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ェ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ェ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ェ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)

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

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。固体であ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。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2.4～2.6ｇ/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。

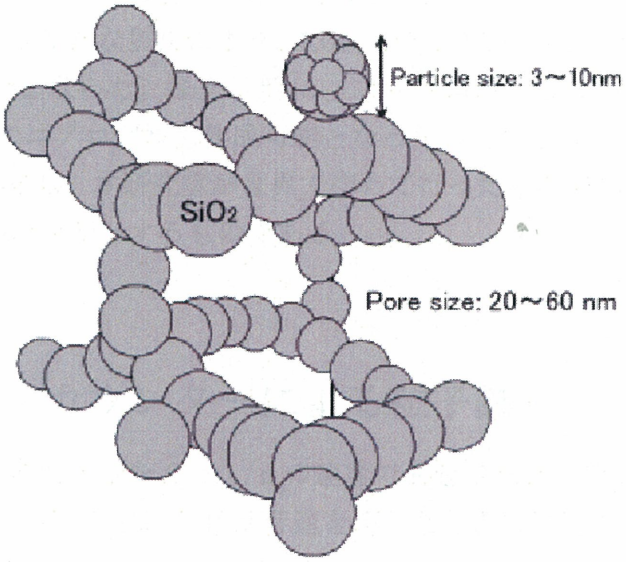


図1．1　シリカエアロゲルの二次粒子構造

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ρ、透明度(透過長Λで数値化される)の３つである。このうち、密度ρ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λ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Λ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≦n≦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≦n≦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≦n≦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ヘンス波面として形成される（図1.2）

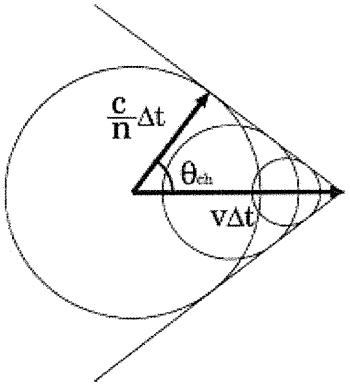


図1.2　チェレンコフ輻射

この時、ある時間Δｔに対してこの波面はΔｔ・ｃ／ｎまで伝わり、その間に粒子はｖΔｔ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θ_{ch}が求まる。

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

また、発生するチェレンコフ光の光子数Nは

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

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

(1.1)式から、チェレンコフ光は、荷電粒子の速度がβ＞1/nの時にのみ発生するといえる。これよりチェ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、$E^2=p^2-m^2$とp=βEの関係を用いて

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

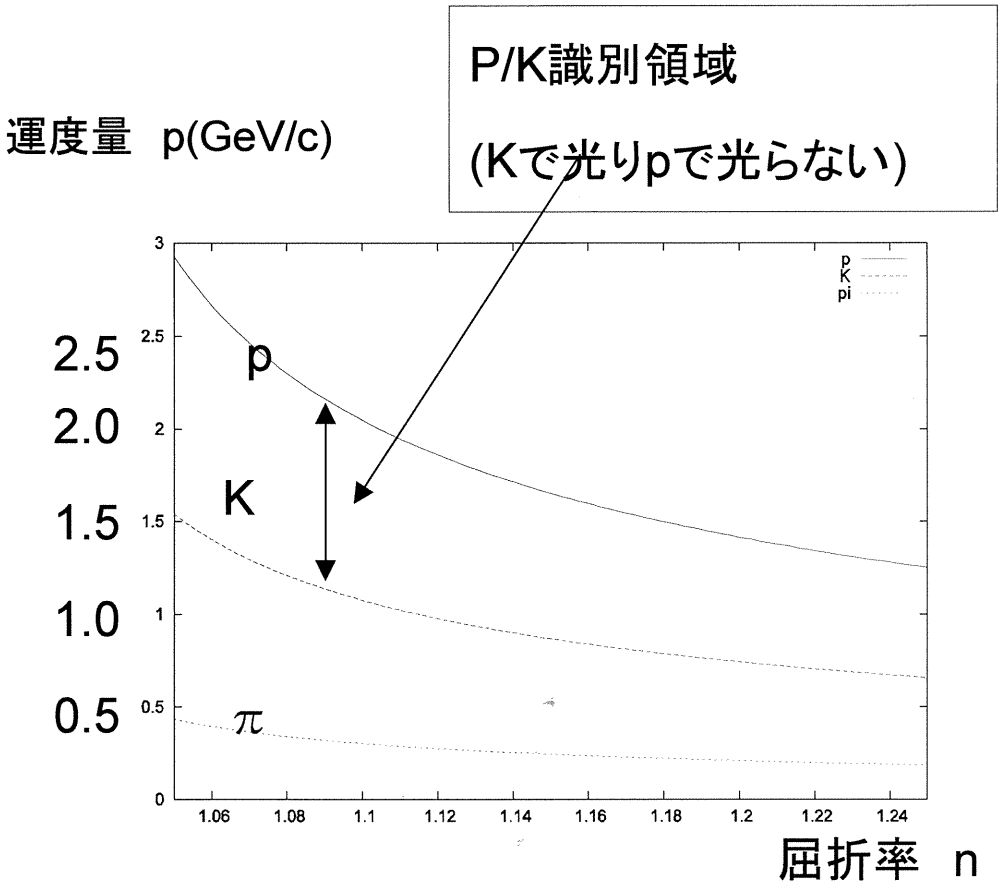


図1.3. 屈折率と閾値運動量

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

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/π粒子識別のためのエアロゲルチェ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ェ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π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Ξ⁻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、$K^- + p \rightarrow K^+ + \Xi^-$ の反応からシグナルとしてK+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ェ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

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

によって、チェ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^+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ェ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ェ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^+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^+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ェレンコフカウンターは、電子とミューオン、π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φ中間子光生成実験により、φ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。

φ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ェ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ェ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π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3 GeV/cであり、発生するπの運動量は最大で1.5GeV/cと考えられる。この時、e/π識別を可能にするためには、πのチェ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.≧2.3である。

