

Large Hadron Collider -Nəhəng Hadron Kollayderi.(10 points)

Please read the general instructions in the separate envelope before you start this problem.

Bu məsələni yerinə yetirməyə başlamadan sizə təqdim olunan ayrıca zərfdəki "Ümumi Gösrəişlərlə" tanış olun.

In this task, the physics of the particle accelerator LHC (Large Hadron Collider) at CERN is discussed. CERN is the world's largest particle physics laboratory. Its main goal is to get insight into the fundamental laws of nature. Two beams of particles are accelerated to high energies, guided around the accelerator ring by a strong magnetic field and then made to collide with each other. The protons are not spread uniformly around the circumference of the accelerator, but they are clustered in so-called bunches. The resulting particles generated by collisions are observed with large detectors. Some parameters of the LHC can be found in table 1.

Bu tapşırıqda CERN-dəki LHC(Nəhəng Hadron Kollayderi) zərrəcik sürətləndiricisinin fizikası müzakirə olunacaq. CERN dünyanın ən böyük elementar zərrəciklər fizikası laboratoriyasıdır. Əsas məqsəd fizikanın fundamental qanunlarının öyrənilməsidir. Güclü maqnit sahəsi tərəfindən sürətləndirilən, dairəvi trayektoriyada qarşı qarşıya hərəkət etdirilən iki zərrəciklər seli (protonlar şüası) çox böyük enerjiyə malik olduğundan sonra toqquşdurulurlar. Selin içərisində protonlar bütün çevrə boyunca bərabər paylanmırlar. Ayrı ayrı dəstə adlanan qruplar şəklində olurlar. Toqquşma nəticəsində meydana çıxan zərrəciklər böyük dedektorların köməyi ilə müşahidə edilir. LHC-in bəzi parametrləri aşağıdakı cədvəldə verilib.

LHC ring-LHC halqası.	
Circumference of ring Dairənin uzunluğu-	26659 m
Number of bunches per proton beam- Bir proton şüasındakı dəstələrinin sayı-	2808
Number of protons per bunch- Bir dəstədəki protonların sayı-	1.15×10^{11}
Proton beams-Proton dəstələri	
Energy of protons- Protonların enerjisi-	7.00 TeV
Centre of mass energy	14.0 TeV

Table 1: Typical numerical values of relevant LHC parameters.

Cədvəl-1: LHC nin parametrlərinin ədədi qiymətləri

Particle physicists use convenient units for the energy, momentum and mass: The energy is measured in electron volts [eV]. By definition, 1 eV is the amount of energy gained by a particle with elementary charge, e , moved through a potential difference of one volt ($1 \text{ eV} = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ kg m}^2\text{s}^{-2}$).

The momentum is measured in units of eV/c and the mass in units of eV/c^2 , where c is the speed of light in vacuum. Since 1 eV is a very small quantity of energy, particle physicists often use MeV ($1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$), GeV ($1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$) or TeV ($1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$).

Part A deals with the acceleration of protons or electrons. Part B is concerned with the identification of particles produced in the collisions at CERN.

Elementar zərrəciklər fizikasında enerji, impuls və kütlə üçün aşağıdakı vahidlərdən istifadə edilir. Enerji elektron-voltla (eV) ilə ölçülür. 1 eV elementar e yükünə malik zərrəciyin 1 V potensiallar fərqi olan iki nöqtə arasında elektrik sahəsi tərəfindən sürətləndirildikdə qazandığı kinetik enerjidir. ($1 \text{ eV} = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ kg m}^2\text{s}^{-2}$)

İmpuls eV/c , kütlə eV/c^2 vahidi ilə ölçülür. c işığın vakuumdakı sürətidir. 1eV çox kiçik kəmiyyət

olduğundan çox vaxt MeV ($1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$), GeV ($1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$) yaxud TeV ($1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$) istifadə olunur. 1-ci hissədə protonların və elektronların təcilləndirilməsi məsələsi ilə məşğul olacaqsınız. B hissəsində CERN-dəki toqquşmalar zamanı meydana çıxan zərrəciklərin tanınması (identifikasiyası) ilə məşğul olacaqsınız.

Part A. LHC accelerator -A hissəsi. LHC sürətləndiricisi.(6 points)

Acceleration-Təcil:

Assume that the protons have been accelerated by a voltage V such that their velocity is very close to the speed of light and neglect any energy loss due to radiation or collisions with other particles.

