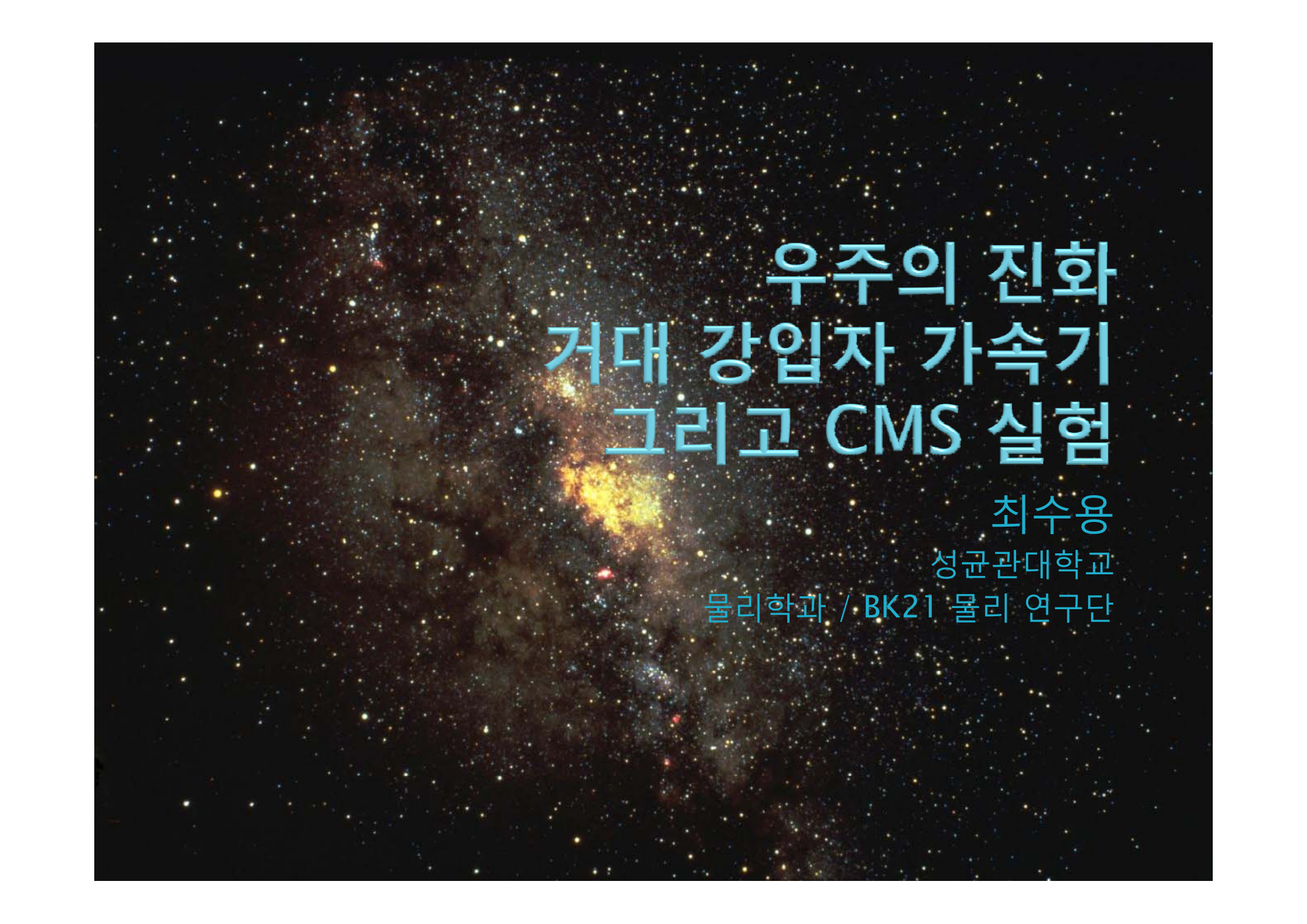




우주의 진화 거대 강입자 가속기 그리고 CMS 실험

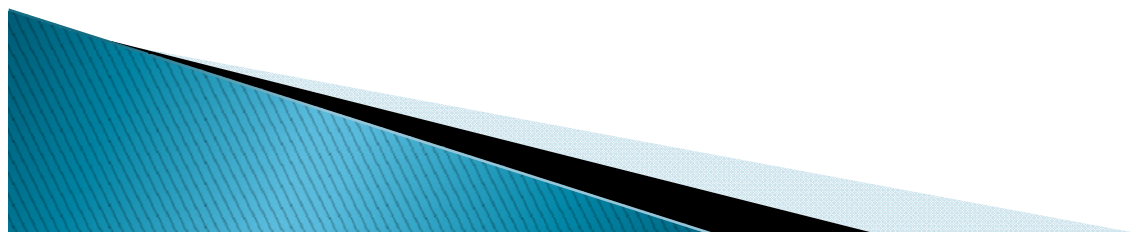
최수용

성균관대학교

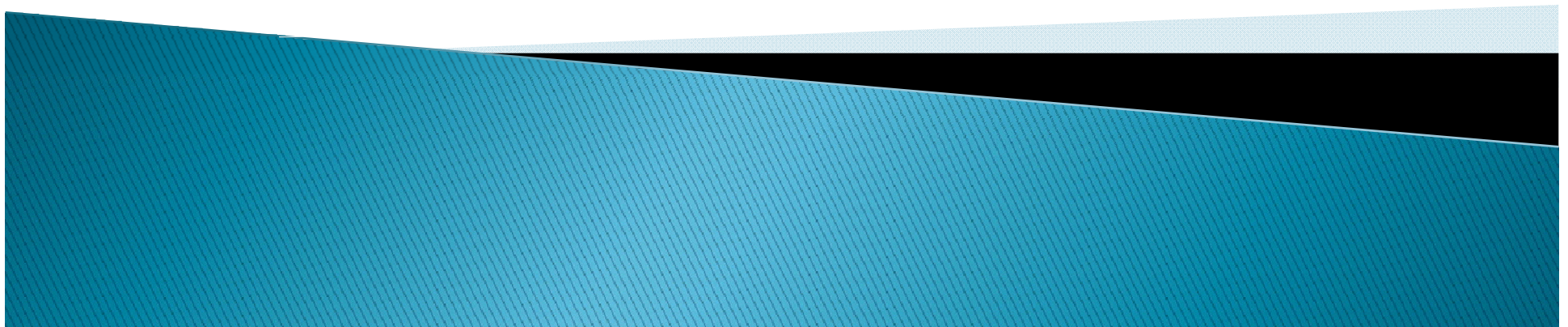
물리학과 / BK21 물리 연구단

목차

- ▶ 자연의 구조와 입자의 발견
- ▶ 거대 강입자 가속기 (LHC)
- ▶ CMS 검출기
- ▶ 무엇을 찾을 것인가
- ▶ 전망

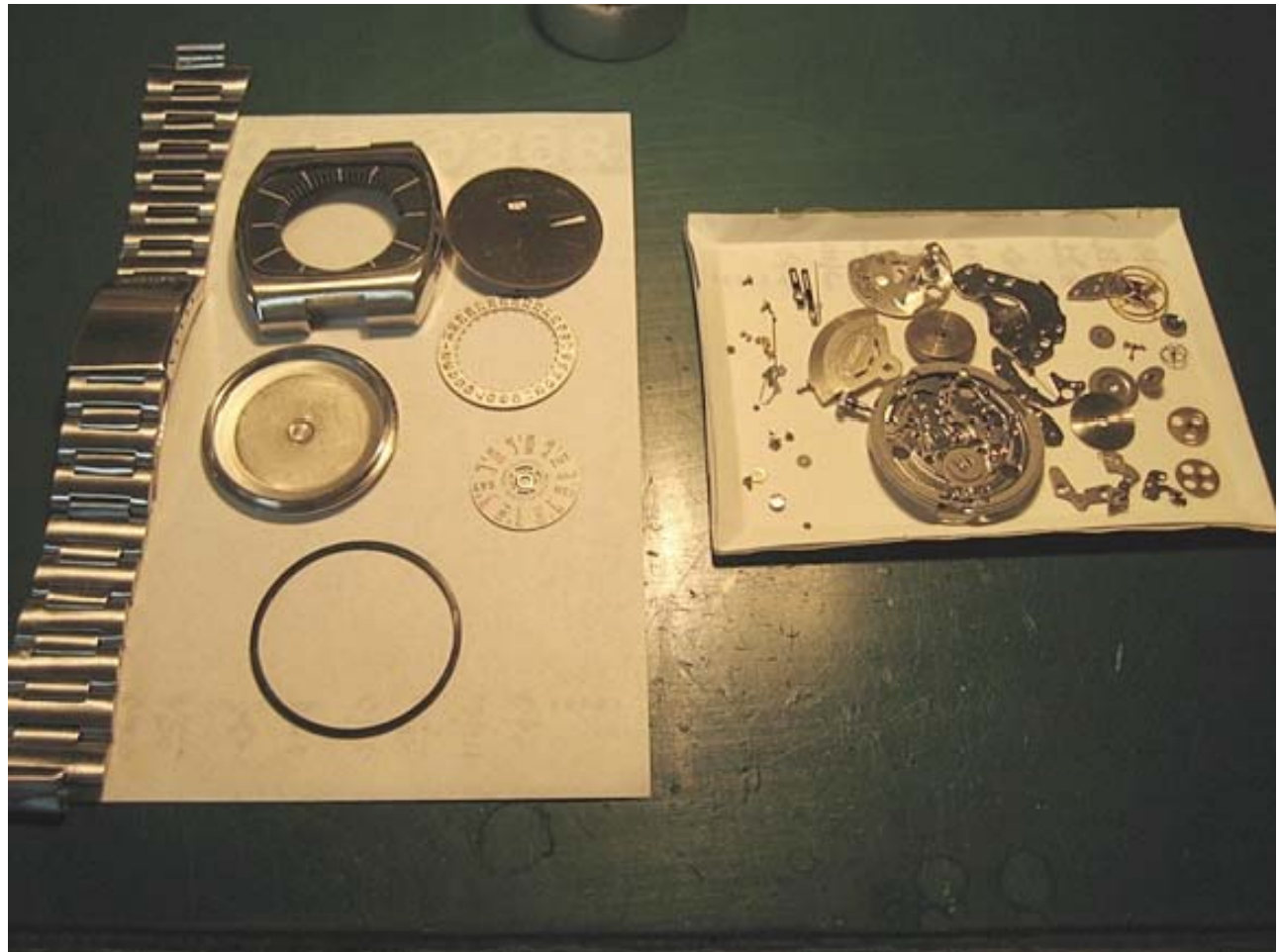


자연의 구조와 입자의 발견



자연의 구조

- ▶ 구조 - 분해
- ▶ 부품의 역할
 - 상호작용



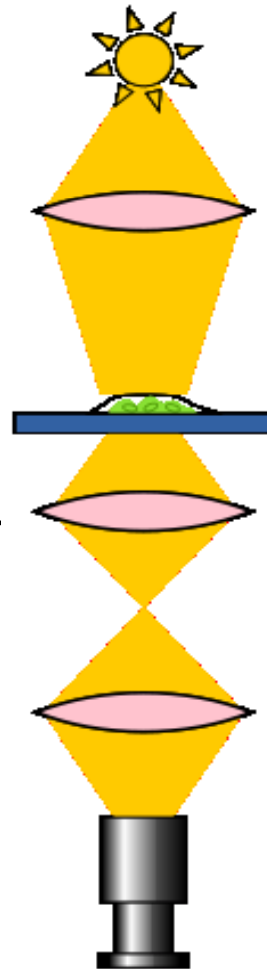
작은 세계 탐구

▶ 현미경

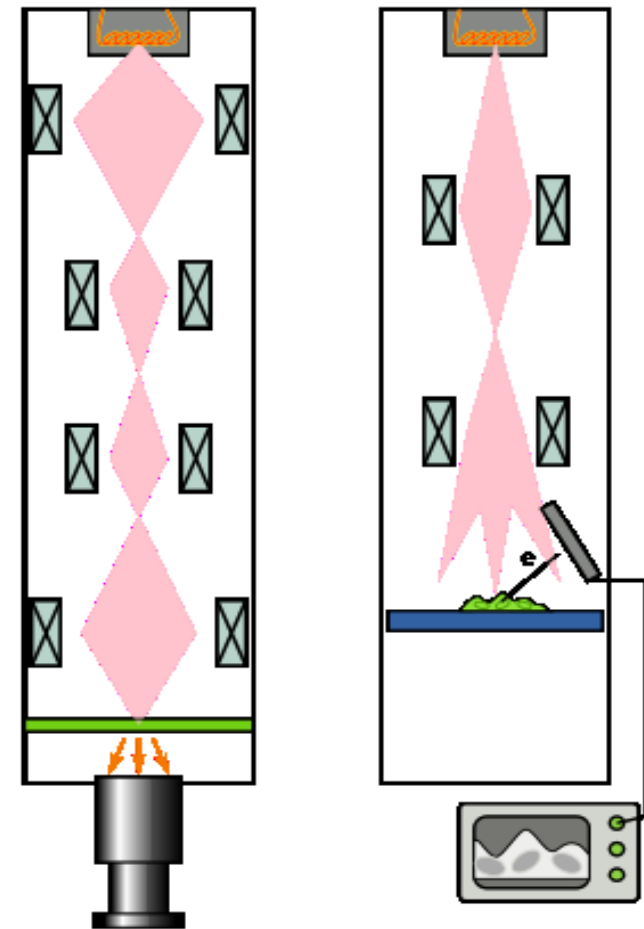
- 광학 현미경
- 전자 현미경
- 피사체와 상호작용

▶ 구분할 수 있는 크기와 파장과 비례

광학 현미경

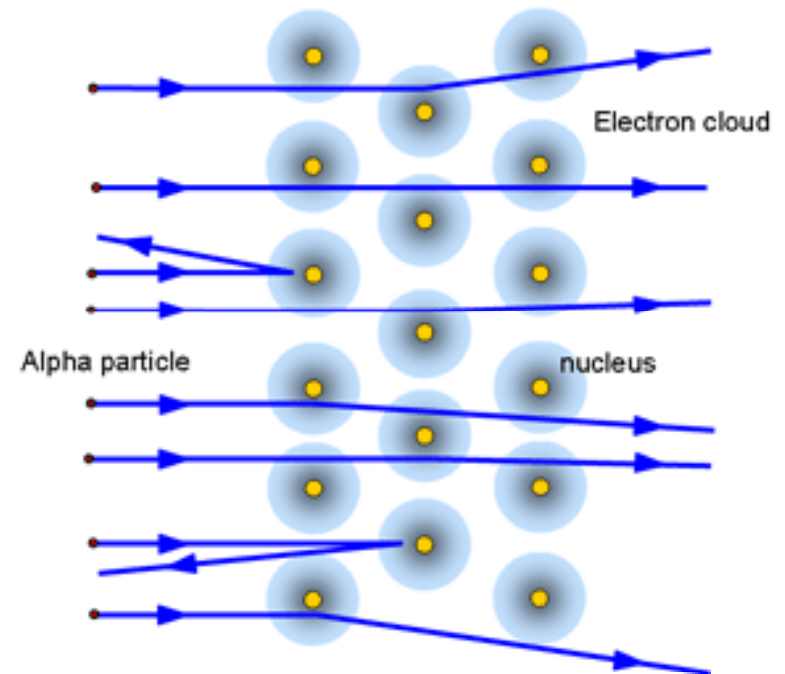


전자 현미경



원자보다 작은 세계

- ▶ 더 짧은 파장의 빛 또는 물질파
 - 운동량 큰 입자
- ▶ 러더포드 산란 실험
 - 알파 입자 - 원자핵 충돌
- ▶ 더 큰 에너지로 충돌시키면?

