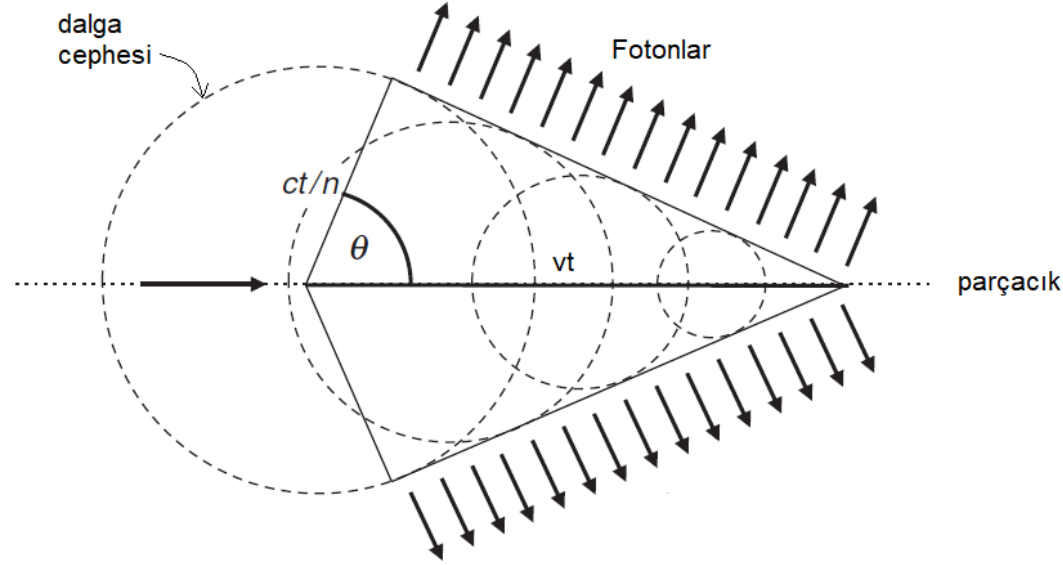




Cherenkov Işıması



Ahmet Bingöl

Gaziantep Üniversitesi

Fizik Mühendisliği Bölümü

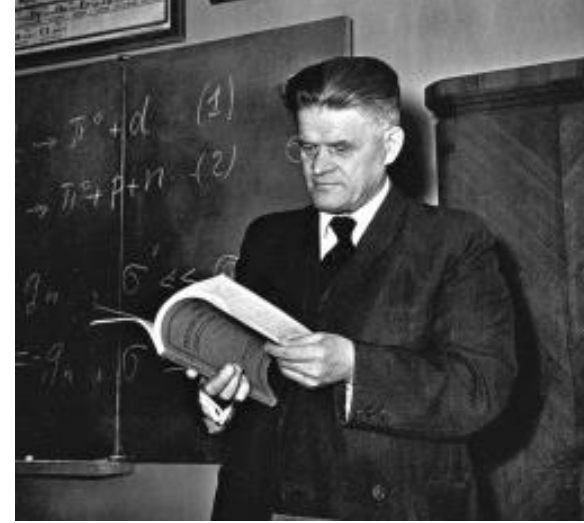
HTE-UKO24, Şubat 2024

İçerik

1. Cherenkov Işıması
2. Fizik
3. Fotonların Yönü
4. Eşik Enerjisi, RICH ve Parçacık Kimlikleri
5. Fotonların Sayısı
6. Bazı RICH Tasarımları
7. Bizim Deney
8. Yararlanılan Kaynaklar

Cherenkov Işıması (Cherenkov Radiation)

- Yüklü bir parçacık saydam (optik) bir ortamdan geçerken, hızı ortamdaki ışık hızından büyükse fotonlar yaymaya başlar. Bu fotonlara **Cherenkov Işıması** denir.
- İlk kez M. Curie tarafından gözlenmiştir (1910).
- Kapsamlı deneysel çalışmalar P.A.Čerenkov tarafından yapılmıştır (1934).
- Sürecin kuramsal açıklaması Frank and Tamm tarafından yapılmış (1937).
- Cherenkov radyasyonunun klasik bir örneği, bir su altı nükleer reaktörünün karakteristik mavi parıltısıdır.



Dalga Cephesi ve Işın

- Dalgaların ilerlemesi “dalga cephesi” kavramı ile modellenebilir.
- Bir boyutta dalga denklemi: $\psi(x, t) = A \sin(kx - \omega t)$
Üç boyutta dalga denklemi: $\psi(\mathbf{r}, t) = A \sin(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t)$
- **Dalga cephesi:** dalga fazının $(kx - \omega t)$ sabit olduğu yüzeydir.
- **Işın:** bir dalga cephesinin üzerindeki bir noktadır.
- Işıklar ve dalga cephesi birbirine **diktir**.

Genlik:

A

Dalga sayısı:

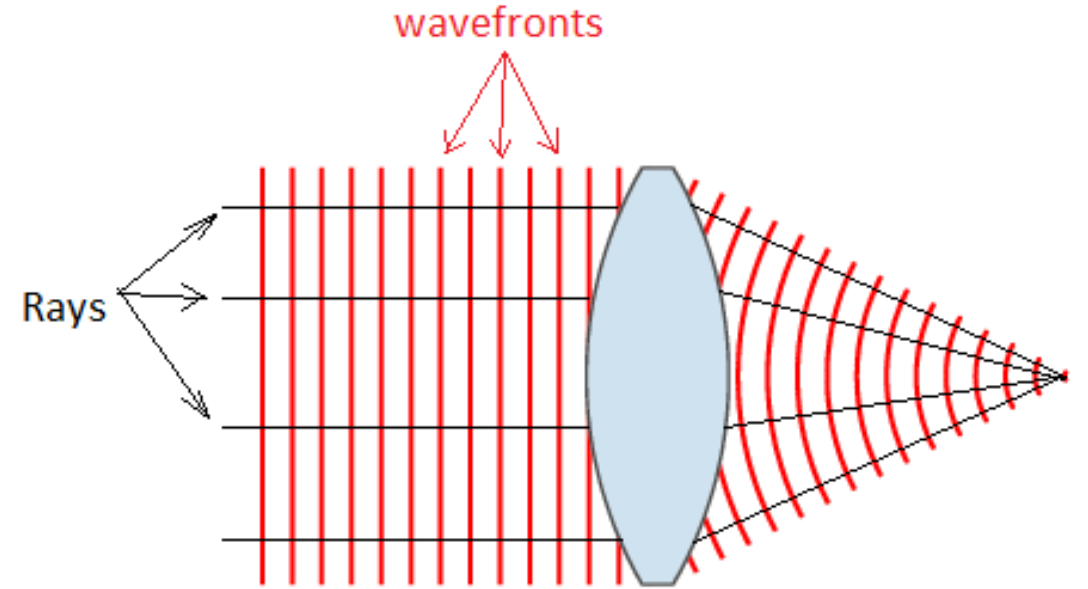
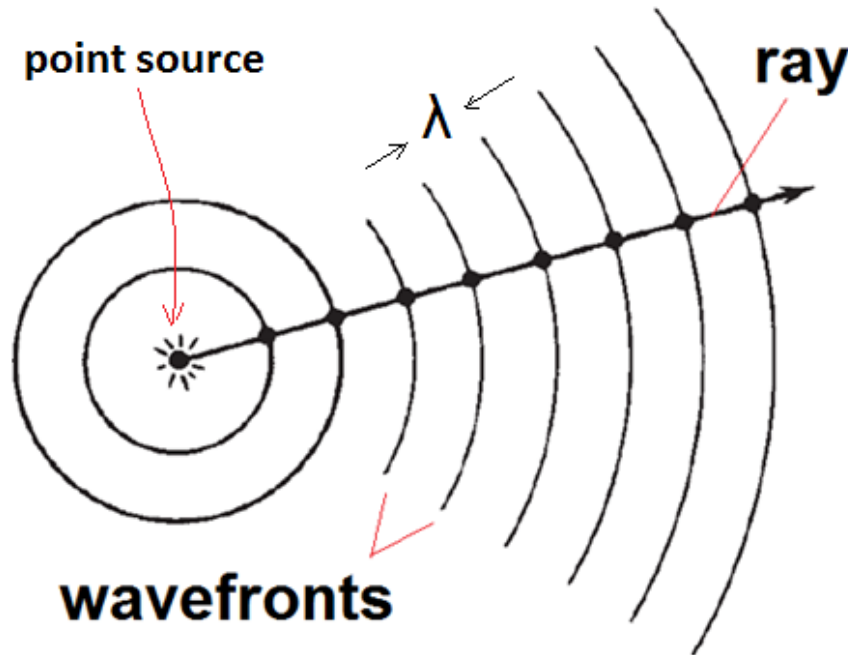
$k = 2\pi/\lambda$

Frekans:

$\omega = 2\pi f$

Faz:

$\phi = kx - \omega t$



Kırılma indisi

- Optikte, bir optik ortamın **kırılma indisi**, o ortamın ışığı bükme yeteneğinin bir ölçüsüdür. Şöyle tanımlanır:

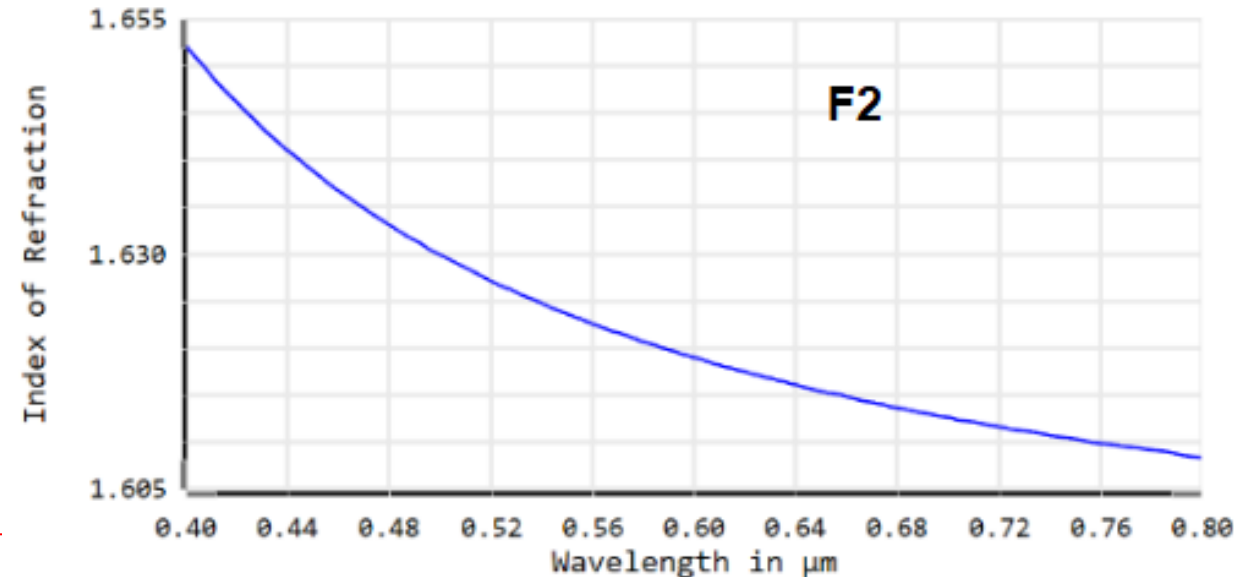
$$n = \frac{\text{ışığın boşluktaki hızı}}{\text{ışığın ortamdaki hızı}} = \frac{c}{v}$$

Birçok malzeme için $n > 1$.

- Kırılma indisi dalgaboyunun bir fonksiyonudur.

$$n = n(\lambda)$$

Malzeme	$\lambda = 589 \text{ nm}'de$
Adı	Kırılma indisi
Hava	1.000293
CO ₂	1.000450
He	1.000036
Aerogel	1.05
H ₂ O	1.333
PMMA	1.491
PC	1.585
PS	1.590
Optik cam	1.5-1.8
Elmas	2.417

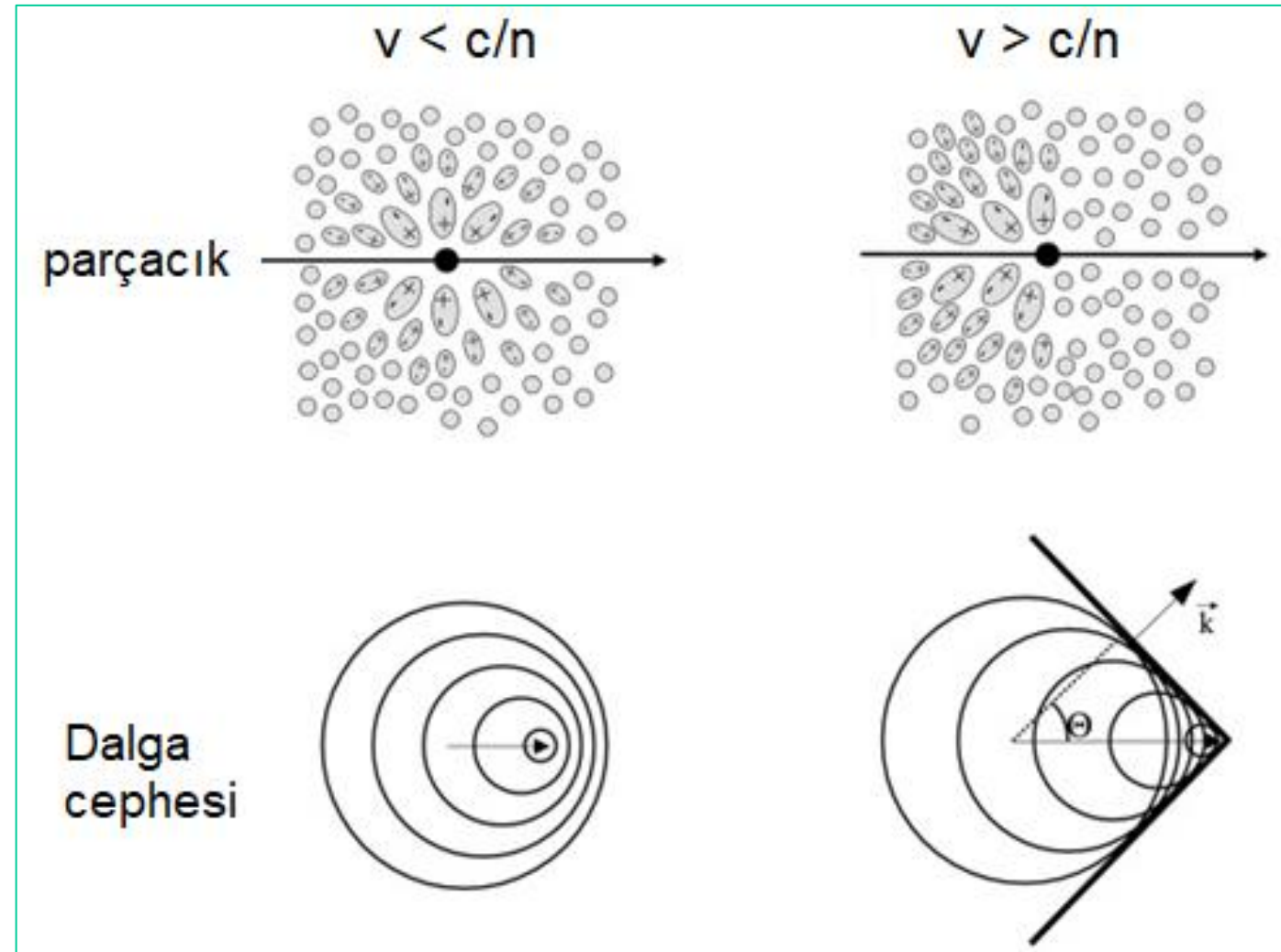


Fizik

Yüksek enerjili yüklü bir parçacık optik ortamda ilerlerken, ortamdaki atomları uyarıp polarize edebilir. Uyarılan atomlar ışıma yaparak taban durumuna düşer. Açığa çıkan fotonlar küresel dalga-cephesi oluşturur.

Eğer $v < c/n$ ise, parçacık etrafında oluşan polarize alan oldukça simetriktir. Yayılan dalga cepheleri çakışmaz ve girişim oluşmaz.

Eğer $v > c/n$ olursa polarizasyon alanı parçacık doğrultusunda asimetriktir. Yayılan dalga cephesi birbiri ile çakışır ve yapıcı bir girişim oluşturur. Sonuçta koni şeklinde fotonlar yayılmaya başlar.



