

## 거대 강입자 충돌기 (Large Hadron Collider, LHC) [10 점]

풀이를 시작하기 전에 별도의 봉투에 있는 일반 지시사항을 꼭 읽으시오.

이 과제에서는 스위스 CERN 에 있는 입자가속기 LHC(Large Hadron Collider) 의 물리를 다룬다. CERN 은 세계에서 제일 큰 입자 물리 연구소이다. 연구의 주된 목표는 자연의 기본법칙에 대한 통찰력을 얻는 것이다. 두 개의 다른 입자 다발 (beam) 을 매우 높은 에너지까지 가속시키고, 강한 자기장으로 가속기 고리 (ring) 내부로 인도한 (집속시킨) 후, 서로 충돌하게 한다. 양성자들은 가속기 둘레에 균일하게 퍼져있지 않고, 군데군데 소위 "뭉치 (bunch)" 라고 불리는 집단을 이루고 있다. 양성자들의 충돌로 발생하는 입자들은 대형 감지장치 (detector) 들로 관찰한다. LHC 의 파라미터들은 표 1 에서 찾을 수 있다.

LHC 고리 (ring)	
고리의 둘레 길이	26659 m
양성자 다발 (beam) 당 뭉치 (bunch) 들의 개수	2808
뭉치 당 양성자의 개수	$1.15 \times 10^{11}$
양성자 다발 (beam)	
양성자들의 에너지	7.00 TeV
질량 중심 에너지	14.0 TeV

표 1: LHC 파라미터들의 일반적인 값들

입자 물리학자들은 에너지, 운동량, 질량에 대해 다음의 단위를 사용한다: 에너지 단위는 전자 볼트 [eV]. 1 eV 는 기본 전하  $e$  를 가지는 입자가 1V 의 전위차로 가속될 때 얻는 에너지 양이다. ( $1 \text{ eV} = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-2}$ )

운동량은  $\text{eV}/c$  의 단위로, 질량은  $\text{eV}/c^2$  의 단위로 측정한다. 여기서  $c$  는 진공에서 광속이다. 1 eV 는 매우 작은 에너지 양이므로, 종종 MeV ( $1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$ ), GeV ( $1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$ ) 또는 TeV ( $1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$ ) 을 사용한다.

파트 A 는 양성자 또는 전자의 가속을 다룬다. 파트 B 는 CERN 의 충돌에서 만들어진 입자들 중 새로운 것을 발견해 내는 것과 연관되어 있다.

### 파트 A. LHC 가속기 (6 점)

#### 가속:

양성자들이 전압  $V$  로 가속되어 속도가 광속에 매우 가까워졌다고 가정하고, 복사 (radiation) 또는 다른 입자들과의 충돌로 인한 에너지 손실은 무시하시오.

**A.1** 가속 전압  $V$  와 물리 상수들 (physical constants) 의 함수로 양성자의 최종 속도  $v$  의 정확한 표현식을 구하시오. 0.7pt

CERN 에서는 LHC 에서 나오는 양성자들을 에너지 60.0 GeV 인 전자들과 충돌시키는 실험을 다음 단계로 계획 중이다.

**A.2** 에너지가 크고 질량이 작은 입자들의 경우, 최종 속도  $v$  가 광속으로부터 벗어난 정도의 상대값  $\Delta = (c - v)/c$  이 매우 작다.  $\Delta$  에 대한 1 차 근사식을 구하고, 이로부터 가속전압  $V$  와 물리상수들을 이용하여 에너지 60.0 GeV 의 전자에 대해  $\Delta$  를 계산하시오. 0.8pt

이제 LHC 내의 양성자들로 되돌아간다. 양성자가 흘러가는 관 (pipe) 은 원 모양이라고 가정한다.

