

$K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 実験 (KEK-E391a) の現状

エンジニアリングラン速報

KEK-E391a 実験グループ

高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所

稲垣 隆雄

takao.inagaki@kek.jp

2002 年 12 月 11 日

はじめに

$K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊の分岐比測定を目指す E391a 実験は、10 月 30 日から約 1.5 ヶ月間のエンジニアリングランを行っている。E391a は、2004 年 2 月から本実験を行うことを目指して、図 1 の様なカロリメーターを主体とする測定装置を建設している。その中で、今回のランのために用意したのは、図中の点線で囲った「下流部エンドキャップ」部分である。この部分には読み出し本数という点では全体の 70% 以上の測定器が配置される。また、この「下流部エンドキャップ」のみが、 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊の π^0 からの 2γ の測定に

使われる。そして、他の部分は専らベトーとしてのみ使われるが、読み出しエレクトロニクスは同じである。

これらの理由から、今回のランによって、読み出し系についてはほとんどすべての課題、測定器や解析については最も重要な部分を調べることが出来る。あえて、エンジニアリングランと呼ぶ所以である。ランの目標は、エレクトロニクス、データ採取、および解析に至る測定法をチェックすることと、データを使ってカロリメーターの較正をすることである。実は、われわれはユニークな方法でこの「較正」を試みているので、ここでは、それに焦点を絞って話を進めたい。

