

千葉大学大学院自然科学研究科修士論文

高屈折率および低屈折率シリカエアロゲルを用いた  
チェレンコフカウンターによる粒子識別

理化学専攻  
基礎物理学講座  
06UM1102  
東海林彰



## 概要

千葉大学粒子線研究室では従来、屈折率 1.005 から 1.08 までのシリカエアロゲルの製造を行っていたが、現在では、1.0022 から 1.3 までの任意の屈折率を持つゲルの作成が可能となっている。このようなゲルの作成は、世界で唯一本研究室のみが行っている。

新たに作成が可能となった高屈折率、低屈折率のシリカエアロゲルは、J-PARC50GeV 陽子シンクロトロン固定ターゲット実験と LEPS(Laser-Electron Photons at SPring-8)実験における利用が計画されている。

本研究の目的は、これらの実験に用いられる、高屈折率あるいは低屈折率のシリカエアロゲルを利用したチエレンコフカウンターについて、その粒子識別精度を見積もり、効率的な粒子識別が可能となるような実験ジオメトリを決定することである。

方法としては、シミュレーションコード GEANT4 によるモンテカルロシミュレーションを用いた。シリカエアロゲルを用いたチエレンコフカウンターの性能評価シミュレーションはこれまでにも行われているが、過去の事例ではゲル中での多重散乱及びノックオンエレクトロンの発生は扱ってこなかった。本研究では、それらの事象を含めたチエレンコフ光発生現象全体について正しくシミュレーションを行った。

(以上)

10. The following table summarizes the results of the study. The first column lists the variables, the second column lists the descriptive statistics, and the third column lists the regression coefficients.

在於此。而其後之學者，又以爲「子雲之賦」，實「漢賦」之祖。蓋「賦」者，古文之體也，非獨子雲之賦，漢人皆有之。

Figure 1. The effect of the number of nodes on the performance of the proposed algorithm.

10. The following table summarizes the results of the study.

10. The following statement is true or false: The U.S. Constitution is the oldest written constitution still in use.

# 目次

## 第一章 はじめに

- 1.1.シリカエアロゲル
- 1.1.1.シリカエアロゲルとは
- 1.1.2.高屈折率シリカエアロゲルと低屈折率シリカエアロゲル
- 1.2.チレンコフカウンターによる粒子識別
- 1.3.光電子増倍管
- 1.4.GEANT4 によるモンテカルロシミュレーション

## 第二章 本研究の目的

## 第三章 高屈折シリカエアロゲルチレンコフカウンターのシミュレーション

- 3.1.シミュレーション概要
- 3.2.シミュレーションの検証
- 3.3.実験ジオメトリの決定

## 第四章 低屈折率シリカエアロゲルチレンコフカウンターのシミュレーション

- 4.1.シミュレーション概要
- 4.2.シミュレーション結果

## 第五章 結論

## 第六章 補遺



# 第一章 はじめに

## 1.1. シリカエアロゲル

### 1.1.1. シリカエアロゲルとは

シリカエアロゲルは、チェレンコフ輻射体として高エネルギー物理学実験に広く用いられている物質である。LEPS実験では現在、輻射体として屈折率1.03と1.008のシリカエアロゲルを使用している。シリカエアロゲルは固体でありながら非常に低屈折率であり、さらに疎水性を備えているため大変扱いやすい物質である。固体するために高圧ガスのように容器の物質量に関わる問題がなく、疎水性のために空気中に長時間放置しても劣化による屈折率や透明度に対する影響が出ない。このような特徴は他の物質では得られないものである（表1. 1）。

物質		屈折率
固体	ポリエチレン	1.58
	ガラス	1.47
液体	水	1.33
	水素	1.11
	ヘリウム	1.024
気体	二酸化炭素	1.00045
	水素	1.000138
	ヘリウム	1.000035

表1. 1 物質の屈折率

シリカエアロゲルはゲル状の物質を超臨界乾燥させることによって作られる多孔質の固体であり、体積の90%以上が空気で占められている。 $\text{SiO}_2$ を主成分とし、無色透明である。シリカエアロゲルはシリカ(二酸化ケイ素)粒子の特異な構造からなる。まず、シリカ分子が直径1から2nmの一次粒子を形成し、この一次粒子が集合して最大直径50nmの二次粒子を形成する。この一次粒子、二次粒子の密度はガラスと同程度の2.4~2.6 g /立方cmである。二次粒子は互いに鎖状に結合して絡み合い、三次元ネットワークを形成して多孔質のゲルになっている(図1.1)。シリカエアロゲルはこの構造によ



って内部に大量の空気を含むことで固体でありながら驚異的な低屈折率を実現している。その密度は0.022~0.11g/立方cmほどである。

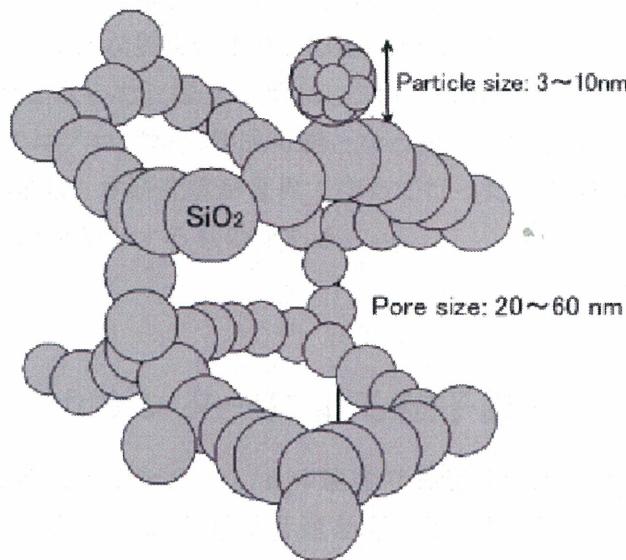


図1. 1 シリカエアロゲルの二次粒子構造

シリカエアロゲルの性質として低屈折率の他に、高い断熱性や気体に近い誘電率、防音性などが挙げられる。エアロゲルの性質のうち、物理量として重要なのは、屈折率n、密度 $\rho$ 、透明度(透過長 $\Lambda$ で数値化される)の3つである。このうち、密度 $\rho$ と屈折率nの間には、

$$n = 1 + 0.25 \rho$$

の関係がある。

エアロゲル中を通過する光は、レイリー散乱を受ける。レイリー散乱は、光の波長 $\lambda$ に比べてサイズが1/10程度の小さい粒子による散乱で、エアロゲルの二次粒子のサイズは可視光領域の光波長のおよそ1/10となっている。

ゲルの屈折率nは、レーザー・フラウンホーファー法を用いた測定によって決定される。

透明度の測定は分光光度計を用いて行われる。使用する光の波長は185から800nmである。光の透過長 $\Lambda$ は、ゲルを通過した光の強度をT、ゲルを除いて測定した光の強度をt、ゲル厚さをdとして、 $T/t = \exp(-d/\Lambda)$ の関係式によって求められる。

### 1.1.2. 高屈折率シリカエアロゲルと低屈折率シリカエアロゲ



ル

従来作られてきたエアロゲルの屈折率は、 $1.005 \leq n \leq 1.08$ 以下であった。しかし近年、ピンホール乾燥法という新たな製法により、 $1.08 \leq n \leq 1.3$ という高い屈折率を有するエアロゲルの製作が可能となった。また同時に、フレーム構造法によって $1.0022 \leq n \leq 1.005$ という低屈折率のエアロゲルも作成可能となった。このような高屈折率および低屈折率エアロゲルの作成は、本研究室が世界で初めて行ったものであり、従来不可能であった様々な物理実験が可能とするものである。

## 1.2. チェレンコフカウンターによる粒子識別

荷電粒子が屈折率  $n$  の物質中を  $\beta > 1/n$  の速度で通過すると、チェレンコフ光と呼ばれる電磁輻射を放射する。これは物体が音速を超えたときに発生する衝撃波と同じ原理で球状ホイレンス波面として形成される（図1.2）

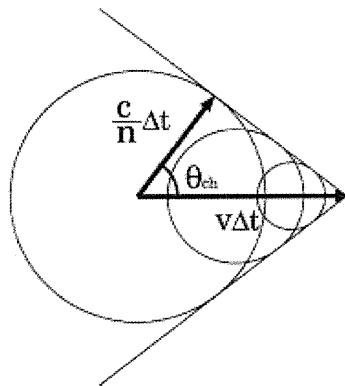


図1.2 チェレンコフ輻射

この時、ある時間  $\Delta t$  に対してこの波面は  $\Delta t \cdot c / n$  まで伝わり、その間に粒子は  $v \Delta t$  だけ進む。この二つの進行距離の関係からチェレンコフ角  $\theta_{ch}$  が求まる。

$$\cos \theta_{ch} = \frac{(c/n) \Delta t}{v \Delta t} = \frac{1}{\beta n} \quad (1.1)$$

また、発生するチェレンコフ光の光子数  $N$  は

$$N = 2 \pi \alpha L \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} \frac{\sin^2 \theta_{ch}}{\lambda^2} d\lambda \quad (1.2)$$



で与えられる。ここで  $\alpha$  は微細構造定数、 $L$  は粒子が通過する物質の厚さ、 $\lambda$  は光の波長である。

(1.1)式から、チエレンコフ光は、荷電粒子の速度が  $\beta > 1/n$  の時にのみ発生するといえる。これよりチエレンコフ光が発生するための、荷電粒子の閾値運動量が決まる。荷電粒子の質量を  $m$ 、エネルギーを  $E$ 、運動量を  $p$  とすると、 $E^2=p^2 \cdot m^2$  と  $p=\beta E$  の関係を用いて

$$p > m / (n^2 - 1)^{0.5} \quad (m : \text{荷電粒子の質量}) \quad (1.3)$$

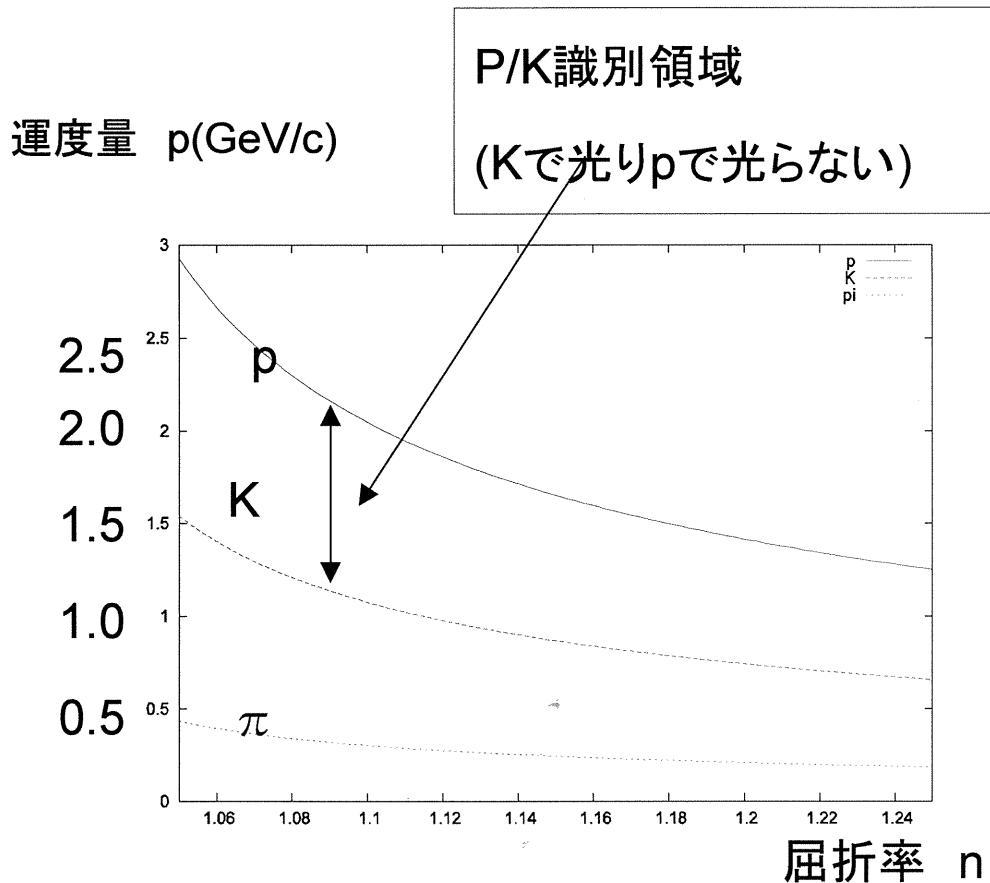


図1.3. 屈折率と閾値運動量

高屈折率ゲルでは、p/K識別。低屈折率ゲルでは、e/その他の識別が可能である。



### 1.3.光電子増倍管

シリカエアロゲル中で輻射された光子を検出するために使用されるのが光電子増倍管(PMT, PhotoMultiplier Tube)である。PMTには大きく分けて二種類あり、その一つがラインフォーカス型、もう一つはファインメッシュ型である。

PMTに入射した光は光電面で光電効果を起こし、電子(光電子)に変換される。変換された電子は電場で加速され、ダイノードに衝突するたびにダイノード中の電子を叩き出して増幅される。PMT中には数段のダイノードがあり、増幅過程は複数回繰り返される。アノードに到達した電子は電気信号として出力される。

ラインフォーカス型では無磁場中の電子の軌道を想定してダイノードの位置が設定されているため、磁場中では電子の軌道が変わってしまいダイノードに衝突しないため、期待通りに増幅が行われない。この欠点を改良したのがファインメッシュ型PMTである。ファインメッシュ型PMTはダイノードを細かい網目状にして各ダイノード面を接近させた構造をしている。これにより、電子が磁場によって軌道を変えても無数にある網目のどこかに当たることになり、管軸方向の磁場による影響を受けにくくなるため、磁場中においても使用が可能となる。LEPS実験ではファインメッシュ型PMTが用いられている。

### 1.4.GEANT4によるモンテカルロシミュレーション

本研究のシミュレーションにはGEANT4というソフトウェアを使用した。GEANT4とは、粒子と物質の相互作用をシミュレーションするためのツールであり、高エネルギー物理、原子核実験、宇宙科学、放射線医学などの分野で広く使用されている。

GEANT4でアプリケーションプログラムを実装するユーザーは、まず以下の三種類の情報を設定する。これらは、GEANT4でシミュレーションを行う上で最低限必要な情報である。

1. 測定器の構造情報(ジオメトリ)
2. 入射粒子の情報
3. 粒子トランスポート時に考慮する粒子と相互作用の種類

粒子の輸送は、ステップと呼ばれる単位毎に行われる。一つのステップを処理するためのアルゴリズムは、以下のようになっている。

1. ステップはじめの粒子速度の計算
2. 予想される各素過程のステップ長のうち、最も短い物を選択

the first time in the history of the world, the people of the United States have been compelled to go to war with their own government. The people of the United States have been compelled to go to war with their own government. The people of the United States have been compelled to go to war with their own government. The people of the United States have been compelled to go to war with their own government.

