため、熱ノイズを排除するためにPHOS検出器はclusteringの際に「clustering threshold」[MeV]と呼ばれる閾値を要求している。

2.4 本研究における較正、較正係数について

本研究における「較正」とは、「ある入力に対する出力を関連付ける作業」と定義し、その時の入力と出力を結びつける係数を本研究においては「較正係数 (calibration constant)」と呼ぶ。

$$\text{出力} = \text{較正係数} \times \text{入力} \quad (4)$$

3 シミュレーション

要旨の項で述べたとおり、鉛鉛衝突シミュレーションを用いて、最小電離粒子のエネルギー損失および中性パイ中間子の質量スペクトルが PHOS 検出器のエネルギー較正に有効であることを示すことが本研究の目的である。そのために本研究では、複数通りに較正係数を変更したシミュレーションを実行し、その解析結果が確かに較正係数に応じて変化しているか否かを確認するというような手法を用いる。

ここで、変更した較正係数はすべて ADC count をエネルギーに変換するときの変換係数 [MeV/ch] にかかっている。較正係数と測定値との関係を以下式に示す。

$$\text{最小電離損失 [MeV]} = \text{較正係数 [MeV/ch]} \times \text{ADC count[ch]} \quad (5)$$

$$\text{中性パイ中間子の質量 [MeV]} = \text{較正係数 [MeV/ch]} \times \text{ADC count[ch]} \quad (6)$$

この節では、具体的にどのような条件を設定してシミュレーションを実行したかについて述べる。

3.1 本研究におけるイベントジェネレータ

本研究では、シミュレーションのイベントジェネレータとして、「HIJING (Heavy Ion Jet INteraction Generator)」を用いた。これは重イオンの高エネルギー衝突を再現することが可能なイベントジェネレータであり、任意の核種、衝突径数での衝突イベントを発生させることができる。

3.2 本研究におけるシミュレーションのパラメータ

この小節では、研究において実行した HIJING シミュレーションにおいて、どのようなパラメータを考慮し、それらにどのような値を用いたかについて述べる。

3.2.1 核種

シミュレーションにおける重イオンの核種としては鉛 207 (Pb^{207}) を使用した。原子核中の核子の密度分布がウッズ・サクソン分布に従うものとする、鉛 207 の原子核半径はおおよそ 7~8fm である。

$$1\text{fm} = 10^{-15}\text{m}$$

3.2.2 衝突径数

衝突径数 (impact parameter) とは、互いに衝突しようとする原子核の中心同士の距離の、ビーム軸に垂直な成分のことである。この値が小さいと中心衝突 (central collision)、大きいとかすり衝突 (peripheral collision) となり、中心衝突であればあるほど多くの粒子が衝突および反応に関与することとなる。

鉛 207 の原子核半径がおおよそ 7~8fm であることから、本研究では中心衝突として衝突径数が 0fm である場合、かすり衝突として衝突径数が 16fm である場合、およびそれらの中間衝突として衝突径数が 8fm である場合の計 3 通りの衝突径数を設定した。

3.2.3 衝突事象数

衝突事象数 (number of event) とは、シミュレーションにおいて鉛鉛衝突を起こす回数である。かすり衝突は中心衝突および中間衝突と比較して衝突時に発生する粒子の数が少ないため、その衝突事象数は多めに設定した。

3.2.4 較正係数

解析結果と較正係数との関連を調べるための較正係数としては 0.8MeV/ch、0.9MeV/ch、1.0MeV/ch、1.1MeV/ch、1.2MeV/ch の 5 通りを考えた。

3.3 本研究におけるシミュレーションの概要

以上より、衝突径数3通りに較正係数5通りで、合わせて計15通りのシミュレーションを実行した。

以下表に、本研究で用いたHIJINGシミュレーションの概要を示す。各欄の数字は、それぞれ対応する衝突径数、較正係数で行ったシミュレーションの衝突事象数である。

	衝突径数 = 0 fm	衝突径数 = 8 fm	衝突径数 = 16 fm
較正係数 = 0.8MeV/ch	10,000event	10,000event	100,000event
較正係数 = 0.9MeV/ch	10,000event	10,000event	100,000event
較正係数 = 1.0MeV/ch	10,000event	10,000event	1,000,000event
較正係数 = 1.1MeV/ch	10,000event	10,000event	100,000event
較正係数 = 1.2MeV/ch	10,000event	10,000event	100,000event

表 8: 本研究で用いたHIJINGシミュレーションの概要

4 結果

この節では、シミュレーションの結果について述べる。本研究で行った15通りのシミュレーションそれぞれについて、得られたESDファイル内の解析前のスペクトルを示し、最小電離損失あるいは中性パイ中間子の質量解析にそれらの結果が有効か否かを判断する。

4.1 解析に有効なクラスターのエネルギー分布について

HIJINGシミュレーションよりESDが得られ、このESDよりクラスターのエネルギーのスペクトルを得ることができる。

ESDから得られたスペクトルには、エネルギーにして0.25GeV付近の領域に、最小電離粒子のエネルギー損失によるピークが現れるものと予想される。最小電離粒子の損失エネルギーを求めるために解析を行うためには、シミュレーション結果のスペクトルにそのようなピークが観測される必要がある。

4.2 解析に有効な中性パイ中間子の質量分布について

中性パイ中間子は、そのほとんどが2つの光子に崩壊する。この崩壊によって生成された2つの光子は、元の粒子である中性パイ中間子のエネルギーを保存したまま運動する。したがって、これら2つの光子のエネルギーを足し合わせれば、元の中性パイ中間子の質量エネルギーを求めることができる。しかし、本研究においては、ある2つの光子についてそれらが同一の中性パイ中間子の崩壊によって生成されたものであるか否かを同定することはできない。そのため本研究においては、全ての光子の中からある条件（横方向運動量が1.0GeVから2.0GeVの間であること）を満たした2つの組み合わせについてエネルギーを足し合わせ、それを中性パイ中間子の質量スペクトルとする。

ここで中性パイ中間子の質量は0.135GeV付近であるため、質量スペクトルにはそのあたりの領域にピークが現れるものと予想される。中性パイ中間子の質量を求めるために解析を行うためには、シミュレーション結果のスペクトルにそのようなピークが観測される必要がある。

4.3 較正係数が 1.0MeV/ch である場合のシミュレーション結果

シミュレーションの結果としてまず、較正係数が 1.0MeV/ch である場合のクラスターのエネルギースペクトルと中性パイ中間子の質量スペクトルを、それぞれ衝突径数別に示す。各スペクトルの横軸はエネルギー [GeV] を表している。

4.3.1 クラスターのエネルギー分布

衝突径数が 0fm である場合のクラスターのエネルギー分布を以下に示す。

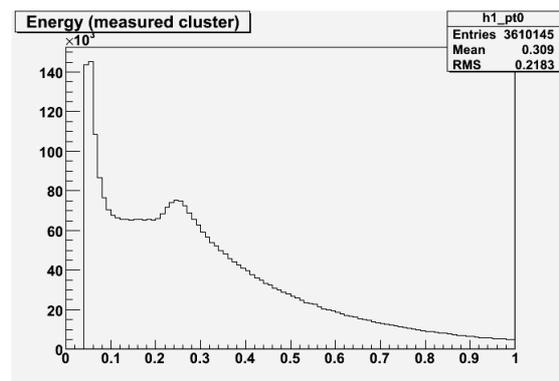


図 7: クラスターのエネルギー分布 (較正係数 = 1.0MeV/ch, 衝突径数 = 0fm)

衝突径数が 8fm である場合のクラスターのエネルギー分布を以下に示す。

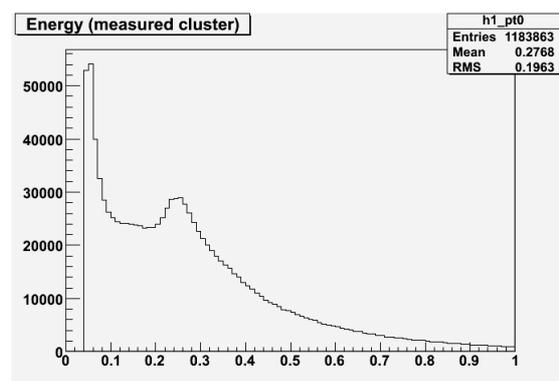


図 8: クラスターのエネルギー分布 (較正係数 = 1.0MeV/ch, 衝突径数 = 8fm)

衝突径数が 16fm である場合のクラスターのエネルギー分布を以下に示す。

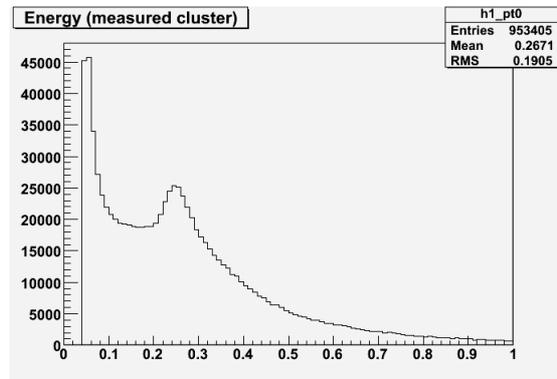


図 9: クラスターのエネルギー分布 (較正係数 = 1.0MeV/ch, 衝突径数 = 16fm)

以上 3 つのスペクトルについて、確かに 0.25GeV 付近の位置にピークが観測できた。このことから、以下の最小電離粒子のエネルギー損失についての解析には、以上 3 つ全てのスペクトルは有効であると判断する。

4.3.2 中性パイ中間子の質量分布

衝突径数が 0fm である場合の中性パイ中間子の質量分布を以下に示す。

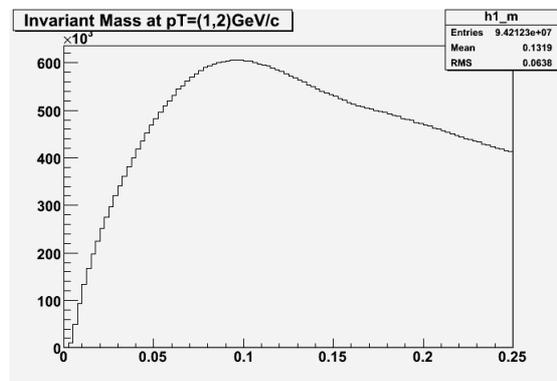


図 10: 中性パイ中間子の質量分布 (較正係数 = 1.0MeV/ch, 衝突径数 = 0fm)

衝突径数が 8fm である場合の中性パイ中間子の質量分布を以下に示す。

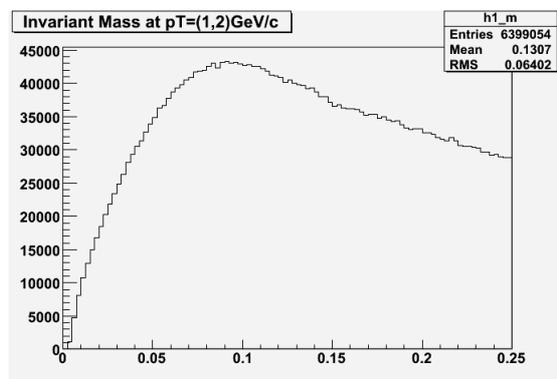


図 11: 中性パイ中間子の質量分布 (較正係数 = 1.0MeV/ch, 衝突径数 = 8fm)

衝突径数が 16fm である場合の中性パイ中間子の質量分布を以下に示す。

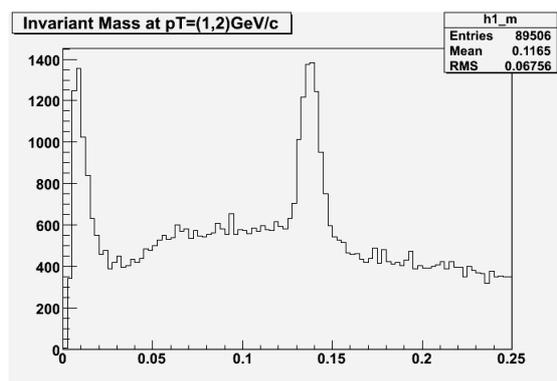


図 12: 中性パイ中間子の質量分布 (較正係数 = 1.0MeV/ch, 衝突径数 = 16fm)

以上3つのスペクトルについて、衝突径数が 16fm のシミュレーション結果については確かに $0.135 \text{ GeV}/c^2$ 付近の位置にピークが観測できた。しかし、衝突径数が 0fm あるいは 8fm である場合のシミュレーション結果についてはそれらしいピークは観測されなかった。

その理由としては、中心衝突および中間衝突においては中性パイ中間子の観測数と比較してそれ以外の背景粒子の観測数が多すぎるのが原因だと考えられる。そのため本当は存在しているピークが背景粒子のスロープに埋もれてしまっており、明らかなピークとして観測ができなかったのではないかと考えられる。このことから、中性パイ中間子の質量についての解析に衝突径数が 0fm および 8fm である場合のシミュレーション結果は用いるのは有効ではないと判断する。

以上より、以下の中性パイ中間子の質量についての解析には、衝突径数が 16fm のシミュレーション結果のみが有効であると判断する。

4.4 較正係数が 1.0MeV/ch でない場合のシミュレーション結果

続いて、較正係数が 1.0MeV/ch でない場合のシミュレーションから得られるクラスターのエネルギースペクトルと中性パイ中間子の質量スペクトルを、それぞれ衝突径数別に示す。各スペクトルの横軸はエネルギー [GeV] を表している。ここで示すスペクトルより、較正係数を変えた場合のシミュレーション結果が確かに変化していることを確認する。

4.4.1 クラスターのエネルギー分布 (較正係数が 0.8MeV/ch である場合)

較正係数が 0.8MeV/ch、衝突径数が 0fm である場合のクラスターのエネルギー分布を以下に示す。

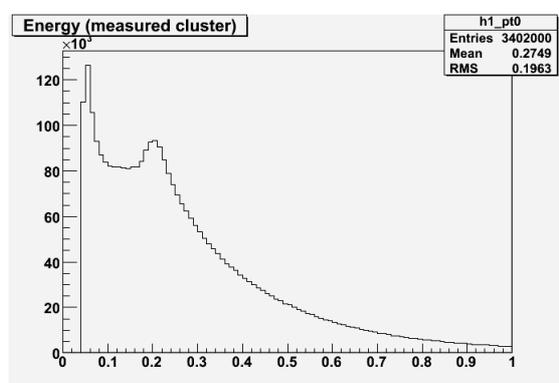


図 13: クラスターのエネルギー分布 (較正係数 = 0.8MeV/ch, 衝突径数 = 0fm)

較正係数が 0.8MeV/ch、衝突径数が 8fm である場合のクラスターのエネルギー分布を以下に示す。

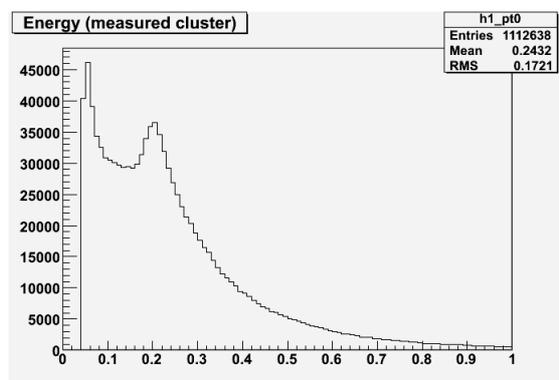


図 14: クラスターのエネルギー分布 (較正係数 = 0.8MeV/ch, 衝突径数 = 8fm)

較正係数が $0.8\text{MeV}/\text{ch}$ 、衝突径数が 16fm である場合のクラスターのエネルギー分布を以下に示す。

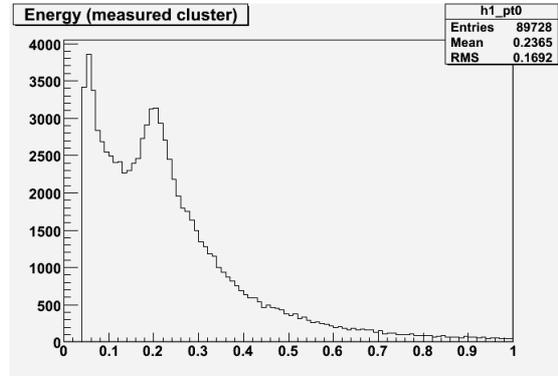


図 15: クラスターのエネルギー分布 (較正係数 = $0.8\text{MeV}/\text{ch}$, 衝突径数 = 16fm)

以上、較正係数が $0.8\text{MeV}/\text{ch}$ である 3 つのスペクトルについて、確かに $0.25 \times 0.8 = 0.20\text{GeV}$ 付近の位置にピークが見える。したがって、以下の最小電離粒子のエネルギー損失についての解析には、これら全てのシミュレーション結果が有効であると判断する。

4.4.2 クラスターのエネルギー分布 (較正係数が $0.9\text{MeV}/\text{ch}$ である場合)

較正係数が $0.9\text{MeV}/\text{ch}$ 、衝突径数が 0fm である場合のクラスターのエネルギー分布を以下に示す。

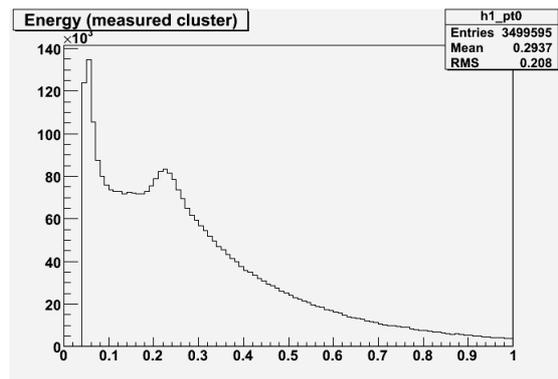


図 16: クラスターのエネルギー分布 (較正係数 = $0.9\text{MeV}/\text{ch}$, 衝突径数 = 0fm)

較正係数が $0.9\text{MeV}/\text{ch}$ 、衝突径数が 8fm である場合のクラスターのエネルギー分布を以下に示す。

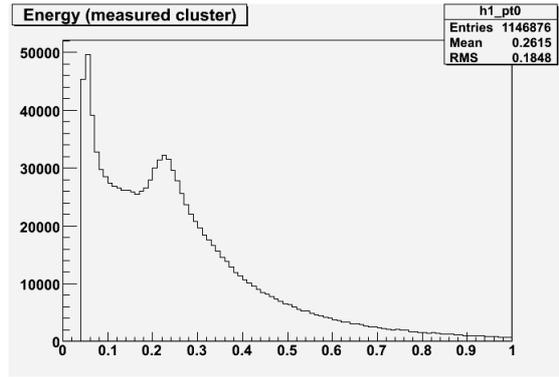


図 17: クラスターのエネルギー分布 (較正係数 = 0.9MeV/ch, 衝突径数 = 8fm)

較正係数が 0.9MeV/ch、衝突径数が 16fm である場合のクラスターのエネルギー分布を以下に示す。

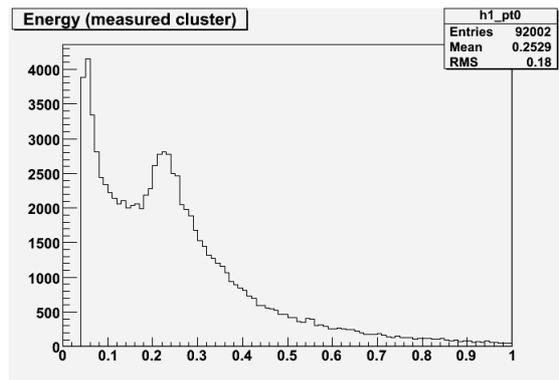


図 18: クラスターのエネルギー分布 (較正係数 = 0.9MeV/ch, 衝突径数 = 16fm)

以上、較正係数が 0.9MeV/ch である 3 つのスペクトルについて、確かに $0.25 \times 0.9 = 0.23\text{GeV}$ 付近の位置にピークが見える。したがって、以下の最小電離粒子のエネルギー損失についての解析には、これら全てのシミュレーション結果が有効であると判断する。

4.4.3 クラスターのエネルギー分布 (較正係数が 1.1MeV/ch である場合)

較正係数が 1.1MeV/ch、衝突径数が 0fm である場合のクラスターのエネルギー分布を以下に示す。

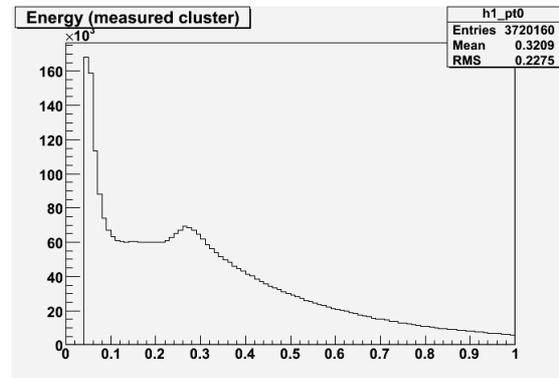


図 19: クラスターのエネルギー分布 (較正係数 = 1.1MeV/ch, 衝突径数 = 0fm)

較正係数が 1.1MeV/ch、衝突径数が 8fm である場合のクラスターのエネルギー分布を以下に示す。

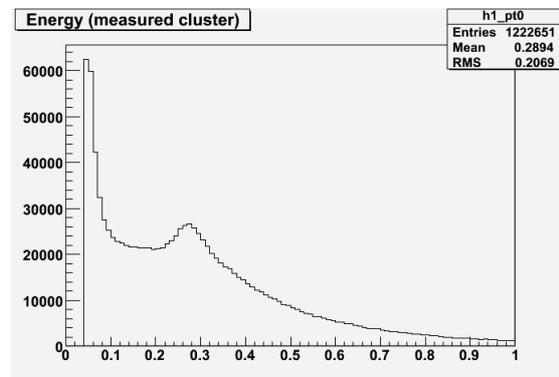


図 20: クラスターのエネルギー分布 (較正係数 = 1.1MeV/ch, 衝突径数 = 8fm)

較正係数が 1.1MeV/ch、衝突径数が 16fm である場合のクラスターのエネルギー分布を以下に示す。

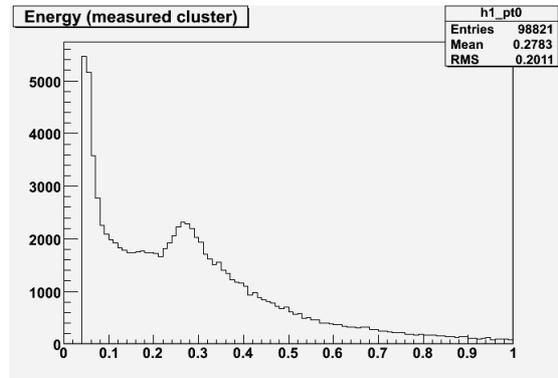


図 21: クラスターのエネルギー分布 (較正係数 = 1.1MeV/ch, 衝突径数 = 16fm)

以上、較正係数が 1.1MeV/ch である 3つのスペクトルについて、確かに $0.25 \times 1.1 = 0.28\text{GeV}$ 付近の位置にピークが見える。したがって、以下の最小電離粒子のエネルギー損失についての解析には、これら全てのシミュレーション結果が有効であると判断する。

4.4.4 クラスターのエネルギー分布 (較正係数が 1.2MeV/ch である場合)

較正係数が 1.2MeV/ch、衝突径数が 0fm である場合のクラスターのエネルギー分布を以下に示す。

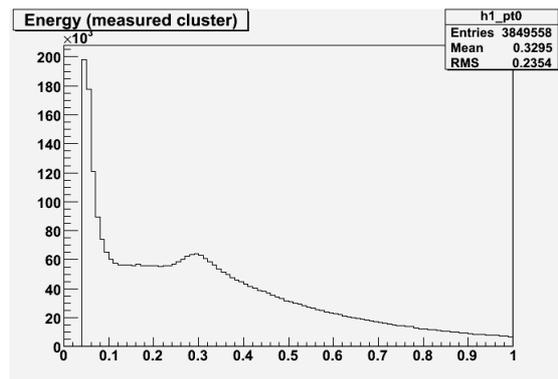


図 22: クラスターのエネルギー分布 (較正係数 = 1.2MeV/ch, 衝突径数 = 0fm)

較正係数が 1.2MeV/ch、衝突径数が 8fm である場合のクラスターのエネルギー分布を以下に示す。

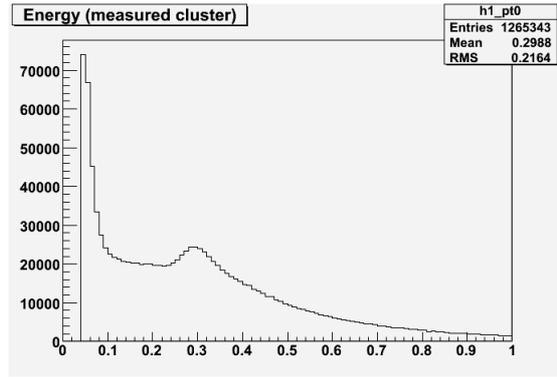


図 23: クラスターのエネルギー分布 (較正係数 = 1.2MeV/ch, 衝突径数 = 8fm)