- A.3** 양성자의 흐름 (beam) 이 원 모양 트랙 (궤적) 을 유지하는 데 필요한 균일한 자속 밀도  $B$  의 수식을 유도하시오. 수식은 양성자 에너지  $E$ , 양성자 궤적의 원둘레 길이  $L$ , 기본 상수들과 숫자들만을 포함하여야 한다. 유효숫자의 마지막 자리의 값보다 정밀도에서 작은 영향을 주는 경우에는 적당한 근사를 사용해도 된다. 양성자의 에너지가  $E = 7.00 \text{ TeV}$  인 경우 자속밀도  $B$  를 계산하시오. 양성자들의 상호작용은 무시하시오. 1.0pt

### 복사 일률 (radiated power)

가속된 대전 입자는 전자기파 형태로 에너지를 복사 (radiate) 한다. 일정한 각속도로 회전하고 있는 대전된 가속 입자의 복사 일률 (radiated power)  $P_{\text{rad}}$  은 가속도  $a$ , 대전 입자의 전하량  $q$ , 광속  $c$ , 진공 유전율  $\epsilon_0$  에만 의존한다.

- A.4** 차원분석 (dimensional analysis) 을 이용하여 복사 일률  $P_{\text{rad}}$  의 표현식을 구하시오. 1.0pt

복사 일률의 실제 공식은  $1/(6\pi)$  의 계수를 더 포함하게 된다: 또한, 상대론을 완전히 적용하여 유도하면 추가적인 곱하기 인수  $\gamma^4$  을 가지게 된다. 이 때,  $\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-\frac{1}{2}}$  이다.

- A.5** 양성자 에너지  $E = 7.00 \text{ TeV}$  인 경우 LHC 의 전체 복사 일률  $P_{\text{tot}}$  을 계산하시오. (앞의 표 1 참조) 여기서 적절한 근사를 사용해도 좋다. 1.0pt

### 선형 가속:

CERN 에서는 정지해 있는 양성자들이 길이  $d = 30.0 \text{ m}$  인 선형 가속기 (직선 경로에서 가속하는 장치) 에 의해 전위차  $V = 500 \text{ MV}$  으로 가속된다. 전기장은 길이 방향을 따라 균일하다고 가정한다. 선형 가속장치는 그림 1 과 같이 두 개의 판으로 이루어져 있다.

- A.6** 양성자들이 길이  $d$  의 균일한 전기장을 지나가는 데 걸리는 시간  $T$  를 계산하시오. 1.5pt

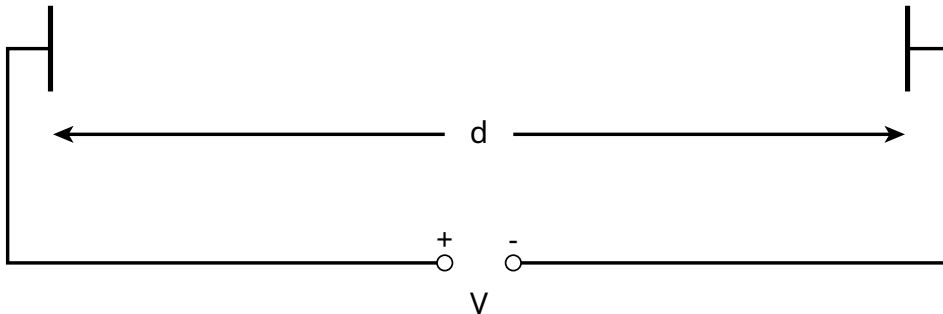


그림 1: 가속기 모듈의 개략도

## 파트 B. 입자 검출 (4 점)

### 비행 시간 ( time of flight, ToF)

상호작용 과정을 해석하기 위하여 충돌로 발생한 큰 에너지의 입자들을 구분해 내는 것이 중요하다. 이를 위한 간단한 방법으로, 운동량을 알고 있는 입자가 비행 시간 검출기 (Time-of-Flight detector, ToF detector ) 라고 불리는 장치에서 길이  $l$  을 지나가는 데 걸리는 시간 ( $t$ ) 을 측정하는 방법이 있다. 비행 시간 검출기에서 발견되는 대표적인 입자들이 질량과 함께 표 2 에 열거되어 있다.

