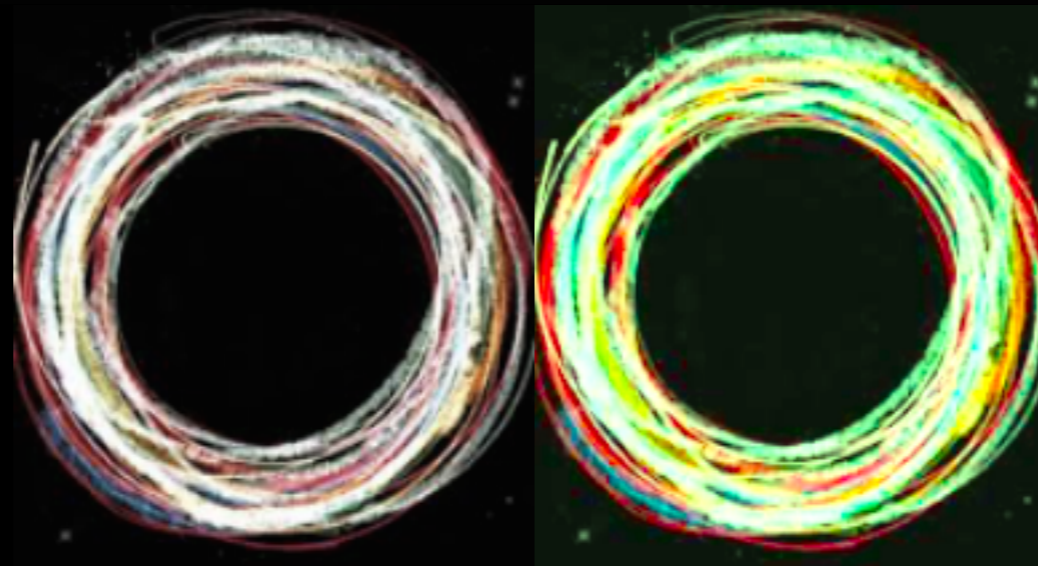
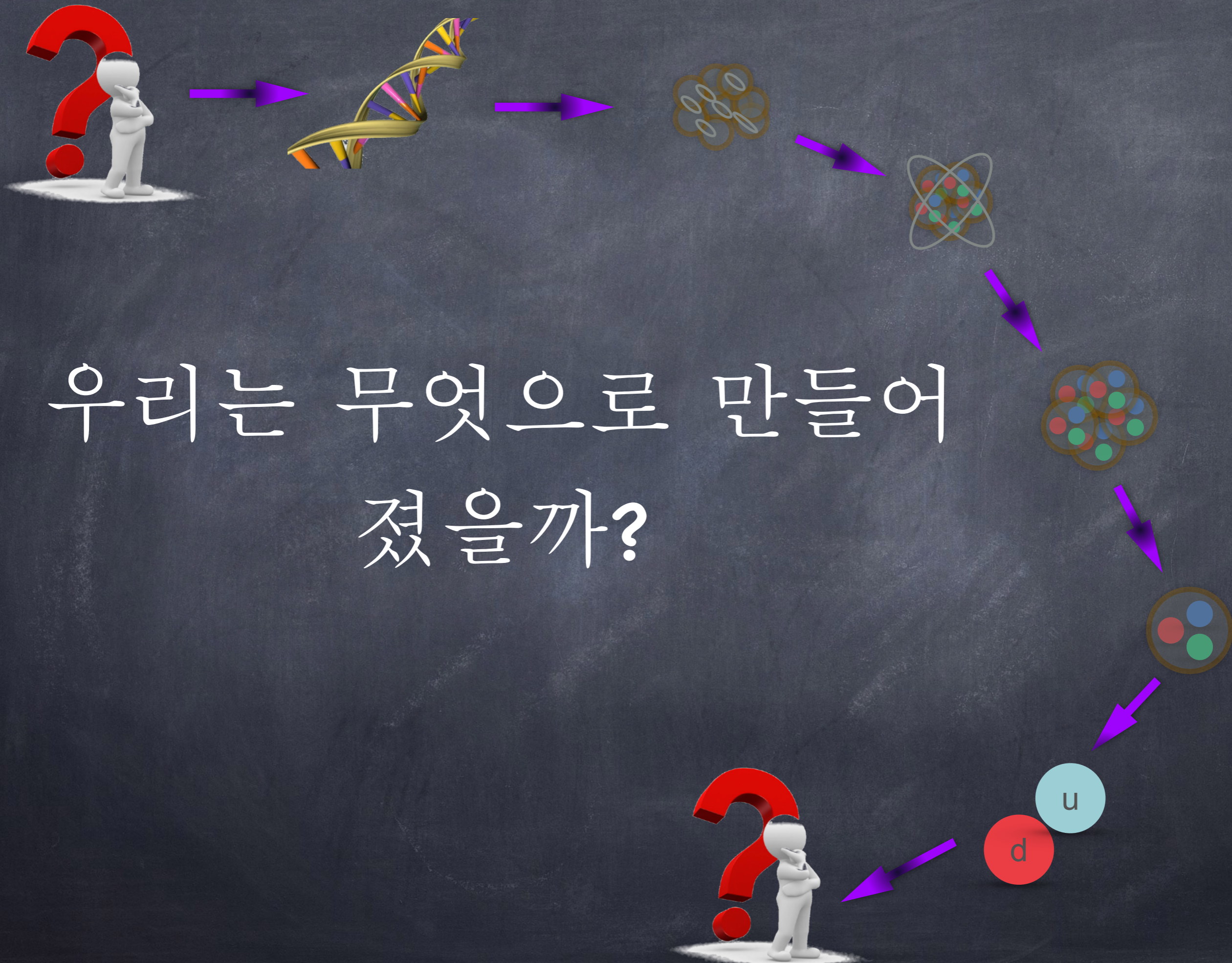


미래원형가속기(FCC)가 탐구하게 될 우리 우주의 존재 원리



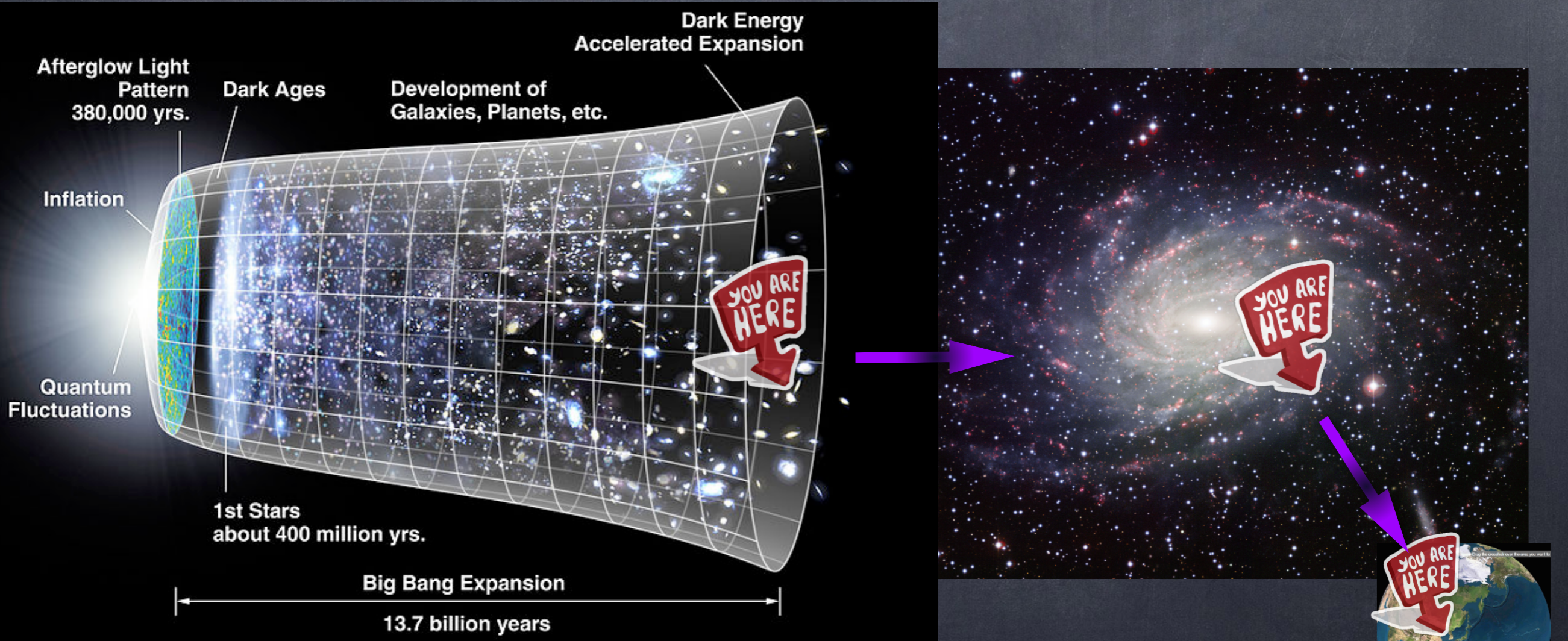
이승준



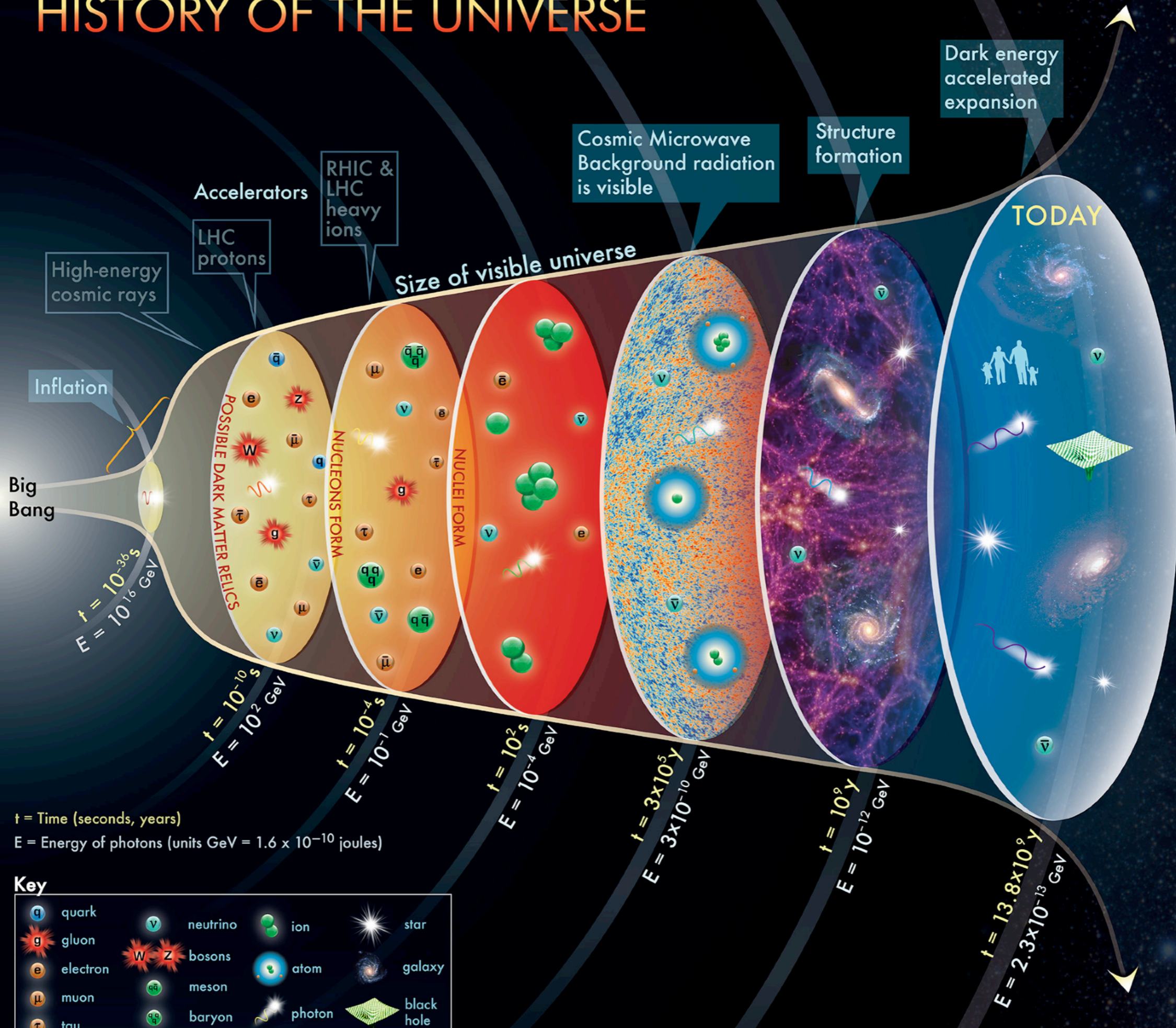


우리는 무엇으로 만들어
졌을까?