Qəbul edin ki, protonlar V potensialı hesabına işıq sürətinə yaxın sürətlərə qədər sürətləndirilir. Bu zaman protonların şüalandırması və digər zərrəciklərlə toqquşması nəticəsində itirilən enerjilər və digər qarşılıqlı təsirlər nəzər alınmır.

- A.1** Find the exact expression for the final velocity v of the protons as a function of the accelerating voltage V , and physical constants. 0.7pt
Protonun son v sürətinin dəqiq ifadəsini, V -sürətləndirici potensialı və fundamental sabitlərlə ifadə edin.

A design for a future experiment at CERN plans to use the protons from the LHC and to collide them with electrons which have an energy of 60.0 GeV.

Gələcəkdəki təcrübələrdə LHC-də sürətləndirilmiş protonların, enerjisi 60 GeV olan elektronlarla toqquşdurulması nəzərdə tutulur.

- A.2** For particles with high energy and low mass the relative deviation $\Delta = (c - v)/c$ of the final velocity v from the speed of light is very small. Find a first order approximation for Δ and calculate Δ for electrons with an energy of 60.0 GeV using the accelerating voltage V and physical constants. 0.8pt
Kiçik sükunət kütləsinə, çox böyük enerjiyə malik zərrəciklərin son sürəti v -nin, işıq sürəti c -dən $\Delta = (c - v)/c$ - nisbi kənarçıxması çox kiçikdir. Δ -i hesablamak üçün təqribi ifadəni əldə edin və enerjisi 60 GeV olan elektronlar üçün Δ -ni hesablayın.

We now return to the protons in the LHC. Assume that the beam pipe has a circular shape.

Yenidən LHC-dəki protonlara nəzər yetirək. Qəbul edin ki, protonlar dəstəsi hərəkət edən boru, dairəvi formadadır.

- A.3** Derive an expression for the uniform magnetic flux density B necessary to keep the proton beam on a circular track. The expression should only contain the energy of the protons E , the circumference L , fundamental constants and numbers. You may use suitable approximations if their effect is smaller than precision given by the least number of significant digits. 1.0pt
- Calculate the magnetic flux density B for a proton energy of $E = 7.00$ TeV, neglecting interactions between the protons.
- Protonları dairəvi trayektoriyada hərəkət etdirmək üçün lazım olan B bircins maqnit sahəsinin induksiyasının ifadəsini tapın. İfadəyə yalnız protonların E enerjisi, hərəkət çevrəsinin L uzunluğu və fundamental sabitlər və ədədlər daxil olmalıdır. Nəticənin tələb olunan dəqiqliyində vacib olan sonuncu rəqəmini dəyişdirməyən təsirləri nəzərə almayan yaxınlaşmalardan istifadə edə bilərsiniz.**
- Protonlar arasındakı qarşılıqlı təsiri nəzərə almayaraq enerjisi 7.00 TeV olan proton üçün B nin qiymətini hesablayın.**

Radiated Power-Şüalanma gücü:

An accelerated charged particle radiates energy in the form of electromagnetic waves. The radiated power P_{rad} of a charged particle that circulates with a constant angular velocity depends only on its acceleration a , its charge q , the speed of light c and the permittivity of free space ϵ_0 .

Təcilləndirən zərrəcik elektromaqnit dalğa şüalandırır. Dairəvi trayektoriyada sabit bucaq sürəti ilə fırlanan yüklü zərrəciyin P_{rad} şüalanmasının gücü, onun a təcildən, q yükündən, c -ışığı sürətindən və ϵ_0 -vakuunun dielektrik nüfuzluğundan asılıdır.

- A.4** Use dimensional analysis to find an expression for the radiated power P_{rad} . 1.0pt
- Vahidlərin müqəsiyəli analizi üsulu ilə P_{rad} -in ifadəsini müəyyənləşdirin.**

The real formula for the radiated power contains a factor $1/(6\pi)$; moreover, a full relativistic derivation gives an additional multiplicative factor γ^4 , with $\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-\frac{1}{2}}$.

Şüalanma gücünün həqiqi ifadəsinə $1/(6\pi)$ əmsalı da daxil olur. Relyativistik effektləri də nəzərə alıqda əlavə γ^4 vuruğu meydana çıxır. Hansı ki $\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-\frac{1}{2}}$.

