

실험 문제: D^0 수명 측정 (Measurement of D^0 lifetime)

서론 --- 맥락 개요 (Introduction -- Context overview)

표준 모형 (Standard Model)

입자물리학의 표준 모형(Standard Model)은 원자와 원자핵 구성 요소 크기까지의 물질의 구성과 그들 사이의 힘을 가장 잘 설명하는 현재의 이론이다. 간단히 말해, 눈에 보이는 물질은 쿼크(quark)(u, d, c, s, t, b)와 렙톤(lepton)(전자, 뮤온, 타우온), 그리고 그들의 반물질 형태인 반쿼크와 반렙톤으로 이루어지며, 이들은 네 가지 기본 힘—전자기력, 약력, 강력, 중력—으로 서로 상호작용한다. 이 힘들은 보손(boson)이라 불리는 매개 입자(광자, Z, W^+ , W^- , 글루온)에 의해 매개된다. 아래 그림 1의 표를 참조하라. 쿼크는 자연에서 자유롭게 존재하지 않으며, 2개, 3개 또는 그 이상으로 서로 결합한다. 세 쿼크의 결합은 중입자(baryon)라 부르며, 예를 들어 양성자(u, u, d)와 중성자(u, d, d)는 수명이 긴 입자이기도 하다. 세 개 또는 두 개 입자(메손(meson)이라 불림)의 어떤 결합은 매우 빠르게 붕괴하는 불안정한 입자를 만든다.

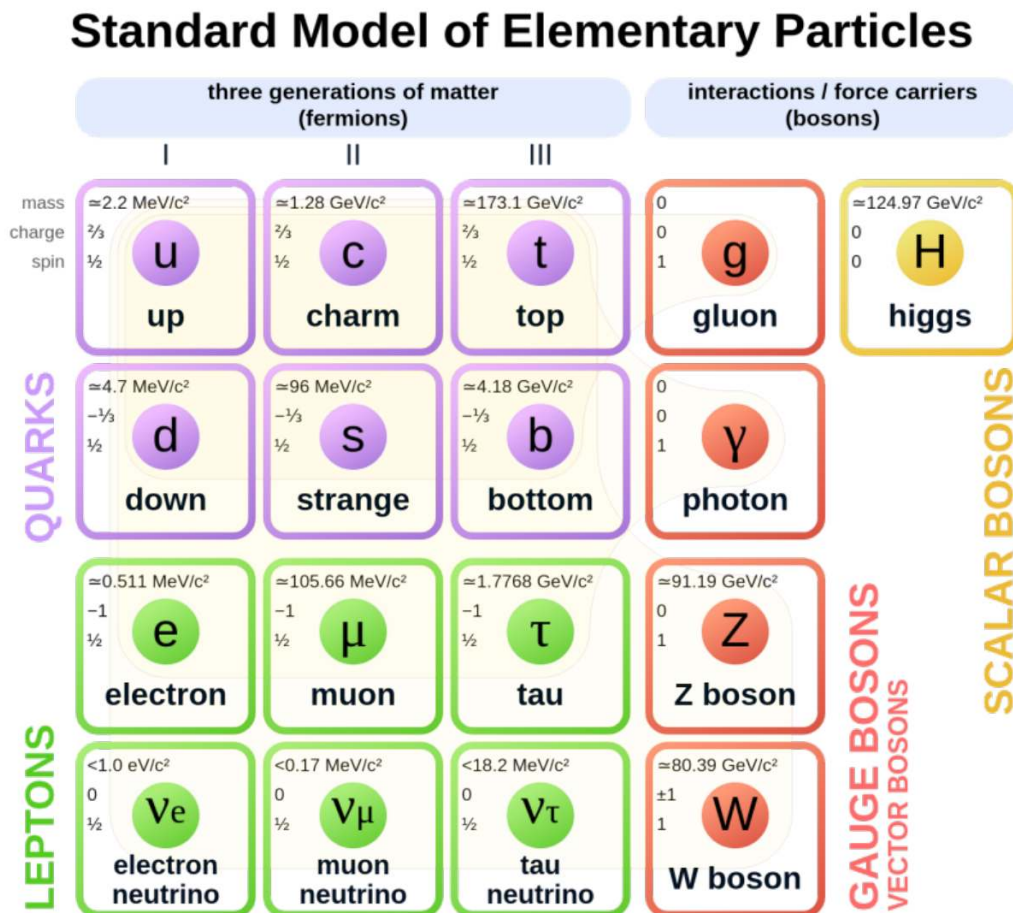


그림 1. 표준 모형 표

불안정한 입자는 더 가벼운 입자로 붕괴한다. 예를 들어 D^0 이라 불리는 메손 입자는 야릇한 쿼크(strange quark)와 반-위 쿼크(anti-up quark)로 이루어진 케이온(kaon, K^-)과, 아래 반쿼크(down anti-quark)와 위 쿼크(up quark)로 이루어진 파이온(pion, π^+)으로 붕괴할 수 있다. +, -, 0은 입자의 전하가 각각 양전하, 음전하, 중성인지를 나타낸다. 이 입자들은 현재의 실험에서 측정할 수 있을 만큼