Canlandırma



https://en.wikipedia.org/wiki/Cherenkov_radiation

Fotonların Yönü

Chrenkov ışımasının koşulu:

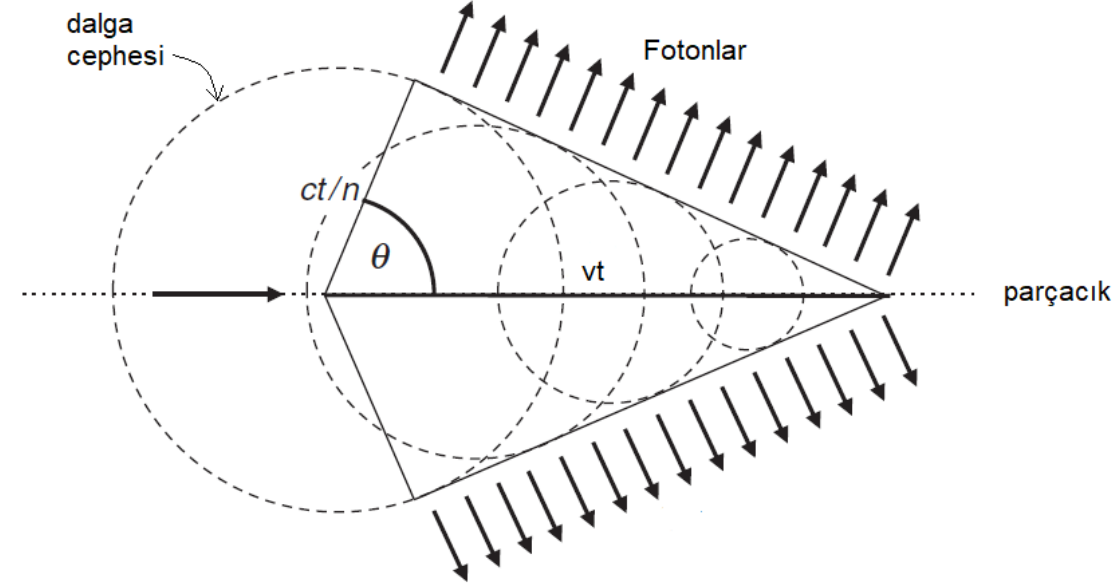
parçacığın hızı > ışığın ortamdaki hızı

$$v > \frac{c}{n} \text{ yada } \beta > \frac{1}{n}$$

Bu durumda elektromanyetik şok dalgası oluşur.
tıpkı sestten hızlı uçan bir uçağın yaptığı
sonik patlama gibi.

Şekildeki EM şok dalgasının parçacığın doğrultu ile yaptığı açı:

$$\cos\theta = \frac{vt}{ct/n} = \frac{1}{\beta n}$$



Eşik Enerjisi (Threshold Energy)

Cherenkov ışımalarının gerçekleşmesi için gereken parçacık enerjisi göreceli denklemler kullanılarak bulunur:

$$\beta = \frac{v}{c} = \frac{pc}{E} = \frac{\sqrt{E^2 - m^2 c^4}}{E} = \frac{1}{n}$$

Bu denklemden E çözülürse

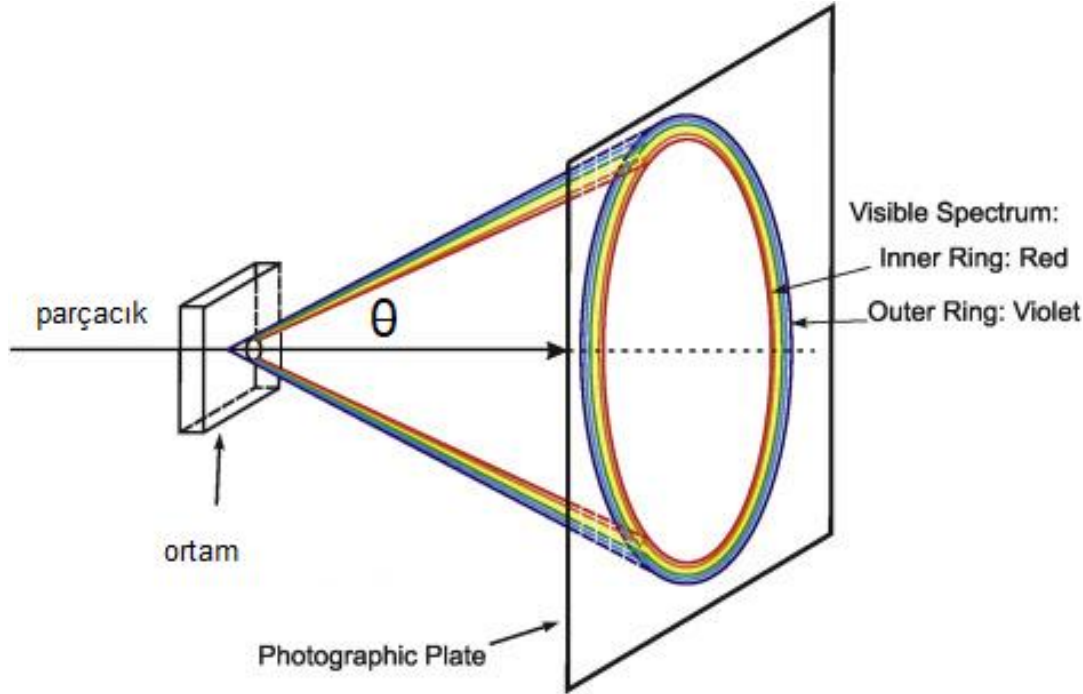
$$E_{eşik} = \frac{mc^2}{1 - 1/n^2}$$

Table 17.1. Particle threshold energies in MeV for the production of Cherenkov photons in media (Cherenkov radiators) of different index of refraction.

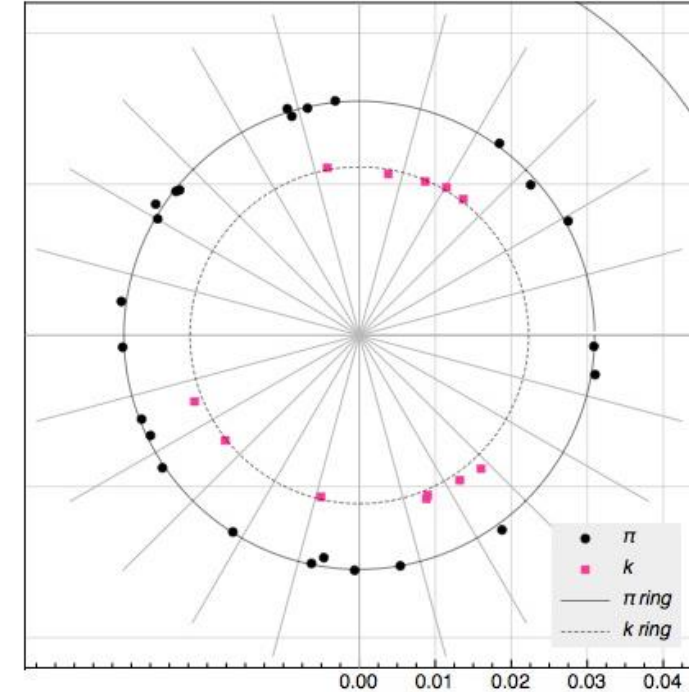
Medium	Index of refraction (n)	Particle threshold energy (MeV) ^a		
		Electron ^b	Muon ^c	Proton ^d
Air	1.00027712 ^e	21.2	4380.9	38,925.9
Silica aerogel ^f	1.05	1.16	240.7	2139.0
Water	1.333	0.262	54.3	482.1
Glass ^g	1.47	0.186	38.5	341.9
Plastic ^h	1.52	0.167	34.6	307.6
Ceramic ⁱ	2.1	0.070	14.5	128.7
Diamond	2.4	0.051	10.6	93.9

Halka Görüntüleme Cherenkov Algıçı (Ring-Imaging Cherenkov Detector, RICH)

- RICH momentumu bilinen yüklü parçacıkların kimliklerini Cherenkov Işıması ilkesine dayanarak belirlemeye yarayan algıçtır.
- 1980'lerde geliştirilmeye başlandı.
- Günümüzde Çekirdek Fiziği, Parçacık Fiziği ve Astrofizik araştırmalarında kullanılmaktadır.



Cherenkov photons emitted by a 22 GeV/c pion or kaon in CO₂



Örnek

$p = 2 \text{ GeV}/c$ momentumlu pion ve proton için saf su içindeki Cherenkov açısını hesaplayın.