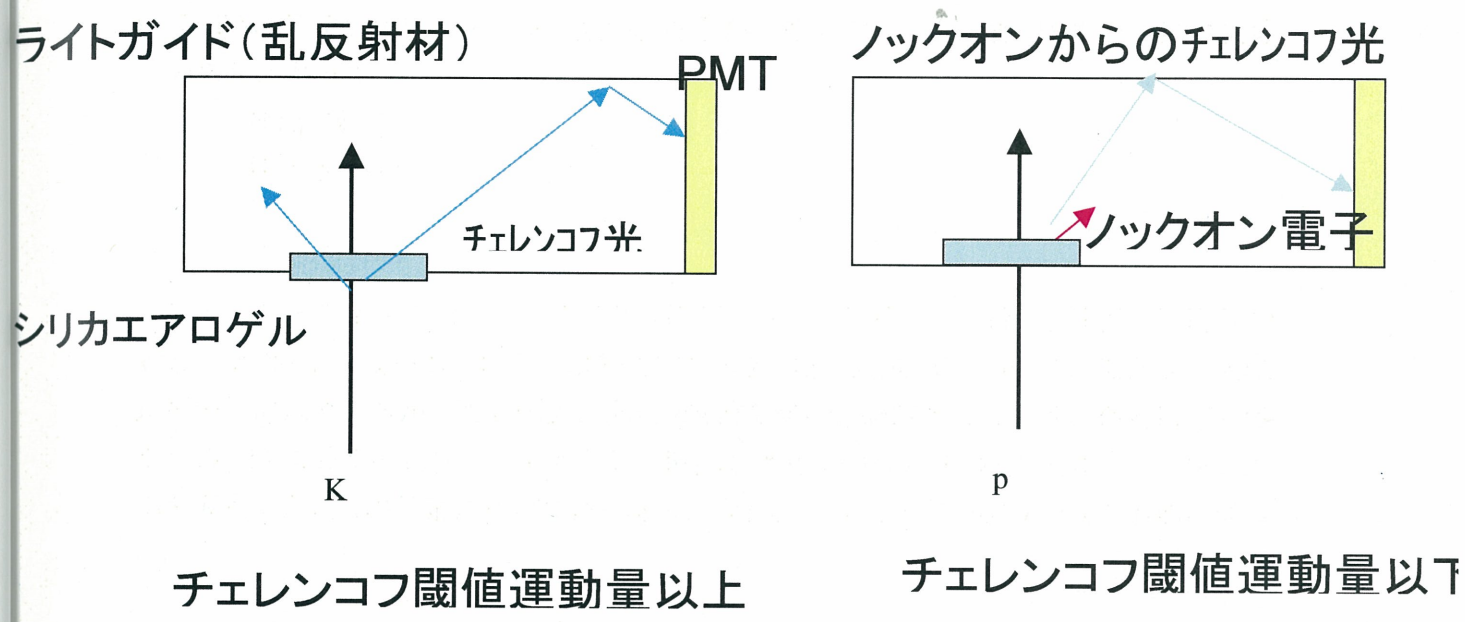
可視光レーザー使用時、ガンマ線ビームの運動量は2.4GeV/cであり、発生するπの運動量は最大で1.2GeV/cと考えられる。この時、e/π識別を行うためには、πのチェレンコフ閾値から、ゲル屈折率は1.0067以下でなくてはならない。また、ビーム強度は10MHzであり、電子陽電子対イベントの99.9%の除去が要求される。これに対応するNp.e.の値は、Npe≧3.45である。

第三章 高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

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。



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、ゲル中でチェレンコフ光を発生。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ェ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。散乱されたチェレンコフ光のうち、1%は吸収される(非検出)とする。ゲル中で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. ゲルの外に出たチェレンコフ光が
    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ェレンコフ光が

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財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ェレンコフが
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 に到達したチェレンコフ光が、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。

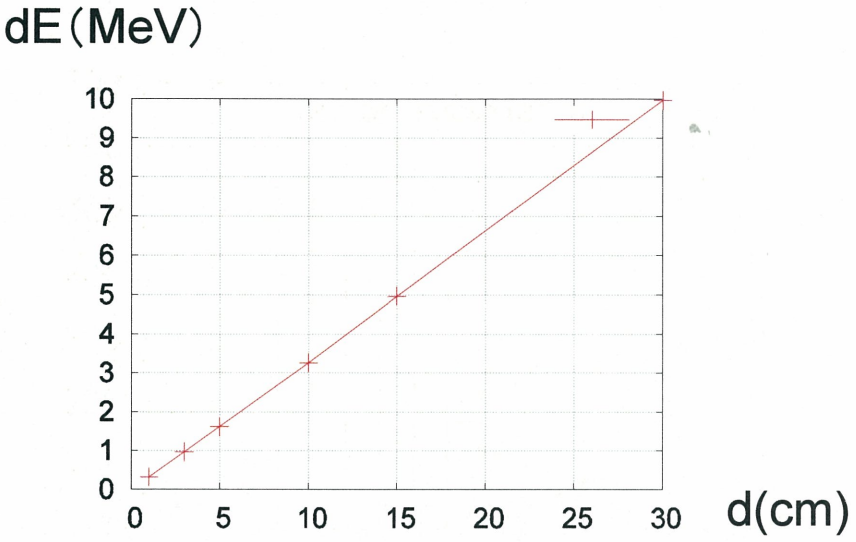
3.2.シミュレーションの検証

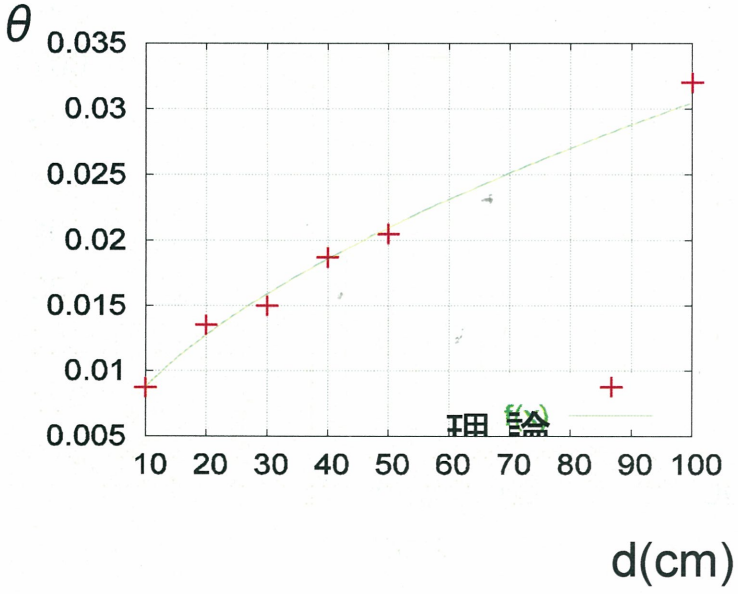
シミュレーションが正しく行われていることを確かめるために、以下のような手順で検証を行った。

検証 1.入射粒子の素過程

まず、チェ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、ゲル中で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。