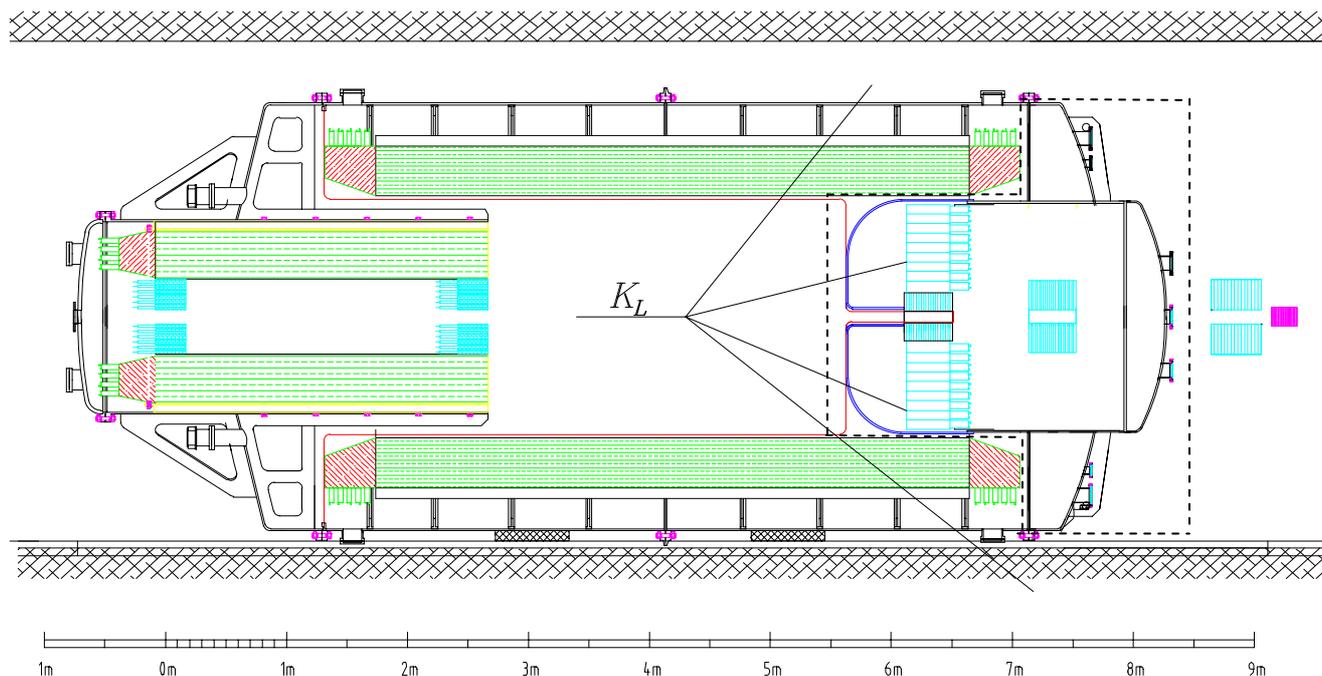


図 1 E391a 測定装置

点線で囲った部分が下流部エンドキャップ

下流部エンドキャップの組立

図2は、下流部エンドキャップ部の測定器配置図である。中央にビームが通過する穴があり、内から順に、タングステンとシンチレーターを積層したカラーカウンター（6モジュール）、KTeV実験から借用している純CsI結晶（25モジュール）、E162実験で使われた純CsI結晶（552モジュール、その内、外側の56モジュールは円形シリンダーに合う様に削られている）、鉛・シンチレーター積層型カウンター（24モジュール）が、直径約2mのステンレスシリンダー内に設置されている。

これらを下から順に、スペーサーを挿入することなく、しかも、相互に0.1mm以上の隙間も作ることなく組み上げるのに約2ヶ月を要した。図3がその完成記念写真である。エンジニアリングランの直前には、これらのカロリメーターの上流に32枚のプラスチックシンチレーター（CV：Charged-Veto）が設置された。これによって、荷電粒子と γ を区別する。

カロリメーターの較正の方法

本来、電磁カロリメーターはよく分かったエネルギーの電子ビームを使って較正するのが基本であるが、E391a実験の場合は、時間的に限られていることもあって、次の様な漸近的な方法を採用した。

宇宙線ミュオンおよびビーム中のミュオンを使う。

ビーム軸上に金属板を置き、中性粒子が衝突して生じる π^0 、 η などからの 2γ を使う。

$K_L \rightarrow \pi^0\pi^0\pi^0$ からの 6γ を使う。

プロセスでADCとエネルギー間の換算係数を10%以下の精度で求め、最終的にとで、逐次法（イテレーション）を使って1%に達することを目標とした。

あらかじめ、25モジュール/2日のペースで、すべてのカロリメーターを宇宙線によって調べた。このテストは、最終的な使用を考慮して真空中で行われた。さらに、組み上げ中も、一日分の積み上げが終わると、夜は宇宙線ランを走らせて、作業によって生じたかも知れない重大な変化に備えた。そして、組み上げ終了後には、本格的な宇宙線テストを行った。その結果を使って光電子増倍管に供給する高電圧値を漸次決めていった。これらのテストでは、実際に使用するのと同様に、長手方向を水平に置いたので、鉛直成分の多い宇宙線はカロリメーターを横切ることになる。たとえば、最も数の多いE162-CsIは7cm角で30cm長さの直方体なので、ミュオンが7cm通過した時の応答を測ることになる。その際に落とすエネルギーは39.4MeVで、実験での測定域（GeV）より随分と小さい。これが、宇宙線