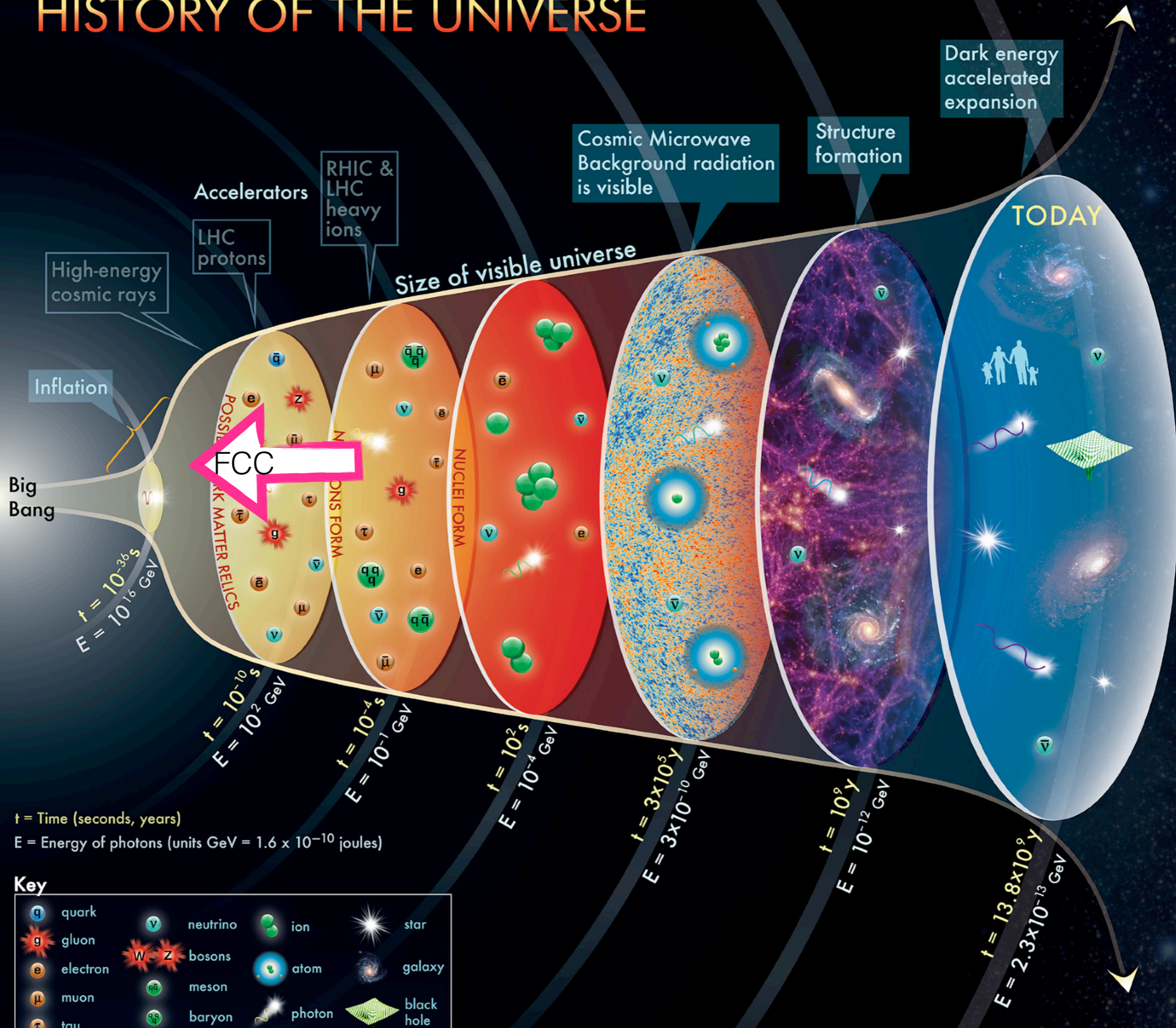
왜 우리는 지금 여기 존재할까?



HISTORY OF THE UNIVERSE

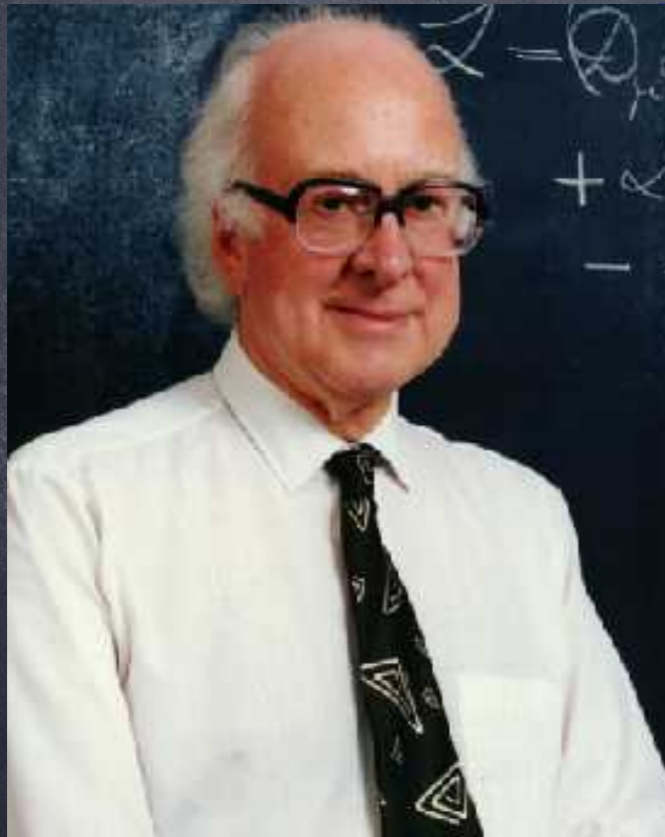


HISTORY OF THE UNIVERSE



LHC run (so far): 힉스 보존의
발견 “God (-Damn) Particle”

LHC run (so far): 힉스 보손의 발견 “God (-Damn) Particle”



In 1964, Peter Higgs postulated a physics mechanism which gives all particles their mass.

This mechanism is a field which permeates the universe.

If this postulate is correct, then one of the signatures is a particle (called the *Higgs Particle*).

48년의 길고 긴 여정

BROKEN SYMMETRY AND THE MASS OF GAUGE VECTOR MESONS*

F. Englert and R. Brout

Faculté des Sciences, Université Libre de Bruxelles, Bruxelles, Belgium

(Received 26 June 1964)

BROKEN SYMMETRIES, MASSLESS PARTICLES AND GAUGE FIELDS

P. W. HIGGS

Tait Institute of Mathematical Physics, University of Edinburgh, Scotland

Received 27 July 1964

VOLUME 13, NUMBER 16

PHYSICAL REVIEW LETTERS

19 OCTOBER 1964

BROKEN SYMMETRIES AND THE MASSES OF GAUGE BOSONS

Peter W. Higgs

Tait Institute of Mathematical Physics, University of Edinburgh, Edinburgh, Scotland

(Received 31 August 1964)

GLOBAL CONSERVATION LAWS AND MASSLESS PARTICLES*

G. S. Guralnik,[†] C. R. Hagen,[‡] and T. W. B. Kibble

Department of Physics, Imperial College, London, England

(Received 12 October 1964)

48년의 길고 긴 여정

BBC

News

Sport

Weather

Travel

NEWS SCIENCE & ENVIRONMENT

Home UK Africa Asia Europe Latin America Mid-East US & Canada Business Health

4 July 2012 Last updated at 07:35 GMT

27K Share

Higgs boson-like particle discovery claimed at LHC

COMMENTS (1665)

By Paul Rincon

Science editor, BBC News website, Geneva



The moment when Cern director Rolf Heuer confirmed the Higgs results

Cern scientists reporting from the Large Hadron Collider (LHC) have claimed the discovery of a new particle consistent with the Higgs boson.

MASS OF GAUGE VECTOR MESONS*

and R. Brout

Centre de Recherches, Bruxelles, Belgium

(16 June 1964)

ON MASSLESS PARTICLES AND GAUGE FIELDS

P. HIGGS

Physics Department, University of Edinburgh, Scotland

(27 July 1964)

VIEW LETTERS

19 OCTOBER 1964

ON THE MASSES OF GAUGE BOSONS

P. Higgs

Physics Department, University of Edinburgh, Edinburgh, Scotland

(August 1964)

ON MASSLESS PARTICLES AND MASSIVE PARTICLES*

Hagen, † and T. W. B. Kibble

Imperial College, London, England

Related (12 October 1964)

48년의 길고 긴 여정

BBC

News

Sport

Weather

BBC

News

Sport

Weather

Travel

Future

Autos

NEWS SCIENCE & ENVIRONMENT NEWS SCIENCE & ENVIRONMENT

Home UK Africa Asia Europe Latin America Mid-East US & Canada

Home UK Africa Asia Europe Latin America Mid-East US & Canada Business Health Sci/Environment

4 July 2012 Last updated at 07:35 GMT

14 March 2013 Last updated at 10:15 GMT

7.2K Share



Higgs boson-like particle discovered, claimed at LHC

COMMENTS (1665)

By Paul Rincon

Science editor, BBC News website, Geneva

LHC cements Higgs boson identification

By Jason Palmer

Science and technology reporter, BBC News



The moment when Cern director Rolf Heuer confirmed the Higgs results



The story of the precise nature of the particle announced in July is slowly pressing ahead

Cern scientists reporting from the Large Hadron Collider (LHC) have claimed the discovery of a new particle consistent with the Higgs boson.

Scientists at the Large Hadron Collider say the particle outlined in July 2012 looks increasingly to be a Higgs boson.

Related Stories

48년의 길고 긴 여정

BBC

News

Sport

Weather

BBC

News

Sport

Weather

Travel

Future

Autos

NEWS SCIENCE & ENVIRONMENT NEWS SCIENCE & ENVIRONMENT

Home UK Africa Asia Europe Latin America Mid-East US & Canada

Home UK Africa Asia Europe Latin America Mid-East US & Canada Business Health Sci/Environment

4 July 2012 Last updated at 07:35 GMT

14 March 2013 Last updated at 10:15 GMT

7.2K Share



Higgs boson-like particle claimed at LHC

COMMENTS (1665)

By Paul Rincon
Science editor, BBC News website

그래서, 다음
은 뭐지?

Measurements Higgs boson identification

Reporter, BBC News



The moment when Cern director Rolf Heuer confirmed the Higgs results



The story of the precise nature of the particle announced in July is slowly pressing ahead

Cern scientists reporting from the Large Hadron Collider (LHC) have claimed the discovery of a new particle consistent with the Higgs boson.

Scientists at the Large Hadron Collider say the particle outlined in July 2012 looks increasingly to be a Higgs boson.

Related Stories

그래서 이젠 뭘 해야하나?

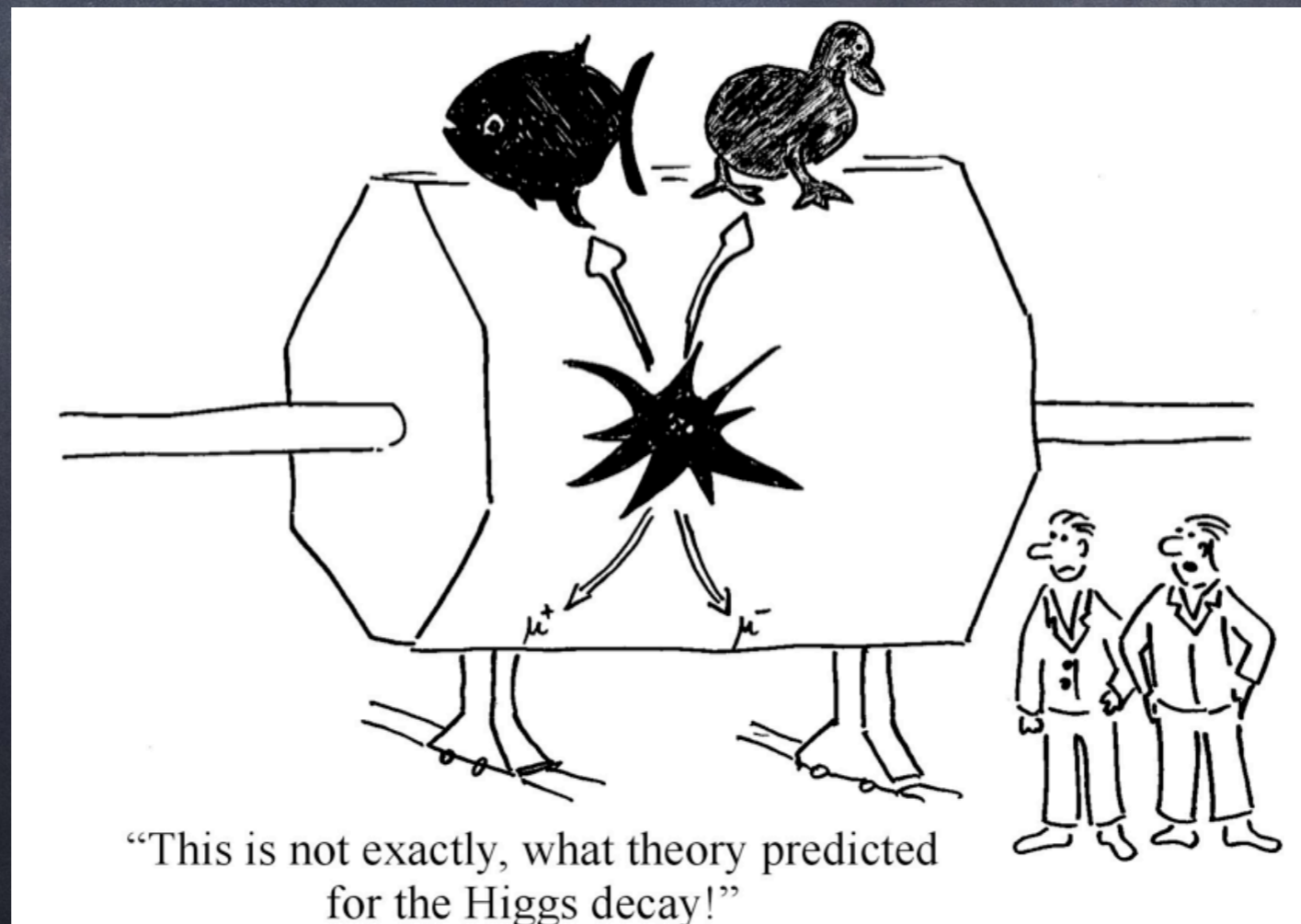
그래서 이젠 뭘 해야하나?

- 우리가 알던 것들과는 완전히 다른 새로운 입자인 힉스 보존을 발견했다.
- 그리고 이 새로운 입자가 증명하는 <힉스장>의 이론은 우주가 존재할 수 있도록 만들어 주는 근본 원리를 내포하고 있다.

그래서 이젠 뭘 해야하나?

- 우리가 알던 것들과는 완전히 다른 새로운 입자인 힉스 보손을 발견했다.
- 그리고 이 새로운 입자가 증명하는 <힉스장>의 이론은 우주가 존재할 수 있도록 만들어 주는 근본 원리를 내포하고 있다.

FCC의 최대 미션: 우리에게 주어진 과제는 힉스장 이론을 제대로 파악하는 것이다 - LHC는 첫번째 스텝이었을 뿐이다.



왜 표준모형의 기본 입자들은 질량을 갖을까?