較正係数が 1.2MeV/ch、衝突径数が 16fm である場合のクラスターのエネルギー分布を以下に示す。

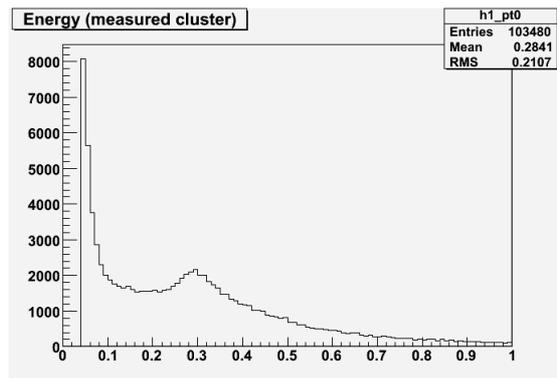


図 24: クラスターのエネルギー分布 (較正係数 = 1.2MeV/ch, 衝突径数 = 16fm)

以上、較正係数が 1.2MeV/ch である 3つのスペクトルについて、確かに $0.25 \times 1.2 = 0.30\text{GeV}$ 付近の位置にピークが見える。したがって、以下の最小電離粒子のエネルギー損失についての解析には、これら全てのシミュレーション結果が有効であると判断する。

4.4.5 中性パイ中間子の質量分布 (較正係数が $0.8\text{MeV}/\text{ch}$ である場合)

較正係数が $0.8\text{MeV}/\text{ch}$ 、衝突径数が 0fm である場合の中性パイ中間子の質量分布を以下に示す。

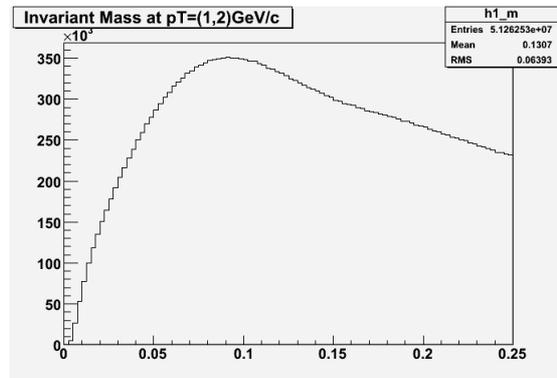


図 25: 中性パイ中間子の質量分布 (較正係数 = $0.8\text{MeV}/\text{ch}$, 衝突径数 = 0fm)

較正係数が $0.8\text{MeV}/\text{ch}$ 、衝突径数が 8fm である場合の中性パイ中間子の質量分布を以下に示す。

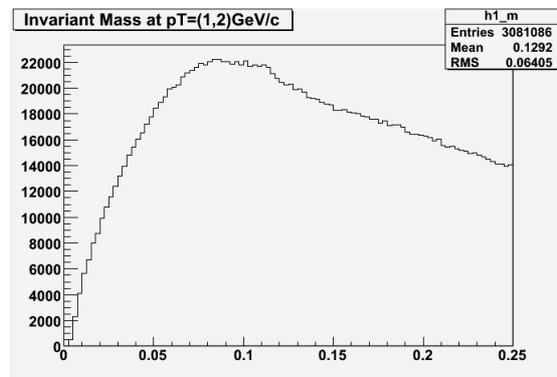


図 26: 中性パイ中間子の質量分布 (較正係数 = $0.8\text{MeV}/\text{ch}$, 衝突径数 = 8fm)

較正係数が $0.8\text{MeV}/\text{ch}$ 、衝突径数が 16fm である場合の中性パイ中間子の質量分布を以下に示す。

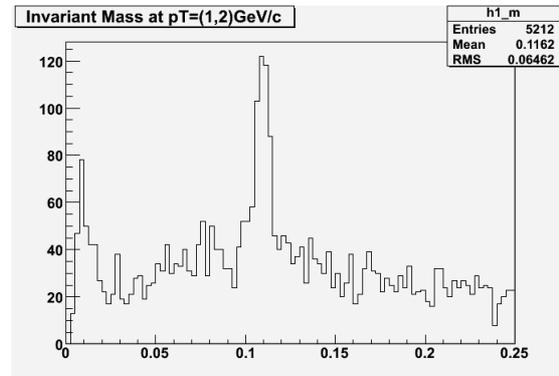


図 27: 中性パイ中間子の質量分布 (較正係数 = $0.8\text{MeV}/\text{ch}$, 衝突径数 = 16fm)

以上、較正係数が $0.8\text{MeV}/\text{ch}$ である 3 つのスペクトルについて、衝突径数が 16fm である場合のスペクトルのみに、 $0.135 \times 0.8 = 0.108\text{GeV}/c^2$ 付近の位置にピークが観測された。衝突径数が 0fm 、あるいは 8fm である場合のスペクトルにそれらしきピークが観測されなかった理由は、較正係数が $1.0\text{MeV}/\text{ch}$ である場合と同様のものであると考えられる。

以上より、以下の較正係数が $0.8\text{MeV}/\text{ch}$ である場合の中性パイ中間子の質量についての解析には、衝突径数が 16fm である場合のシミュレーション結果のみが有効であると判断する。

4.4.6 中性パイ中間子の質量分布 (較正係数が $0.9\text{MeV}/\text{ch}$ である場合)

較正係数が $0.9\text{MeV}/\text{ch}$ 、衝突径数が 0fm である場合の中性パイ中間子の質量分布を以下に示す。

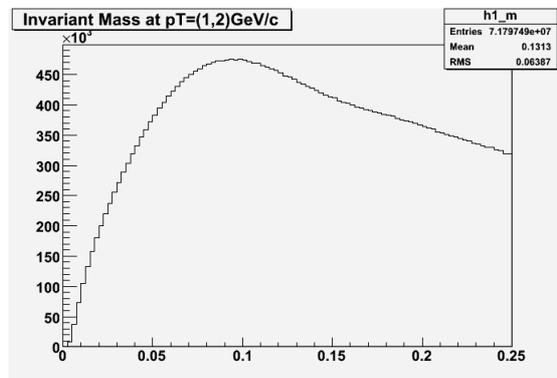


図 28: 中性パイ中間子の質量分布 (較正係数 = $0.9\text{MeV}/\text{ch}$, 衝突径数 = 0fm)

較正係数が $0.9\text{MeV}/\text{ch}$ 、衝突径数が 8fm である場合の中性パイ中間子の質量分布を以下に示す。

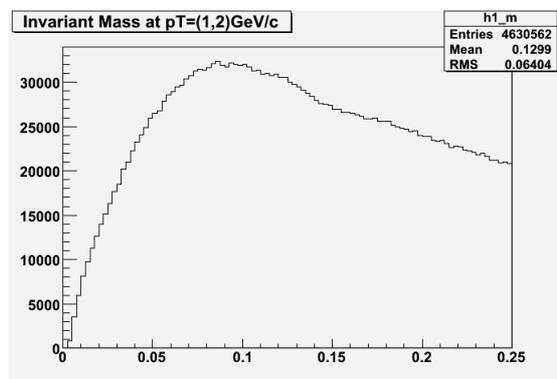


図 29: 中性パイ中間子の質量分布 (較正係数 = $0.9\text{MeV}/\text{ch}$, 衝突径数 = 8fm)

較正係数が $0.9\text{MeV}/\text{ch}$ 、衝突径数が 16fm である場合の中性パイ中間子の質量分布を以下に示す。

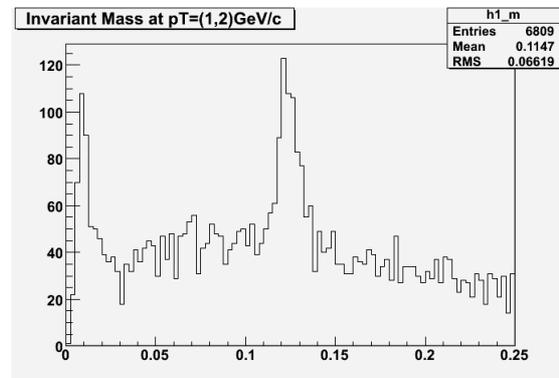


図 30: 中性パイ中間子の質量分布 (較正係数 = $0.9\text{MeV}/\text{ch}$, 衝突径数 = 16fm)

以上、較正係数が $0.9\text{MeV}/\text{ch}$ である 3 つのスペクトルについて、衝突径数が 16fm である場合のスペクトルのみに、 $0.135 \times 0.9\text{MeV}/\text{ch} = 0.122\text{GeV}/c^2$ 付近の位置にピークが観測された。衝突径数が 0fm 、あるいは 8fm である場合のスペクトルにそれらしきピークが観測されなかった理由は、較正係数が $1.0\text{MeV}/\text{ch}$ である場合と同様のものであると考えられる。

以上より、以下の較正係数が $0.9\text{MeV}/\text{ch}$ である場合の中性パイ中間子の質量についての解析には、衝突径数が 16fm である場合のシミュレーション結果のみが有効であると判断する。

4.4.7 中性パイ中間子の質量分布 (較正係数が 1.1MeV/ch である場合)

較正係数が 1.1MeV/ch、衝突径数が 0fm である場合の中性パイ中間子の質量分布を以下に示す。

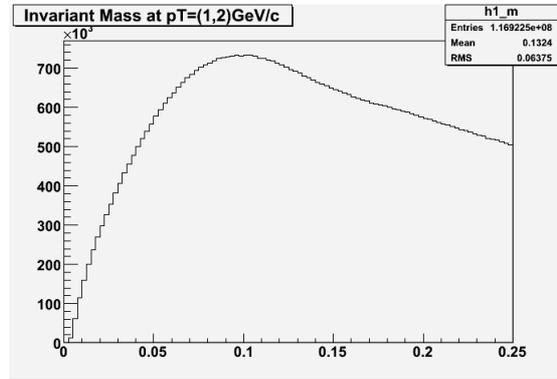


図 31: 中性パイ中間子の質量分布 (較正係数 = 1.1MeV/ch, 衝突径数 = 0fm)

較正係数が 1.1MeV/ch、衝突径数が 8fm である場合の中性パイ中間子の質量分布を以下に示す。

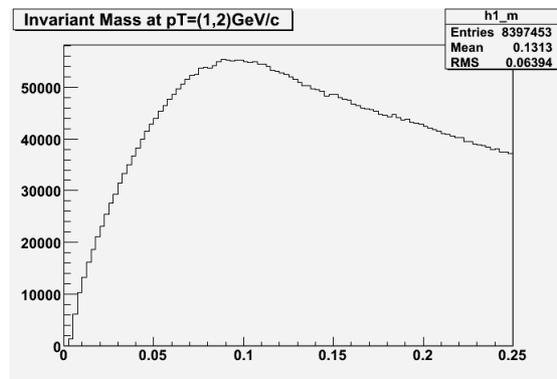


図 32: 中性パイ中間子の質量分布 (較正係数 = 1.1MeV/ch, 衝突径数 = 8fm)

較正係数が $1.1\text{MeV}/\text{ch}$ 、衝突径数が 16fm である場合の中性パイ中間子の質量分布を以下に示す。

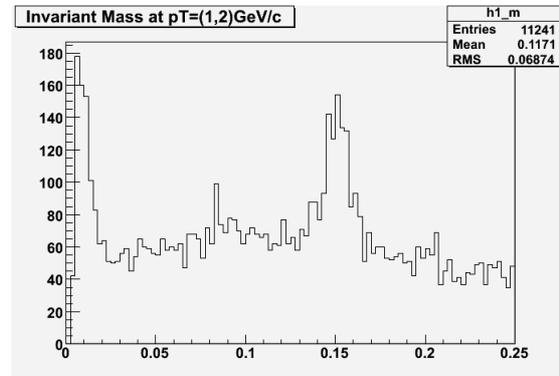


図 33: 中性パイ中間子の質量分布 (較正係数 = $1.1\text{MeV}/\text{ch}$, 衝突径数 = 16fm)

以上、較正係数が $1.1\text{MeV}/\text{ch}$ である 3 つのスペクトルについて、衝突径数が 16fm である場合のスペクトルのみに、 $0.135 \times 1.1 = 0.149\text{GeV}/c^2$ 付近の位置にピークが観測された。衝突径数が 0fm 、あるいは 8fm である場合のスペクトルにそれらしきピークが観測されなかった理由は、較正係数が $1.0\text{MeV}/\text{ch}$ である場合と同様のものであると考えられる。

以上より、以下の較正係数が $1.1\text{MeV}/\text{ch}$ である場合の中性パイ中間子の質量についての解析には、衝突径数が 16fm である場合のシミュレーション結果のみが有効であると判断する。

4.4.8 中性パイ中間子の質量分布 (較正係数が 1.2MeV/ch である場合)

較正係数が 1.2MeV/ch、衝突径数が 0fm である場合の中性パイ中間子の質量分布を以下に示す。

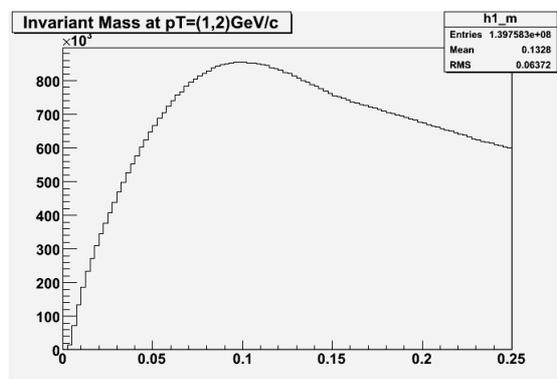


図 34: 中性パイ中間子の質量分布 (較正係数 = 1.2MeV/ch, 衝突径数 = 0fm)

較正係数が 1.2MeV/ch、衝突径数が 8fm である場合の中性パイ中間子の質量分布を以下に示す。

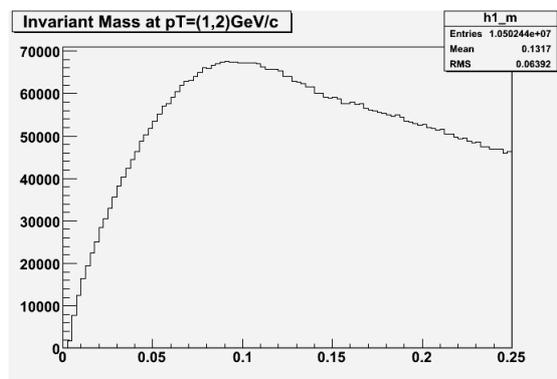


図 35: 中性パイ中間子の質量分布 (較正係数 = 1.2MeV/ch, 衝突径数 = 8fm)

較正係数が $1.2\text{MeV}/\text{ch}$ 、衝突径数が 16fm である場合の中性パイ中間子の質量分布を以下に示す。

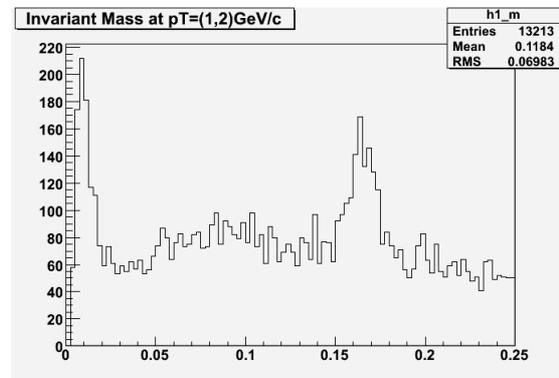


図 36: 中性パイ中間子の質量分布 (較正係数 = $1.2\text{MeV}/\text{ch}$, 衝突径数 = 16fm)

以上、較正係数が $1.2\text{MeV}/\text{ch}$ である 3 つのスペクトルについて、衝突径数が 16fm である場合のスペクトルのみに、 $0.135 \times 1.2 = 0.162\text{GeV}/c^2$ 付近の位置にピークが観測された。衝突径数が 0fm 、あるいは 8fm である場合のスペクトルにそれらしきピークが観測されなかった理由は、較正係数が $1.0\text{MeV}/\text{ch}$ である場合と同様のものであると考えられる。

以上より、以下の較正係数が $1.2\text{MeV}/\text{ch}$ である場合の中性パイ中間子の質量についての解析には、衝突径数が 16fm である場合のシミュレーション結果のみが有効であると判断する。

5 解析

この節では、本研究においてどのような解析を行ったか、およびその解析結果について述べる。なお、本節では簡単のため、以下の様に記す。

これまでの表記	本節での表記
エネルギーピーク [GeV]	E
質量ピーク [GeV]	M
較正係数 [MeV/ch]	C
衝突径数 [fm]	b
衝突径数が x である場合	$b = x$ の上付き添え字
背景粒子のスペクトルの関数形	BG
BG として指数関数を仮定した場合	Expo の下付き添え字
BG として 2 次関数を仮定した場合	Pol2 の下付き添え字
BG として 3 次関数を仮定した場合	Pol3 の下付き添え字
BG として 4 次関数を仮定した場合	Pol4 の下付き添え字

5.1 解析手法

この小節では、最小電離粒子の損失エネルギーと中性パイ中間子の質量それぞれのピークの値が、較正係数に合わせて確かに変化しているかを調べるに当たり、それぞれのピーク値をどのように解析したかについて述べる。

5.1.1 クラスタのエネルギー分布の解析手法

ESD から得られた全てのクラスタのエネルギースペクトルには、エネルギーにして $0.25 \times C$ GeV 付近の領域に、最小電離粒子のエネルギー損失によるものと思われるピークが確かに現れた。しかし、スペクトルには最小電離粒子が作るピークだけではなく、背景（バックグラウンド）粒子が作るスロープもまた観測されている。

そこで最小電離粒子が作るピークのエネルギーを調べるために、最小電離粒子が作るピークと背景粒子が作るスロープとでそれぞれに別の関数を仮定して、最小電離粒子が失うエネルギーのピーク値を求めるという解析手法をとる。

5.1.2 中性パイ中間子の質量分布の解析手法

中性パイ中間子の質量分布に関しては、衝突径数が 16fm のスペクトルに限って、確かにだいた $0.135 \times C$ GeV 付近の領域にピークが観測された。また、中性パイ中

間子の質量分布についても、クラスターのエネルギー分布と同様に背景粒子による分布が観測された。そのため解析手法として、クラスターのエネルギー分布の解析手法と同様に、中性パイ中間子の質量エネルギーが作るピークと背景粒子が作るスロープとでそれぞれに別の関数を仮定して、中性パイ中間子の質量ピーク値を求めるという手法をとる。

5.1.3 系統誤差について

前述の通り本研究における解析は、最小電離粒子もしくは中性パイ中間子と背景粒子が作るスペクトルについてそれぞれ関数形を仮定している。

最小電離粒子が損失するエネルギーはほぼ一定であることがわかっているため、そのスペクトルはガウス関数と仮定してよさそうだが、背景粒子が作るスペクトルについては現状適切な関数形がわかっていない。そのため、本研究では背景粒子が作るスペクトルとして指数関数、2次関数、3次関数、4次関数の4通りを仮定して解析する。このことから、同じ較正係数、衝突径数のシミュレーション結果から4通りの解析結果が得られることになる。それらの標準偏差 σ_E を背景粒子について適切な関数形がわかっていないことに起因する系統誤差とし、以下の式で求める。

$$\sigma_E = \sqrt{\frac{1}{4} \left\{ (E_{\text{Expo}} - \bar{E})^2 + (E_{\text{Pol2}} - \bar{E})^2 + (E_{\text{Pol3}} - \bar{E})^2 + (E_{\text{Pol4}} - \bar{E})^2 \right\}} \quad (7)$$

ここで \bar{E} は E_{Expo} 、 E_{Pol2} 、 E_{Pol3} 、 E_{Pol4} の相加平均を表している。

一方の中性パイ中間子の質量もほぼ一定であることが分かっているため、そのスペクトルはガウス関数と仮定してよさそうである。しかし、最小電離損失の場合と同様に、背景粒子がつくるスペクトルについては適切な関数形がわかっていない。したがって、中性パイ中間子の質量解析についても、最小電離損失解析の場合と同様に、以下の式で標準偏差 σ_M を求め、それを背景粒子について適切な関数形がわかっていないことに起因する系統誤差とする。

$$\sigma_M = \sqrt{\frac{1}{4} \left\{ (M_{\text{Expo}} - \bar{M})^2 + (M_{\text{Pol2}} - \bar{M})^2 + (M_{\text{Pol3}} - \bar{M})^2 + (M_{\text{Pol4}} - \bar{M})^2 \right\}} \quad (8)$$

ここで \bar{M} は M_{Expo} 、 M_{Pol2} 、 M_{Pol3} 、 M_{Pol4} の相加平均を表している。

5.2 最小電離粒子の損失エネルギー解析結果

この小節では、最小電離粒子の損失エネルギーについて、実際に前小節の手法でスペクトルを解析した結果について述べる。なお、各スペクトルの横軸はエネルギー [GeV] を表している。

5.2.1 解析スペクトル

以下に、本研究における、クラスターのエネルギー分布を解析したスペクトルを示す。スペクトルはそれぞれ較正係数、衝突径数、背景粒子に仮定した関数形別に、以下表の組み合わせとなっている。

較正係数 [MeV/ch]	0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2
衝突径数 [fm]	0, 8, 16
背景粒子に仮定した関数形	指数関数, 2 次関数, 3 次関数, 4 次関数

以下、計 60 個のスペクトルを示す。ここで、スペクトル中の赤線は最小電離粒子のエネルギー損失が作るピーク（ガウス関数）、青線は背景粒子が作るスロープ（仮定した各関数）、緑線はそれらの足し合わせを表している。また、解析を行ったエネルギーの範囲は 0.10 から 0.50 GeV の間である。

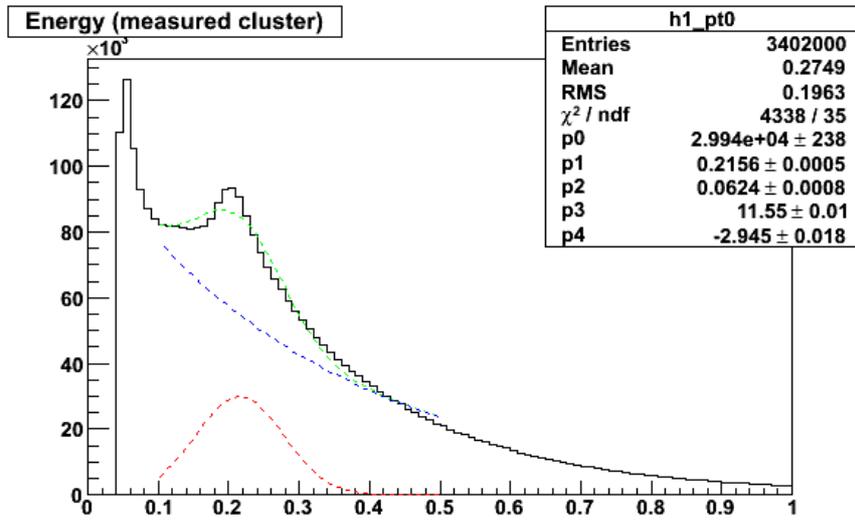


図 37: 最小電離損失ピーク (較正係数 = 0.8MeV/ch, 衝突径数 = 0fm, 背景粒子 = 指数関数)

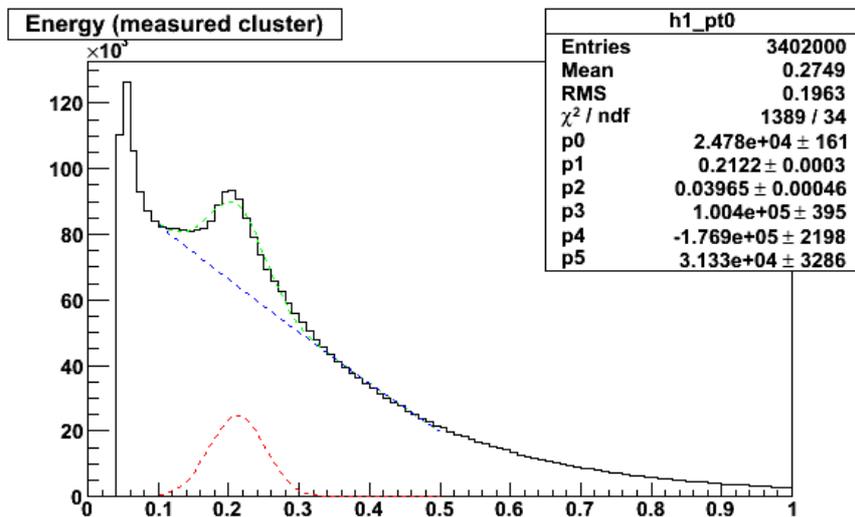


図 38: 最小電離損失ピーク (較正係数 = 0.8MeV/ch, 衝突径数 = 0fm, 背景粒子 = 2次関数)

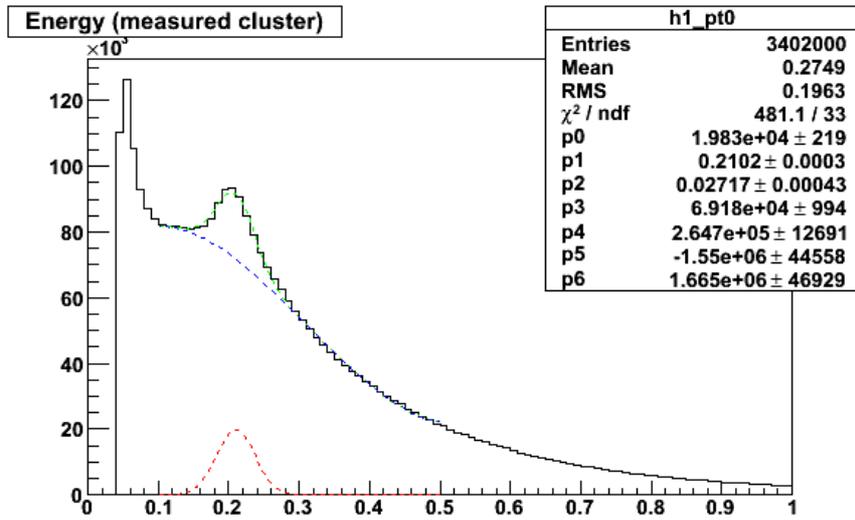


図 39: 最小電離損失ピーク (較正係数 = 0.8MeV/ch, 衝突径数 = 0fm, 背景粒子 = 3 次関数)