結果は以下の透り。いずれも、理論式への一致が確かめられた。

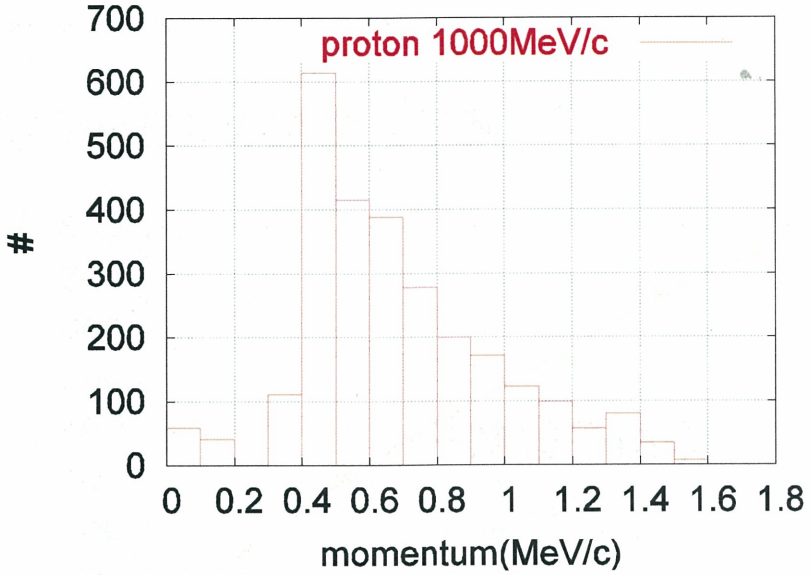


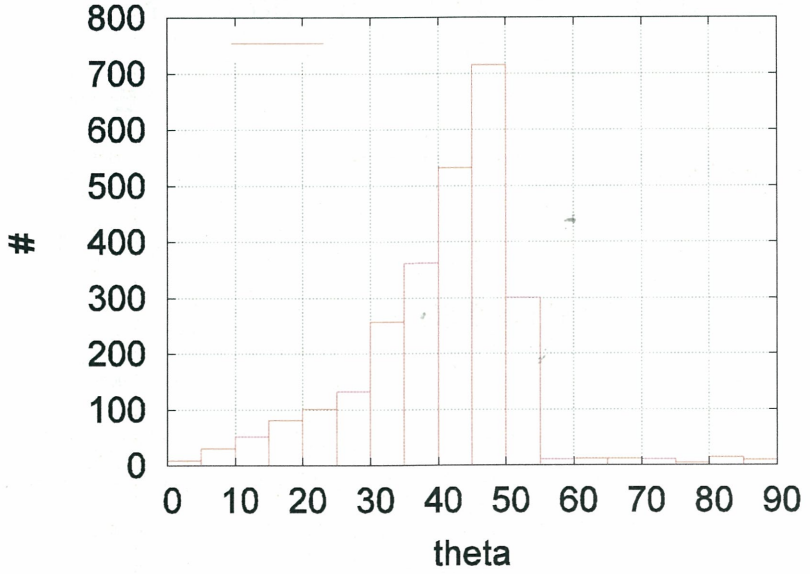


検証 2.ノックオン電子の発生

次に、運動量 1GeV/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、1GeV/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