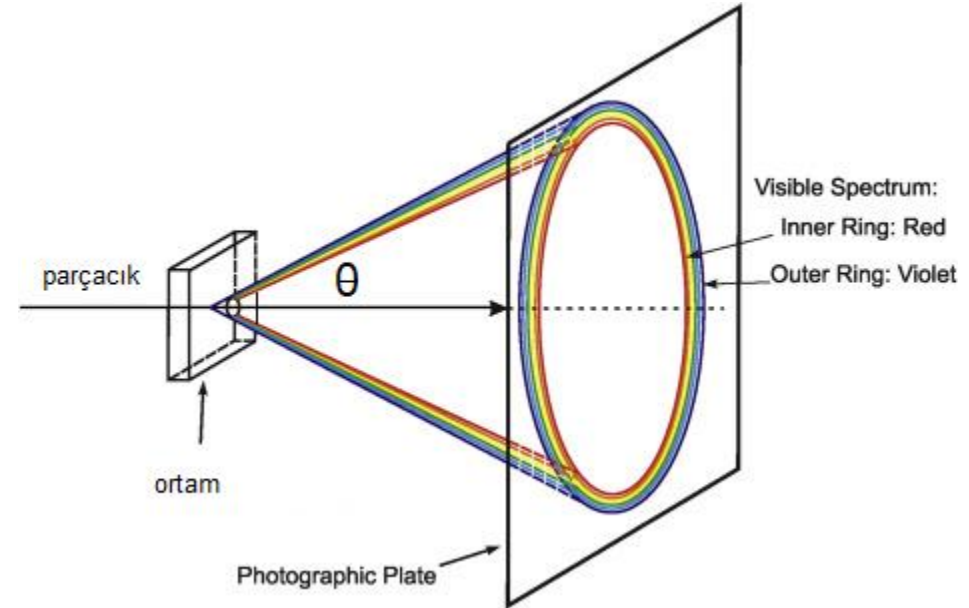
$$\beta = \frac{pc}{E} = \frac{pc}{\sqrt{p^2c^2 + (mc^2)^2}}$$

$$\beta_\pi = 0.9986 \text{ ve } \beta_p = 0.9054$$

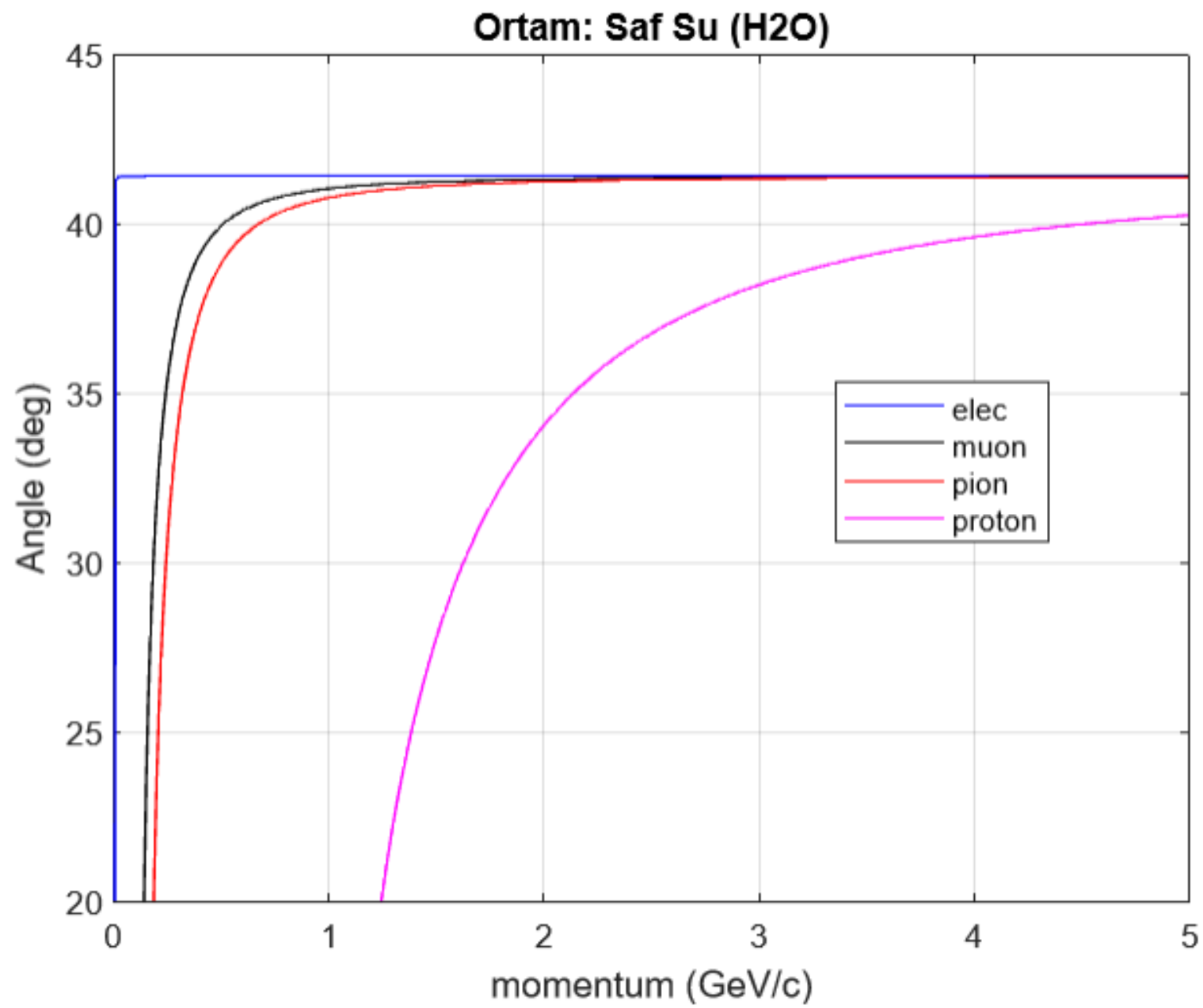
Koni açıları:

$$\theta_\pi = \arccos\left(\frac{1}{\beta_\pi n}\right) = 40.2^\circ$$

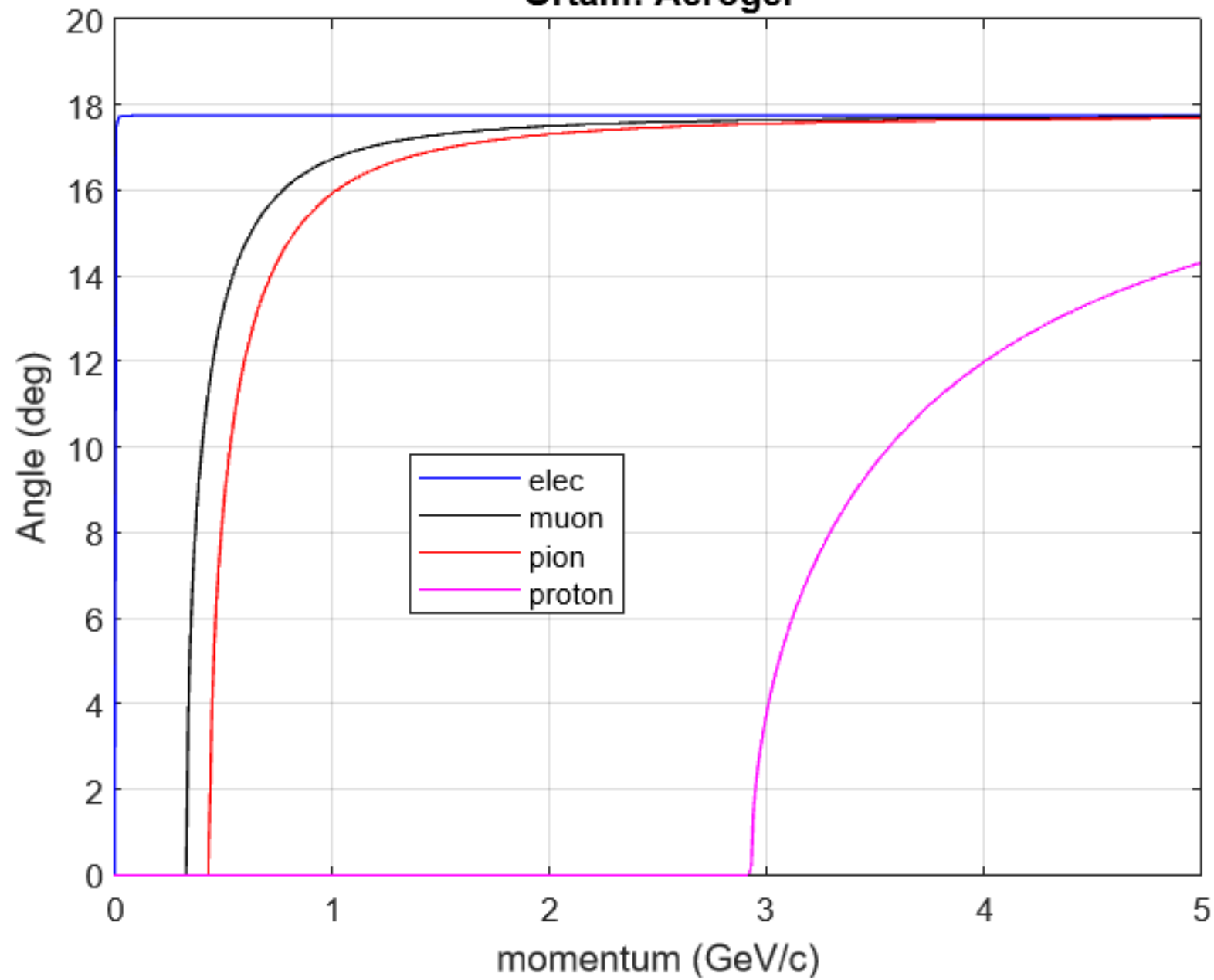
$$\theta_p = \arccos\left(\frac{1}{\beta_p n}\right) = 34.0^\circ$$

