申請書本体

平成１１年１月１８日

研究責任者氏名	竹下　徹
生　年　月　日	
所　属　機　関	信州大学理学部
電　話　番　号	0263-37-2898
ＦＡＸ　番　号	0263-34-2358

研究課題

リニアコライダーのための補償型タイルファイバーカロリメータの
高エネルギービームを用いたビームテスト- II

研究目的

標準理論を超えた物理を探究するために、電子陽電子衝突型線形加速器 (以下リニアコライダーと略) の開発が世界の主要な研究所で進められている。質量の起源たるHiggs粒子や統一理論の担い手たるSUSY粒子を研究するためには超高性能の加速器と超高性能の測定器 (以下LCDと略) が必要であり、カロリメータに対しては40%/√E + 2% (２乗和) という優れたハドロンエネルギー分解能が要求されている。このようなエネルギー分解能は、補償型と呼ばれるサンプリング型カロリメータでのみ達成することが可能である。

タイルファイバー型のカロリメータが補償型として機能しLCDで要求されるエネルギー分解能を達成出来ることを実証するために、神戸大、甲南大、信州大、筑波大、KEKからなる我々のグループでは1996年度-1997年度において共同開発研究を行なった。この研究においては直線ファイバー型、及びシグマループ型タイルファイバー形式のテストモジュールの製作し、KEK-PSにおいて系統的なビームテストを行なった。これにより補償型構成をもつタイルファイバー型カロリメータの性能のうち、比較的低エネルギー領域についてはその性能を確立した。

リニアコライダー実験における反応生成粒子のエネルギーは2-3GeVから100GeV以上に渡る。このためLCDのカロリメータにおいては、当然のことながら高エネルギー領域での性能もまた極めて重要である。またエネルギー分解能において、統計項 (40%/√E項) は主として低エネルギーにおける実験で詳しく調べられるが、定数項 (+2%項) を調べるためには高い入射エネルギーが必要となる。このため1998年度においては、1996-7年度の共同開発研究で製作したカロリメータモジュールについて、FNALの高エネルギービームを用いたテスト実験により高エネルギーにおける性能を確立することを目的とした共同開発研究を行なった。しかしながら1998年度においてはFNALの運転が行なわれなかったためビームテストは行なわず、高エネルギーテストに向けた各種シミュレーションスタディやFNAL実験エリアの調査、及びその結果を受けてのカロリメータモジュールの改造/増強を行なった。

本研究においては1998年度に行なう事が出来なかったFNALの高エネルギービームを用いたテスト実験を行ない、カロリメータの高エネルギーにおける性能を確立する。必要なスタディやモジュール増強は1998年度において実行済みであり、またFNALの運転スケジュールについても1999年夏ー秋にテストビームを供給することが決定している。既に我々のグループではFNALにビームテストのLetter-of-Intentを送り、実験へ向けた手続きを開始している。

本研究によりKEK-PSでのテスト結果と合わせ、リニアコライダー実験に必要な全エネルギー領域における性能を確立する。

別添付文書

[1] 研究組織

研究代表者	竹下　徹	信州大学理学部助教授
研究従事者	古川啓太郎	信州大学理学部修士２年
	宮島明里	信州大学理学部修士２年
	武田　廣	神戸大学理学部教授
	野崎光昭	神戸大学理学部教授
	川越清以	神戸大学理学部助教授
	金谷奈央子	神戸大学大学院自然科学研究科博士２年
	杉本佳之	神戸大学大学院自然科学研究科修士２年
	竹内　彰	神戸大学大学院自然科学研究科修士２年
	梶野文義	甲南大学理学部教授
	金　信弘	筑波大学物理学系教授
	浅川高史	筑波大学物理学系研究員
	大石龍太郎	筑波大学物理学系研究員
	中川敦子	筑波大学物理学系一貫博士課程２年
	大田辰郎	筑波大学物理学系修士２年
	魚住　聖	筑波大学物理学系一貫博士課程１年
	神前純一	高エネルギー物理学研究所助手
★	藤井芳昭	高エネルギー物理学研究所助手、　会計責任者