カウンターについて、その粒子識別精度をシミュレーションによって見積もり、効率的な粒子識別が可能な実験ジオメトリを決定することである。

従来の $1.01 < n < 1.03$ のシリカエアロゲルは、KEKB-factory実験において衝突点での素粒子反応を観測するBelle検出器において、高運動領域におけるK/ $\pi$ 粒子識別のためのエアロゲルチレンコフカウンターとして用いられてきた。

高屈折率シリカエアロゲルチレンコフカウンターは、1.0～1.5GeV/cの運動量領域における陽子と $\pi$ 中間子やK中間子の粒子識別に用いることができ、J-PARC50GeV陽子シンクロトロン固定ターゲット実験における利用が計画されている。

この実験は、K1.8ビームラインを利用して鉄原子からのE<sub>0</sub>原子X線の初めての観測を目指すものである。この実験では、 $K^- + p \rightarrow K^- + E_0^-$ の反応からシグナルとしてK<sup>+</sup>中間子を検出するが、その際、バックグラウンドとして弾性散乱による陽子が大量に発生する。Belle検出器の場合は、粒子同士を衝突させるコライダー実験に用いられていたため、固定ターゲット実験に比べてビーム強度が低く、オフラインでの解析が十分であったが、この実験では、ビーム強度が1.4MHzと非常に高く、イベントデータ量は100kHzにまで達する。一般的にデータ処理能力は1kHzが限界であり、すべてのデータを採取してオフラインでデータ解析を行うことは不可能である。そのため、トリガー一段階でP/K粒子識別を行い、不要な陽子データのうち99.9%を破棄してデータ量を数百Hz以下に落とすことでオンラインでのデータ処理を行う必要がある。

シリカエアロゲルチレンコフカウンターによる粒子識別は、粒子の質量mおよび運動量pと輻射体であるエアロゲルの屈折率nの関係

$$p \geq m/(n^2 - 1)^{0.5}$$

によって、チレンコフ発光の有無が決定されるという事実に基づく。J-PARC実験の場合、運動量1～1.5GeV/cの入射粒子について、K<sup>+</sup>中間子ならば発光し、陽子の場合は発光しないような高い屈折率のゲルを用いて粒子の識別を行うが、この識別が正しく行われないことがある。検出器に入射した陽子がゲル中でノックオン電子を叩き出し、そのノックオン電子がチレンコフ発光を起こすケースである。これにより、本来バックグラウンドである陽子がシグナルとして観測されてしまうという粒子の誤識別が起こる。粒子の誤識別をなくし、正しい粒子識別を行うための検出器のジオメトリ、Np.e.閾値等を設定することが、高屈折率シリカエアロゲルチレンコフカウンターについての本研究の目的となる。本研究では、K<sup>+</sup>中間子と陽子それぞれがシリカエアロゲルに入射した際に検出される光量をシミュレーションによって見積もり、Np.e.閾値によって陽子データの99.9%を除去した際にK<sup>+</sup>中間子由来の光量(シグナル)がバックグラウンドに比べて十分に得られるような検出器のジオメトリを決定し、p/K粒子識別の性能を評価した。

低屈折率シリカエアロゲルチレンコフカウンターは、電子とミューオン、 $\pi$ 中間子、K中間子、陽子の識別用に、LEPS(Laser-Electron Photons at SPring-8)実験における



利用が計画されている。

LEPS実験は大型放射光施設SPring-8のBL33LEPビームラインで行われているクオータク核物理実験である。Spring-8の蓄積リング中の高強度8GeV電子ビームを利用すると逆コンプトン散乱により最大エネルギー2.4GeVの高強度変極ガンマ線を生成できる。この変極ガンマ線を利用した $\phi$ 中間子光生成実験により、 $\phi$ 中間子の生成閾値近傍での生成機構を明らかにし、強い相互作用とハドロン構造に新しい知見をもたらすことができる。観測される反応は、 $\gamma + p \rightarrow p + \phi$ 、 $\phi \rightarrow K^+ + K^-$ である。

$\phi$ 中間子光生成やその他のハドロンイベントを観測する上で最大のバックグラウンドとなるのは、対生成により発生した電子および陽電子である。LEPS実験は現在、世界最高強度 $10^7$  photon/secの逆コンプトンガンマ線を実現しているが、この高強度ガンマ線のために大量の電子陽電子対生成が起こり、生成される電子用電子対は1MHzにまで達する。データ処理限度はJ-PARC実験と同様に1kHzであるため、データ解析を行うためにはこのバックグラウンドを除去してデータ量を数百Hzにまで落とす必要がある。また、この実験は強磁場中で行われるため、通常の光電子増倍管ではなく数百ガウスの磁場中でも使用可能なファインメッシュ型PMTが用いられている。ファインメッシュ型PMTは量子効率が悪く、通常のPMTの半分程度となってしまうため、検出される光量は少なくなる。そのため集光の工夫を考慮した検出器のジオメトリを決定し、e/K粒子識別の性能を評価する必要がある。

従来のシリカエアロゲルチエレンコフカウンターはLEPS実験において既に使用されてきたが、低屈折率エアロゲルチエレンコフカウンターを用いることによって新たに高運動量 $\pi$ 中間子のデータを得ることが期待されている。

紫外線レーザー使用時、ガンマ線ビーム運動量は3GeV/cであり、発生する $\pi$ の運動量は最大で1.5GeV/cと考えられる。この時、e/ $\pi$ 識別を可能にするためには、 $\pi$ のチエレンコフ閾値からゲル屈折率nが1.0043以下である必要がある。また、ビーム強度は1MHzであり、電子陽電子対イベントの99%の除去が要求される。これに対応するNp.e.の値は、Np.e. $\geq$ 2.3である。

可視光レーザー使用時、ガンマ線ビームの運動量は2.4GeV/cであり、発生する $\pi$ の運動量は最大で1.2GeV/cと考えられる。この時、e/ $\pi$ 識別を行うためには、 $\pi$ のチエレンコフ閾値から、ゲル屈折率は1.0067以下でなくてはならない。また、ビーム強度は10MHzであり、電子陽電子対イベントの99.9%の除去が要求される。これに対応するNp.e.の値は、Np.e. $\geq$ 3.45である。

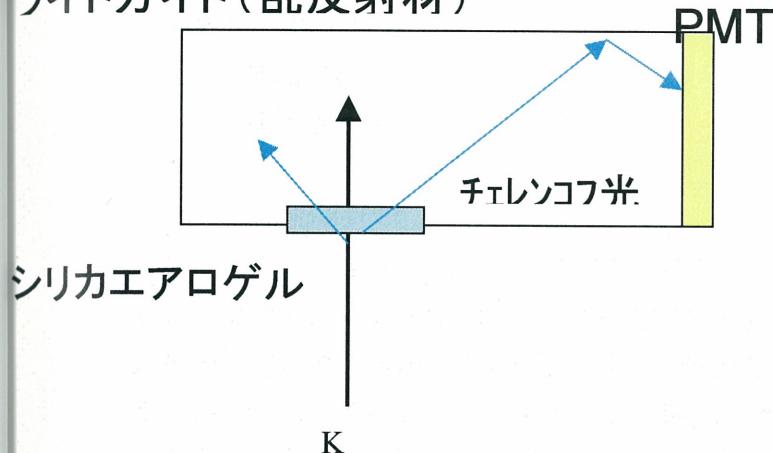
### 第三章 高屈折率シリカエアロゲルチエレンコフカウンター のシミュレーション

Δ

### 3.1. シミュレーション概要

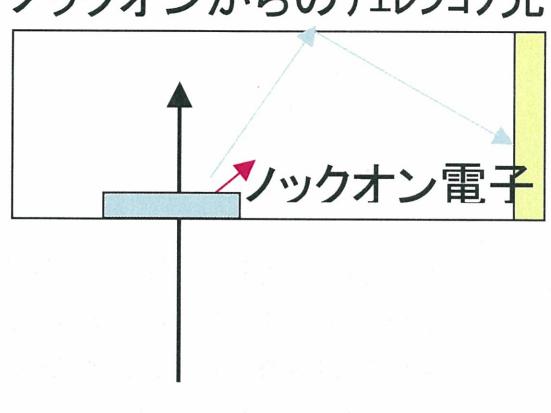
高屈折率のゲルについて本研究で行ったシミュレーションについて説明する。基本的には以下のようなジオメトリを考える。その各パラメータをさまざまに変化させたときの、チェレンコフカウンターの p/K 識別能力を見積もり、最適なジオメトリを決定する。

ライトガイド(乱反射材)



チレンコフ閾値運動量以上

ノックオンからのチレンコフ光



チレンコフ閾値運動量以下

入力したパラメータは、入射粒子の運動量、ゲルのサイズ、屈折率、密度、透過長、反射材及び鏡の反射率、PMT の QE である。PMT の QE としては HT8500 のデータを用いた。

シミュレーションのアルゴリズムは以下の通り。

1. まず、入射粒子がゲルに入り、ゲル中でチレンコフ光を発生。粒子がステップを繰り返して進む。そのエネルギー損失および多重散乱
2. ゲル中で発生したチレンコフ光がステップを繰り返す。ゲル中で光はレイリー散乱される。散乱されたチレンコフ光のうち、1%は吸収される(非検出)とする。ゲル中のステップは光がゲルの外に出るか、ゲルに吸収されるまで続く。
3. ゲルの外に出たチレンコフ光が
  - a. ライトガイドに入射しない → 非検出
  - b. ライトガイドに入射
4. ライトガイド内に入射したチレンコフ光が

其後，我到過幾處，都是在那裏的。我到過那裏，是因為我喜歡那裏的風景，那裏的風景，是那麼的美，那麼的優美，那麼的令人心醉。

那裏的風景，是那麼的美，那麼的優美，那麼的令人心醉。那裏的風景，是那麼的美，那麼的優美，那麼的令人心醉。

- a. 反射面で吸収される→非検出
- b. 反射面で反射される。反射面は、シミュレーションの条件によって反射材と乱反射材の二つのケースがある。反射材の場合、光は鏡面反射し、乱反射材の場合、光は乱反射する。

#### 5. 4.を数回繰り返したチエレンコフが

- a. 再びライトガイドの外へ出る。この場合、ゲルの外へ出る(非検出)か、再びゲルの中に入る(2.に戻る)
- b. PMTに到達

#### 6. PMTに到達したチエレンコフ光が、あらかじめ入力しておいたPMTのQEの波長分布にしたがって

- a. 検出される
- b. 検出されない

シミュレーションに用いたエアロゲルのデータは、サイズ、屈折率、密度、透過長である。ただし、本来 GEANT では物質内での光の散乱と吸収について、散乱長と吸収長を別々に入力するが、ゲルの散乱長と吸収長を別々に測定することは原理的に不可能なため、透過長を散乱長として入力し、散乱した光子のうち 1%が吸収によって失われると仮定した。この仮定については、過去に行われてきたエアロゲル研究の前例に従った。

## 3.2. シミュレーションの検証

シミュレーションが正しく行われていることを確かめるために、以下のような手順で検証を行った。

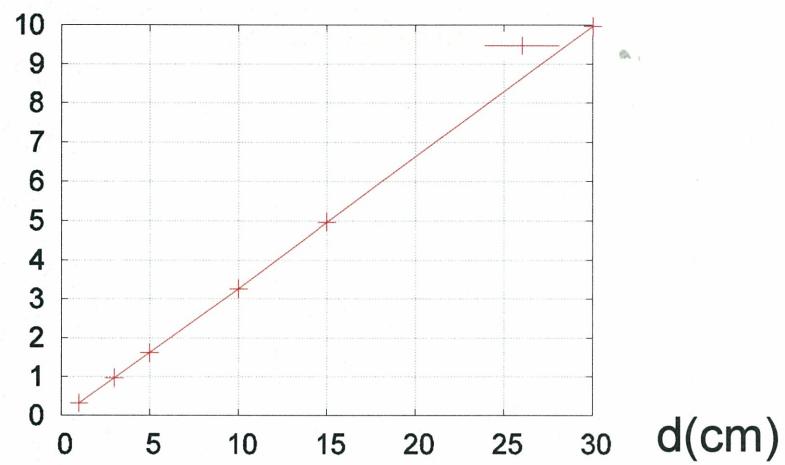
### 検証 1. 入射粒子の素過程

まず、チエレンコフ光を発生させる入射粒子についてのシミュレーションが正しく行われているかどうかを調べた。空間中にゲルを配置しただけの、図のようなジオメトリを用意し、そこに粒子を打ち込む。電子と陽子について、ゲルの厚さを変えたとき、ゲル中のエネルギー損失とゲルから出るときの多重散乱による散乱角の平均値がどのように変化するのかを求め、理論値に一致することを確かめた。

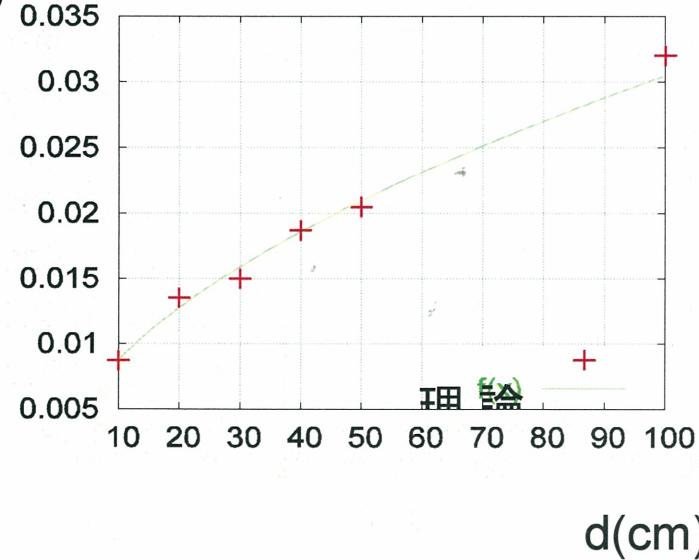
結果は以下の通り。いずれも、理論式への一致が確かめられた。



$dE$ (MeV)



