E1 - 자기 진자 (10점)

진자의 진동수는 진자와 받침대 사이의 자기력에 의해 바뀔 수 있다. 이 실험에서는 그림 3의 장치를 써서, 중력 항과 자기 상호작용 항이 합쳐진 퍼텐셜 속에서의 진자 운동을 연구한다.

장비 (그림 3도 참고)

A 점 모양의 받침점과 각도 측정용 거울이 달린 진자 몸체
B 진자를 받치는 단단한 받침점과 각도 측정용 레이저 모듈이 달린 진자 탑
C 외부 자석을 받치는 레일
D 진자 몸체에 붙이는 작은 쌍극자 자석 2개(**초록, 빨강, 흰색** 또는 **노랑**일 수 있음)
E 똑같은 외부 쌍극자 자석 2개(**검정**)
F 미지의 외부 자석 2개 F1, F2(**파랑**, F2는 양 끝에 **흰** 점이 찍혀 있음)
G 각도 측정용 레이저 점을 비추는 스크린
H 스톱워치
I 마스킹 테이프(예: 진자 탑을 책상에 고정하는 데 사용)
J 연필과 자

자석은 꽤 강하다. 다치거나 자석이 손상되지 않도록 조심하시오.
레이저 빔을 직접 들여다보지 말고, 필요하지 않을 때는 레이저를 끄시오.
진자로 실험할 때에는 받침 나사가 진자 탑의 홈에 놓여 있는지 확인하시오.
필요하면 진자에 연필로 표시해도 된다.

과제 E1.1 - 질량 (1.0점)

작은 쌍극자 자석이 붙은 진자 몸체의 전체 질량은 $M_{\text{pen}} + M_{\text{mag}} = (52.3 \pm 0.2)\,\text{g}$이다.

M_{pen}과 M_{mag}를 각각 가능한 한 정확하게 구하시오.

과제 E1.2 - 자기 쌍극자 모멘트 (4.0점)

외부 자석이 가까이 있으면, 자기 진자는 중력과 자기 상호작용이 함께 만드는 퍼텐셜 속에서 움직인다. 그 결과 진자의 진동수 ω는 고유 진동수 ω_1과 "자기 진동수 이동" ω_{mag}의 함수로 쓸 수 있다:

$$\omega^2 = \omega_1^2 \pm \omega_{\text{mag}}^2 \tag{1}$$

두 **검정** 외부 쌍극자 자석을 진자의 평형 위치를 중심으로 거리 d만큼 떨어뜨려 대칭으로 놓고(그림 1 참고) 진폭이 작게 진동시키면, 자기 진동수 이동은 다음과 같다:

$$\omega_{\text{mag}}^2 = \frac{6\mu_0}{I\pi} \cdot j_1 \cdot j_2 \cdot \frac{\ell^2}{d^5}, \tag{2}$$

여기서 $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}\,\text{N/A}^2$은 진공의 투자율, I는 회전축에 대한 자기 진자의 관성 모멘트, j_1은 진자 자석들의 합성 자기 모멘트, j_2는 외부 쌍극자 하나의 자기 모멘트, ℓ은 진자 자석에서 회전축까지의 거리이다. 쌍극자 모멘트의 상대적 크기는 $j_2 = 2.4 \cdot j_1$이라고 가정해도 된다. 이곳의 중력 가속도는 $g = 9.81\,\text{m/s}^2$이다.