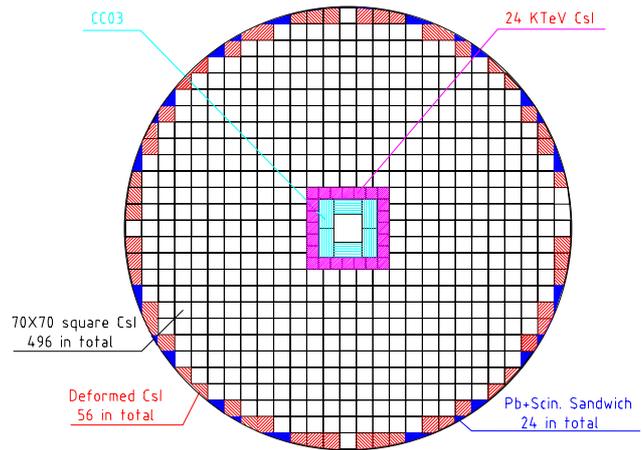


図2 下流部エンドキャップ正面図



図3 積み上げ完成記念写真（2002年9月20日）

を使った測定では換算係数をせいぜい10%の精度でしか測れないだろうと予測した理由である。実は、これは間違いであった。もっと精度がよかったのである。

話が前後するが、今年5月には π^2 ラインを使ってビームテスト・T510を行った。T510ではサンプルとして選んだ25本（5×5に並べた）のCsIモジュールを電子ビームで較正した。TOFを使って π^2 ライン自体の運動量設定確度も調べ、補正した結果、結晶中に落としたエネルギー（デボジットエネルギー）とADC間に、0.1%オーダーの直線性があることが判った。

さらに、T510ではビームを使った測定と宇宙線での測定を同じ時間内で行った。CsIが環境からの影響を受けやすいので、それを相殺するためである。図4は3GeVの電子ビームで得たADCスペクトルのピークと宇宙線で得たものの比のサンプル分布である。モジュール間のばらつきは3%以下で、このことから、宇宙線を使った較正も案外いけるといふ感触を得ていた。

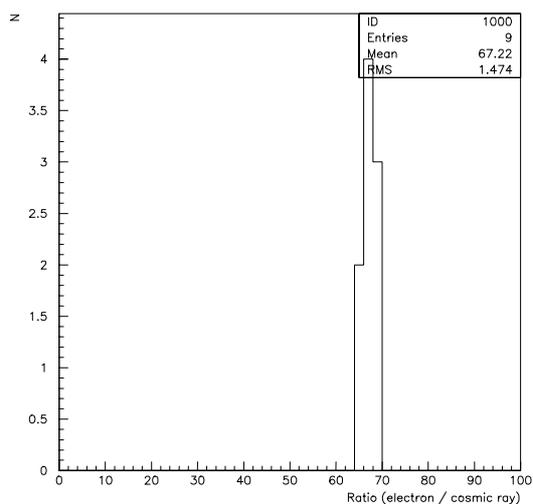


図4 3GeVの電子ビームと宇宙線とでのADCスペクトルのピークの比

組み上げ後のミュオンを使った較正

さて、組み上げ後の測定に戻る。図5が、宇宙線ミュオンによるイベントのオンラインプロットである。まず、上から下まで通過して、しかも直線性の良いイベントを選び出して直線近似した軌跡を求める。この軌跡から通過厚みを個々のモジュールに対してイベント毎に求めることが出来る。

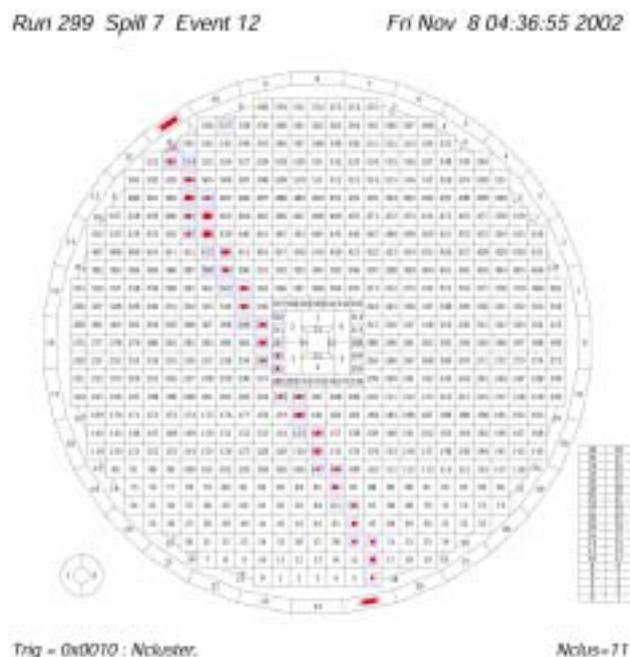


図5 宇宙線ミュオンによるイベントプロット

図6(a)は、測定した平均電荷量（ADC分布のピークに対応）をモジュール毎にプロットしたものである。値はデポジットエネルギーが1MeVであるように規格化している。よく揃っているのは、高電圧がうまく設定できていることを示している。