$\theta$



検証 2. ノックオン電子の発生

1988.12

1988.12.10 1988.12.11

1988.12.12

1988.12.13

1988.12.14

1988.12.15

1988.12.16

1988.12.17

1988.12.18

1988.12.19

1988.12.20

1988.12.21

1988.12.22

1988.12.23

1988.12.24

1988.12.25

1988.12.26

1988.12.27

1988.12.28

1988.12.29

1988.12.30

1988.12.31

1989.1.1

1989.1.2

1989.1.3

1989.1.4

1989.1.5

1989.1.6

1989.1.7

1989.1.8

1989.1.9

1989.1.10

1989.1.11

1989.1.12

1989.1.13

1989.1.14

1989.1.15

1989.1.16

1989.1.17

1989.1.18

1989.1.19

1989.1.20

1989.1.21

1989.1.22

1989.1.23

1989.1.24

1989.1.25

1989.1.26

1989.1.27

1989.1.28

1989.1.29

1989.1.30

1989.1.31

1989.2.1

1989.2.2

1989.2.3

1989.2.4

1989.2.5

1989.2.6

1989.2.7

1989.2.8

1989.2.9

1989.2.10

1989.2.11

1989.2.12

1989.2.13

1989.2.14

1989.2.15

1989.2.16

1989.2.17

1989.2.18

1989.2.19

1989.2.20

1989.2.21

1989.2.22

1989.2.23

1989.2.24

1989.2.25

1989.2.26

1989.2.27

1989.2.28

1989.2.29

1989.2.30

1989.2.31

1989.3.1

1989.3.2

1989.3.3

1989.3.4

1989.3.5

1989.3.6

1989.3.7

1989.3.8

1989.3.9

1989.3.10

1989.3.11

1989.3.12

1989.3.13

1989.3.14

1989.3.15

1989.3.16

1989.3.17

1989.3.18

1989.3.19

1989.3.20

1989.3.21

1989.3.22

1989.3.23

1989.3.24

1989.3.25

1989.3.26

1989.3.27

1989.3.28

1989.3.29

1989.3.30

1989.3.31

1989.4.1

1989.4.2

1989.4.3

1989.4.4

1989.4.5

1989.4.6

1989.4.7

1989.4.8

1989.4.9

1989.4.10

1989.4.11

1989.4.12

1989.4.13

1989.4.14

1989.4.15

1989.4.16

1989.4.17

1989.4.18

1989.4.19

1989.4.20

1989.4.21

1989.4.22

1989.4.23

1989.4.24

1989.4.25

1989.4.26

1989.4.27

1989.4.28

1989.4.29

1989.4.30

1989.5.1

1989.5.2

1989.5.3

1989.5.4

1989.5.5

1989.5.6

1989.5.7

1989.5.8

1989.5.9

1989.5.10

1989.5.11

1989.5.12

1989.5.13

1989.5.14

1989.5.15

1989.5.16

1989.5.17

1989.5.18

1989.5.19

1989.5.20

1989.5.21

1989.5.22

1989.5.23

1989.5.24

1989.5.25

1989.5.26

1989.5.27

1989.5.28

1989.5.29

1989.5.30

1989.5.31

1989.6.1

1989.6.2

1989.6.3

1989.6.4

1989.6.5

1989.6.6

1989.6.7

1989.6.8

1989.6.9

1989.6.10

1989.6.11

1989.6.12

1989.6.13

1989.6.14

1989.6.15

1989.6.16

1989.6.17

1989.6.18

1989.6.19

1989.6.20

1989.6.21

1989.6.22

1989.6.23

1989.6.24

1989.6.25

1989.6.26

1989.6.27

1989.6.28

1989.6.29

1989.6.30

1989.7.1

1989.7.2

1989.7.3

1989.7.4

1989.7.5

1989.7.6

1989.7.7

1989.7.8

1989.7.9

1989.7.10

1989.7.11

1989.7.12

1989.7.13

1989.7.14

1989.7.15

1989.7.16

1989.7.17

1989.7.18

1989.7.19

1989.7.20

1989.7.21

1989.7.22

1989.7.23

1989.7.24

1989.7.25

1989.7.26

1989.7.27

1989.7.28

1989.7.29

1989.7.30

1989.7.31

1989.8.1

1989.8.2

1989.8.3

1989.8.4

1989.8.5

1989.8.6

1989.8.7

1989.8.8

1989.8.9

1989.8.10

1989.8.11

1989.8.12

1989.8.13

1989.8.14

1989.8.15

1989.8.16

1989.8.17

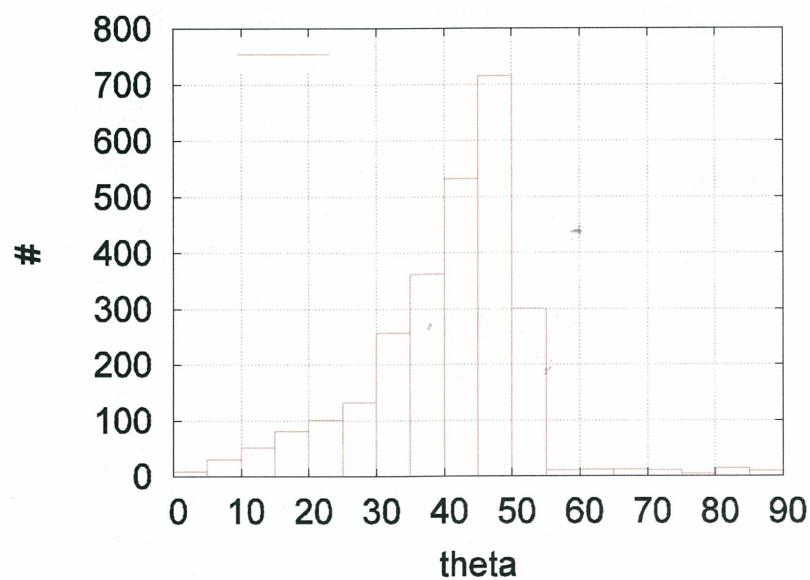
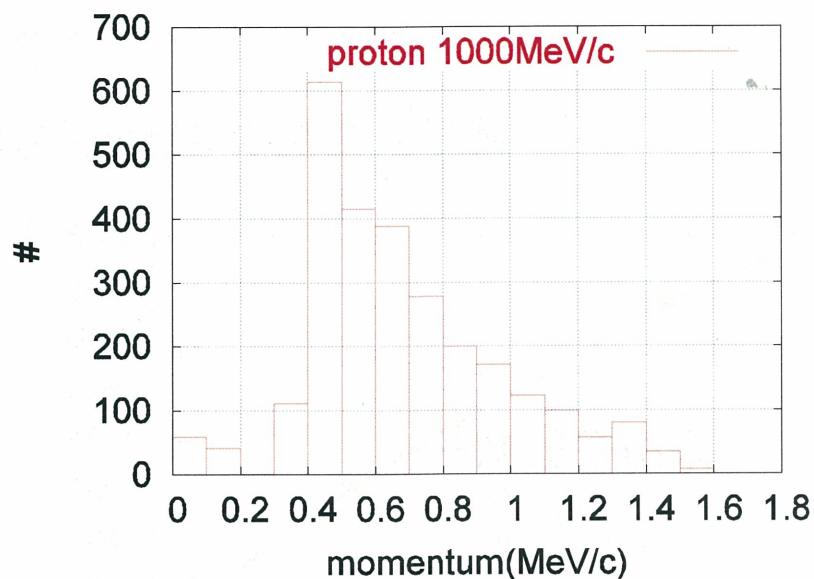
1989.8.18

1989.8.19

1989.8.20

次に、運動量  $1\text{GeV}/c$  の陽子を入射させた際のゲル中でのノックオン電子を確かめ、その運動量分布とゲルから飛び出す際の入射粒子の進行方向から計った角度の分布を求めた。

結果は以下の通り。ともに、 $1\text{GeV}/c$  の陽子を 1 万イベント入射させた時の結果である。



電子のチェレンコフ閾値を越える運動量を持つノックオン電子が誤識別の原因となる粒子である。ほとんどのノックオン電子は、粒子の入射方向に対して 30 から 55 度

the following table gives the results of the experiments made at the different temperatures.

The first column gives the temperature, the second the time of exposure, the third the amount of water added, and the fourth the percentage of reduction.

Temperature	Time of exposure	Amount of water added	Percentage of reduction
20°	1 hr.	10 ml.	20%
25°	1 hr.	10 ml.	25%
30°	1 hr.	10 ml.	30%
35°	1 hr.	10 ml.	35%
40°	1 hr.	10 ml.	40%
45°	1 hr.	10 ml.	45%
50°	1 hr.	10 ml.	50%
55°	1 hr.	10 ml.	55%
60°	1 hr.	10 ml.	60%
65°	1 hr.	10 ml.	65%
70°	1 hr.	10 ml.	70%
75°	1 hr.	10 ml.	75%
80°	1 hr.	10 ml.	80%
85°	1 hr.	10 ml.	85%
90°	1 hr.	10 ml.	90%
95°	1 hr.	10 ml.	95%
100°	1 hr.	10 ml.	100%

It is evident from the above table that the reduction increases with the increase of temperature.

Temperature	Time of exposure	Amount of water added	Percentage of reduction
20°	1 hr.	10 ml.	20%
25°	1 hr.	10 ml.	25%
30°	1 hr.	10 ml.	30%
35°	1 hr.	10 ml.	35%
40°	1 hr.	10 ml.	40%
45°	1 hr.	10 ml.	45%
50°	1 hr.	10 ml.	50%
55°	1 hr.	10 ml.	55%
60°	1 hr.	10 ml.	60%
65°	1 hr.	10 ml.	65%
70°	1 hr.	10 ml.	70%
75°	1 hr.	10 ml.	75%
80°	1 hr.	10 ml.	80%
85°	1 hr.	10 ml.	85%
90°	1 hr.	10 ml.	90%
95°	1 hr.	10 ml.	95%
100°	1 hr.	10 ml.	100%

It is evident from the above table that the reduction increases with the increase of temperature.

It is evident from the above table that the reduction increases with the increase of temperature.

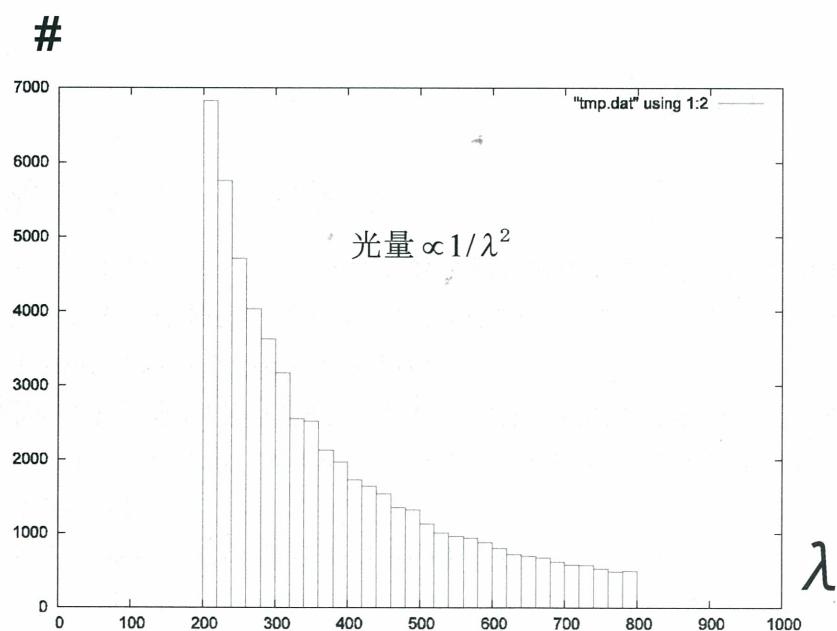
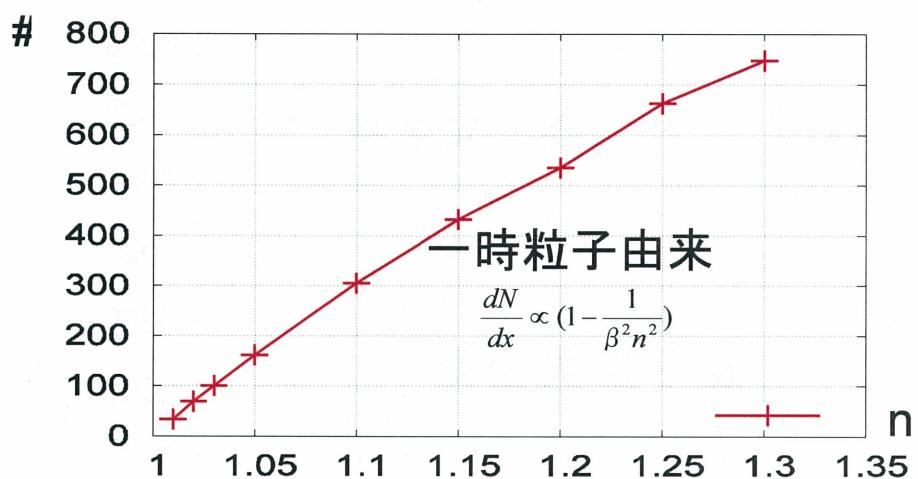
程度の角度で飛び出しがわかる。

### 検証 3. チェレンコフ光の発生

ゲル中で発生するチェレンコフ光の光子数が、ゲルの厚さや屈折率を変えた際にどう変化するかを確かめた。理論式への一致が確認できる。また、発生する光の波長分布を求め。光量が波長の二乗に反比例していることを確かめた。

結果は以下の通り。

### 厚さ1cm当たりの発生光子数

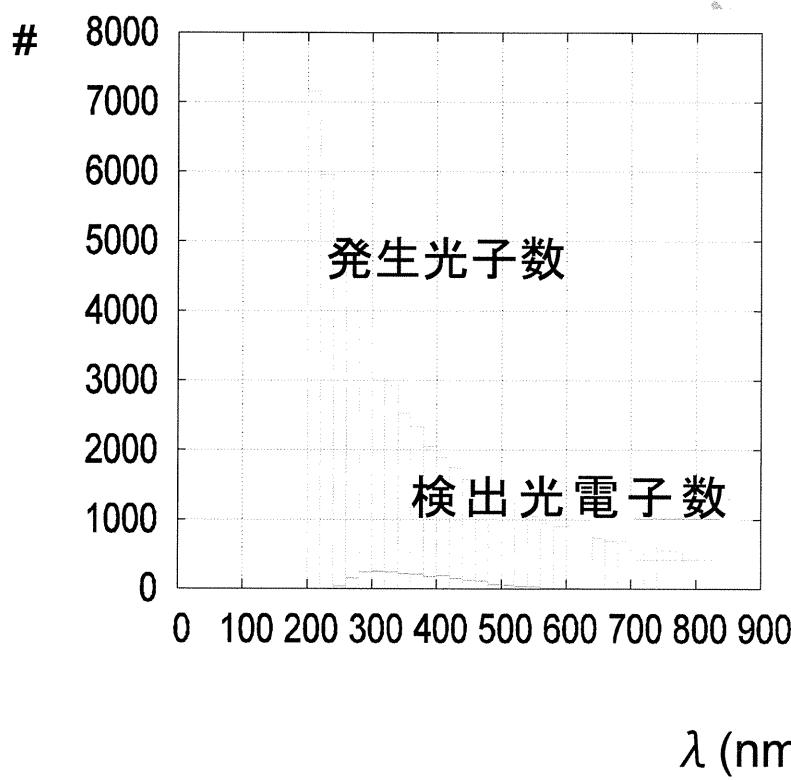




#### 検証 4. 検出光電子数

最後に、ライトガイド及び PMT をジオメトリに追加し、実際のシミュレーションと同様の設定で、検出光電子数が散乱長と QE の波長依存性に従って短波長側で減少していることを確かめた。

結果は以下の通り。



### 3.3 実験ジオメトリの決定

シミュレーションによって、J-PARC 実験に用いられる高屈折率シリカエアロゲルチエレンコフカウンターの最適なジオメトリを決定する。高屈折率シリカエアロゲルとして、屈折率 1.208、厚さ 1.05cm の物を用いた。

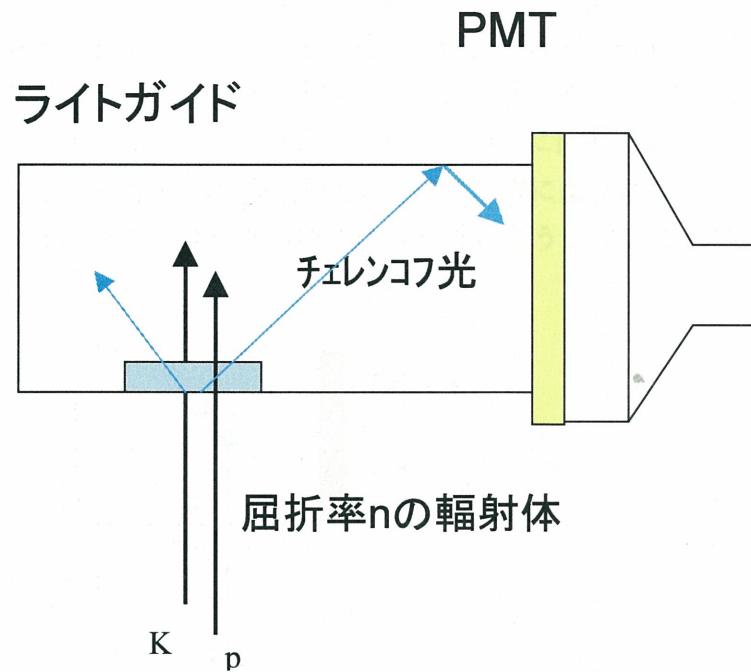
この検出器の検出対象は  $K^+$  中間子であり、大量に発生する陽子がバックグラウンドである。検出を行うためには、陽子による光量の 99.9%を除去するように N.p.e. 閾値を定めなくてはならない。

まず、 $1\text{GeV}/c$  の陽子と  $K^+$  中間子を以下のようなジオメトリのエアロゲルチエレンコフカウンターに入射させた。なお、ライトガイドには乱反射材を用いている。

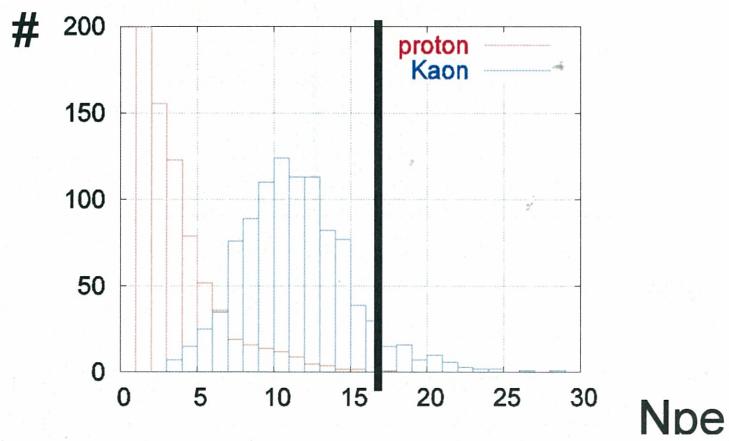
the first time in the history of the world, the  
whole of the human race has been gathered  
together in one place, and that is the  
present meeting of the World's Fair.