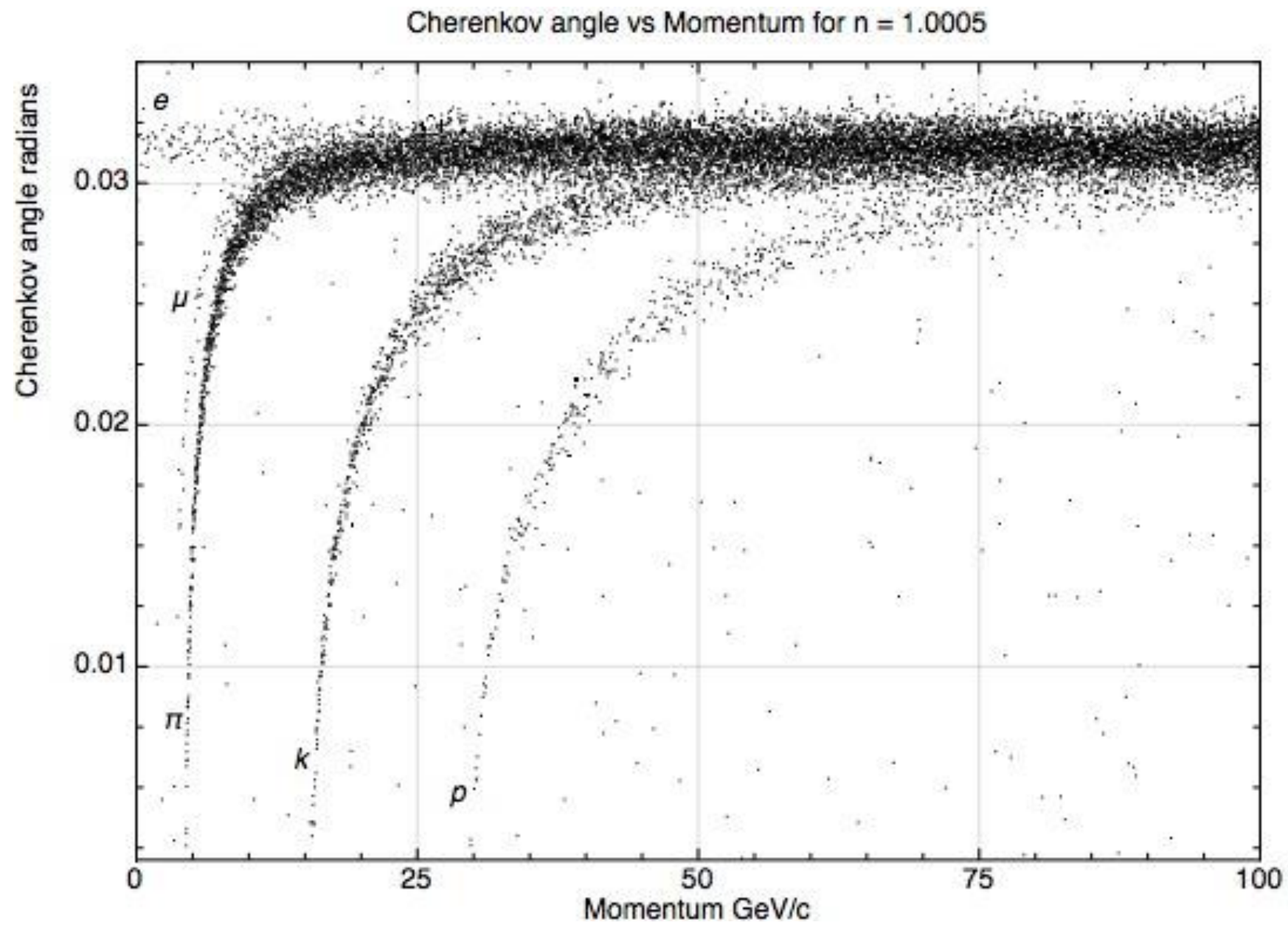


```
% Cherenkov açısı hesaplama (matlab)
n = 1.333; % kırılma indisi
p = 2; % momentum GeV/c
m = [0.140 0.938]; % pion ve proton kütlesi
beta = p./sqrt(p.^2 + m.^2)
theta = acosd(1./(n*beta))
```



Ortam: Aerogel





Foton Sayısı

Cherenkov Işıması'nda açığa çıkan foton sayısı (N) aşağıdaki diferansiyel denklemle belirlenir:

$$\frac{d^2N}{dx d\lambda} = \frac{2\pi z^2 \alpha}{\lambda^2} \left(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2} \right)$$

$\alpha = 1/137$	<i>İnce yapı sabiti</i>
$\beta = v/c$	<i>Parçacığın hızı</i>
z	<i>Parçacığın yükü (± 1)</i>
λ	<i>Dalgaboyu</i>
n	<i>Ortamin kırılma indisi</i>

Birim uzunlukta yayılan foton sayısı:

$$\frac{dN}{dx} = 2\pi\alpha \int_{\beta n > 1} \frac{d\lambda}{\lambda^2} \left(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2} \right)$$

Kırılma indisi çok değişmiyorsa:

$$\frac{dN}{dx} = 2\pi\alpha \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{d\lambda}{\lambda^2} \left(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2} \right) \approx 2\pi\alpha \left(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2} \right) \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right)$$

Örnek

Su içinde $p = 1 \text{ GeV}/c$ momentumlu bir elektronun görünür bölgede yayacağı foton sayısını bulun.

Elektron için $\beta \approx 1$ ve suyun kırılma indisi $n = 1.333$ (değişmediğini varsayalım).

Görünür bölge dalgaboyu aralığı $[400 \text{ nm}, 700 \text{ nm}] \text{ nm}$ olsun.

$$\frac{dN}{dx} = 0.0459 \left(1 - \frac{1}{1.333^2} \right) \left(\frac{1}{400 \times 10^{-9}} - \frac{1}{700 \times 10^{-9}} \right) = 21484 \frac{\text{foton}}{\text{m}} = \mathbf{214.84 \frac{\text{foton}}{\text{cm}}}$$

Not: Kırılma indisinin değişimi de (dispersion) dikkate alınır, aşağıdaki sonuçlar elde edilir.

Parçacık	Momentum	dN/dx
<u>Adı</u>	<u>(GeV/c)</u>	<u>(foton/cm)</u>
Elektron	1.0	215.3
Muon	1.0	212.2
Pion	1.0	209.9
Proton	1.0	0.0

Dalgaboyu Dağılımı

Geant4 algıç benzetimi programında:

The number of photons generated per track length is:

$$\frac{dN}{dx} \approx 370z^2 \int_{\epsilon_{min}}^{\epsilon_{max}} d\epsilon \left(1 - \frac{1}{n^2 \beta^2} \right) = 370z^2 \left[\epsilon_{max} - \epsilon_{min} - \frac{1}{\beta^2} \int_{\epsilon_{min}}^{\epsilon_{max}} \frac{d\epsilon}{n^2(\epsilon)} \right]$$

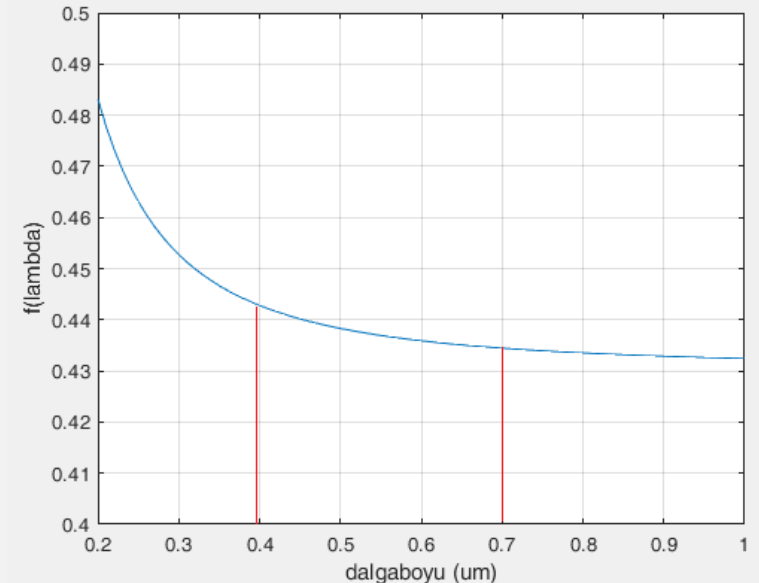
The number of photons produced is calculated from a Poisson distribution with a mean of $\langle n \rangle = \text{StepLength } dN/dx$.
The energy distribution of the photon is then sampled from the density function:

$$f(\epsilon) = \left[1 - \frac{1}{n^2(\epsilon) \beta^2} \right]$$

or

$$f(\lambda) = \left[1 - \frac{1}{n(\lambda)^2 \beta^2} \right]$$

Su için: $n(\lambda) = 0.937 \sqrt{1 + \frac{9.311 \lambda^2}{9.311 \lambda^2 - 0.06303}}$



Ceren

MATLAB programlama dili ile geliştirilmiş Cherenkov Işınımı'da oluşan fotonları üreten bir benzetim programdır.