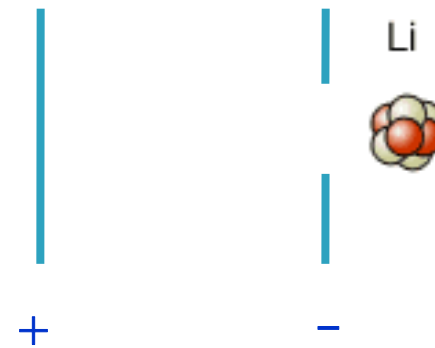


입자 가속기

- ▶ 1932년 Cockcroft & Walton 최초의 가속기
 - 전하를 가진 입자를 전압을 가해서 가속



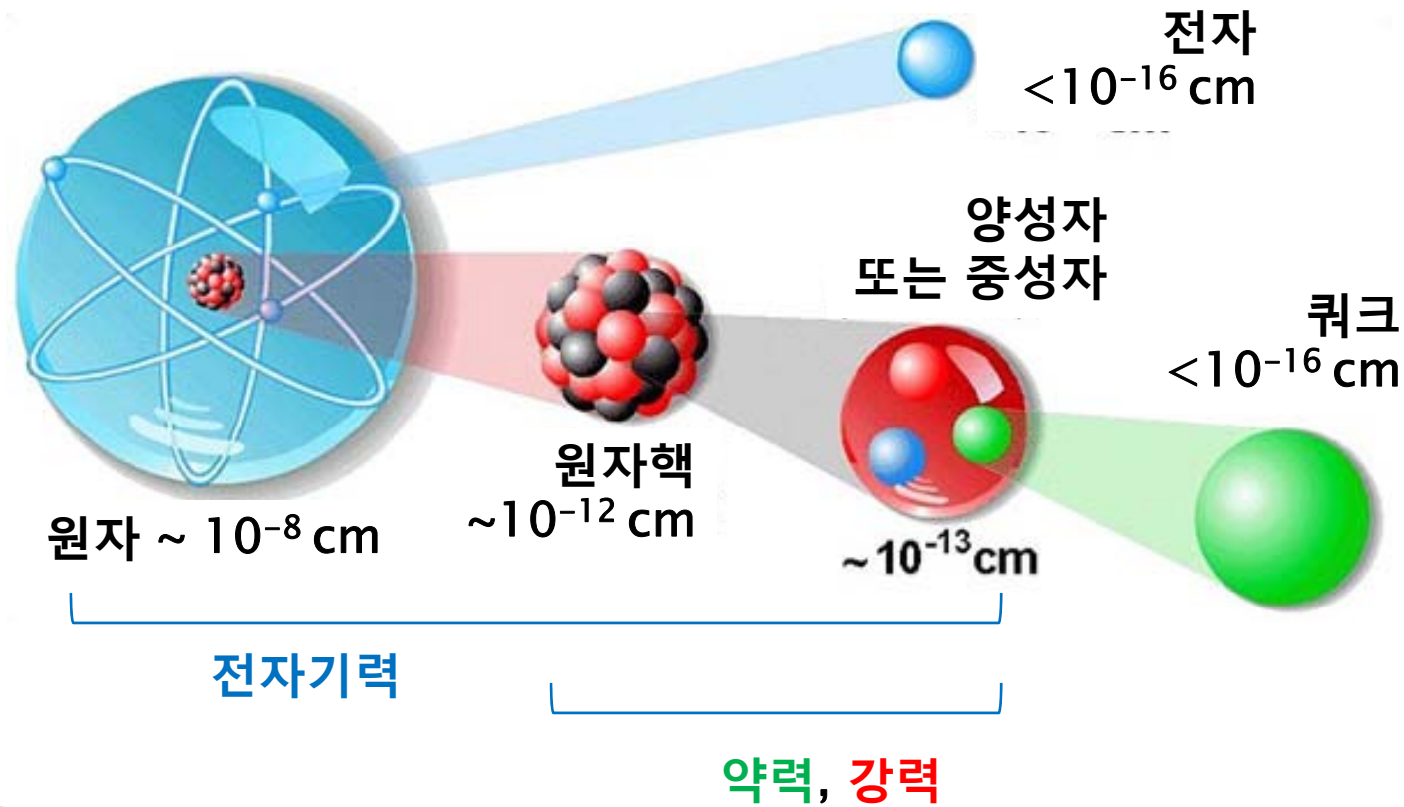
양성자(+)를 가속 리튬판을 때림



800,000 볼트 전압

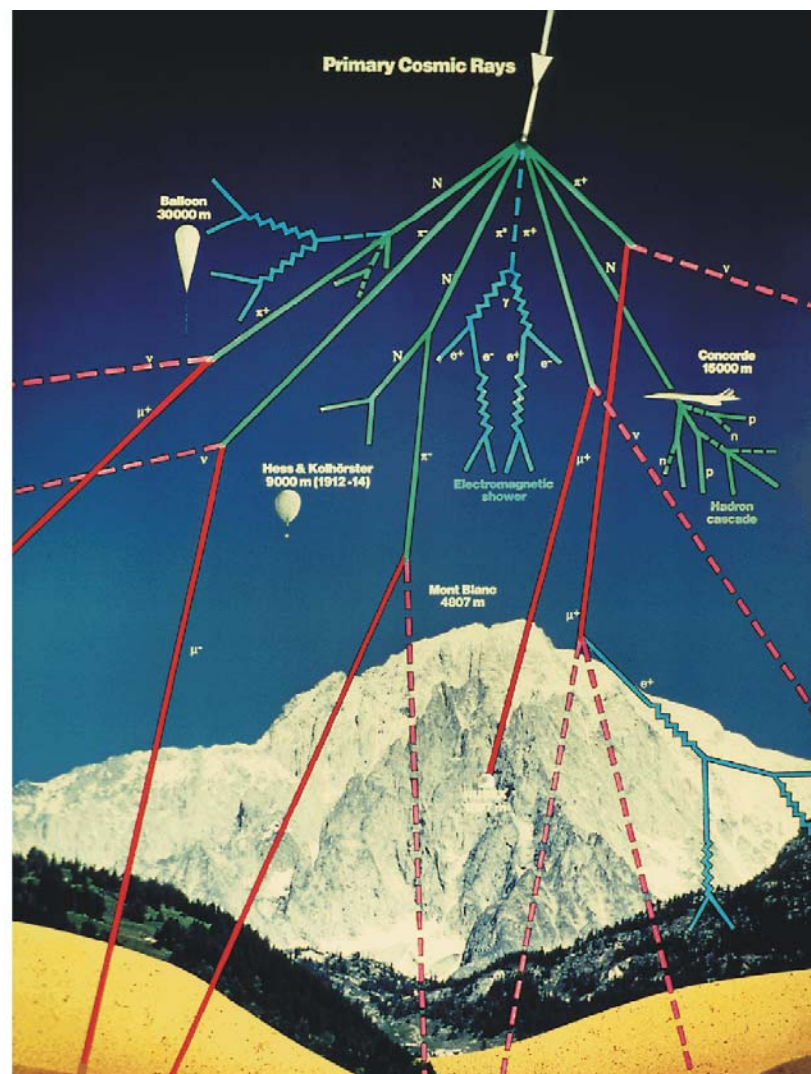
우리를 구성하는 것

▶ 구조가 없는 것 - 입자



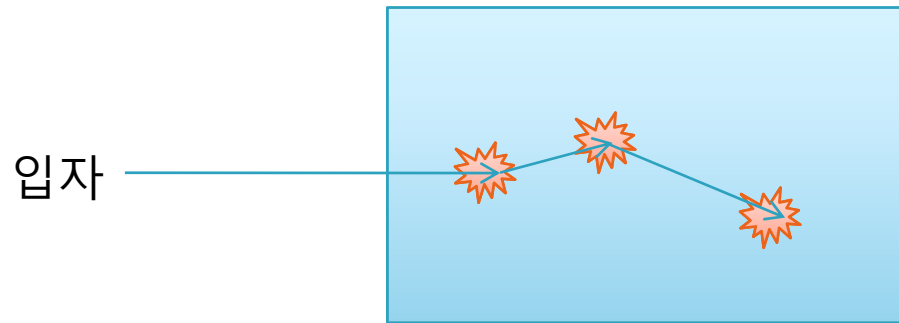
우주선 - Cosmic Rays

- ▶ 공기를 이온화 하는 그 무엇
 - 1912년 V. Hess
 - 머리위로 1초에 한 개
- ▶ “누가 그것을 주문했나?”
 - I.I. Rabi
 - 1936년 뮤온 발견
C. Anderson



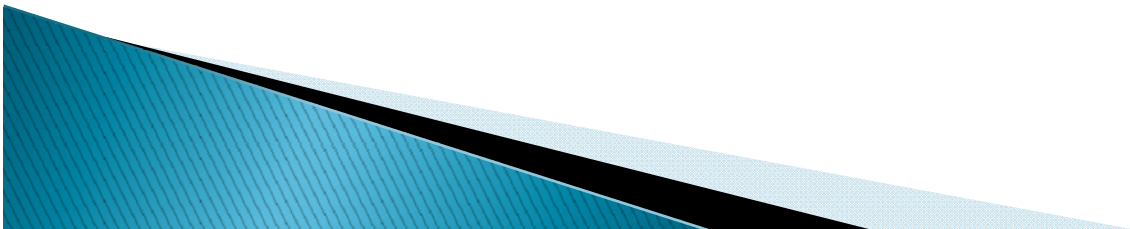
입자 어떻게 검출하나?

▶ 입자와 매질 반응



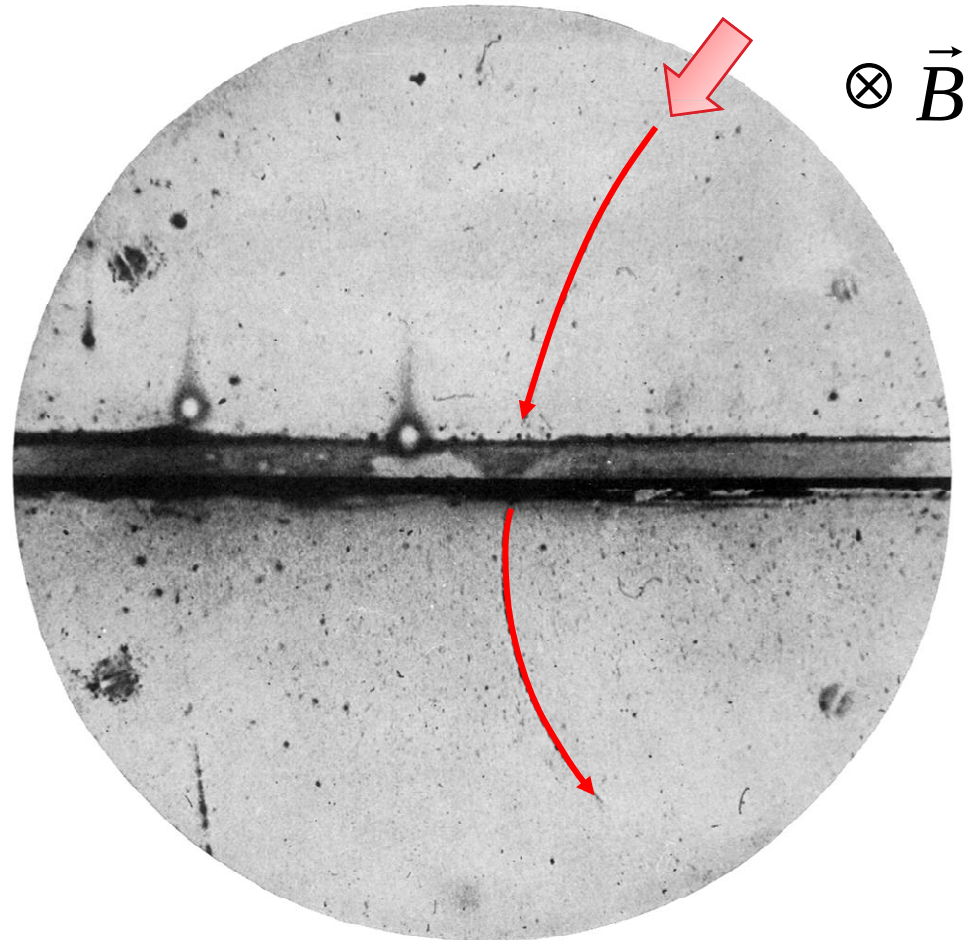
◦ 운동 에너지 → 이온화 → 빛 (섬광), 온도 변화, 전기 신호

▶ 입자가 매질을 이온화 → 검출 가능



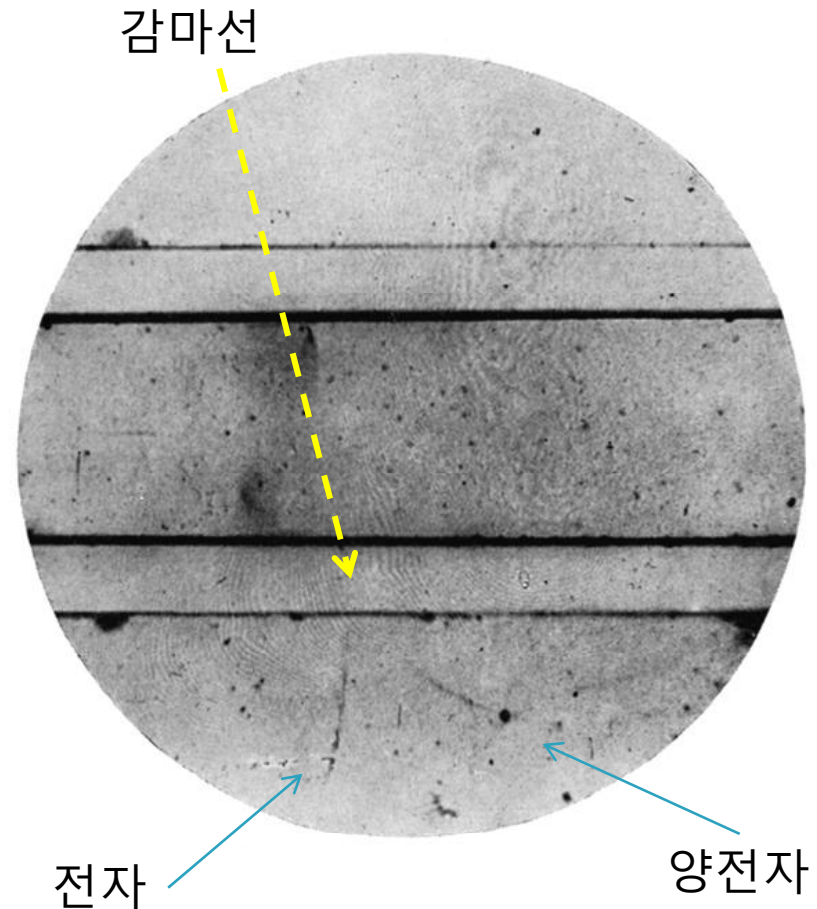
반입자란?

- ▶ 1932년 우주선 사건
 - 양전자가 납판 투과
 - 전하, 운동량, 질량
 - C. Anderson 1936년 노벨 물리학상
- ▶ 반입자
 - 질량은 입자와 같고
 - 전하는 반대



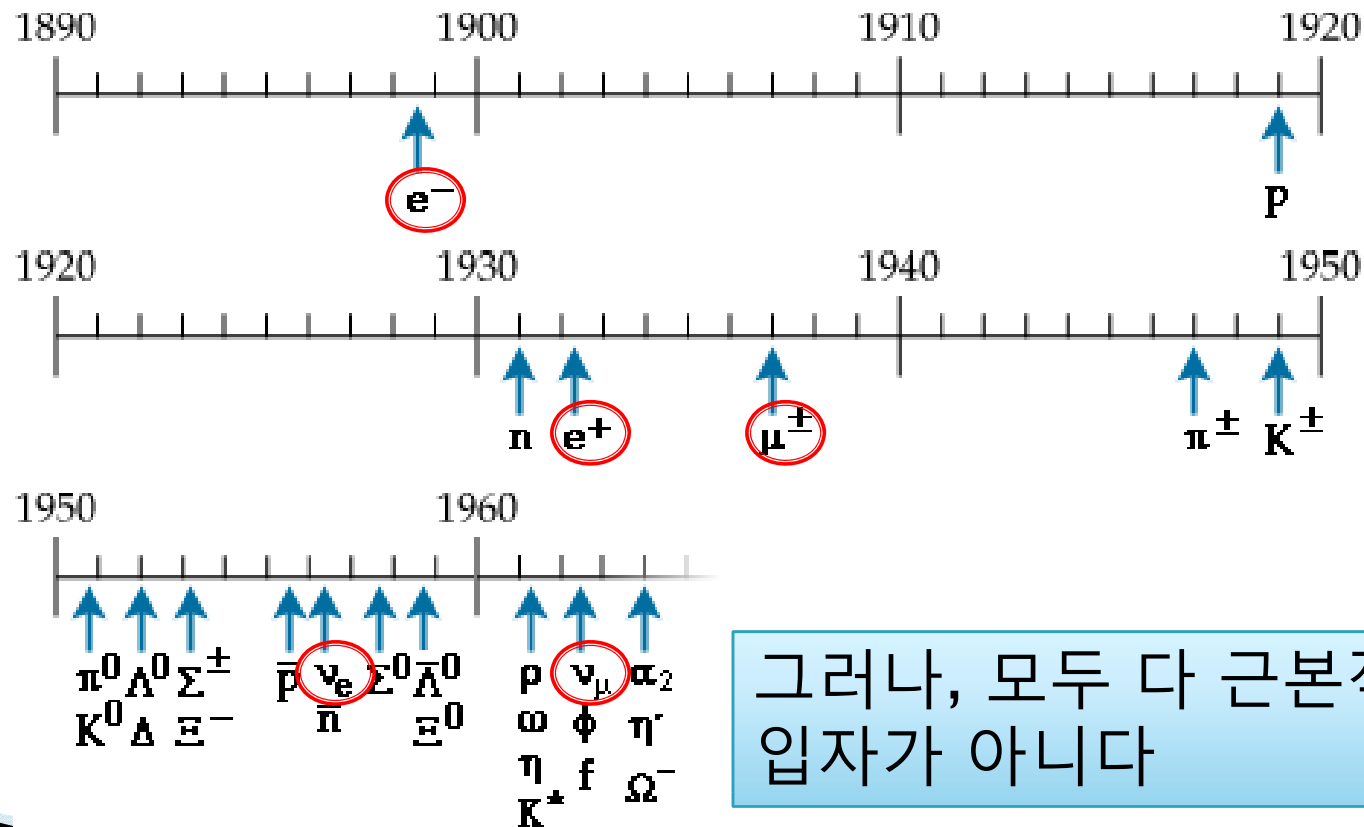
반입자의 생성과 소멸

- ▶ 에너지 (감마선)
→ 전자 + 양전자
- ▶ $E=mc^2$
- ▶ 입자 - 반입자 수
보존
- ▶ 같은 질량을 지닌 입
자와 반입자가 만나면
소멸 → 에너지