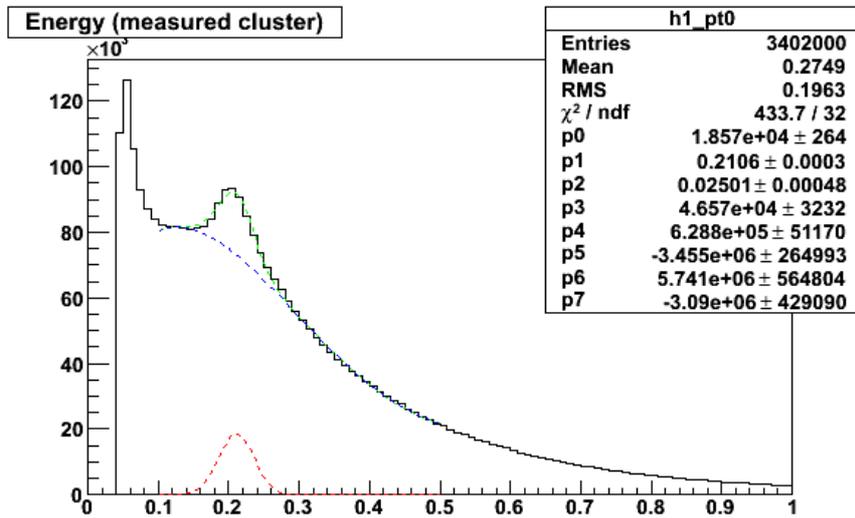


図 40: 最小電離損失ピーク (較正係数 = 0.8MeV/ch, 衝突径数 = 0fm, 背景粒子 = 4 次関数)

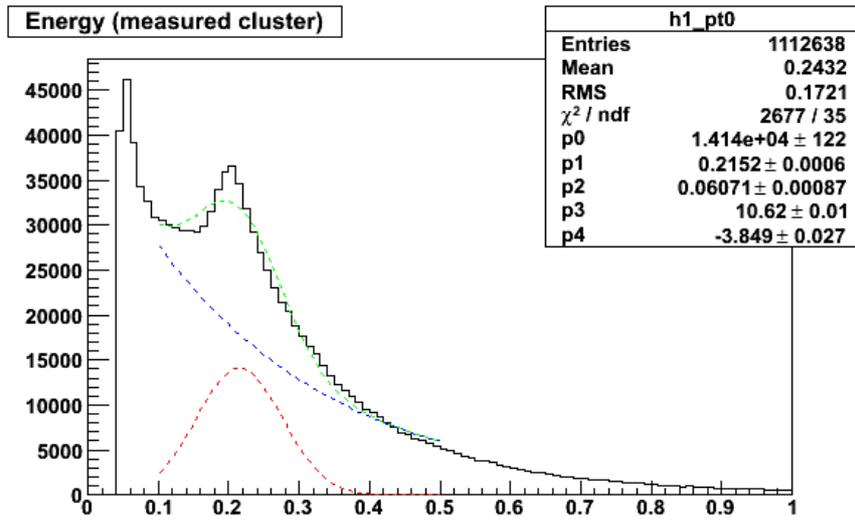


図 41: 最小電離損失ピーク (較正係数 = 0.8MeV/ch, 衝突径数 = 8fm, 背景粒子 = 指数関数)

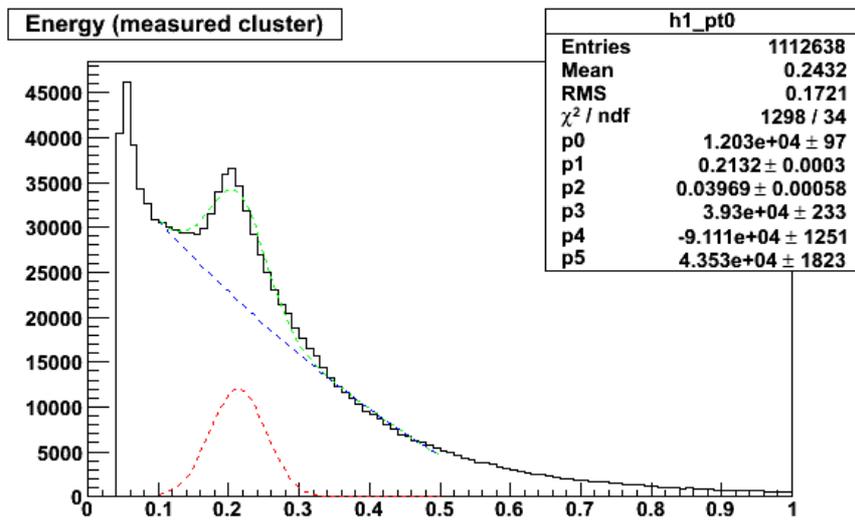


図 42: 最小電離損失ピーク (較正係数 = 0.8MeV/ch, 衝突径数 = 8fm, 背景粒子 = 2次関数)

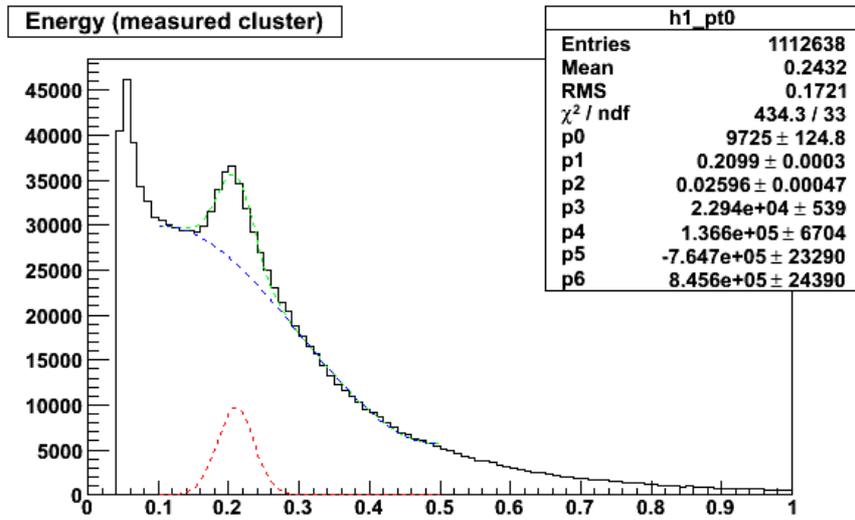


図 43: 最小電離損失ピーク (較正係数 = 0.8MeV/ch, 衝突径数 = 8fm, 背景粒子 = 3 次関数)

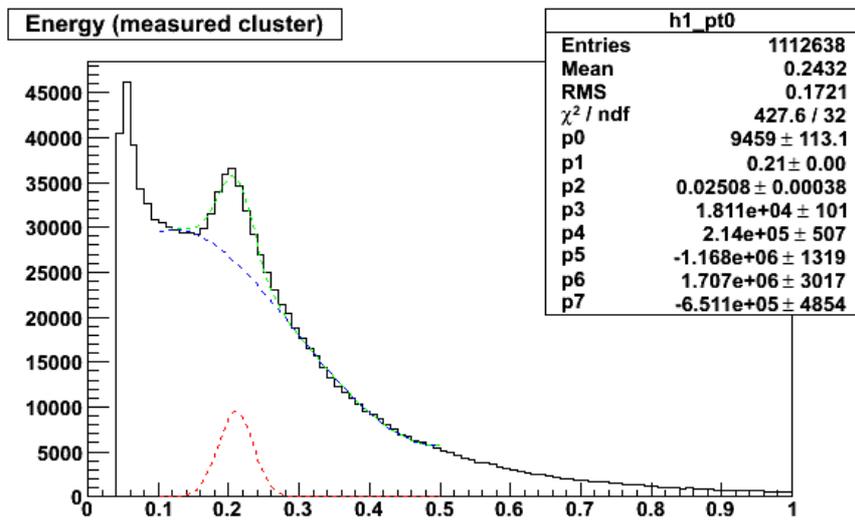


図 44: 最小電離損失ピーク (較正係数 = 0.8MeV/ch, 衝突径数 = 8fm, 背景粒子 = 4 次関数)

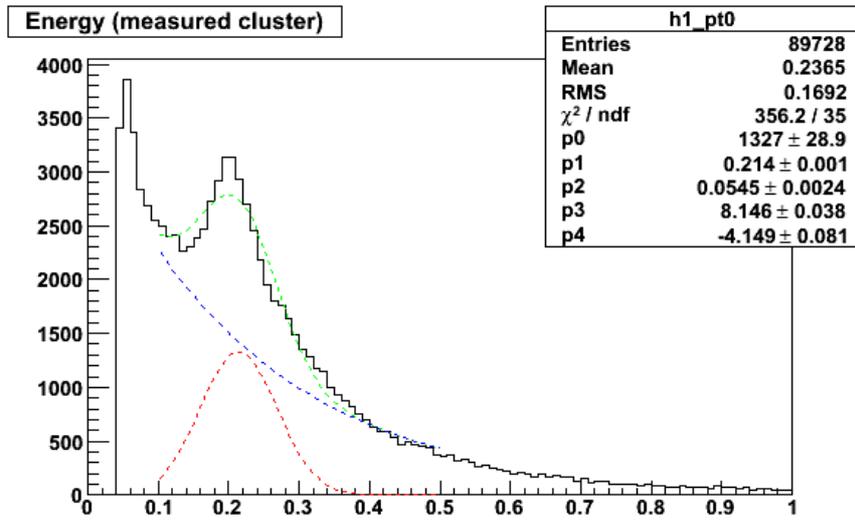


図 45: 最小電離損失ピーク (較正係数 = 0.8MeV/ch, 衝突径数 = 16fm, 背景粒子 = 指数関数)

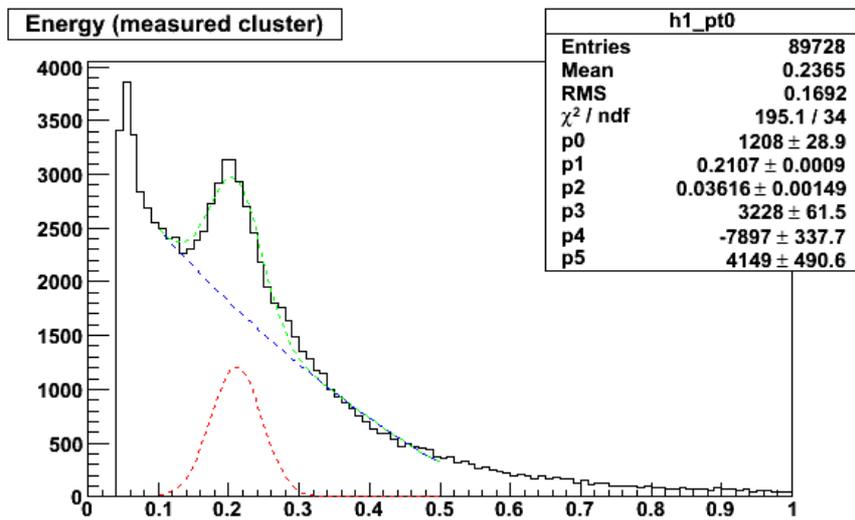


図 46: 最小電離損失ピーク (較正係数 = 0.8MeV/ch, 衝突径数 = 16fm, 背景粒子 = 2次関数)

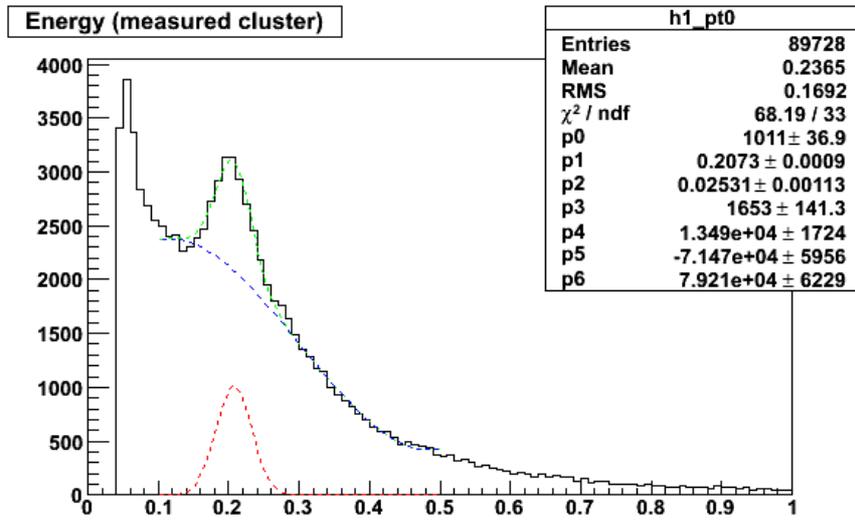


図 47: 最小電離損失ピーク (較正係数 = 0.8MeV/ch, 衝突径数 = 16fm, 背景粒子 = 3 次関数)

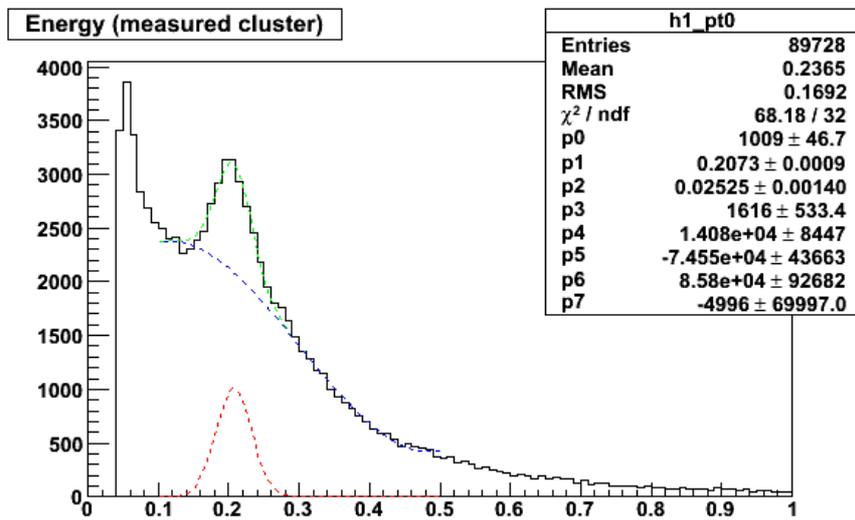


図 48: 最小電離損失ピーク (較正係数 = 0.8MeV/ch, 衝突径数 = 16fm, 背景粒子 = 4 次関数)

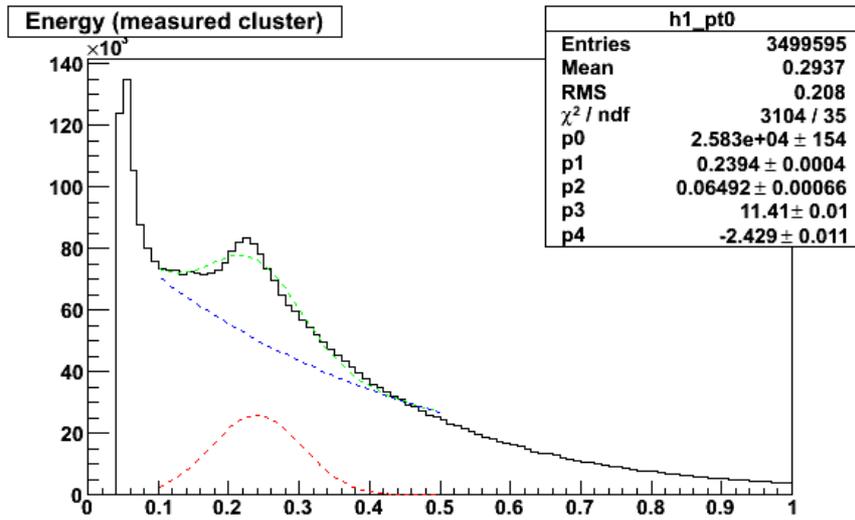


図 49: 最小電離損失ピーク (較正係数 = 0.9MeV/ch, 衝突径数 = 0fm, 背景粒子 = 指数関数)

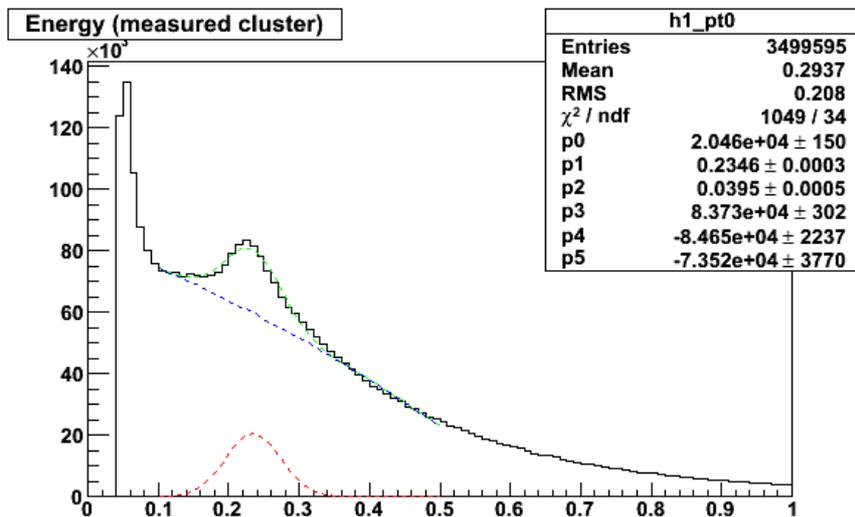


図 50: 最小電離損失ピーク (較正係数 = 0.9MeV/ch, 衝突径数 = 0fm, 背景粒子 = 2次関数)

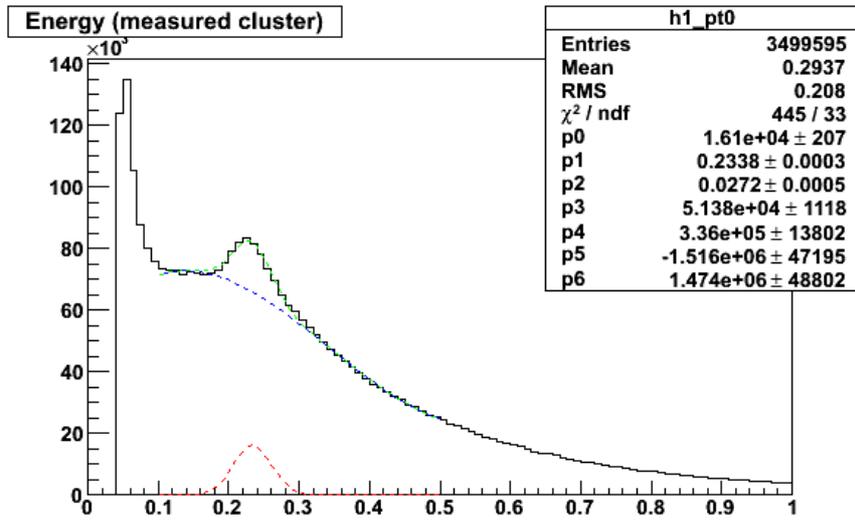


図 51: 最小電離損失ピーク (較正係数 = 0.9MeV/ch, 衝突径数 = 0fm, 背景粒子 = 3 次関数)

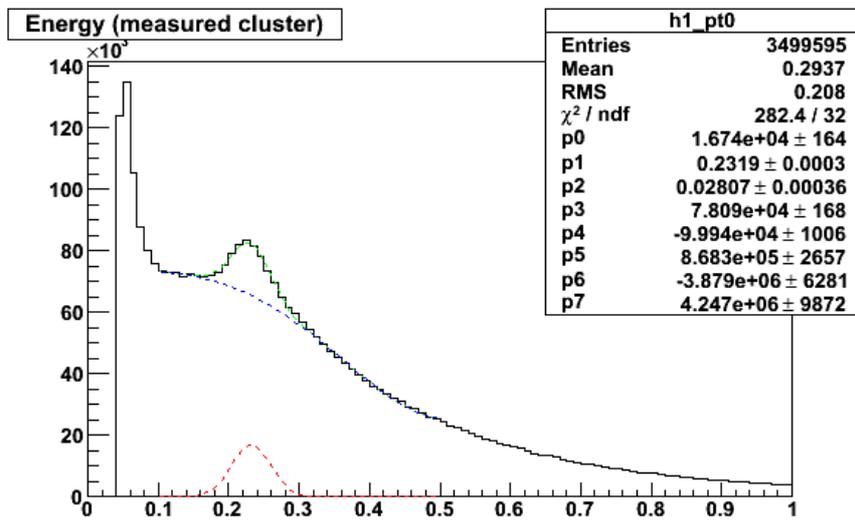


図 52: 最小電離損失ピーク (較正係数 = 0.9MeV/ch, 衝突径数 = 0fm, 背景粒子 = 4 次関数)

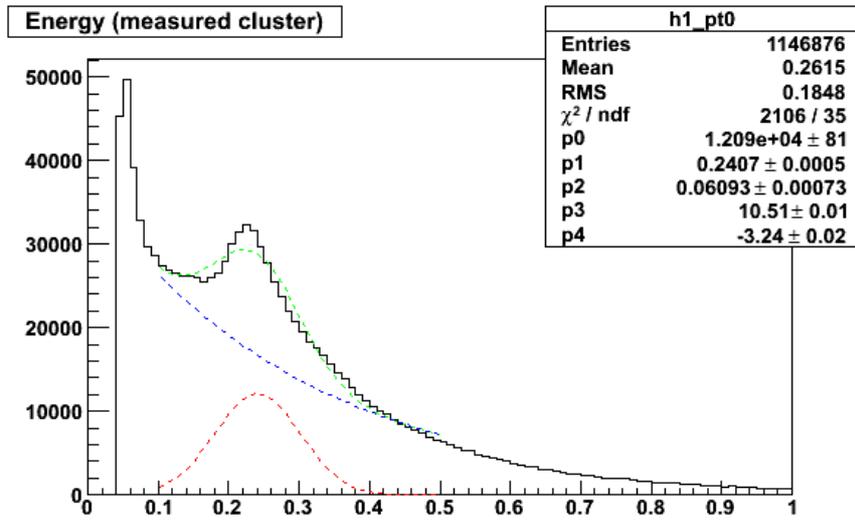


図 53: 最小電離損失ピーク (較正係数 = 0.9MeV/ch, 衝突径数 = 8fm, 背景粒子 = 指数関数)

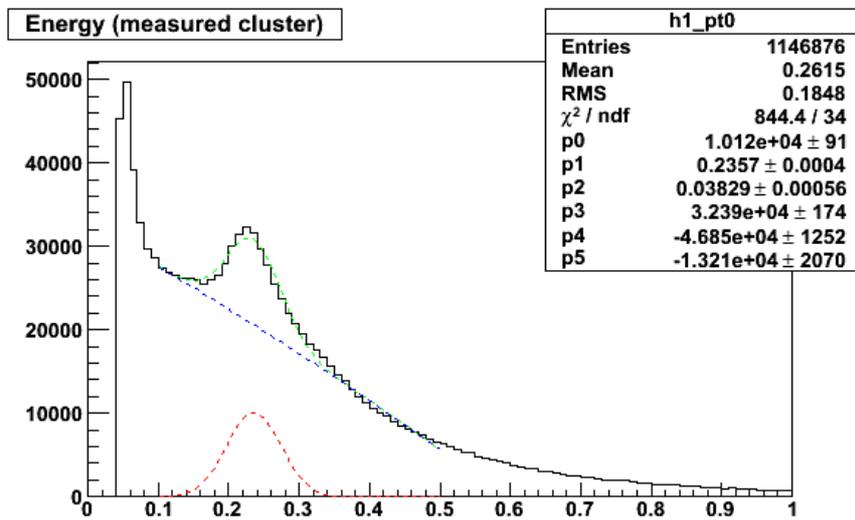


図 54: 最小電離損失ピーク (較正係数 = 0.9MeV/ch, 衝突径数 = 8fm, 背景粒子 = 2次関数)

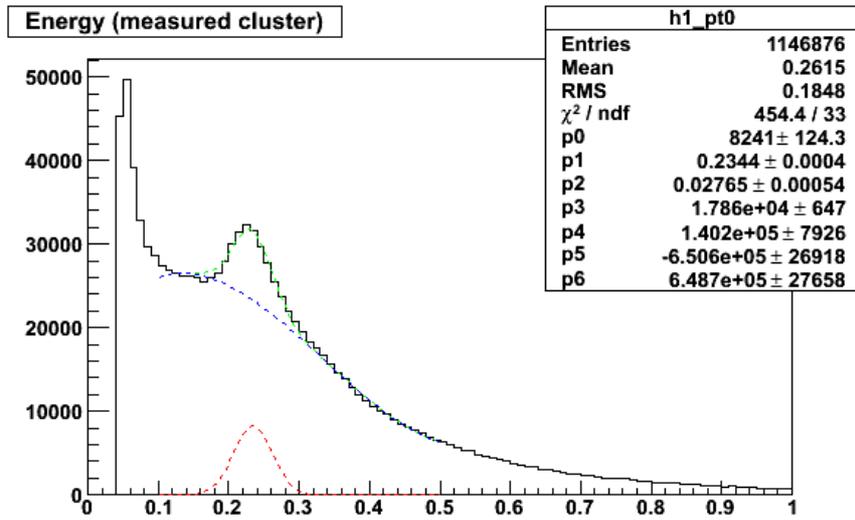


図 55: 最小電離損失ピーク (較正係数 = 0.9MeV/ch, 衝突径数 = 8fm, 背景粒子 = 3 次関数)