- 발견한 사실: photon과 gluon만 질량이 0이다
- gauge symmetry: 다른 모든 입자들도 질량이 0이어야 함

왜 표준모형의 기본 입자들은 질량을 갖을까?

- 발견한 사실: photon과 gluon만 질량이 0이다
- gauge symmetry: 다른 모든 입자들도 질량이 0이어야 함

$$A_\mu \rightarrow A_\mu + \partial_\mu \epsilon$$

왜 표준모형의 기본 입자들은 질량을 갖을까?

- 발견한 사실: photon과 gluon만 질량이 0이다
- gauge symmetry: 다른 모든 입자들도 질량이 0이어야 함

왜 표준모형의 기본 입자들은 질량을 갖을까?

- 발견한 사실: photon과 gluon만 질량이 0이다
- gauge symmetry: 다른 모든 입자들도 질량이 0이어야 함

$$A_{\mu}^a \rightarrow A_{\mu}^a + \partial_{\mu}\epsilon^a + f^{abc} A_{\mu}^b \epsilon^c$$

왜 표준모형의 기본 입자들은 질량을 갖을까?

- 발견한 사실: photon과 gluon만 질량이 0이다
- gauge symmetry: 다른 모든 입자들도 질량이 0이어야 함

$$A_{\mu}^a \rightarrow A_{\mu}^a + \partial_{\mu}\epsilon^a + f^{abc} A_{\mu}^b \epsilon^c \quad A_{\mu} A^{\mu}$$

왜 표준모형의 기본 입자들은 질량을 갖을까?

- 발견한 사실: photon과 gluon만 질량이 0이다
- gauge symmetry: 다른 모든 입자들도 질량이 0이어야 함

$$A_{\mu}^a \rightarrow A_{\mu}^a + \partial_{\mu}\epsilon^a + f^{abc} A_{\mu}^b \epsilon^c$$

~~$$A_{\mu} A^{\mu}$$~~

왜 표준모형의 기본 입자들은 질량을 갖을까?

- 발견한 사실: photon과 gluon만 질량이 0이다
- gauge symmetry: 다른 모든 입자들도 질량이 0이어야 함

$$A_{\mu}^a \rightarrow A_{\mu}^a + \partial_{\mu}\epsilon^a + f^{abc} A_{\mu}^b \epsilon^c \quad \cancel{A_{\mu} A^{\mu}}$$

=> 약전자기 대칭성은 일관성있게 깨져야 한다.

힉스는 퍼표준모형의 약전자기 대칭성을 깨뜨린다

- 약전자기 대칭성은 자발적으로 붕괴해야 한다:
 - $action$ 의 대칭성이지만, $vacuum$ 의 대칭성은 아니다

힉스는 퍼표준모형의 약전자기 대칭성을 깨뜨린다

- 약전자기 대칭성은 자발적으로 붕괴해야 한다:
 - action의 대칭성이지만, vacuum의 대칭성은 아니다
 - vacuum이 매개체(medium)의 역할을 해준다:
입자들의 전파(propagation) 속도를 느리게 만든다

힉스는 퍼표준모형의 약전자기 대칭성을 깨뜨린다

- 약전자기 대칭성은 자발적으로 붕괴해야 한다:
 - action의 대칭성이지만, vacuum의 대칭성은 아니다
 - vacuum이 매개체(medium)의 역할을 해준다:
입자들의 전파(propagation) 속도를 느리게 만든다
- 질량은 입자들이 매개체에서 전파하며 속도가 낮춰진다는 것은 입자들이 질량이 생겼다는 말이다 (질량의 기원)
 - 하지만 매개체(medium)는 상대론적으로 불변해야 한다

솔루션:

d	s	b	g
u	c	t	γ
e	μ	τ	W
ν_e	ν_μ	ν_τ	Z

솔루션:

=> scalar field (힉스)!



힉스 = 질량의 기원

- 힉스(scalar field)는 Lorentz transformation에 대해 불변
- 하지만, "internal"한 약전자기 space에서 선호하는 방향을 얻는다

(Lagrangian의 대칭성)

힉스 = 질량의 기원

- 힉스(scalar field)는 Lorentz transformation에 대해 불변
- 하지만, "internal"한 약전자기 space에서 선호하는 방향을 얻는다

(Lagrangian의 대칭성)

$SU(2) \times U(1)_Y$

$$H = \begin{pmatrix} h^+ \\ h^0 \end{pmatrix}$$

힉스 = 질량의 기원

- 힉스(scalar field)는 Lorentz transformation에 대해 불변
- 하지만, "internal"한 약전자기 space에서 선호하는 방향을 얻는다

(Lagrangian의 대칭성)

$$SU(2) \times U(1)_Y$$

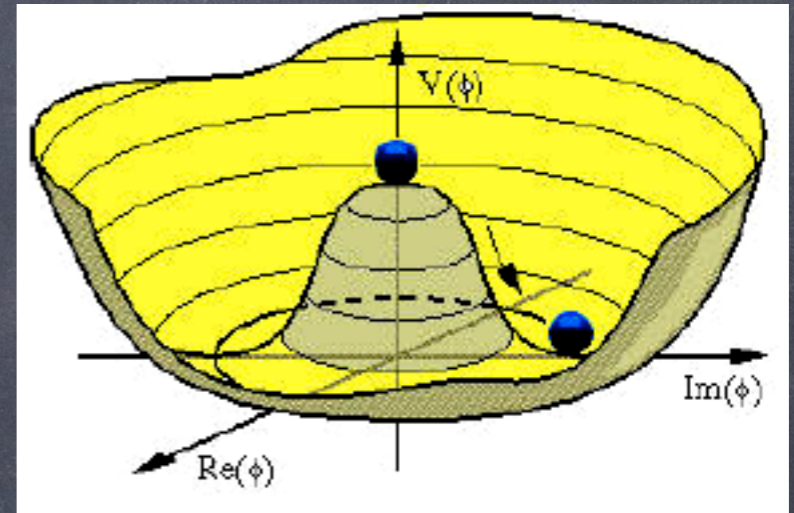
$$H = \begin{pmatrix} h^+ \\ h^0 \end{pmatrix}$$

(symmetry of the Vacuum)

$$U(1)_{e.m.}$$

Vacuum Expectation Value

$$\langle H \rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{v}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \text{ with } v \approx 246$$



$$V(H) = -\mu^2 H^+ H + \lambda (H^+ H)^2$$

힉스 = 질량의 기원

● 힉스(scalar field)는 Lorentz transformation에 대해 불변

● 하지만, "internal"한 약전자기 space에서 선호하는 방향을 얻는다

(Lagrangian의 대칭성)

$$SU(2) \times U(1)_Y$$

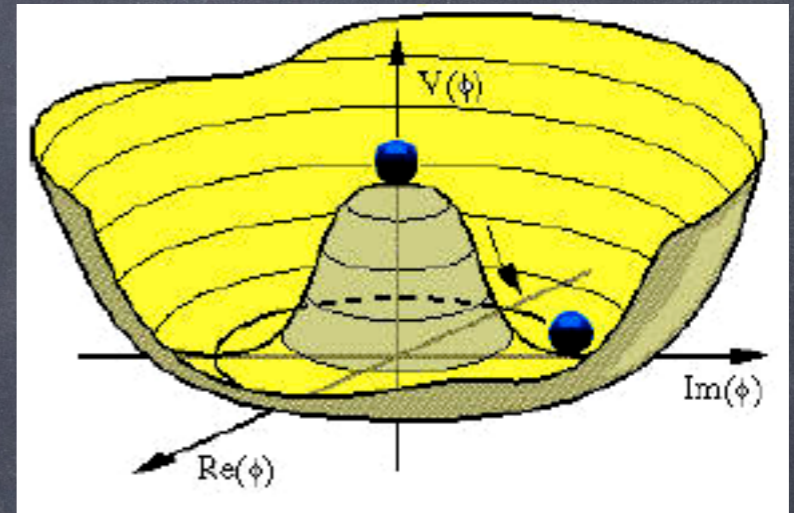
$$H = \begin{pmatrix} h^+ \\ h^0 \end{pmatrix}$$

(symmetry of the Vacuum)

$$U(1)_{e.m.}$$

Vacuum Expectation Value

$$\langle H \rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{v}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \text{ with } v \approx 246$$



$$V(H) = -\mu^2 H^+ H + \lambda (H^+ H)^2$$

● 질량 항을 만들어낸다:

$$A_\mu H A^\mu H \rightarrow A_\mu \langle H \rangle A^\mu \langle H \rangle$$

● photon 은 여전히 질량이 0 (깨지지 않은 하나의 방향)

$$SU(2) \times U(1) \rightarrow U(1)_{EM}$$

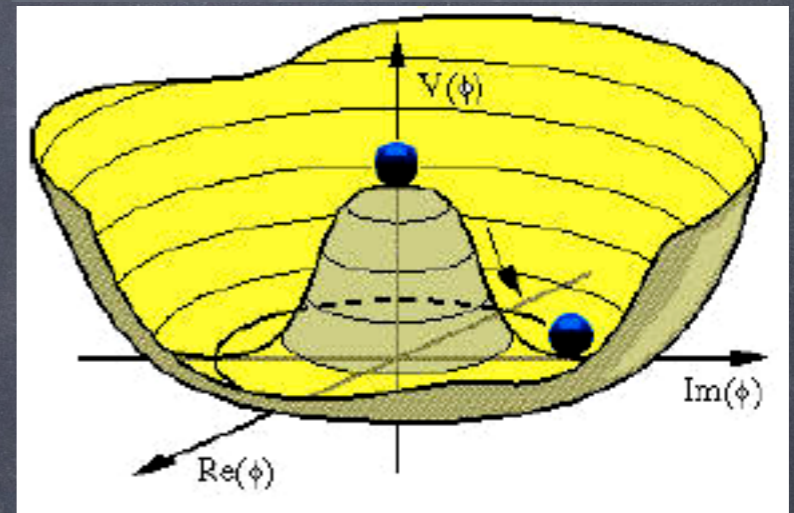
힉스 = 질량의 기원

(symmetry of the Vacuum)

$$U(1)_{e.m.}$$

Vacuum Expectation Value

$$\langle H \rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{v}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \text{ with } v \approx 246$$



힉스는 게이지 대칭성을 깨뜨린다

● 힉스(scalar transformation)

● 하지만 게이지 대칭성을 깨뜨린다

$$H = \begin{pmatrix} h^+ \\ h^0 \end{pmatrix}$$

$$V(H) = -\mu^2 H^+ H + \lambda (H^+ H)^2$$

● 질량 항을 만들어낸다:

$$A_\mu H A^\mu H \rightarrow A_\mu \langle H \rangle A^\mu \langle H \rangle$$

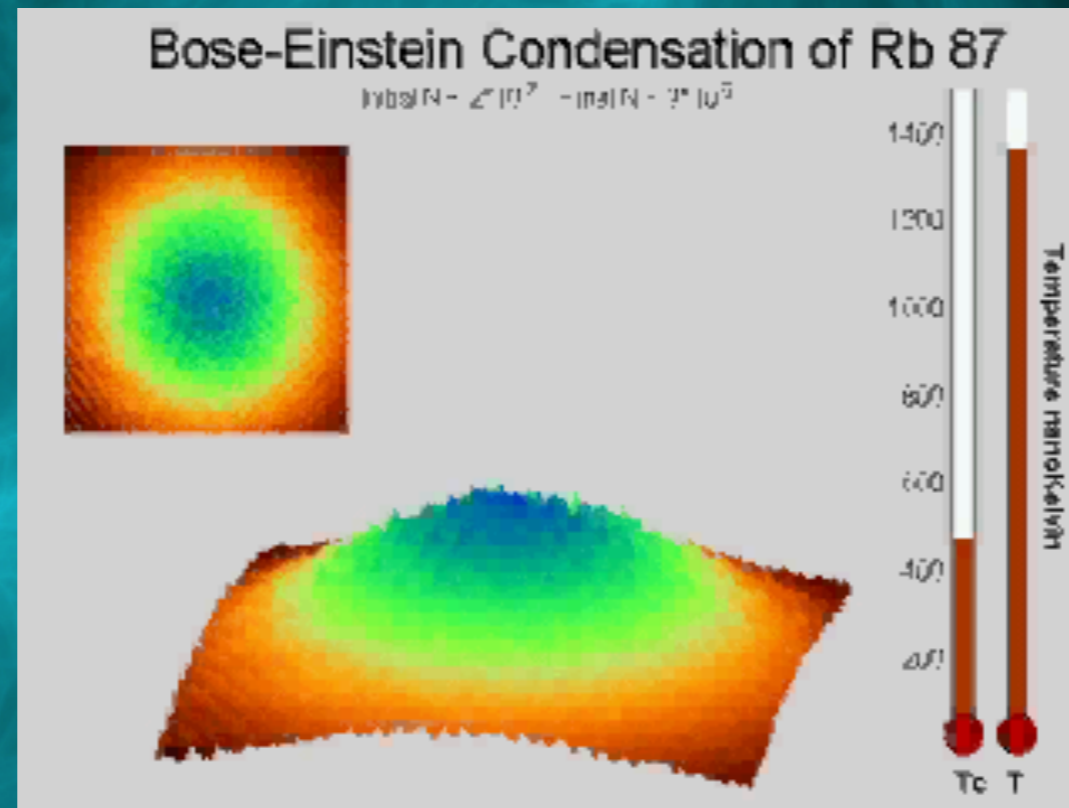
● photon 은 여전히 질량이 0

(깨지지 않은 하나의 방향)