（官職、学年は1999年4月1日現在予定）

[2] 研究の意義

電子陽電子線形衝突型加速器 (以下リニアコライダーと略) は標準理論の枠内で唯一未発見のヒッグス粒子や標準理論を超える物理の発見、研究を目指したもので、現在日米欧でその研究開発が精力的に進められている。このリニアコライダーを用いた実験は、極めて高品質のビームと電子陽電子を用いることによる極めてクリアな事象という非常に優れた特質をもっているが、このような優れた特質を最大限に引き出すためには極めて高性能な測定器が要求される。

リニアコライダー実験の最も重要な目的の１つは、ヒッグス粒子の発見やその精密研究である。中間質量のヒッグス粒子の生成反応は、Z粒子とヒッグス粒子が対で作られたのちにヒッグス粒子が b-クォーク対に崩壊する

$$e^+ + e^- \rightarrow \mathrm{Z} + \mathrm{H}\ ,\ \mathrm{H} \rightarrow b + \bar{b}$$

なる反応が主である。この反応はZ粒子がレプトン対に崩壊するチャンネルにおいて最も容易に検出されうる。しかしこのチャンネルは全体の7%しかなく、統計精度の高い精密測定を行なうためには、70%もの分岐比をもつZ粒子のクォーク対への崩壊を測定する事が不可欠である。このチャンネルをW粒子対生成反応やZ粒子対生成反応等の膨大なバックグラウンド反応から抽出するためには、生成粒子をそのジェット質量再構成によって識別することが本質的に重要である。W粒子対生成反応はバーテックス測定器を用いた b-タギングによって効率良く除去することができるが、Z粒子対生成においてZ粒子が b-クォーク対に崩壊する反応は、ジェットの不変質量によってのみヒッグス粒子の b-クォーク対崩壊反応と区別できる。特にヒッグス粒子の質量がZ粒子の質量に近い場合にもその精密研究ができるために、Z粒子の自然幅程度よりも良いジェット質量分解能が必要である。

標準理論を精密検証しまたそれを超える物理を探る手段として、W粒子の対生成反応もまた極めて重要

である。ゲージ粒子の結合定数の測定のためには、W粒子対生成反応とZ粒子対生成反応を分離して測定出来なければならない。このためにはジェット質量再構成によってW粒子とZ粒子を良いS/Nで分離出来ることが必要であり、W粒子やZ粒子の自然幅程度よりも良いジェット質量分解能が必要である。

このような高精度のジェット不変質量再構成を行なうためには、
a) エネルギー分解能及びエネルギー測定の線形性が優れていること、
b) 細かくセグメント化された電磁シャワー発達部測定により、高性能なクラスタートラック
マッチング及び光子/中性パイ中間子識別ができること、
c) 細かくセグメント化されたシャワー本体測定部をもち、電磁粒子とハドロン粒子が高い精度で
識別でき、かつ中性クラスターと荷電トラックの偶発的な重なりあいが十分防げること、
等の条件を満たすことが必要である。加えて現実的なコストで製作出来ることも極めて重要である。

神戸大、甲南大、信州大、筑波大、KEKからなる我々のグループでは、超高性能なカロリメータの開発を目的として1996-7年度において共同開発研究を行なった。上記の条件を満たしうる最も有力な候補として補償構成比をもつタイルファイバー型のサンプリングカロリメータを採用し、図1に示すような構造をもつカロリメータテストモジュールを製作した。このテストモジュールは鉛の板とシンチレータの板を2本のレールの上から吊り下げる構造をしており、鉛とシンチレータの構成比率を広い範囲にわたって細かく変えることができる。