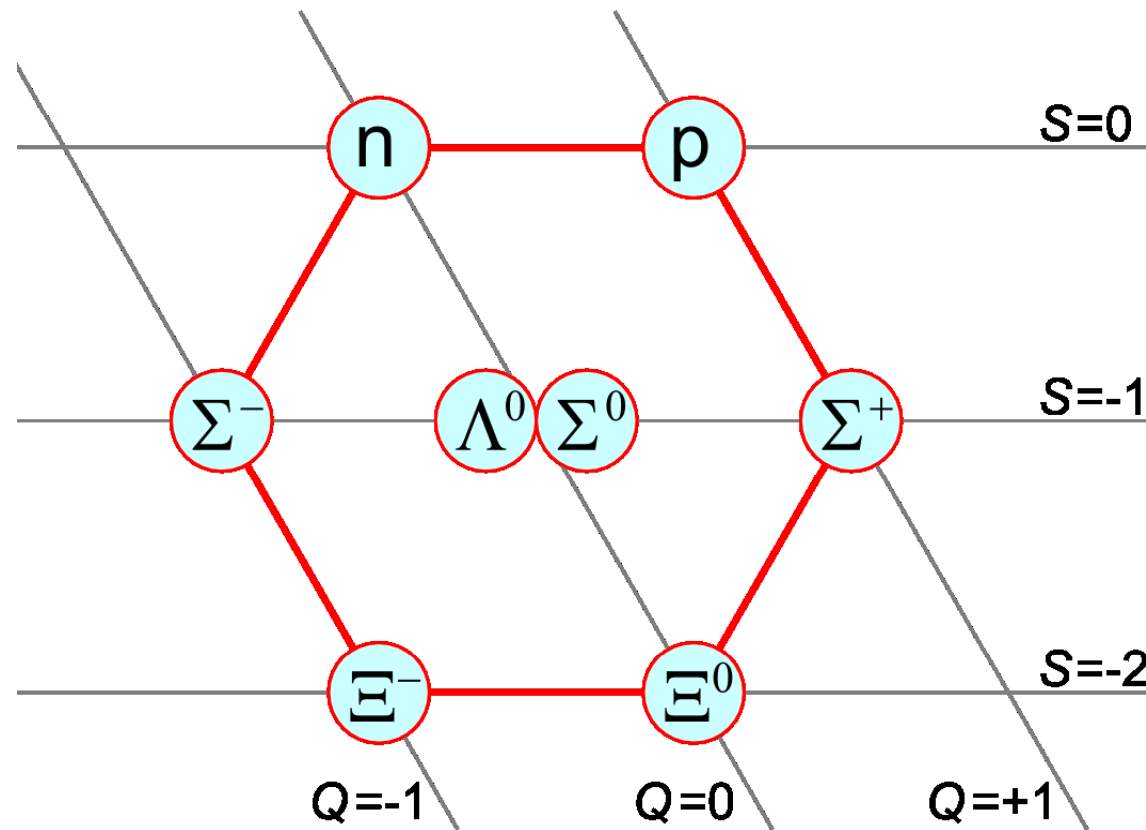
입자들의 발견

- ▶ 관측 및 직접 실험으로 많은 입자가 발견 됐다



그러나, 모두 다 근본적인 입자가 아니다

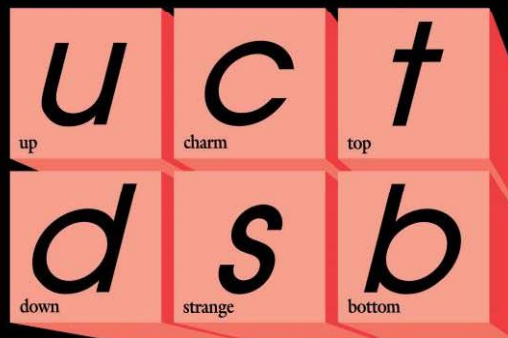
규칙성



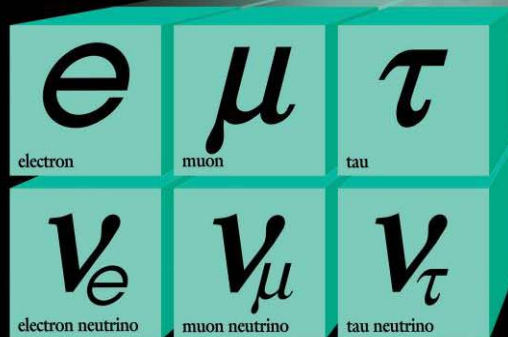
- ▶ 강한 상호작용을 하는 입자는 쿼크로 이뤄져 있다
 - Gell-Mann 1969년 노벨 물리학상

표준 모형의 입자

쿼크

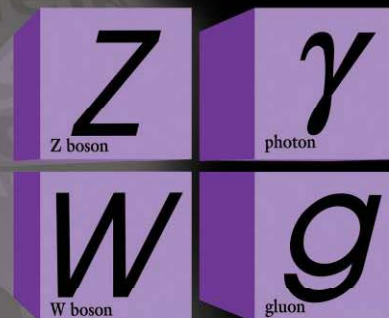


12개 입자
12개 반입자



경입자

힘 매개 입자



힉스 입자는
아직 발견 안됐음

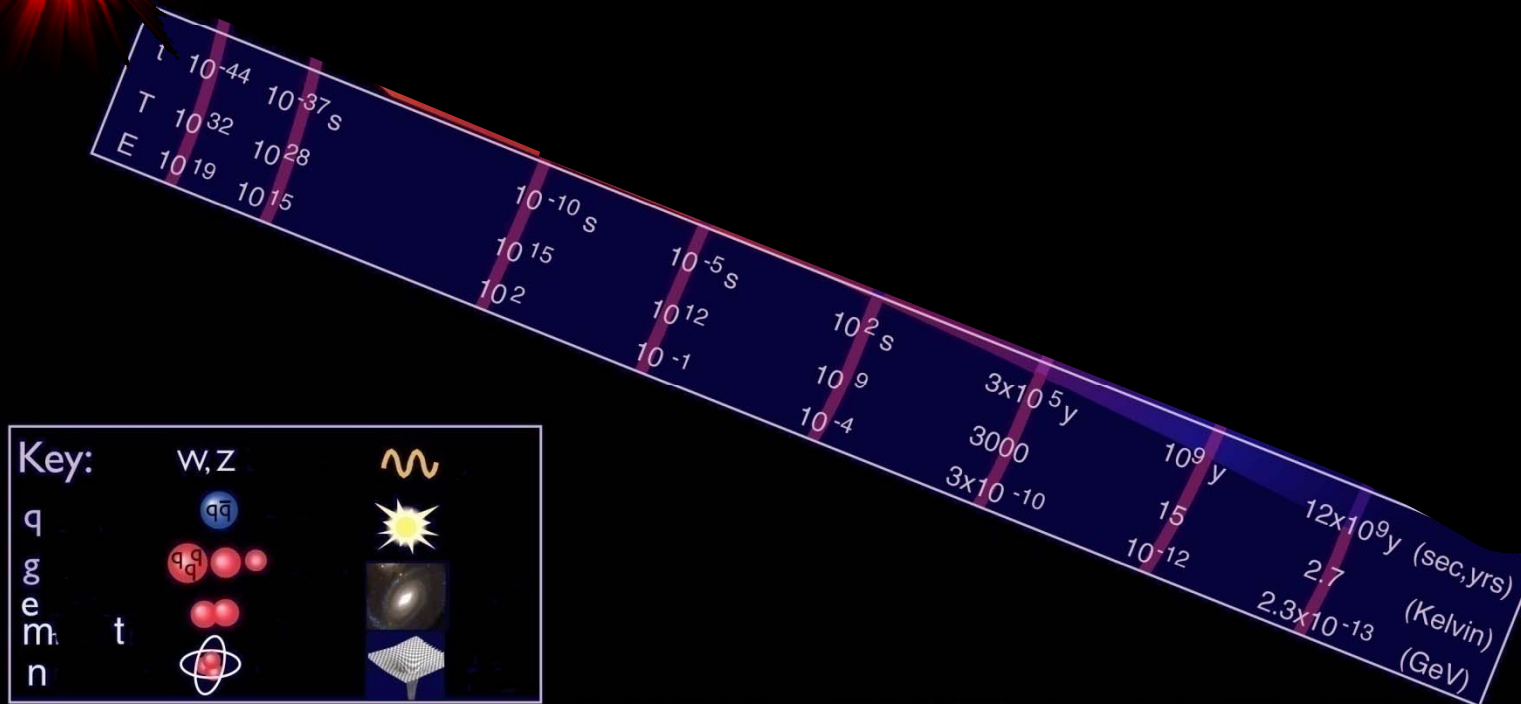
우주의 역사

별, 은하 생성

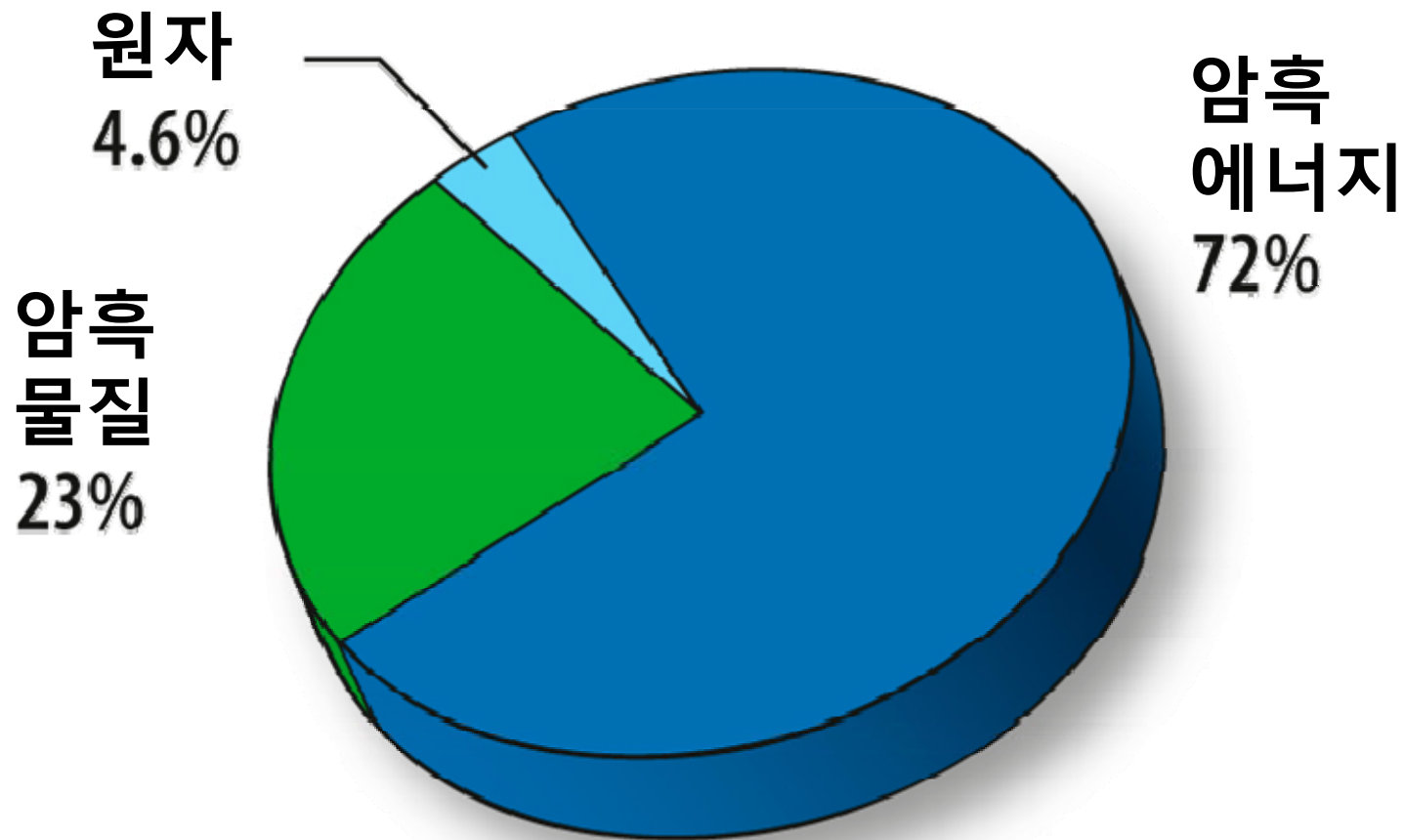
원자핵, 원자 생성

원자핵 생성 후 원자 소멸, 일부 입자 남음
입자, 한 입자 양의 쌍 생성, 중성자, 핵자 만들

빅뱅



우주의 에너지 분포



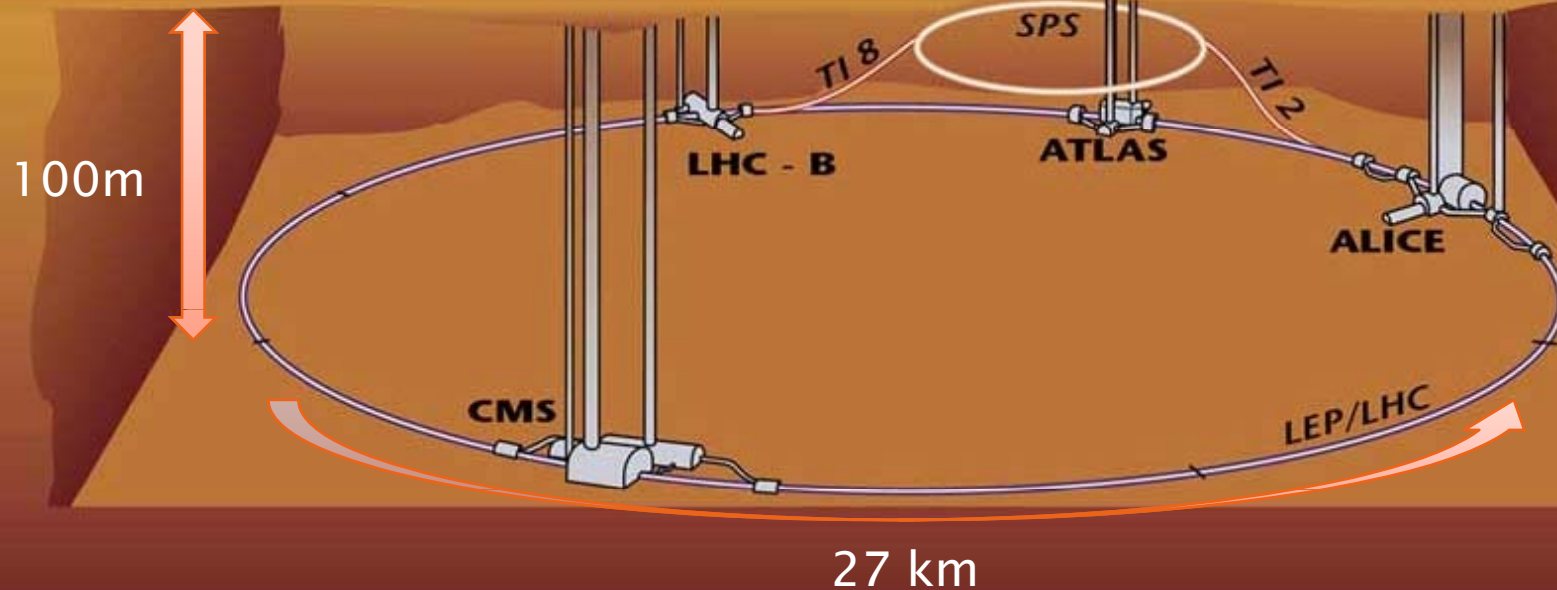
현재

우주의 5%만 이해하고 있다
새로운 현상 있어야 한다

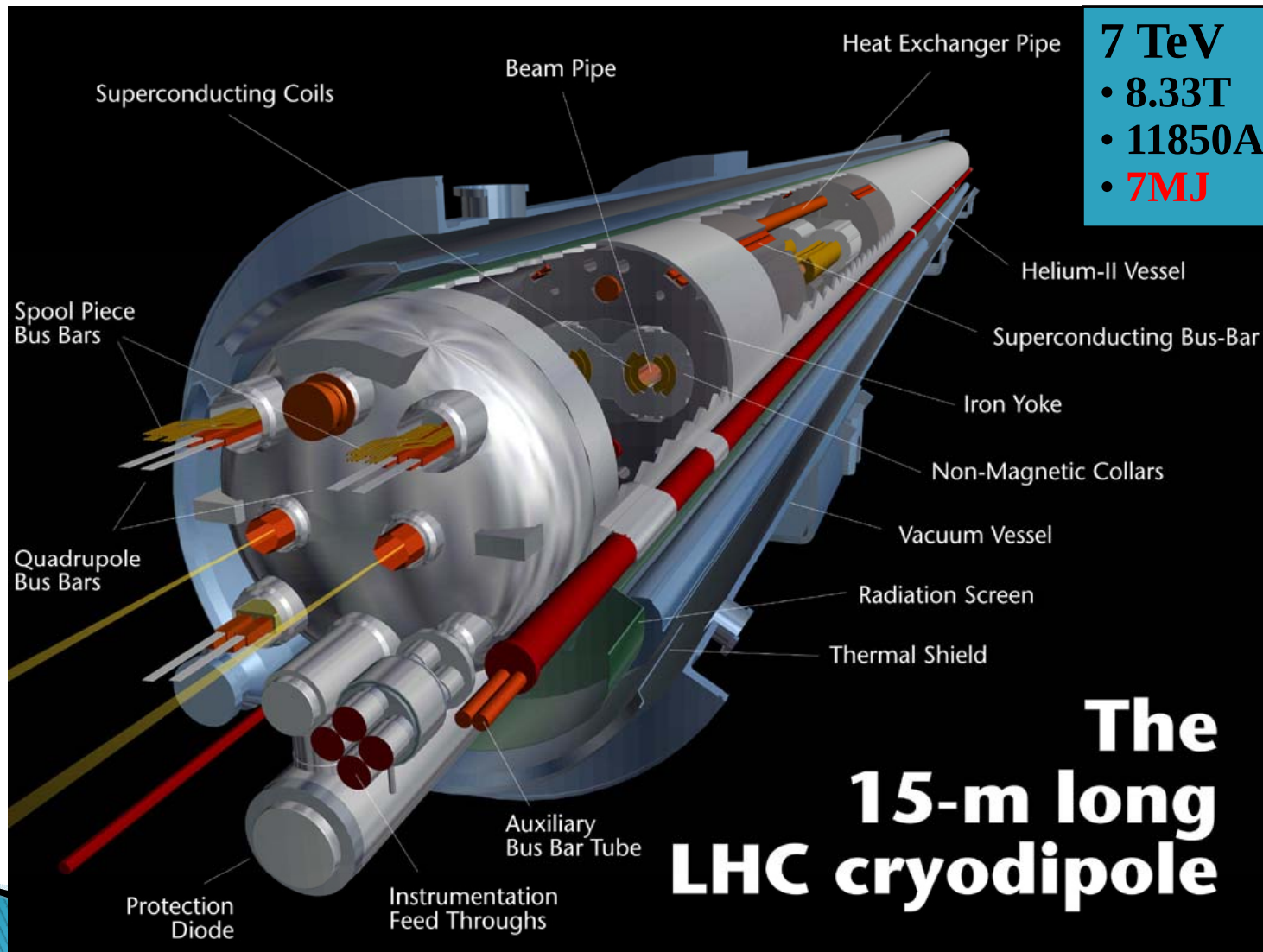
Large Hadron Collider

거대 강입자 가속기

스위스, 제네바

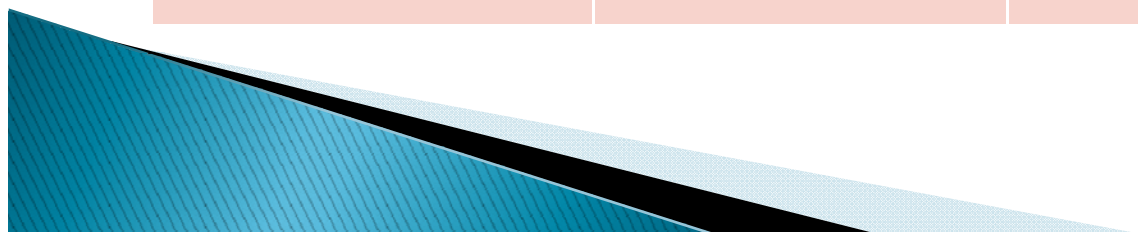


LHC 가속기



LHC 가속기 주요 제원

사양		비고
길이	27 km	세계 최대 가속기
질량	40,000 톤	
가격	4~10조원	우리나라 예산 3~6%
작동 온도	섭씨 -271 도	우주 평균 온도 보다 1도 낮음
진공도	10^{-13} atm	달보다 10배 낮은 진공도
가속 입자	양성자	강입자
입자 에너지	7 TeV	광속의 99.999999%
소모 전력	120 MW	~ Geneva시 소비 전력
액체 헬륨	700,000 리터	