It is a great privilege to be here, and I  
feel that it is a great responsibility to speak  
to you all. We are here to witness the  
greatest exhibition of human achievement  
and progress ever assembled under one roof.  
We are here to learn, to inspire, and to  
be inspired. Let us all remember that  
we are here not just as individuals,  
but as representatives of our countries,  
our cultures, and our histories.  
Let us all work together to make this  
a truly memorable and inspiring experience.

As we look around at the vast array of  
exhibits and displays, let us remember  
that each one represents a different  
culture, a different way of life, and a  
different perspective on the world.  
Let us be open-minded and receptive  
to new ideas and new ways of thinking.  
Let us be respectful of each other's  
cultures and backgrounds.  
Let us be inspired by the achievements  
of others, and let us strive to achieve  
similar success in our own fields.  
Let us all work together to make this  
a truly memorable and inspiring experience.



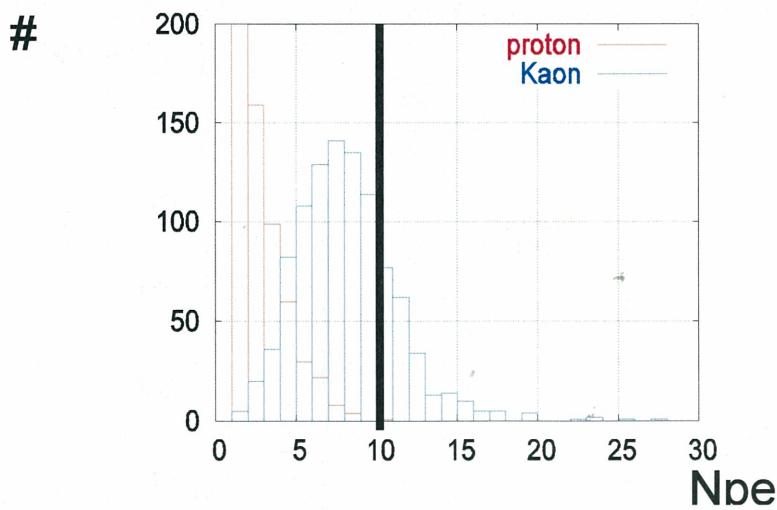
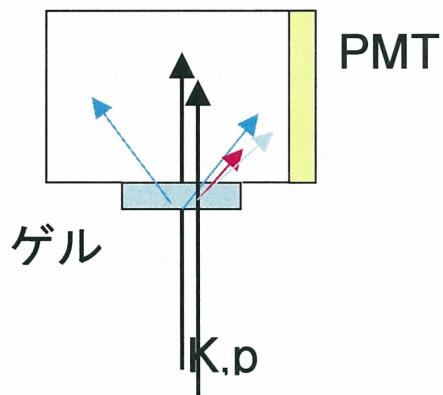
この運動量では本来陽子はチエレンコフ光を発生しないが、陽子がゲル中で発生させた、電子のチエレンコフ閾値を超えるノックオン電子がチエレンコフ光を発生させ、これが PMT に届いて検出されている。検出光電子数のヒストグラムを描くと以下のようになつた。検出器の検出対象は  $K^+$  中間子であり、陽子はバックグラウンドである。太い縦線が陽子を 99.9% 除去するための Np.e. 閾値(17)である。



図を見ると二つのヒストグラムが重なっているために、実験で要請される Np.e. 閾値

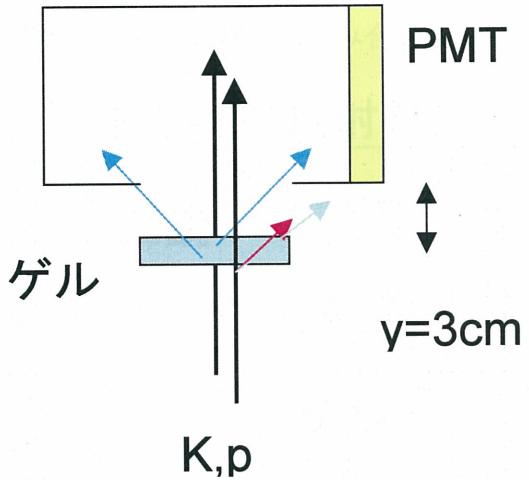
1920-1921  
1921-1922  
1922-1923  
1923-1924  
1924-1925  
1925-1926  
1926-1927  
1927-1928  
1928-1929  
1929-1930  
1930-1931  
1931-1932  
1932-1933  
1933-1934  
1934-1935  
1935-1936  
1936-1937  
1937-1938  
1938-1939  
1939-1940  
1940-1941  
1941-1942  
1942-1943  
1943-1944  
1944-1945  
1945-1946  
1946-1947  
1947-1948  
1948-1949  
1949-1950  
1950-1951  
1951-1952  
1952-1953  
1953-1954  
1954-1955  
1955-1956  
1956-1957  
1957-1958  
1958-1959  
1959-1960  
1960-1961  
1961-1962  
1962-1963  
1963-1964  
1964-1965  
1965-1966  
1966-1967  
1967-1968  
1968-1969  
1969-1970  
1970-1971  
1971-1972  
1972-1973  
1973-1974  
1974-1975  
1975-1976  
1976-1977  
1977-1978  
1978-1979  
1979-1980  
1980-1981  
1981-1982  
1982-1983  
1983-1984  
1984-1985  
1985-1986  
1986-1987  
1987-1988  
1988-1989  
1989-1990  
1990-1991  
1991-1992  
1992-1993  
1993-1994  
1994-1995  
1995-1996  
1996-1997  
1997-1998  
1998-1999  
1999-2000  
2000-2001  
2001-2002  
2002-2003  
2003-2004  
2004-2005  
2005-2006  
2006-2007  
2007-2008  
2008-2009  
2009-2010  
2010-2011  
2011-2012  
2012-2013  
2013-2014  
2014-2015  
2015-2016  
2016-2017  
2017-2018  
2018-2019  
2019-2020  
2020-2021  
2021-2022  
2022-2023  
2023-2024  
2024-2025  
2025-2026  
2026-2027  
2027-2028  
2028-2029  
2029-2030  
2030-2031  
2031-2032  
2032-2033  
2033-2034  
2034-2035  
2035-2036  
2036-2037  
2037-2038  
2038-2039  
2039-2040  
2040-2041  
2041-2042  
2042-2043  
2043-2044  
2044-2045  
2045-2046  
2046-2047  
2047-2048  
2048-2049  
2049-2050  
2050-2051  
2051-2052  
2052-2053  
2053-2054  
2054-2055  
2055-2056  
2056-2057  
2057-2058  
2058-2059  
2059-2060  
2060-2061  
2061-2062  
2062-2063  
2063-2064  
2064-2065  
2065-2066  
2066-2067  
2067-2068  
2068-2069  
2069-2070  
2070-2071  
2071-2072  
2072-2073  
2073-2074  
2074-2075  
2075-2076  
2076-2077  
2077-2078  
2078-2079  
2079-2080  
2080-2081  
2081-2082  
2082-2083  
2083-2084  
2084-2085  
2085-2086  
2086-2087  
2087-2088  
2088-2089  
2089-2090  
2090-2091  
2091-2092  
2092-2093  
2093-2094  
2094-2095  
2095-2096  
2096-2097  
2097-2098  
2098-2099  
2099-20100  
20100-20101  
20101-20102  
20102-20103  
20103-20104  
20104-20105  
20105-20106  
20106-20107  
20107-20108  
20108-20109  
20109-20110  
20110-20111  
20111-20112  
20112-20113  
20113-20114  
20114-20115  
20115-20116  
20116-20117  
20117-20118  
20118-20119  
20119-20120  
20120-20121  
20121-20122  
20122-20123  
20123-20124  
20124-20125  
20125-20126  
20126-20127  
20127-20128  
20128-20129  
20129-20130  
20130-20131  
20131-20132  
20132-20133  
20133-20134  
20134-20135  
20135-20136  
20136-20137  
20137-20138  
20138-20139  
20139-20140  
20140-20141  
20141-20142  
20142-20143  
20143-20144  
20144-20145  
20145-20146  
20146-20147  
20147-20148  
20148-20149  
20149-20150  
20150-20151  
20151-20152  
20152-20153  
20153-20154  
20154-20155  
20155-20156  
20156-20157  
20157-20158  
20158-20159  
20159-20160  
20160-20161  
20161-20162  
20162-20163  
20163-20164  
20164-20165  
20165-20166  
20166-20167  
20167-20168  
20168-20169  
20169-20170  
20170-20171  
20171-20172  
20172-20173  
20173-20174  
20174-20175  
20175-20176  
20176-20177  
20177-20178  
20178-20179  
20179-20180  
20180-20181  
20181-20182  
20182-20183  
20183-20184  
20184-20185  
20185-20186  
20186-20187  
20187-20188  
20188-20189  
20189-20190  
20190-20191  
20191-20192  
20192-20193  
20193-20194  
20194-20195  
20195-20196  
20196-20197  
20197-20198  
20198-20199  
20199-20200  
20200-20201  
20201-20202  
20202-20203  
20203-20204  
20204-20205  
20205-20206  
20206-20207  
20207-20208  
20208-20209  
20209-20210  
20210-20211  
20211-20212  
20212-20213  
20213-20214  
20214-20215  
20215-20216  
20216-20217  
20217-20218  
20218-20219  
20219-20220  
20220-20221  
20221-20222  
20222-20223  
20223-20224  
20224-20225  
20225-20226  
20226-20227  
20227-20228  
20228-20229  
20229-20230  
20230-20231  
20231-20232  
20232-20233  
20233-20234  
20234-20235  
20235-20236  
20236-20237  
20237-20238  
20238-20239  
20239-20240  
20240-20241  
20241-20242  
20242-20243  
20243-20244  
20244-20245  
20245-20246  
20246-20247  
20247-20248  
20248-20249  
20249-20250  
20250-20251  
20251-20252  
20252-20253  
20253-20254  
20254-20255  
20255-20256  
20256-20257  
20257-20258  
20258-20259  
20259-20260  
20260-20261  
20261-20262  
20262-20263  
20263-20264  
20264-20265  
20265-20266  
20266-20267  
20267-20268  
20268-20269  
20269-20270  
20270-20271  
20271-20272  
20272-20273  
20273-20274  
20274-20275  
20275-20276  
20276-20277  
20277-20278  
20278-20279  
20279-20280  
20280-20281  
20281-20282  
20282-20283  
20283-20284  
20284-20285  
20285-20286  
20286-20287  
20287-20288  
20288-20289  
20289-20290  
20290-20291  
20291-20292  
20292-20293  
20293-20294  
20294-20295  
20295-20296  
20296-20297  
20297-20298  
20298-20299  
20299-202100  
202100-202101  
202101-202102  
202102-202103  
202103-202104  
202104-202105  
202105-202106  
202106-202107  
202107-202108  
202108-202109  
202109-202110  
202110-202111  
202111-202112  
202112-202113  
202113-202114  
202114-202115  
202115-202116  
202116-202117  
202117-202118  
202118-202119  
202119-202120  
202120-202121  
202121-202122  
202122-202123  
202123-202124  
202124-202125  
202125-202126  
202126-202127  
202127-202128  
202128-202129  
202129-202130  
202130-202131  
202131-202132  
202132-202133  
202133-202134  
202134-202135  
202135-202136  
202136-202137  
202137-202138  
202138-202139  
202139-202140  
202140-202141  
202141-202142  
202142-202143  
202143-202144  
202144-202145  
202145-202146  
202146-202147  
202147-202148  
202148-202149  
202149-202150  
202150-202151  
202151-202152  
202152-202153  
202153-202154  
202154-202155  
202155-202156  
202156-202157  
202157-202158  
202158-202159  
202159-202160  
202160-202161  
202161-202162  
202162-202163  
202163-202164  
202164-202165  
202165-202166  
202166-202167  
202167-202168  
202168-202169  
202169-202170  
202170-202171  
202171-202172  
202172-202173  
202173-202174  
202174-202175  
202175-202176  
202176-202177  
202177-202178  
202178-202179  
202179-202180  
202180-202181  
202181-202182  
202182-202183  
202183-202184  
202184-202185  
202185-202186  
202186-202187  
202187-202188  
202188-202189  
202189-202190  
202190-202191  
202191-202192  
202192-202193  
202193-202194  
202194-202195  
202195-202196  
202196-202197  
202197-202198  
202198-202199  
202199-202200  
202200-202201  
202201-202202  
202202-202203  
202203-202204  
202204-202205  
202205-202206  
202206-202207  
202207-202208  
202208-202209  
202209-202210  
202210-202211  
202211-202212  
202212-202213  
202213-202214  
202214-202215  
202215-202216  
202216-202217  
202217-202218  
202218-202219  
202219-202220  
202220-202221  
202221-202222  
202222-202223  
202223-202224  
202224-202225  
202225-202226  
202226-202227  
202227-202228  
202228-202229  
202229-202230  
202230-202231  
202231-202232  
202232-202233  
202233-202234  
202234-202235  
202235-202236  
202236-202237  
202237-202238  
202238-202239  
202239-202240  
202240-202241  
202241-202242  
202242-202243  
202243-202244  
202244-202245  
202245-202246  
202246-202247  
202247-202248  
202248-202249  
202249-202250  
202250-202251  
202251-202252  
202252-202253  
202253-202254  
202254-202255  
202255-202256  
202256-202257  
202257-202258  
202258-202259  
202259-202260  
202260-202261  
202261-202262  
202262-202263  
202263-202264  
202264-202265  
202265-202266  
202266-202267  
202267-202268  
202268-202269  
202269-202270  
202270-202271  
202271-202272  
202272-202273  
202273-202274  
202274-202275  
202275-202276  
202276-202277  
202277-202278  
202278-202279  
202279-202280  
202280-202281  
202281-202282  
202282-202283  
202283-202284  
202284-202285  
202285-202286  
202286-202287  
202287-202288  
202288-202289  
202289-202290  
202290-202291  
202291-202292  
202292-202293  
202293-202294  
202294-202295  
202295-202296  
202296-202297  
202297-202298  
202298-202299  
202299-202300  
202300-202301  
202301-202302  
202302-202303  
202303-202304  
202304-202305  
202305-202306  
202306-202307  
202307-202308  
202308-202309  
202309-202310  
202310-202311  
202311-202312  
202312-202313  
202313-202314  
202314-202315  
202315-202316  
202316-202317  
202317-202318  
202318-202319  
202319-202320  
202320-202321  
202321-202322  
202322-202323  
202323-202324  
202324-202325  
202325-202326  
202326-202327  
202327-202328  
202328-202329  
202329-202330  
202330-202331  
202331-202332  
202332-202333  
202333-202334  
202334-202335  
202335-202336  
202336-202337  
202337-202338  
202338-202339  
202339-202340  
202340-202341  
202341-202342  
202342-202343  
202343-202344  
202344-202345  
202345-202346  
202346-202347  
202347-202348  
202348-202349  
202349-202350  
202350-202351  
202351-202352  
202352-202353  
202353-202354  
202354-202355  
202355-202356  
202356-202357  
202357-202358  
202358-202359  
202359-202360  
202360-202361  
202361-202362  
202362-202363  
202363-202364  
202364-202365  
202365-202366  
202366-202367  
202367-202368  
202368-202369  
202369-202370  
202370-202371  
202371-202372  
202372-202373  
202373-202374  
202374-202375  
202375-202376  
202376-202377  
202377-202378  
202378-202379  
202379-202380  
202380-202381  
202381-202382  
202382-202383  
202383-202384  
202384-202385  
202385-202386  
202386-202387  
202387-202388  
202388-202389  
202389-202390  
202390-202391  
202391-202392  
202392-202393  
202393-202394  
202394-202395  
202395-202396  
202396-202397  
202397-202398  
202398-202399  
202399-202400  
202400-202401  
202401-202402  
202402-202403  
202403-202404  
202404-202405  
202405-202406  
202406-202407  
202407-202408  
202408-202409  
202409-202410  
202410-202411  
202411-202412  
202412-202413  
202413-202414  
202414-202415  
202415-202416  
202416-202417  
202417-202418  
202418-202419  
202419-202420  
202420-202421  
202421-202422  
202422-202423  
202423-202424  
202424-202425  
202425-202426  
202426-202427  
202427-202428  
202428-202429  
202429-202430  
202430-202431  
202431-202432  
202432-202433  
202433-202434  
202434-202435  
202435-202436  
202436-202437  
202437-202438  
202438-202439  
202439-202440  
202440-202441  
202441-202442  
202442-202443  
202443-202444  
202444-202445  
202445-202446  
202446-202447  
202447-202448  
202448-202449  
202449-202450  
202450-202451  
202451-202452  
202452-202453  
202453-202454  
202454-202455  
202455-202456  
202456-202457  
202457-202458  
202458-202459  
202459-202460  
202460-202461  
202461-202462  
202462-202463  
202463-202464  
202464-202465  
202465-202466  
202466-202467  
202467-202468  
202468-202469  
202469-202470  
202470-202471  
202471-202472  
202472-202473  
202473-202474  
202474-202475  
202475-202476  
202476-202477  
202477-202478  
202478-202479  
202479-202480  
202480-202481  
202481-202482  
202482-202483  
202483-202484  
202484-202485  
202485-202486  
202486-202487  
202487-202488  
202488-202489  
202489-202490  
202490-202491  
202491-202492  
202492-202493  
202493-202494  
202494-202495  
202495-202496  
202496-202497  
202497-202498  
202498-202499  
202499-202500  
202500-202501  
202501-202502  
202502-202503  
202503-202504  
202504-202505  
202505-202506  
202506-202507  
202507-202508  
202508-202509  
202509-202510  
202510-202511  
202511-202512  
202512-202513  
202513-202514  
202514-202515  
202515-202516  
202516-202517  
202517-202518  
202518-202519  
202519-202520  
202520-202521  
202521-202522  
202522-202523  
202523-202524  
202524-202525  
202525-202526  
202526-202527  
202527-202528  
202528-202529  
202529-202530  
202530-202531  
202531-202532  
202532-202533  
202533-202534  
202534-202535  
202535-202536  
202536-202537  
202537-202538  
202