図1. タイルファイバー型ハドロンカロリメータテストモジュールの概念図

このテストモジュールを用いてKEK-PSにおいてビームテストを行ない、エネルギー分解能やe/π比の鉛とシンチレータの構成比率に対する依存性やタワー境界のレスポンス等を詳しく測定した。これにより補償構成比をもつタイルファイバー型ハドロンカロリメータについての、比較的低いエネルギー領域における特性の把握を完了した。しかしながらリニアコライダー実験においては生成粒子のエネルギーは2-3GeVから100GeV以上にわたる広いエネルギースペクトルをもっており、カロリメータも広いエネルギー範囲にわたって高い測定精度をもつことが必要である。またカロリメータのエネルギー分解能は40%/$\sqrt{E}$+2%のように統計項と定数項の2乗和で表わされる。このうち統計項は比較的低いエネルギーでの測定から、定数項については高いエネルギーでの測定から精度良く求められる。このためカロリメータの性能を正確に把握するためには低いエネルギーにおける測定と高いエネルギーにおける測定の両者が不可欠である。

本研究では1997年度に製作/性能測定を行なったテストモジュールをFNALに持ち込み、高いエネルギーのビームを用いて性能測定を行なう事を目的とする。これによりリニアコライダー実験において要求される全エネルギー領域での性能を確立することは、リニアコライダー測定器全体の設計に対しても極めて重要な指針を与える。

[3] 研究方法

本研究は、1997年度に製作/性能測定を行なったテストモジュールを用いて行なう。このモジュールについては、既に1998年度の共同開発研究によって高エネルギービームテストに向けてのスタディ、改造を行なった。このスタディ、改造の内容については以下に簡単に述べる。

ビームテストはFNALの中間子測定実験室 (Meson Det. BLDG.) のE-741エリアにおいて行なう。これはCERNにおけるテストビームラインがLHC関係のビームテストがきつく詰まっていることと、FNALにおけるFixed Beam Lineの運転スケジュールが1999年6月から予定されており、テストビームも夏期シャットダウン明けに予定されているなど、本研究のスケジュールにマッチするためである。FNALへの送り出し作業、及びビームテストのスケジュールについても以下に示す。

1) 改造項目

現テストモジュールは鉛厚で96cm (約６相互作用長) の厚みをもっている。これはKEK-PSにおけるビームテスト (4GeV以下) に対しては十分な厚さである。これに対して100GeVの入射エネルギーにおいては、約８相互作用長の厚みが必要である。１相互作用長については1994年に製作、テストを行なったZEUS型のカロリメータテストモジュールを充てることとし、テストモジュール本体について約１相互作用長の厚みの増強を行なった。

FNALビームラインに設置してある汎用駆動架台と本テストモジュールとの組み上げについては、1998年度に現地調査を行なうとともに各種図面を入手した。設置の様子を図２に示す。この検討の結果から以下の事が判明した。

a) カロリメータモジュールの本体構造には改造の必要はない。

b) 汎用駆動架台の強度は十分あるが、駆動モーターの駆動力については不足している可能性がある。

c) 駆動架台の最低高が高すぎ、カロリメータモジュールが十分下がり切らない。

駆動モーターについてはFNAL側担当者に問い合わせ、必要があればモーター若くはギアの交換を行なう。また駆動架台の高さについては、架台最上部に取り付けてある横梁を撤去することにより、十分な低さまで下げることができるようになると考えている。

図２. 汎用駆動架台上へのカロリメータモジュールの設置図。

このほか光電子増倍管についても、広いエネルギー範囲に渡って測定することからそのダイナミックレンジの再検討を行なった。その結果、現在使用している光電子増倍管で十分対応できることが確認された。また入射粒子識別のPre-Shower測定器、Shower-Max測定器については現在新規製作中である。

2) 送り出し

早ければ９月初旬から開始できるビームテストに備え、６月末までにはKEKからの発送を完了させる。光電子増倍管やシンチレータアセンブリなどの壊れやすい部品や、鉛薄板のような壊れやすい重量物など取扱が難しい物品が多いため、基本的に梱包は我々自身で行なう。海上コンテナへの積み込みは輸送業者に依頼する。輸出入に関わる事務手続き等に時間がかかることが予想されるため、既に運送業者とのコンタクトをとり事前調査を始めている。

