

Large Hadron Collider (10 poeng)

Vær vennlig å lese de generelle instruksjonene i den separate konvoluttet før du begynner på denne oppgaven.

I denne oppgaven blir fysikken ved partikkelakseleratoren LHC (Large Hadron Collider) ved CERN diskutert. CERN er verdens største laboratorium for partikkelfysikk. Hovedmålet er å få innsikt i de fundamentale naturlovene. To partikkelstråler blir akselerert til høye energier mens de holdes på plass i akseleratorringen av sterke magnetfelt før de kollideres med hverandre. Protonene er ikke jevnt fordelt utover hele omkretsen av akseleratoren, men de er samlet i såkalte bunter. Partiklene som skapes som følge av kollisjonene blir observert med store detektorer. Noen parametere for LHC kan bli funnet i tabell 1.

LHC-ringen	
Ringens omkrets	26659 m
Antall bunter per protonstråle	2808
Antall protoner i hvert bunt	$1,15 \times 10^{11}$
Protonstråler	
Energi til protonener	7,00 TeV
Massesenterenergi	14,0 TeV

Tabell 1: Typiske numeriske verdier for relevante LHC-parametere

Partikkelfysikere bruker hensiktsmessige enheter for energi, bevegelsesmengde og masse: Energien blir målt i elektronvolt [eV]. Per definisjon er 1 eV mengden energi en partikkel med elementærladning, e , får når den forflyttes gjennom en potensialforskjell på én volt ($1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-2}$).

Bevegelsesmengden blir målt i enheten eV/c og massen i enheten eV/c^2 , hvor c er lysfarten i vakuum. Siden 1 eV er et veldig lite mål på energi, bruker partikkelfysikere 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 handler om akselerasjonen av protoner eller elektroner. Del B handler om identifisering av partikler som skapes i kollisjoner ved CERN.

Del A. LHC-akseleratoren (6 poeng)

Akselerasjon:

Anta at protonene har blitt akselerert av en spenning V slik at farten deres er veldig nær lysfarten og se bort fra andre energitap som er forårsaket av stråling eller kollisjoner med andre partikler.

A.1 Finn det eksakte uttrykket for slutfarten v til protonene som en funksjon av akseleratorspenningen V og fysiske konstanter. 0.7pt

Et design for et fremtidig eksperiment ved CERN planlegger å bruke protonene fra LHC til å kollideres med elektroner som har en energi på 60,0 GeV.

- A.2** For partikler med høy energi og lav masse er den relative avviket $\Delta = (c - v)/c$ mellom slutfarten og lysfarten veldig liten. Finn en første ordens tilnærming for Δ og beregn Δ for elektroner med en energi på 60,0 GeV ved å bruke akselerasjonsspenningen V og fysiske konstanter. 0.8pt

Vi går nå tilbake til å se på protonene i LHC. Anta at strålerøret har en sirkelform.

- A.3** Utled et uttrykk for den homogene magnetiske flukstettheten B som er nødvendig for å holde protonstrålen på plass i en sirkulær bane. Uttrykket skal bare inneholde energien til protonene E , omkretsen L , fundamentale konstanter og tall. Du kan bruke passende tilnærminger hvis effekten deres er mindre enn presisjonen til minste antall gjeldende siffer. 1.0pt
Beregn den magnetiske flukstettheten B for en protonenergi på $E = 7,00$ TeV. Se bort fra vekselvirkninger mellom protoner.

Utstrålt effekt

En akselerert ladd partikkel utstråler energi i form av elektromagnetiske bølger. Den utstrålte effekten P_{rad} til en ladd partikkel som går rundt i sirkel med konstant vinkelfart avhenger bare av dens akselerasjon a , ladningen q , lysfarten c , og permittiviteten i vakuum ϵ_0 .

- A.4** Bruk en dimensjonsanalyse for å finne et uttrykk for den utstrålte effekten P_{rad} . 1.0pt

Den virkelige formelen for utstrålt effekt inneholder en faktor $1/(6\pi)$; videre gir en fullstendig relativistisk utledning en multiplikativ tilleggsfaktor γ^4 , med $\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-\frac{1}{2}}$.