Program linki: <http://www1.gantep.edu.tr/~bingul/zemax/src/ceren.m>

Program Girdileri:

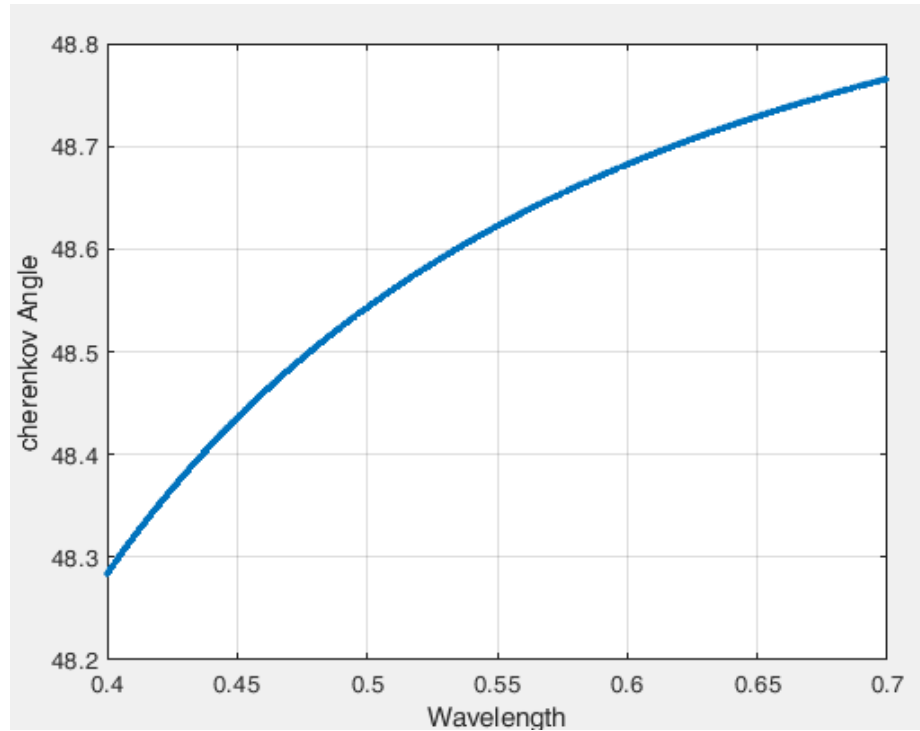
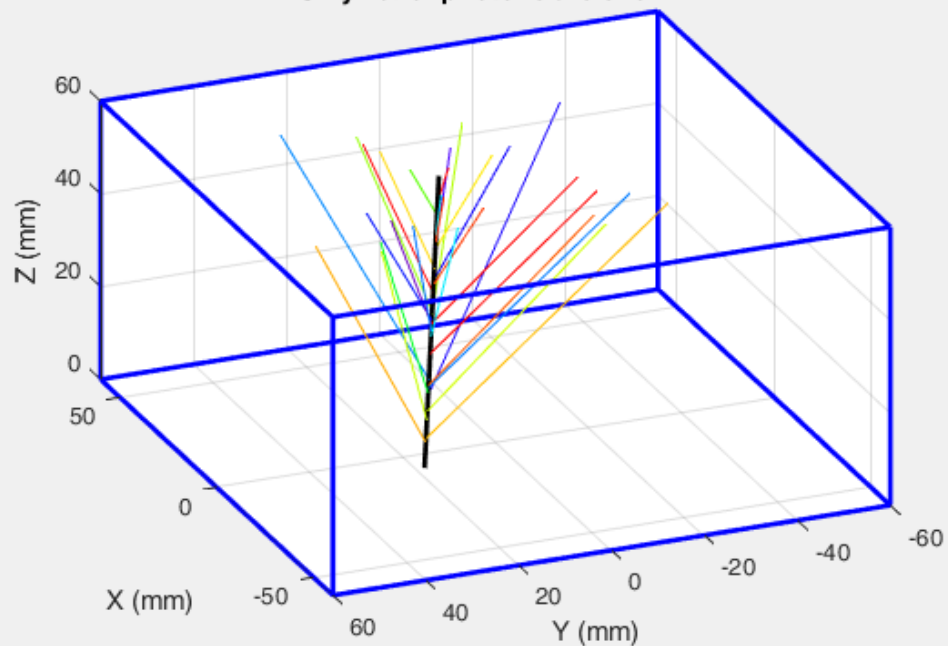
- Parçacık bilgisi (p , m , x , y , z , θ , φ)
- Malzeme (ortamın adı, 3B geometrisi)

Program Çıktıları:

- Rapor
- Çizimler
- Histogramlar
- Kaynak Dosyası (Fotonların sayısı, konumu, yönü ve dalgaboyu).

Bu dosya **Zemax OpticStudio** programında kullanılabile *source file* biçimindedir.

Only 2% of photons are shown.

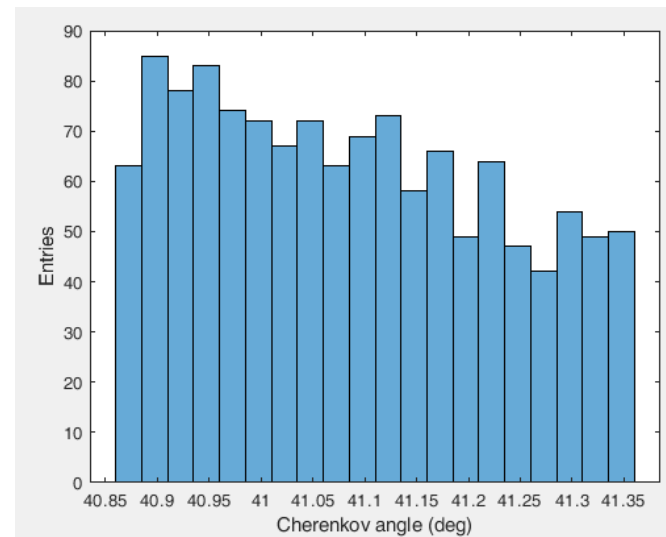
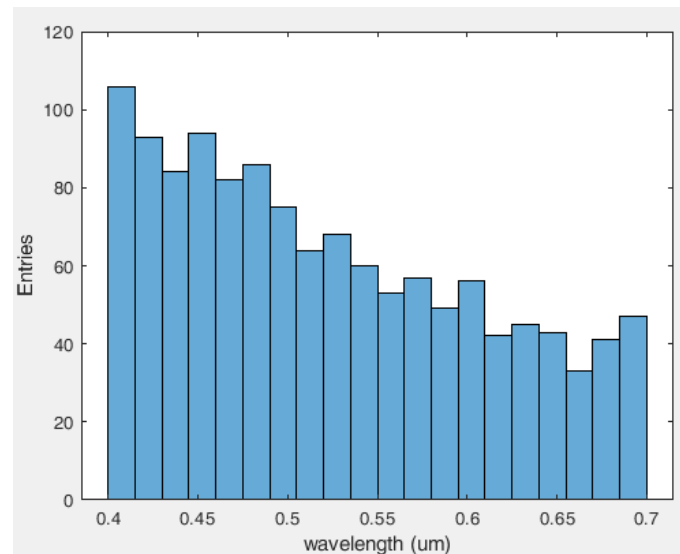


Final Report:

Particle Momentum : 1.000000 GeV
Particle Mass : 0.105658 GeV
Particle Energy : 1.005566 GeV
Particle Beta ($=v/c$) : 0.994464