충분히 긴 수명을 가진다.

$$D^0(c\bar{u}) \rightarrow K^-(s\bar{u}) + \pi^+(u\bar{d}).$$

◦ 실험 장치 --- LHCb 검출기 (The setup -- LHCb detector)

대형 강입자 충돌기(Large Hadron Collider, LHC)는 아원자 세계의 법칙을 발견하기 위한 가장 큰 연구 기반 시설이다. 그림 2에 보인 LHCb 검출기는 LHC가 일으키는 양성자-양성자 충돌을 기록하는 네 개의 대규모 장치 중 하나이다. LHCb는 여러 층으로 이루어진 하위 검출기(subdetector)들을 가지며, 이들은 최초 충돌에서 나오는 입자들의 궤적을 재구성하는 데 기여한다. 양성자가 충돌하는 곳을 일차 꼭짓점(primary vertex)이라 하고, 불안정한 입자(D0이나 이색적인(exotic) 입자 등)가 붕괴하는 곳을 이차(삼차) 꼭짓점(secondary/tertiary vertices) 또는 변위 꼭짓점(displaced vertices)이라 한다. 변위 꼭짓점의 존재는 물리적으로 흥미로운 사건의 신호이다. LHCb는 양성자가 충돌하는 곳에 매우 가까이 있는 VELO라 불리는 검출기(그림 2 참조) 덕분에 변위 꼭짓점을 기록할 수 있다.

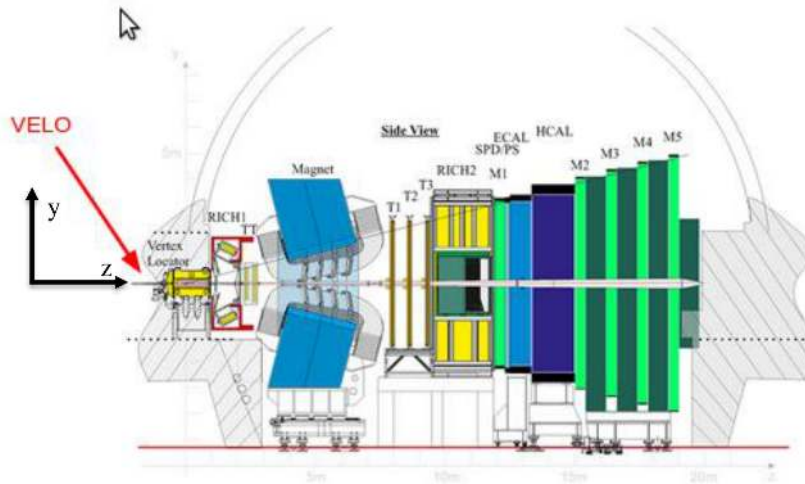


그림 2: LHCb 검출기. Z축은 LHC 빔라인의 방향이다.

◦ 데이터 (The data)

이 실습에 사용되는 데이터 표본은 2011년 데이터 수집 동안 무작위로 수집된 LHC 상호작용 표본에서 찾아낸, D0 입자(및 반입자 $\bar{D}^0$)로 알려진 맵시 입자(charmed particle)의 후보들로 이루어진다. 이 입자들은 다음 모드로 붕괴하는 것이 측정되었으며($D^0 \rightarrow K^- + \pi^+$, 그리고 쉼레 모드 $\bar{D}^0 \rightarrow K^+ + \pi^-$), 신호를 명확히 볼 수 있도록 미리 선별(preselect)되어 있다. 같은 데이터셋에는 진짜 D0 후보가 아니지만 부과된 조건으로 제거할 수 없었던 다른 사건들도 있다. 이 후보들을 이 실습의 맥락에서 배경(background)이라 부른다.

