

Large Hadron Collider (10 point)

Læs venligst de generelle instruktioner fra den separate konvolut, før du starter på denne opgave.

Denne opgave handler om fysikken bag partikelacceleratorer LHC (Large Hadron Collider) ved CERN. CERN er det største partikelfysiklaboratorium i verden. Hovedformålet med CERN er at få indsigt i de grundlæggende naturlove. To stråler af partikler accelereres til høje energier og ledes rundt i en acceleratorring ved hjælp af kraftige magnetfelter, hvorefter de bringes til at kollideres med hinanden. Protonerne er ikke jævnt fordelt rundt i acceleratoren, men er samlet i bundter. De partikler, der dannes ved kollisionerne studeres ved hjælp af detektorer. Nogle værdier for LHC kan ses i tabel 1.

LHC ring	
Omkreds af ringen	26659 m
Antal protonbundter i hver stråle i ringen	2808
Antal protoner i hvert bundt	$1,15 \times 10^{11}$
Protonstrålerne	
Energi af protoner	7,00 TeV
Center-of-mass energi	14,0 TeV

Tabel 1: Typiske numeriske værdier for relevante LHC parametre.

Partikelfysikere benytter nogle praktiske enheder for energi, impuls og masse: Energien måles i elektronvolt [eV]. Pr. definition er 1 eV den energi som en partikel med elementarladningen e får ved at gennemløbe et spændingsfald på 1 V

$$(1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ kg m}^2/\text{s}^2).$$

Impulsen (bevægelsesmængden) måles i enheden eV/c og massen måles i enheden eV/c^2 , hvor c er lysets fart i vakuum. Da 1 eV er en meget lille energimængde, benytter partikelfysikere ofte MeV (1 MeV = 10^6 eV), GeV (1 GeV = 10^9 eV) eller TeV (1 TeV = 10^{12} eV).

Del A omhandler acceleration af protoner eller elektroner. Del B omhandler identifikation af partikler dannet ved kollisioner i CERN.

Del A. LHC acceleratoren (6 point)

Acceleration:

Antag, at protonerne er blevet accelereret af et spændingsfald V , så deres fart er meget tæt på lysets fart, og at man kan se bort fra energitab i form af elektromagnetisk stråling og kollisioner med andre partikler.

A.1	Udled et eksakt udtryk for slutfarten v af protonerne som funktion af accelerationsspændingen V og fysiske konstanter.	0.7pt
------------	--	-------

I et fremtidigt eksperiment ved CERN planlægger man at benytte protoner fra LHC til kollisioner med elektroner som har en energi på 60,0 GeV.

- A.2** For partikler med store energier og små masser vil den relative afvigelse $\Delta = (c - v)/c$ af slutfarten v fra lysets fart være meget lille. Udled en førsteordens tilnærmelse til Δ og beregn størrelsen af Δ for elektroner med en energi på 60,0 GeV. 0.8pt

Vi vender nu tilbage til at betragte protonerne i LHC. Antag, at strålen af protoner har et cirkulært tværsnit.

- A.3** Udled et udtryk for størrelsen af det homogene magnetfelt, B , som er nødvendigt for at holde protonerne på plads i deres cirkelbane. Svaret skal kun indeholde energien E af protonen, omkredsen af banen L , grundlæggende konstanter og rene talværdier. Du kan benytte passende tilnærmelser, hvis det ikke har indflydelse på det sidste betydende ciffer i svaret. Beregn størrelsen af B for en proton med energien $E = 7,00$ TeV. Du kan se bort fra vekselvirkning mellem protonerne. 1.0pt

Udstrålet effekt:

En accelereret, ladet partikel udstråler energi i form af elektromagnetisk stråling. Den udstrålede effekt P_{rad} for en ladet partikel der bevæger sig i en cirkel med konstant vinkelhastighed afhænger kun af størrelsen af partiklens acceleration a , ladningen q , lysets fart c og vakuumpervittiviteten ϵ_0 .