$$SU(2) \times U(1) \rightarrow U(1)_{EM}$$

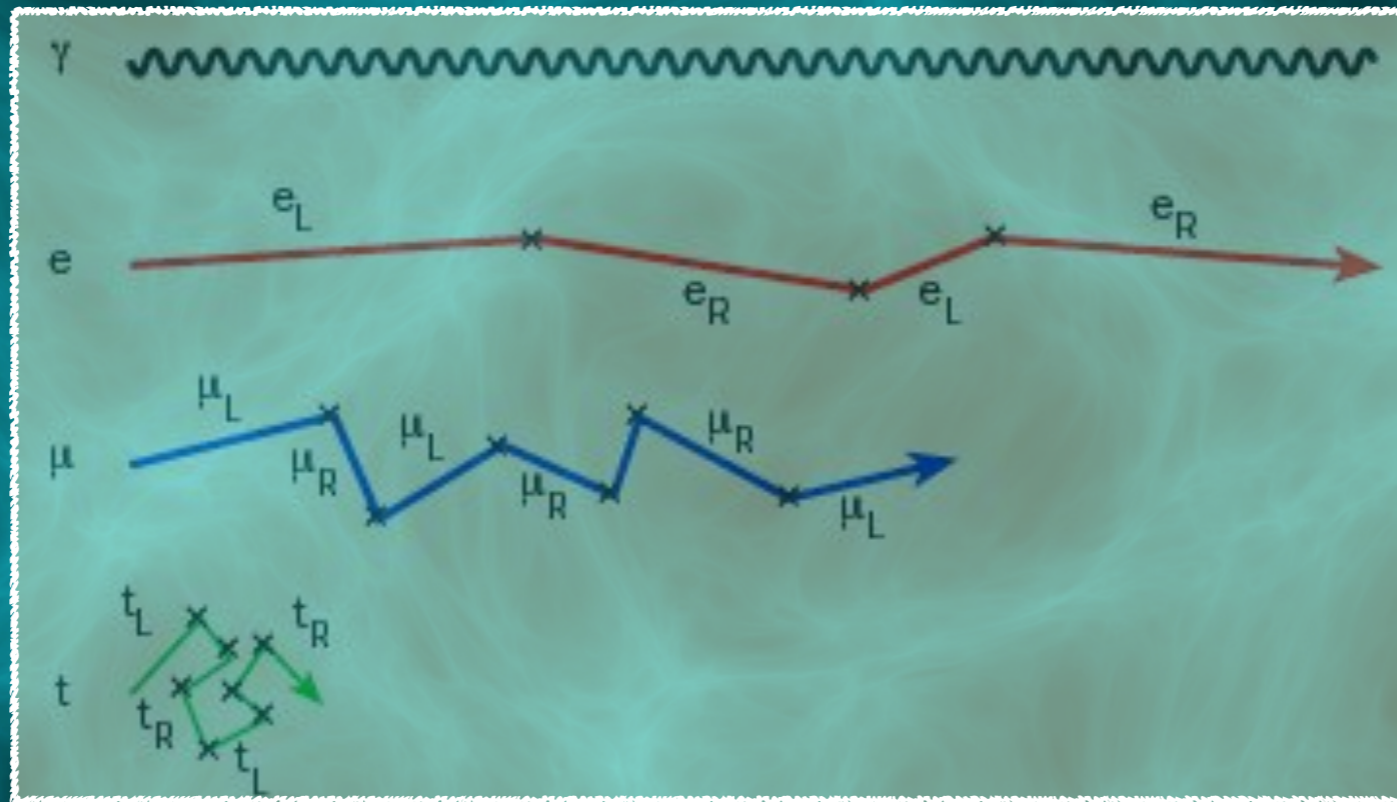
힉스 = 질량의 기원

- 온 우주가 힉스의 응축(condensate)들로 가득차있다 (Quantum Liquid)
- 이 응축들과의 상호작용으로 입자의 속도가 느려진다
- 입자가 질량이 있는 것과 같은 효과가 생기는 것이다



힉스 = 질량의 기원

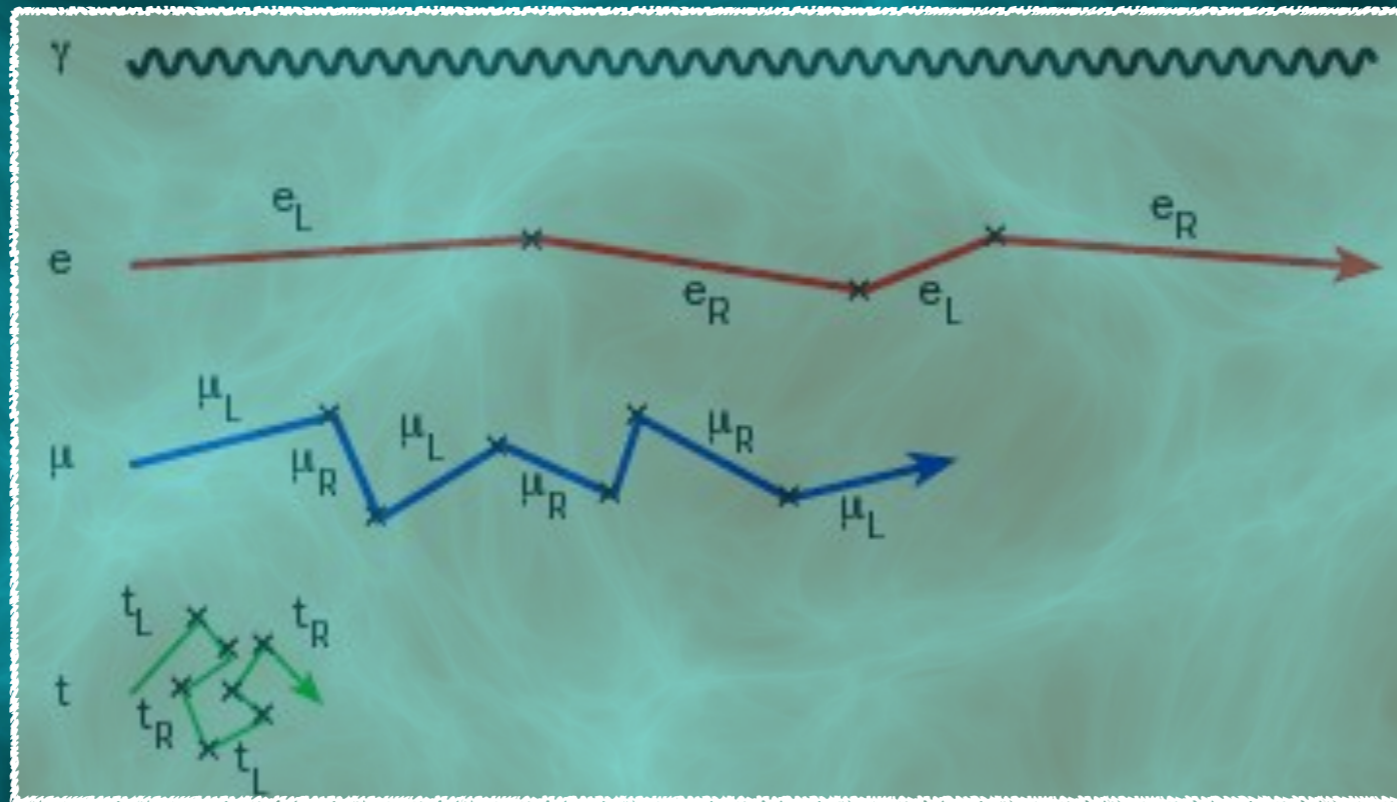
- 온 우주가 힉스의 응축(condensate)들로 가득차있다 (Quantum)
- 이 응축들과의 상호작용으로 입자의 속도가 느려진다
- 입자가 질량이있는 것과 같은 효과가 생기는 것이다
- 에테르 이론과 비슷하지만, 상대론적으로 불변 (scalar field!)



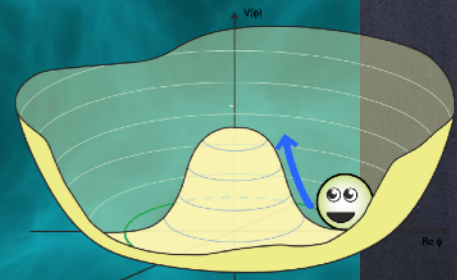
$$F=ma$$

힉스 = 질량의 기원

- 온 우주가 힉스의 응축(condensate)들로 가득차있다 (Quantum)
- 이 응축들과의 상호작용으로 입자의 속도가 느려진다
- 입자가 질량이있는 것과 같은 효과가 생기는 것이다
- 에테르 이론과 비슷하지만, 상대론적으로 불변 (scalar field!)



$$F=ma$$



- 물리적인 scalar 입자가 한개 존재한다 (힉스 포텐셜의 radial excitation에 해당): 힉스 보존이라 불림 => 지금까지 LHC의 핵심적인 발견.

힉스 메커니즘의 비유

유체에 공을 던진 것과 같다



$$F_{\text{visc}} = -b$$

viscous damping

$$F_{\text{drag}} = -bv^2$$

turbulent damping

$$F_{\text{higgs}} = -ba$$

힉스 damping



$$F_{\text{tot}} = \sum_i F_i - ba = 0$$

$$\sum_i F_i = ba$$

유효 질량

만일 힉스 메커니즘이 없 었다면 우리 우주는?

- 전자와 쿼크들은 질량이 0이다
- 강한동력학인 QCD를 통한 구속현상
으로 양성자는 질량을 여전히 갖을
것이다 => 핵입자의 질량은 그대로
- 전자(electron)의 질량은 0 => 원자가
존재할 수 없다
- 원자가 존재할 수 없다면 => 화학도
존재할 수 없다 => 액체, 고체도 존재
할 수 없다 => 생명은 존재할 수 없다

$$a_0 = \frac{\hbar^2}{m_e e^2}$$

만일 힉스 메커니즘이 없 었다면 우리 우주는?

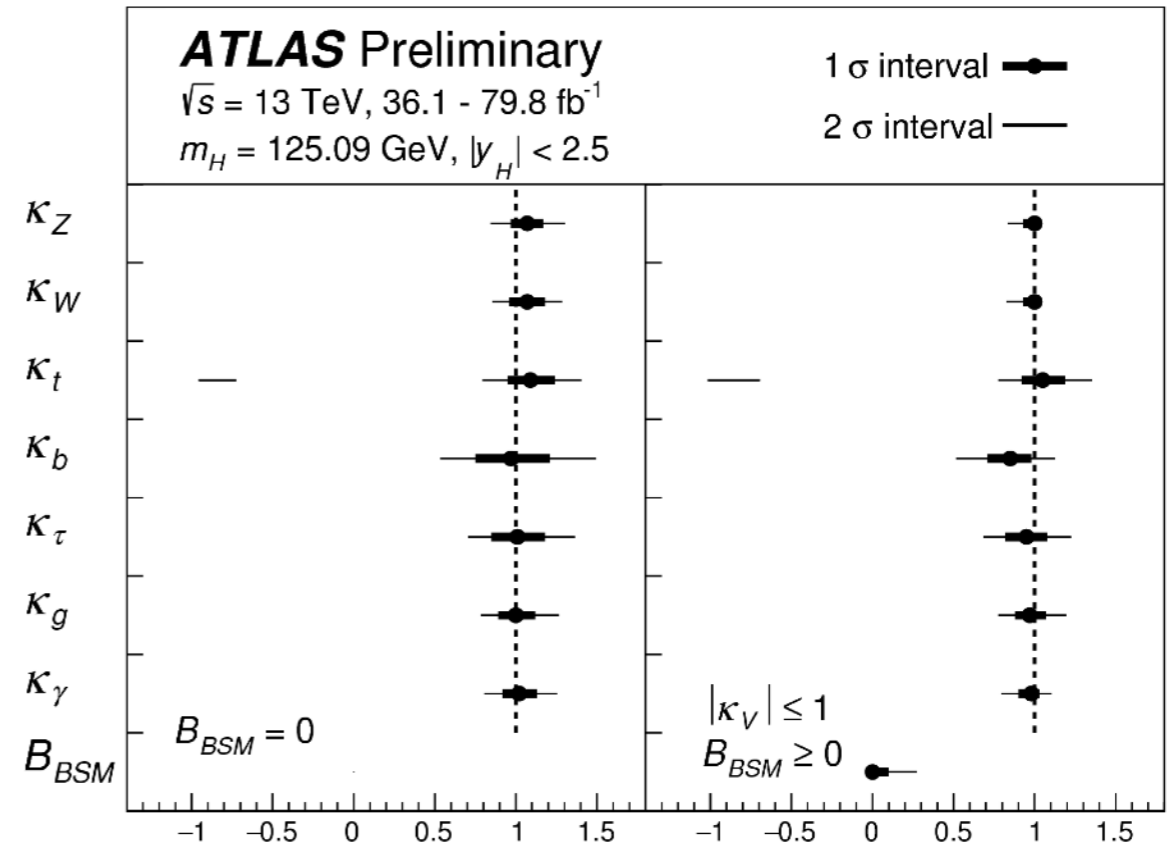
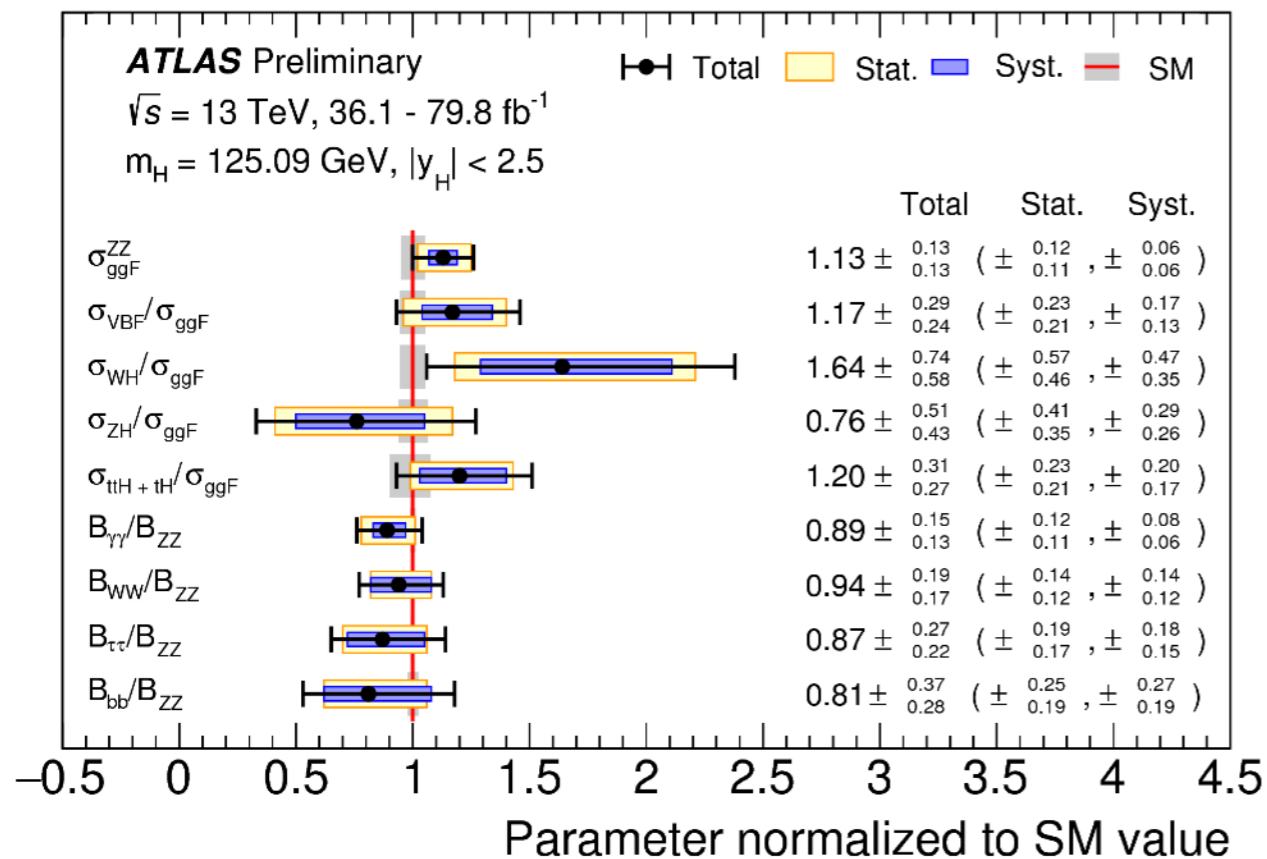
- 전자와 쿼크들은 질량이 0이다
- 강한동력학인 QCD를 통한 구속현상
으로 양성자는 질량을 여전히 갖을
것이다 => 핵입자의 질량은 그대로
- 전자(electron)의 질량은 0 => 원자가
존재할 수 없다
- 원자가 존재할 수 없다면 => 화학도
존재할 수 없다 => 액체, 고체도 존재
할 수 없다 => 생명은 존재할 수 없다