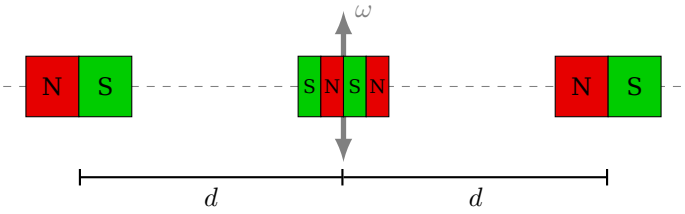


그림 1: 외부 쌍극자 자석을 이용한 진동수 이동(위에서 본 모습). d는 자석 중심 사이의 거리이다. 외부 자석의 방향은 뒤집힐 수도 있음에 유의하라.

a) 진폭을 아주 작게 하여 여러 자석 거리 d에 대해 진자의 진동수를 측정하시오. 도달할 수 있는 진동수 범위 전체를 반드시 다루시오.

b) 진자 자석과 외부 쌍극자 자석 재료의 "평균 자화"(단위 질량당 자기 모멘트)를 구하시오. 분석에 알맞은 그래프를 그리시오. 미지수를 모두 구하려면 보조 측정이 필요할 수 있다. 자석의 비자성 코팅의 질량과 두께는 무시해도 된다.

레일을 정밀하게 정렬하는 것이 중요하다. 진자가 평형 위치에 있을 때 모든 자석의 중심이 한 직선 위에 있도록 하시오.
레일 방향으로 진자 자석에 작용하는 힘이 상쇄되도록 반드시 대칭 배치를 쓰시오.

과제 E1.3 - 미지의 외부 자석 (3.0점)

미지의 **파랑** 외부 자석 두 개(F1, F2)에는 각각 여러 개의 자기 쌍극자가 들어 있다. F1 안의 쌍극자들은 F2 안의 쌍극자들과 방향이 반대이다. 그림 1과 같은 배치에서의 자기 진동수 이동도 거듭제곱 법칙을 따른다:

$$\omega_{\text{mag,F}}^2 \propto d^{\alpha}. \tag{3}$$

a) 진폭을 아주 작게 하여 여러 거리 d에 대해 진자의 진동수를 측정하시오. 자기 진동수 이동을 가능한 한 정확하게 구할 수 있는 설정을 고르시오.

b) 거듭제곱 법칙의 지수 α를 구하시오.

c) F1과 F2 안에 들어 있을 수 있는 자기 쌍극자의 배치를 그리고, 그 선택의 근거를 대시오.

과제 E1.4 - 비선형 진자 (2.0점)

장치를 과제 E1.2의 배치로 되돌리고, **검정** 외부 쌍극자 자석을 그림 1과 같이 놓으시오. 식 1에 따르면 진폭이 작을 때의 진자 진동수를 완전히 상쇄할 수 있다: $\omega \to 0$.

a) 이렇게 완전히 상쇄되는 자석 간격 d를 가능한 한 정확하게 구하시오.

b) 가장 잘 상쇄되도록 맞추었을 때, 진자의 주기가 진폭에 어떻게 의존하는지 조사하시오.

함수 관계를 제안하고 데이터로 확인하시오.

어긋남이 있다면 그 원인을 논의하시오.

E2 - 광학 블랙박스 (10점)

경고!

블랙박스를 열지 마시오. 블랙박스를 흔들지 마시오. 광학 포트의 창을 만지지 마시오. 블랙박스나 창을 깨뜨리거나 블랙박스를 열려고 하면 실격된다.

이 과제에서는 광학 블랙박스를 열지 않고 그 안에 무엇이 들어 있는지 알아낸다.

블랙박스에는 빛이 드나드는 광학 포트 4개(A, B, C, D)와 광축 2개가 있다(그림 2). 두 광축은 서로 수직이다. 각 포트 뒤에 광학 소자가 하나까지 있고, 상자 중심에도 하나가 더 있을 수 있다. 레이저와, 레이저를 돌릴 수 있도록 바퀴가 달린 레이저 거치대(바퀴에는 연필로 표시를 할 수 있다)를 써도 된다.