Radiator material : WATER (H2O)
TOTL in radiator : 60.487728 mm

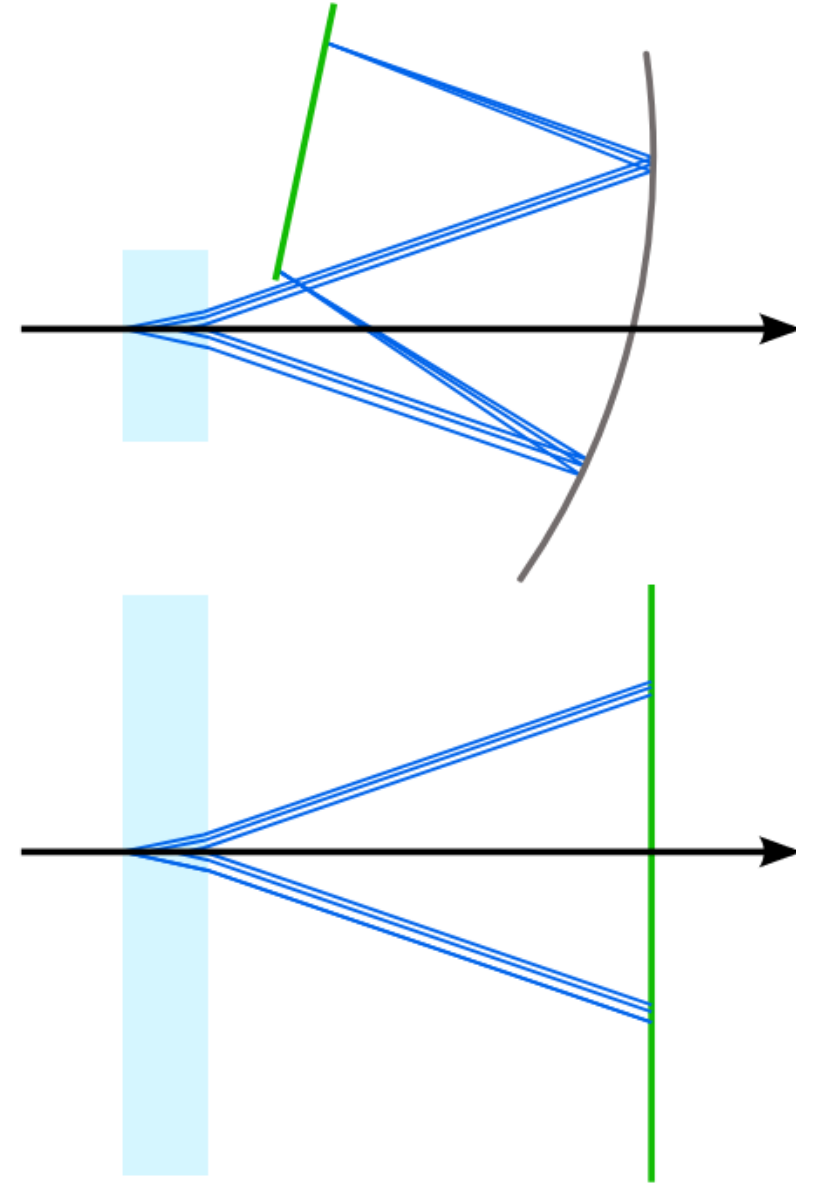
Wavelength range : [0.40, 0.70] μm
of photons/mm : 21.220706
Total # of photons : 1278
Output source filename : cherenkov.dat



RICH Tasarımları

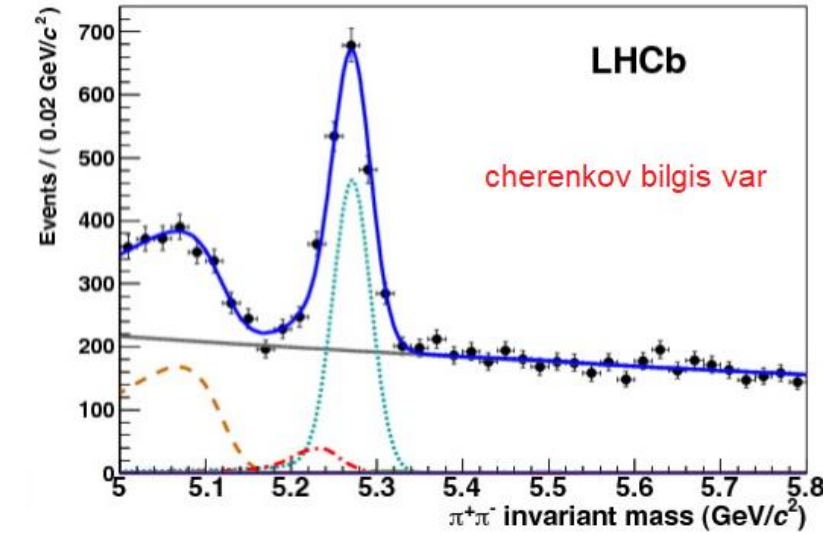
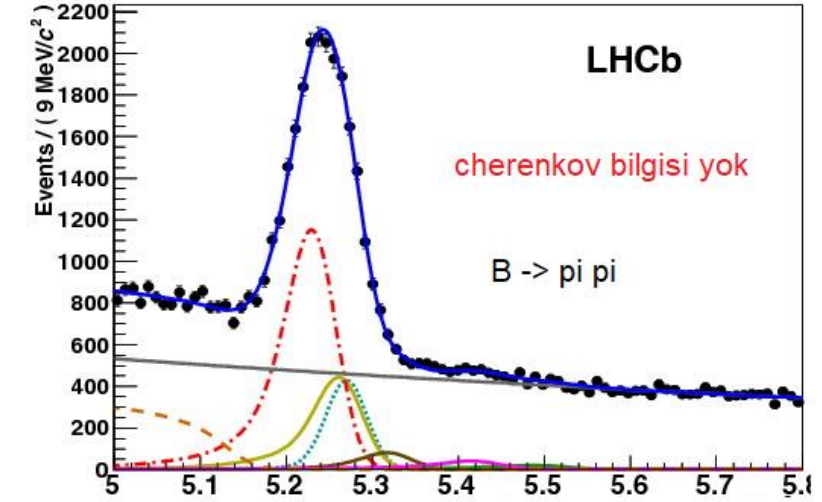
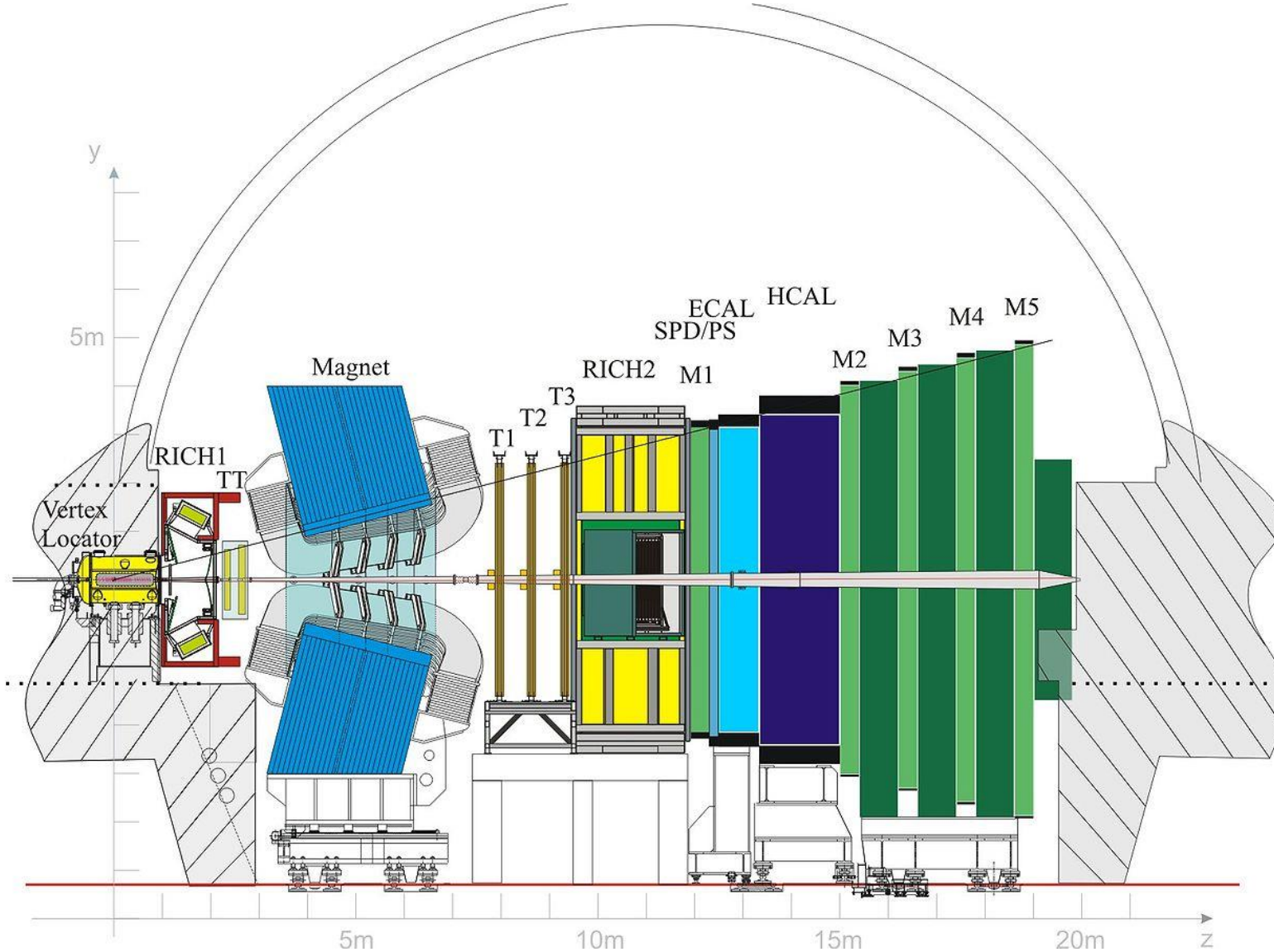
Odaklanan bir RICH detektörde, fotonlar odak uzaklığı f olan küresel bir ayna tarafından toplanır ve odak düzlemine yerleştirilen foton detektörüne odaklanır. LHCb'de kullanılmaktadır.