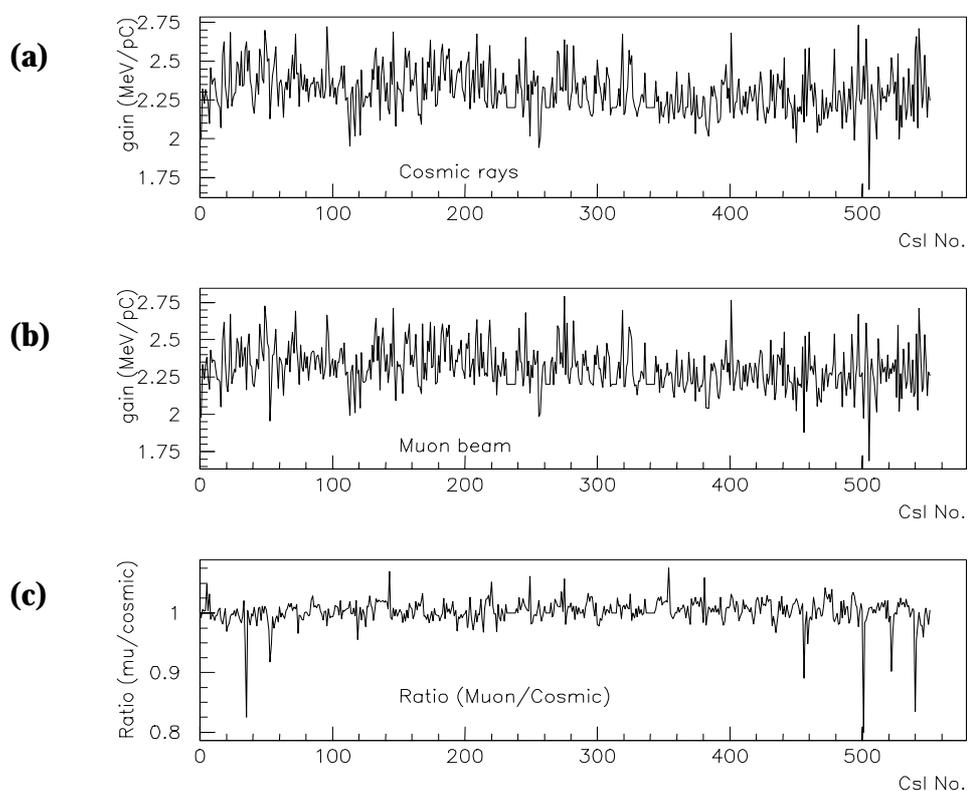


図6 デポジットエネルギー1MeV当たりの平均電荷量のモジュール毎の分布
(a) 宇宙線、(b) 突き抜けミュオンに対して、(c) それらの比

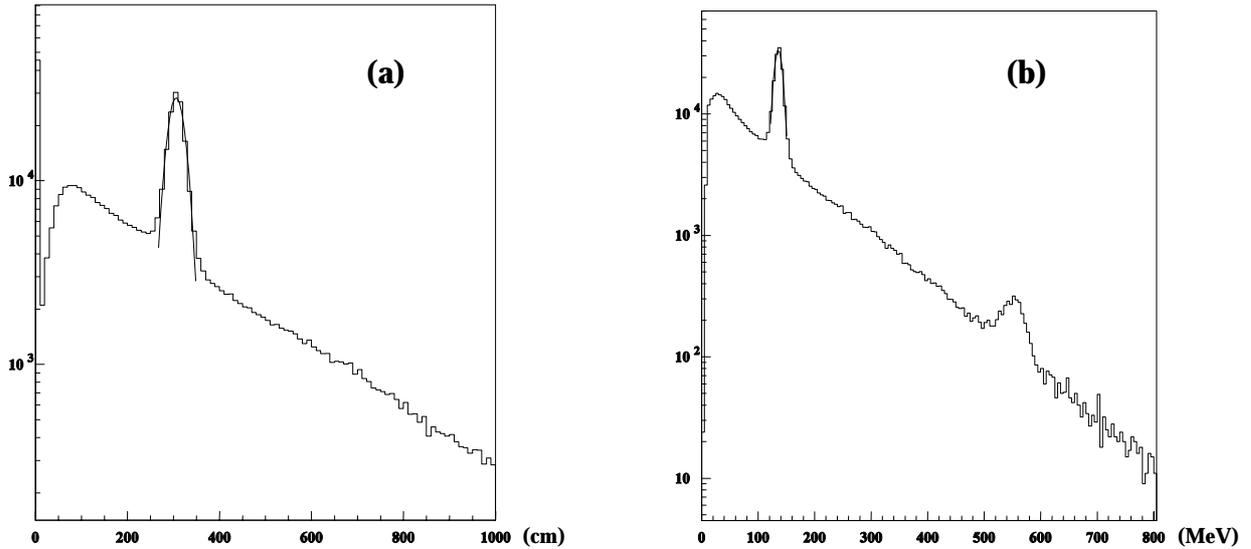


図7 (a) 2γ の発生点の分布、(b) 2γ の有効質量分布

K0 ラインのシャッターを閉めると 10m のシールドを突き抜けた平行性のよいミュオンビームが得られる。得られたイベントから、1 モジュールにのみ信号があって、周りのモジュールに信号がないものを選ぶと、そのモジュールを突き抜けたイベントサンプルが得られる。図6 (b) は、この突き抜けミュオンを使って求めた「規格化された平均電荷量」である。

そして、宇宙線によるものと突き抜けミュオンの比が、図 6 (c) である。ほとんどのモジュールに対して、比が 1 になっている。モジュール間のばらつきは小さい。突き抜けミュオンと宇宙線の通過距離には、E162-CsI では 4.29 倍、KTeV-CsI では 10 倍の違いがあるので、その間の比例関係も確かめたことになる。20% 近くのずれを示しているのは、端に置かれた細いモジュールで、隣にカロリメーターがなく、突き抜けミュオンが斜めにかすったイベントが混入したためと考えられる。