- A.4** Benyt dimensionsanalyse til at finde et udtryk for den udstrålede effekt P_{rad} . 1.0pt

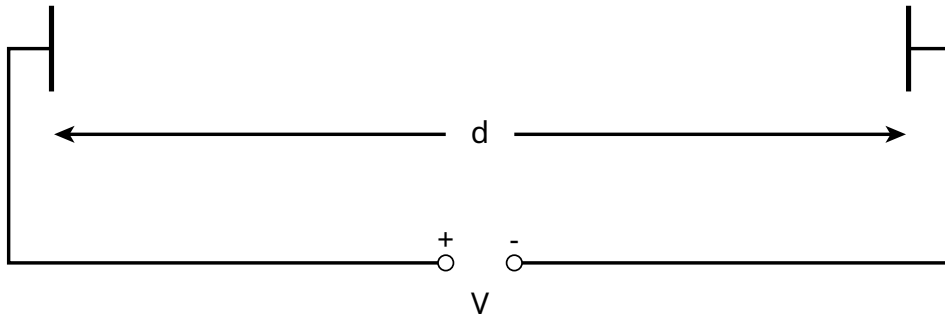
Den korrekte formel for den udstrålede effekt indeholder talfaktoren $1/(6\pi)$; Desuden giver en relativistisk udledning yderligere en faktor γ^4 på ovenstående resultat, hvor $\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-\frac{1}{2}}$.

- A.5** Beregn den samlede udstrålede effekt P_{tot} fra LHC når den kører med protonenergi $E = 7,00$ TeV (Bemærk tabel 1). Du kan benytte passende tilnærmelser. 1.0pt

Lineær acceleration

Ved CERN accelereres protonerne fra hvile i en lineær accelerator med længden $d = 30,0$ m af en spændingsfald på $V = 500$ MV. Antag, at det elektriske felt er homogent. En lineær accelerator kan antages at bestå af to opladede metalplader, som vist på Fig. 1.

- A.6** Beregn den tid T det tager for protonerne at passere igennem det elektriske felt. 1.5pt



Figur 1: Skitse af den lineære accelerator.

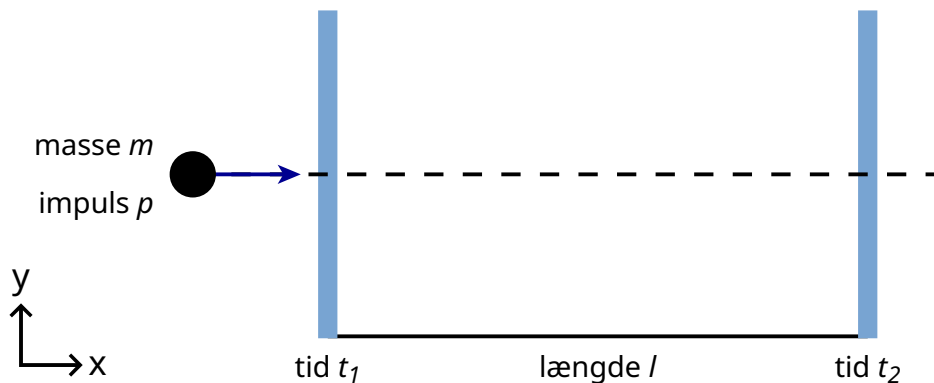
Del B. Partikelidentifikation (4 point)

Flyvetid:

Det er vigtigt at kunne identificere de energirige partikler, der dannes ved kollisionerne, for at kunne forstå de grundlæggende vekselvirkninger. En simpel metode er at måle den tiden t som en partikel med kendt impuls er om at gennemløbe stræningen l i en såkaldt flyvetids-detektor. Nogle typiske partikler, som kan identificeres med denne type detektor og deres masser er angivet i tabel 2.

Partikel	Masse [MeV/c ²]
Deuteron	1876
Proton	938
Ladet kaon	494
Ladet pion	140
Elektron	0,511

Tabel 2: Partikler og deres masser.