$$a_0 = \frac{\hbar^2}{m_e e^2}$$

우리가 존재하는 이유

LHC를 통해 힉스에 대해 알고있는 것

가장 시급한 질문: 힉스의 coupling은 표준모형과 일치하나?



대략적으로 **표준모형과** ~ 20% 정밀도로 일치해 보임. 하지만 같지 않을 수도 있다. 특히 가벼운 쿼크, 전자와 힉스의 coupling은 측정이 LHC에서는 불가능하다.

FCC와 힉스 정밀측정

		K_γ	K_W	K_Z	K_g	K_b	K_t	K_τ	$K_{Z\gamma}$	K_μ
300fb^{-1}	ATLAS	[9,9]	[9,9]	[8,8]	[11,14]	[22,23]	[20,22]	[13,14]	[24,24]	[21,21]
300fb^{-1}	CMS	[5,7]	[4,6]	[4,6]	[6,8]	[10,13]	[14,15]	[6,8]	[41,41]	[23,23]
3000fb^{-1}	ATLAS	[4,5]	[4,5]	[4,4]	[5,9]	[10,12]	[8,11]	[9,10]	[14,14]	[7,8]
3000fb^{-1}	CMS	[2,5]	[2,5]	[2,4]	[3,5]	[4,7]	[7,10]	[2,5]	[10,12]	[8,8]

(A. Nisati, talk at IAS, 20 Jan 2015)

–ATLAS: [no theory uncert., full theory uncert.]

(P. Janot, talk at FCC-ee, 24 Sep 2015)

–CMS: [Scenario 2, Scenario1]

Error on	$\mu\mu$ Collider	ILC	FCC-ee
m_H (MeV)	0.06	30	8
Γ_H (MeV)	0.17	0.16	0.04
g_{Hbb}	2.3%	1.5%	0.4%
g_{HWW}	2.2%	0.8%	0.2%
$g_{H\tau\tau}$	5%	1.9%	0.5%
$g_{H\gamma\gamma}$	10%	7.8%	1.5%
$g_{H\mu\mu}$	2.1%	20%	6.2%
g_{HZZ}	–	0.6%	0.15%
g_{Hcc}	–	2.7%	0.7%
g_{Hgg}	–	2.3%	0.8%
BR_{invis}	–	<0.5%	<0.1%

LHC: 5-20 %

HL-LHC: 2-10%

FCC-ee: 0.2-1%

힉스는 정밀 측정을 요구한다

힉스 = 다른 종류의 새로운 힘
-국소적인 대칭성이 없다
-양자화된 전하를 갖지 않는다

물질과 우주의 구조를 이해하기 위해서는 힉스의 coupling값을 알아야한다

$m_W, m_Z \leftrightarrow$ Higgs couplings
↑
lifetime of stars
(why $t_{\text{Sun}} \sim t_{\text{life evolution}}$?)

$m_e, m_u, m_d \leftrightarrow$ Higgs couplings
size of atoms nuclei stability

EWSB @ $t \sim 10^{-10}\text{s} \leftrightarrow$ Higgs self-coupling(s)
Higgs(es) potential

matter/anti-matter \leftrightarrow CPV in Higgs sector

힉스는 정밀 측정을 요구한다

LHC, HL-LHC로는 충분하지 않다: FCC가 필요한 이유

물질과 우주의 구조를 이해하기 위해서는 힉스의 coupling값을 알아야한다

$m_W, m_Z \leftrightarrow$ Higgs couplings
↑
lifetime of stars
(why $t_{\text{Sun}} \sim t_{\text{life evolution}}$?)

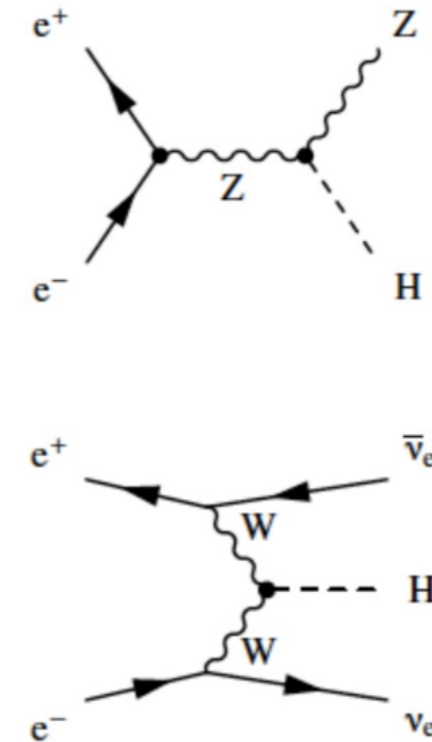
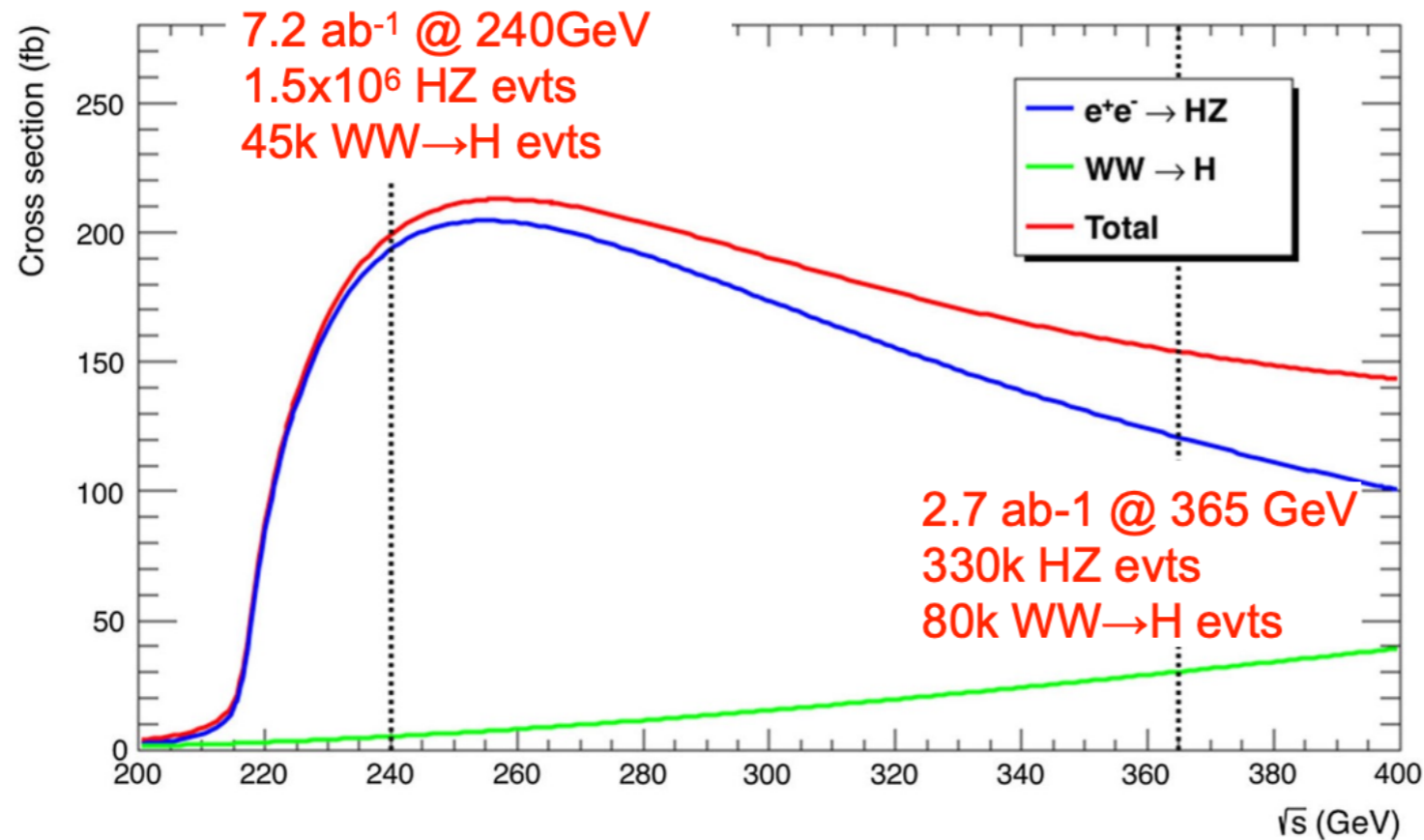
$m_e, m_u, m_d \leftrightarrow$ Higgs couplings
↙ ↘
size of atoms nuclei stability

EWSB @ $t \sim 10^{-10}\text{s} \leftrightarrow$ Higgs self-coupling(s)
? Higgs(es) potential

matter/anti-matter \leftrightarrow CPV in Higgs sector
?

Higgs @ FCC-ee.

FCC-ee의 핵심 목표: 힉스의 width와 coupling들을 %레벨 보다 낮게 측정하기



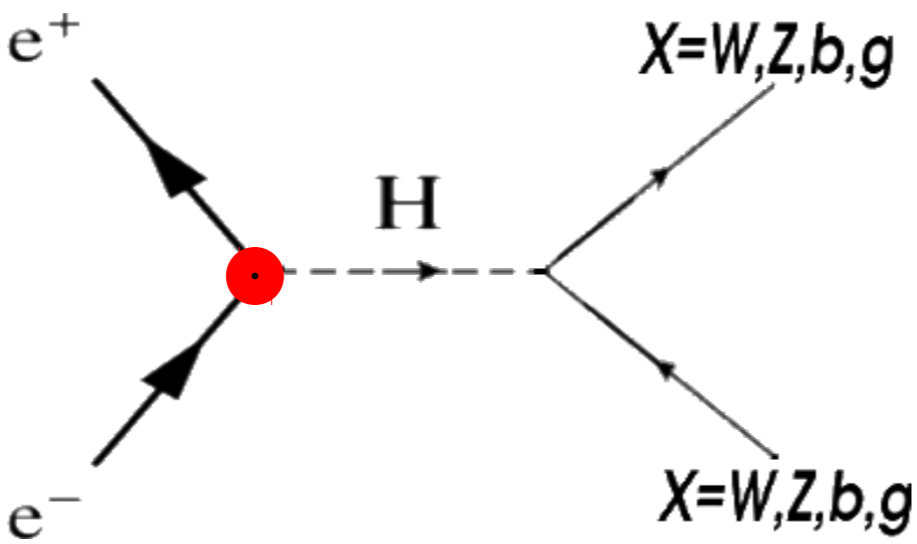
Sensitivity to both processes very helpful in improving precision on couplings.

Complementarity with 365GeV on top of 240GeV

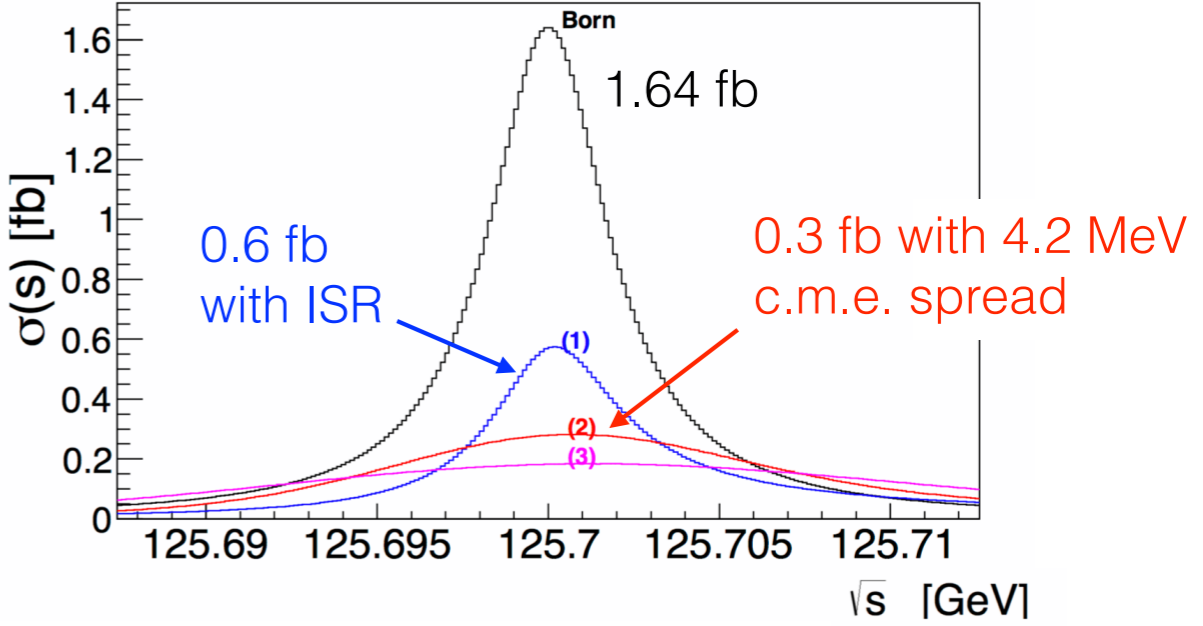
improvement factor: $\infty/3/2/1.5/1.2$ on $\kappa_\lambda/\kappa_W/\kappa_b/\kappa_g, \kappa_c/\kappa_\gamma$ (plot in bonus)

The stuff we are made of: Y_e .