図 6 には、積層型のカロリメーターは含まれていないが、斜めに削った 56 モジュールが含まれている。宇宙線の軌跡を追いかけることで、通過距離がうまく算定でき、規格化された平均電荷量を精度よく求められたことを示している。

π^0 生成と K_L 崩壊を使った逐次法

ビーム軸上の CsI の前面から 3m のところに、厚み 2cm のアルミニウム板を置き、カロリメーター上に 2γ 信号が見える事象を観測した。 2γ が π^0 からのものと仮定して求めたビーム軸上の発生点分布は図 7 (a) の様である。逆に、発生点を板の中央として求めた 2γ の有効質量分布が、図 7 (b) である。これらの解析では、宇宙線による較正值を使

った。また、衝突するビームが細いペンシル状なので、発生点はビーム軸上にあるとしている。

一方、エンジニアリングランでは、各種 K_L 崩壊も測定している。図 8 は同じく宇宙線による較正值を使って求めた 6γ -イベントの有効質量分布である。 $K_L \rightarrow \pi^0\pi^0\pi^0$ のきれいなピークが見える。

各々のピーク付近のサンプルを使って、ピーク幅が小さくなるように、一つ一つのモジュールの換算係数を繰り返し修正し、より精度よい係数を得ようとするのが逐次法である。図 7、8 は、宇宙線による較正值を使っているので、このプロセスのいわば出発点（初期値）である。