D0 입자의 두드러진 특징은 측정 가능할 만큼 긴 수명이다(이것이 이 실습의 목적이다). 실용적인 관점에서 이는 D0이 양성자-양성자 일차 상호작용에서 변위된 “이차” 꼭짓점을 형성함을 의미한다. 이는 그림 3에 나타나 있다. 이러한 두드러진 특징이 있더라도, 대부분 양성자-양성자 충돌에서 생성된 입자들의 무작위 조합으로 이루어진 배경 사건은 여전히 존재한다.

응용 프로그램 (The application)

여러분은 아래에 설명된 그래픽 사용자 인터페이스(graphical user interface, GUI)를 통해 데이터에 접근한다. 연결에 관해서는 제공된 기술 안내서(technical guide)를 참조하라. 실습 전체의 목표는

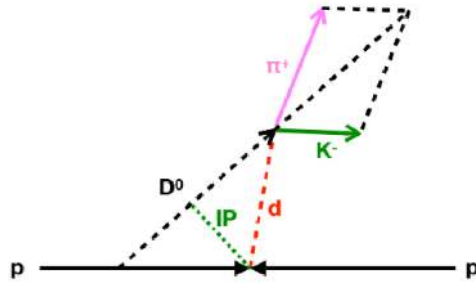
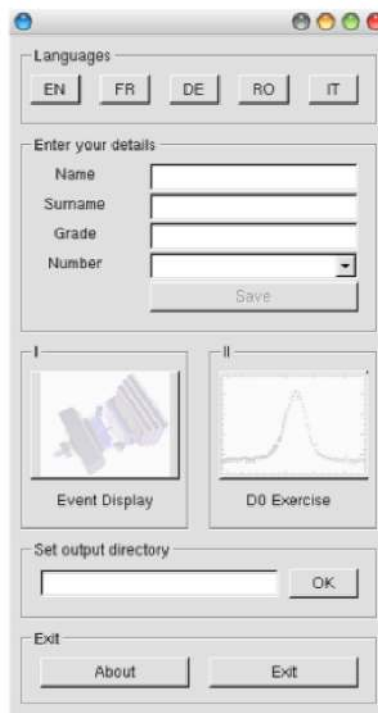


그림 3: pp 상호작용에서 변위된 D0 입자의 이차 꼭짓점("D").

입자 D^0 의 수명과 그에 관련된 측정 불확도를 결정하는 것이다.



응용 프로그램의 그래픽 사용자 인터페이스(GUI)

첫 번째 실습에서는 응용 프로그램의 'Event Display' 부분을 사용하고, 실습 2와 3에서는 'D0 Exercise' 부분을 사용한다.

참고:

- 응용 프로그램의 인스턴스를 둘 이상 병렬로 실행할 수 있다.
- 'D0 exercise' 버튼을 활성화하려면 먼저 'Event display' 부분에서 적어도 하나의 사건을 선택해야 한다.
- 그림, 표, 메모의 최종 저장은 기술 안내서에 따라 응용 프로그램 외부에서 수행한다.
- 대회 중 인터넷 연결이 끊기면 응용 프로그램 내부의 그림은 잃게 되지만, 컴퓨터에 저장된 것은 여전히 가지고 있다.

실습 1: 시각적 탐색 (Exercise 1: Visual search)

이 실습에서는 응용 프로그램의 첫 번째 부분인 ‘Event display’를 사용한다. 여러분은 양성자-양성자 충돌 후 LHCb 실험이 기록한 입자 궤적(“트랙(tracks)”)의 시각화에 접근할 수 있다. 각자 30개의 사건에 접근할 수 있으며, 이들은 ‘Combinations’ 메뉴 탭에서 선택된다. 여러분에게 전달된 번호의 조합을 선택하라.

이벤트 디스플레이를 통해 LHCb 실험의 꼭짓점 검출기에서 D0 입자에 속한 변위 꼭짓점을 찾을 수 있다. 트랙은 색으로 구분되어 있으며, GUI 하단의 범례가 어떤 색이 어떤 종류의 입자에 해당하는지 알려준다. 꼭짓점 식별을 더 쉽게 하기 위해, 한 사건을 세 가지 다른 2차원 투영— $y-z$, $y-x$, $x-z$ —으로 볼 수 있다(한 사건에 대해 그림 4에 표시). 사건마다 서로 다른 투영에서 더 명확하게 보인다! 변위 꼭짓점은 사건 내 다른 트랙들로부터 멀리 떨어진, 서로 교차하는 한 쌍의 트랙으로 나타난다. 입자를 클릭하면 질량과 운동량을 포함한 정보가 Particle Info 상자에 표시된다.