を定めた場合シグナルの大半(93.5%)が失われてしまうことになり、このジオメトリでは粒子識別が不可能であることが分かる。これを改善するため、新たに次のようなジオメトリを考えてシミュレーションを行った。このジオメトリでは、ライトガイドにゲルと同じサイズの穴を開け、ゲルをライトガイドの外に出している。これは、ノックオン電子はほとんどが入射粒子の進行方向から斜め前方に出るため、ノックオン電子由来のチエレンコフ光がライトガイドの内部に入らないようにするための工夫である。

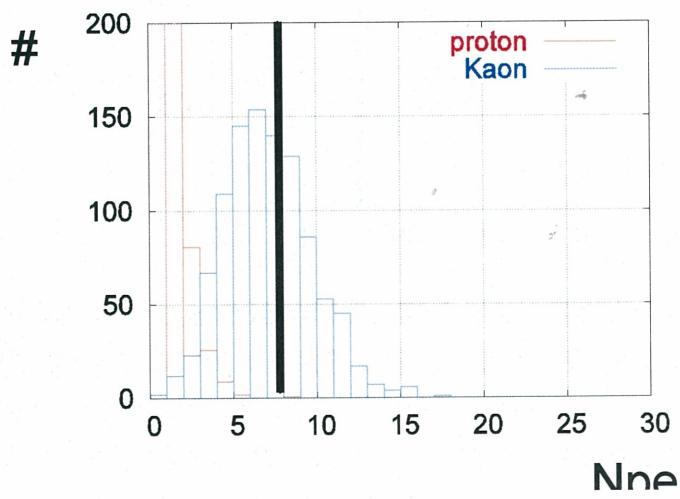


図を見ると、 $K^+$ 中間子によるシグナルは減少しているが、陽子のヒストグラムの tail が短くなっているため、二つのヒストグラムの重なりは少なくなっており、やや改善が見られる。それでも、陽子の 99.9%を除去するような Np.e.閾値(10)を設定すると  $K^+$  中間子によるシグナルの 77%が失われてしまうことになり、実用的ではない。更なる改善のため、ゲルをライトガイドからさらに離してシミュレーションを行った。





ライトガイドからゲルを離しすぎると、入射粒子から発生したチェレンコフ光もガイド内に届かなくなる。シミュレーションによってゲルとライトガイドの最適な距離を求めたところ 3cm という値が得られた。それでもシグナルの 65.2%が失われる。Np.e. 閾値は 8 である。



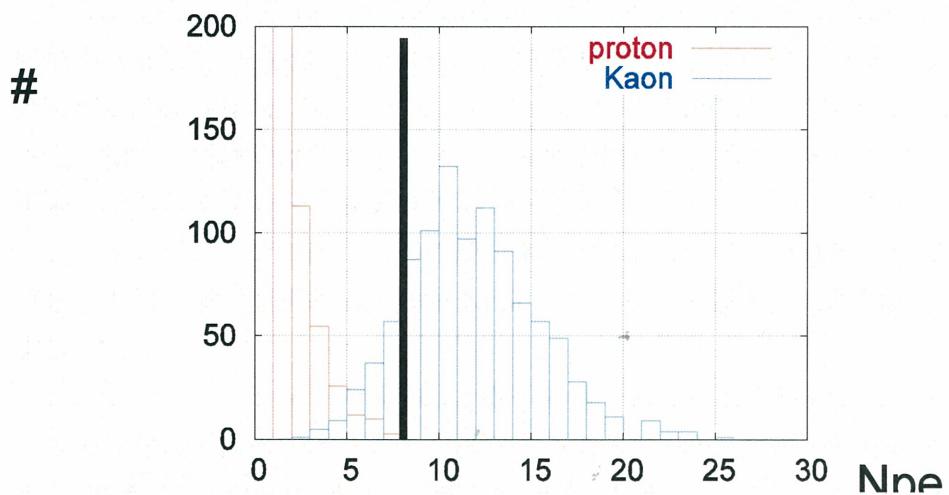
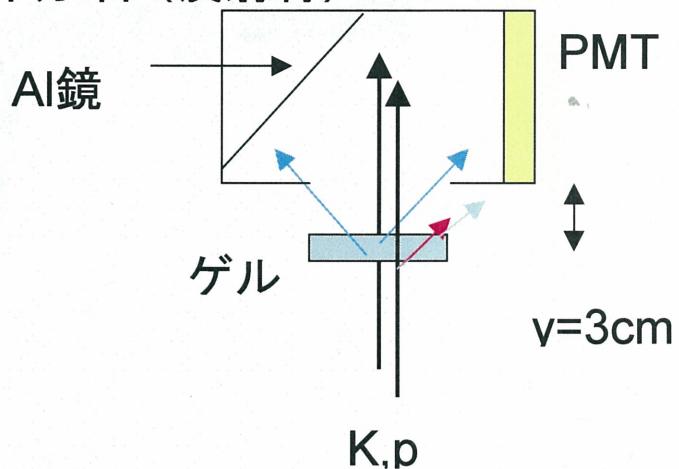


$K^+$ 中間子由来による検出光子の割合をさらに増加させるために

1. ライトガイドを乱反射材から反射材に変更する
2. ライトガイド内に Al 鏡を置くことで検出光子数を増やす

の二つの工夫を行い、これらの組み合わせの中で有効なジオメトリを決定する

### ライトガイド(反射材)

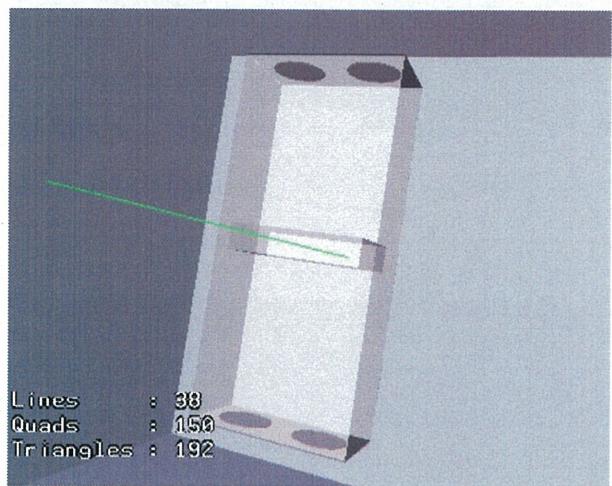


Al 鏡を置くことで  $K^+$  中間子、陽子ともに検出光子数は増加する。しかし、 $K^+$  中間子の検出光子数の方がより大きく増えるため、Al 鏡を置いた方が識別能力は向上する。反射材と乱反射材、鏡の有無を考慮して四通りのシミュレーションを行った結果、ライトガイドに反射材を用い、鏡を入れた場合に最も粒子識別能力が高くなることが分かった。これにより、シグナルの 86.7% を残すことができる。Np.e. 閾値は 8 である。これを、高屈折率シリカエアロゲルチェレンコフカウンターのジオメトリとして採用することにする。