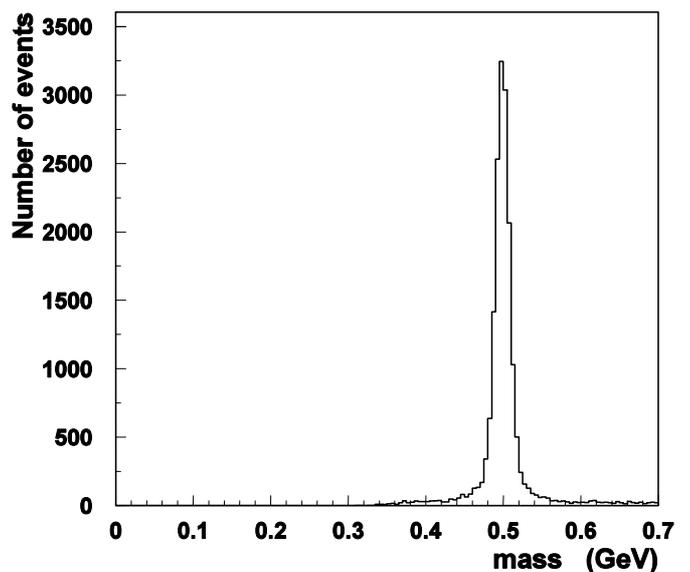


図8 6γ -イベントの 6γ の有効質量分布

図 9 は、 $K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0 \pi^0$ のデータを使ってどの程度まで精度が上げられるかをシミュレーションで予測したものである。縦軸は精度、横軸はサンプル数である。宇宙線による較正が予想以上に優れていたため、数百 k のサンプルで得られうる究極まで到達できそうである。我々は π^0 生成ランでは、アルミニウム板をビーム軸上の 2 箇所の位置に置いてそれぞれ 1.5 M (1.5×10^6) の π^0 イベントを採り、 $K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0 \pi^0$ は、1M イベントを集める予定である。

図 7、8 の様な π^0 や $K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0 \pi^0$ のきれいなピークが得られていることは、宇宙線による較正がうまくいっており、今後の逐次法への期待も高まったことを示すだけでなく、信号があるモジュールの空間的パターンからクラスターを捜すルーチンなどソフトウェアもある程度整備されつつあることを示している。ここで強調したいのは、ラン後には、ピークから約 10M イベントの起源の分かった γ サンプルが得られ、カロリメーターの理解とソフトウェア開発に利用できるという副産物があることである。

エンジニアリングランでは、他にも面白いことがあるし、製作途上のパレルカロリメーターについても触れたいが、別の機会に譲る。この期間には、Dubna、Chicago、釜山、台北などの海外組と共に、佐賀、大阪、山形などから大勢の若手や先生方がつくばに集まり、にぎやかに仕事を進めている。読者諸氏も是非一度ご来訪くださることを願っている。実験場所は、KEK 東カウンターホールの南側である。

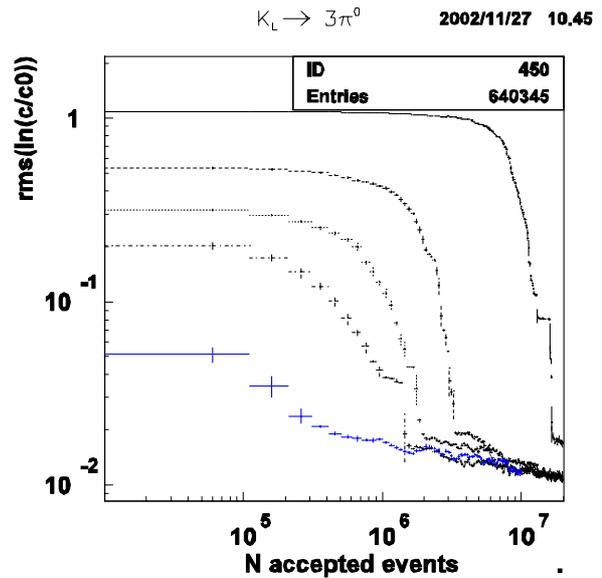


図 9 逐次法で求められる精度と使用できるイベントサンプル数の関係

いくつかの線は、初期値の違いによる。初期値の精度が一番よいのが、今回の場合に当たる。