送り出した荷物は８月上旬にはFNALに着くものと思われる。これに備えて若干名の先発隊を８月初旬にFNALに派遣し、荷物の受け取りと検査、組み上げ等を行なう。本隊はビームテストの日程に合わせて現地入りする予定である。

3) テスト実験

実験の主目的は

a) エネルギー分解能、特に定数項、

b) エネルギー測定の線形性とダイナミックレンジ、

c) 電磁シャワーとハドロンシャワーに対する出力比（いわゆるe/π比）、

d)タワー構造におけるタワー境界のレスポンスの特異性、

の４点を測定する事である。測定は 5GeV-200GeVの ϵ, π, μ を用いて行なう。E741ビームラインにおいては、10GeV以下のエネルギーのビーム強度は低くかつ不安定であることが知られている。しかしながら5GeVでの測定はKEKにおけるテスト結果との一致をチェックするためのものなので、多少の不安定さは許容されると考える。

タイルファイバー型におけるタワーレスポンスの一様性については既にCDFグループがビームテストを行ない、十分な一様性があることを実証している。しかしながらCDFグループで用いたシンチレータに比べ、我々のモジュールのシンチレータは補償構成比を実現するため非常に薄いものとなっている。このためより精密な一様性の確認が必要である。

KEK-PSでのビームテストの結果から、図３に示すように補償構成比は鉛/シンチレータ比が9mm:2mmであると考えられている。しかしながらモジュールの構造上鉛厚9mmというのは実現できないため、今回のテストでは8mm厚と12mm厚の２構成で実験を行ないその間を補間する。

図３．e/π比の鉛厚依存性

データ収集系については現在構築中であるが、今の所約30events/secの収集速度が得られている。この速度とビームのスピル構造を勘案すると、１構成での項目a)-c)の測定にキャリブレーションも含め約4日間を要するものと計算される。途中構成の組み替えに約3日間を必要とすると思われるので、必要な実験期間は実ビーム時間としてはチューニングも含め10日間程度、全実験期間としては2週間弱である。従って組み替えを含めても９月下旬には全測定を完了する予定である。

また実験遂行に必要な人員は、KEK-PSでのビームテストの経験から最低６人、出来れば８人程度派遣したい。

実験に必要な周辺機器のうち、計算機については日本から持ち込む予定である。NIM/CAMAC/FastBus等のクレート、モジュール類や電源類、ケーブル等についてはFNALのものを借用して行なう予定である。また空調や測量機器等についてもFNALから借用する。

[4] 予想される成果

リニアコライダーにおける実験には極めて高性能な測定器が必要とされる。1996-7年度共同開発研究で製作されたテストモジュールは十分な大きさをもち、また組み替え自由度の高い構造になっているため、この設計に必要な多彩なデータを系統的にとることができる。既に比較的低いエネルギーにおける性能はKEK-PSにおけるビームテストで確立したが、これに高いエネルギーでの測定を合わせることにより、リニアコライダー実験で要求される広範なエネルギー領域にわたりその性能を確立する事ができる。

[5] 所要経費

共同開発研究においては旅費の申請は受理されたことがないが、本研究においては米国への渡航が不可欠であるため以下のように物品費並びに外国渡航旅費を申請する。

FNAL汎用架台改造	４０万円
梱包用品類	２０万円
運送費　船便　往復	３８０万円
輸送コンテナ	５０万円
物品費合計	４９０万円

先発隊航空運賃	２０万円ｘ3人	６０万円	(シカゴ往復)
先発隊滞在費	１８万円ｘ3人	５４万円	(２ヵ月分のFNAL滞在費)
本隊航空運賃	１５万円ｘ5人	７５万円	(シカゴ往復)
本隊滞在費	９万円ｘ5人	４５万円	(１ヵ月分のFNAL滞在費)
旅費合計		２３４万円	