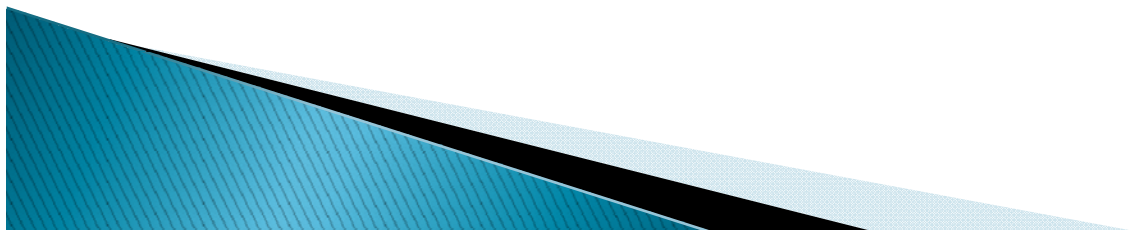


LHC 빔의 에너지

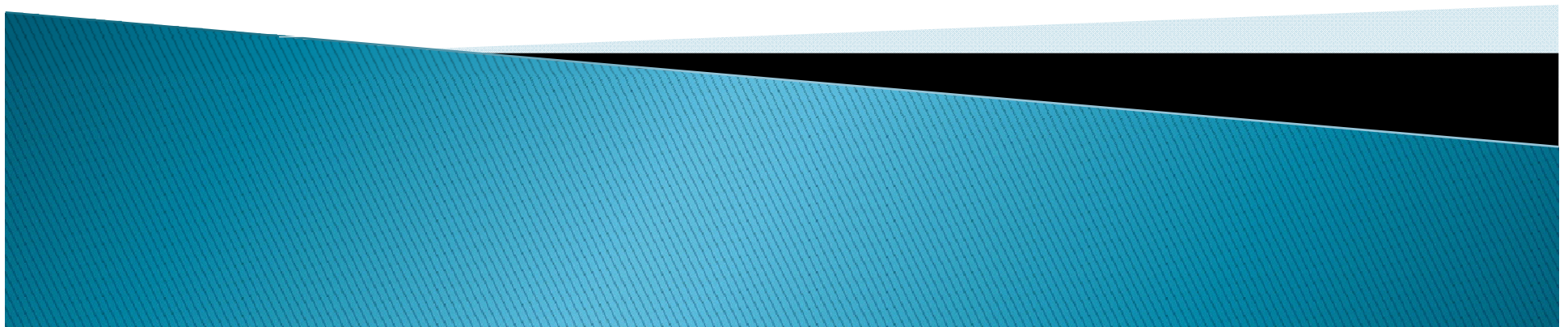
- ▶ 양성자 beam
 - 10^{14} 개의 양성자
 - 질량: 0.000000000001 g
 - 빔 굵기: 15 마이크로미터 ~ 머리카락 굵기의 1/10
 - 빔 길이: 2.2m
- ▶ 100 km/h 로 움직이는 KTX (800톤)의 운동 에너지



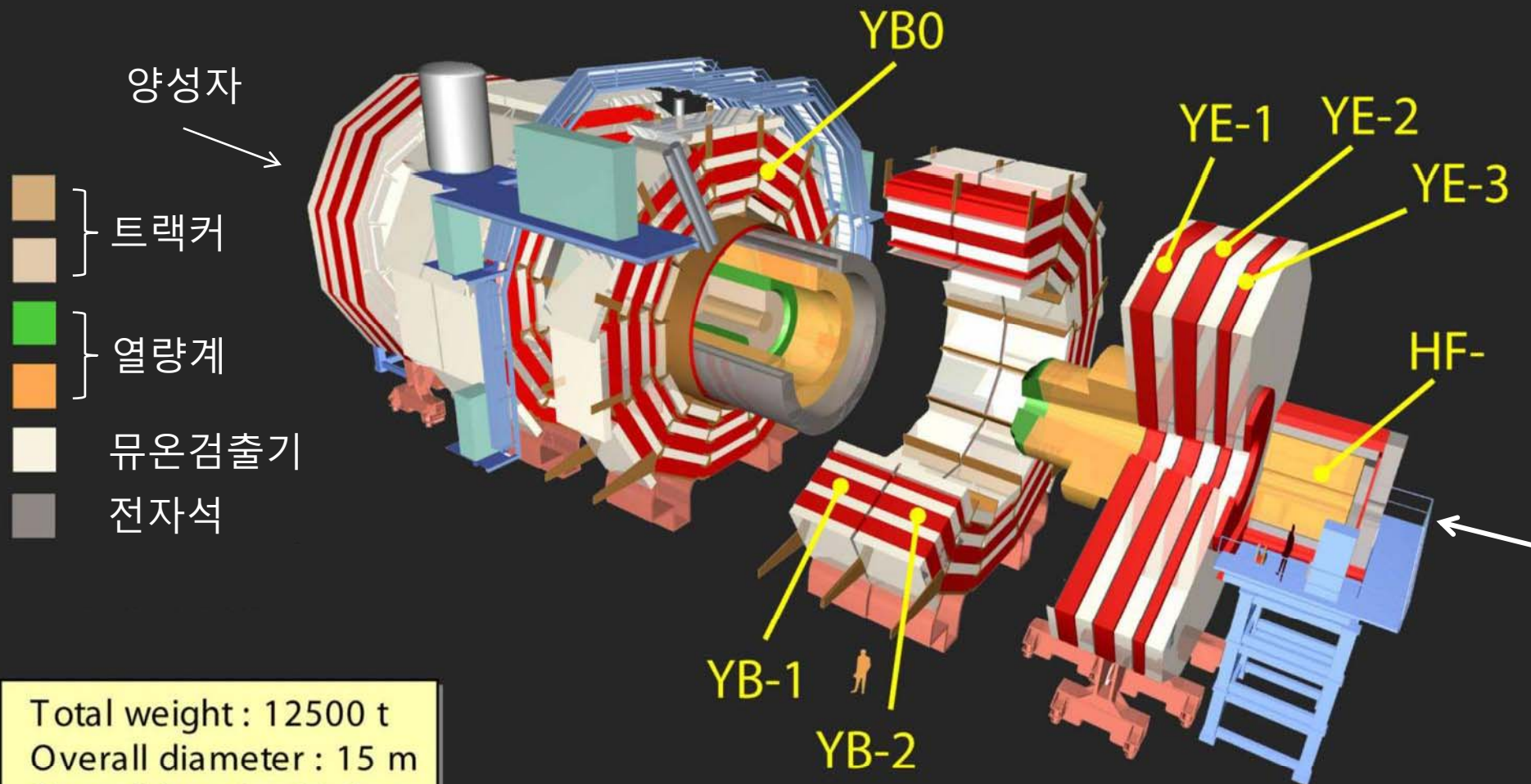
CERN의 양성자 가속기



CMS 입자 검출기



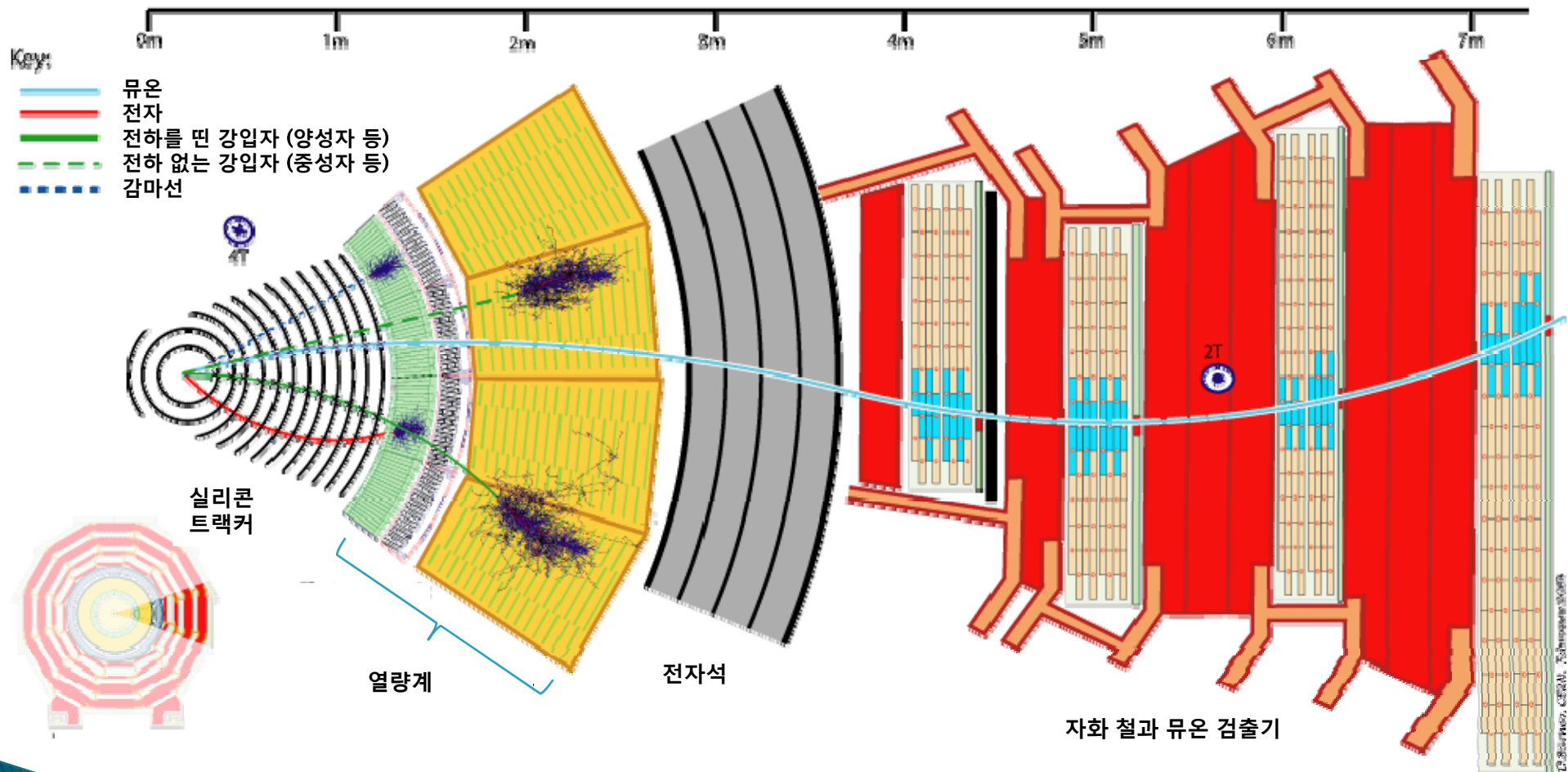
Compact Muon Solenoid 검출기



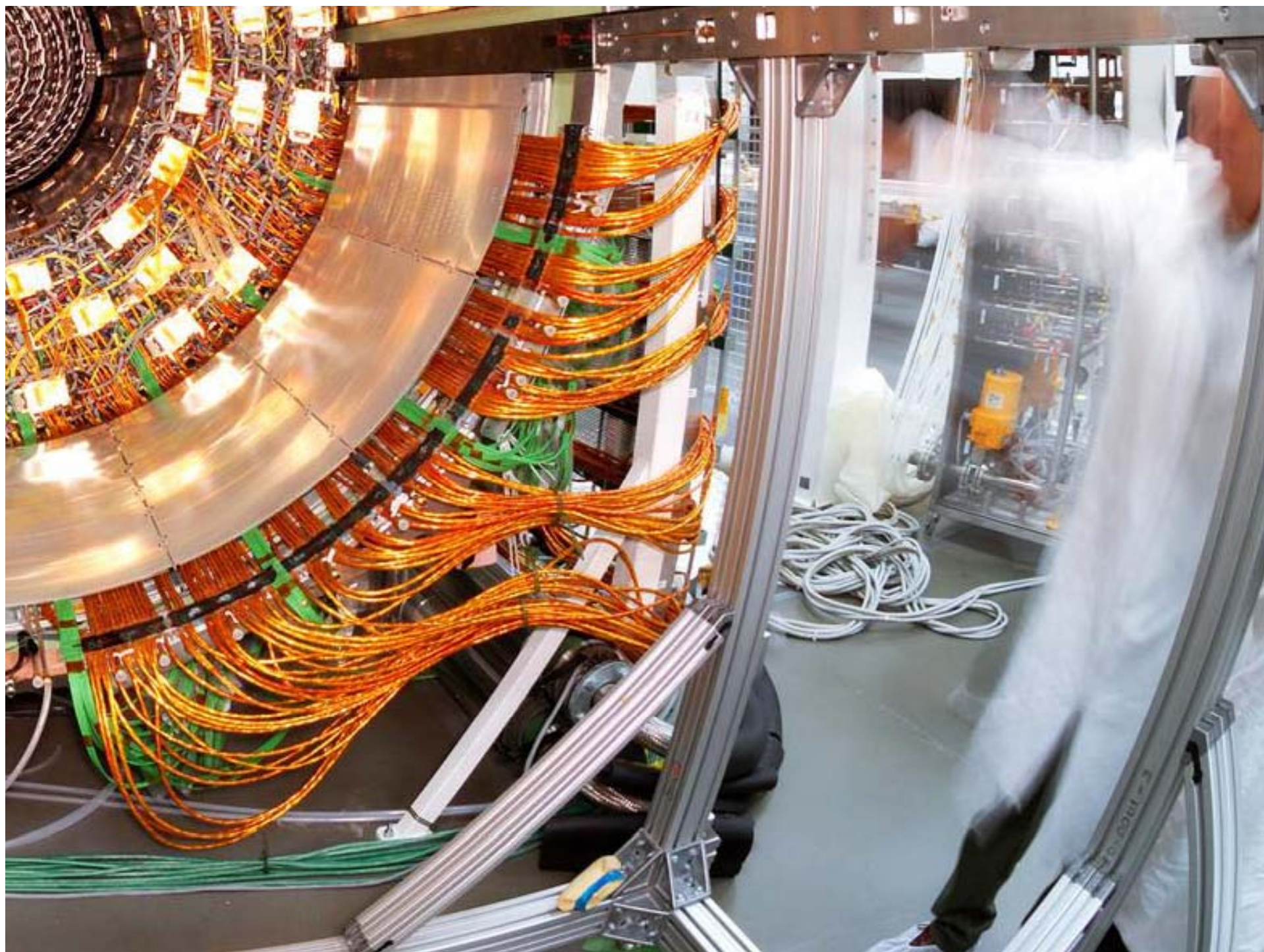
Total weight : 12500 t
Overall diameter : 15 m
Overall length : 21.6 m
Magnetic field : 4 Tesla

