

Large Hadron Collider (10 poäng)

Läs anvisningarna i det separata kuvertet innan du börjar.

I denna uppgift kommer fysiken i partikelacceleratoren LHC (Large Hadron Collider) vid CERN att diskuteras. Den är för närvarande världens största anläggning för partikelfysik. Målet är att få ökad kunskap om naturens fundamentala egenskaper.

Två protonstrålar, motsatt riktade, accelereras till hög energi. Med hjälp av starka magnetfält fås partiklarna att röra sig i en cirkulär bana för att sedan kollidera med varandra. Partiklarna är inte jämnt fördelade längs röret, utan kommer samlade i s.k. paket. De partiklar som bildas vid kollisionerna studeras med stora detektorer. Några av LHC:s parametrar finns i tabell 1.

LHC-ringen	
Ringens omkrets	26659 m
Antal paket per protonstråle	2808
Antal protoner per paket	$1,15 \times 10^{11}$
Protonstrålar	
Protonenergi	7,00 TeV
Energi i tyngdpunktssystemet	14,0 TeV

Tabell 1: Numeriska värden på några relevanta LHC-parametrar.

Partikelfysiker använder praktiska enheter för energi och rörelsemängd: Energi mäts i elektronvolt [eV]. Per definition är 1 eV den energi en partikel med elementarladdningen får/förlorar, när den rör sig genom en potentialskillnad på en volt ($1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ kg m}^2/\text{s}^2$).

Rörelsemängd mäts i enheter av eV/c och massa i enheter av eV/c^2 , där c är ljusfarten i vakuum. Eftersom 1 eV är en mycket liten enhet använder partikelfysiker ofta MeV ($1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$), GeV ($1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$) eller TeV ($1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$).

Del A handlar om acceleration av protoner eller elektroner. Del B handlar om att identifiera de partiklar som bildas vid kollisionerna.

Del A. LHC-acceleratorn (6 poäng)

Acceleration

Anta att protonerna accelererats av en spänning V till nära ljusfarten och försumma energiförluster på grund av strålningsförluster och/eller kollisioner med andra partiklar.

A.1	Ange det exakta uttrycket för protonernas sluthastighet v som funktion av accelerationsspänningen V , och fysikaliska konstanter.	0.7pt
------------	---	-------

I ett framtida experiment planerar CERN att använda protoner från LHC och låta dessa kollidera med elektroner som har en energi av 60,0 GeV.

- A.2** För partiklar med hög energi och liten massa blir den relativa avvikelsen $\Delta = (c - v)/c$ mellan sluthastigheten v och ljusfarten mycket liten. Ange en första ordningens approximation för Δ och beräkna sedan Δ för elektroner med en energi på 60,0 GeV uttryckt i accelerationsspänningen V och fysikaliska konstanter. 0.8pt

Vi återvänder till protonerna i LHC. Antag att strålröret har cirkulärt tvärsnitt.

- A.3** Härled ett uttryck för den magnetiska flödestäten B för att protonerna ska hålla sig i sin cirkelbana. Uttrycket ska endast innehålla protonenergin E , omkretsen L , fundamentala konstanter och tal. Du får göra lämpliga approximationer om deras inverkan är mindre än den minst signifikanta siffran i värdet. Beräkna den magnetiska flödestätheten B som krävs för en proton med energin $E = 7,00$ TeV. Bortse från växelverkan mellan protonerna. 1.0pt

Utstrålad effekt:

En accelererad laddad partikel strålar ut energi i form av elektromagnetisk strålning. Den utstrålade effekten P_{rad} från en laddad partikel som cirkulerar med en konstant vinkelhastighet beror bara på dess acceleration a , dess laddning q , ljusfarten c och permittiviteten i vakuum ϵ_0 .