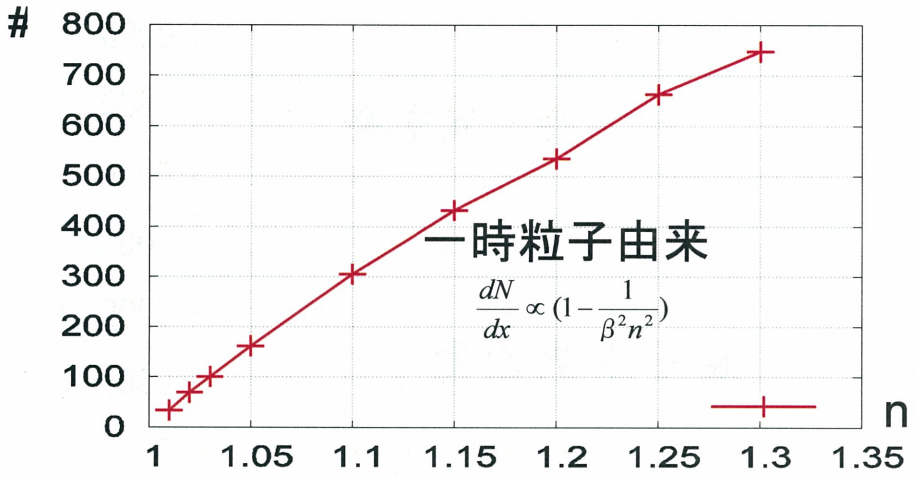
程度の角度で飛び出すことがわかる。

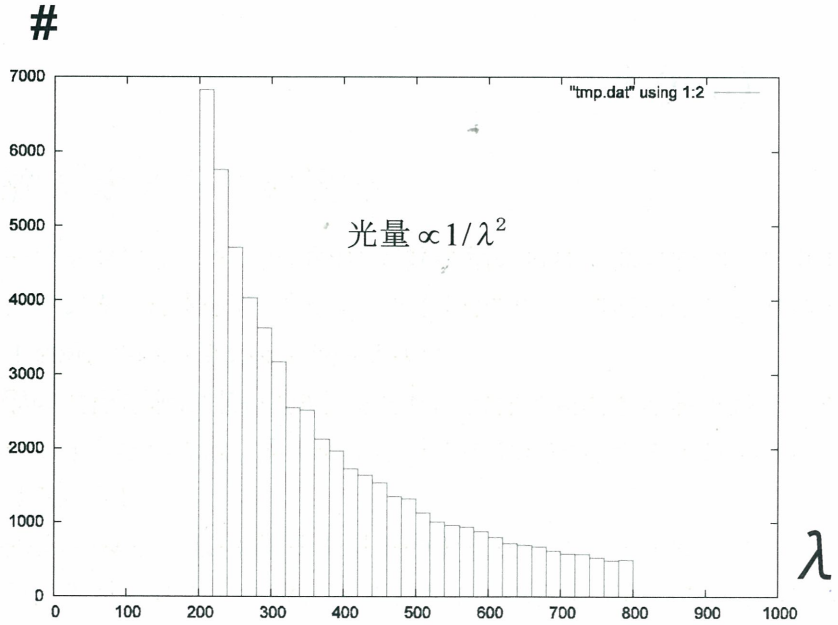
検証 3. チェレンコフ光の発生

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

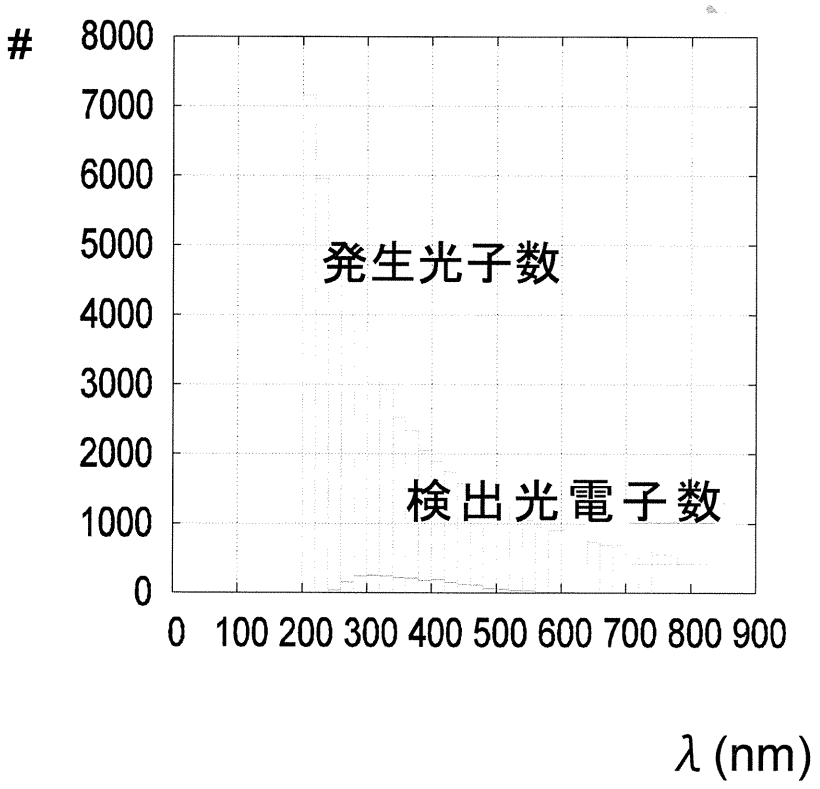




検証 4. 検出光電子数

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。

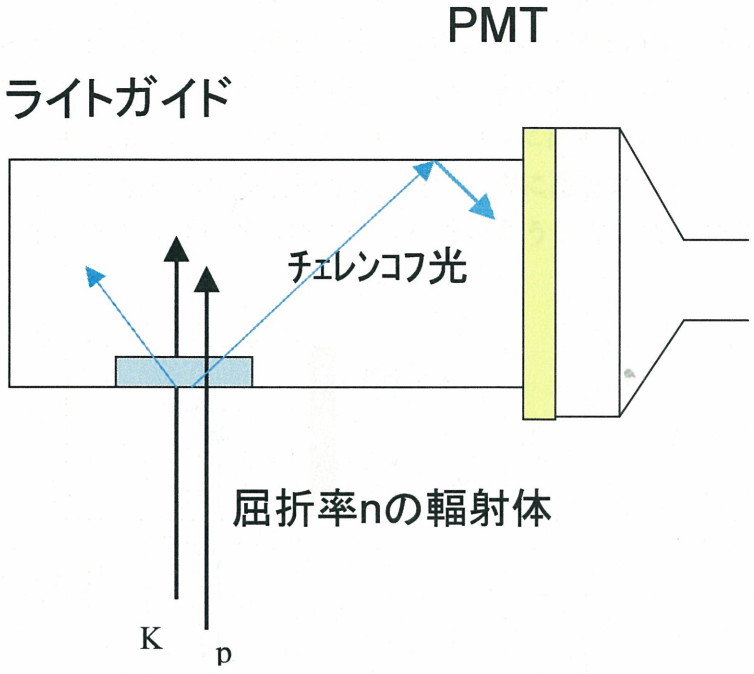


3.3 実験ジオメトリの決定

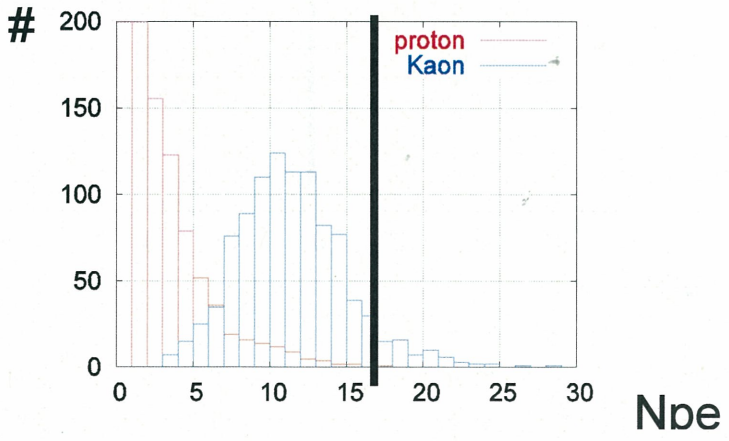
シミュレーションによって、J-PARC 実験に用いられる高屈折率シリカエアロゲルチェレンコフカウンターの最適なジオメトリを決定する。高屈折率シリカエアロゲルとして、屈折率 1.208、厚さ 1.05cm の物を用いた。

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、1GeV/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ェ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。

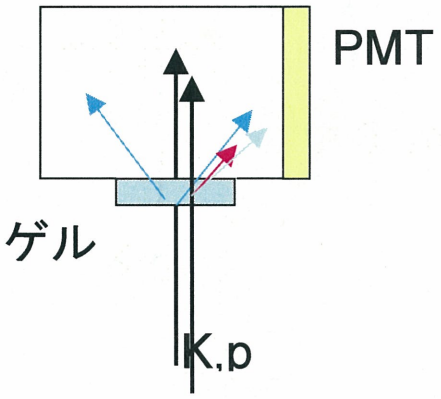


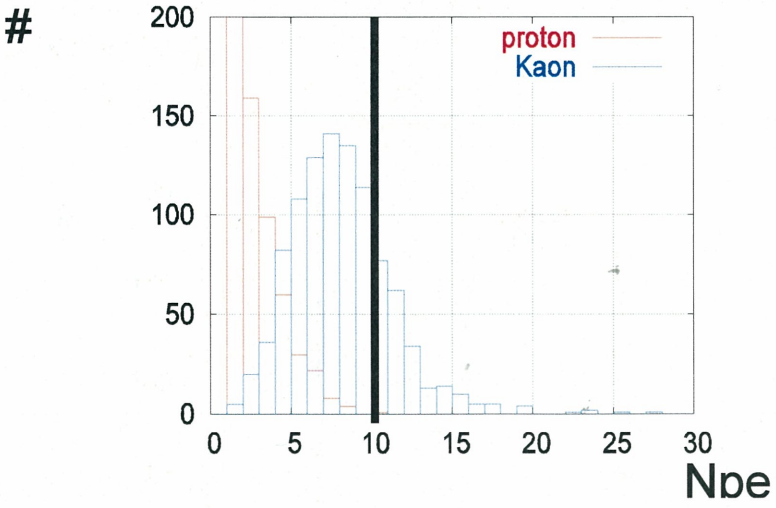
この運動量では本来陽子はチェレンコフ光を発生しないが、陽子がゲル中で発生させた、電子のチェレンコフ閾値を超えるノックオン電子がチェレンコフ光を発生させ、これが PMT に届いて検出されている。検出光電子数のヒストグラムを描くと以下のようになった。検出器の検出対象は K^+中間子であり、陽子はバックグラウンドである。太い縦線が陽子を 99.9%除去するための Np.e.閾値(17)である。



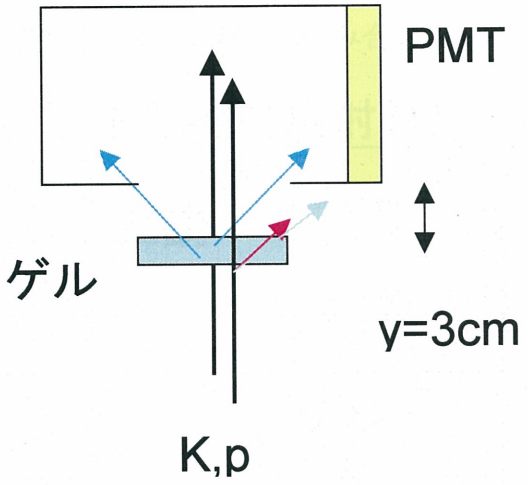
図を見ると二つのヒストグラムが重なっているために、実験で要請される Np.e.閾値