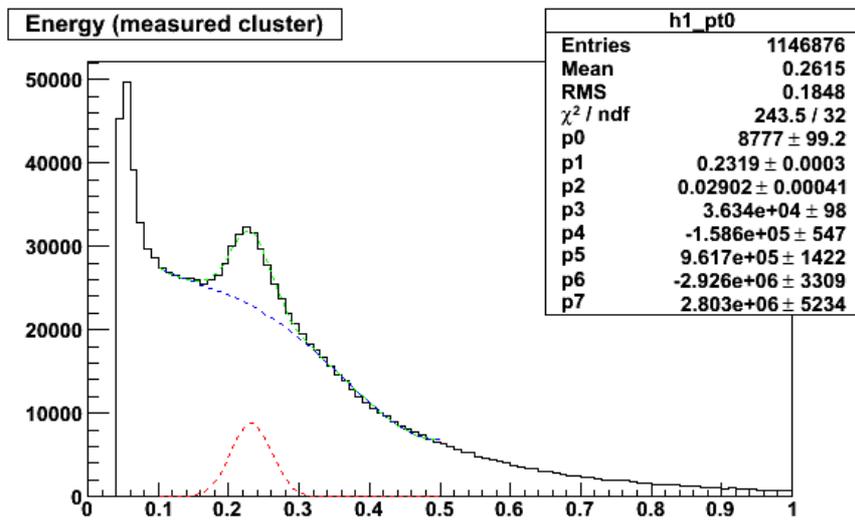


図 56: 最小電離損失ピーク (較正係数 = 0.9MeV/ch, 衝突径数 = 8fm, 背景粒子 = 4 次関数)

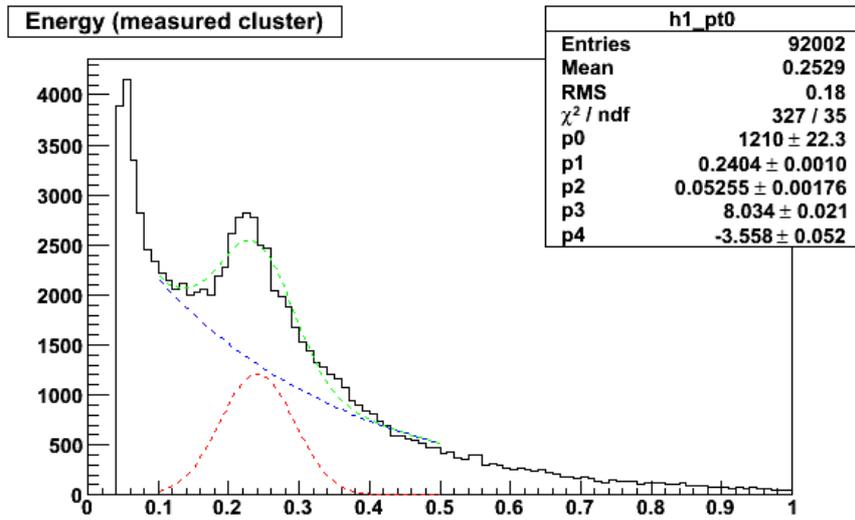


図 57: 最小電離損失ピーク (較正係数 = 0.9MeV/ch, 衝突径数 = 16fm, 背景粒子 = 指数関数)

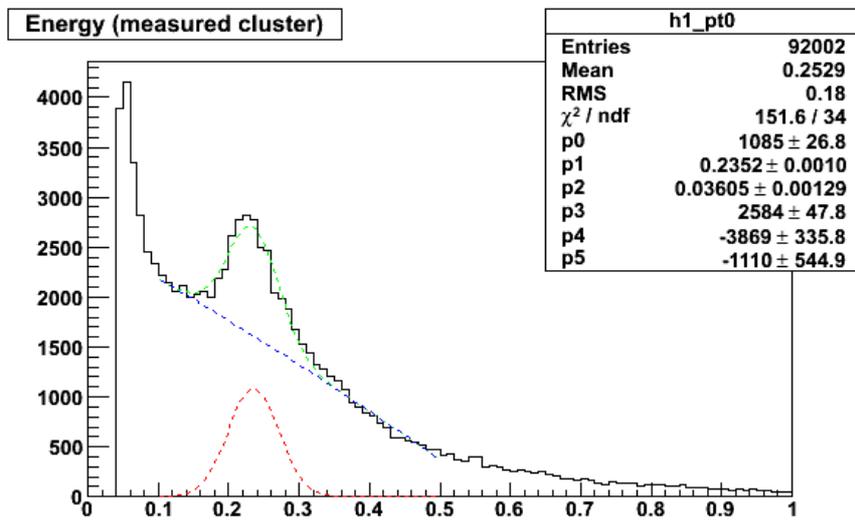


図 58: 最小電離損失ピーク (較正係数 = 0.9MeV/ch, 衝突径数 = 16fm, 背景粒子 = 2次関数)

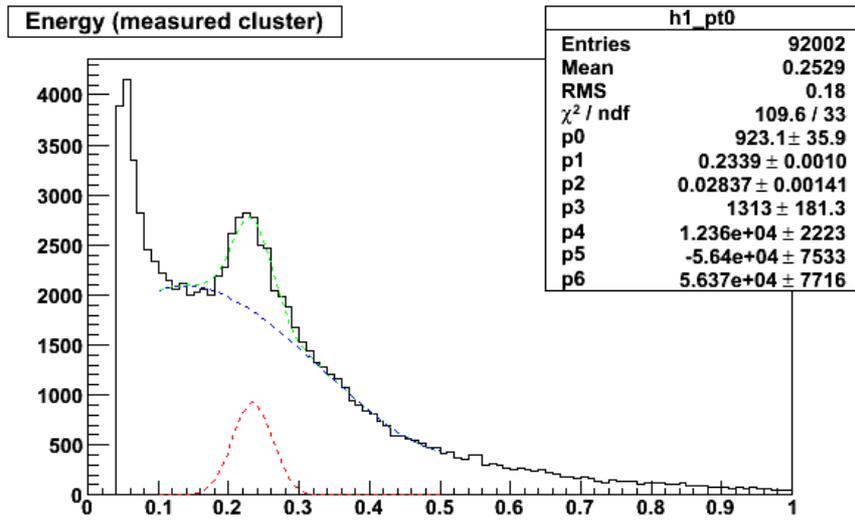


図 59: 最小電離損失ピーク (較正係数 = 0.9MeV/ch, 衝突径数 = 16fm, 背景粒子 = 3 次関数)

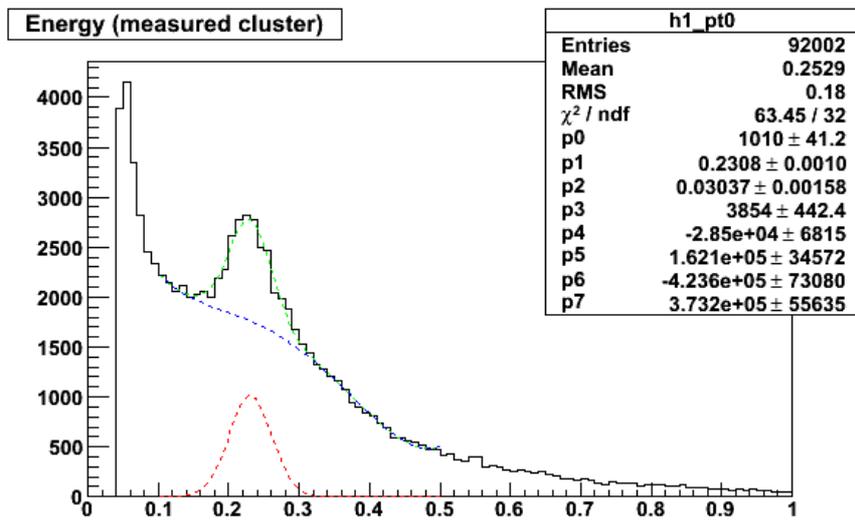


図 60: 最小電離損失ピーク (較正係数 = 0.9MeV/ch, 衝突径数 = 16fm, 背景粒子 = 4 次関数)

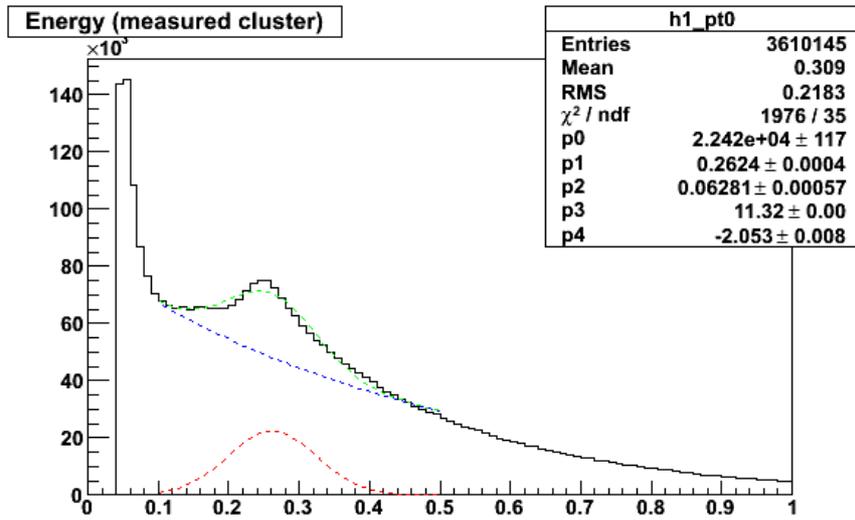


図 61: 最小電離損失ピーク (較正係数 = 1.0MeV/ch, 衝突径数 = 0fm, 背景粒子 = 指数関数)

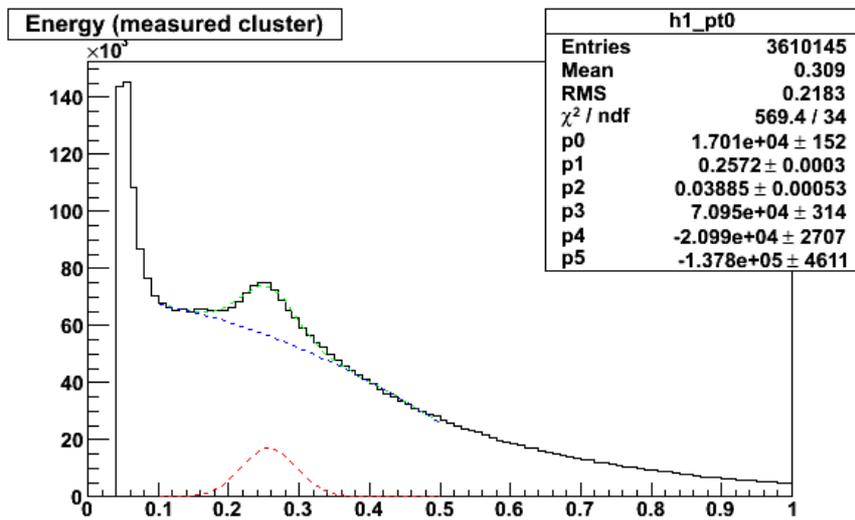


図 62: 最小電離損失ピーク (較正係数 = 1.0MeV/ch, 衝突径数 = 0fm, 背景粒子 = 2次関数)

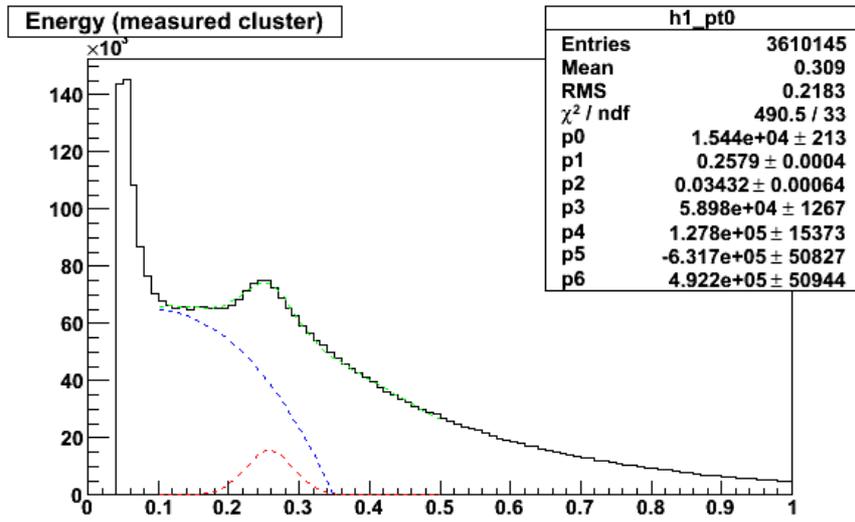


図 63: 最小電離損失ピーク (較正係数 = 1.0MeV/ch, 衝突径数 = 0fm, 背景粒子 = 3次関数)

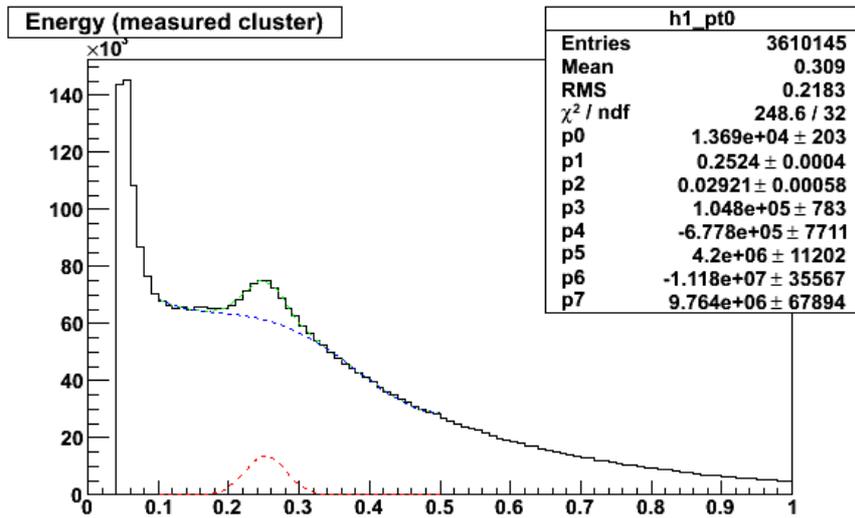


図 64: 最小電離損失ピーク (較正係数 = 1.0MeV/ch, 衝突径数 = 0fm, 背景粒子 = 4次関数)

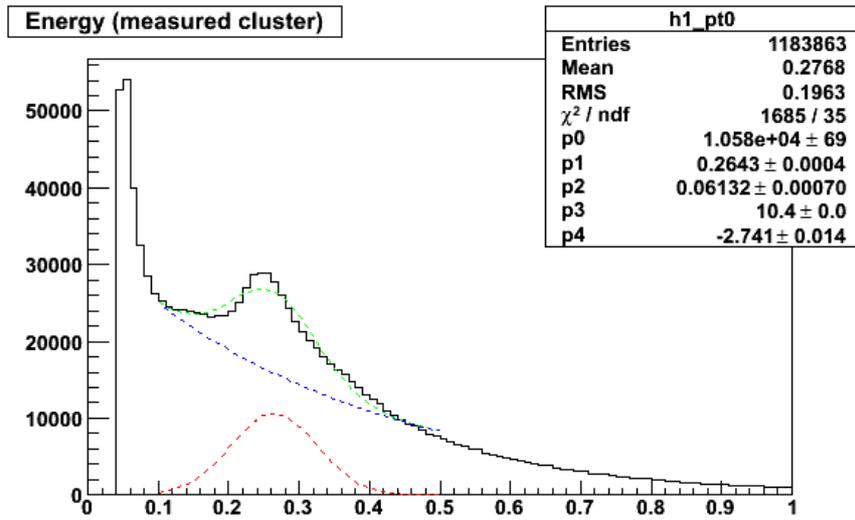


図 65: 最小電離損失ピーク (較正係数 = 1.0MeV/ch, 衝突径数 = 8fm, 背景粒子 = 指数関数)

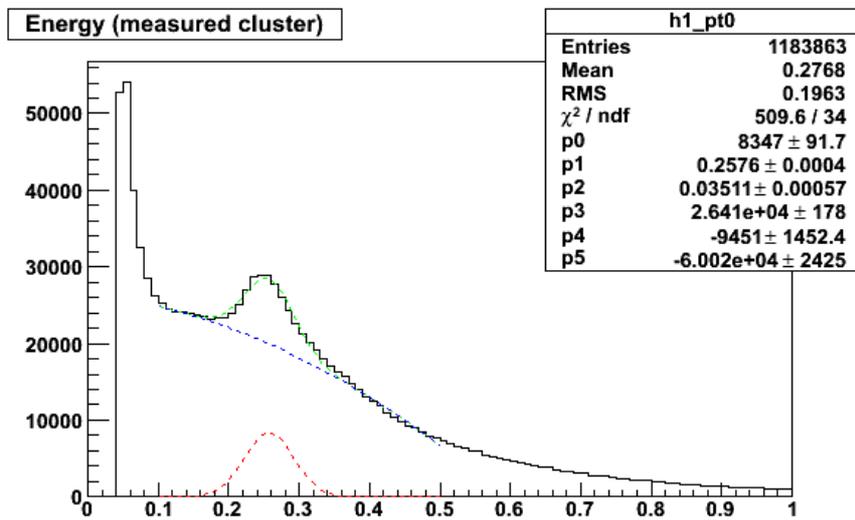


図 66: 最小電離損失ピーク (較正係数 = 1.0MeV/ch, 衝突径数 = 8fm, 背景粒子 = 2次関数)

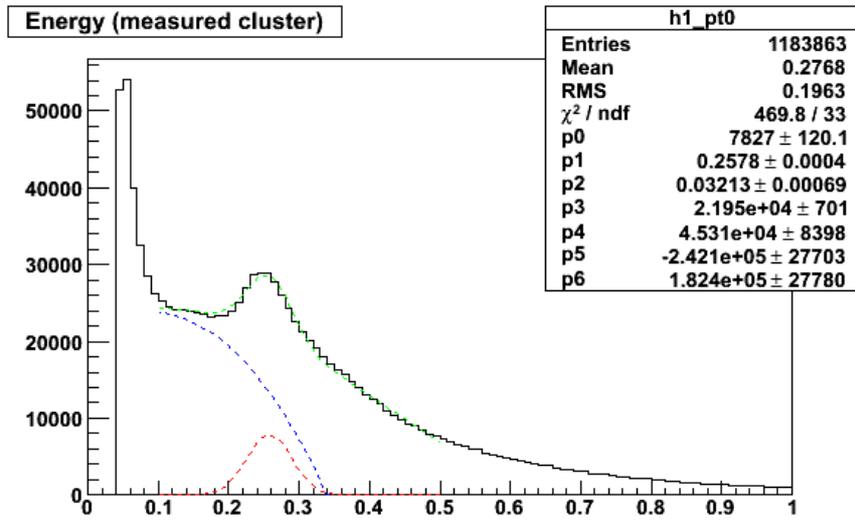


図 67: 最小電離損失ピーク (較正係数 = 1.0MeV/ch, 衝突径数 = 8fm, 背景粒子 = 3 次関数)

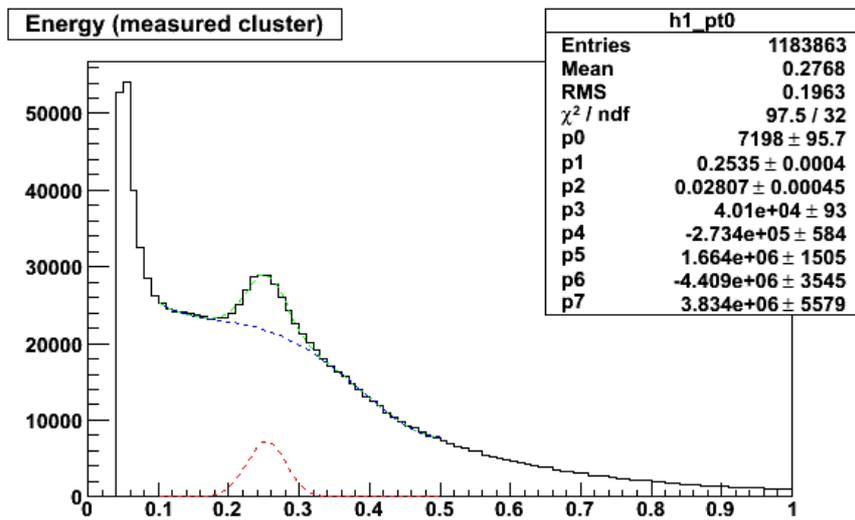


図 68: 最小電離損失ピーク (較正係数 = 1.0MeV/ch, 衝突径数 = 8fm, 背景粒子 = 4 次関数)

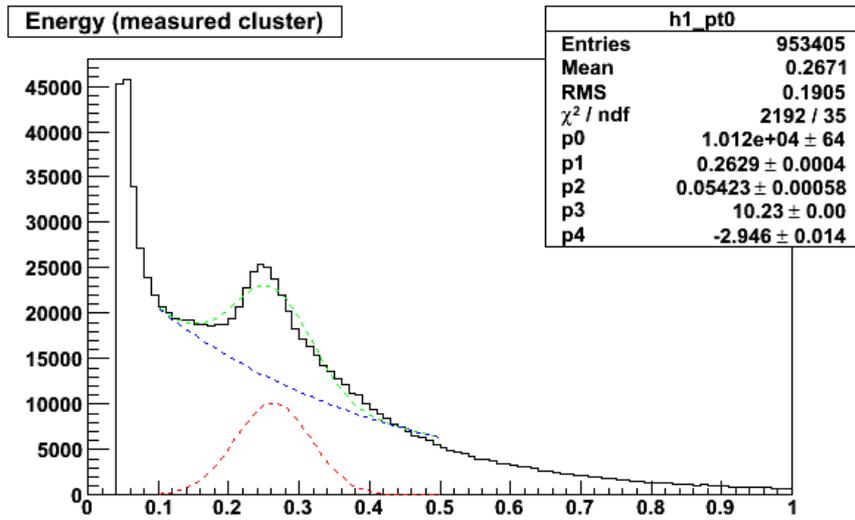


図 69: 最小電離損失ピーク (較正係数 = 1.0MeV/ch, 衝突径数 = 16fm, 背景粒子 = 指数関数)

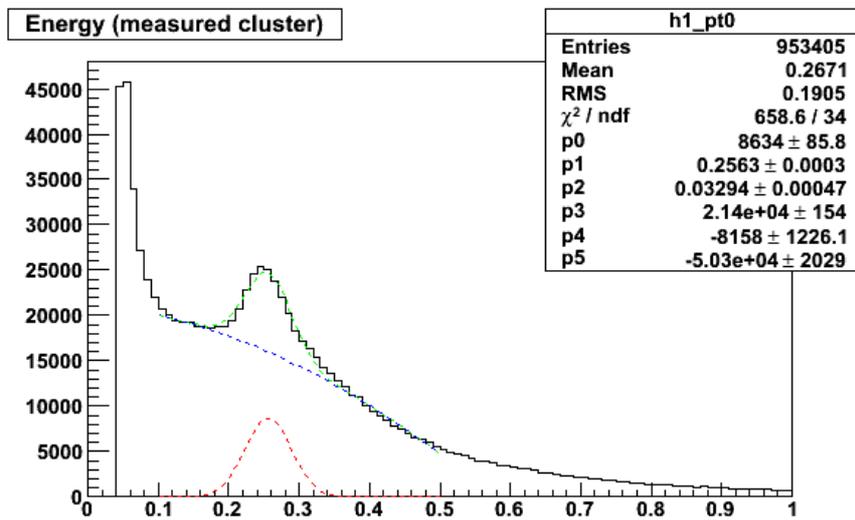


図 70: 最小電離損失ピーク (較正係数 = 1.0MeV/ch, 衝突径数 = 16fm, 背景粒子 = 2次関数)

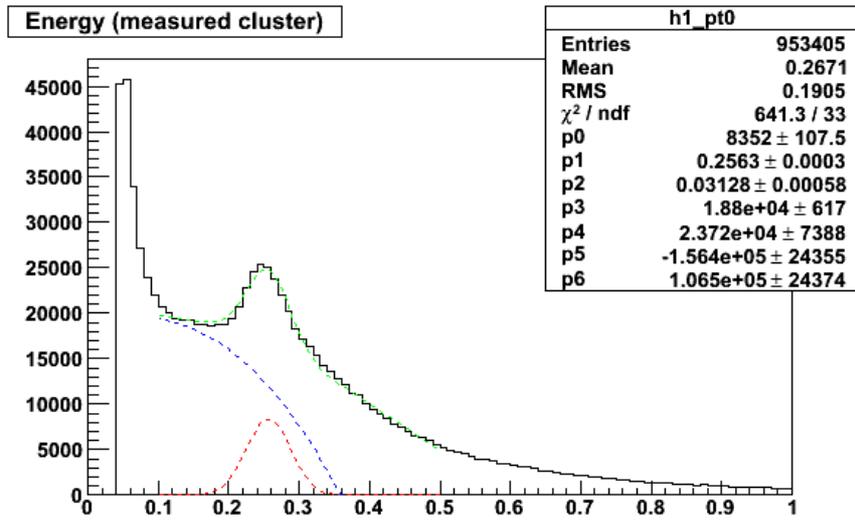


図 71: 最小電離損失ピーク (較正係数 = 1.0MeV/ch, 衝突径数 = 16fm, 背景粒子 = 3 次関数)