- A.5** Calculate P_{tot} , the total radiated power of the LHC, for a proton energy of $E = 7.00$ TeV (Note table 1). You may use suitable approximations. 1.0pt
- Hər birinin Enerjisi $E = 7.00$ TeV olan protonlardan ibarət sellərin LHC dəki ümümi şüalanma gücünü hesablayın (1 cədvəldən istifadə edin). Hesablama zamanı uyğun yaxınlaşmalardan istifadə edə bilərsiniz.**

Linear Acceleration-Xətti təcilləndirici:

At CERN, protons at rest are accelerated by a linear accelerator of length $d = 30.0$ m through a potential difference of $V = 500$ MV. Assume that the electrical field is homogeneous. A linear accelerator consists of two plates as sketched in Figure 1.

LHC də başlanğıcda sükunətdə olan protonlar əvvəlcə düz $d=30.0$ m uzunluğunda xətti sürətləndiricidə sürətləndirilirlər. Qəbul edin ki, elektrik sahəsi sabitdir və sürətləndirici potensial fərqi

$V=500$ MVolt-a bərabərdir. Xətti sürətləndirici Şəkil-3 də göstərildiyi kimi iki paralel müstəvidən ibarətdir.

- A.6 Determine the time T that the protons take to pass through this field. 1.5pt
Protonların bu sürətləndirici elektrostatik sahəni keçməsi üçün lazım olan T zamanını hesablayın.

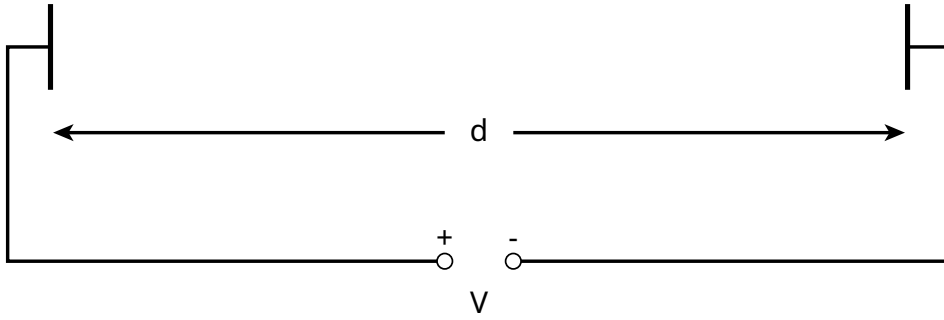


Figure 1: Sketch of an accelerator module.
Şəkil-1. Sürətləndirici qurğunun sxemi.

Part B. Particle Identification -Zərrəciklərin müəyyənəşdirilməsi (identifikasiyası)(4 points)

Time of flight-Uçma zamanı:

It is important to identify the high energy particles that are generated in the collision in order to interpret the interaction process. A simple method is to measure the time (t) that a particle with known momentum needs to pass a length l in a so-called Time-of-Flight (ToF) detector. Typical particles which are identified in the detector, together with their masses, are listed in table 2.

Toqquşmalardan alınan yüksək enerjili zərrəcikləri tanımaq üçün qarşılıqlı təsirin təbiətini müəyyənəşdirmək lazımdır. Ən sadə metodlardan biri impulsu məlum olan zərrəciyin detektorda l məsafəsini qət etmə zamanı t -nin ölçülməsidir. Bu metod Uçma Zamanı (ToF) Metodu adlanır. Cədvəl 2-də tanınan bəzi zərrəciklərin adı və kütləsi verilmişdir.

Particle	Mass [MeV/c ²]
Deuteron	1876
Proton	938
charged Kaon	494
charged Pion	140
Electron	0.511

Table 2: Particles and their masses.-

Cədvəl-2: Zərrəciklər və kütlələri

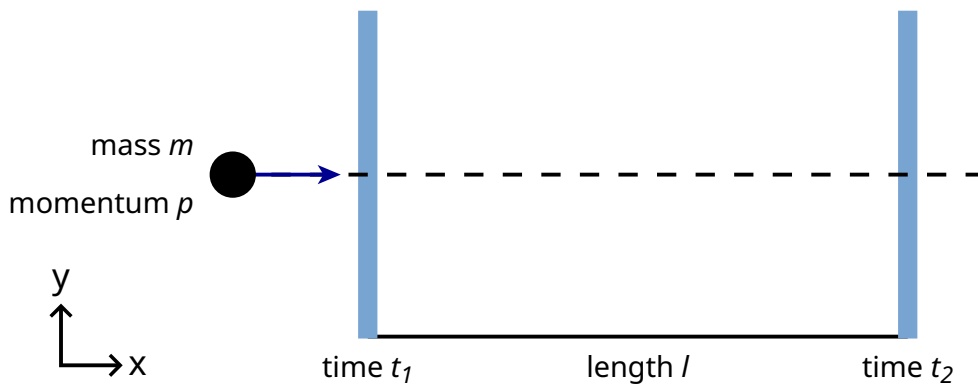


Figure 2: Schematic view of a time-of-flight detector.