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ェ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。

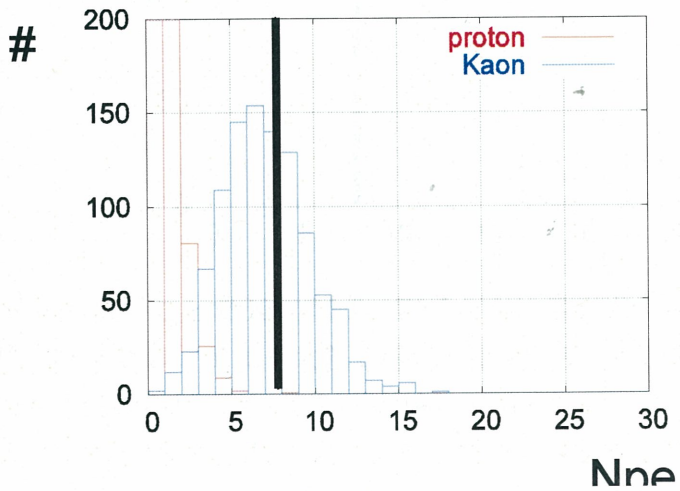




図を見ると、K^+中間子によるシグナルは減少しているが、陽子のヒストグラムの tail が短くなっているため、二つのヒストグラムの重なりは少なくなっており、やや改善が見られる。それでも、陽子の 99.9%を除去するような Np.e.閾値(10)を設定すると K^+中間子によるシグナルの 77%が失われてしまうことになり、実用的ではない。更なる改善のため、ゲルをライトガイドからさらに離してシミュレーションを行った。



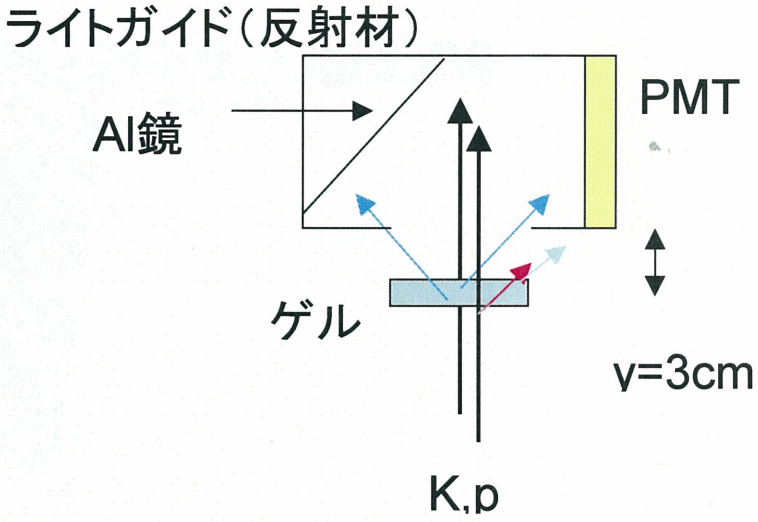
ライトガイドからゲルを離しすぎると、入射粒子から発生したチェレンコフ光もガイド内に届かなくなる。シミュレーションによってゲルとライトガイドの最適な距離を求めたところ 3cm という値が得られた。それでもシグナルの 65.2%が失われる。Np.e. 閾値は８である。

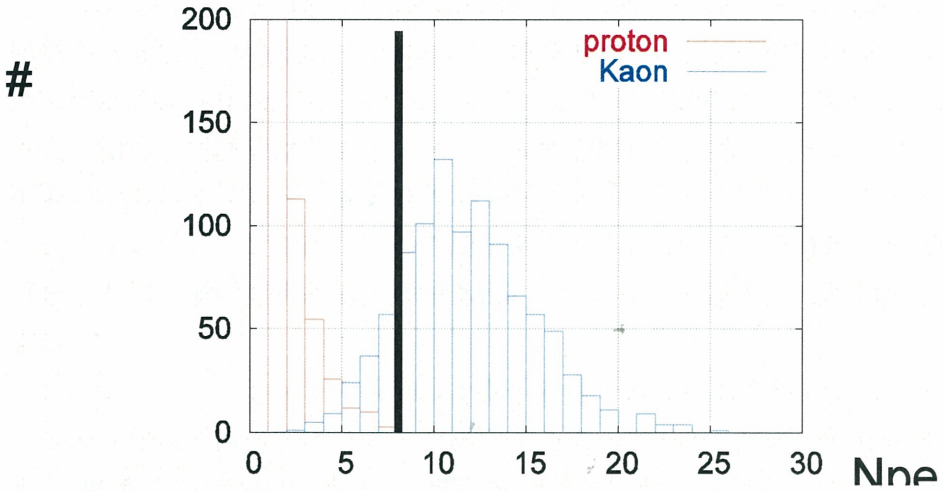


K^+中間子由来による検出光子の割合をさらに増加させるために

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

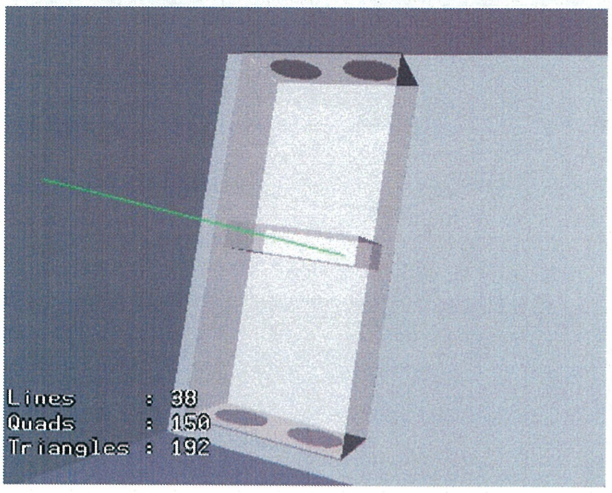




Al鏡を置くことでK^+中間子、陽子ともに検出光子数は増加する。しかし、K^+中間子の検出光子数の方がより大きく増えるため、Al 鏡を置いた方が識別能力は向上する。反射材と乱反射材、鏡の有無を考慮して四通りのシミュレーションを行った結果、ライトガイドに反射材を用い、鏡を入れた場合に最も粒子識別能力が高くなることが分かった。これにより、シグナルの 86.7%を残すことができる。Np.e.閾値は8である。これを、高屈折率シリカエアロゲルチェレンコフカウンターのジオメトリとして採用することにする。