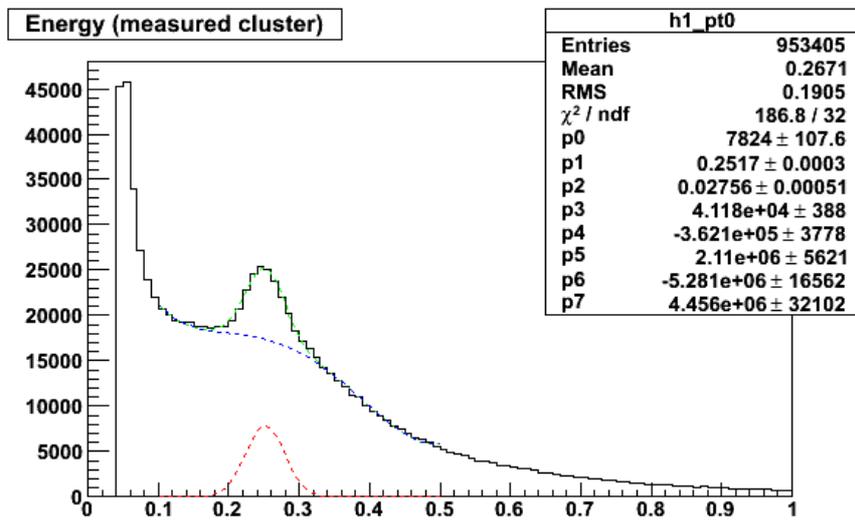


図 72: 最小電離損失ピーク (較正係数 = 1.0MeV/ch, 衝突径数 = 16fm, 背景粒子 = 4 次関数)

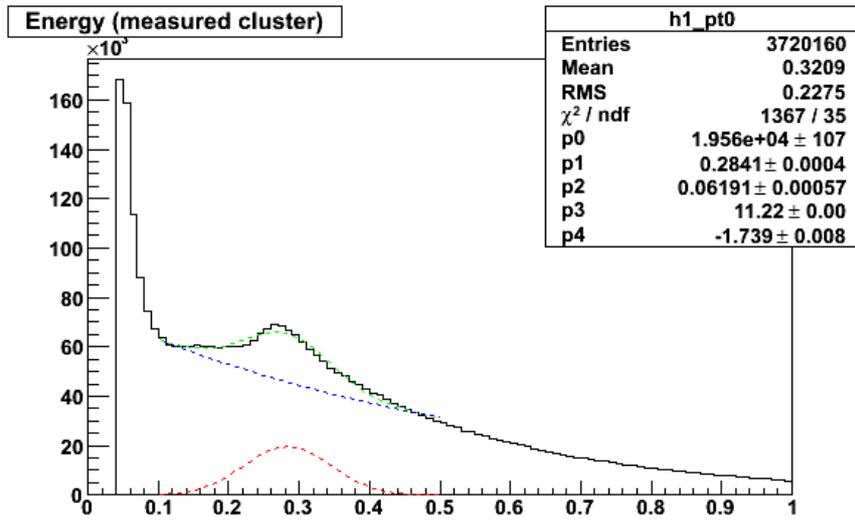


図 73: 最小電離損失ピーク (較正係数 = 1.1MeV/ch, 衝突径数 = 0fm, 背景粒子 = 指数関数)

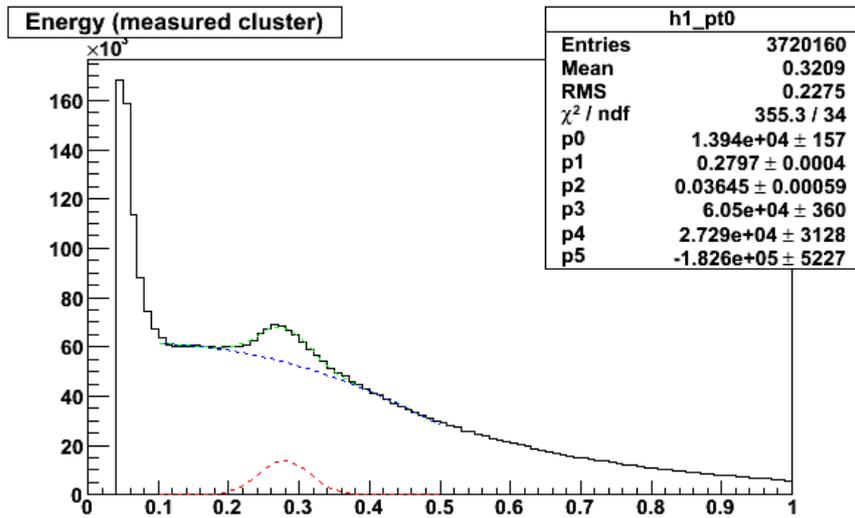


図 74: 最小電離損失ピーク (較正係数 = 1.1MeV/ch, 衝突径数 = 0fm, 背景粒子 = 2次関数)

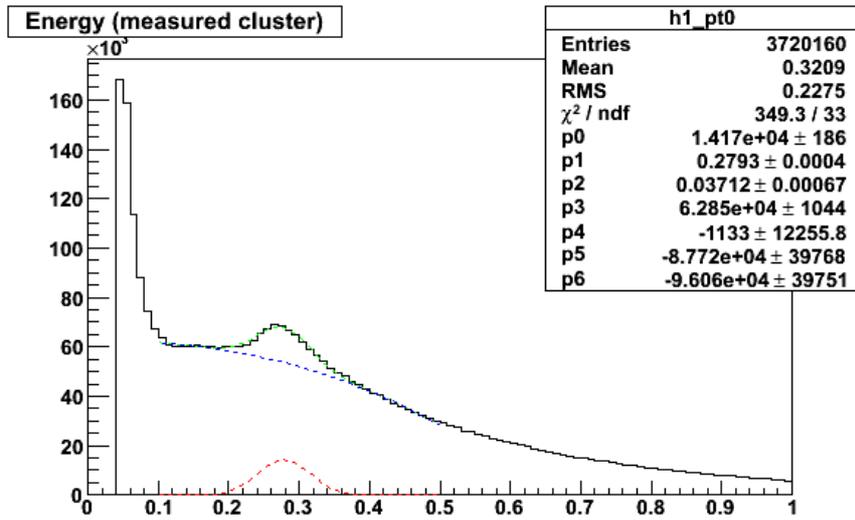


図 75: 最小電離損失ピーク (較正係数 = 1.1MeV/ch, 衝突径数 = 0fm, 背景粒子 = 3 次関数)

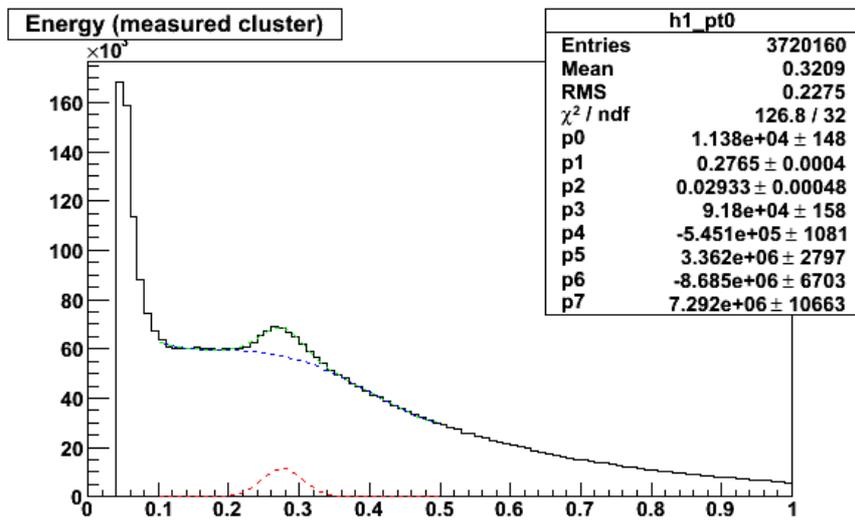


図 76: 最小電離損失ピーク (較正係数 = 1.1MeV/ch, 衝突径数 = 0fm, 背景粒子 = 4 次関数)

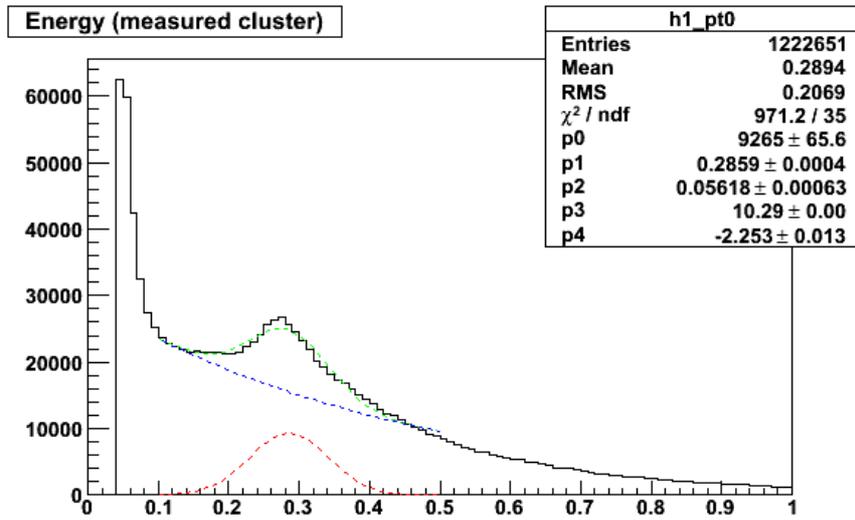


図 77: 最小電離損失ピーク (較正係数 = 1.1MeV/ch, 衝突径数 = 8fm, 背景粒子 = 指数関数)

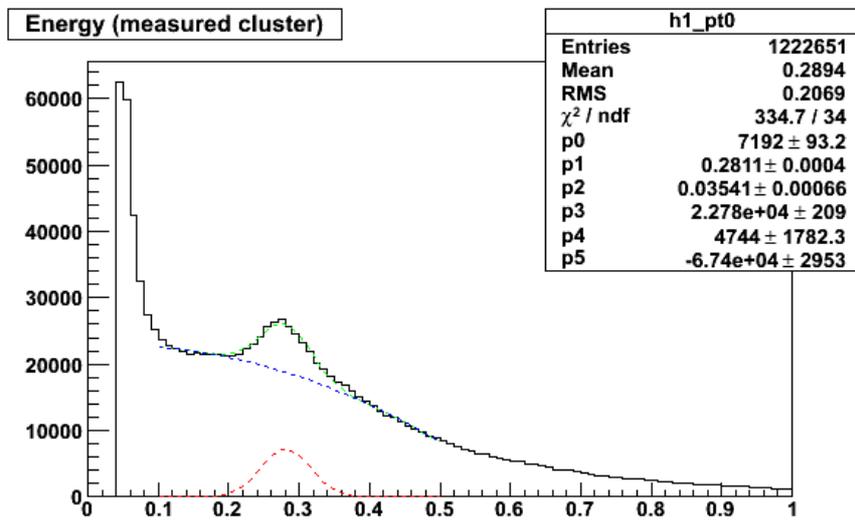


図 78: 最小電離損失ピーク (較正係数 = 1.1MeV/ch, 衝突径数 = 8fm, 背景粒子 = 2次関数)

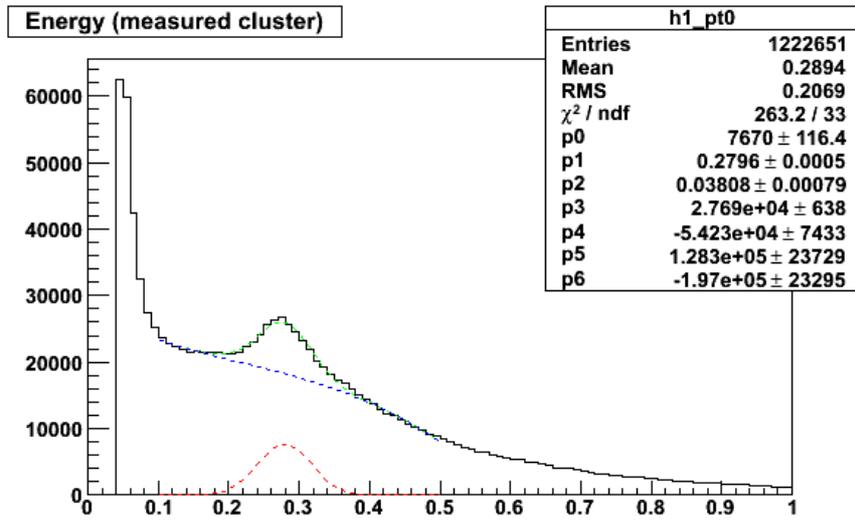


図 79: 最小電離損失ピーク (較正係数 = 1.1MeV/ch, 衝突径数 = 8fm, 背景粒子 = 3 次関数)

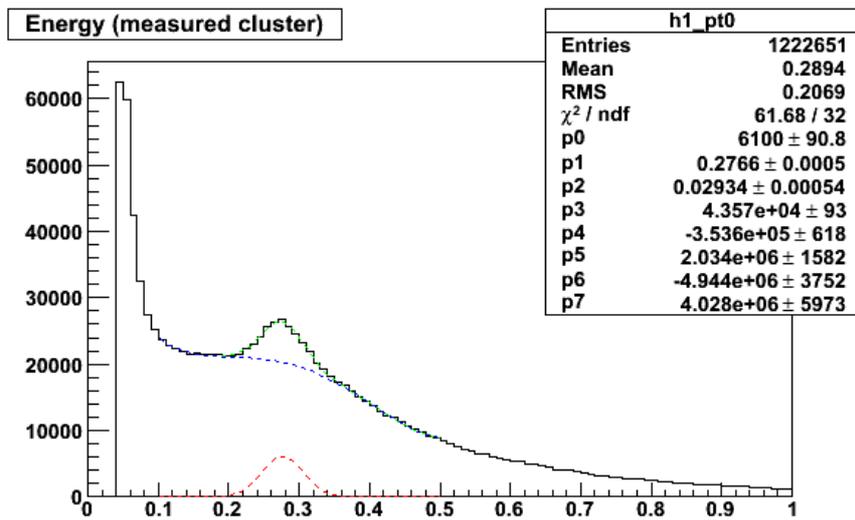


図 80: 最小電離損失ピーク (較正係数 = 1.1MeV/ch, 衝突径数 = 8fm, 背景粒子 = 4 次関数)

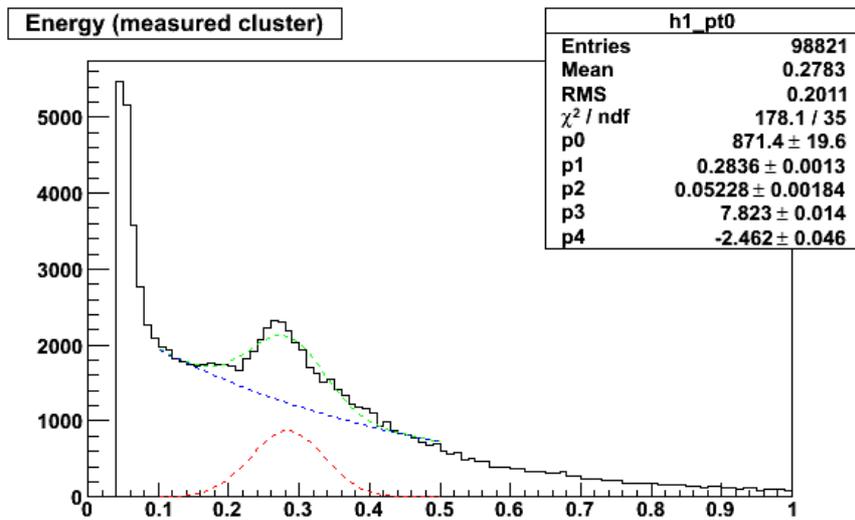


図 81: 最小電離損失ピーク (較正係数 = 1.1MeV/ch, 衝突径数 = 16fm, 背景粒子 = 指数関数)

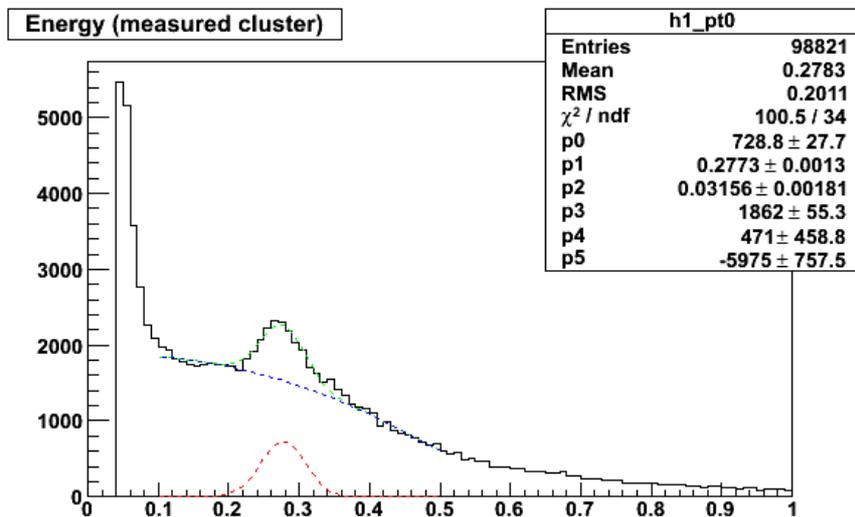


図 82: 最小電離損失ピーク (較正係数 = 1.1MeV/ch, 衝突径数 = 16fm, 背景粒子 = 2次関数)

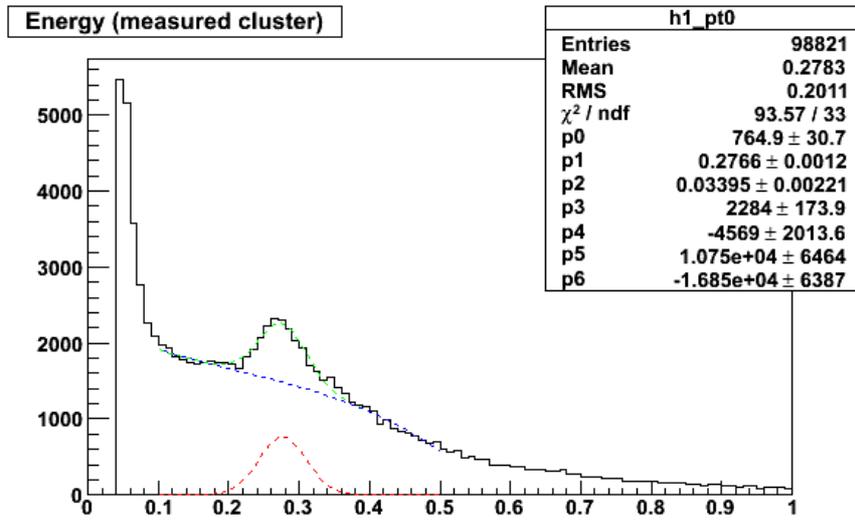


図 83: 最小電離損失ピーク (較正係数 = 1.1MeV/ch, 衝突径数 = 16fm, 背景粒子 = 3 次関数)

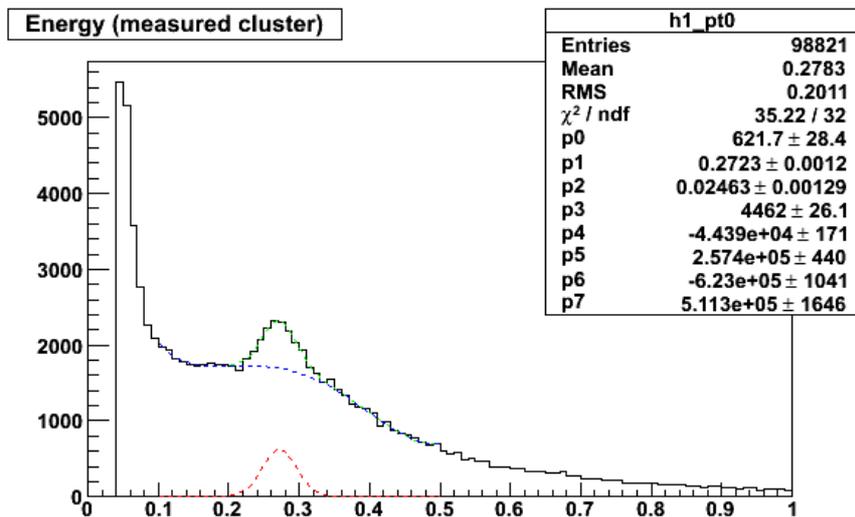


図 84: 最小電離損失ピーク (較正係数 = 1.1MeV/ch, 衝突径数 = 16fm, 背景粒子 = 4 次関数)

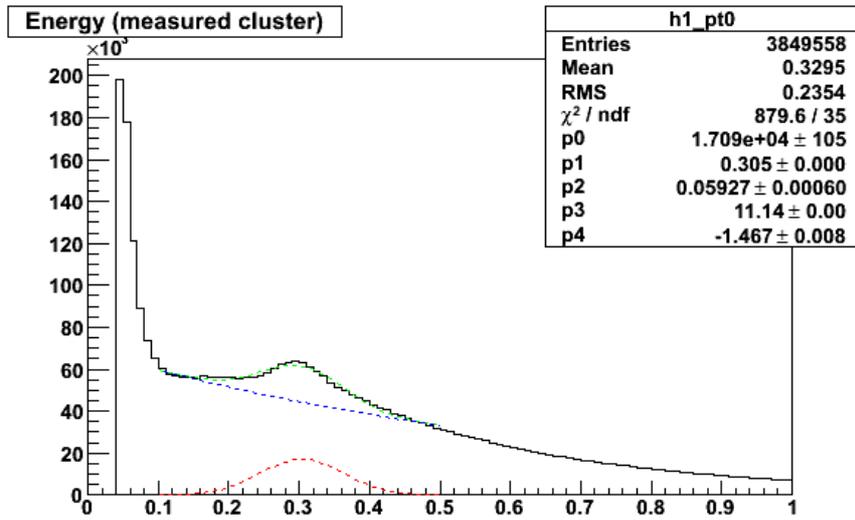


図 85: 最小電離損失ピーク (較正係数 = 1.2MeV/ch, 衝突径数 = 0fm, 背景粒子 = 指数関数)

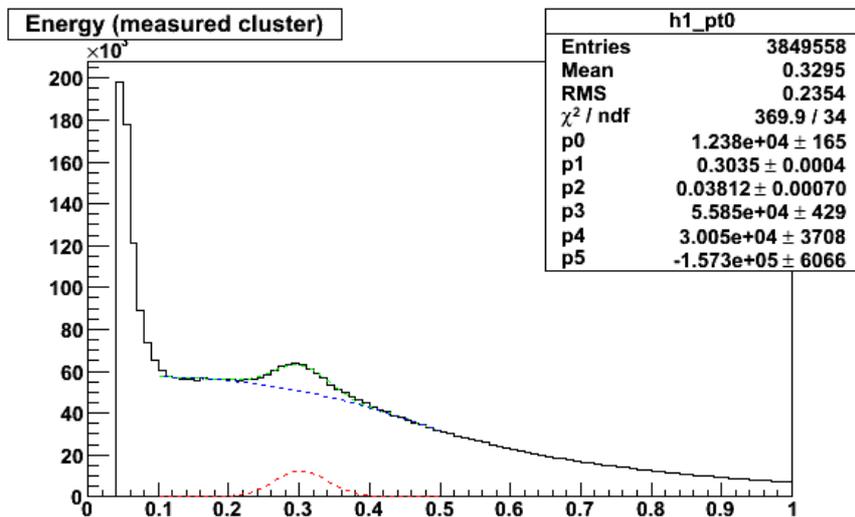


図 86: 最小電離損失ピーク (較正係数 = 1.2MeV/ch, 衝突径数 = 0fm, 背景粒子 = 2次関数)

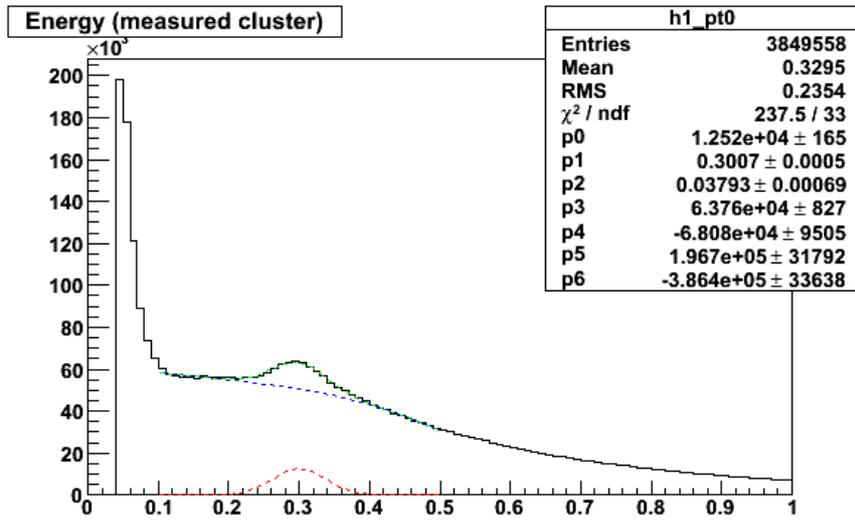


図 87: 最小電離損失ピーク (較正係数 = 1.2MeV/ch, 衝突径数 = 0fm, 背景粒子 = 3 次関数)