입자	질량 [MeV/c <sup>2</sup> ]
중양성자 (Deuteron)	1876
양성자 (Proton)	938
대전된 중간자 케이온 (Kaon)	494
대전된 중간자 파이온 (Pion)	140
전자 (Electron)	0.511

표 2: 입자들의 질량

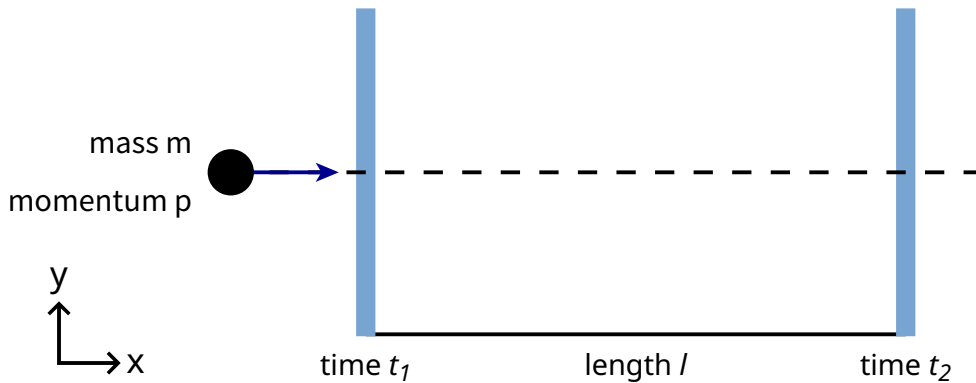
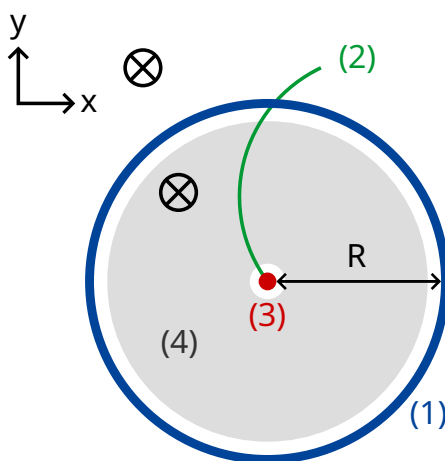


그림 2: 비행시간 검출기의 개략적인 그림 (mass= 질량, momentum= 운동량, time= 시각, length= 길이)

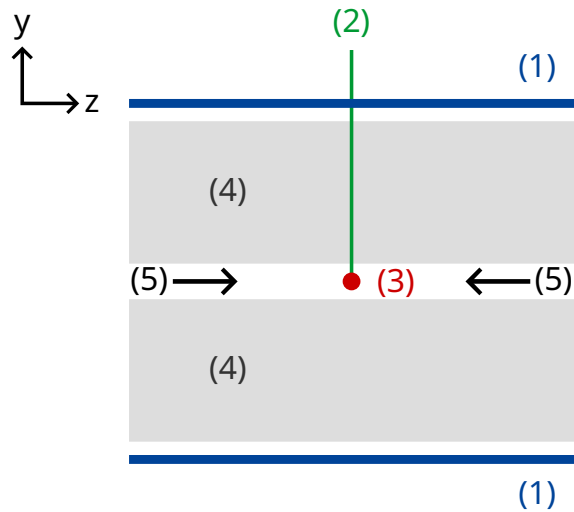
- B.1** 운동량  $p$ , 비행 거리  $l$ , 비행 시간  $t$  의 함수로 입자의 질량  $m$  을 나타내시오. 입자들이 기본 전하  $e$  를 가지고 광속에 가까운 속도로 ToF 검출기 내의 직선 트랙을 따라, 두 개의 감지 평면 (detection plane) 에 수직 방향으로 이동한다고 가정하시오 (그림 2 를 보시오) 0.8pt

**B.2** 운동량이  $1.00 \text{ GeV}/c$  으로 같은, 대전된 중간자 케이온과 대전된 중간자 파이온을 안전하게 구분하려면, 비행 시간 (ToF) 검출기의 최소 길이  $l$  이 얼마가 되어야 하는지 계산하시오. 0.7pt  
안전하게 구분하기 위해서는, 두 입자의 비행 시간의 차이가 검출기의 시간 분해능의 3 배 보다 커야 한다. 비행 시간 검출기의 분해능은  $150 \text{ ps}$  ( $1 \text{ ps} = 10^{-12} \text{ s}$ ) 이다.