1979  
1980  
1981  
1982  
1983  
1984  
1985  
1986  
1987  
1988  
1989  
1990  
1991  
1992  
1993  
1994  
1995  
1996  
1997  
1998  
1999  
2000  
2001  
2002  
2003  
2004  
2005  
2006  
2007  
2008  
2009  
2010  
2011  
2012  
2013  
2014  
2015  
2016  
2017  
2018  
2019  
2020  
2021  
2022  
2023  
2024  
2025  
2026  
2027  
2028  
2029  
2030  
2031  
2032  
2033  
2034  
2035  
2036  
2037  
2038  
2039  
2040  
2041  
2042  
2043  
2044  
2045  
2046  
2047  
2048  
2049  
2050  
2051  
2052  
2053  
2054  
2055  
2056  
2057  
2058  
2059  
2060  
2061  
2062  
2063  
2064  
2065  
2066  
2067  
2068  
2069  
2070  
2071  
2072  
2073  
2074  
2075  
2076  
2077  
2078  
2079  
2080  
2081  
2082  
2083  
2084  
2085  
2086  
2087  
2088  
2089  
2090  
2091  
2092  
2093  
2094  
2095  
2096  
2097  
2098  
2099  
20100  
20101  
20102  
20103  
20104  
20105  
20106  
20107  
20108  
20109  
20110  
20111  
20112  
20113  
20114  
20115  
20116  
20117  
20118  
20119  
20120  
20121  
20122  
20123  
20124  
20125  
20126  
20127  
20128  
20129  
20130  
20131  
20132  
20133  
20134  
20135  
20136  
20137  
20138  
20139  
20140  
20141  
20142  
20143  
20144  
20145  
20146  
20147  
20148  
20149  
20150  
20151  
20152  
20153  
20154  
20155  
20156  
20157  
20158  
20159  
20160  
20161  
20162  
20163  
20164  
20165  
20166  
20167  
20168  
20169  
20170  
20171  
20172  
20173  
20174  
20175  
20176  
20177  
20178  
20179  
20180  
20181  
20182  
20183  
20184  
20185  
20186  
20187  
20188  
20189  
20190  
20191  
20192  
20193  
20194  
20195  
20196  
20197  
20198  
20199  
201000  
201001  
201002  
201003  
201004  
201005  
201006  
201007  
201008  
201009  
201010  
201011  
201012  
201013  
201014  
201015  
201016  
201017  
201018  
201019  
201020  
201021  
201022  
201023  
201024  
201025  
201026  
201027  
201028  
201029  
201030  
201031  
201032  
201033  
201034  
201035  
201036  
201037  
201038  
201039  
201040  
201041  
201042  
201043  
201044  
201045  
201046  
201047  
201048  
201049  
201050  
201051  
201052  
201053  
201054  
201055  
201056  
201057  
201058  
201059  
201060  
201061  
201062  
201063  
201064  
201065  
201066  
201067  
201068  
201069  
201070  
201071  
201072  
201073  
201074  
201075  
201076  
201077  
201078  
201079  
201080  
201081  
201082  
201083  
201084  
201085  
201086  
201087  
201088  
201089  
201090  
201091  
201092  
201093  
201094  
201095  
201096  
201097  
201098  
201099  
201100  
201101  
201102  
201103  
201104  
201105  
201106  
201107  
201108  
201109  
201110  
201111  
201112  
201113  
201114  
201115  
201116  
201117  
201118  
201119  
201120  
201121  
201122  
201123  
201124  
201125  
201126  
201127  
201128  
201129  
201130  
201131  
201132  
201133  
201134  
201135  
201136  
201137  
201138  
201139  
201140  
201141  
201142  
201143  
201144  
201145  
201146  
201147  
201148  
201149  
201150  
201151  
201152  
201153  
201154  
201155  
201156  
201157  
201158  
201159  
201160  
201161  
201162  
201163  
201164  
201165  
201166  
201167  
201168  
201169  
201170  
201171  
201172  
201173  
201174  
201175  
201176  
201177  
201178  
201179  
201180  
201181  
201182  
201183  
201184  
201185  
201186  
201187  
201188  
201189  
201190  
201191  
201192  
201193  
201194  
201195  
201196  
201197  
201198  
201199  
201200  
201201  
201202  
201203  
201204  
201205  
201206  
201207  
201208  
201209  
201210  
201211  
201212  
201213  
201214  
201215  
201216  
201217  
201218  
201219  
201220  
201221  
201222  
201223  
201224  
201225  
201226  
201227  
201228  
201229  
201230  
201231  
201232  
201233  
201234  
201235  
201236  
201237  
201238  
201239  
201240  
201241  
201242  
201243  
201244  
201245  
201246  
201247  
201248  
201249  
201250  
201251  
201252  
201253  
201254  
201255  
201256  
201257  
201258  
201259  
201260  
201261  
201262  
201263  
201264  
201265  
201266  
201267  
201268  
201269  
201270  
201271  
201272  
201273  
201274  
201275  
201276  
201277  
201278  
201279  
201280  
201281  
201282  
201283  
201284  
201285  
201286  
201287  
201288  
201289  
201290  
201291  
201292  
201293  
201294  
201295  
201296  
201297  
201298  
201299  
201300  
201301  
201302  
201303  
201304  
201305  
201306  
201307  
201308  
201309  
201310  
201311  
201312  
201313  
201314  
201315  
201316  
201317  
201318  
201319  
201320  
201321  
201322  
201323  
201324  
201325  
201326  
201327  
201328  
201329  
201330  
201331  
201332  
201333  
201334  
201335  
201336  
201337  
201338  
201339  
201340  
201341  
201342  
201343  
201344  
201345  
201346  
201347  
201348  
201349  
201350  
201351  
201352  
201353  
201354  
201355  
201356  
201357  
201358  
201359  
201360  
201361  
201362  
201363  
201364  
201365  
201366  
201367  
201368  
201369  
201370  
201371  
201372  
201373  
201374  
201375  
201376  
201377  
201378  
201379  
201380  
201381  
201382  
201383  
201384  
201385  
201386  
201387  
201388  
201389  
201390  
201391  
201392  
201393  
201394  
201395  
201396  
201397  
201398  
201399  
201400  
201401  
201402  
201403  
201404  
201405  
201406  
201407  
201408  
201409  
201410  
201411  
201412  
201413  
201414  
201415  
201416  
201417  
201418  
201419  
201420  
201421  
201422  
201423  
201424  
201425  
201426  
201427  
201428  
201429  
201430  
201431  
201432  
201433  
201434  
201435  
201436  
201437  
201438  
201439  
201440  
201441  
201442  
201443  
201444  
201445  
201446  
201447  
201448  
201449  
201450  
201451  
201452  
201453  
201454  
201455  
201456  
201457  
201458  
201459  
201460  
201461  
201462  
201463  
201464  
201465  
201466  
201467  
201468  
201469  
201470  
201471  
201472  
201473  
201474  
201475  
201476  
201477  
201478  
201479  
201480  
201481  
201482  
201483  
201484  
201485  
201486  
201487  
201488  
201489  
201490  
201491  
201492  
201493  
201494  
201495  
201496  
201497  
201498  
201499  
201500  
201501  
201502  
201503  
201504  
201505  
201506  
201507  
201508  
201509  
201510  
201511  
201512  
201513  
201514  
201515  
201516  
201517  
201518  
201519  
201520  
201521  
201522  
201523  
201524  
201525  
201526  
201527  
201528  
201529  
201530  
201531  
201532  
201533  
201534  
201535  
201536  
201537  
201538  
201539  
201540  
201541  
201542  
201543  
201544  
201545  
201546  
201547  
201548  
201549  
201550  
201551  
201552  
201553  
201554  
201555  
201556  
201557  
201558  
201559  
201560  
201561  
201562  
201563  
201564  
201565  
201566  
201567  
201568  
201569  
201570  
201571  
201572  
201573  
201574  
201575  
201576  
201577  
201578  
201579  
201580  
201581  
201582  
201583  
201584  
201585  
201586  
201587  
201588  
201589  
201590  
201591  
201592  
201593  
201594  
201595  
201596  
201597  
201598  
201599  
201600  
201601  
201602  
201603  
201604  
201605  
201606  
201607  
201608  
201609  
201610  
201611  
201612  
201613  
201614  
201615  
201616  
201617  
201618  
201619  
201620  
201621  
201622  
201623  
201624  
201625  
201626  
201627  
201628  
201629  
201630  
201631  
201632  
201633  
201634  
201635  
201636  
201637  
201638  
201639  
201640  
201641  
201642  
201643  
201644  
201645  
201646  
201647  
201648  
201649  
201650  
201651  
201652  
201653  
201654  
201655  
201656  
201657  
201658  
201659  
201660  
201661  
201662  
201663  
201664  
201665  
201666  
201667  
201668  
201669  
201670  
201671  
201672  
201673  
201674  
201675  
201676  
201677  
201678  
201679  
201680  
201681  
201682  
201683  
201684  
201685  
201686  
201687  
201688  
201689  
201690  
201691  
201692  
201693  
201694  
201695  
201696  
201697  
201698  
201699  
201700  
201701  
201702  
201703  
201704  
201705  
201706  
201707  
201708  
201709  
2017010  
2017011  
2017012  
2017013  
2017014  
2017015  
2017016  
2017017  
2017018  
2017019  
20170100  
20170101  
20170102  
20170103  
20170104  
20170105  
20170106  
20170107  
20170108  
20170109  
20170110  
20170111  
20170112  
20170113  
20170114  
20170115  
20170116  
20170117  
20170118  
20170119  
201701100  
201701010  
201701020  
201701030  
201701040  
201701050  
201701060  
201701070  
201701080  
201701090  
201701100  
201701110  
201701120  
201701130  
201701140  
201701150  
201701160  
201701170  
201701180  
201701190  
201701101  
201701011  
201701021  
201701031  
201701041  
201701051  
201701061  
201701071  
201701081  
201701091  
201701101  
201701111  
201701121  
201701131  
201701141  
201701151  
201701161  
201701171  
201701181  
201701191  
201701102  
201701012  
201701022  
201701032  
201701042  
201701052  
201701062  
201701072  
201701082  
201701092  
201701102  
201701112  
201701122  
201701132  
201701142  
201701152  
201701162  
201701172  
201701182  
201701192  
201701103  
201701013  
201701023  
201701033  
201701043  
201701053  
201701063  
201701073  
201701083  
201701093  
201701103  
201701113  
201701123  
201701133  
201701143  
201701153  
201701163  
201701173  
201701183  
201701193  
201701104  
201701014  
201701024  
201701034  
201701044  
201701054  
201701064  
201701074  
201701084  
201701094  
201701104  
201701114  
201701124  
201701134  
201701144  
201701154  
201701164  
201701174  
201701184  
201701194  
201701105  
201701015  
201701025  
201701035  
201701045  
201701055  
201701065  
201701075  
201701085  
201701095  
201701105  
201701115  
201701125  
201701135  
201701145  
201701155  
201701165  
201701175  
201701185  
201701195  
201701106  
201701016  
201701026  
201701036  
201701046  
201701056  
201701066  
201701076  
201701086  
201701096  
201701106  
201701116  
201701126  
201701136  
201701146  
201701156  
201701166  
201701176  
201701186  
201701196  
201701107  
201701017  
201701027  
201701037  
201701047  
201701057  
201701067  
201701077  
201701087  
201701097  
201701107  
201701117  
201701127  
201701137  
201701147  
201701157  
201701167  
201701177  
201701187  
201701197  
201701108  
201701018  
201701028  
201701038  
201701048  
201701058  
201701068  
201701078  
201701088  
201701098  
201701108  
201701118  
201701128  
201701138  
201701148  
201701158  
201701168  
201701178  
201701188  
201701198  
201701109  
201701019  
201701029  
201701039  
201701049  
201701059  
201701069  
201701079  
201701089  
201701099  
201701109  
201701119  
201701129  
201701139  
201701149  
201701159  
201701169  
201701179  
201701189  
201701199  
201701110  
201701020  
201701030  
201701040  
201701050  
201701060  
201701070  
201701080  
201701090  
201701100  
201701110  
201701120  
201701130  
201701140  
201701150  
201701160  
201701170  
201701180  
201701190  
2017011010  
2017010110  
2017010210  
2017010310  
2017010410  
2017010510  
2017010610  
2017010710  
2017010810  
2017010910  
2017011010  
2017011110  
2017011210  
2017011310  
2017011410  
2017011510  
2017011610  
2017011710  
2017011810  
2017011910  
2017011020  
2017010120  
2017010220  
2017010320  
2017010420  
2017010520  
2017010620  
2017010720  
2017010820  
2017010920  
2017011020  
2017011120  
2017011220  
2017011320  
2017011420  
2017011520  
2017011620  
2017011720  
2017011820  
2017011920  
2017011030  
2017010130  
2017010230  
2017010330  
2017010430  
2017010530  
2017010630  
2017010730  
2017010830  
2017010930  
2017011030  
2017011130  
2017011230  
2017011330  
2017011430  
2017011530  
2017011630  
2017011730  
2017011830  
2017011930  
2017011040  
2017010140  
2017010240  
2017010340  
2017010440  
2017010540  
2017010640  
2017010740  
2017010840  
2017010940  
2017011040  
2017011140  
2017011240  
2017011340  
2017011440  
2017011540  
2017011640  
2017011740  
2017011840  
2017011940  
2017011050  
2017010150  
2017010250  
2017010350  
2017010450  
2017010550  
2017010650  
2017010750  
2017010850  
2017010950  
2017011050  
2017011150  
2017011250  
2017011350  
2017011450  
2017011550  
2017011650  
2017011750  
2017011850  
2017011950  
2017011060  
2017010160  
2017010260  
2017010360  
2017010460  
2017010560  
2017010660  
2017010760  
2017010860  
20170109

## 第四章 低屈折率シリカエアロゲルチェレンコフカウンタ ーのシミュレーション

### 4.1. シミュレーション概要



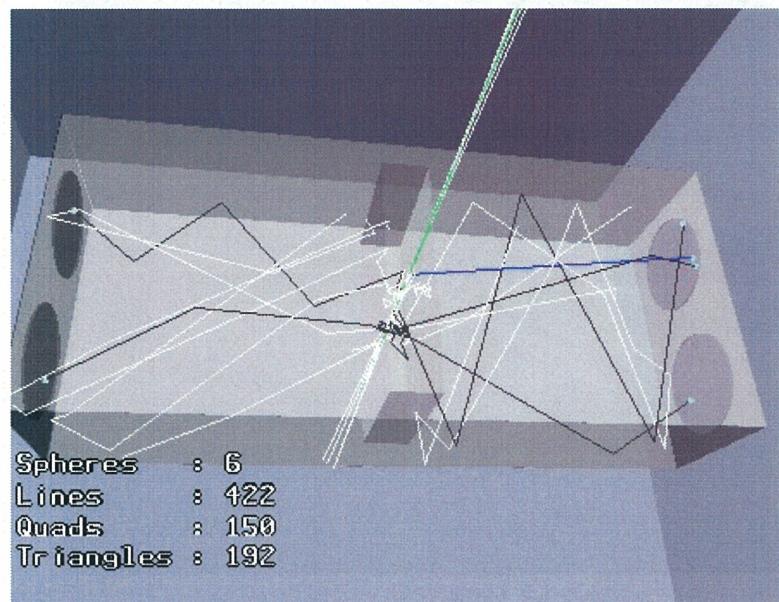
現在の LEPS 実験用検出器を再現した図のようなジオメトリを基本としてシミュレーションを行う。入射粒子は  $460\text{MeV}/c$  の電子、ゲルのサイズは、 $65\text{mm} \times 100\text{mm} \times 20\text{mm}$ 、屈折率 1.0027、1.0083、1.0156 の三種類のゲルの透過長データを用いた。PMT の有効面積は直径 44mm の円とした。ゲル中心から PMT までの距離は、135mm である。また、LEPS 実験ではファインメッシュ型 PMT を使用しているため、QE の値は高屈折率ゲルのシミュレーション時の半分とした。

シミュレーションでは、三つの屈折率のゲルについて、PMT で検出される Np.e. の値を出し、横軸屈折率  $n$ 、縦軸 Np.e. のプロットを描き、一次関数でフィッティングする。

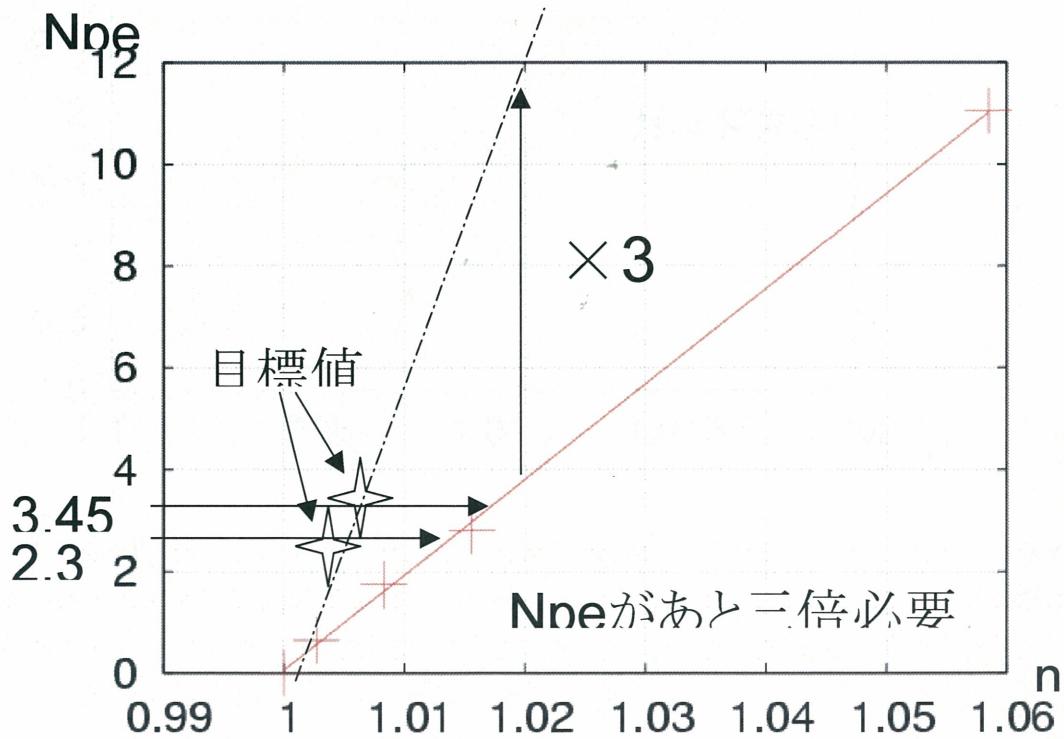
このシミュレーションの目的は、電子陽電子対の除去を行いつつ、 $e/\pi$  識別を可能とするような検出器のジオメトリを決定することである。要求される性能は、電子陽電子対を 99 あるいは 99.9% 除去した際、Np.e. 2.3 個を達成するためのゲル屈折率が 1.0043 以下、Np.e. 3.45 個を達成するためのゲル屈折率が 1.0067 以下となることである。