<http://cms.cern.ch>

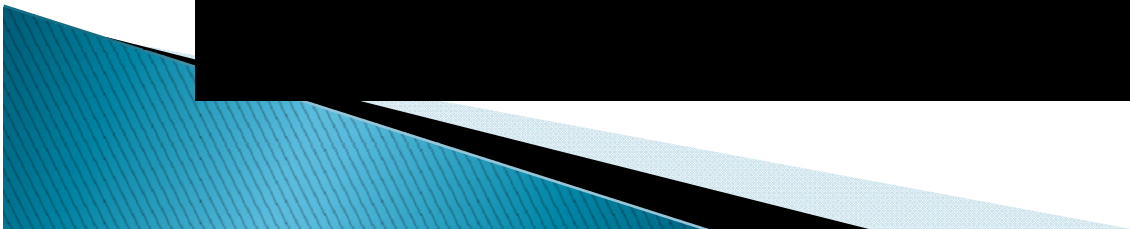
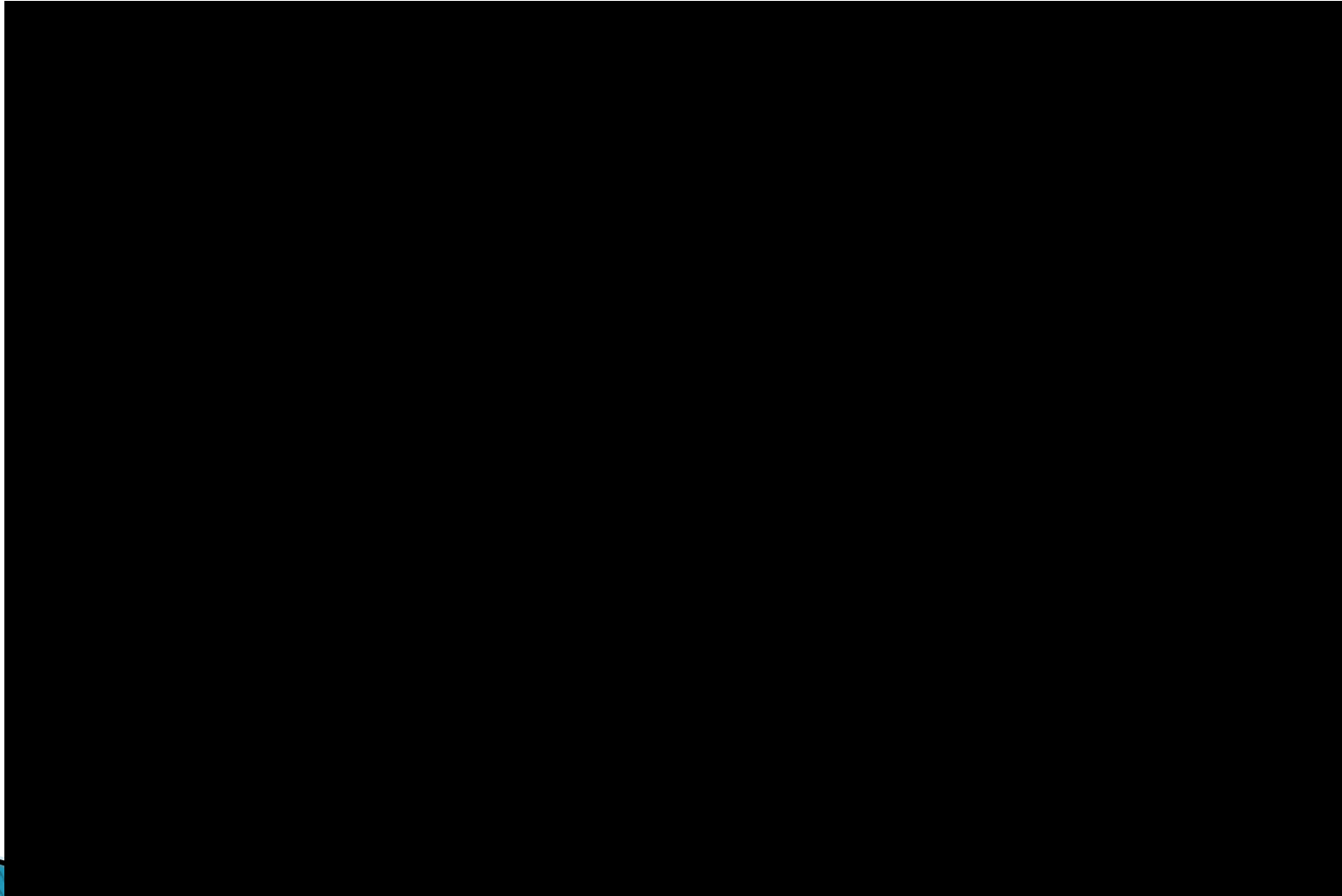
검출기와 입자의 반응



입자의 종류에 따라 검출기와 반응을 달리한다
에너지 측정



CMS 검출기



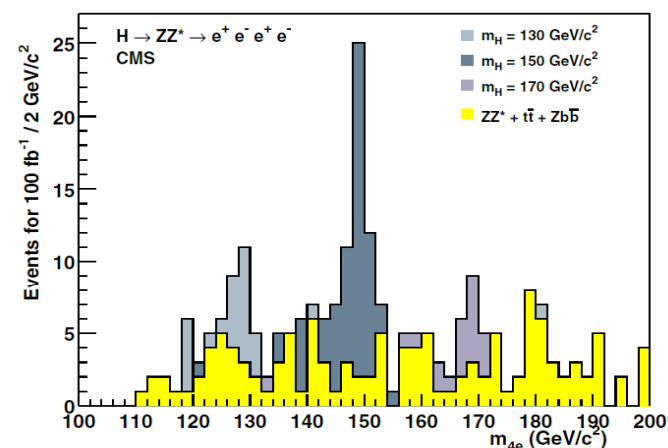
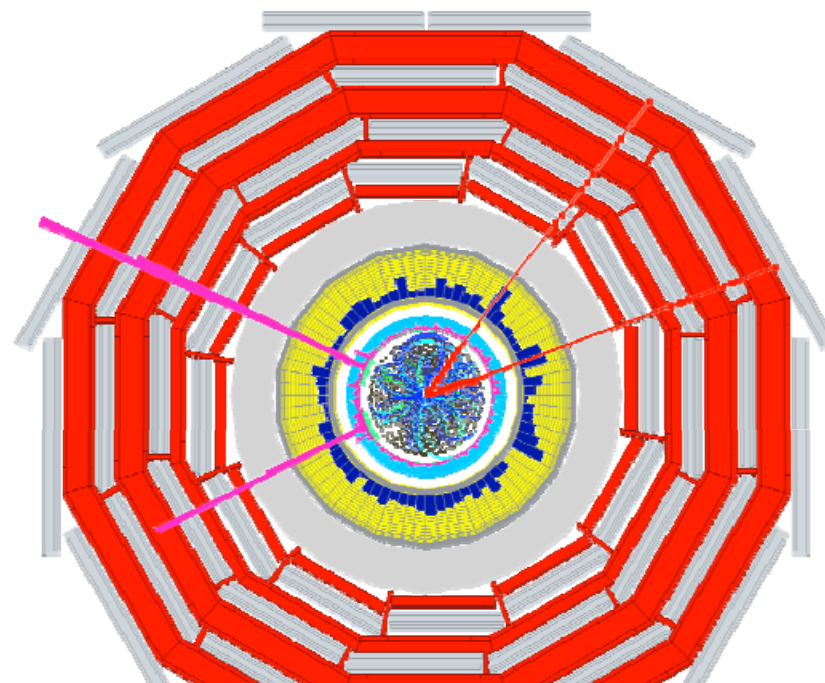
우주선 데이터

- ▶ 2008/7/21 기록
- ▶ 우주선 (Cosmic Ray)
 - 상공에서 생긴 뮤온 입자 검출기 통과
 - 빔이 없을 때 이러한 사건을 수집, 검출기 이해

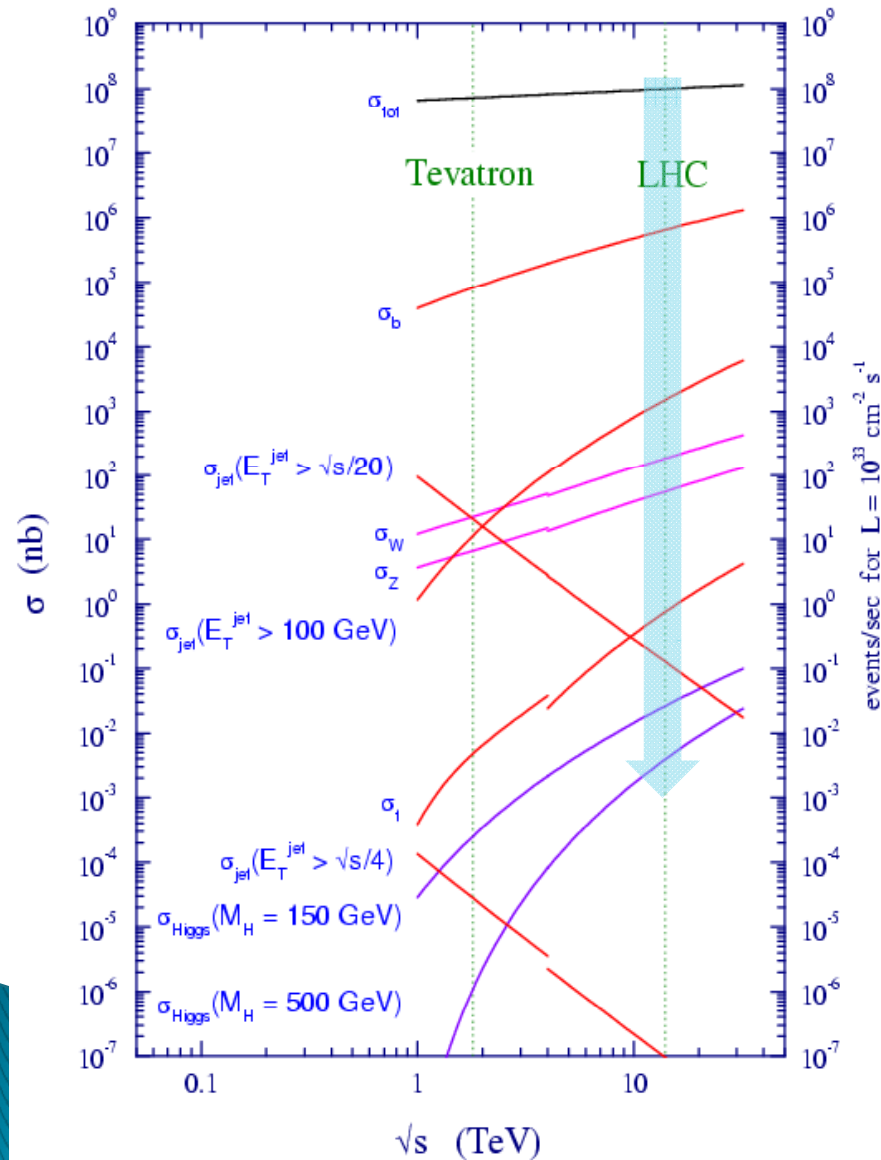


어떻게 새로운 입자를 발견하나?

- ▶ 검출기 신호로부터 재구성
 - 입자의 종류
 - 입자의 에너지
- ▶ 에너지, 운동량 보존 법칙
 - 특정한 질량의 입자 찾기
- ▶ 많은 데이터 수집