- A.4** Använd dimensionsanalys för att ta fram ett uttryck för den utstrålade effekten P_{rad} . 1.0pt

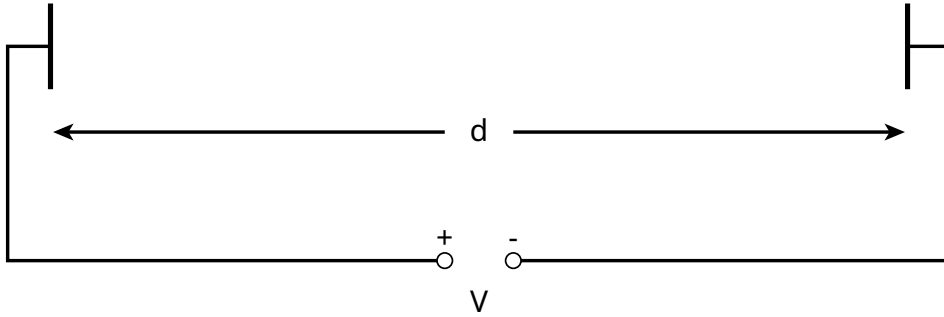
Den korrekta formeln för den utstrålade effekten innehåller faktorn $1/(6\pi)$; dessutom ger en relativistisk beräkning också en multiplikativ faktor γ^4 , där $\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-\frac{1}{2}}$.

- A.5** Beräkna den totala utstrålade effekten P_{tot} från LHC för en proton med energin $E = 7,00$ TeV (se tabell 1). Du får göra lämpliga approximationer. 1.0pt

Linjär acceleration:

Vid CERN accelereras protoner från vila i en linjäraccelerator som har längden $d = 30,0$ m med hjälp av en spänning på $V = 500$ MV. Antag att det elektriska fältet är homogent. En linjär accelerator består av två plattor (se figur 1).

A.6 Beräkna tiden T det tar för en proton att röra sig genom det elektriska fältet. 1.5pt



Figur 1: Skiss av en acceleratormodul.

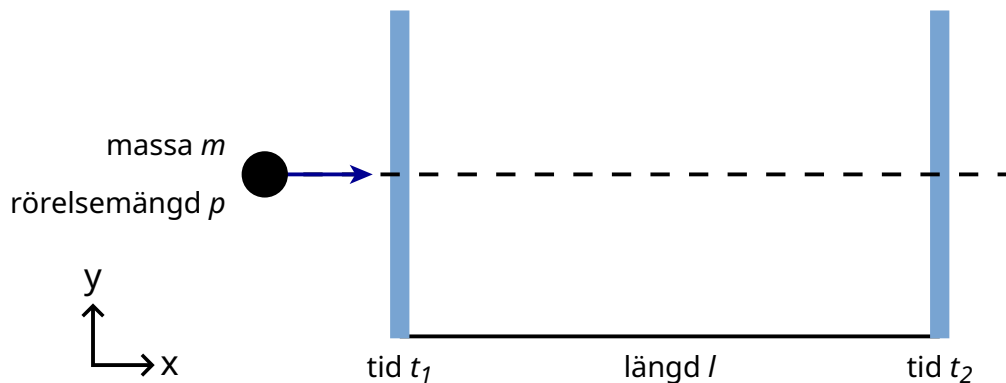
Del B. Identifikation av partiklar (4 poäng)

Time of flight:

För att kunna förstå processerna när partiklar kolliderar vid höga energier måste de kunna identifieras. En enkel metod går ut på att mäta tiden (t) det tar för en partikel med känd rörelsemängd att röra sig en sträcka l , i en s.k. time-of-flight (ToF) detektor. Några av de partiklar som identifierats i detektorn, och deras massor, listas i tabell 2.

Partikel	Massa [MeV/c^2]
Deutron	1876
Proton	938
Laddad kaon	498
Laddad pion	140
Elektron	0,511

Tabell 2: Partiklar och deras massor.