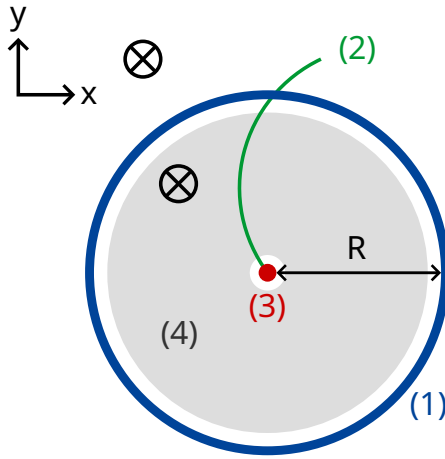
Şəkil-2: ToF-un sxematik şəkli

B.1 Express the particle mass m in terms of the momentum p , the flight length l and the flight time t , assuming that particles have elementary charge e and travel with velocity close to c on straight tracks in the ToF detector and that they travel perpendicular to the two detection planes (see figure 2). 0.8pt
Bu detektorun müstəvilərinə perpendikulyar sürətlə düz xətt boyunca hərəkət edən impulsu p , uçuş zamanı (lövhələrin arasında keçirdiyi vaxt) t , uçuş məsafəsi- l və yükü e olan zərrəciyin sükunət kütləsinin ifadəsini tapın.(Şəkil-2-yə baxın)

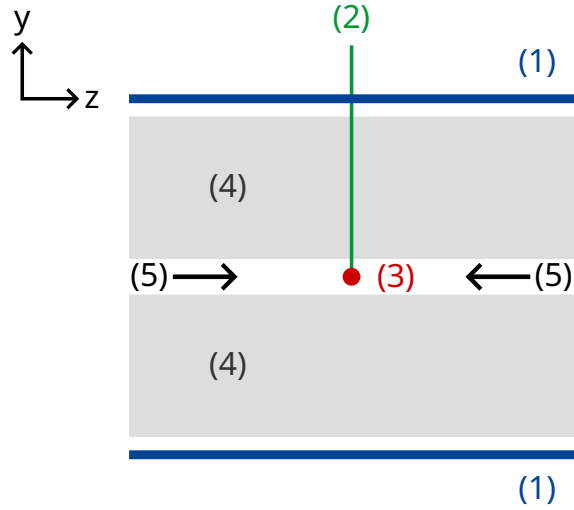
B.2 Calculate the minimal length l of a ToF detector that allows to safely distinguish a charged kaon from a charged pion, given both their momenta are measured to be $1.00 \text{ GeV}/c$. For a good separation it is required that the difference in the time-of-flight is larger than three times the time resolution of the detector. The typical resolution of a ToF detector is 150 ps ($1 \text{ ps} = 10^{-12} \text{ s}$). 0.7pt
İmpulsları eyni 1.00 GeV olan yüklü kaon və yüklü pionu əminliklə fərqləndirməyə imkan verən detektorun lövhələri arasındakı minimal l məsafəsinin qiymətini hesablayın. Fərqləndirmənin əminliyi o zaman gerçəkləşir ki, zərrəciklərin uçuş zamanlarının fərqi detektorun ayırdetmə zamanından 3 dəfə böyük olsun. ToF dedektorunun ayırdetmə zamanı 150 ps ($1 \text{ ps} = 10^{-12} \text{ s}$)-dir.

In the following, particles produced in a typical LHC detector are identified in a two stage detector consisting of a tracking detector and a ToF detector. Figure 3 shows the setup in the plane transverse and longitudinal to the proton beams. Both detectors are tubes surrounding the interaction region with the beam passing in the middle of the tubes. The tracking detector measures the trajectory of a charged particle which passes through a magnetic field whose direction is parallel to the proton beams. The radius r of the trajectory allows one to determine the transverse momentum p_T of the particle. Since the collision time is known the ToF detector only needs one tube to measure the flight time (time between the collision and the detection in the ToF tube). This ToF tube is situated just outside the tracking chamber. For this task you may assume that all particles created by the collision travel perpendicular to the proton beams, which means that the created particles have no momentum along the direction of the proton beams.