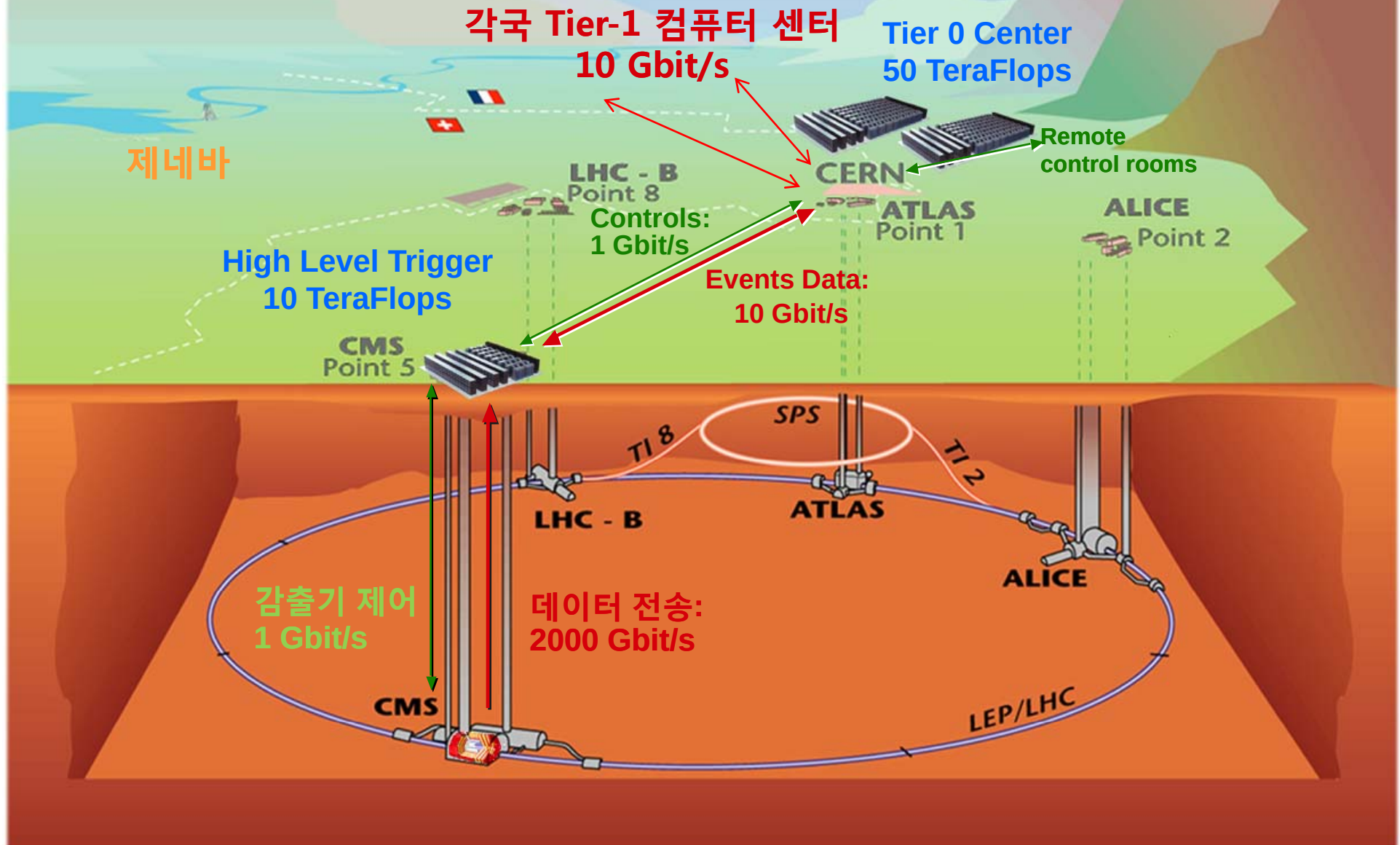


확률게임



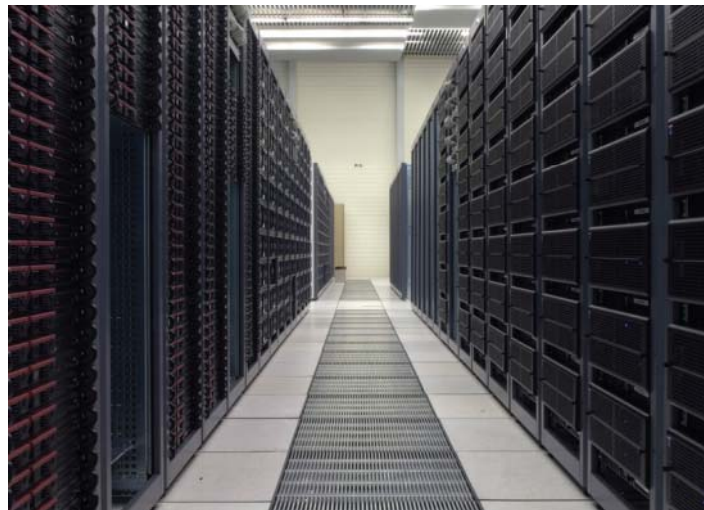
- ▶ Higgs 입자발견- 동전 34개 던져 모두 앞면이 나올때 까지

데이터 흐름도



Tier-0 Center @ CERN

자원	용량
CPU	30000 개
하드디스크	5,000,000 GB
대용량 테이프	16,000,000 GB

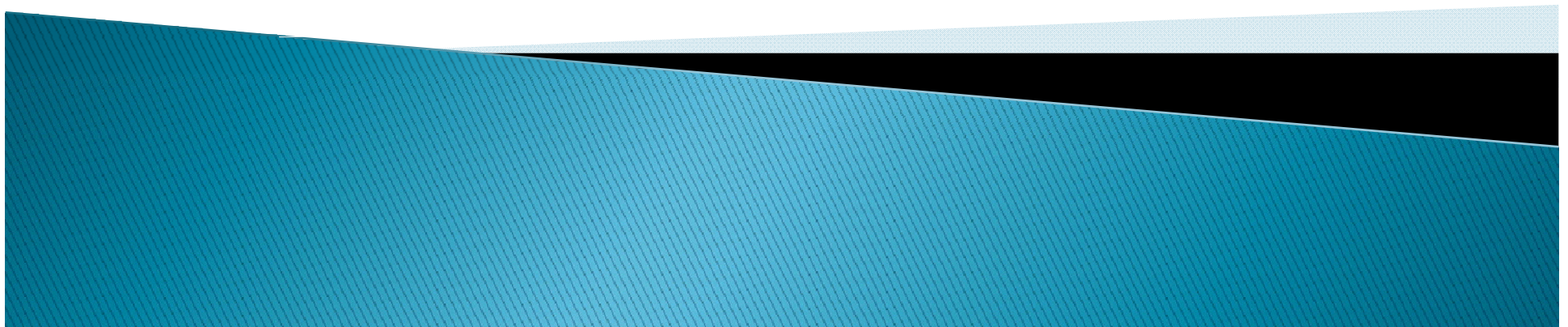


그리드(Grid)로 데이터 처리

- ▶ 전세계에 인터넷에 물려있는 PC 10만대를 연결
 - 방대한 데이터의 저장, 전송, 분석문제 나눠서 처리



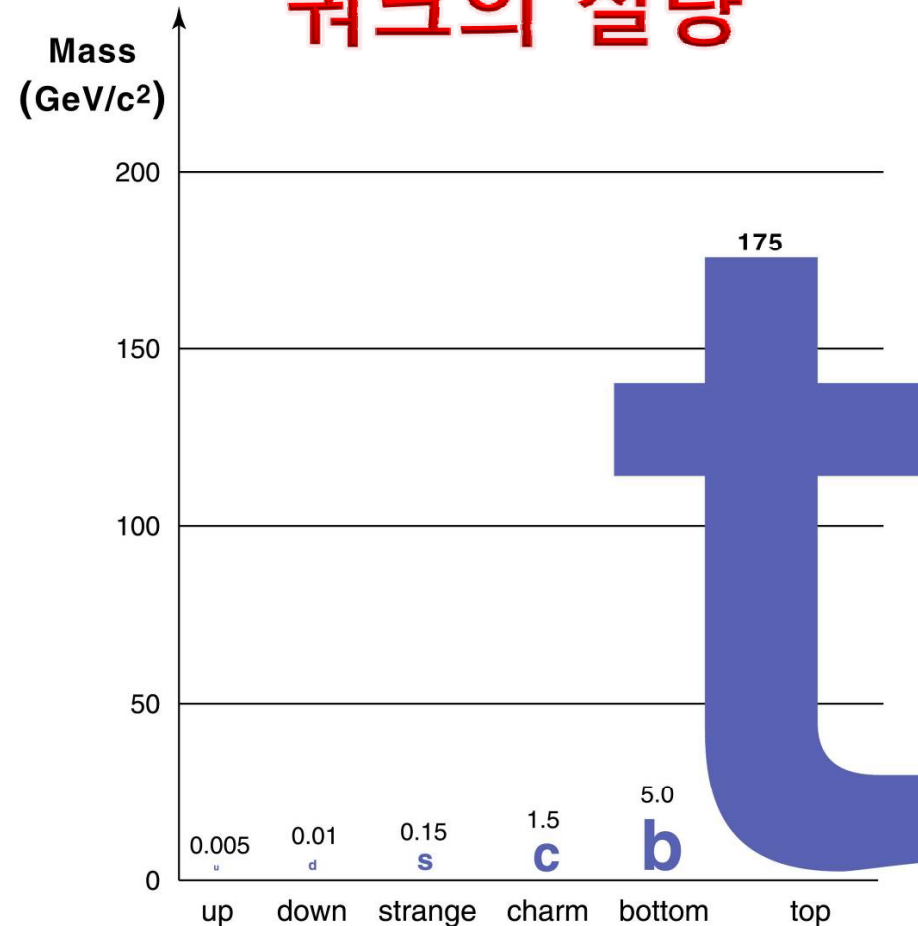
LHC에서의 물리학



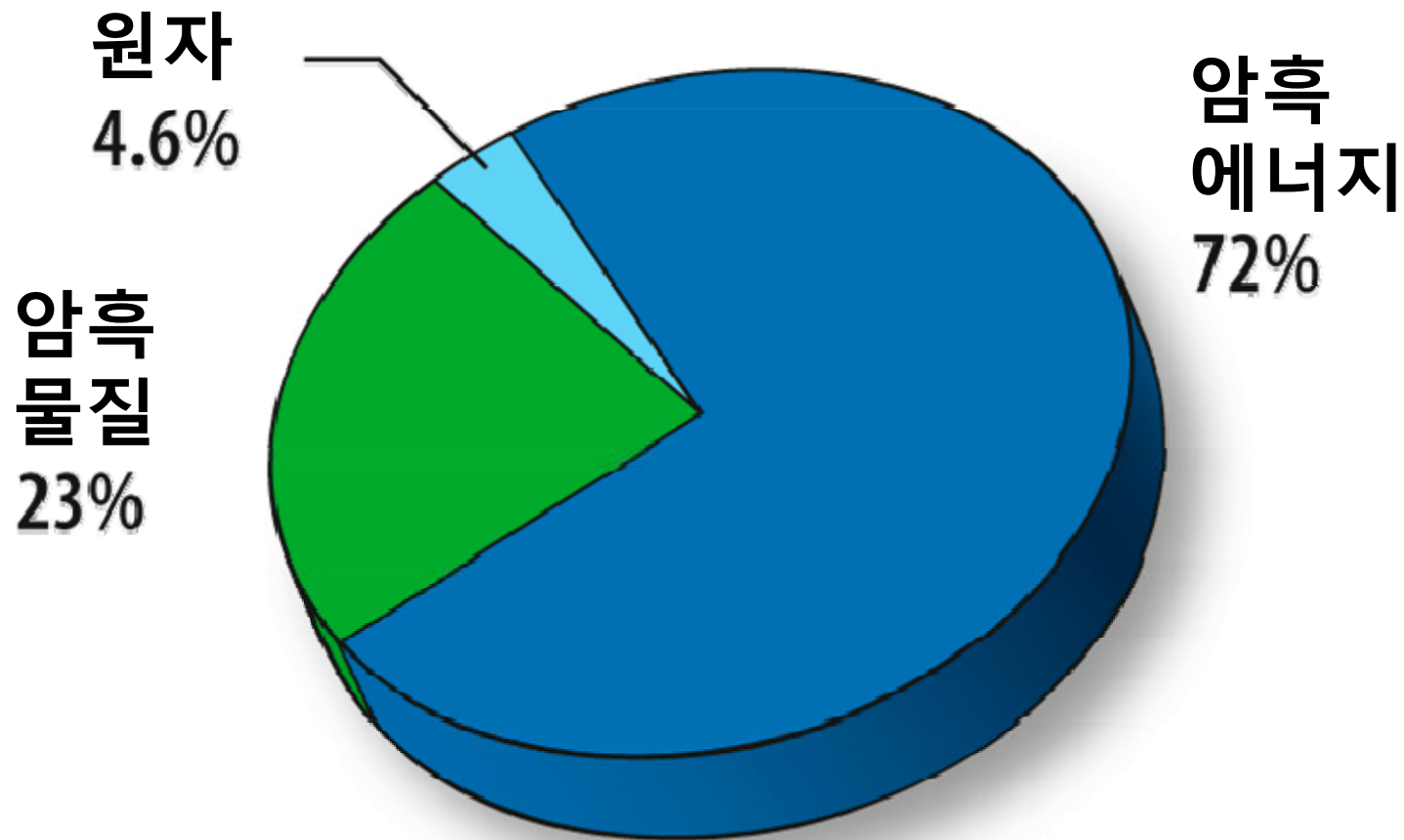
질량의 근원

- ▶ 입자의 질량
 - 무작위?
 - 별의 진화에 중요
- ▶ 힉스 메커니즘
 - 힉스장과 입자가 반응
 - 질량
 - 전자기, 약력 대칭성 깨짐

쿼크의 질량



우주의 에너지 분포

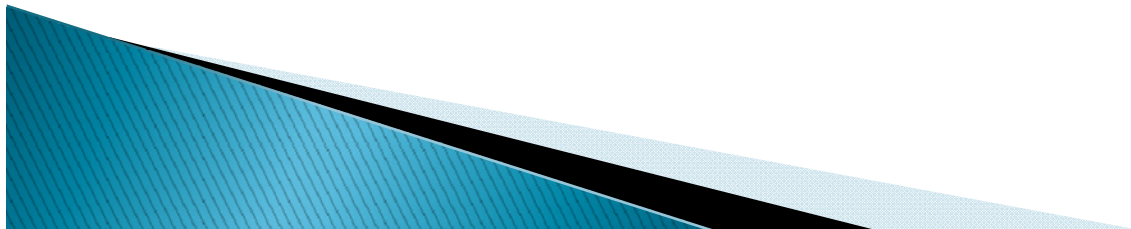


현재

우주의 5%만 이해하고 있다
새로운 현상 있어야 한다

Higgs Mass Reconstruction in $H \rightarrow WW^* \rightarrow \ell \nu \ell \nu$

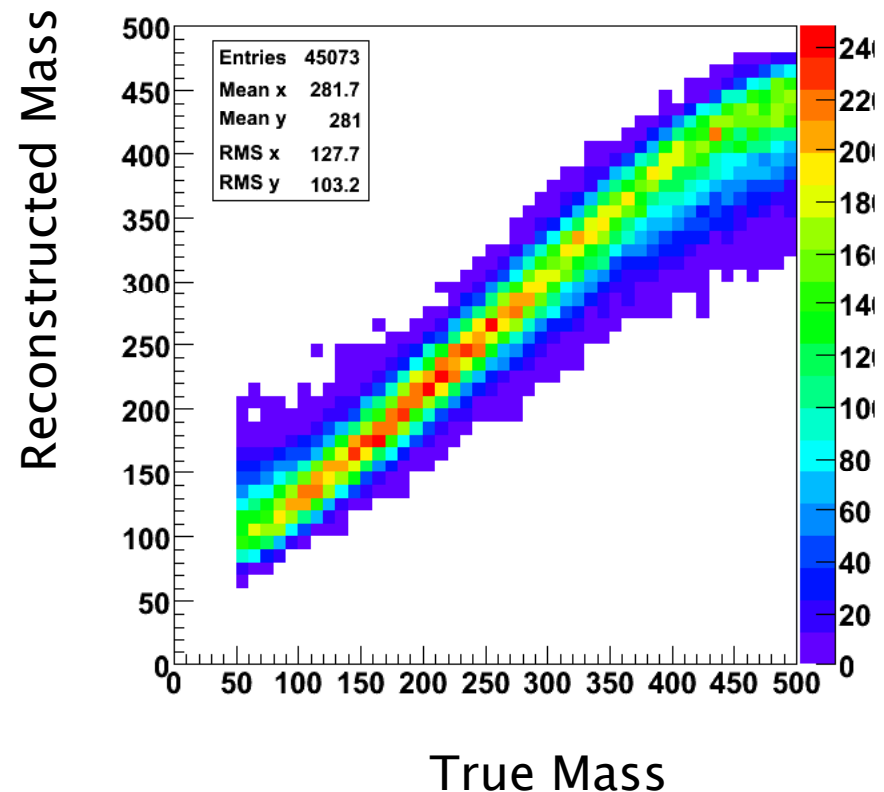
- ▶ Underconstrained system
 - 6 unknowns and 3~4 constraints
 - Cannot solve exactly
- ▶ Apply modified mass reconstruction method developed for SUSY type events
 - neutralino information is incomplete
 - arXiv:0908.0079 – Accepted by PRD
- ▶ I've been trying a new method:
Symbolic Regression



Multivariate Non-linear Regression

- ▶ Mass reconstruction as a problem of regression
 - A general function estimator $\{x_i\} \rightarrow m$
- ▶ Numerical regression methods have some deficiency
 - Insufficient generalization
 - Bayesian
- Momentum vectors from a two body decay

Mass Reconstruction using RF



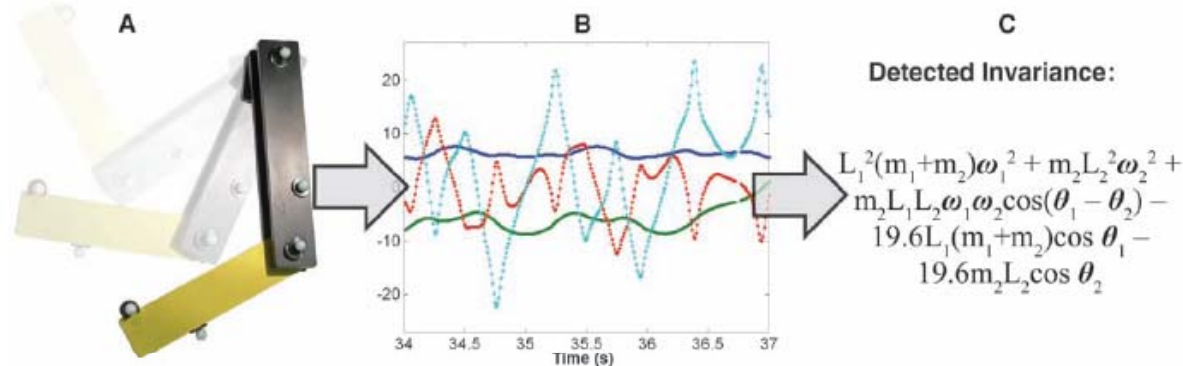
Symbolic Regression

- ▶ Science 324, 81 (2009)
 - Find invariants present in the data
 - **Analytic equation is constructed**
 - Genetic algorithm was used in finding the solution

Distilling Free-Form Natural Laws from Experimental Data

Michael Schmidt¹ and Hod Lipson^{2,3*}

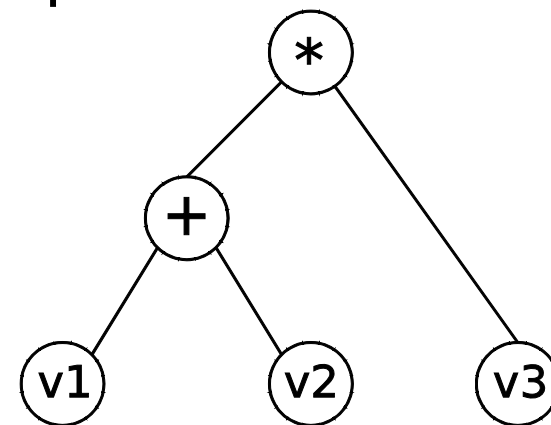
For centuries, scientists have attempted to identify and document analytical laws that underlie physical phenomena in nature. Despite the prevalence of computing power, the process of finding natural laws and their corresponding equations has resisted automation. A key challenge to finding analytic relations automatically is defining algorithmically what makes a correlation in observed data important and insightful. We propose a principle for the identification of nontriviality. We demonstrated this approach by automatically searching motion-tracking data captured from various physical systems, ranging from simple harmonic oscillators to chaotic double-pendula. Without any prior knowledge about physics, kinematics, or geometry, the algorithm discovered Hamiltonians, Lagrangians, and other laws of geometric and momentum conservation. The discovery rate accelerated as laws found for simpler systems were used to bootstrap explanations for more complex systems, gradually uncovering the “alphabet” used to describe those systems.



- ▶ We can apply similar idea to the problem of finding optimal variables in HEP

Symbolic Regression

- ▶ Goal: construct a variable sensitive to mass
 - kinematic variables
 - operators: $+$, $-$, $*$, $/$
 - functions: $\sin$, $\cos$, $\exp$, $\log$
 - Restricted terms to match the dimension of target
 - Fitness – relative Root Mean Square
- ▶ Evolution
 - 150 Generations
 - 1000 individuals (equations)
 - cross-over probability 50%
 - mutation probability 4%