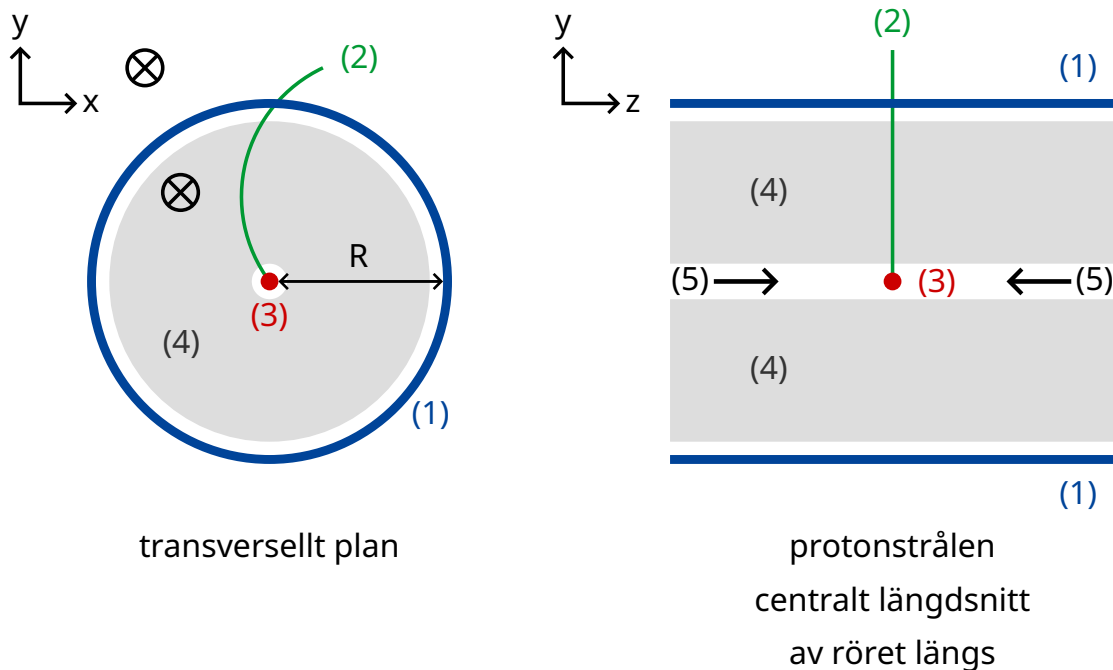


Figur 2: Schematisk vy av ToF-detektor.

- B.1** Uttryck partikelmassan m i termer av rörelsemängden p , sträckan l och ToF-tiden t , under antagandet att partiklarna har elementarladdningen e och att de rör sig med en fart nära c , längs en rät linje mellan detektorns två detektionsplan, vinkelrätt mot dem (se figur 2). 0.8pt

- B.2** Beräkna den minsta längden l av en ToF-detektor som säkert kan skilja en laddad kaon från en laddad pion, givet att båda har samma rörelsemängd $1.00 \text{ GeV}/c$. Det krävs då att skillnaden i ToF-tid är större än tre gånger detektorns tidsupplösning. En typisk ToF-detektor har en upplösning på 150 ps ($1 \text{ ps} = 10^{-12} \text{ s}$). 0.7pt

Partiklar i en typisk LHC-detektor identifieras i två steg, dels i en spårdetektor dels i en ToF-detektor. Figur 3 visar hur det ser ut både i ett transversellt plan och i ett longitudinellt plan relativt protonstrålen. Båda detektorerna består av rör som omger kollisionområdet, med protonstrålarna mitt i rören. Spår-detektorn mäter spår som uppstår när laddade partiklar rör sig i ett magnetfält som är parallellt med protonstrålen. Ur spårets radie r kan partikelns transversala rörelsemängd p_T bestämmas. Eftersom kollisionstiden är känd behöver ToF-detektorn enbart ett rör för att bestämma ToF-tiden, vilken mäts från kollisionspunkten. ToF-röret sitter direkt utanför spår-detektorn. Du får här anta att alla partiklar som bildas rör sig vinkelrätt mot protonstrålen, dvs. att de inte har någon rörelsemängd i protonstrålens riktning.



- (1) - ToF rör
- (2) - spår
- (3) - kollisionspunkt
- (4) - spår-detektor
- (5) - protonstråle
- ⊗ - magnetfält

Figur 3 : Uppställning med spår- respektive ToF-detektor för att kunna identifiera partiklar. Båda detektorernas rör omsluter kollisionspunkten som ligger i mitten. Vänster: transversell vy vinkelrätt mot protonstrålen. Höger: Longitudinell vy parallell med protonstrålen. Partikeln rör sig vinkelrätt mot protonstrålen.

B.3 Uttryck partikelns massa i termer av den magnetiska flödestätheten B , radien R på ToF-röret, fundamentala konstanter och uppmätta värden på radien r och ToF-tiden t . 1.7pt

Vi har detekterat fyra partiklar som vi önskar identifiera. Den magnetiska flödestätheten i spårdetektorn var $B = 0,500$ T. R på ToF-röret var $3,70$ m. Nedan följer mätningarna ($1 \text{ ns} = 10^{-9} \text{ s}$):

Partikel	Radien r [m] på spåret	Time of flight t [ns]
A	5,10	20
B	2,94	14
C	6,06	18
D	2,31	25

B.4 Identifiera de fyra partiklarna genom att beräkna deras respektive massor. 0.8pt