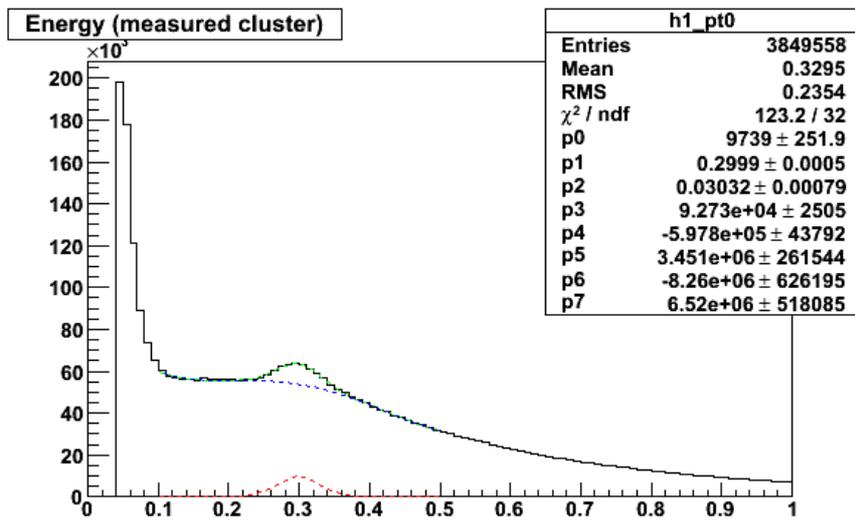


図 88: 最小電離損失ピーク (較正係数 = 1.2MeV/ch, 衝突径数 = 0fm, 背景粒子 = 4 次関数)

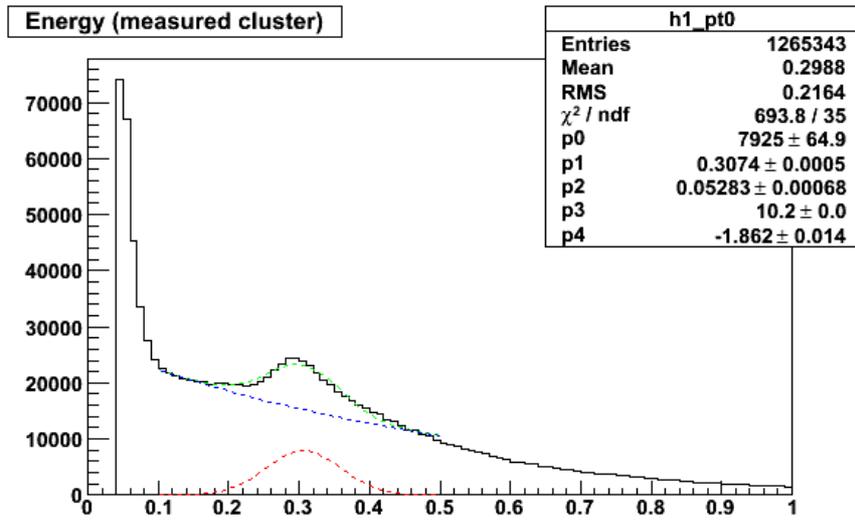


図 89: 最小電離損失ピーク (較正係数 = 1.2MeV/ch, 衝突径数 = 8fm, 背景粒子 = 指数関数)

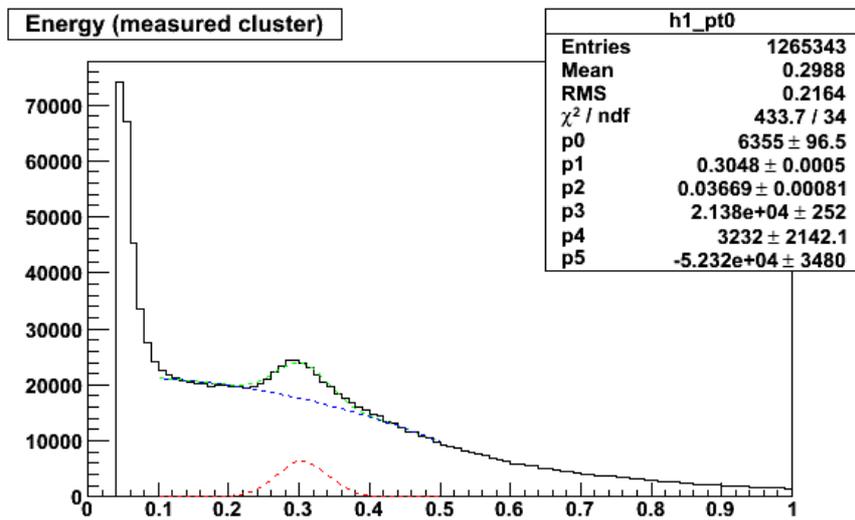


図 90: 最小電離損失ピーク (較正係数 = 1.2MeV/ch, 衝突径数 = 8fm, 背景粒子 = 2次関数)

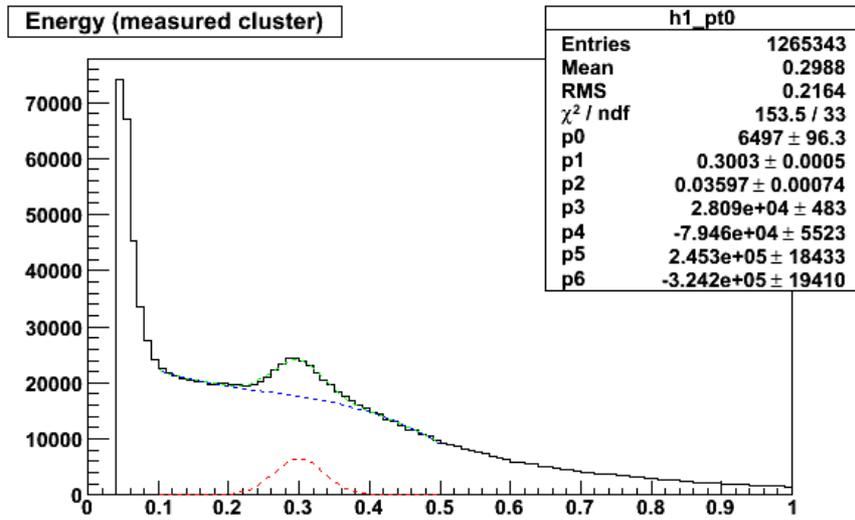


図 91: 最小電離損失ピーク (較正係数 = 1.2MeV/ch, 衝突径数 = 8fm, 背景粒子 = 3 次関数)

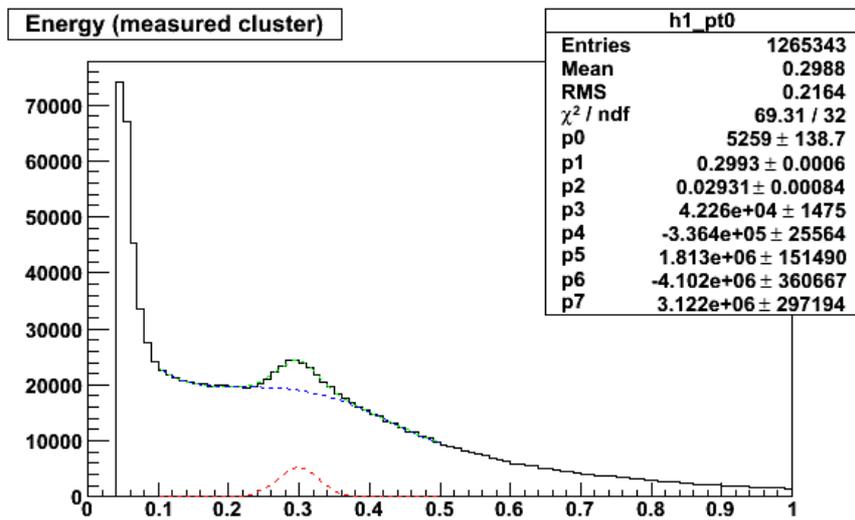


図 92: 最小電離損失ピーク (較正係数 = 1.2MeV/ch, 衝突径数 = 8fm, 背景粒子 = 4 次関数)

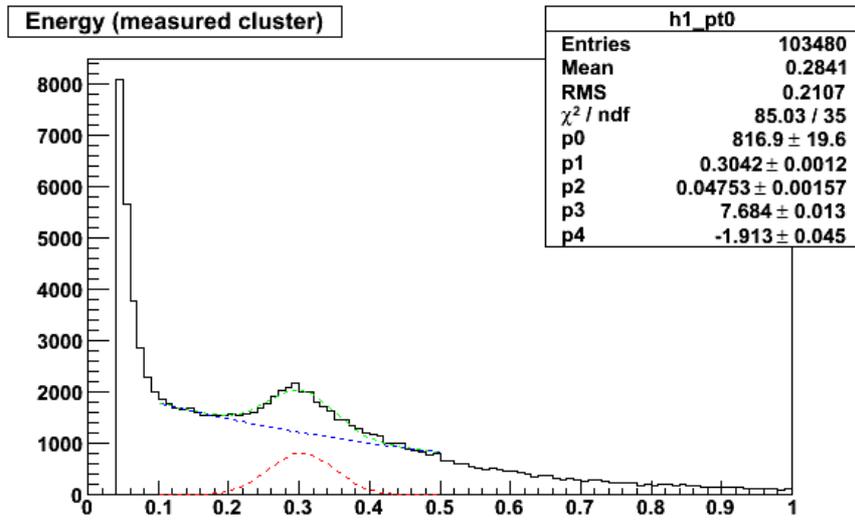


図 93: 最小電離損失ピーク (較正係数 = 1.2MeV/ch, 衝突径数 = 16fm, 背景粒子 = 指数関数)

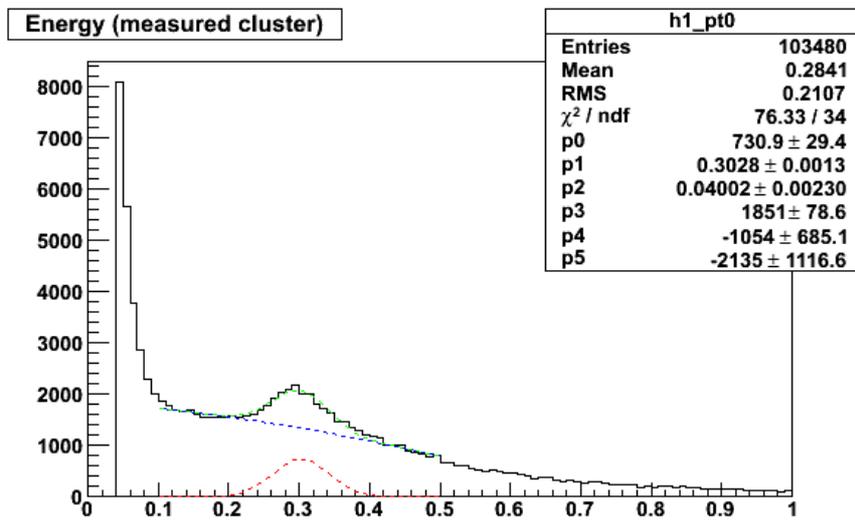


図 94: 最小電離損失ピーク (較正係数 = 1.2MeV/ch, 衝突径数 = 16fm, 背景粒子 = 2次関数)

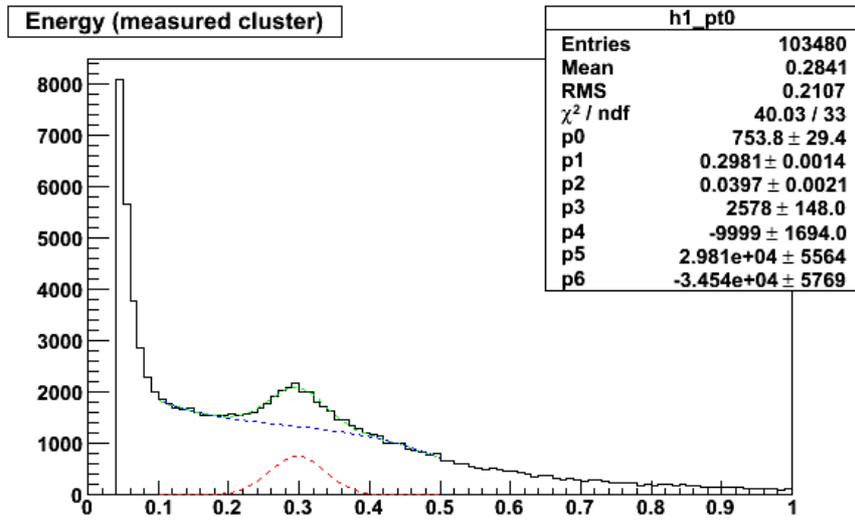


図 95: 最小電離損失ピーク (較正係数 = 1.2MeV/ch, 衝突径数 = 16fm, 背景粒子 = 3 次関数)

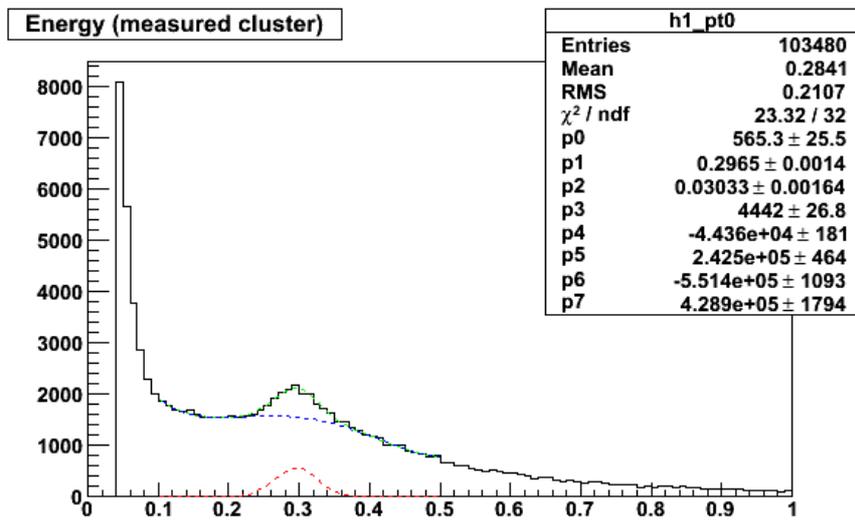


図 96: 最小電離損失ピーク (較正係数 = 1.2MeV/ch, 衝突径数 = 16fm, 背景粒子 = 4 次関数)

5.2.2 数値解析

以上の解析スペクトルを元にこの小々節で、系統誤差まで考慮した最小電離粒子の損失エネルギーの値について、設定した較正係数別に解析する。

較正係数を $0.8\text{MeV}/\text{ch}$ に設定したシミュレーション結果から得られる、最小電離粒子の損失エネルギーの解析結果を以下表に示す。

表 9: 最小電離粒子の損失エネルギー (較正係数 = $0.8\text{MeV}/\text{ch}$)

	$b = 0 \text{ fm}$	$b = 8 \text{ fm}$	$b = 16 \text{ fm}$
E_{Exp0}	0.2156 GeV	0.2152 GeV	0.2140 GeV
E_{Pol2}	0.2122 GeV	0.2132 GeV	0.2107 GeV
E_{Pol3}	0.2096 GeV	0.2099 GeV	0.2073 GeV
E_{Pol4}	0.2106 GeV	0.2100 GeV	0.2073 GeV

これらの値から得られる相加平均および標準偏差より、較正係数が $0.8\text{MeV}/\text{ch}$ である場合の最小電離粒子の損失エネルギーは

$$E^{b=0} = 0.2120 \pm 0.0023\text{GeV} \quad (9)$$

$$E^{b=8} = 0.2121 \pm 0.0023\text{GeV} \quad (10)$$

$$E^{b=16} = 0.2098 \pm 0.0028\text{GeV} \quad (11)$$

であることがわかった。

較正係数を 0.9MeV/ch に設定したシミュレーション結果から得られる、最小電離粒子の損失エネルギーの解析結果を以下表に示す。

表 10: 最小電離粒子の損失エネルギー (較正係数 = 0.9MeV/ch)

	$b = 0$ fm	$b = 8$ fm	$b = 16$ fm
E_{Expo}	0.2394 GeV	0.2407 GeV	0.2404 GeV
E_{Pol2}	0.2346 GeV	0.2357 GeV	0.2352 GeV
E_{Pol3}	0.2338 GeV	0.2344 GeV	0.2339 GeV
E_{Pol4}	0.2319 GeV	0.2319 GeV	0.2308 GeV

これらの値から得られる相加平均および標準偏差より、較正係数が 0.9MeV/ch である場合の最小電離粒子の損失エネルギーは

$$E^{b=0} = 0.2349 \pm 0.0028 \text{ GeV} \quad (12)$$

$$E^{b=8} = 0.2357 \pm 0.0032 \text{ GeV} \quad (13)$$

$$E^{b=16} = 0.2351 \pm 0.0035 \text{ GeV} \quad (14)$$

であることがわかった。

較正係数を 1.0MeV/ch に設定したシミュレーション結果から得られる、最小電離粒子の損失エネルギーの解析結果を以下表に示す。

表 11: 最小電離粒子の損失エネルギー (較正係数 = 1.0MeV/ch)

	$b = 0$ fm	$b = 8$ fm	$b = 16$ fm
E_{Expo}	0.2624 GeV	0.2643 GeV	0.2629 GeV
E_{Pol2}	0.2572 GeV	0.2576 GeV	0.2563 GeV
E_{Pol3}	0.2579 GeV	0.2578 GeV	0.2563 GeV
E_{Pol4}	0.2524 GeV	0.2535 GeV	0.2517 GeV

これらの値から得られる相加平均および標準偏差より、較正係数が 1.0MeV/ch である場合の最小電離粒子の損失エネルギーは

$$E^{b=0} = 0.2575 \pm 0.0036 \text{ GeV} \quad (15)$$

$$E^{b=8} = 0.2583 \pm 0.0038 \text{ GeV} \quad (16)$$

$$E^{b=16} = 0.2568 \pm 0.0040 \text{ GeV} \quad (17)$$

であることがわかった。

較正係数を 1.1MeV/ch に設定したシミュレーション結果から得られる、最小電離粒子の損失エネルギーの解析結果を以下表に示す。

表 12: 最小電離粒子の損失エネルギー (較正係数 = 1.1MeV/ch)

	$b = 0 \text{ fm}$	$b = 8 \text{ fm}$	$b = 16 \text{ fm}$
E_{Exp0}	0.2841 GeV	0.2859 GeV	0.2836 GeV
E_{Pol2}	0.2797 GeV	0.2811 GeV	0.2774 GeV
E_{Pol3}	0.2793 GeV	0.2796 GeV	0.2766 GeV
E_{Pol4}	0.2765 GeV	0.2766 GeV	0.2723 GeV

これらの値から得られる相加平均および標準偏差より、較正係数が 1.1MeV/ch である場合の最小電離粒子の損失エネルギーは

$$E^{b=0} = 0.2799 \pm 0.0027 \text{ GeV} \quad (18)$$

$$E^{b=8} = 0.2808 \pm 0.0034 \text{ GeV} \quad (19)$$

$$E^{b=16} = 0.2775 \pm 0.0040 \text{ GeV} \quad (20)$$

であることがわかった。

較正係数を 1.2MeV/ch に設定したシミュレーション結果から得られる、最小電離粒子の損失エネルギーの解析結果を以下表に示す。

表 13: 最小電離粒子の損失エネルギー (較正係数 = 1.2MeV/ch)

	$b = 0$ fm	$b = 8$ fm	$b = 16$ fm
E_{Exp0}	0.3050 GeV	0.3074 GeV	0.3042 GeV
E_{Pol2}	0.3035 GeV	0.3048 GeV	0.3028 GeV
E_{Pol3}	0.3007 GeV	0.3003 GeV	0.2981 GeV
E_{Pol4}	0.2999 GeV	0.2993 GeV	0.2965 GeV

これらの値から得られる相加平均および標準偏差より、較正係数が 1.2MeV/ch である場合の最小電離粒子の損失エネルギーは

$$E^{b=0} = 0.3023 \pm 0.0021 \text{ GeV} \quad (21)$$

$$E^{b=8} = 0.3030 \pm 0.0033 \text{ GeV} \quad (22)$$

$$E^{b=16} = 0.3004 \pm 0.0032 \text{ GeV} \quad (23)$$

であることがわかった。

5.2.3 最小電離損失ピーク値と較正係数との関係性

前小々節で得られた数値解析の結果より、最小電離損失ピーク値と較正係数との関係を、衝突径数別にしてグラフにして以下に示す。各グラフは、赤点が背景粒子の関数形を変更した解析結果の相加平均を表しており、上下に伸びる線はその系統誤差を表している。また、青線は各グラフを直線で近似した時の直線を表している。

まず、衝突径数が 0fm の時の最小電離粒子のエネルギー損失と較正係数との関係を示す。

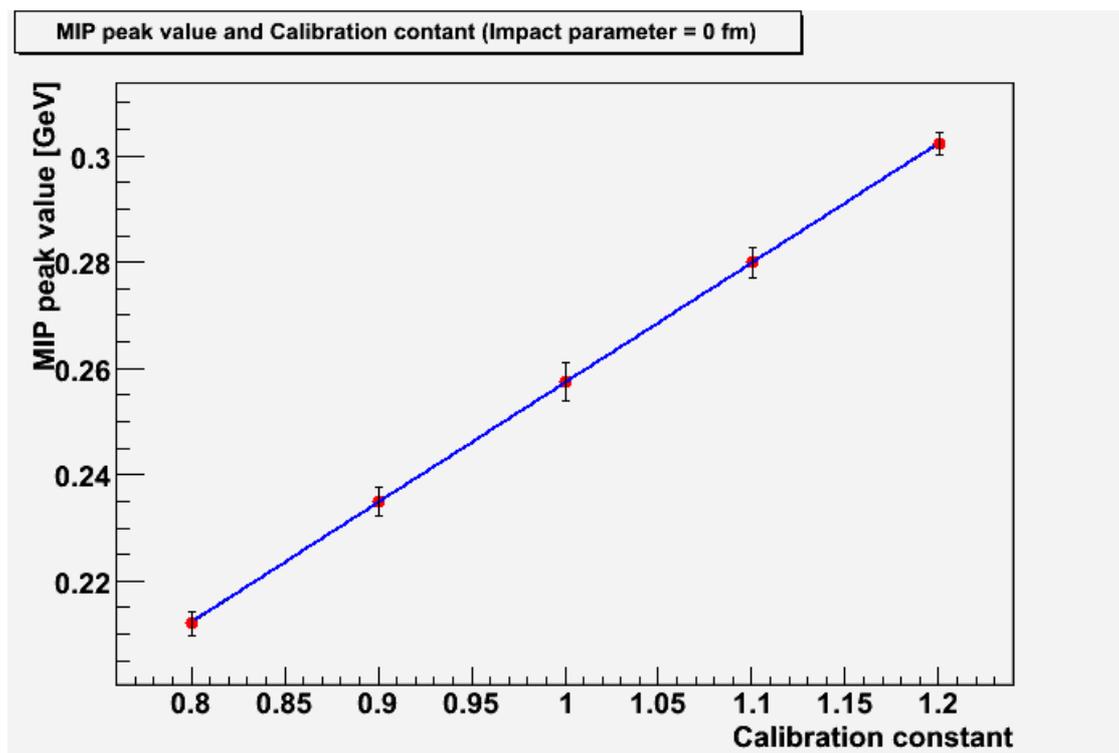


図 97: 最小電離粒子のエネルギー損失と較正係数との関係 (衝突径数 = 0 fm)

このグラフは確かにほぼ直線となっていることがわかる。この直線を解析した結果、この直線は以下の関数で表わされることがわかった。

$$E^{b=0} = 0.2255 \times C + 0.0318 \quad (24)$$

続いて、衝突径数が 8fm の時の最小電離粒子のエネルギー損失と較正係数との関係を示す。

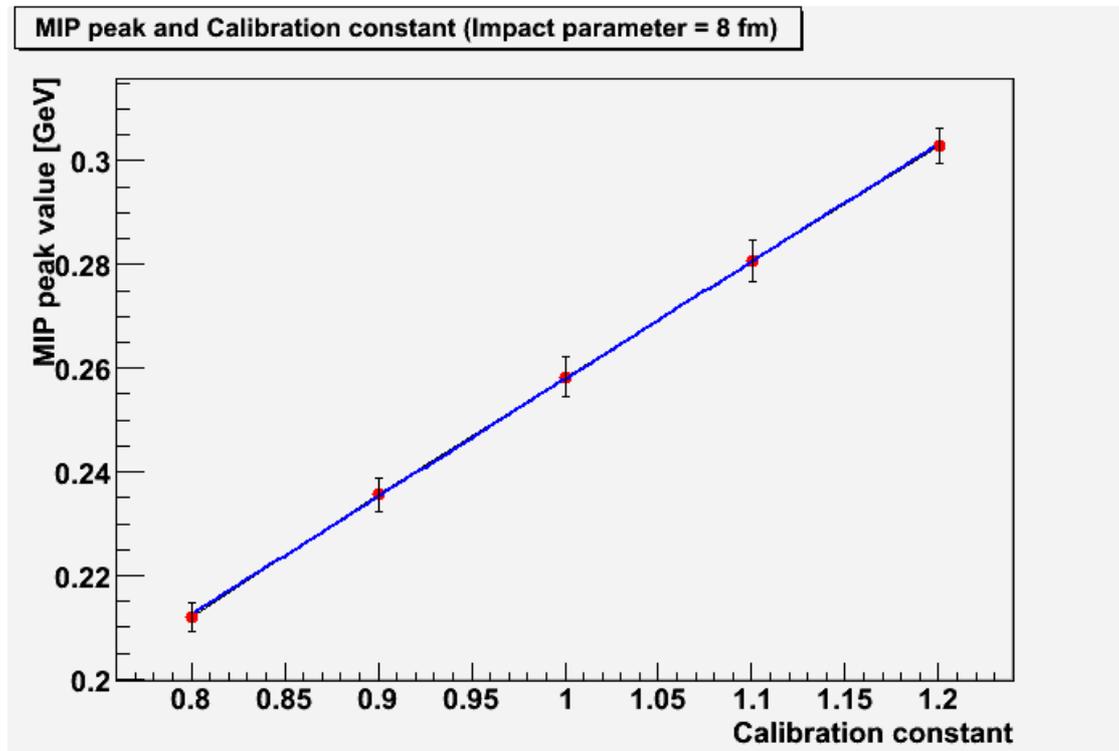


図 98: 最小電離粒子のエネルギー損失と較正係数との関係 (衝突径数 = 8 fm)