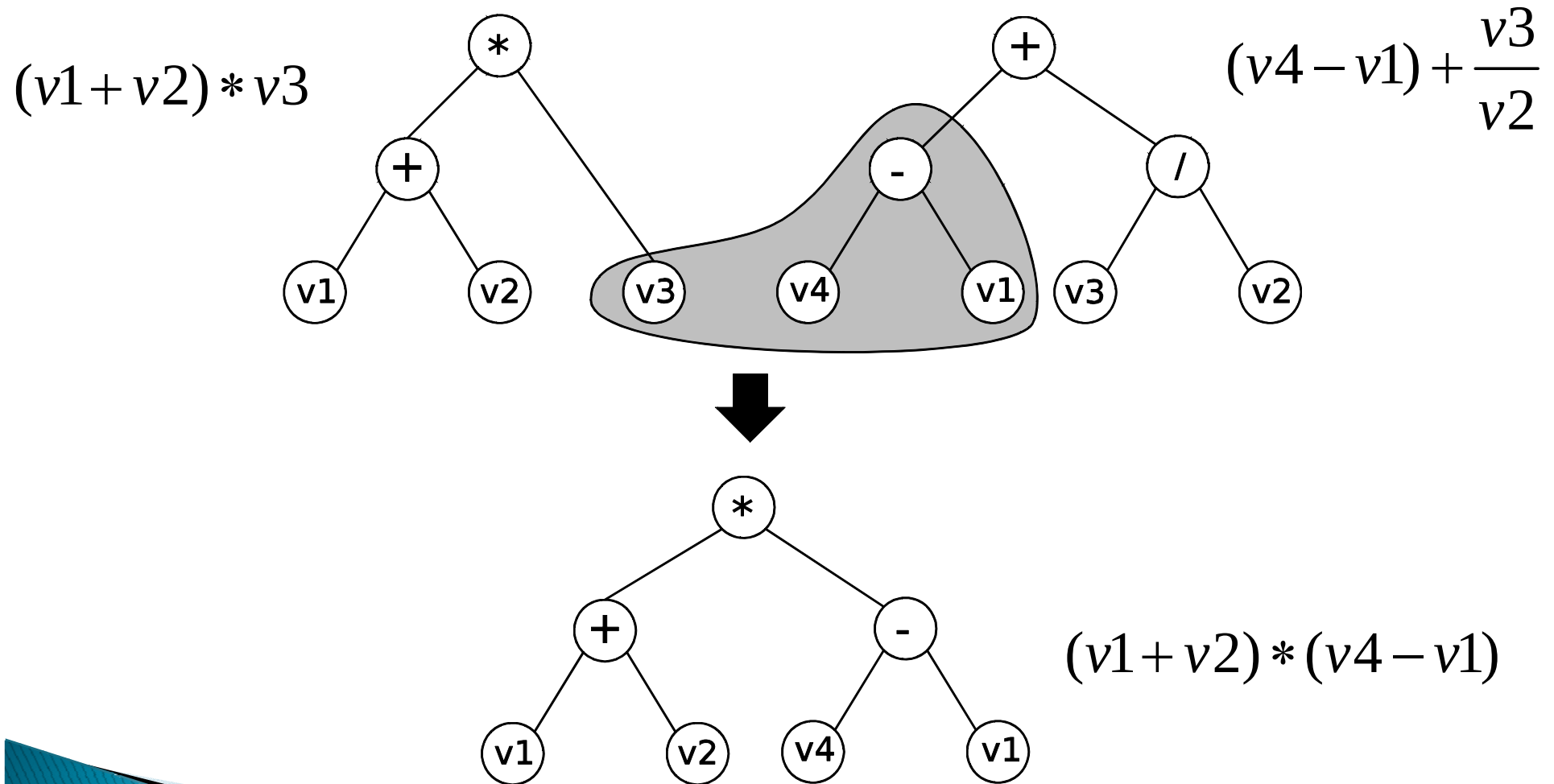
$$(v1 + v2) * v3$$

Symbolic Regression with Genetic Algorithms

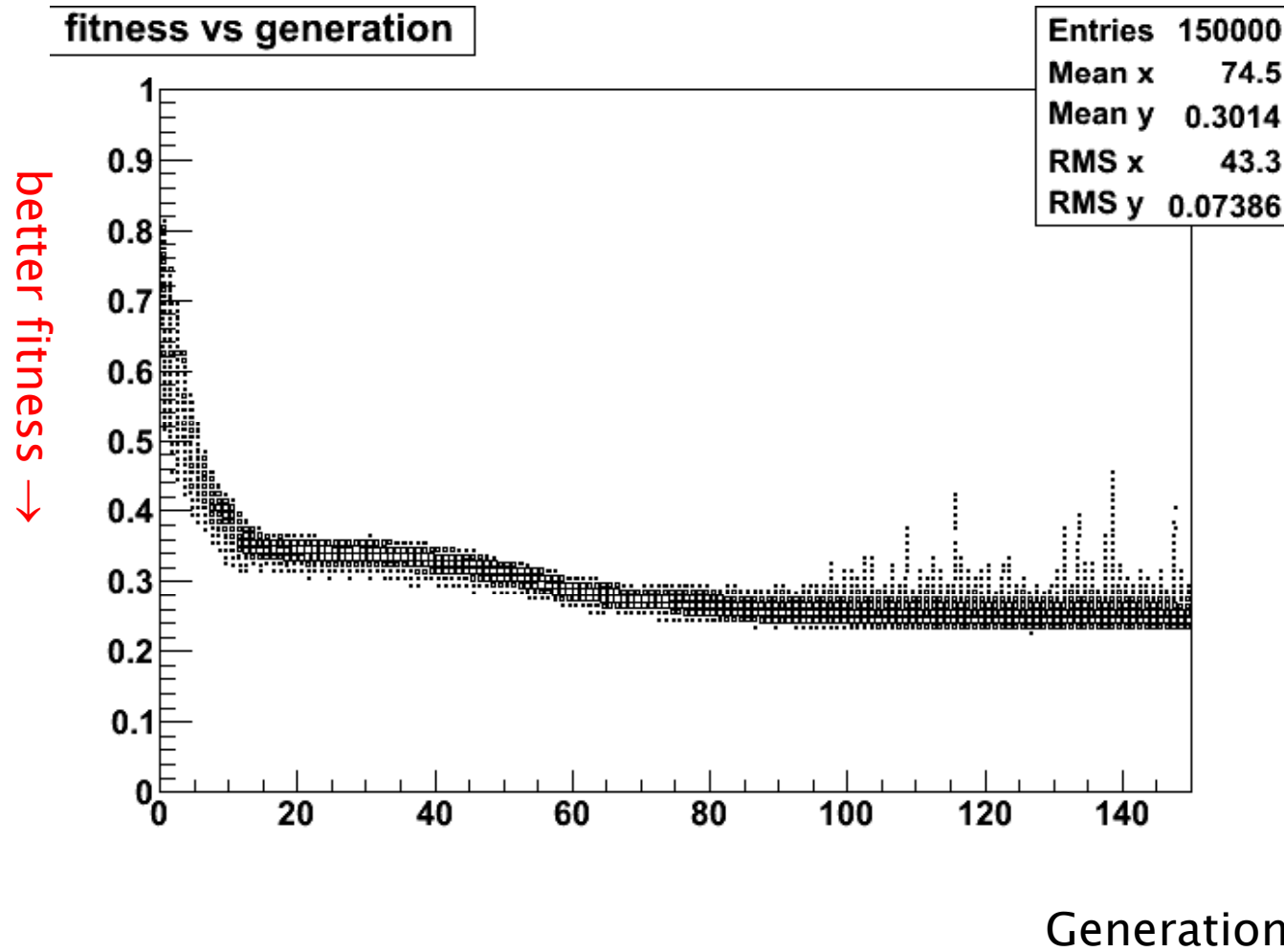
1. Initialization: random equations are created
2. Creation of new individuals
 1. parents are selected by tournament from random subpool
 2. Cross-over of genes occur at random points
 3. random mutation – probability for this is small
3. Population selection
 1. Population sorted according to fitness
 2. Discard individuals with poor fitness
4. Go to step 2



Example of Cross-over Genetic Operation

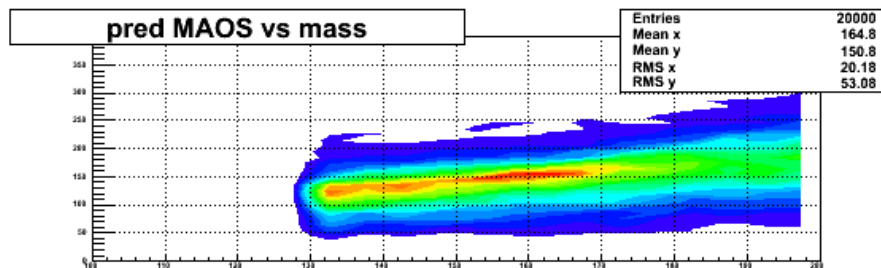
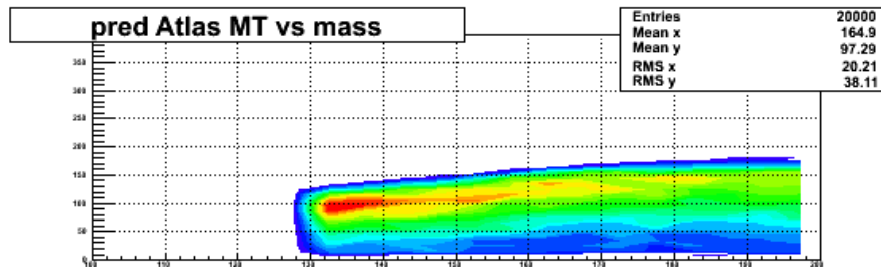
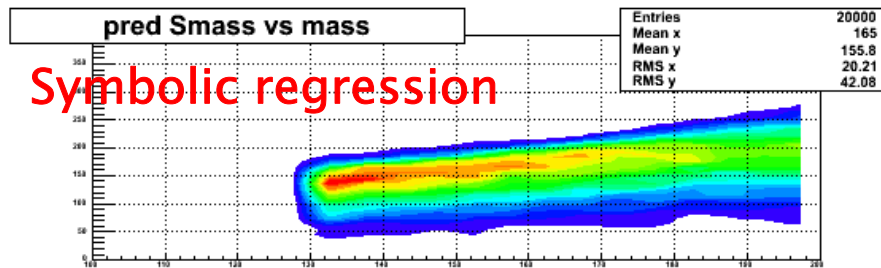


Evolution of Fitness

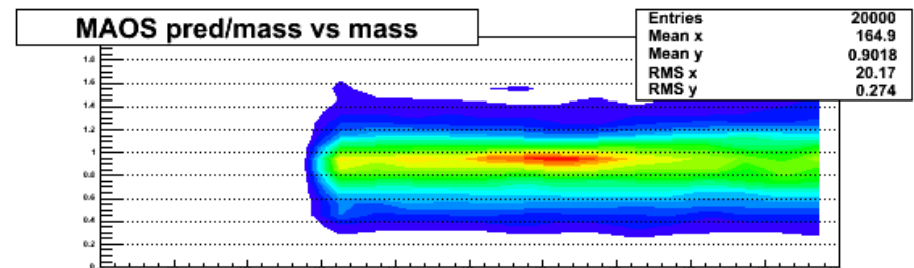
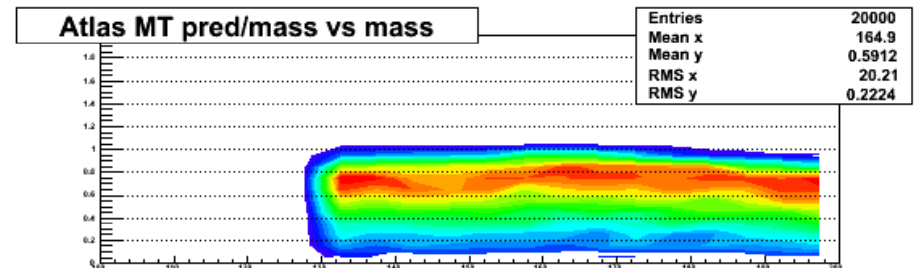
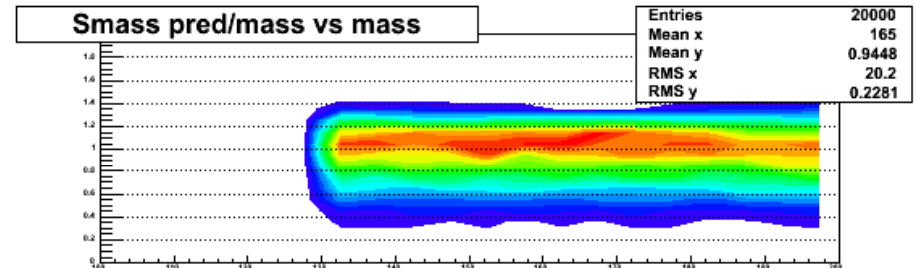


Predicted Mass vs True Mass

Symbolic regression



Mass Ratio vs True Mass



Good linearity and resolution is seen

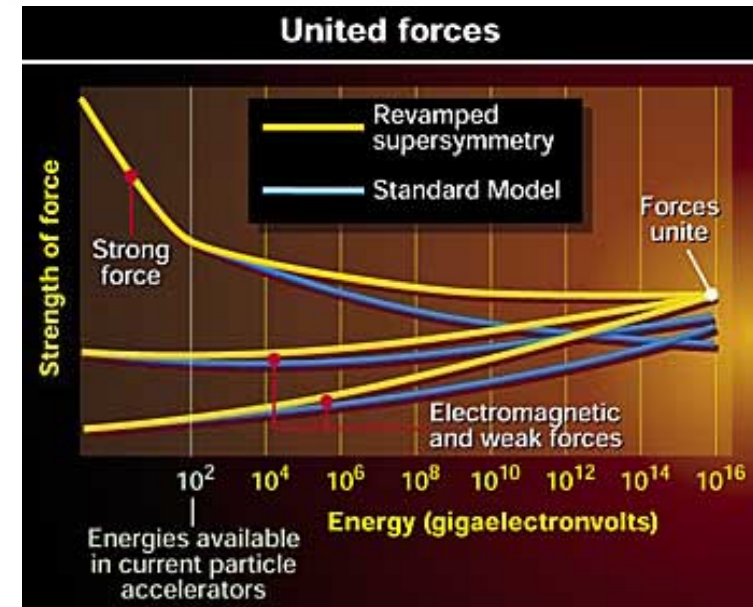
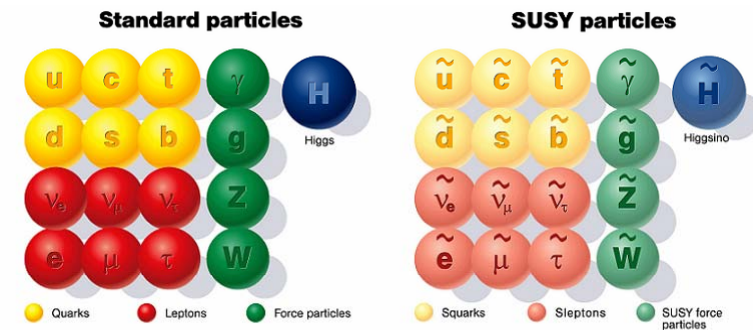
초대칭 (Supersymmetry)

- ▶ TeV에너지에서 입자 현상→ 무한대
초대칭 존재하면 문제 해결

- ▶ 초끈이론이 맞다면
초대칭 현상, 여분 차원 존재

- ▶ 암흑 물질이 되는 입자
 - 검출기 데이터 운동량 보존 안됨

- ▶ 힘의 통일

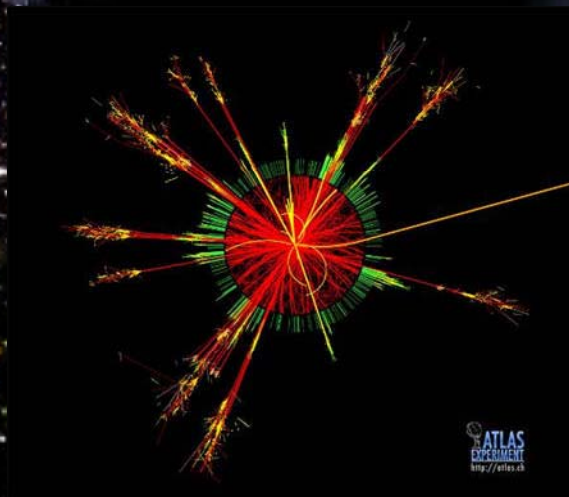


LHC에서의 블랙홀

1초당 $O(1)$ 개~1년에 $O(100)$ 개 정도 만들어 질 수 있다.

호킹 복사를 통해 순식간에 붕괴, 소멸한다.

소멸 당시 내놓은 '신호'를 통해 블랙홀에 숨겨진 물리학 탐구가 가능하다.

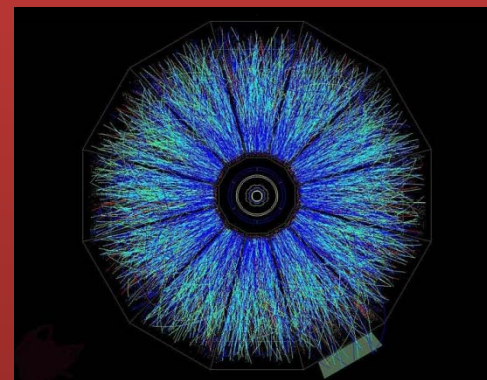


블랙홀 사전

- 크다 (astronomical)
- 무겁고, 차갑다
- 오래 살고 안정적이다.
- 간접적으로만 관측할 수 있다.

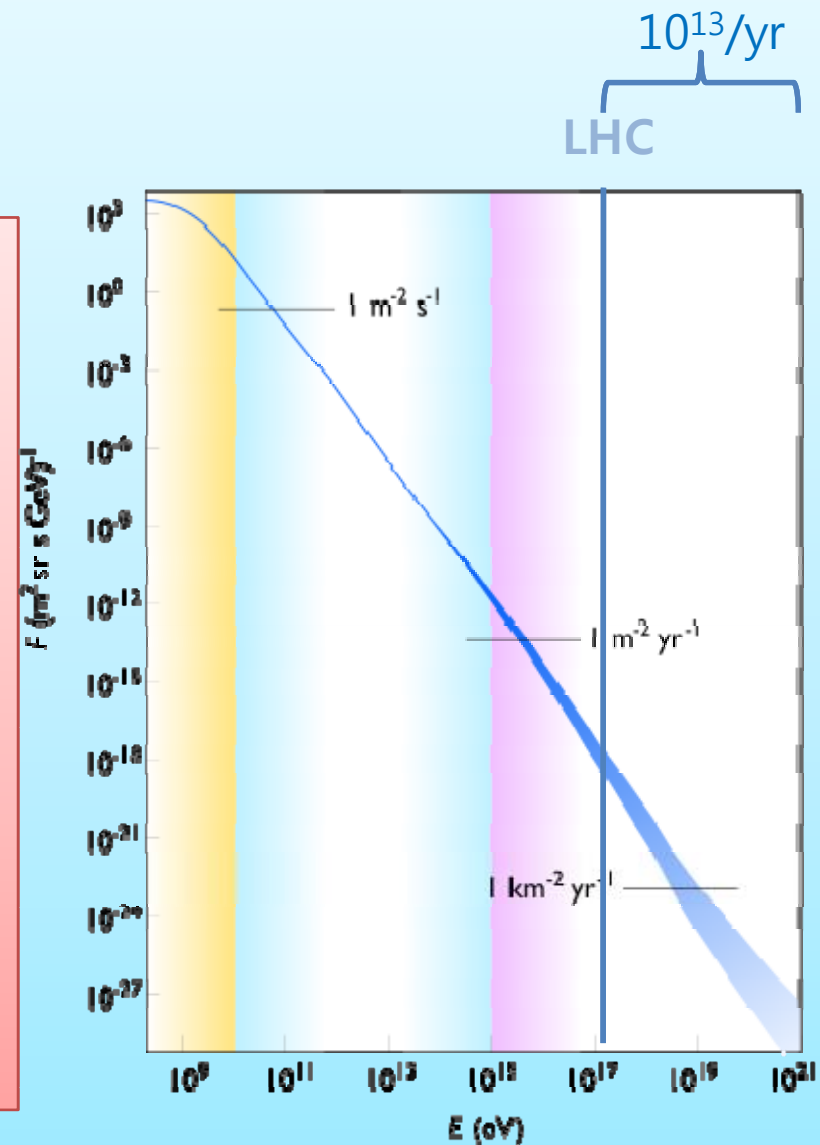


- 작다 (microscopic)
- 가볍고, 뜨겁다
- 불안정하고 빠르게 붕괴한다.
- 호킹 복사를 직접 관측할 수 있다.