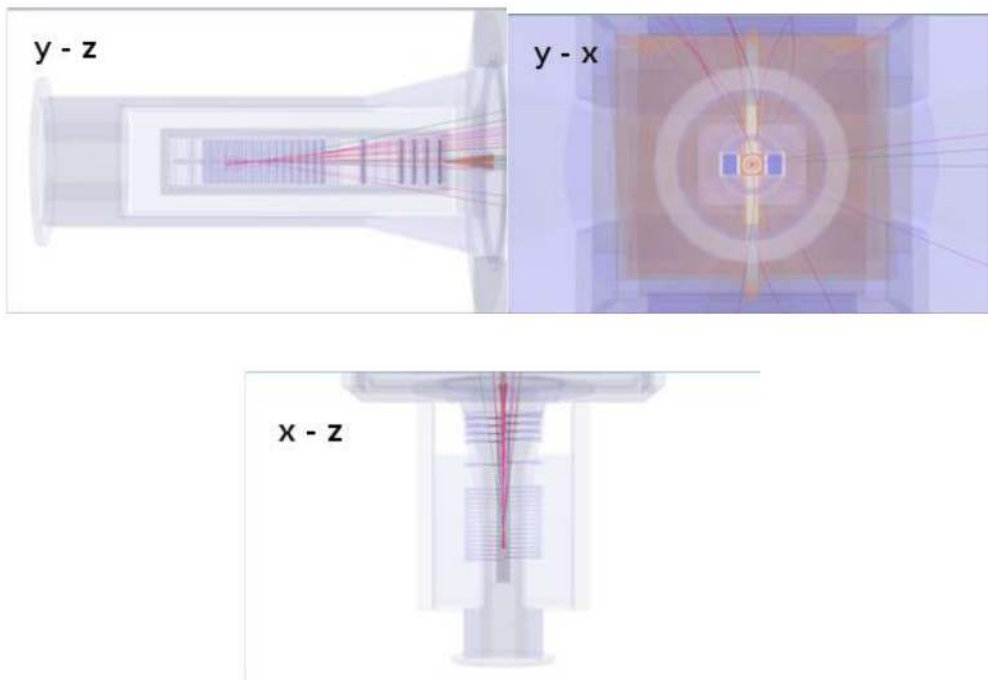


그림 4: 서로 다른 평면 $y-z$, $y-x$, $x-z$ 에서 본 한 사건의 세 가지 모습.

D0 입자는 케이온과 파이온으로 붕괴하므로, 케이온 트랙이 파이온 트랙과 교차하는 변위 꼭짓점을 찾아야 한다. 변위 꼭짓점의 일부라고 생각되는 트랙을 찾으면 Save Particle 버튼으로 저장할 수 있다. 입자 두 개를 저장하면 Calculate 버튼을 클릭하여 그 질량을 계산할 수 있다. 이 조합이 D0 입자와 양립하는 질량을 가진다고 생각되면 Add를 클릭하여 저장하라. 각 사건마다 조합을 저장함으로써, 서로 다른 사건들의 변위 꼭짓점 질량 히스토그램을 만들게 된다.

여러분이 보는 것은 실제 데이터이므로 표본은 신호와 배경을 모두 포함하며, 검출기는 유한한 분해능을 가진다. 따라서 모든 변위 꼭짓점이 정확히 D0 질량을 가지지는 않는다(신호인 것조차도). 그러나 그것들은 1816–1914 MeV 범위 안에 있어야 한다(이 범위는 참 D0 질량을 중심으로 양쪽 약 3%에 해당한다). 실제 D0 질량에서 너무 멀리 떨어진 조합을 저장하려고 하면, 응용 프로그램은 올바른 변위 꼭짓점 쌍을 찾지 못했다고 경고하며 저장을 허용하지 않는다.

○ 과제 (Tasks)

1.1 주어진 사건들을 보고 각 사건에 대해 D^0 또는 $\bar{D}^0$ 후보를 식별하라. 각 사건에서 얻은 후보와 질량을 종이나 전자적으로 기록하라. (응용 프로그램에서) 조합을 전체 질량에 추가하라.

사건 번호 (Evt. no)	# D0 질량 (mass)	# 반-D0 질량 (anti-D0 mass)
x.1		
x.2		
x.3		
...		
...		

한 사건에 대해 변위 꼭짓점을 찾지 못하면 다음 사건으로 넘어가고 나중에 건너뛴 사건으로 돌아올 수 있다. 모든 사건을 살펴본 후, Draw 버튼을 클릭하여 질량 히스토그램을 검토할 수 있다.