このグラフは確かにほぼ直線となっていることがわかる。この直線を解析した結果、この直線は以下の関数で表わされることがわかった。

$$E^{b=8} = 0.2271 \times C + 0.0309 \quad (25)$$

最後に、衝突径数が 16fm の時の最小電離粒子のエネルギー損失と校正係数との関係を示す。

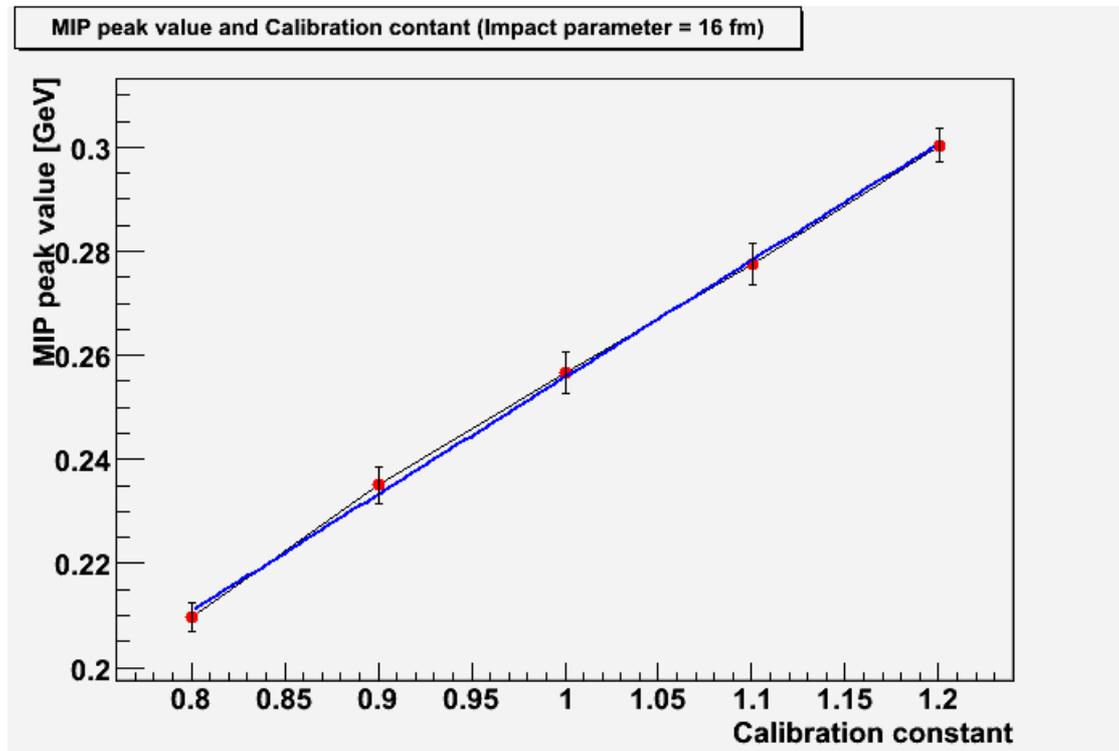


図 99: 最小電離粒子のエネルギー損失と校正係数との関係 (衝突径数 = 16 fm)

このグラフは確かにほぼ直線となっていることがわかる。この直線を解析した結果、この直線は以下の関数で表わされることがわかった。

$$E^{b=16} = 0.2248 \times C + 0.0310 \quad (26)$$

5.3 中性パイ中間子の質量解析結果

この小節では、中性パイ中間子の質量について、実際に前々小節の手法でスペクトルを解析した結果について述べる。なお、各スペクトルの横軸は質量 [GeV] を表している。

5.3.1 解析スペクトル

以下に、本研究における中性パイ中間子の質量分布を解析したスペクトルを示す。スペクトルはそれぞれ較正係数、衝突径数、背景粒子に仮定した関数形別に以下表の組み合わせとなっている。

較正係数 [MeV/ch]	0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2
衝突径数 [fm]	16
背景粒子に仮定した関数形	指数関数, 2 次関数, 3 次関数, 4 次関数

以下、計 20 個のスペクトルを示す。ここで、スペクトル中の赤線は中性パイ中間子の質量が作るピーク（ガウス関数）、青線は背景粒子が作るスロープ（仮定した各関数）、緑線はそれらの足し合わせを表している。また、解析を行ったエネルギーの範囲は 0.05 から 0.25GeV の間である。

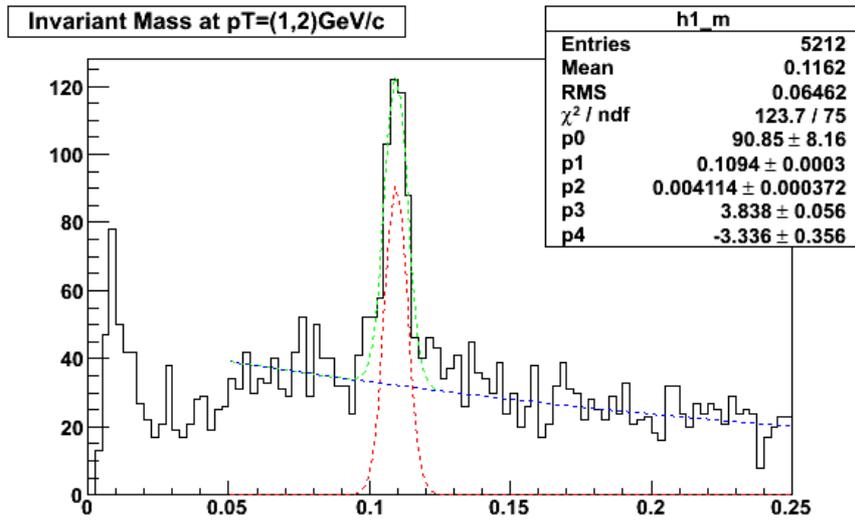


図 100: 中性パイ中間子質量ピーク (較正係数 = 0.8MeV/ch, 衝突径数 = 16fm, 背景粒子 = 指数関数)

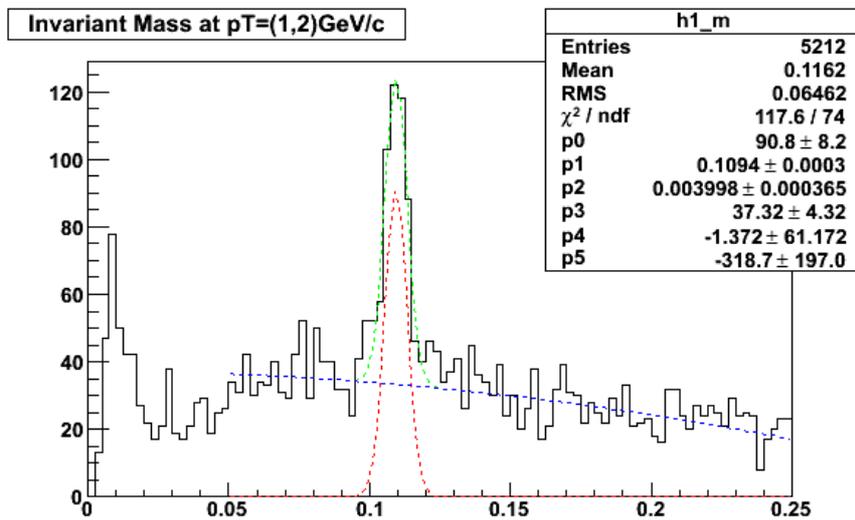


図 101: 中性パイ中間子質量ピーク (較正係数 = 0.8MeV/ch, 衝突径数 = 16fm, 背景粒子 = 2次関数)

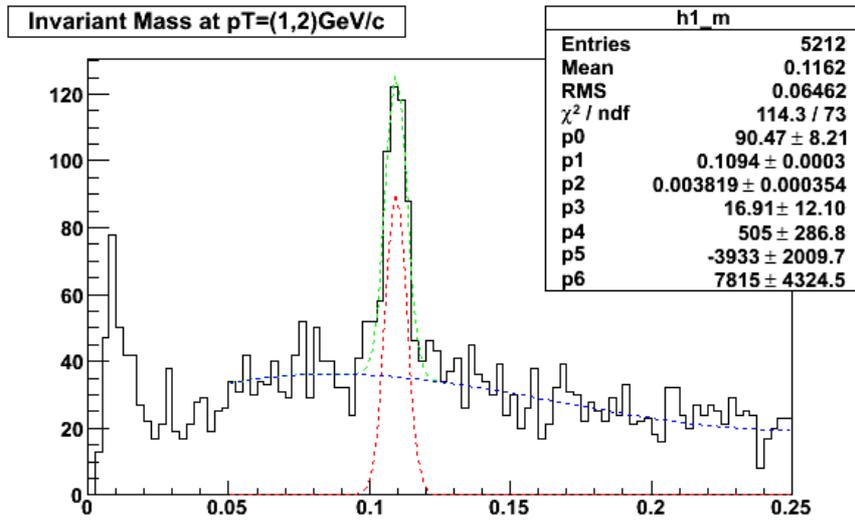


図 102: 中性パイ中間子質量ピーク (較正係数 = 0.8MeV/ch, 衝突径数 = 16fm, 背景粒子 = 3 次関数)

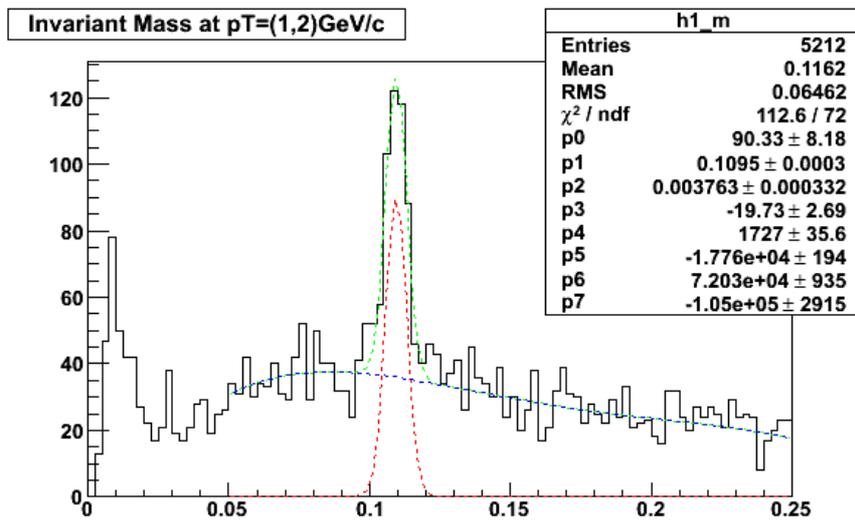


図 103: 中性パイ中間子質量ピーク (較正係数 = 0.8MeV/ch, 衝突径数 = 16fm, 背景粒子 = 4 次関数)

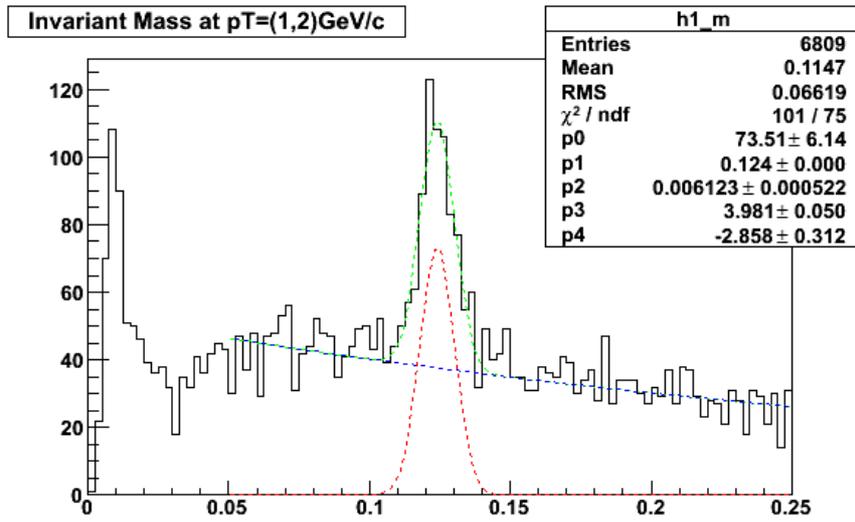


図 104: 中性パイ中間子質量ピーク (較正係数 = 0.9MeV/ch, 衝突径数 = 16fm, 背景粒子 = 指数関数)

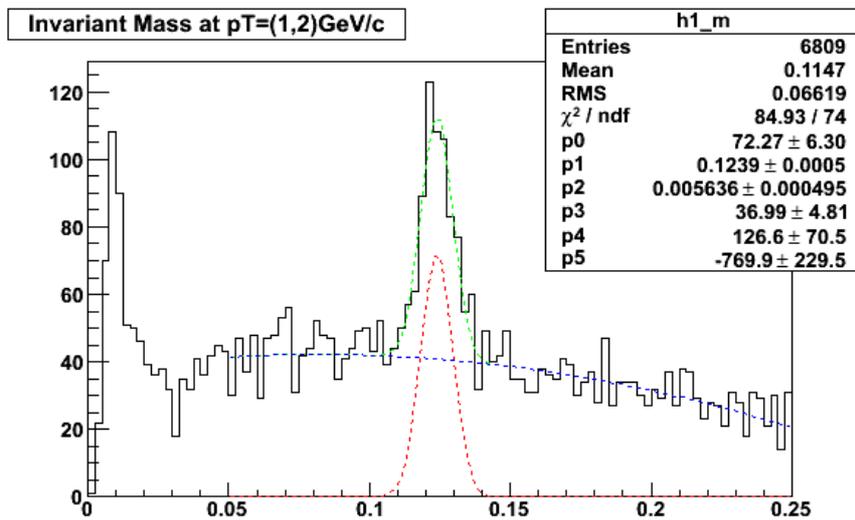


図 105: 中性パイ中間子質量ピーク (較正係数 = 0.9MeV/ch, 衝突径数 = 16fm, 背景粒子 = 2次関数)

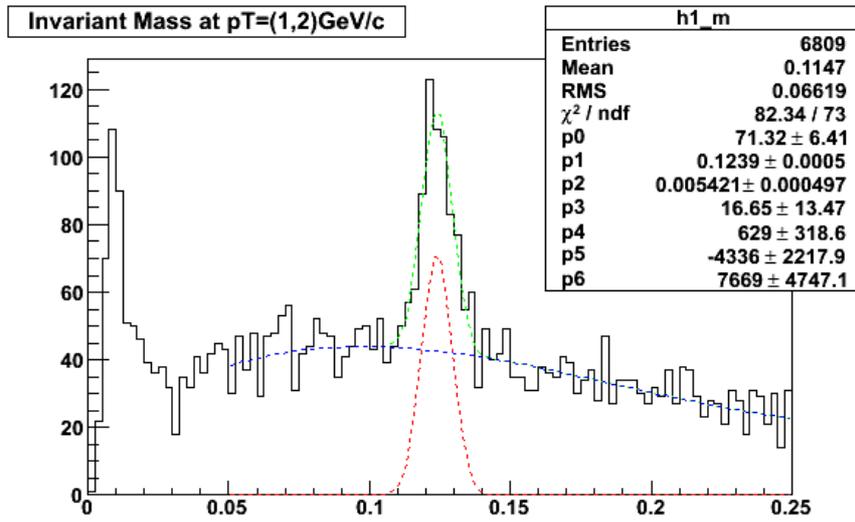


図 106: 中性パイ中間子質量ピーク (較正係数 = 0.9MeV/ch, 衝突径数 = 16fm, 背景粒子 = 3 次関数)

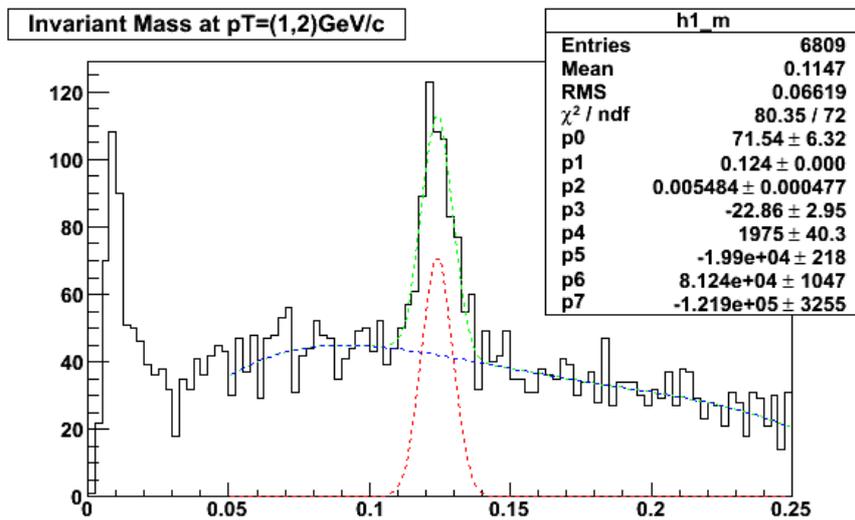


図 107: 中性パイ中間子質量ピーク (較正係数 = 0.9MeV/ch, 衝突径数 = 16fm, 背景粒子 = 4 次関数)

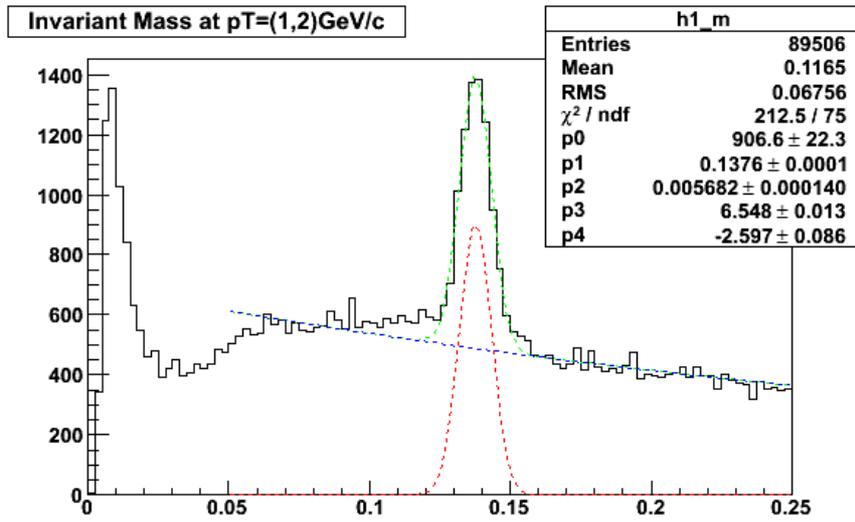


図 108: 中性パイ中間子質量ピーク (較正係数 = 1.0MeV/ch, 衝突径数 = 16fm, 背景粒子 = 指数関数)

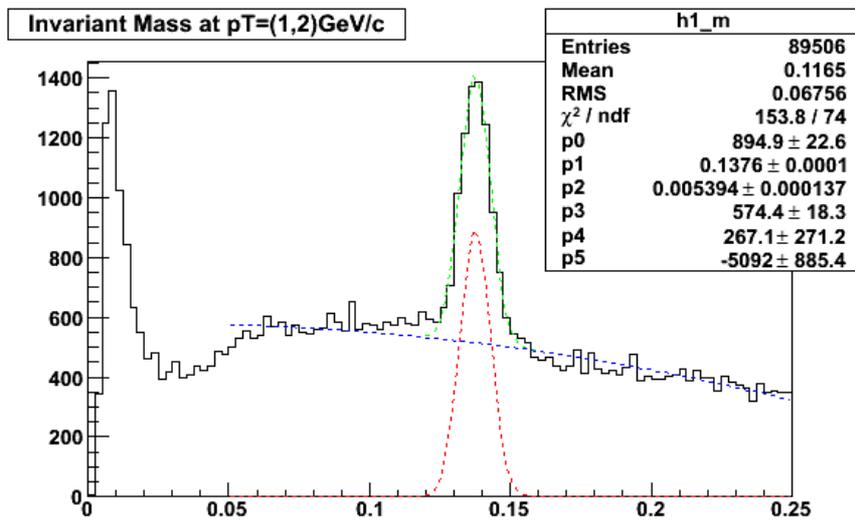


図 109: 中性パイ中間子質量ピーク (較正係数 = 1.0MeV/ch, 衝突径数 = 16fm, 背景粒子 = 2次関数)

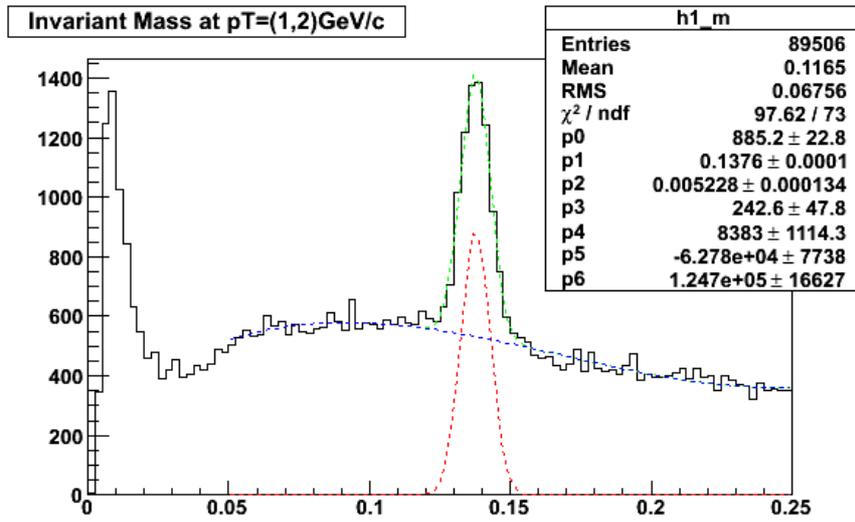


図 110: 中性パイ中間子質量ピーク (較正係数 = 1.0MeV/ch, 衝突径数 = 16fm, 背景粒子 = 3 次関数)

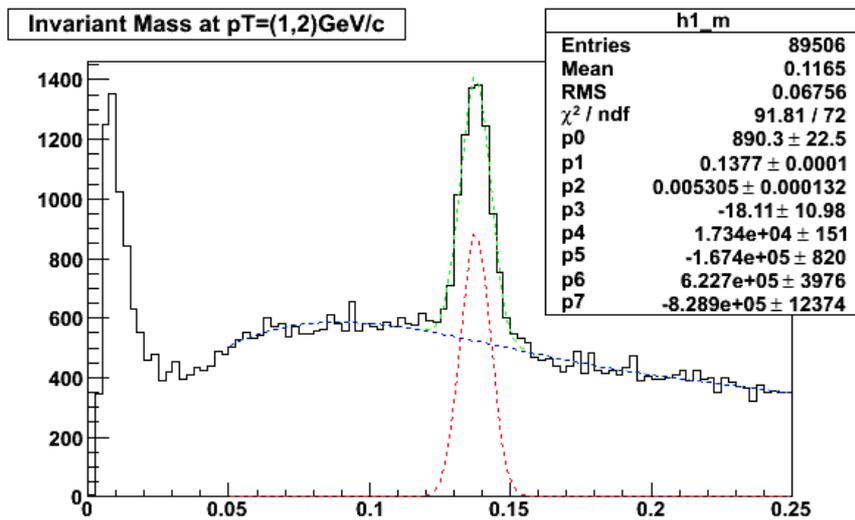


図 111: 中性パイ中間子質量ピーク (較正係数 = 1.0MeV/ch, 衝突径数 = 16fm, 背景粒子 = 4 次関数)

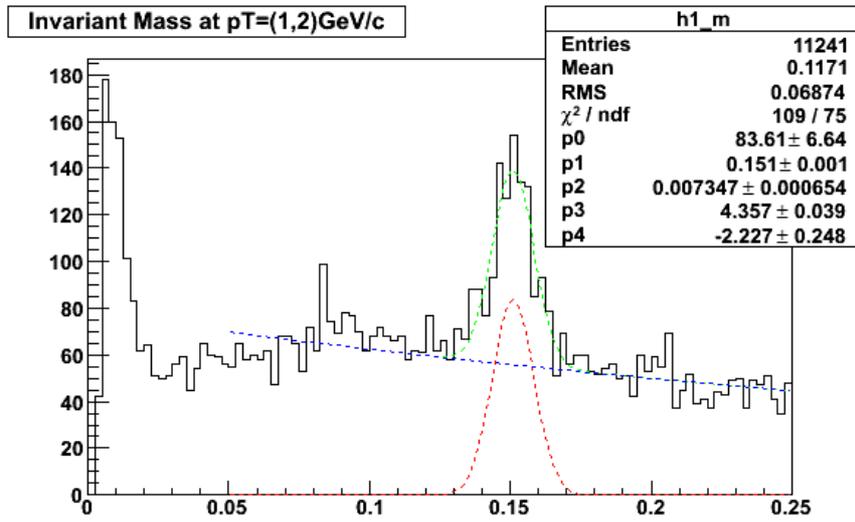


図 112: 中性パイ中間子質量ピーク (較正係数 = 1.1MeV/ch, 衝突径数 = 16fm, 背景粒子 = 指数関数)