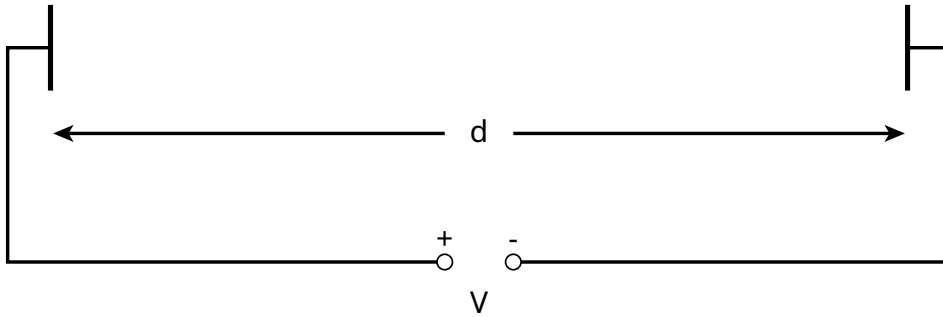
- A.5** Beregn den totale utstrålte effekten P_{tot} til LHC for en protonenergi $E = 7,00$ TeV (se tabell 1). Du kan bruke passende tilnærminger. 1.0pt

Lineær akselerasjon

Ved CERN blir protoner akselerert fra ro med en lineær akselerator med lengde $d = 30,0$ m over en potensialforskjell på $V = 500$ MV. Anta at det elektriske feltet er homogent. En lineær akselerator består av to plater som skissert i Figur 1.

A.6 Bestem tiden T som protonene bruker for å passere gjennom dette feltet.

1.5pt



Figur 1: Skisse av en akseleratormodul.

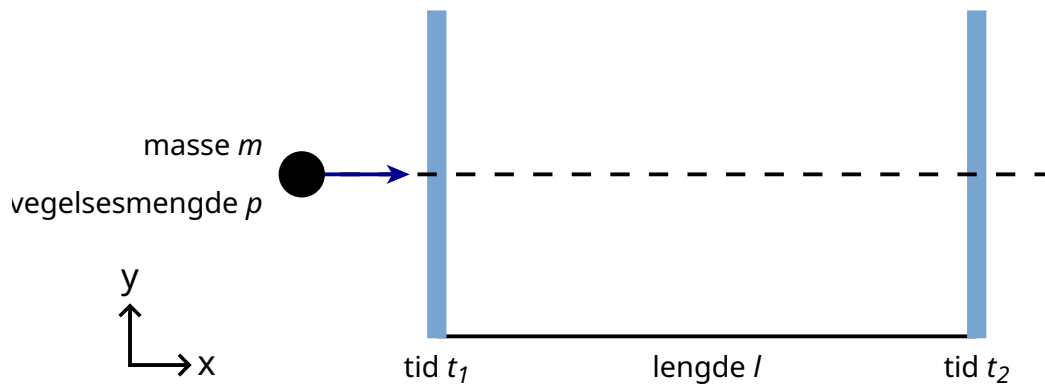
Del B. Partikkelidentifisering (4 poeng)

Flytid:

Det er viktig å identifisere høyenergipartikler som skapes i kollisjonene for å tolke vekselvirkningsprosessen. En enkel metode er å måle tiden (t) som en partikkel med kjent bevegelsesmengde trenger for å passere en lengde l i en såkalt flytid-detektor (ToF, Time of Flight). Typiske partikler som blir identifisert i detektoren, er gitt i tabell 2 sammen med tilhørende masse.

Partikkel	Masse [MeV/c ²]
Deuteron	1876
Proton	938
Ladet Kaon	494
Ladd Pion	140
Elektron	0,511

Tabell 2: Partikler og deres masse.