1.2 기록한 데이터로, 이전 과제와 비슷한 히스토그램을 D0과 반-D0 후보에 대해 각각 구분하여 그려라. 두 종류 후보의 개수 비율을 계산하라.

실습 2: D^0 의 수명 측정 (Exercise 2: Measure the lifetime of D^0)

이 실습에서는 응용 프로그램의 두 번째 부분인 “D0 exercise”를 사용한다. 이 실습의 목적은 약 50000개 사건의 데이터 표본을 사용하여 D0 입자의 수명을 측정하는 것이다. 이는 방사성 입자의 반감기와 같은 양이다. D0은 지수 분포(exponential distribution)에 따라 붕괴하며, 이 지수 함수를 D0 붕괴 시간 분포에 맞추면(fit) 이 지수 함수의 기울기가 D0의 수명이 된다.

정의 (Definitions)

실습을 시작하면 데이터의 그래프를 그리고, 변수의 범위를 바꾸며, 불변 질량(invariant mass)과 D0의 수명을 맞춤(fit)할 수 있다. 실습에는 다음 변수들이 나타난다:

- **D0 mass:** D0 입자의 불변 질량이다. 신호는 배경 위로 솟아오른 봉우리 구조로 보인다. 이 분석에 관련된 질량 범위는 1816-1914 MeV이다. 신호 모양은 가우스(Gaussian, “정규(normal)”라고도 함) 분포로 기술된다. 이 분포의 중심(“평균(mean)”)은 D0 입자의 질량이고, 너비는 검출기의 실험적 분해능을 나타낸다.
- **D0 TAU:** D0 후보의 붕괴 시간 분포이다. 신호는 단일 지수 함수로 기술되며, 그 기울기가 D0 수명이다.
- **D0 IP:** 사건의 양성자-양성자 상호작용에 대한 D0의 최근접 거리(“충돌 매개변수(impact parameter)”)이다. 충돌 매개변수가 작을수록 D0이 실제로 그 일차 상호작용에서 나왔을 가능성이 높다. 그리기를 단순화하기 위해, 실습에서는 실제로 이 양의 (밀이 10인) 로그를 그리고 잘라낸다(cut).
- **D0 PT:** LHC 빔라인에 수직인 D0의 운동량이다.

신호 맞춤: 질량 분포와 수명 (Fitting the signals: mass distribution and the lifetime)

응용 프로그램은 D0의 질량과 수명 두 변수에서 신호 맞춤을 수행한다. 여러분의 선택은 위에서 언급한 네 변수의 범위를 선택하여, 신호를 선택(측정)하고 배경 사건을 제거하는 것이다. 수명 값을 얻기 위해 아래에 설명된 배경 차감(background subtraction) 방법을 사용한다.

1. Plot D0 mass 버튼을 클릭하여 전체 질량 분포를 그린다. 분포(배경) 위에 봉우리(신호)가 보일 것이다. 이 봉우리는 가우스 함수로 기술되어야 하며, 그 평균은 D0의 질량에, 너비(σ)는 LHCb 검출기의 실험적 분해능에 대응한다.
2. Fit mass distribution을 클릭하여 신호는 가우스 함수로, 배경은 선형 함수로 이 분포를 맞춤다.
3. 맞춰진 질량 분포를 본다. 이를 세 영역으로 나눌 수 있다: 신호 영역(signal region)과, 신호 위쪽의 측대역(upper sideband) 및 신호 아래쪽의 측대역(lower sideband)이라는 두 개의

배경만 있는 “측대역(sidebands)”.

4. Sig range라고 표시된 슬라이더를 사용하여 신호 영역의 시작과 끝을 정의한다. 신호 영역에 들지 않는 모든 사건은 배경 영역(background region)에 든다고 한다.
5. 이제 질량 변수에서 정의한 신호 영역과 배경 영역을 사용하여 다른 변수들에서의 신호 분포와 배경 분포를 결정할 수 있다. Apply cuts and plot variables라고 표시된 버튼을 클릭한다. 나머지 세 변수에 대한 신호(파랑)와 배경(빨강) 분포가 질량 분포 옆에 그려진다.

또한 어떤 컷(cut)을 적용한 후에는 언제든지 D0의 수명을 맞출 수 있다. 여러분이 수행하는 각 수명 맞춤을 측정(measurement)이라 부른다. 컷을 바꾸어 더 많은 측정을 수행할 수 있다.