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

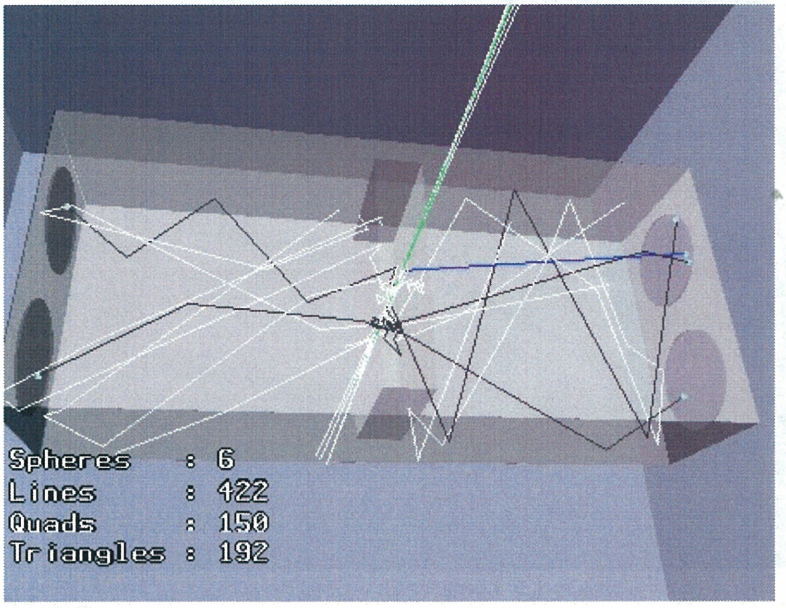


現在の LEPS 実験用検出器を再現した図のようなジオメトリを基本としてシミュレーションを行う。入射粒子は460MeV/cの電子、ゲルのサイズは、65mm×100m×20mm。屈折率 1.0027、1.0083、1.0156 の三種類のゲルの透過長データを用いた。PMT の有効面積は直径 44mm の円とした。ゲル中心から PMT までの距離は、135mm である。また、LEPS 実験ではファインメッシュ型 PMT を使用しているため、QE の値は高屈折率ゲルのシミュレーション時の半分とした。

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.の値を出力し、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。

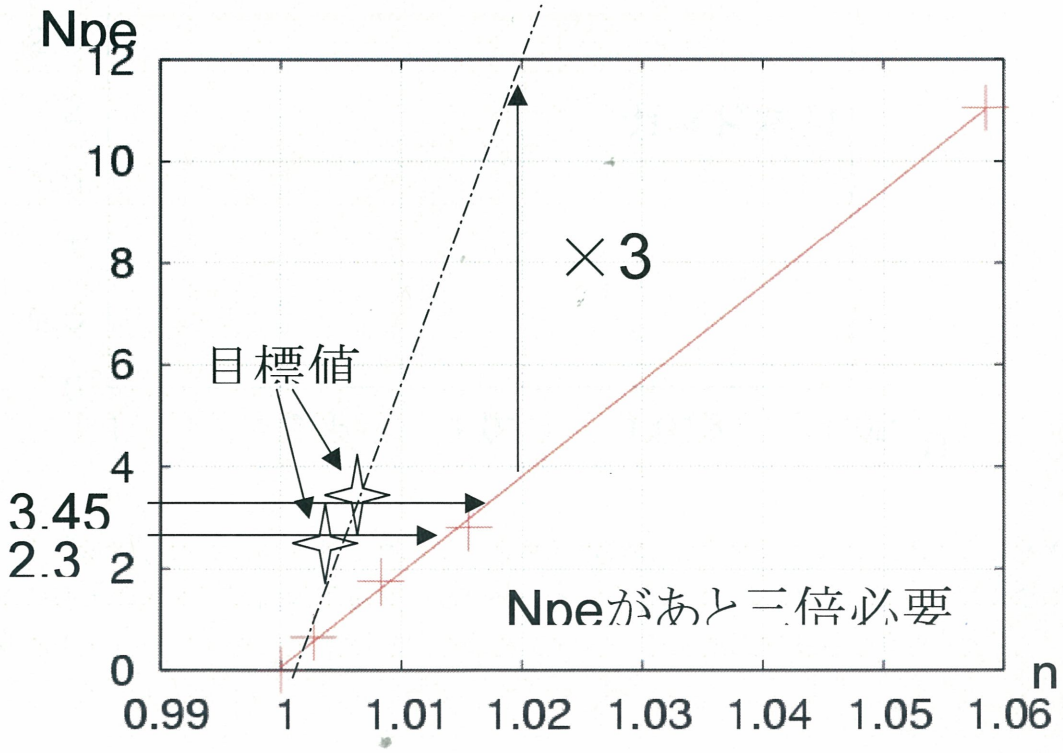
このシミュレーションの目的は、電子陽電子対の除去を行いつつ、e/π識別を可能とするような検出器のジオメトリを決定することである。要求される性能は、電子陽電子対を 99 あるいは 99.9%除去した際、Np.e.2.3 個を達成するためのゲル屈折率が 1.0043 以下、Np.e.3.45 個を達成するためのゲル屈折率が 1.0067 以下となることである。