Daha küçük hacimli **proximity-focusing** tasarımında, parçacık küçük bir optik ortamda ilerlerken yayılan fotonlar doğrudan foton detektörü üzerinde gözlenir.



RICH Tasarımları

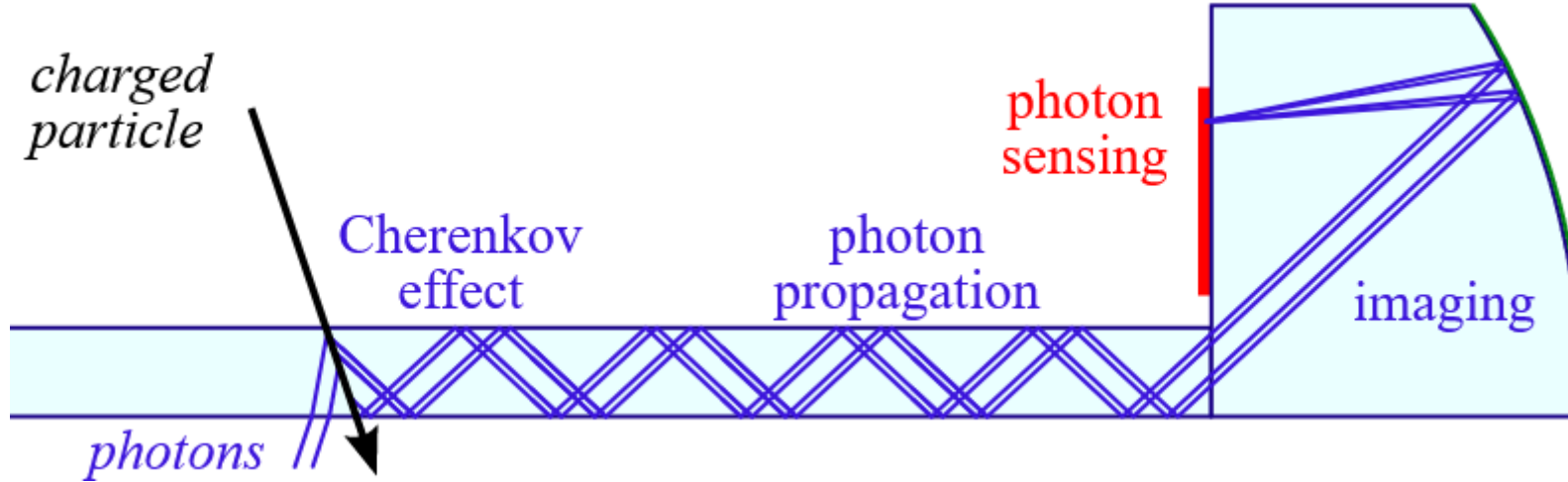
LHCb deneyinde, pionları ve kaonları ayırmak için iki tane RICH kullanılmaktadır.



RICH Tasarımları

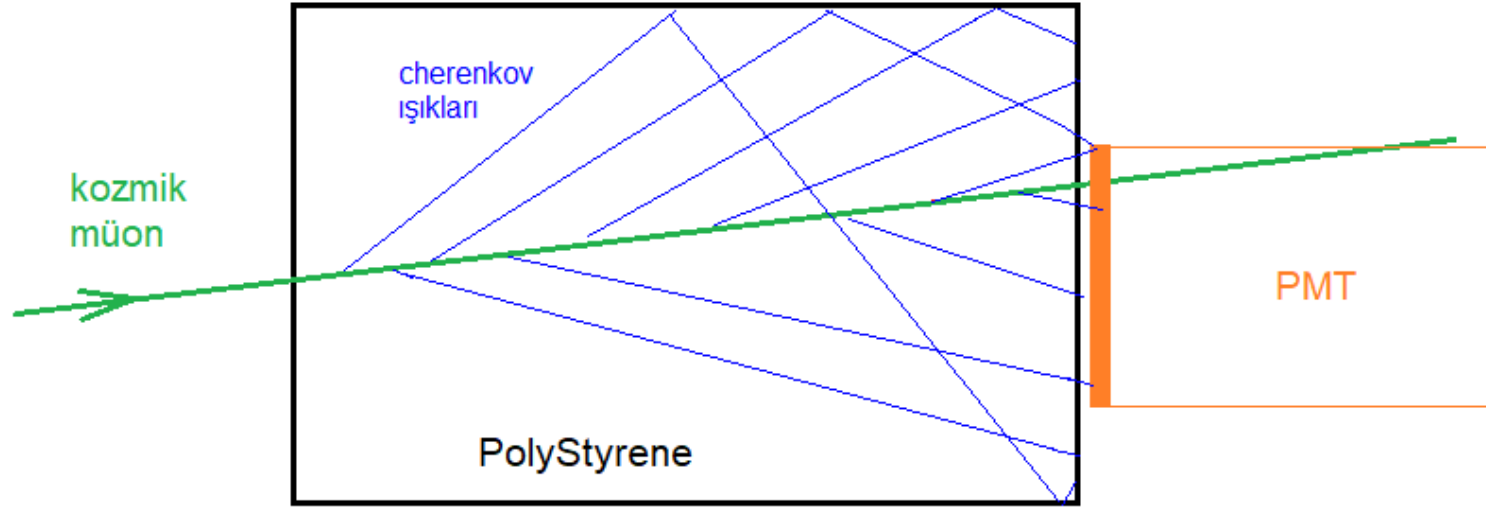
DIRC (Detection of Internally Reflected Cherenkov light)

Parçacık silindirik bir ortamdan algıca girer. Fotonlar toplam iç yansıma ilkesine göre foto sensörüne kadar ulaşır. Fotonların odaklandığı konumdan Cherenkov açısı ölçülmüş olur.

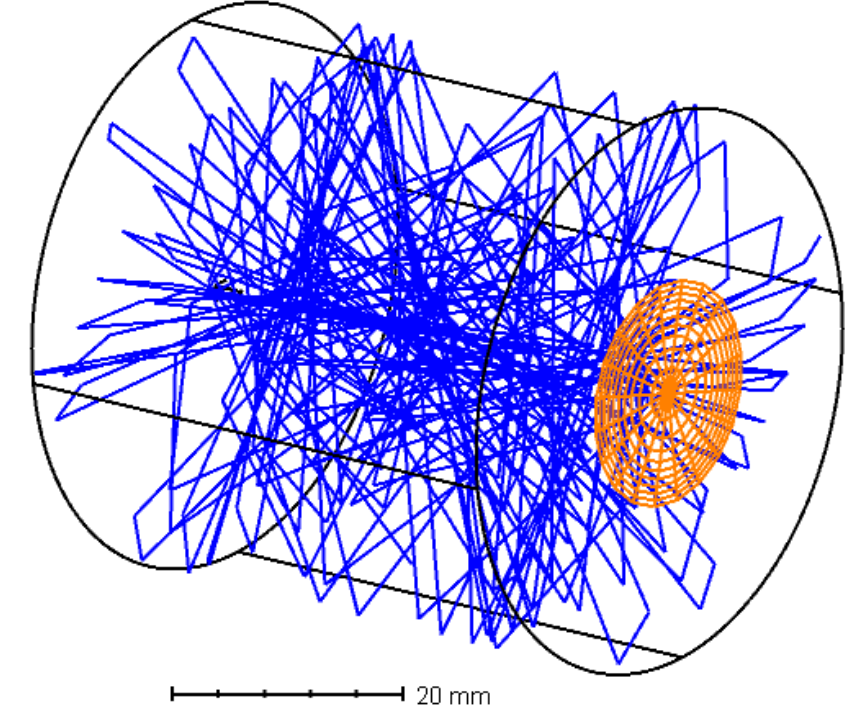


Yapacağımız Deneyin Tasarımı

Deneyin basit şeması



Zemax'de ışın izleme (ray tracing)



Kaynaklar

- [1]. <https://pdg.lbl.gov/2021/reviews/rpp2020-rev-passage-particles-matter.pdf> (2019)
- [2]. https://en.wikipedia.org/wiki/Cherenkov_radiation
- [3]. M. F. L'Annunziata, *Handbook of Radioactivity Analysis 2nd Ed*, ScienceDirect (2023)
- [4]. W.R. Leo, *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments 2nd Ed*, Springer (1994)