장비 (그림 4도 참고)

A 블랙박스

B 바퀴 달린 거치대에 끼운 레이저 모듈(두 실험에 같은 레이저 모듈을 쓰며, 책상 위에 놓고 쓴다)

C 투명 블록

D 마스킹 테이프, 연필, 자, 대각선 눈금이 있는 종이

레이저 빔을 직접 들여다보지 말고, 다른 사람이 빔에 맞지 않도록 하시오. 레이저가 켜져 있을 때 상자의 광학 포트를 들여다보지 말고, 필요하지 않을 때는 레이저를 끄시오.

과제 E2.1 - 중심 소자 (~0.3점)

두 광축은 블랙박스의 중심에서 교차한다. 교차점에는 소자 없음, 완전 반사 거울(양면), 반투명 거울, 또는 정삼각형 프리즘이 있을 수 있다.

표 1: 블랙박스의 슬롯에 들어갈 수 있는 소자

소자 없음	슬롯에 공기만 있음
거울	거울 축과 한 광축 사이의 각
프리즘	한 변과 블랙박스의 한 광축 사이의 각, 모양은 정삼각형
오목 또는 볼록 렌즈	상자 중심까지의 거리, 초점 거리의 크기와 부호. 참고: 렌즈의 축은 항상 광축과 나란하다.
편광판	블랙박스의 수직축에 대한 방향 각
단일 좁은 슬릿	상자 중심까지의 거리, 슬릿의 폭
회절 격자	상자 중심까지의 거리, 줄무늬의 방향, 줄무늬 사이의 간격
바늘구멍	상자 중심까지의 거리, 구멍의 지름

블랙박스 중심에 어떤 소자가 놓여 있는지 알아내시오. 광학 포트(A, B, C, D)에 대한 그 소자의 방향을 기술하시오 — 예를 들어 그림을 그려서. 선택의 근거를 대시오.

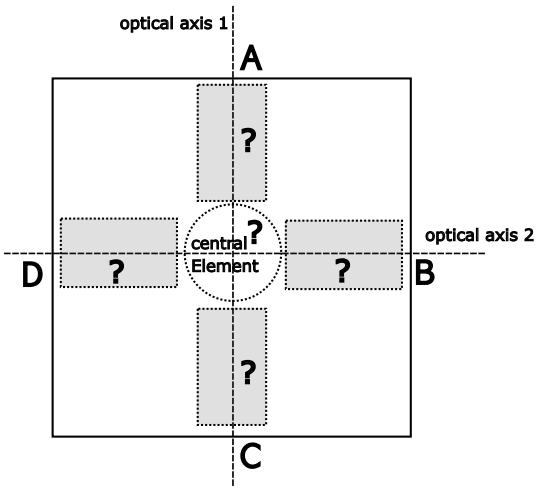


그림 2: 블랙박스와 미지 소자가 들어가는 슬롯의 배치

과제 E2.2 - 나머지 슬롯의 소자 (~2.2점)

네 광학 포트 A, B, C, D 뒤의 슬롯에는 각각 표 1의 소자가 하나씩 있다.

각 슬롯에 어떤 종류의 소자가 있는지 알아내시오. 선택의 근거를 대시오.

과제 E2.3 - 특성 (~7.5점)

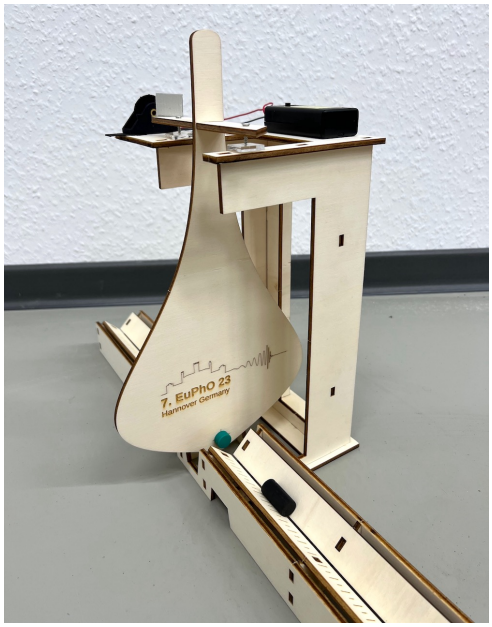
표 1의 두 번째 열에는 각 소자의 특성이 적혀 있다.