4.2.シミュレーション結果

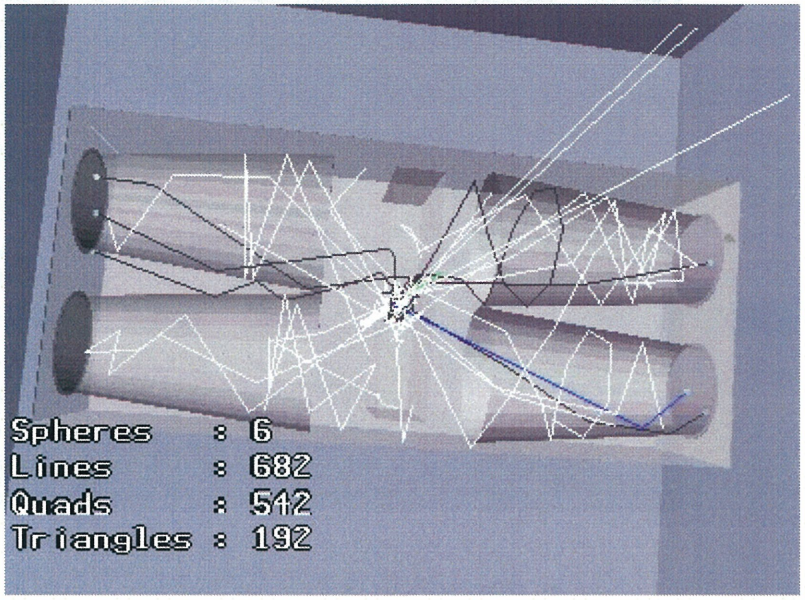


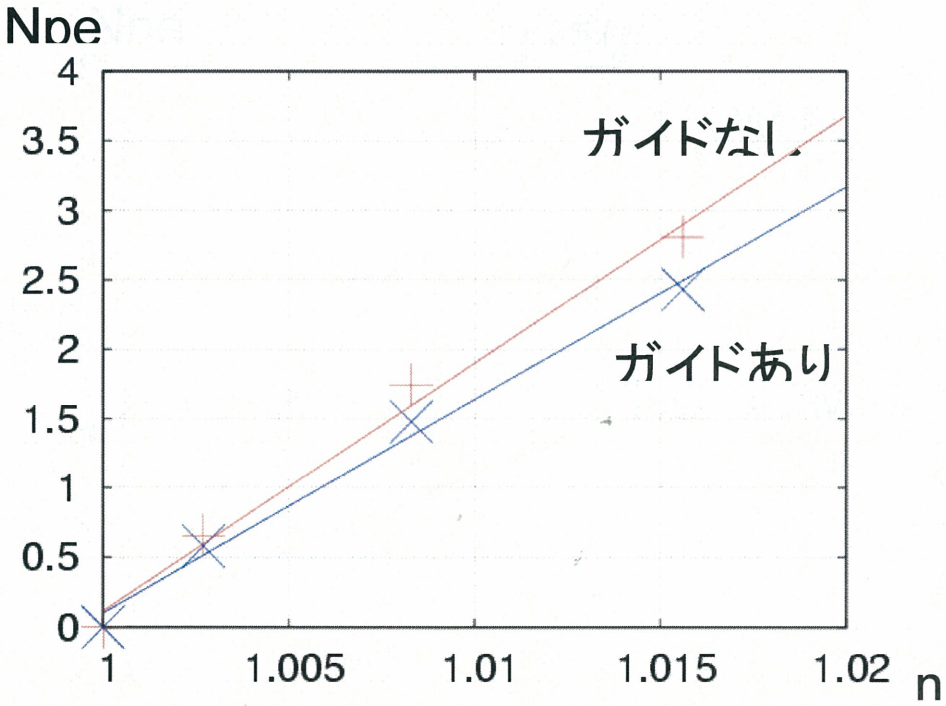
はじめ、現在のLEPS実験用検出器を再現した図のようなジオメトリでシミュレーションを行った。ゲルのみ、低屈折率の物に変更している。

結果は以下のとおり。



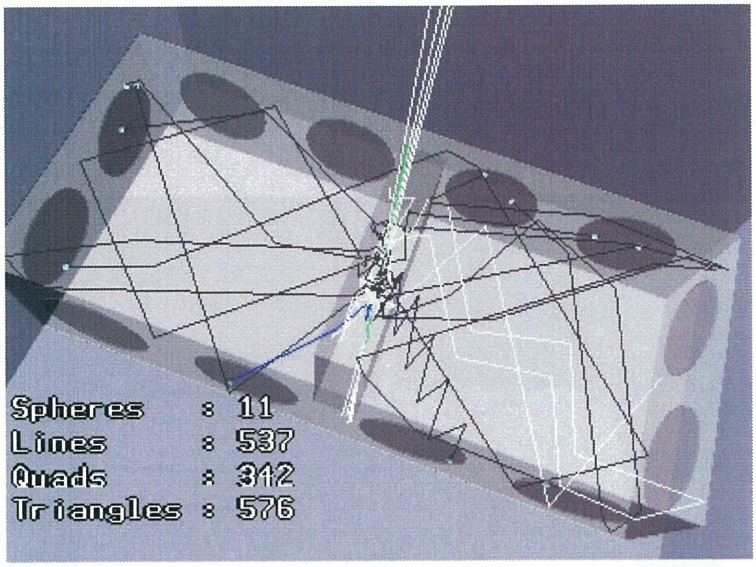
この結果では、目標としているNp.e.の1/3程度の値しか光量が得られていないため、e/π識別を行うことが出来ない。改善策として、コーン型ライトガイドの導入を行った。

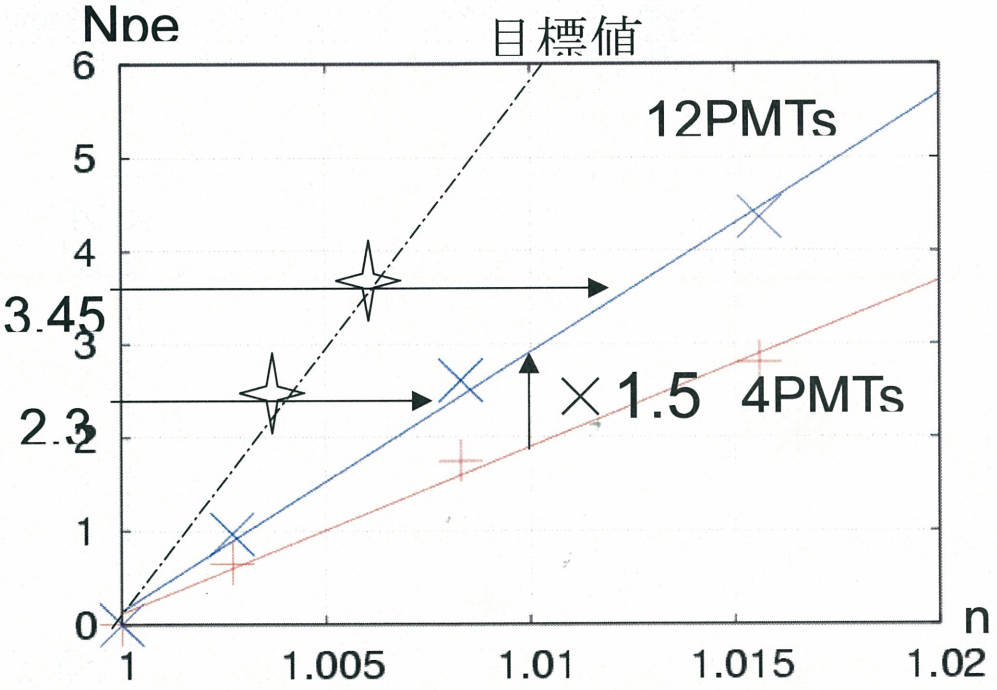




結果的に、ライトガイドを導入した方が光量は少なくなってしまったため、ライトガイド導入のアイデアは効果がないということが分かった。これは、光子がゲルを出た段階でチェレンコフ角の情報がほぼ失われていることが原因であると考えられる。

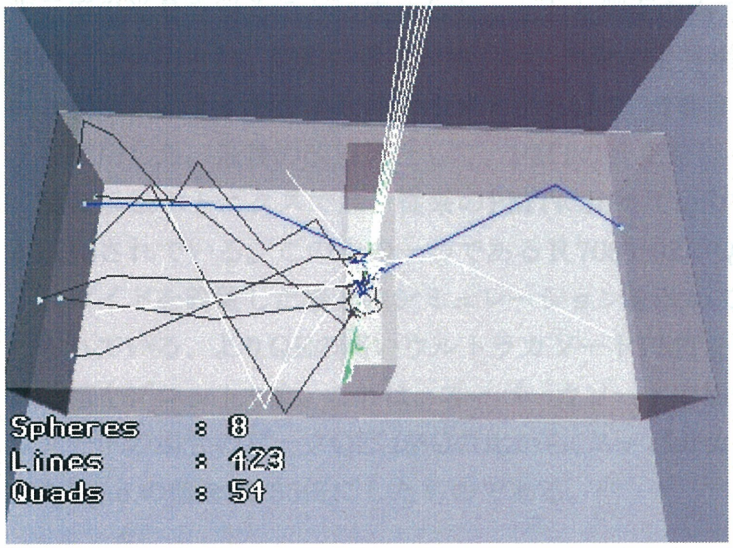
ライトガイドに代わるアイデアとして、現在上下面に４本設置されているPMTを側面にも8本追加し、計12本のPMTを用いることで光量の増加を目指した。