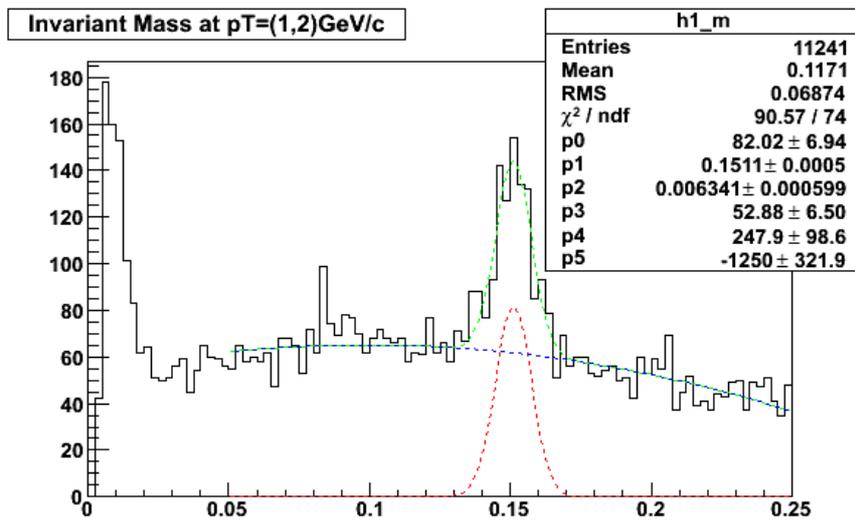


図 113: 中性パイ中間子質量ピーク (較正係数 = 1.1MeV/ch, 衝突径数 = 16fm, 背景粒子 = 2次関数)

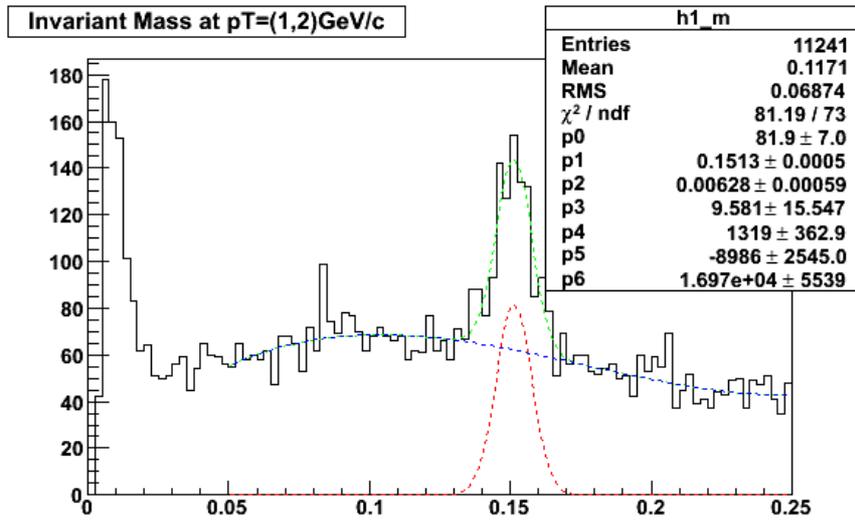


図 114: 中性パイ中間子質量ピーク (較正係数 = 1.1MeV/ch, 衝突径数 = 16fm, 背景粒子 = 3 次関数)

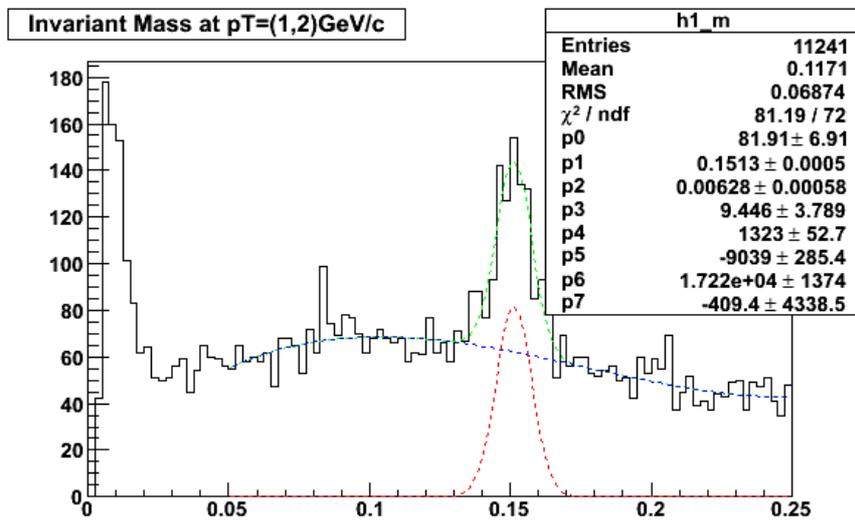


図 115: 中性パイ中間子質量ピーク (較正係数 = 1.1MeV/ch, 衝突径数 = 16fm, 背景粒子 = 4 次関数)

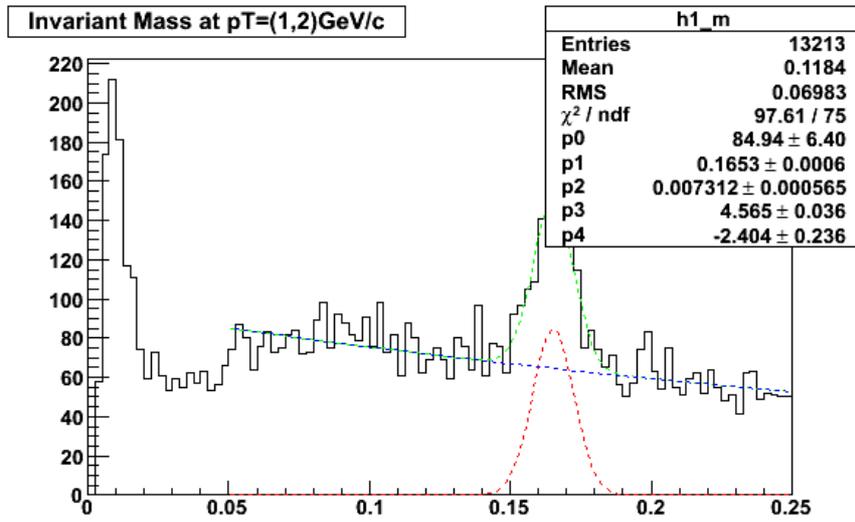


図 116: 中性パイ中間子質量ピーク (較正係数 = 1.2MeV/ch, 衝突径数 = 16fm, 背景粒子 = 指数関数)

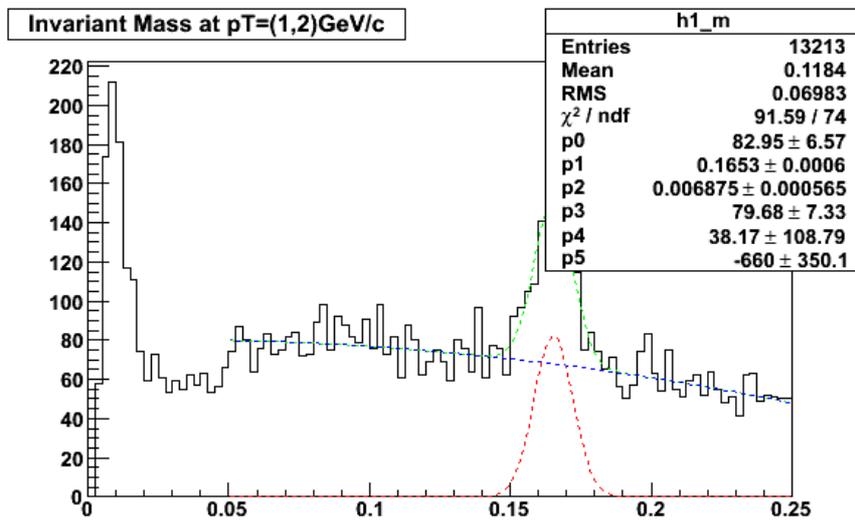


図 117: 中性パイ中間子質量ピーク (較正係数 = 1.2MeV/ch, 衝突径数 = 16fm, 背景粒子 = 2次関数)

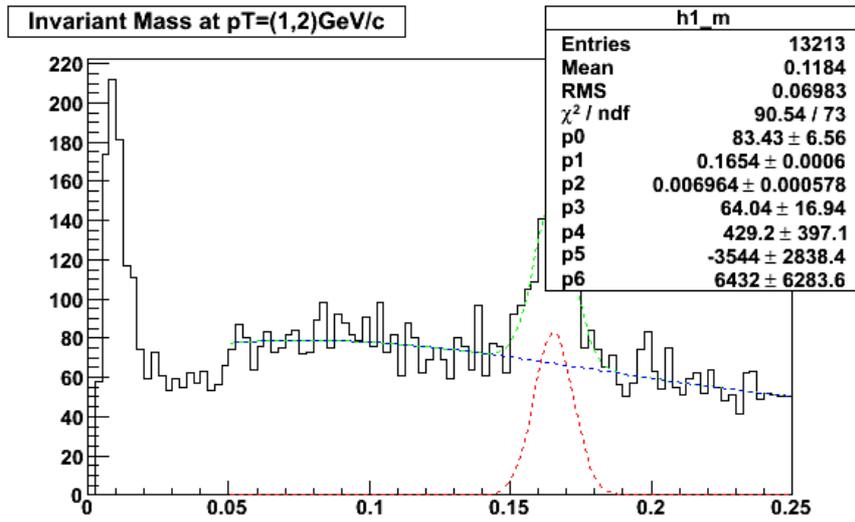


図 118: 中性パイ中間子質量ピーク (較正係数 = 1.2MeV/ch, 衝突径数 = 16fm, 背景粒子 = 3 次関数)

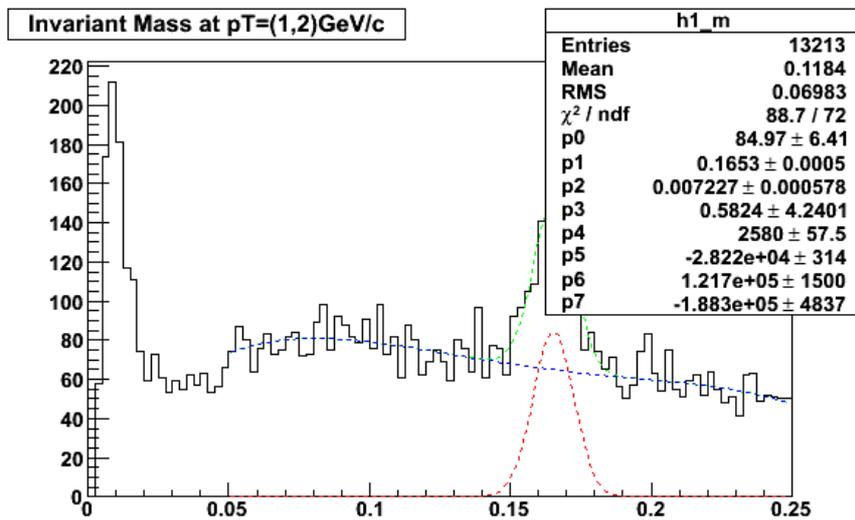


図 119: 中性パイ中間子質量ピーク (較正係数 = 1.2MeV/ch, 衝突径数 = 16fm, 背景粒子 = 4 次関数)

5.3.2 数値解析

以上の解析スペクトルを元にこの小節で、系統誤差まで考慮した中性パイ中間子の質量について、設定した較正係数別に解析する。

較正係数を $0.8\text{MeV}/\text{ch}$ に設定したシミュレーション結果から得られる、中性パイ中間子の質量の解析結果を以下表に示す。

	$b = 16 \text{ fm}$
M_{Expo}	0.10942 GeV
M_{Pol2}	0.10941 GeV
M_{Pol3}	0.10943 GeV
M_{Pol4}	0.10946 GeV

表 14: 中性パイ中間子の質量 (較正係数 = $0.8\text{MeV}/\text{ch}$)

これらの値から得られる相加平均および標準偏差より、較正係数が $0.8\text{MeV}/\text{ch}$ である場合の中性パイ中間子の質量は

$$M^{b=16} = 0.10943 \pm 0.00002\text{GeV} \quad (27)$$

であることがわかった。

較正係数を $0.9\text{MeV}/\text{ch}$ に設定したシミュレーション結果から得られる、中性パイ中間子の質量の解析結果を以下表に示す。

	$b = 16 \text{ fm}$
M_{Expo}	0.12404 GeV
M_{Pol2}	0.12392 GeV
M_{Pol3}	0.12394 GeV
M_{Pol4}	0.12402 GeV

表 15: 中性パイ中間子の質量 (較正係数 = $0.9\text{MeV}/\text{ch}$)

これらの値から得られる相加平均および標準偏差より、較正係数が $0.9\text{MeV}/\text{ch}$ である場合の中性パイ中間子の質量は

$$M^{b=16} = 0.12398 \pm 0.00005\text{GeV} \quad (28)$$

であることがわかった。

較正係数を 1.0MeV/ch に設定したシミュレーション結果から得られる、中性パイ中間子の質量の解析結果を以下表に示す。

	$b = 16 \text{ fm}$
M_{Expo}	0.13758 GeV
M_{Pol2}	0.13757 GeV
M_{Pol3}	0.13764 GeV
M_{Pol4}	0.13766 GeV

表 16: 中性パイ中間子の質量 (較正係数 = 1.0MeV/ch)

これらの値から得られる相加平均および標準偏差より、較正係数が 1.0MeV/ch である場合の中性パイ中間子の質量は

$$M^{b=16} = 0.13761 \pm 0.00004 \text{ GeV} \quad (29)$$

であることがわかった。

較正係数を 1.1MeV/ch に設定したシミュレーション結果から得られる、中性パイ中間子の質量の解析結果を以下表に示す。

	$b = 16 \text{ fm}$
M_{Expo}	0.15099 GeV
M_{Pol2}	0.15111 GeV
M_{Pol3}	0.15128 GeV
M_{Pol4}	0.15128 GeV

表 17: 中性パイ中間子の質量 (較正係数 = 1.1MeV/ch)

これらの値から得られる相加平均および標準偏差より、較正係数が 1.1MeV/ch である場合の中性パイ中間子の質量は

$$M^{b=16} = 0.15117 \pm 0.00001 \text{ GeV} \quad (30)$$

であることがわかった。

較正係数を 1.2MeV/ch に設定したシミュレーション結果から得られる、中性パイ中間子の質量の解析結果を以下表に示す。

	$b = 16 \text{ fm}$
M_{Expo}	0.16526 GeV
M_{Pol2}	0.16533 GeV
M_{Pol3}	0.16539 GeV
M_{Pol4}	0.16531 GeV

表 18: 中性パイ中間子の質量 (較正係数 = 1.2MeV/ch)

これらの値から得られる相加平均および標準偏差より、較正係数が 1.2MeV/ch である場合の中性パイ中間子の質量は

$$M^{b=16} = 0.16532 \pm 0.00004 \text{ GeV} \quad (31)$$

であることがわかった。

5.3.3 中性パイ中間子質量ピーク値と較正係数との関係性

前小々節で得られた結果より、中性パイ中間子質量ピーク値と較正係数との関係をグラフにして以下に示す。グラフは、赤点が背景粒子の関数形を変更した解析結果の相加平均を表しており、上下に伸びる線はその系統誤差を表している。また、青線はグラフを直線で近似した時の直線を表している。

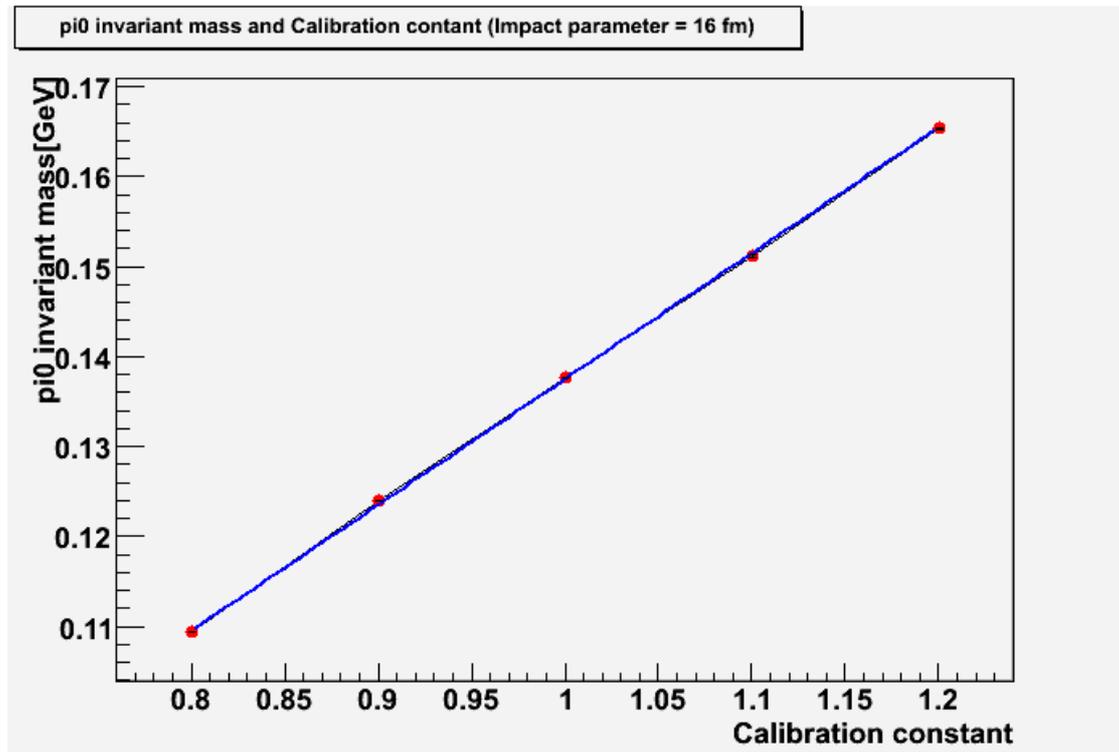


図 120: 中性パイ中間子の質量と較正係数との関係 (衝突径数 = 16 fm)

このグラフは確かにほぼ直線となっていることがわかる。この直線を表す関数は以下で表される。

$$M^{b=16} = 0.1399 \times C - 0.0025 \quad (32)$$

6 考察と結論

この節では、前節で得られた解析の結果より、最小電離損失および中性パイ中間子の質量の各ピーク値と較正係数との関係性について考察し、本研究の結論について述べる。

前節での解析結果より、PHOS 検出器の最小電離損失および中性パイ中間子の質量の各ピーク値と較正係数とをグラフにプロットすると、それらはほぼ直線となることがわかった。しかし、本研究で求めた各ピーク値と較正係数との関係は比例関係ではなく、そこには切片が現れた。その切片の由来として考えられるものに、PHOS 検出器における「非線形性」という性質が挙げられる。この非線形性という性質にはシャワーの漏れ、シンチレーション光の減衰、clustering threshold の3つの原因が考えられている。

これらのうち、シャワーの漏れというのは、高いエネルギーをもった光子がPWOに入射した場合、180mmの長さを通過する間にその全エネルギーを損失しきれずに通過してしまうことである。また、シンチレーション光の減衰というのは、PWOのシンチレーション光がAPDに到達する前に減衰してしまうことである。しかし、今回解析を行ったエネルギー領域においては、3つ目のclustering thresholdによるものがもっとも主なので、ここではそれについて詳しく述べる。

前述の通り、PHOS 検出器の各 crystal には有限な熱ノイズがあり、それを排除するためにエネルギーにclustering threshold が設けられている。したがって、crystalで観測したエネルギーが低い場合は、そのエネルギーが入射粒子の損失したエネルギーであったとしても、それがclusteringされずに無視される場合がある。そのため、この無視された分、入射粒子の測定エネルギーは実際に入射粒子が損失したエネルギーより低く見積もられる。本研究における非線形性は主にこのことに起因している。

実は、このような非線形性は、シミュレーションにおいて補正がなされている。以下図に、シミュレーションにおける補正関数を示す。青色の破線がシミュレーションで実際に使用された補正関数であり、黒色の点を結んだ線が現状予想されている補正関数である。1GeV以下の低エネルギー領域においてはclustering thresholdによる補正のため、測定されたエネルギーと実際に粒子が損失したエネルギーとの比が1より大きくずれる。一方、100GeV付近の高エネルギー領域においてはシャワー漏れによる補正が大きくなるために、また測定値と損失値との比が1よりずれていく。

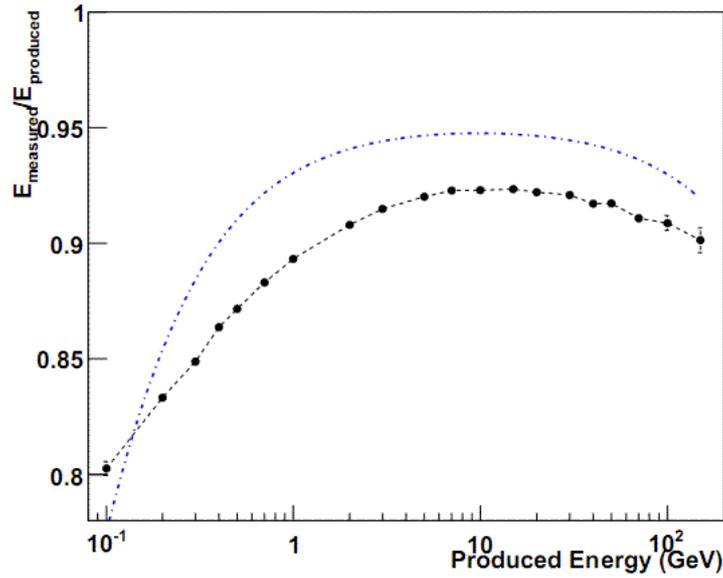


図 121: 非線形性の補正関数

このように、非線形性の補正関数はエネルギーを引数に持っている。この非線形補正を用いて、実際の測定エネルギーは以下式で表わされる。

$$E_{measured} = \sum_{\text{clustering}} [E_{crystal} \times \text{gain} \times \text{較正係数}] \times \text{補正関数}(E) \quad (33)$$

$$= E \times \text{補正関数}(E) \quad (34)$$

ここで、例として較正係数が 1.0 である場合と 0.8 である場合とについて考える。

$$E = \sum_{\text{clustering}} [E_{crystal} \times \text{gain}] \quad (35)$$

$$\tilde{E} = \sum_{\text{clustering}} [E_{crystal} \times \text{gain} \times 0.8] \quad (36)$$

現状、比例関係が成り立っていないということは、

$$\tilde{E}_{measured} \neq 0.8 \times E_{measured} \quad (37)$$

$$\tilde{E} \times \text{補正関数}(\tilde{E}) \neq 0.8 \times E \times \text{補正関数}(E) \quad (38)$$

ということを表している。この理由としては、先ほど述べた clustering threshold の効果のために、較正係数が 0.8 である場合は clustering されずに無視される crystal

が多くなり、 $\tilde{E} \leq E$ という関係が成り立ってしまうことが考えられる。この効果は本来なら補正関数 (\tilde{E}) と補正関数 (E) との違いに吸収されるべきであるが、現状使っている補正関数がまだ正確なものではないために吸収されていない。したがってまだ非線形性が残っており、そのためにピーク値と較正係数との間に比例関係が現れなかったものと考えられる。

この「残った非線形性」について考察し、正確な補正関数を得ることが今後の課題となる。補正因子として非線形性とエネルギーとの正確な関係性を知ることができれば、最小電離粒子のエネルギー損失と中性パイ中間子の質量が本検出器の較正に有効であると、本研究は結論する。

謝辞

本研究を行うにあたって、数多くの助言を下された先生、スタッフをはじめ、広島大学クォーク物理学研究室の方々に、この場を借りて感謝の意を表したいと思います。

まず、本研究のテーマを与えてくださった指導教官の杉立先生に心から感謝致します。杉立先生には、研究室配属直後から原子核物理学の基礎を教授していただき、本研究を進める際にも貴重な助言を数多く頂きました。志垣先生、本間先生には、会議中の進捗状況の報告の際に貴重な助言を頂きました。洞口さんには研究室内の解析環境を整えて頂きました。鳥井さんには、検出器のエネルギー較正に対して何の知識も持っていなかった私に、非常に丁寧な指導を頂きました。

また、同研究室の修士、博士課程の先輩方にも数々の助言を頂きました。多くの方々の支えがあって、本研究を進めることができました。本当にありがとうございました。

参考文献

- [1] 永江知文、永宮正治 共著 原子核物理学 裳華房
- [2] 長島順清 著 朝倉物理学大系 3 素粒子物理学の基礎 朝倉書店
- [3] 岩永義弘 2006 年度広島大学卒業論文
- [4] 溝口謙太 2006 年度広島大学卒業論文
- [5] 中馬文広 2007 年度広島大学卒業論文
- [6] CERN - European Organization for Nuclear Research
<http://public.web.cern.ch/public/>
- [7] ALICE - A Large Ion Collider Experiment <http://aliceinfo.cern.ch/Public/>
- [8] Particle Data Group REVIEW OF PARTICLE PHYSICS
- [9] Particle Data Group <http://pdg.lbl.gov/>