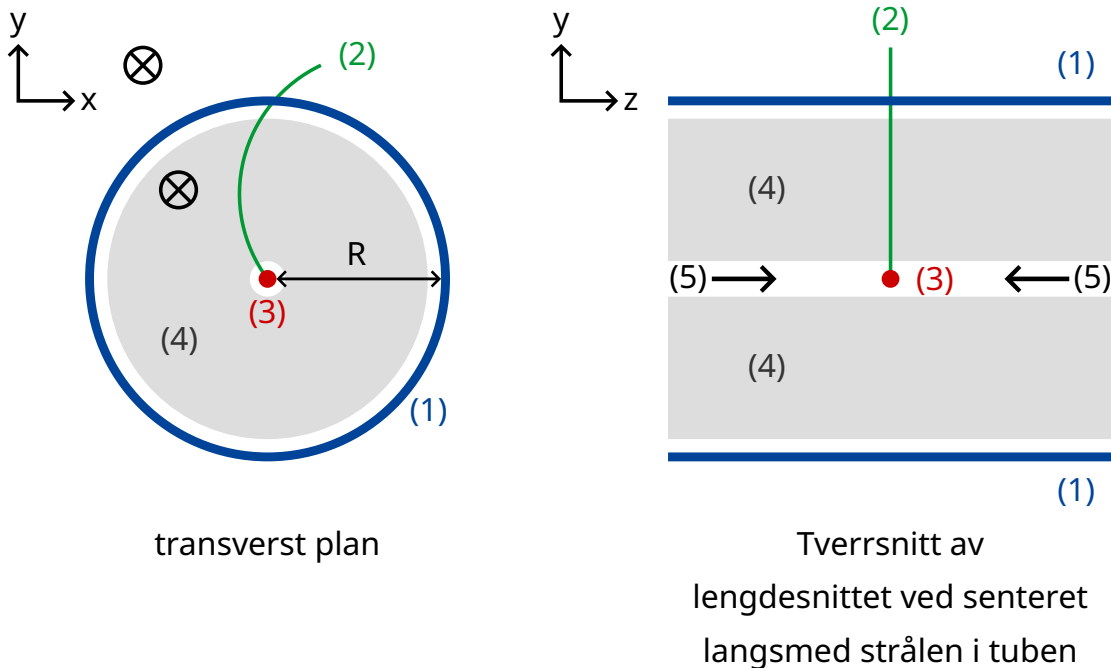


Figur 2: Skisse av en flytid-detektor.

- B.1** Uttrykk partikkelmassen m ved hjelp av bevegelsesmengden p , flylengden l og flytiden t , ved å anta at partikler har elementærladning e og beveger seg med fart opp mot c i rette baner i ToF-detektoren og at de beveger seg vinkelrett på de to deteksjonsplanene (se figur 2). 0.8pt

B.2 Beregn den minste lengden l til en ToF-detektor som med sikkerhet tillater å skille et ladd kaon fra et ladd pion, gitt at begge bevegelsesmengde blir målt til å være $1.00 \text{ GeV}/c$. For å kunne gjøre et godt skille er det påkrevd at forskjellen i flytiden er større enn tre ganger tidsoppløsningen til detektoren. Den typiske oppløsningen til en ToF-detektor er 150 ps ($1 \text{ ps} = 10^{-12} \text{ s}$). 0.7pt

I det følgende blir partikler som produseres i en typisk LHC-detektor identifisert i en to-trinns detektor som består av en sporingdetektor og en ToF-detektor. Figur 3 viser oppsettet på tvers (transvers) og planet langs med protonstrålene. Begge detektorene er tuber som ligger rundt vekselvirkningsområdet med strålen som passerer i midten av tuben. Sporingdetektoren måler banen til en ladd partikkel som passerer gjennom et magnetfelt hvis retning er parallell med protonstrålene. Radien r til banen tillater bestemmelse av den transverselle bevegelsesmengden p_T til partikkelen. Siden kollisjonstiden er kjent trenger ToF-detektoren bare en tube for å måle flytiden som er målt fra kollisjonspunktet og til ToF-tuben. Denne ToF-tuben er plassert rett utenfor sporingkammeret. I denne oppgaven kan du anta at alle partikler som skapes i kollisjonen beveger seg vinkelrett på protonstrålene, dvs at partiklene som skapes ikke har bevegelsesmengde langs retningen til protonstrålene.



- (1) - ToF-tube
- (2) - spor
- (3) - kollisjonspunkt
- (4) - sporingstube
- (5) - protonstråler
- ⊗ - magnetisk felt

Figure 3 : Eksperimentelt oppsett for partikkelidentifisering med sporingkammer og en ToF-detektor. Begge detektorene er tuber som omkranser kollisjonspunktet i midten. Venstre : tverrsnitt vinkelrett på strålerøret. Høyre : lengdesnitt parallelt med strålerøret. Partikkelen beveger seg vinkelrett på strålerøret.

B.3 Uttrykk partikkelmassen ved hjelp av den magnetiske flukstettheten B , radien R til ToF-tuben, fundamentale konstanter og de målte størrelsene: radius r til banen og flytiden t . 1.7pt

Vi oppdager fire partikler og ønsker å identifisere dem. Den magnetiske flukstettheten i sporingsdetektoren var $B = 0,500$ T. Radien R til ToF-tuben var $3,70$ m. Her er målingene ($1 \text{ ns} = 10^{-9} \text{ s}$):

Partikkel	Radius til banen r [m]	Flytid t [ns]
A	5,10	20
B	2,94	14
C	6,06	18
D	2,31	25

B.4 Identifiser de fire partiklene ved å beregne massene deres. 0.8pt