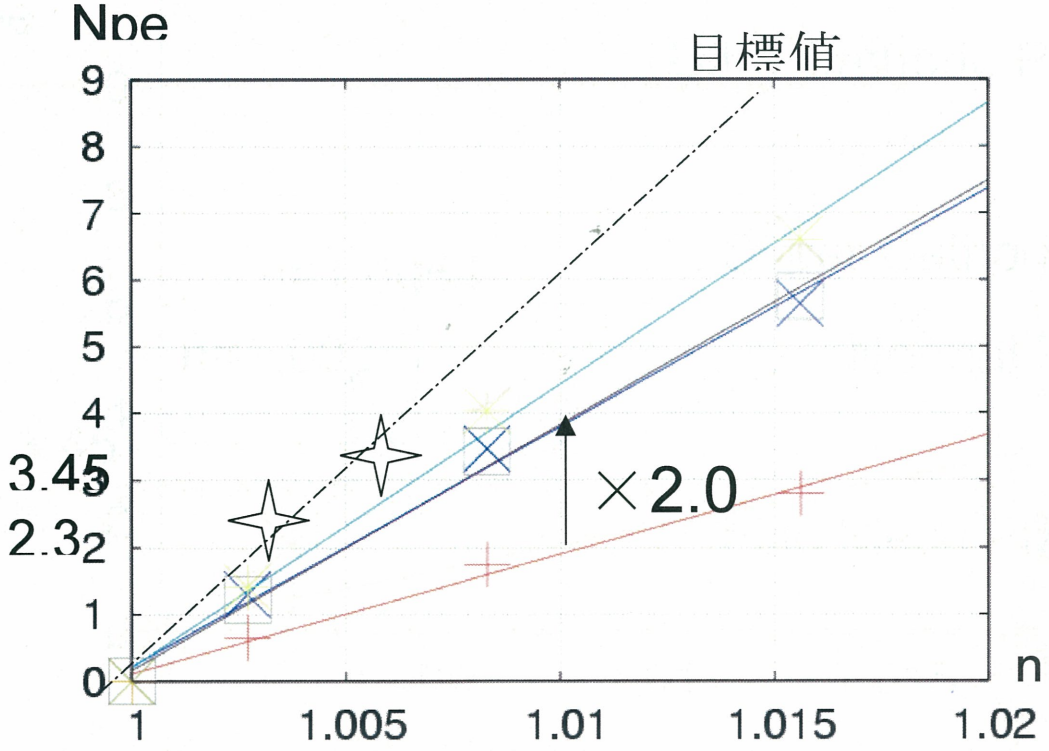




PMTを4本から12本に増やすことで、光量は約1.5倍になるという結果が得られた。しかし、これでもまだ目標値である3倍の光量には及ばない。そこで、さらなる改善策として、アクリルブロック型のライトガイドの導入を行うことにした。これにより、ボックスから離れた磁場の影響のない場所にPMTを置くことができるようになるため、

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Np.e.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。



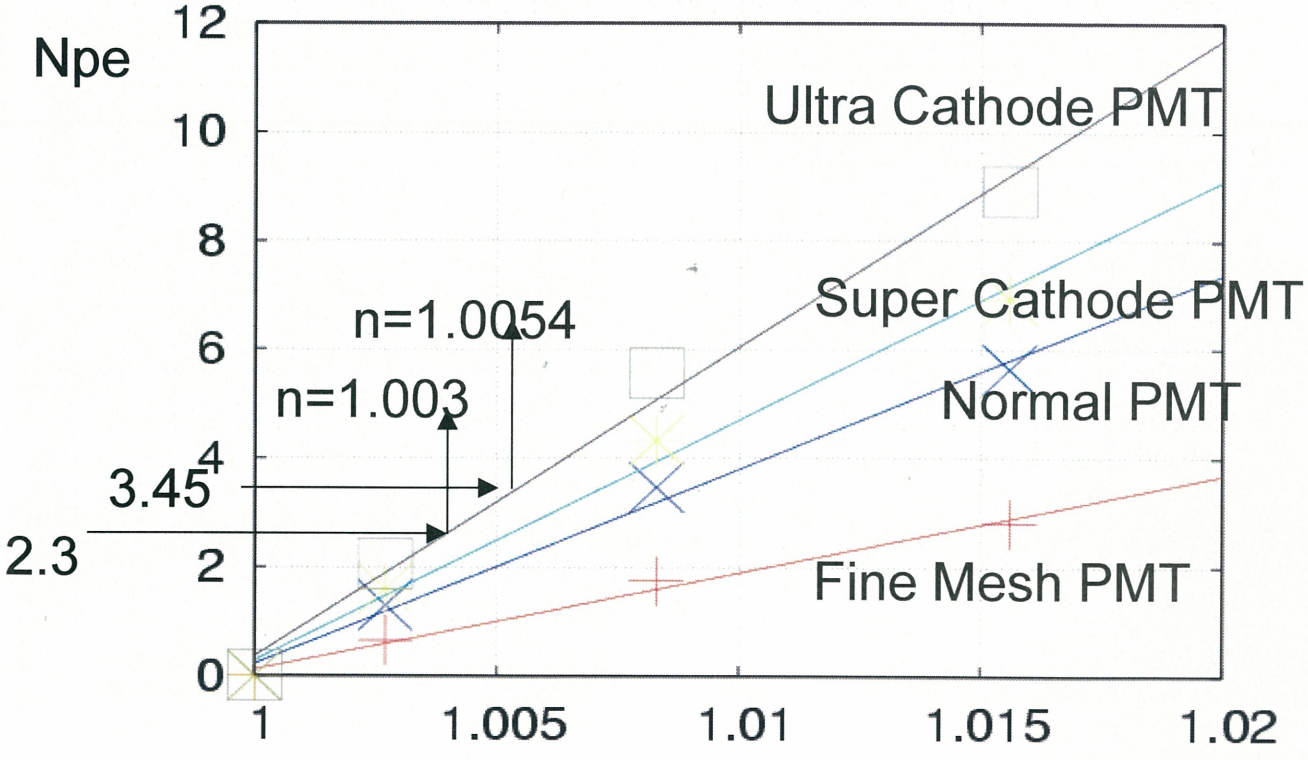


このシミュレーションは、アクリルライトガイドの配置場所を変えて三通り行った。

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つ目のジオメトリは、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Np.e.の値を45/35倍にしたものである。



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π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^+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π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^3]，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[%]

λ[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

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^3], 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[%]

λ[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

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 Ξ- Atom .

3. 椎野裕樹,LEPS実験におけるシリカ・エアロジェル・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/