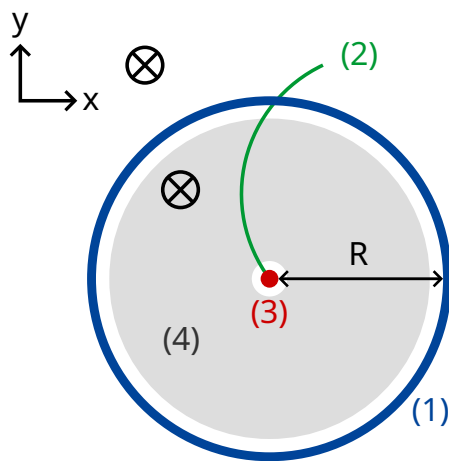


Figur 2: Skitse af en flyvetids-detektor

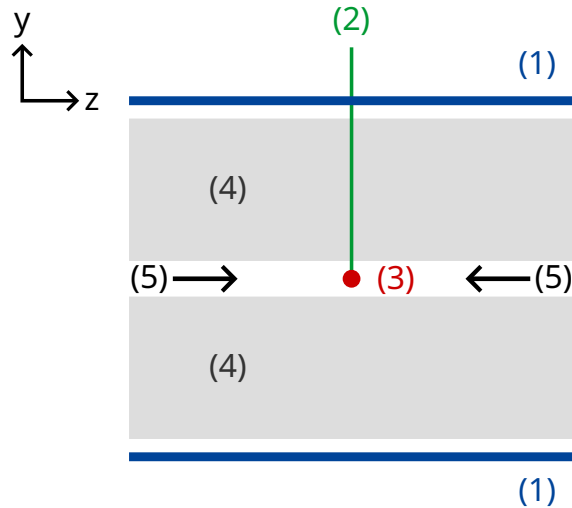
- B.1** Udled en formel for partiklens hvilemasse m udtrykt ved lysets fart, impulsen (bevægelsesmængden) p , flyvelængden l og flyvetiden t . Antag, at partiklen har ladningen e og bevæger sig med fart tæt på lysets i en ret linje igennem flyvetids-detektoren. Antag også, at den bevæger sig vinkelret på de to detektorplaner (se figur 2). 0.8pt

- B.2** Beregn den mindste længde l af en flyvetids-detektor, hvor man med sikkerhed kan skelne mellem en ladet kaon og en ladet pion, givet at begge partiklers impuls (bevægelsesmængde) er målt til $1,00 \text{ GeV}/c$. Kravet til sikkert at kunne skelne er, at forskellen i flyvetid er større end tre gange tidsopløsningen af detektoren. Den typiske tidsopløsning i en flyvetids-detektor er 150 ps ($1 \text{ ps} = 10^{-12} \text{ s}$). 0.7pt

I det følgende ser vi på detektionen af partikler i en typisk LHC- detektor. Detektionen foregår i to trin (en spor-detektor og en flyvetids-detektor). Fig. 3 viser forsøgsopstillingen dels set som et tværsnit af partikelstrålen, dels set fra siden, parallelt med partikelstrålen. Begge de nævnte detektorer er cylinderformede og omgiver det område hvor partikelreaktionerne finder sted. Partikelstrålen er i midteraksen. Spor-detektoren måler banen af den ladede partikel, som bevæger sig i et magnetfelt, der er parallelt med protonstrålen. Kendskab til radius r af partiklens bane gør det muligt at bestemme impulsen vinkelret på protonstrålen, p_T . Da tidspunktet for kollisionen er kendt, behøver flyvetids-detektoren kun én tidsmåling for at bestemme flyvetiden fra kollisionspunktet ved midteraksen til flyvetids-detektoren. Flyvetids-detektoren er placeret umiddelbart udenfor spor-detektoren. I denne delopgave kan du antage, at alle partikler dannet i kollisionen bevæger sig vinkelret på protonstrålen. Dette betyder, at ingen af de dannede partikler har impuls (bevægelsesmængde) langs med protonstrålen.



tværsnitsbillede



tværnsnit af
billede set fra siden
langs med strålen

- (1) - Flyvetids-detektor cylinder
- (2) - partikelspor
- (3) - det punkt hvor kollisionen finder sted
- (4) - spor-detektor
- (5) - proton-stråler
- ⊗ - magnetfelt

Figur 3 : Eksperimentel opstilling til identifikation af partikler med en spor-detektor og en flyvetids-detektor. Begge detektorer er cylinderformede og omgiver kollisionsområdet i midten. Venstre: Tværnsnit vinkelret på partikelstrålen. Højre : set fra siden parallelt med protonstrålen. Den dannede partikel bevæger sig vinkelret på protonstrålens retning.

B.3 Udtryk den dannede partikels masse ved størrelserne magnetfeltet B , radius R af flyvetids-detektorcylinderen, grundlæggende konstanter og de målte størrelser: baneradius r af partikelsporet og flyvetiden t af den dannede partikel. 1.7pt

Der er detekteret følgende fire partikler, og vi ønsker at identificere dem. Størrelsen af magnetfeltet i spor-detektoren var $B = 0,500$ T. Radius R af flyvetids-detektorrøret var $3,70$ m. Herunder er måleresultaterne ($1 \text{ ns} = 10^{-9} \text{ s}$):

Partikel	Baneradius r [m]	Flyvetid t [ns]
A	5,10	20
B	2,94	14
C	6,06	18
D	2,31	25

B.4 Identificér de fire partikler ved at bestemme deres masser.

0.8pt