○ 과제 (Tasks)

2.1 D0 질량에 대한 범위를 정의하라. 이것이 여러분의 ‘신호 영역’이 되어야 한다. 사용한 기준에 대해 설명하라.

2.2 맞춤을 수행하여 D0 수명의 값과 통계 오차(statistical error)를 구하라.

2.3 통계 불확도 외에도, 측정은 잘못 보정된 장치나 배경의 부정확한 모형화로 인한 계통 불확도(systematic uncertainties)를 겪을 수 있다. 이를 추정하는 한 가지 기본 기법은 신호 사건을 선택하는 데 사용한 기준을 바꾸면서 측정을 반복하는 것이다. 기준을 바꿀 때 결과가 크게 변하면, 무언가 잘못되었음을 알 수 있다! D0의 최대 허용 충돌 매개변수를 바꾸면서 D0 수명에 대한 맞춤을 반복하라. 허용되는 값은 원래 맞춤에서 -4.0 부터 1.5 까지이다. 이 상한값을 적어도 10 지점만큼 아래로 내리고 얻은 수명의 그래프를 그려라. 응용 프로그램이 이 점들을 기록하고 그래프를 그려준다. 그래프를 (응용 프로그램 외부에서 ‘print screen’이나 ‘snipping tool’을 사용하여) 저장하고 2.3_YOURCODE로 이름 붙여라. 이는 제출이 요구된다.

화면에 표시된 값을 다음과 같이 표에 적어 두면 도움이 된다:

	IP	t (수명, lifetime)	오차 (통계, statistical)
1	1.5	...	...
2	...	...	...
3	...	...	...
4	...	...	...
...	...	...	...

2.4 여러분이 얻은 시그마(sigma) 모양의 그래프는 계통 효과(systematic effect)의 존재를 나타내며, 일단 식별되면 제거할 수 있다. 이 계통 효과의 원인에 대한 가설을 세워라.

2.5 충돌 매개변수의 상한 컷의 함수로서 수명의 모양을 볼 때, 어디를 수명의 ‘올바른’ 값으로 보겠는가? 그래프에서 이 ‘올바른’ 값이 놓일 곳에 대한 기준을 제시하라. 다른 변수들에 대해서도 같은 작업을 할 것이므로, 그 경우에도 적용할 수 있도록 기준은 일반적이어야 한다.

2.6 위에서 찾은 기준에 근거하여 D0 수명의 최선의 값인 공칭값(nominal value)과 그 주위의 범위를 선택하라. (이후 이 범위를 측정의 계통 오차를 추정하는 데 사용한다.)

2.7 D0 TAU 변수에 대해 단계 2.3과 2.6을 반복하여 수명의 올바른 값을 ‘개선’하라. 위에서 제안한 표를 만들어라. 그래프를 그리는 것은 선택 사항이며, 응용 프로그램은 이를 수행하지 않는다.

2.8 D0 PT 변수에 대해 단계 2.3과 2.6을 반복하라.

2.9 D0 수명의 최종값인 공칭값과 그에 관련된 통계 오차를 제시하라.

실습 3: 계통 오차 (Exercise 3: Systematic errors)

앞서 여러분은 초기 데이터셋에 존재했고 제거할 수 있었던 계통 효과의 예를 보았다. 다른 계통 불확도의 원천은 현상, 검출기, 또는 측정에 사용한 방법으로 인해 여러 이유로 존재할 수 있다. 수명의 공칭값을 선택하는 것은 연구에 사용 가능한 모든 변수에 대해 어떤 범위를 선택하는 것도 포함했다. 이 값들의 상한 컷(또는 하한 컷)을 바꾸어 수명에 대한 더 많은 결정값을 얻을 수 있다. 이러한 변동의 연구는 D0 수명 결정에 이 방법을 사용함으로써 생기는 계통 효과의 추정값을 줄 수 있다.

○ 과제 (Tasks)

3.1 사용 가능한 모든 종속 변수에 대해 D0 수명의 계통 불확도를 조사하라. 각 변수의 정의된 범위를 사용하여 추가 측정을 수행하고 계통 불확도 값을 추출하라.

참고: 각 불확도 원천이 채점된다. 다른 변수들을 고정한 채 한 번에 하나의 변수만 바꿔라.

3.2 식별한 D0 수명의 통계 및 계통 불확도에 대한 최종값을 제시하라.

3.3 계산한 불확도들을 순서대로 정렬하고, 어떤 원천이 여러분 연구의 정밀도를 가장 크게 제한하는지 설명하라.