Sonrakı mərhələlərdə LHC də alınan zərrəciklər iz düşmə detektorunda və ToF detektorlarında izlənilir. Şəkil-3 detektorların proton dəstələrinin hərəkət istiqamətinə perpendikulyar və hərəkət istiqamətindəki kəsikləri verilmişdir. Hər iki dedektor boru şəklindədir. İz düşmə dedektoru protonların hərəkət istiqamətinə paralel olan maqnit sahəsindən keçən zərrəciklərin trayektoriyasını göstərir. Trayektoriyanın r radiusu bilindikdə zərrəciklərin eninə p_T impulslarını təyin etmək olar. Toqquşma zamanı məlum olduğuna görə, toqquşmadan əmələ gələn zərrəciklərin ToF borusuna çatana qədər keçən zamanı (uçuş zamanını) tapmaq tələb olunur. Bu uçuş zamanını təyin edən ToF borusu (1) iz düşən dedektorun (4) həməm arxasında yerləşir. Bu məsələdə qəbul etmək olar ki, toqquşmadan meydana çıxan bütün zərrəciklər proton şüasına perpendikulyar, yəni xy müstəvisində hərəkət edir. Bu o deməkdir ki, meydana çıxan zərrəciklər uzununa, yəni z istiqamətində impulsa malik deyil.



transverse plane-



cross section of the
longitudinal view at the center-
of the tube along the beamline

- (1) - ToF tube-**ToF borusu.**
(2) - track-**zərrəciyin izi**
(3) - collision point-**toqquşma nöqtəsi**
(4) - tracking tube-**iz düşən borusu (dedektoru)**
(5) - proton beams-**proton şüası**
⊗ - magnetic field-**maqnit sahəsi**

Figure 3 : Experimental setup for particle identification with a tracking chamber and a ToF detector. Both detectors are tubes surrounding the collision point in the middle. Left : transverse view perpendicular to the beamline. Right : longitudinal view parallel to the beam line. The particle is travelling perpendicular to the beam line.

Şəkil-3: İzləmə kamerası və ToF dedektoru vasitəsi ilə zərrəciyin tanınması üçün təcrübə qurğu. Dedektor mərkəzdə olan toqquşma nöqtəsini əhatə edən boru şəklindədir. Sol: Şüanın istiqamətinə perpendikulyar görünüş. Sağ: Şüa xəttinə paralel görünüş. Toqquşmadan əmələ gələn zərrəciklər Proton selinə perpendikulyar hərəkət edir.

- B.3** Express the particle mass in terms of the magnetic flux density B , the radius R of the ToF tube, fundamental constants and the measured quantities: radius r of the track and time-of-flight t . 1.7pt
Toqquşmadan əmələ gələn zərrəciyin kütləsinin ifadəsini onun ToF borunun divarına (1) çatma zamanı- t , trayektoriyasının radiusu r , ToF borusunun radiusu R , maqnit sahəsinin induksiyası B və fundamental sabitlərlə əldə edin.

We detected four particles and want to identify them. The magnetic flux density in the tracking detector was $B = 0.500$ T. The radius R of the ToF tube was 3.70 m. Here are the measurements ($1 \text{ ns} = 10^{-9} \text{ s}$):

Siz 4 zərrəcik müşahidə elədiniz və bunları tanımaq lazımdır. İz düşən detektorda $B=0.500$ T -dir. ToF borusunun radiusu $R=3.70$ m-dir. Aşağıdakı cədvəldə hər bir zərrəcik üçün ölçmələrin nəticələri

verilib. $1 \text{ ns} = 10^{-9} \text{ s}$

Particle- Zərrəcik	Radius of the trajectory- trayektoriyanın radiusu r [m]	Time of flight- uçma zamanı t [ns]
A	5.10	20
B	2.94	14
C	6.06	18
D	2.31	25

B.4 Identify the four particles by calculating their mass. 0.8pt
Zərrəciklərin kütləsinə görə hansı zərrəcik olduğunu müəyyən edin(taniyin).