높은 luminosity와 beam의 정밀 컨트롤 들을 통해서 final state들을 깨끗하게 reconstruct하는 것이 핵심



Jadach+, arXiv: 1509.02406



$$\sigma(e^+e^- \rightarrow H) = 1.64 \text{ fb}$$

$$\sigma_{\text{spread+ISR}}(e^+e^- \rightarrow H) = 0.17 \times \sigma(e^+e^- \rightarrow H) = 290 \text{ ab}$$

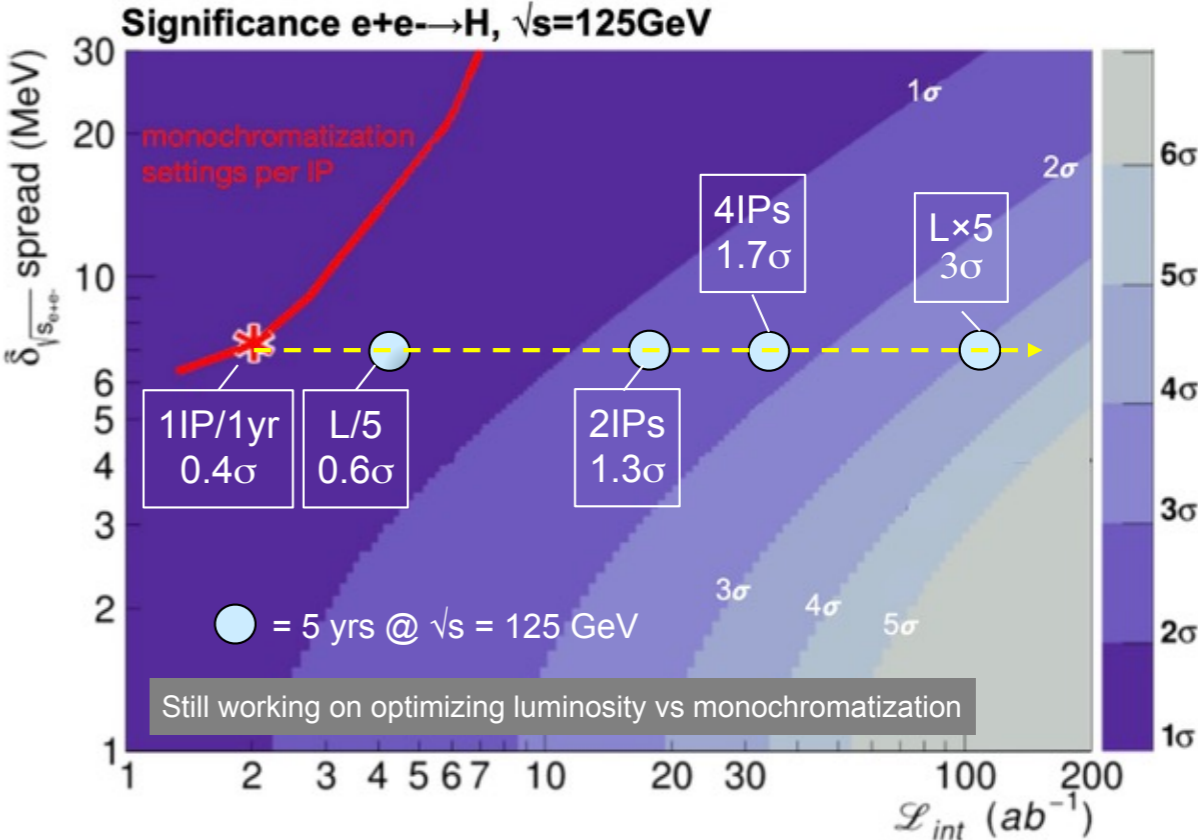
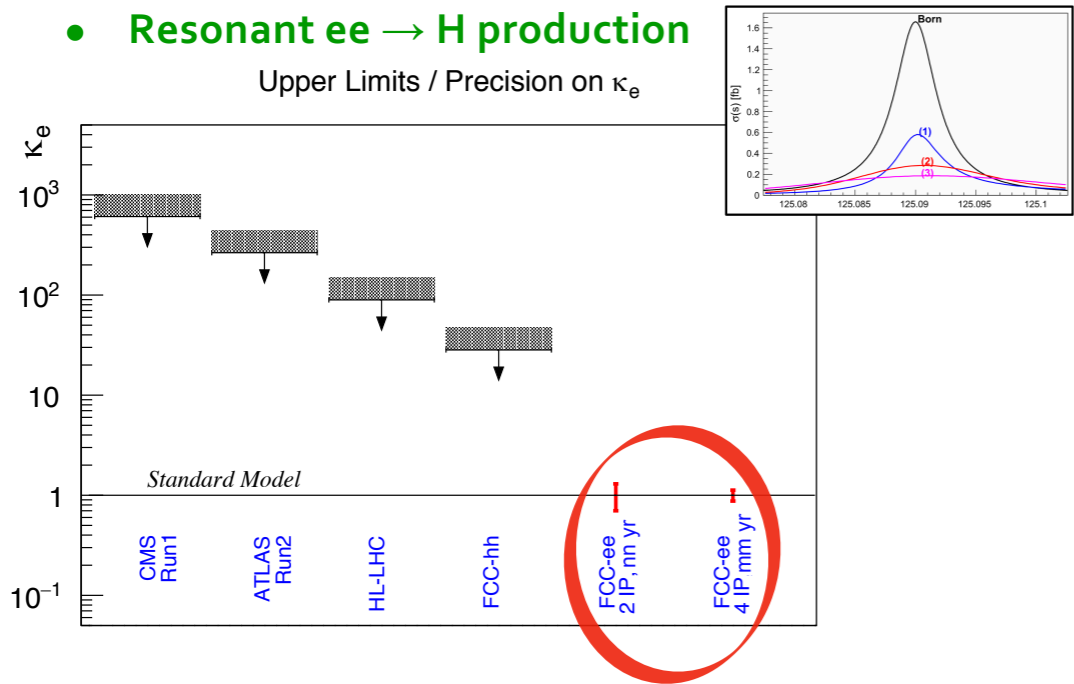
FCC-ee의 가장 중요한 물리학적인 임무는:
일반적인 물질을 구성하는 전자와 같은 기본 입자들의 질량이 힉스메커니즘 때문인지 확인하는 것이다

The stuff we are made of: Y_e .

The high luminosity, the precise control of the beam \sqrt{s} , the clean reconstruction of final states make it possible to observe:

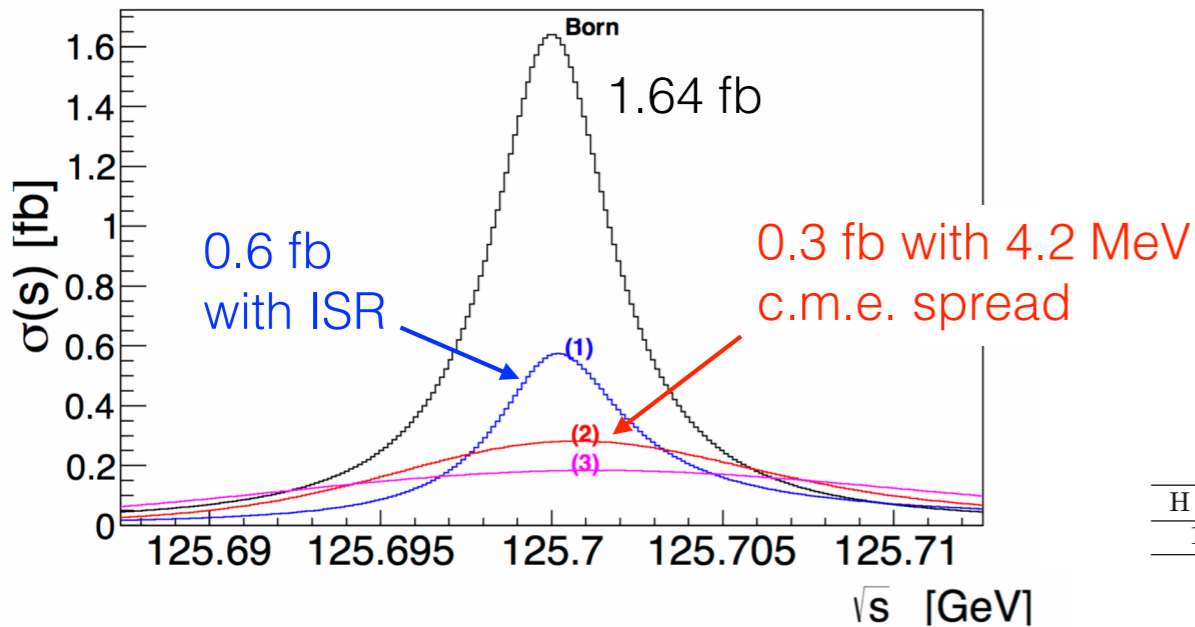
- ◆ 20 ab^{-1} /year at $\sqrt{s} = 125$ GeV (not in baseline FCC-ee)
- ◆ Monochromatization $\sigma_{\sqrt{s}} \sim 1-2 \times \Gamma_H \sim 6$ to 10 MeV
- Resonant $ee \rightarrow H$ production

Upper Limits / Precision on κ_e



The stuff we are made of: Y_e .

Jadach+, arXiv: 1509.02406



d'Enterria+, arXiv: 2107.02686

Higgs decay channel	\mathcal{B}	$\sigma \times \mathcal{B}$	Irreducible background	σ	S/B
$e^+e^- \rightarrow H \rightarrow b\bar{b}$	58.2%	164 ab	$e^+e^- \rightarrow b\bar{b}$	19 pb	$\mathcal{O}(10^{-5})$
$e^+e^- \rightarrow H \rightarrow gg$	8.2%	23 ab	$e^+e^- \rightarrow q\bar{q}$	61 pb	$\mathcal{O}(10^{-3})$
$e^+e^- \rightarrow H \rightarrow \tau\tau$	6.3%	18 ab	$e^+e^- \rightarrow \tau\tau$	10 pb	$\mathcal{O}(10^{-6})$
$e^+e^- \rightarrow H \rightarrow c\bar{c}$	2.9%	8.2 ab	$e^+e^- \rightarrow c\bar{c}$	22 pb	$\mathcal{O}(10^{-7})$
$e^+e^- \rightarrow H \rightarrow WW^* \rightarrow \ell\nu 2j$	$21.4\% \times 67.6\% \times 32.4\% \times 2$	26.5 ab	$e^+e^- \rightarrow WW^* \rightarrow \ell\nu 2j$	23 fb	$\mathcal{O}(10^{-3})$
$e^+e^- \rightarrow H \rightarrow WW^* \rightarrow 2\ell 2\nu$	$21.4\% \times 32.4\% \times 32.4\%$	6.4 ab	$e^+e^- \rightarrow WW^* \rightarrow 2\ell 2\nu$	5.6 fb	$\mathcal{O}(10^{-3})$
$e^+e^- \rightarrow H \rightarrow WW^* \rightarrow 4j$	$21.4\% \times 67.6\% \times 67.6\%$	27.6 ab	$e^+e^- \rightarrow WW^* \rightarrow 4j$	24 fb	$\mathcal{O}(10^{-3})$
$e^+e^- \rightarrow H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 2j 2\nu$	$2.6\% \times 70\% \times 20\% \times 2$	2 ab	$e^+e^- \rightarrow ZZ^* \rightarrow 2j 2\nu$	273 ab	$\mathcal{O}(10^{-2})$
$e^+e^- \rightarrow H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 2\ell 2j$	$2.6\% \times 70\% \times 10\% \times 2$	1 ab	$e^+e^- \rightarrow ZZ^* \rightarrow 2\ell 2j$	136 ab	$\mathcal{O}(10^{-2})$
$e^+e^- \rightarrow H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 2\ell 2\nu$	$2.6\% \times 20\% \times 10\% \times 2$	0.3 ab	$e^+e^- \rightarrow ZZ^* \rightarrow 2\ell 2\nu$	39 ab	$\mathcal{O}(10^{-2})$
$e^+e^- \rightarrow H \rightarrow \gamma\gamma$	0.23%	0.65 ab	$e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$	79 pb	$\mathcal{O}(10^{-8})$