상자 안 슬롯 A, B, C, D에 쓰인 광학 소자들의 이 특성들을 **가능한 한 정확하게** 구하시오.

중요한 힌트:

- 레이저의 파장은 $(650 \pm 5)\,\mathrm{nm}$이다.
- 투명한 소자의 굴절률은 1.5라고 가정해도 된다.

실험 장치와 장비 사진



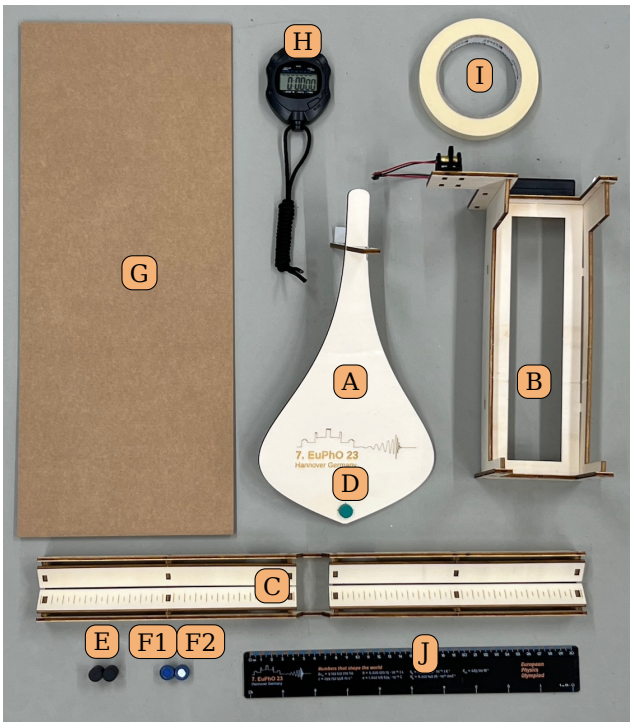


그림 3: 실험 문제 E1의 장치와 장비.

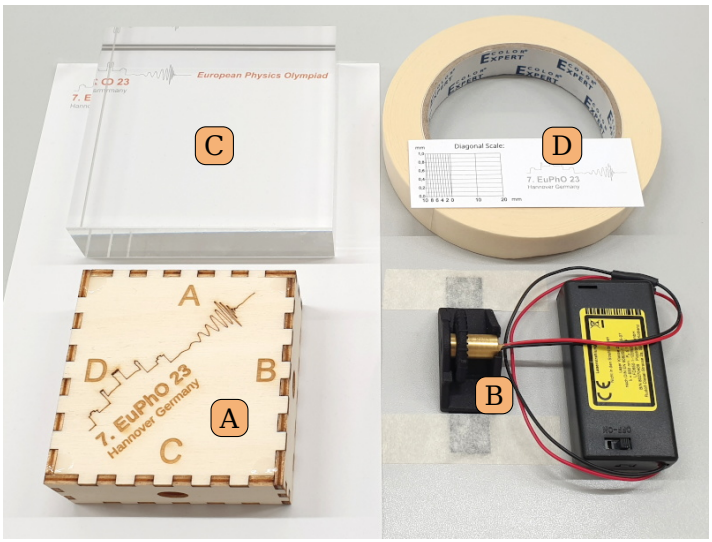


그림 4: 실험 문제 E2의 장치와 장비. 참고: 테이프로 레이저 모듈을 책상에 고정할 수 있다 - *B* 참고.

참고: 레이저 모듈은 처음에 E1 장치에 달려 있다. E2에 쓰려면 떼어 내야 한다. E1로 돌아갈 때 다시 달아도 된다 (정렬에 주의할 것).