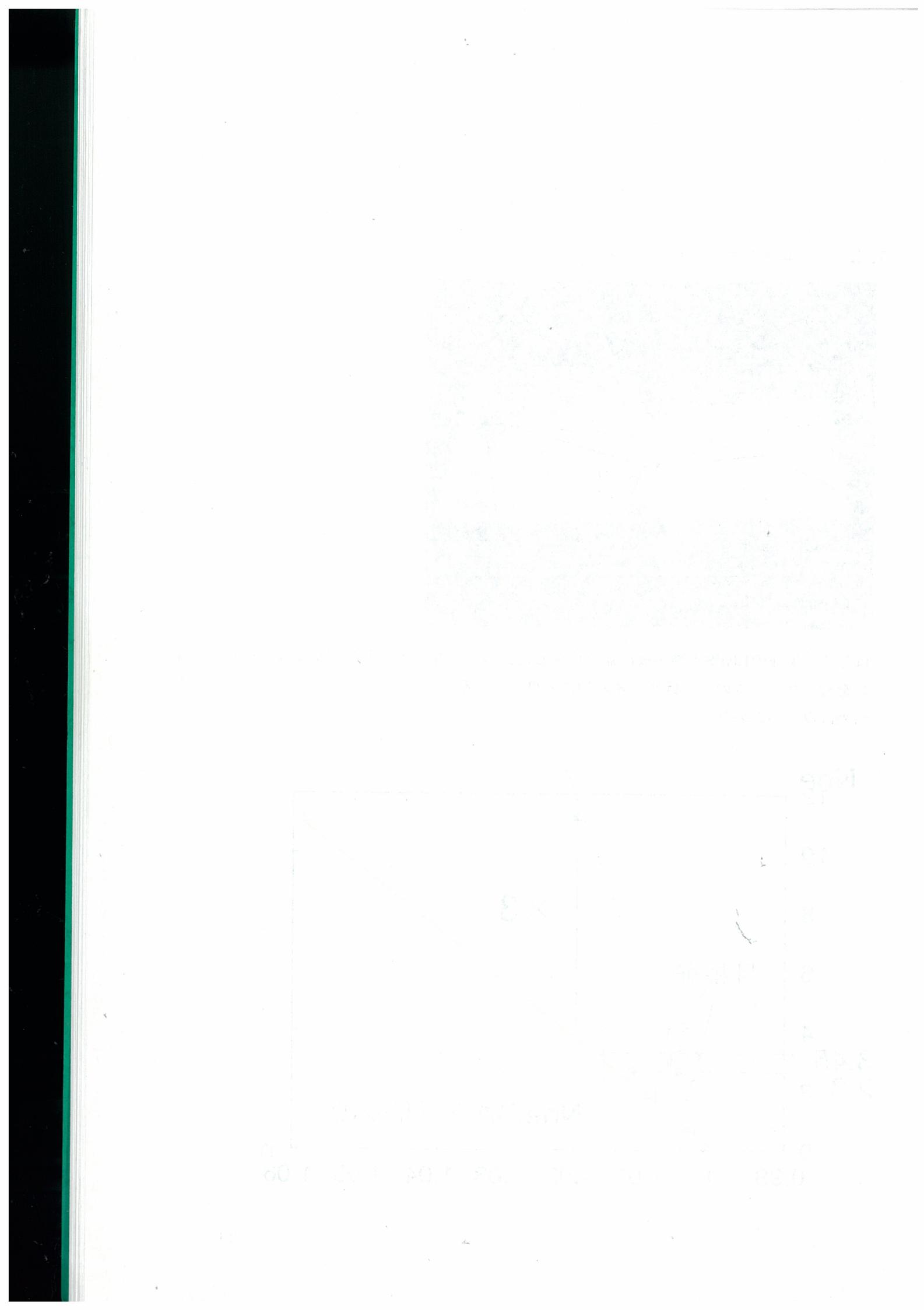


## 4.2. シミュレーション結果

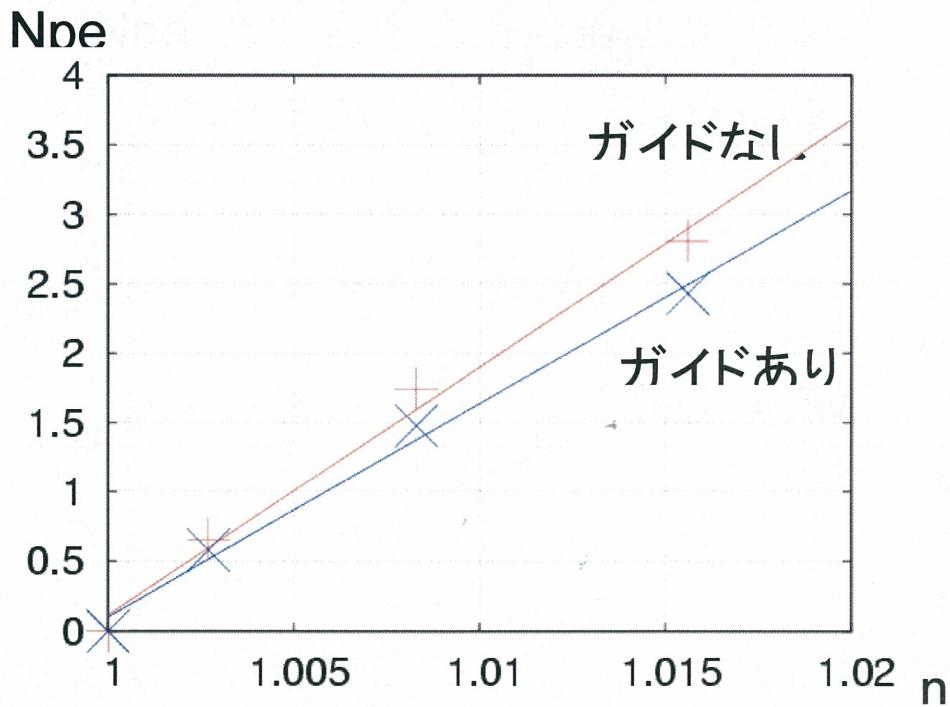
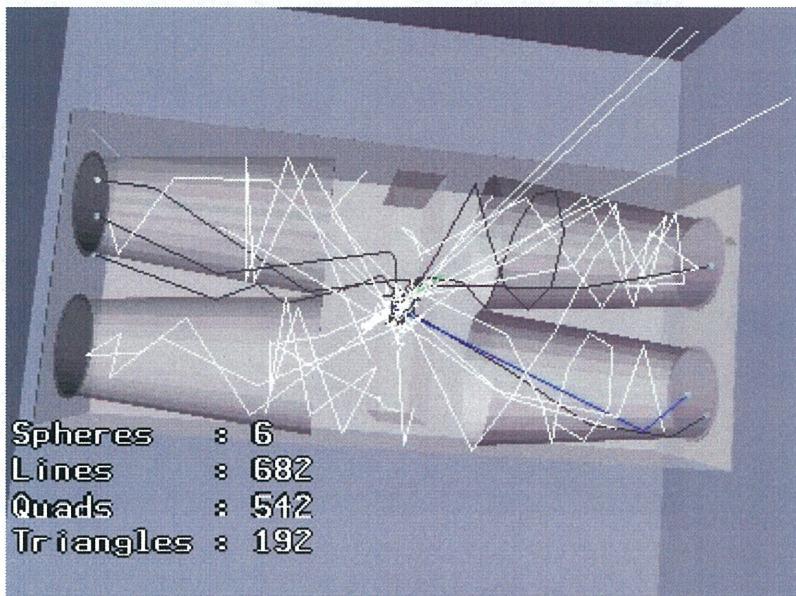


はじめ、現在のLEPS実験用検出器を再現した図のようなジオメトリでシミュレーションを行った。ゲルのみ、低屈折率の物に変更している。  
結果は以下のとおり。





この結果では、目標としている $N_{p.e.}$ の1/3程度の値しか光量が得られていないため、 $e/\pi$ 識別を行うことが出来ない。改善策として、コーン型ライトガイドの導入を行った。



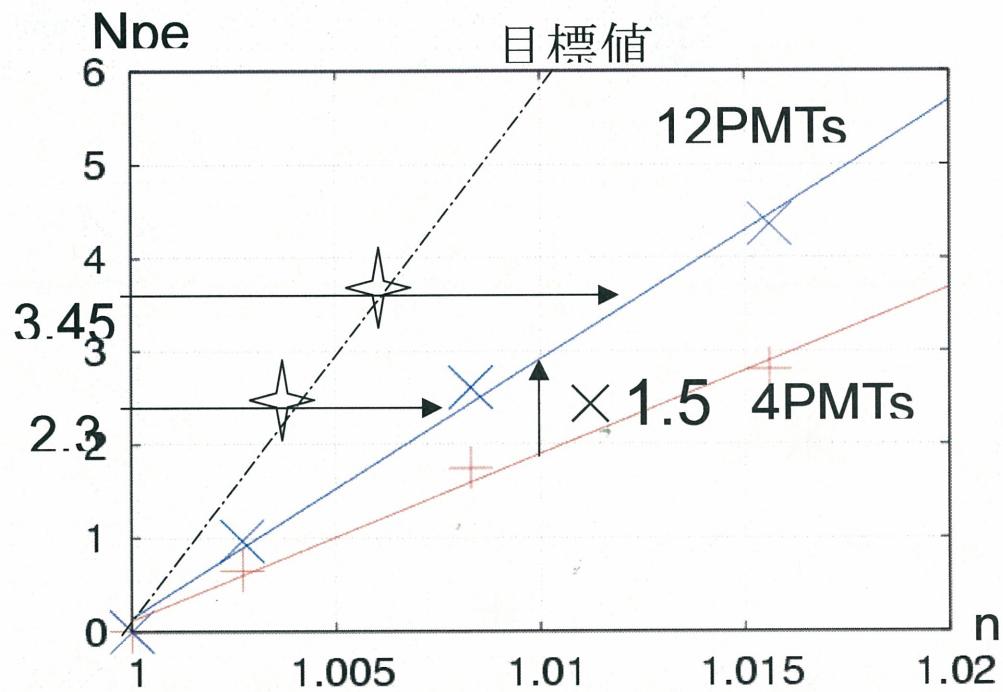
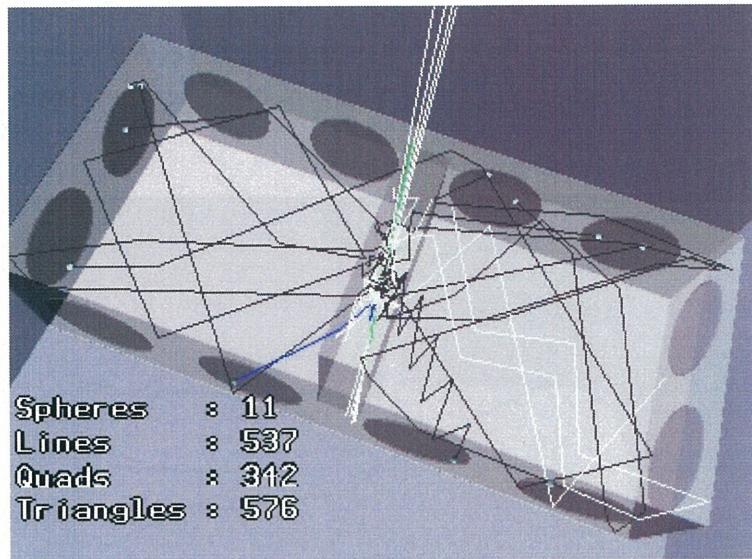
結果的に、ライトガイドを導入した方が光量は少なくなってしまったため、ライトガイド導入のアイデアは効果がないということが分かった。これは、光子がゲルを出た段階でチエレンコフ角の情報がほぼ失われていることが原因であると考えられる。

1000000

1000000

0 50.0 100.0 150.0 200.0

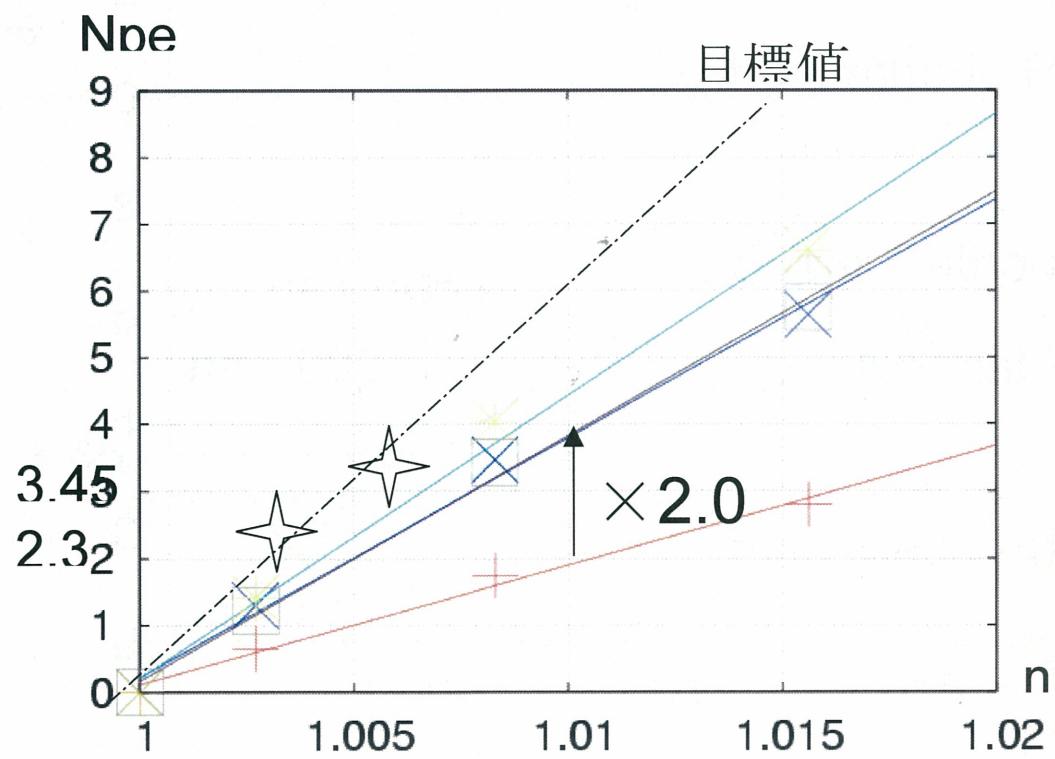
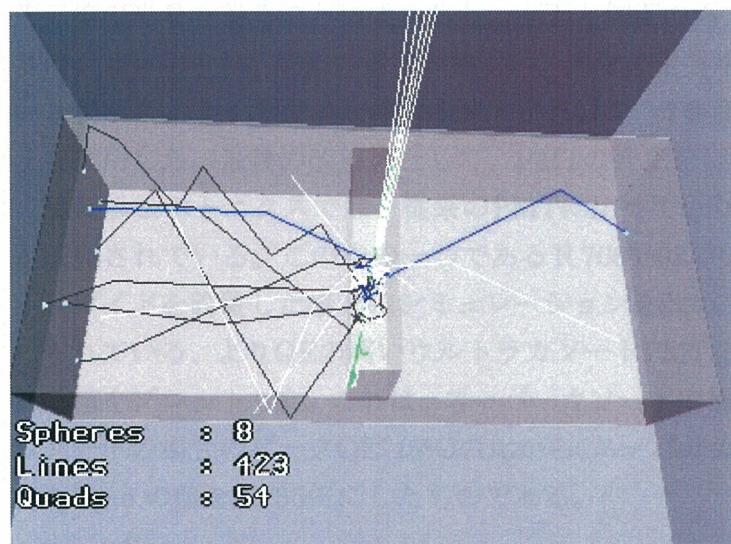
ライトガイドに代わるアイデアとして、現在上下面に4本設置されているPMTを側面にも8本追加し、計12本のPMTを用いることで光量の増加を目指した。



PMTを4本から12本に増やすことで、光量は約1.5倍になるという結果が得られた。しかし、これでもまだ目標値である3倍の光量には及ばない。そこで、さらなる改善策として、アクリルブロック型のライトガイドの導入を行うことにした。これにより、ボックスから離れた磁場の影響のない場所にPMTを置くことができるようになるため、



ファインメッシュ型ではない通常のPMTの使用が可能となる。アクリル中の減衰に関連したパラメータとして、アクリルライトガイドの長さがあるが、これは、現時点では決定することができない。そこで、ライトガイド中の減衰は50%と仮定し、シミュレーションで得られたN<sub>p.e.</sub>値の半分を結果として採用することにした。シミュレーションの絵にはアクリルライトガイドは入っていない。