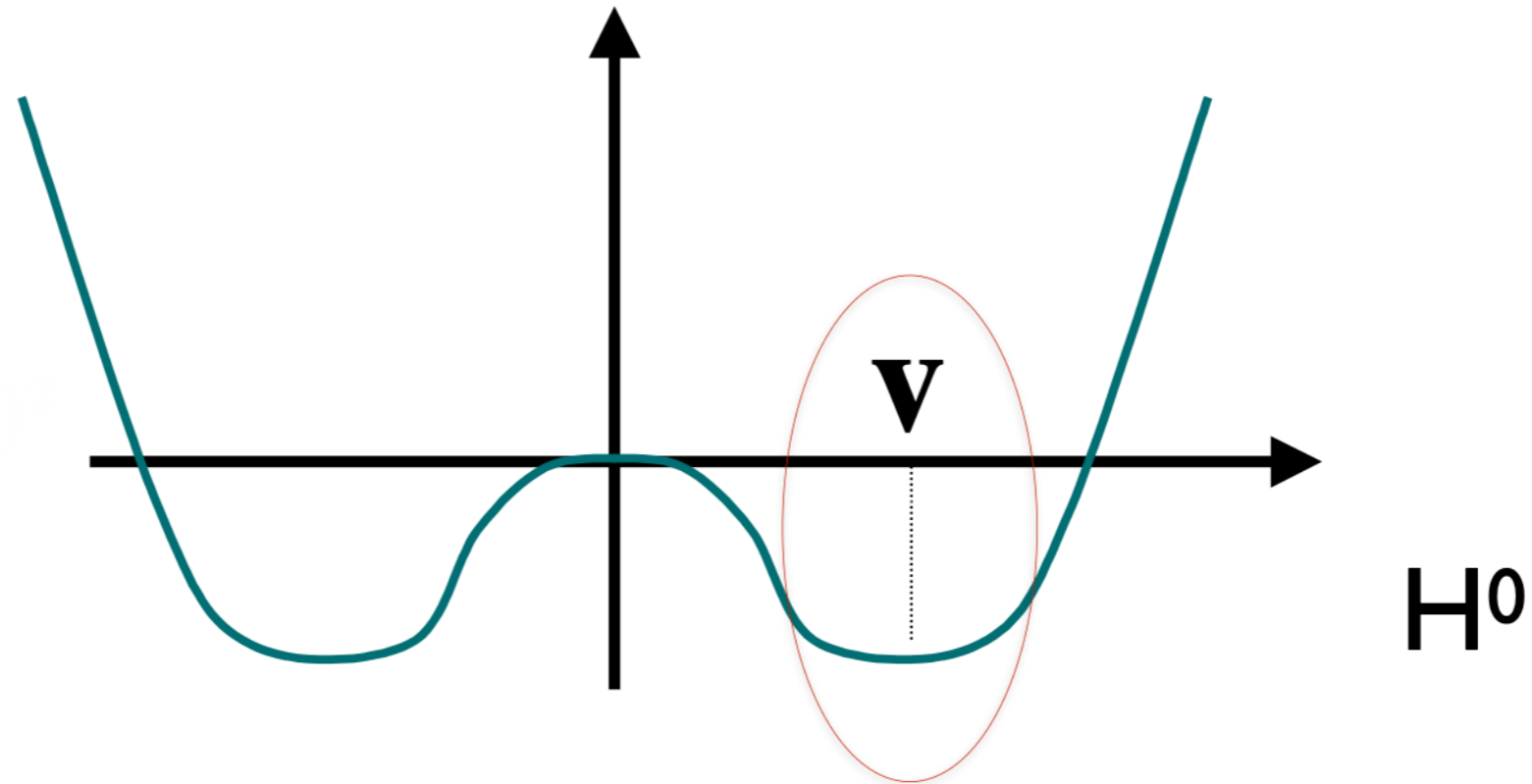
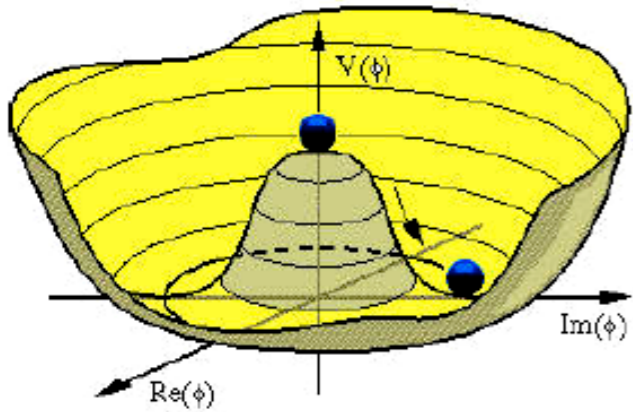
$H \rightarrow gg$	$H \rightarrow WW^* \rightarrow \ell\nu 2j; 2\ell 2\nu; 4j$	$H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 2j 2\nu; 2\ell 2j; 2\ell 2\nu$	$H \rightarrow b\bar{b}$	$H \rightarrow \tau_{\text{had}}\tau_{\text{had}}; c\bar{c}; \gamma\gamma$	Combined
1.1σ	$(0.53 \otimes 0.34 \otimes 0.13)\sigma$	$(0.32 \otimes 0.18 \otimes 0.05)\sigma$	0.13σ	$< 0.02\sigma$	1.3σ

w/ 10/ab: S~55, B~2400 \rightarrow 1.1 σ

FCC-ee는:

일반적인 물질을 구성하는 전자와 같은 기본 입자들의 질량이 힉스메커니즘 때문인지 확인할 수 있는 매우 중요한 실험이 될 것이다.

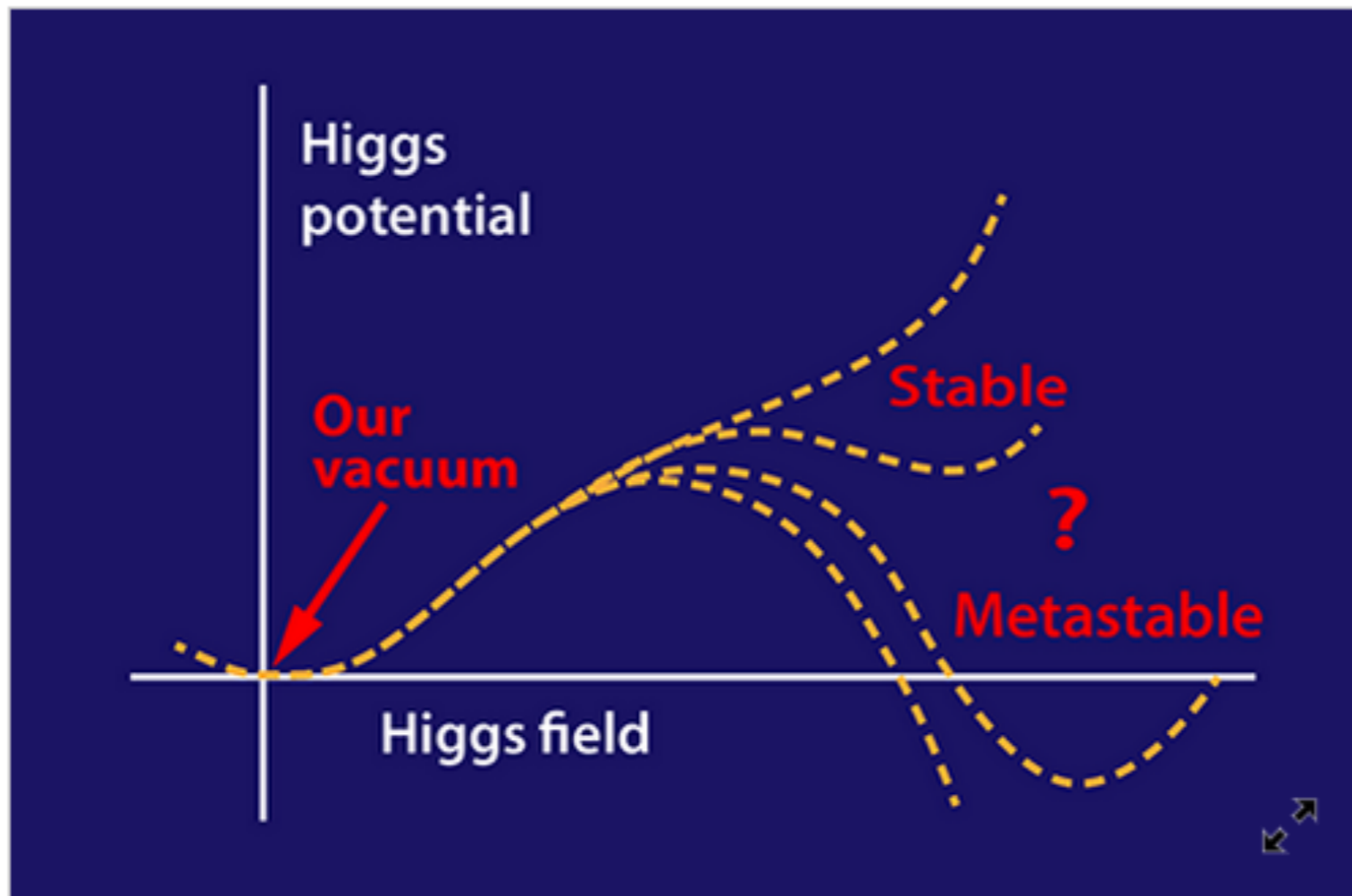
약전자기 대칭성의 붕괴와 힉스 포텐셜



$$V(H) = -\mu^2 |H|^2 + \lambda |H|^4$$

힉스 포텐셜은 왜 어디서 어떻게 존재하는 것일까?

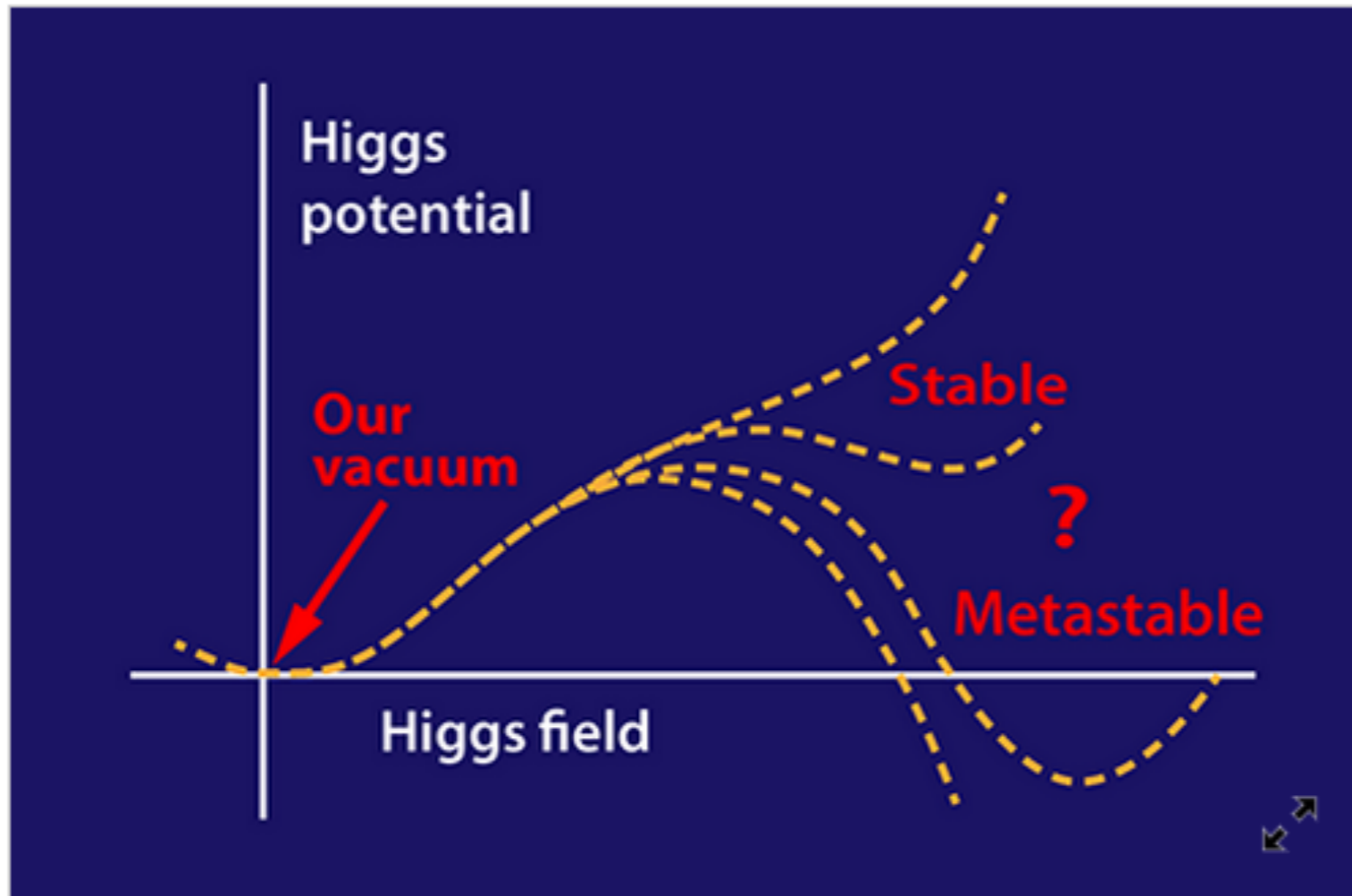
Vacuum의 안정성



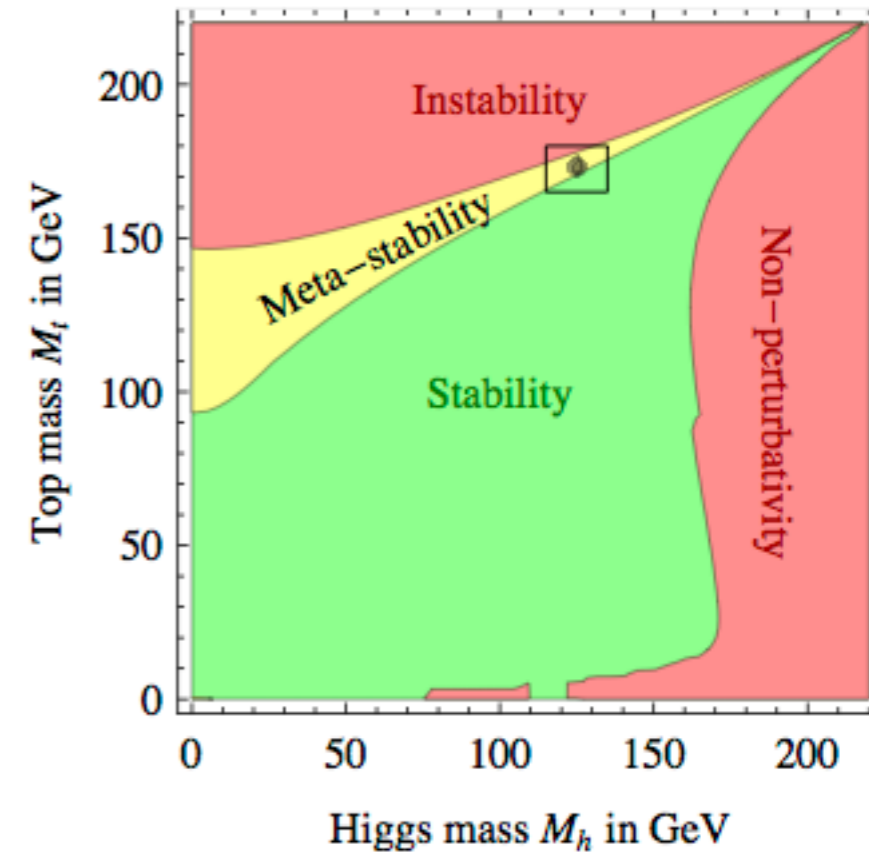
APS/Alan Stonebraker

The ground state of the Universe depends on the potential of the Higgs field. If the Universe lies in the global minimum of the potential (a “true” vacuum state), then it is stable. But if the minimum is local and a deeper minimum exists, the vacuum is “false,” and the Universe might catastrophically tunnel out into the true vacuum state.