블랙홀 괴담

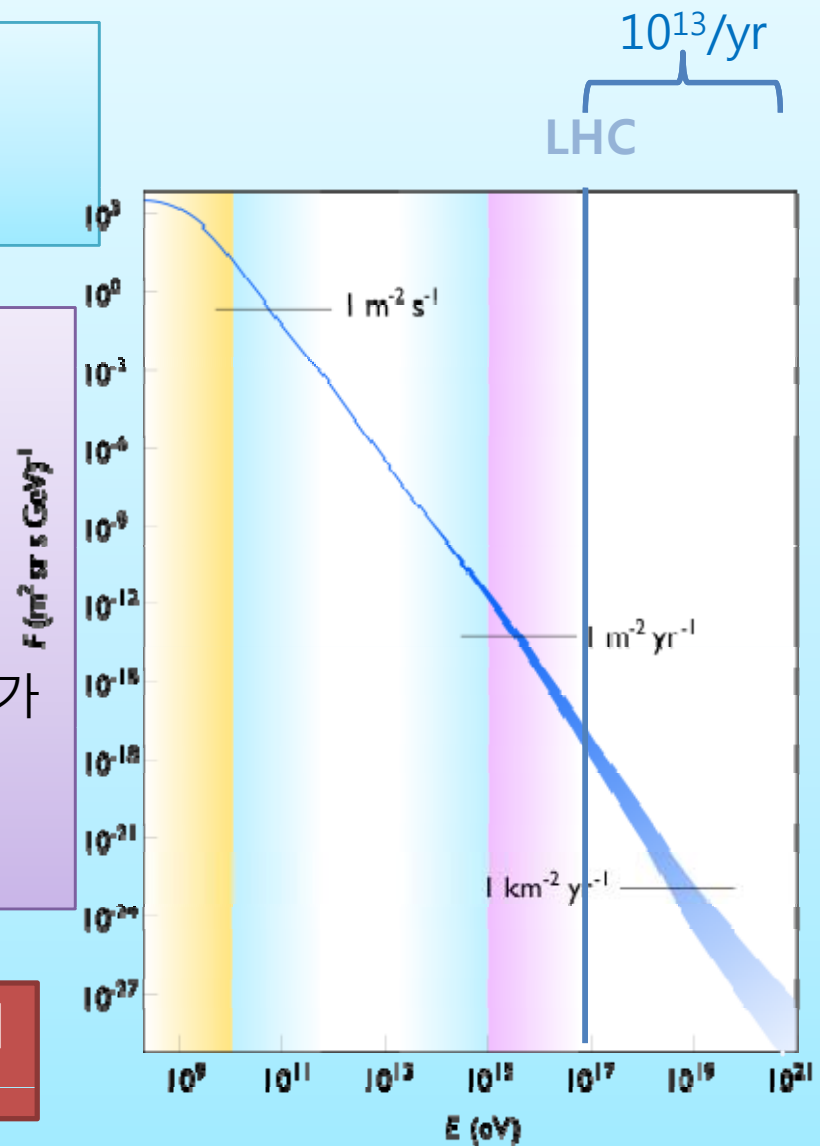
- LHC에서 블랙홀이 생성되어 지구를 삼킨다는 이야기가 널리 유행하고 있다.
- 이는 물리학적으로 전혀 가능하지 않다.
- 미니 블랙홀은 10^{-27} 초 이내에 소멸하기 때문이다.
- Hawking radiation $\sim 1/m^2$
- 실제로 우주선입자에 의한 10 TeV 이상 에너지 입자충돌은 지금도 수없이 발생하고 있다.
- 지난 45억년 지구는 안전했다. 우리가 여기 앉아 있다는 사실이 안전성을 보장한다.



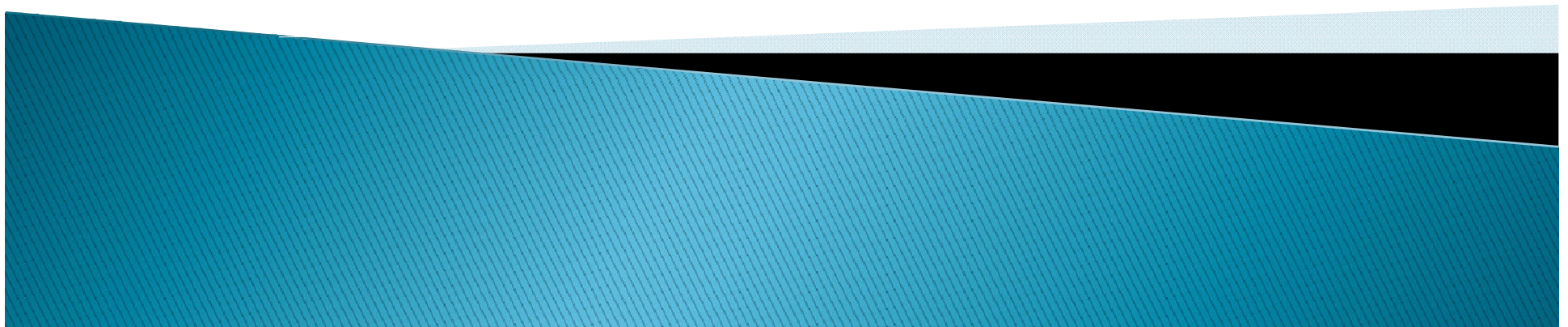
우주 LHC

- **LHC @14 TeV = cosmic rays @ 10^{17}eV**
- 우주선은 $3 \times 10^{20}\text{eV}$ 까지 관측되고 있다
- $\sim 3 \times 10^{22}$ 개의 10^{17}eV 이상 우주선이 지구와 충돌해왔다.
- 이는 **10^5 LHCs**에 해당한다.
- 태양 표면적은 10^4 배 크다.
- 은하당 10^{11} 개의 별이 있고, 10^{11} 개의 은하가 있다.
- 자연계는 이미 10^{31} LHC 실험을 했다.
- 우주가 수행한 실험: **3×10^{15} LHCs/sec**

블랙홀 물리학을 자세히 고려할 필요도 없이
우리가 안전하다는 것을 알 수 있다!



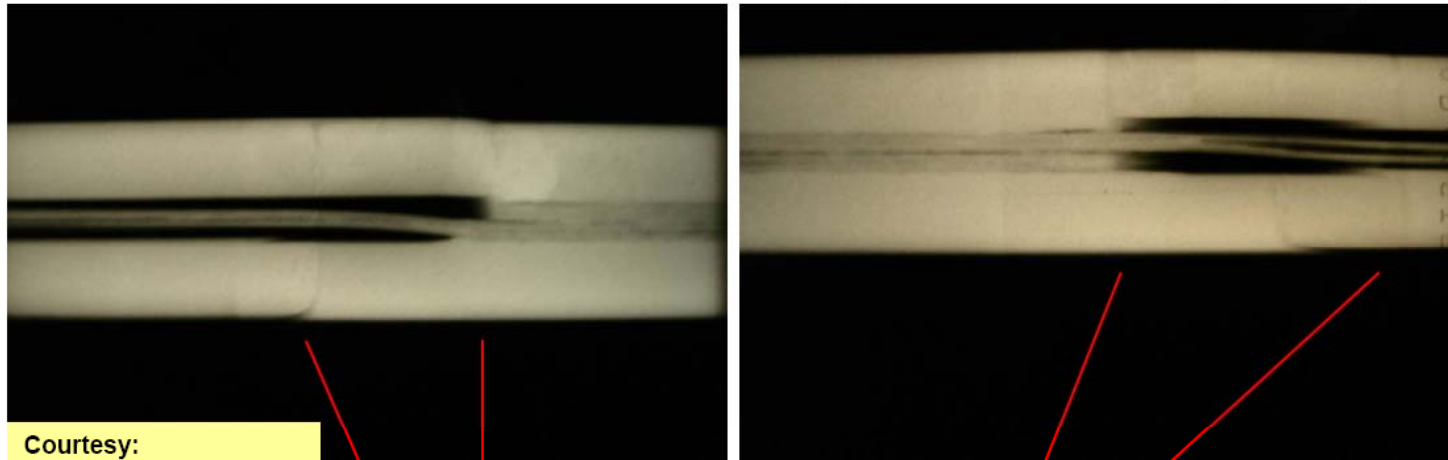
LHC 재가동 계획



Stablizer problem

Bad surprise after gamma-ray imaging of the joints: Void is present in most of bus extremities because SnAg flew out during soldering of the joint

Gamma rays QBBI.B25R3-M3 before disconnection (QRL connection & QRL lyra sides)

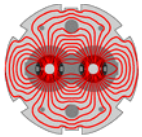


Courtesy:
Christian Scheuerlein

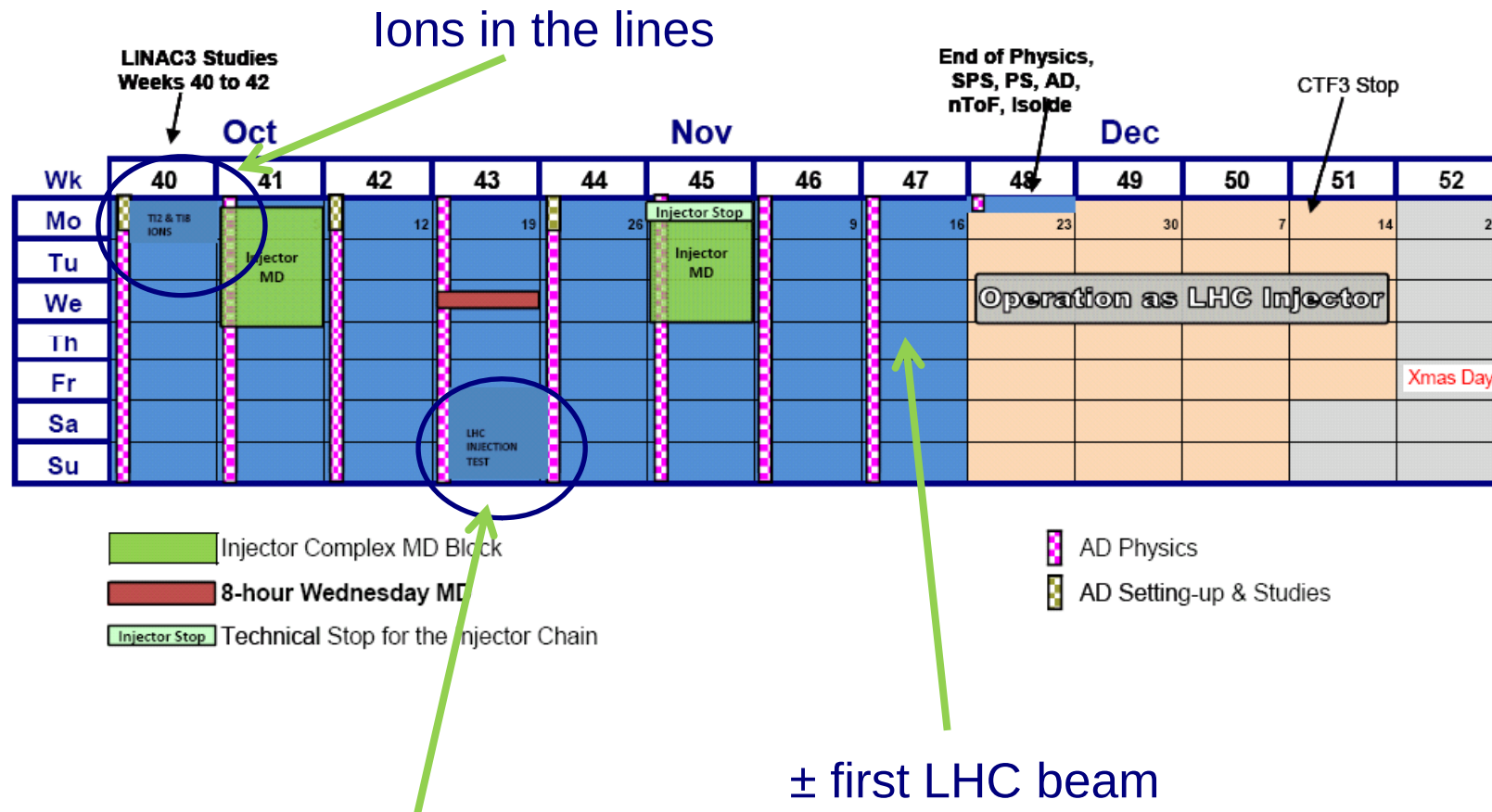


Bad electrical contact between wedge and U-profile with the bus on at least 1 side of the joint

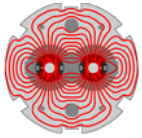
Bad contact at joint with the U-profile and the wedge



2009 - injectors

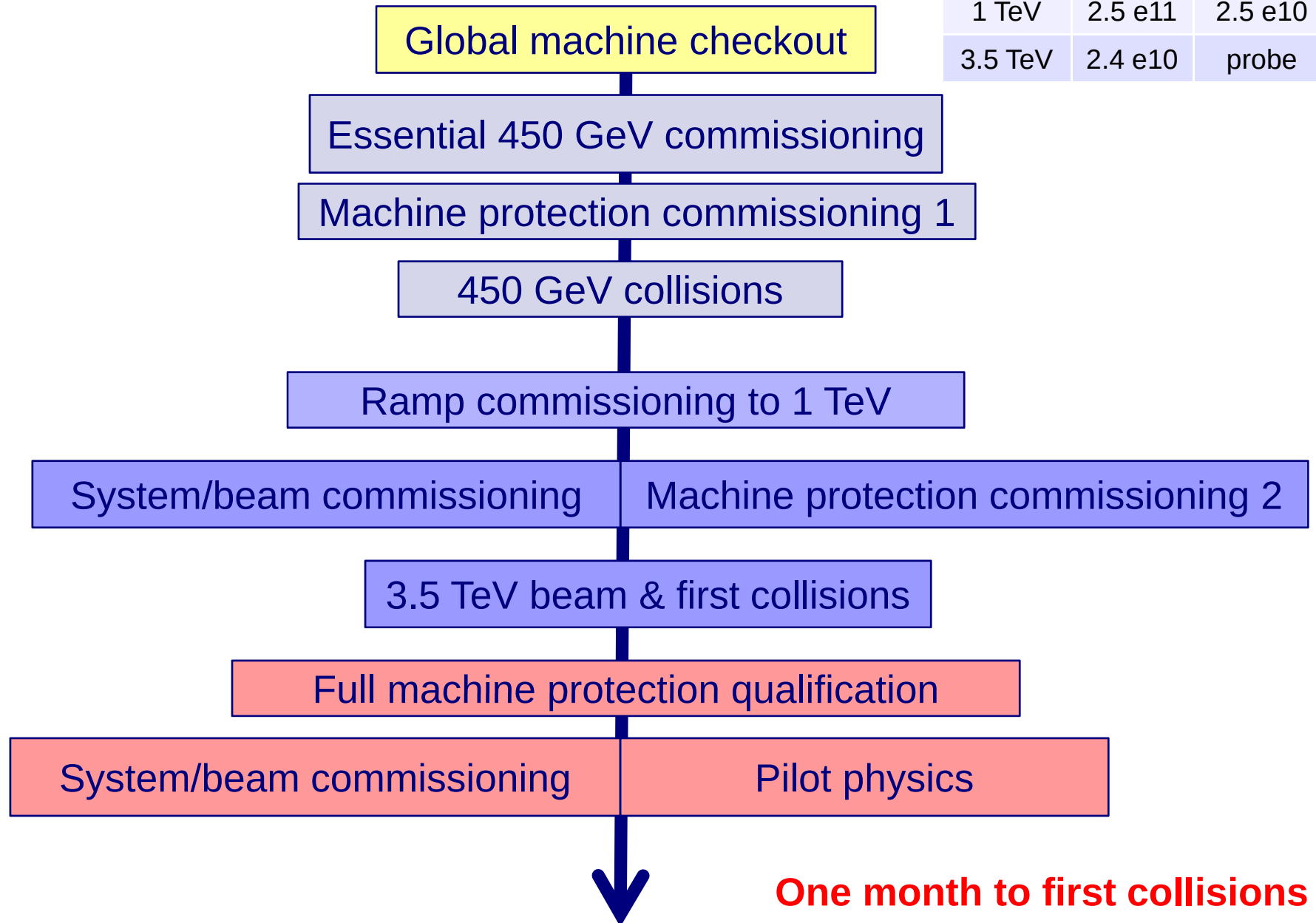


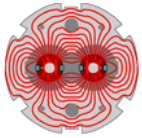
Injection test
Sector 23 as first priority
Sector 78 if part of 81 required is ready



Beam commissioning

Energy	Safe	Very Safe
450	1 e12	1 e11
1 TeV	2.5 e11	2.5 e10
3.5 TeV	2.4 e10	probe

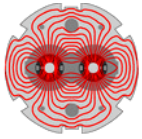




450 GeV collisions

- Time limited: 3-4 shifts
- No squeeze
- Low intensity – machine protection commissioning unlikely to be very advanced.
- ~1 week after first beam

Number of bunches	1	4	12
Particles per bunch	4	4	4
Beam intensity	4×10^{10}	1.6×10^{11}	4.8×10^{11}
beta* [m]	11	11	11
Luminosity [$\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$]	1.7×10^{27}	6.6×10^{27}	2×10^{28}
Integrated lumi/24 hours [nb^{-1}]	0.06	0.24	0.7



Plugging in the numbers with a step in energy

Month	OP scenario	Max number bunch	Protons per bunch	Min beta*	Peak Lumi	Integrated	% nominal
1	Beam commissioning						
2	Pilot physics combined with commissioning	43	3×10^{10}	4	8.6×10^{29}	$\sim 200 \text{ nb}^{-1}$	
3		43	5×10^{10}	4	2.4×10^{30}	$\sim 1 \text{ pb}^{-1}$	
4		156	5×10^{10}	2	1.7×10^{31}	$\sim 9 \text{ pb}^{-1}$	2.5
5a	No crossing angle	156	7×10^{10}	2	3.4×10^{31}	$\sim 18 \text{ pb}^{-1}$	3.4
5b	No crossing angle – pushing bunch intensity	156	1×10^{11}	2	6.9×10^{31}	$\sim 36 \text{ pb}^{-1}$	4.8
6	Shift to higher energy: approx 4 weeks	Would aim for physics without crossing angle in the first instance with a gentle ramp back up in intensity					
7	4 – 5 TeV (5 TeV luminosity numbers quoted)	156	7×10^{10}	2	4.9×10^{31}	$\sim 26 \text{ pb}^{-1}$	3.4
8	50 ns – nominal Xing angle	144	7×10^{10}	2	4.4×10^{31}	$\sim 23 \text{ pb}^{-1}$	3.1
9	50 ns	288	7×10^{10}	2	8.8×10^{31}	$\sim 46 \text{ pb}^{-1}$	6.2
10	50 ns	432	7×10^{10}	2	1.3×10^{32}	$\sim 69 \text{ pb}^{-1}$	9.4
11	50 ns	432	9×10^{10}	2	2.1×10^{32}	$\sim 110 \text{ pb}^{-1}$	12

전망

- ▶ 가속기 및 검출기 설계 에너지 도달에 시간이 걸림
- ▶ 새로운 에너지 대역에서 새로운 물리가 틀림없이 기다리고 있다