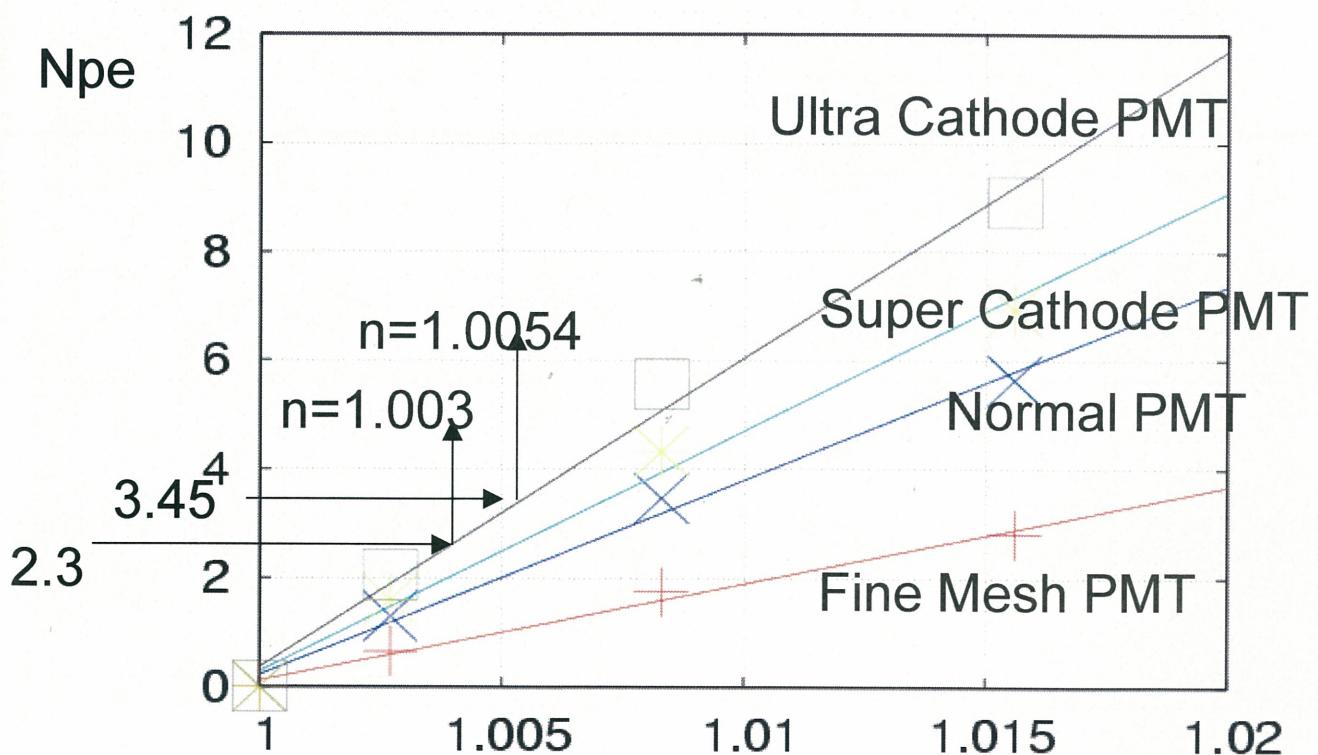


このシミュレーションは、アクリルライトガイドの配置場所を変えて三通り行った。

1. 従来PMTが設置されていた上下面に設置(黒のグラフ)
2. 以前PMTを追加した側面に設置(青のグラフ)
3. 上下、側面の両方に設置(水色のグラフ)

結果としては、目標値である光量三倍には届かなかったが、上下面に設置した場合、約二倍の光量を得ることに成功した。上下と側面の両方にライトガイドを設置する3つのジオメトリは、実際の設置が難しい。光量の上昇率から考えて、これは効率的でないと判断し、ライトガイドのジオメトリとして、1番目の、上下面に設置するジオメトリを採用した。最後の改善策として、PMTの変更を行う。

現在浜松ホトニクスでは、従来のPMTに比べてQEの高い、スーパーカソードPMTが販売されている。この中の一つであるR 7081-02のQEデータを用いて、上下面にライトガイドを設置した場合のシミュレーションを改めて行った。さらに、現在開発が進められている、よりQEの高いウルトラカソードPMTを用いた場合の結果として予想される値をプロットした。これは、スーパーカソードの場合のピークQE(35%)とウルトラカソードの場合のピークQE(45%)の比から、スーパーカソードの場合の結果として得られたN<sub>p.e.</sub>の値を45/35倍にしたものである。



the following day. I am now in the middle of the valley, and have just crossed the river. The country is very flat, and the river is wide and shallow. The water is brown, and there are many small fish swimming in it. The banks of the river are covered with tall grass and reeds. In the distance, I can see some hills and mountains. The sky is clear and blue. I am walking along the bank of the river, and I can hear the sound of the water flowing. The air is cool and fresh. I am wearing a long coat and a hat, and I have a backpack on my back. I am carrying a rifle and a knife. I am looking around me, and I can see some birds flying in the sky. I am walking slowly, and I am taking my time to enjoy the beauty of the landscape. I am thinking about the journey ahead of me, and I am feeling excited. I am looking forward to what I will see and experience on this trip.

結果として、Ultra Cathode PMTを用いた場合、Np.e.2.3個を得るための屈折率が1.003、Np.e.3.45個を得るための屈折率が1.0054となり、それぞれn<1.0043、n<1.0067の条件を満たすことが分かった。これにより、目標としていた、電子陽電子ペアの除去を行っても $\pi$ 中間子のデータを捨てない検出器のジオメトリが達成された。

## 第五章 結論

高屈折率および低屈折率のシリカエアロゲルを用いたチェレンコフカウンターについて、シミュレーションによって必要な実験条件を満たすジオメトリの提案を行った。

高屈折率シリカエアロゲルチェレンコフカウンターについては、単純なボックス型のカウンターでは陽子の99.9%を除去するためにシグナルのK<sup>+</sup>中間子データを十分に得られない事が分かった。そのため、ボックス前3cmにゲルを配置、ボックス内部を反射材に変更、ボックス中に鏡を配置するという工夫によって、実験条件でシグナルの86.7%が得られるようになった。

低屈折率シリカエアロゲルチェレンコフカウンターについては、アクリルライトガイドと高QEPMTを用いることで、電子陽電子ペアの99ないし99.9%の除去を行いつつ、従来不可能であった $\pi$ 中間子データを得る事が可能となった。

今後、シミュレーション結果に基づいたカウンターの試作品が製作される予定である。



## 第六章 補遺

シミュレーションに用いたエアロゲルのデータを以下にまとめる。

### 1.高屈折率シリカエアロゲル

ラベル, 屈折率, 密度[g/cm<sup>3</sup>], 厚さ[mm]

pd81a	1.2084	0.788	10.5
pd85a	1.1443	0.533	10.4
pd93a	1.0948	0.347	10.3
pd93b	1.1443	0.206	11.8

透過率データ[%]

$\lambda$ [nm]	pd81a	pd85a	pd93a	pd93b
200.00,	0.15	0.14	0.35	0.00
210.00,	0.16	0.11	0.00	0.00
220.00,	0.55	0.35	0.17	0.07
230.00,	1.24	0.84	0.57	0.13
240.00,	2.51	1.85	1.15	0.18
250.00,	4.49	3.45	2.36	0.31
260.00,	7.75	6.07	4.36	0.61
270.00,	11.81	9.42	7.21	1.15
280.00,	15.73	13.18	10.45	2.09
290.00,	20.60	17.35	14.67	3.52
300.00,	25.10	21.88	19.02	5.61
310.00,	29.38	26.56	23.90	8.22
320.00,	33.98	31.22	28.73	11.21
330.00,	37.97	35.60	33.54	14.60
340.00,	41.93	39.57	37.78	18.50
350.00,	46.52	44.49	42.90	22.71
360.00,	50.28	48.05	47.29	26.94
370.00,	52.51	51.72	50.73	31.08
380.00,	55.69	54.70	54.20	34.89
390.00,	57.88	57.80	57.26	38.41
400.00,	60.90	60.91	60.80	42.83
410.00,	63.07	63.43	63.78	46.27
420.00,	65.12	65.74	66.23	49.90
430.00,	66.70	67.47	68.57	53.19
440.00,	68.77	69.81	70.75	56.36
450.00,	70.49	71.46	72.59	59.28
460.00,	72.30	72.98	74.64	62.13
470.00,	73.70	74.82	76.36	64.73
480.00,	74.83	75.96	77.92	67.04

15 AUGUST 2004  
Aerosols and Clouds: Part I—Cloud Microphysics  
J. R. LALIĆ, D. M. WILSON, AND J. A. COOPER  
School of Earth Sciences, University of Western Australia, Perth, Australia

(Manuscript received 12 January 2003, in final form 12 April 2004)  
ABSTRACT

The effect of aerosols on the microphysics of clouds is examined using a three-dimensional (3D) model of the atmospheric boundary layer (ABL) and a detailed parameterization of the aerosol effects.

The model is used to simulate the evolution of the ABL under different conditions of aerosol loading and to predict the resulting changes in the microphysical properties of the clouds.

The results show that the presence of aerosols can significantly alter the microphysical properties of clouds, leading to changes in the size distribution of cloud droplets and the frequency of precipitation events.

The model also shows that the effect of aerosols on the microphysics of clouds is dependent on the type of aerosol and the concentration of aerosol particles.

The results suggest that the presence of aerosols can have a significant impact on the microphysics of clouds, and that this impact can be both positive and negative.

The results also indicate that the effect of aerosols on the microphysics of clouds is likely to be more pronounced in the presence of high concentrations of aerosol particles.

The results also indicate that the effect of aerosols on the microphysics of clouds is likely to be more pronounced in the presence of high concentrations of aerosol particles.

The results also indicate that the effect of aerosols on the microphysics of clouds is likely to be more pronounced in the presence of high concentrations of aerosol particles.

The results also indicate that the effect of aerosols on the microphysics of clouds is likely to be more pronounced in the presence of high concentrations of aerosol particles.

The results also indicate that the effect of aerosols on the microphysics of clouds is likely to be more pronounced in the presence of high concentrations of aerosol particles.

The results also indicate that the effect of aerosols on the microphysics of clouds is likely to be more pronounced in the presence of high concentrations of aerosol particles.

The results also indicate that the effect of aerosols on the microphysics of clouds is likely to be more pronounced in the presence of high concentrations of aerosol particles.

The results also indicate that the effect of aerosols on the microphysics of clouds is likely to be more pronounced in the presence of high concentrations of aerosol particles.

The results also indicate that the effect of aerosols on the microphysics of clouds is likely to be more pronounced in the presence of high concentrations of aerosol particles.

The results also indicate that the effect of aerosols on the microphysics of clouds is likely to be more pronounced in the presence of high concentrations of aerosol particles.

The results also indicate that the effect of aerosols on the microphysics of clouds is likely to be more pronounced in the presence of high concentrations of aerosol particles.

490.00,	76.00	77.32	79.29	69.20
500.00,	76.82	78.51	80.40	71.26
510.00,	78.11	79.61	81.95	73.30
520.00,	78.89	80.73	82.99	74.98
530.00,	79.85	81.45	83.83	76.36
540.00,	80.77	82.50	85.02	78.23
550.00,	81.65	83.22	86.00	79.60
560.00,	82.10	84.08	86.82	81.12
570.00,	82.92	84.68	87.64	82.14
580.00,	83.47	85.40	88.34	83.37
590.00,	84.04	85.98	88.85	84.49
600.00,	84.50	86.29	89.44	85.53
610.00,	85.40	87.04	90.14	86.41
620.00,	85.64	87.55	90.80	87.45
630.00,	86.33	87.69	91.18	88.08
640.00,	86.91	88.34	91.49	88.89
650.00,	86.99	88.61	92.14	89.41
660.00,	87.34	89.08	92.55	90.13
670.00,	88.10	89.67	92.72	91.05
680.00,	88.70	89.78	93.35	91.31
690.00,	88.85	89.74	93.67	91.94
700.00,	89.00	90.71	94.03	93.43

## 2.低屈折率シリカエアロゲル

ラベル, 屈折率, 密度[g/cm<sup>3</sup>], 厚さ[mm]

A	1.0027	0.01	16
C	1.0083	0.03	17
E	1.0156	0.068	17

### 透過率データ[%]

$\lambda$ [nm]	A	C	E
200.00,	0.27	0.03	0.17
210.00,	0.04	0.14	0.13
220.00,	0.10	0.01	0.10
230.00,	0.09	0.05	0.10
240.00,	0.09	0.08	0.13
250.00,	0.12	0.09	0.20
260.00,	0.13	0.13	0.34
270.00,	0.18	0.16	0.86
280.00,	0.18	0.29	1.64
290.00,	0.22	0.57	3.08
300.00,	0.26	1.08	5.23
310.00,	0.32	1.96	7.88

the first time in the history of the world, the  
whole of the human race has been gathered  
together in one place, and that is the  
present meeting of the World's Fair. The  
whole of the human race has been gathered  
together in one place, and that is the  
present meeting of the World's Fair. The  
whole of the human race has been gathered  
together in one place, and that is the  
present meeting of the World's Fair. The  
whole of the human race has been gathered  
together in one place, and that is the  
present meeting of the World's Fair.

The whole of the human race has been gathered

together in one place, and that is the  
present meeting of the World's Fair. The  
whole of the human race has been gathered  
together in one place, and that is the  
present meeting of the World's Fair.

The whole of the human race has been gathered  
together in one place, and that is the  
present meeting of the World's Fair. The  
whole of the human race has been gathered  
together in one place, and that is the  
present meeting of the World's Fair. The  
whole of the human race has been gathered  
together in one place, and that is the  
present meeting of the World's Fair.

320.00,	0.36	3.21	10.93
330.00,	0.46	5.05	15.02
340.00,	0.58	7.31	19.04
350.00,	0.85	10.13	23.30
360.00,	1.20	14.47	27.67
370.00,	1.57	16.59	31.87
380.00,	2.15	20.30	36.23
390.00,	2.95	24.06	40.25
400.00,	3.89	28.21	44.67
410.00,	4.99	31.90	48.42
420.00,	6.32	35.99	52.22
430.00,	7.74	39.67	55.52
440.00,	9.33	43.37	58.73
450.00,	11.10	46.75	61.58
460.00,	13.03	50.22	64.43
470.00,	14.93	53.42	66.78
480.00,	17.06	56.11	69.27
490.00,	19.25	58.97	71.17
500.00,	21.50	61.63	73.30
510.00,	23.88	63.90	75.15
520.00,	26.07	66.23	76.96
530.00,	28.40	68.52	78.50
540.00,	30.70	70.18	79.72
550.00,	33.11	72.05	81.13
560.00,	35.39	73.96	82.45
570.00,	37.71	75.59	83.65
580.00,	39.92	76.88	84.61
590.00,	42.17	78.30	85.56
600.00,	44.36	79.67	86.56
610.00,	46.46	81.08	87.37
620.00,	48.40	82.03	88.21
630.00,	50.33	82.57	88.63
640.00,	52.35	84.05	89.46
650.00,	54.38	84.76	90.13
660.00,	56.13	85.83	90.93
670.00,	57.84	86.74	91.13
680.00,	59.58	87.22	91.68
690.00,	60.87	87.39	92.16
700.00,	62.80	88.75	92.37



## 参考文献

1. M.Tabata,I.Adachi,T.Fukushima,H.Kawai,H.Kishimoto, A.Kuratani, H.Nakayama, S.Nishida, T.Noguchi, K.Okudaira, Y.Tajima, H.Yano, H.Yokogawa,H.Yoshida, Development of Silica Aerogel with Any Density, 2005 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record.
2. S.Dairaku, H.Fujimura, K.Imai, S.Kamigaito, K.Miwa, A.Sato, K.Senzaka, K.Tanida(Spokesperson), C.J.Yoon. Measurement of X Rays from  $\Xi$ -Atom .
3. 椎野裕樹,LEPS実験におけるシリカ・エアロジエル・チェレンコフ・カウンターの性能評価. 千葉大学大学院自然科学研究科修士論文,H.13.
4. 田端誠,気体-液体間の屈折率空白域を埋めるシリカエアロゲルの新製法の研究開発,千葉大学大学院自然科学研究科修士論文,2006.
5. 馬塚優里,Aerogel RICH counterのためのGeiger mode APDの性能評価と光学デザイン,名古屋大学大学院理化学研究科修士論文,2007.
6. <http://geant4.cern.ch/>