아래에서는, 궤도 추적 감지기 (tracking detector) 와 비행 시간 (ToF) 검출기로 구성된 두 단계 검출 시스템을 사용하여 LHC 에서 양성자의 충돌에 의해 생성된 입자들을 검출하려고 한다. 그림 3 은 양성자 흐름에 대해 가로 방향 (transverse) 단면과 길이 방향 (longitudinal) 단면에서 실험 셋업을 보여주고 있다. 두 검출장치는 모두 양성자가 흘러가고 상호작용하며 충돌하는 원통 (pipe) 의 중심축을 둘러싸고 있는 튜브 형태이다. 궤도 추적 감지기는 양성자 흐름에 평행한 방향의 자기장이 존재하는 영역을 지나가는 대전입자의 이동 경로 (trajectory) 를 측정한다. 입자의 이동 경로의 반지름  $r$  로부터 그 입자의 축에 수직인 방향의 (transverse) 운동량  $p_T$  을 구할 수 있다. 양성자들의 충돌이 일어난 시각을 알기 때문에, 충돌 지점부터 비행 시간 (ToF) 튜브 경계까지의 비행 시간을 재기 위해 바깥쪽에 있는 튜브 하나만 필요하다. 비행 시간 (ToF) 검출기 튜브는 궤도 추적 감지기 (tracking chamber) 바로 밖에 둔다. 이 과제에서는 충돌로 생성된 모든 입자들이 양성자 흐름에 수직인 방향으로만 (transverse 방향) 이동한다고, 즉, 생성된 입자들에는 양성자흐름 방향으로의 (longitudinal) 운동량은 없다고 가정하시오.



transverse plane



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

- (1) - 비행 시간 (ToF) 검출기 튜브
- (2) - 트랙 (생성 입자의 궤적)
- (3) - 충돌 지점
- (4) - 궤도 추적 감지기 튜브
- (5) - 양성자 흐름들 (beam)
- ⊗ - 자기장

그림 3: 궤도 추적 감지기 (tracking chamber) 와 ToF 검출기를 가지고 있는 입자 검출을 위한 실험 셋업. 두 검출장치 모두 충돌 지점을 둘러싸고 있는 튜브들이다. 왼쪽: 양성자 흐름선 (beamline) 에 수직인 단면을 본 그림. 오른쪽: 양성자 흐름선에 평행한 길이 방향의 단면을 본 그림. 입자가 흐름선에 수직으로 이동하고 있다.

( transverse plane = 가로 방향의 단면, cross section of the longitudinal view at the center of the tube along the beamline = 흐름선을 따라 튜브의 중앙에서 길이 방향의 단면 그림)

**B.3** 자속 밀도  $B$ , 비행 시간 (ToF) 튜브의 반지름  $R$ , 기본 상수, 그리고 측정된 양들 (트랙의 반지름  $r$  과 비행 시간  $t$ ) 으로 입자의 질량을 표현하시오. 1.7pt

네 개의 입자들을 감지하여, 이 입자들이 무엇인지 확인하려고 한다. 궤도 추적 감지기 내의 자속밀도는  $B = 0.500 \text{ T}$  이다. 비행 시간 (ToF) 튜브의 반지름  $R$  은  $3.70 \text{ m}$  이다. 측정값들은 아래와 같다. ( $1 \text{ ns} = 10^{-9} \text{ s}$ )

입자	궤적의 반지름 $r$ [m]	비행 시간 $t$ [ns]
A	5.10	20
B	2.94	14
C	6.06	18
D	2.31	25

**B.4** 각 입자의 질량을 계산하여 무슨 입자인지 알아내시오. 0.8pt