Vacuum의 안정성



APS/Alan Stonebraker



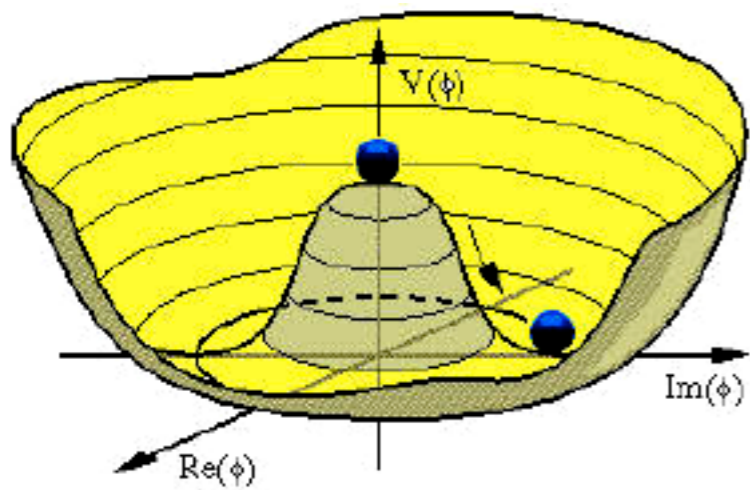
The ground state of the Universe depends on the potential. If the vacuum state is local and a deeper minimum exists, the vacuum is “false,” and it can tunnel out into the true vacuum state.

The Standard Model (In)Stability

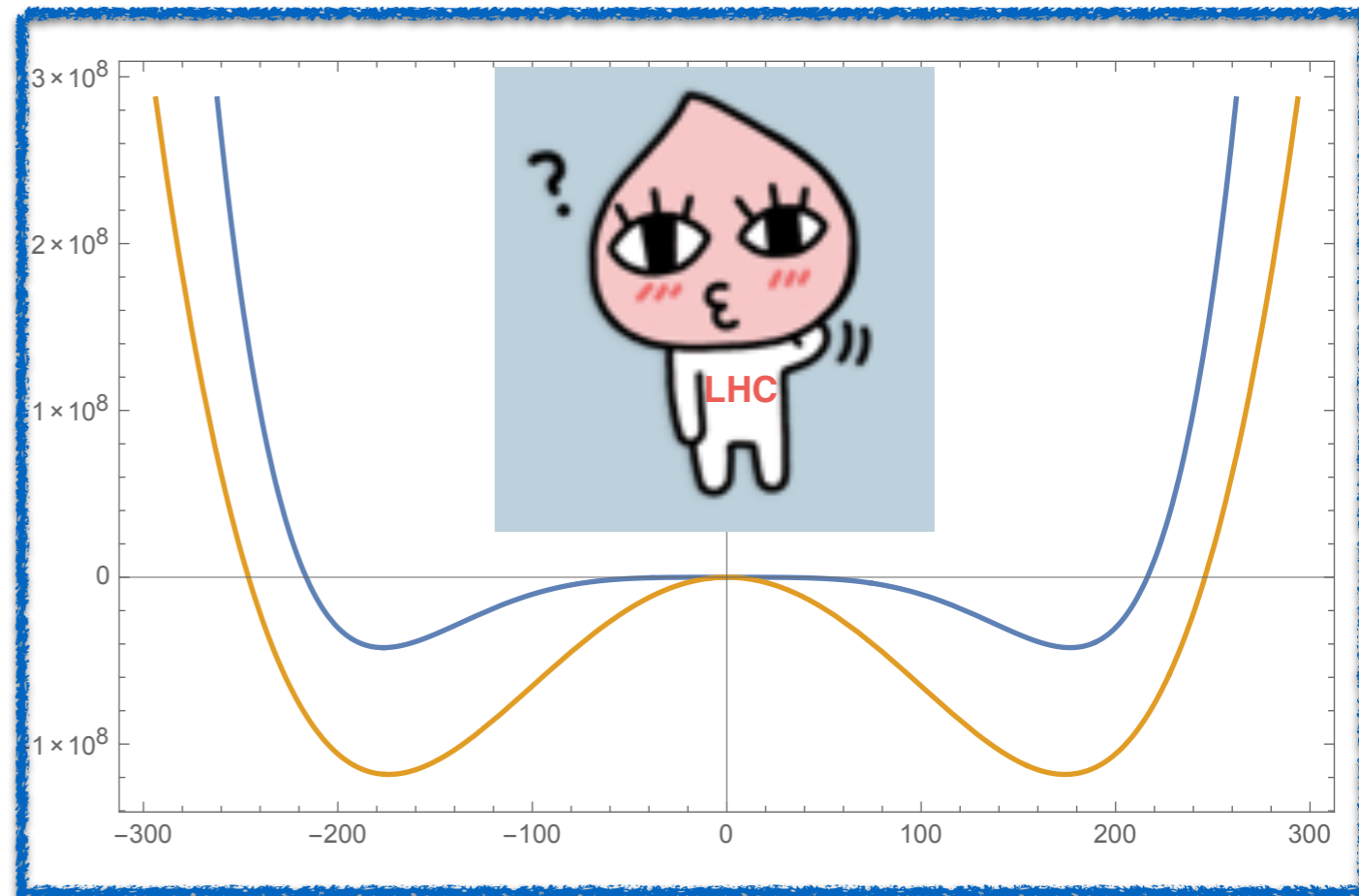
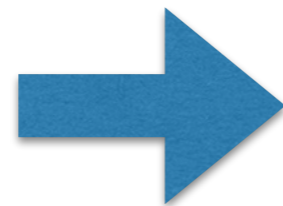
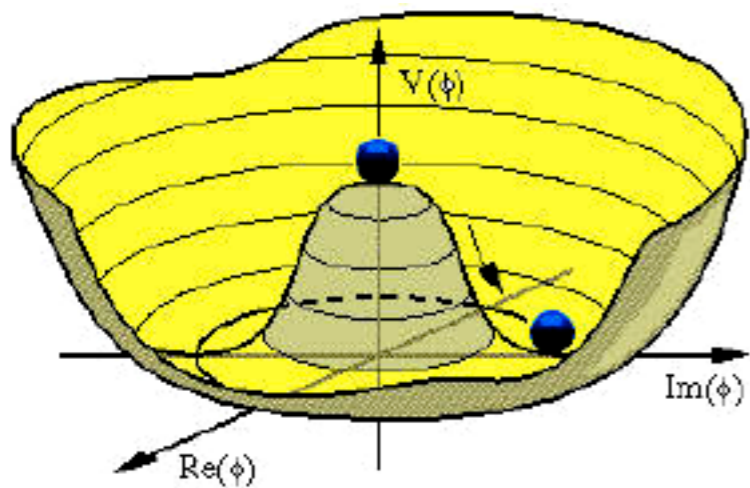
$$V_{\text{SM}} = -\mu^2 H^\dagger H + \lambda (H^\dagger H)^2$$

- large field values: $V \sim \lambda(H^\dagger H)^2$
- RGE: $\lambda \rightarrow \lambda(Q)$, where $Q \sim H$
- $\lambda \rightarrow 0$ around $Q \sim 10^{10}$ GeV, new minimum beyond M_{Planck}

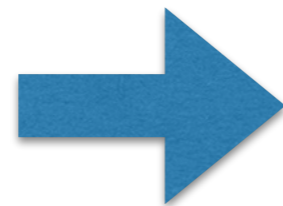
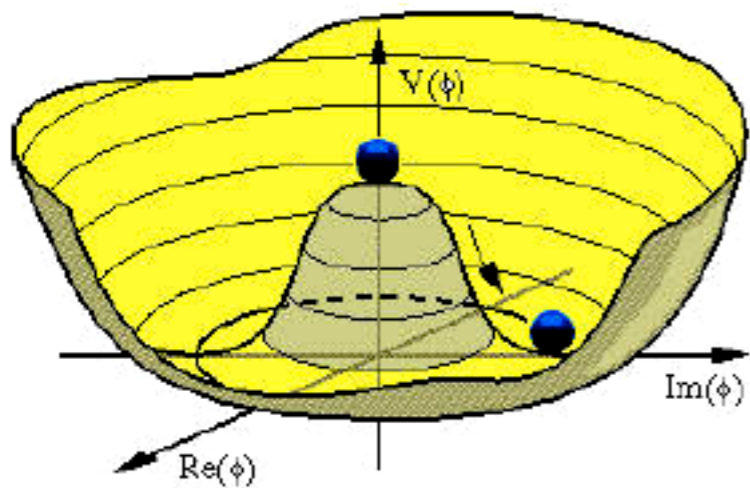
우리는 약전자기 대칭성의 붕괴와 힉스 포텐셜에 대해 얼마나 알고있을까?



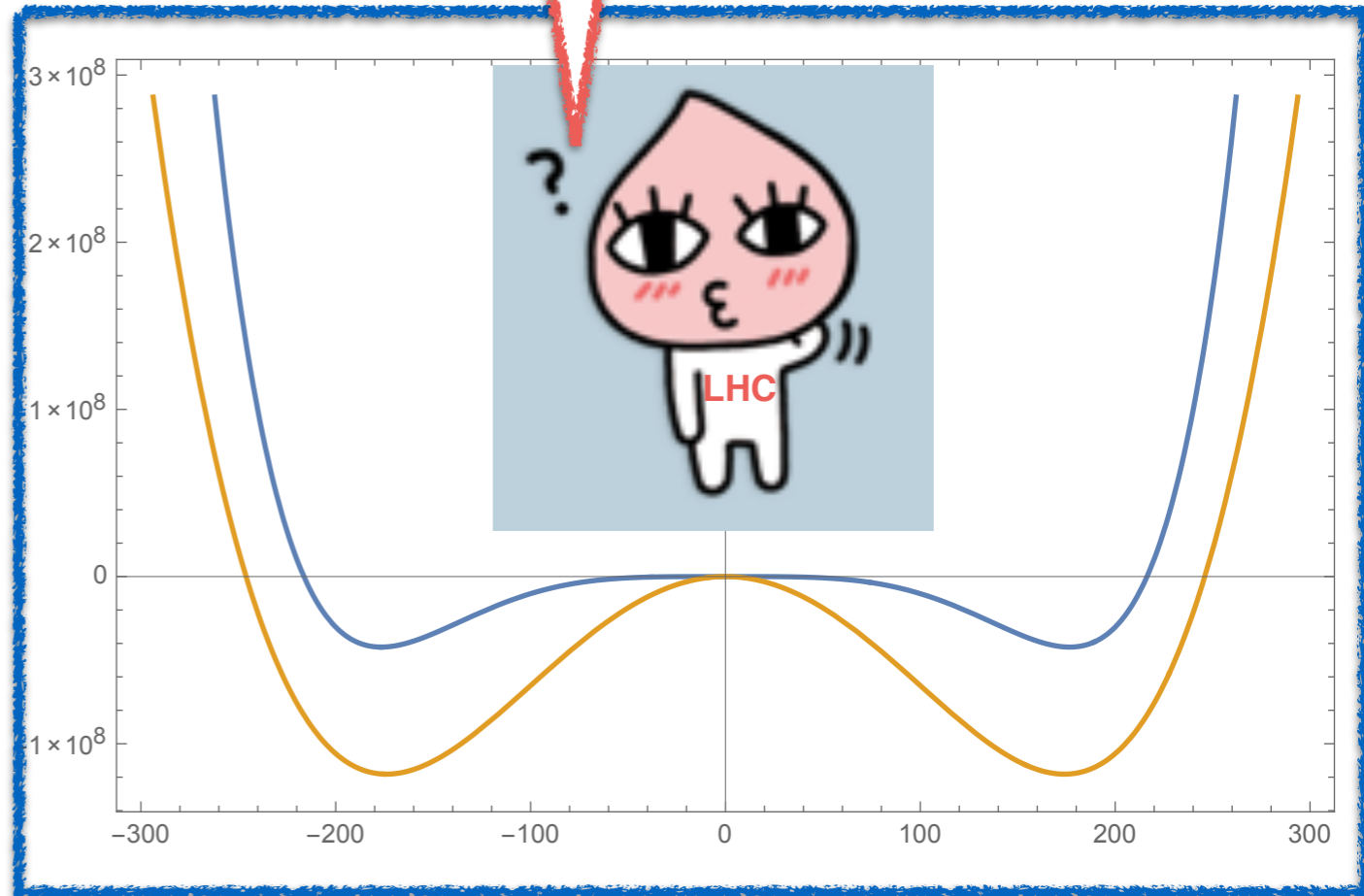
우리는 약전자기 대칭성의 붕괴와 힉스 포텐셜에 대해 얼마나 알고있을까?



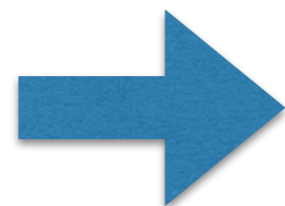
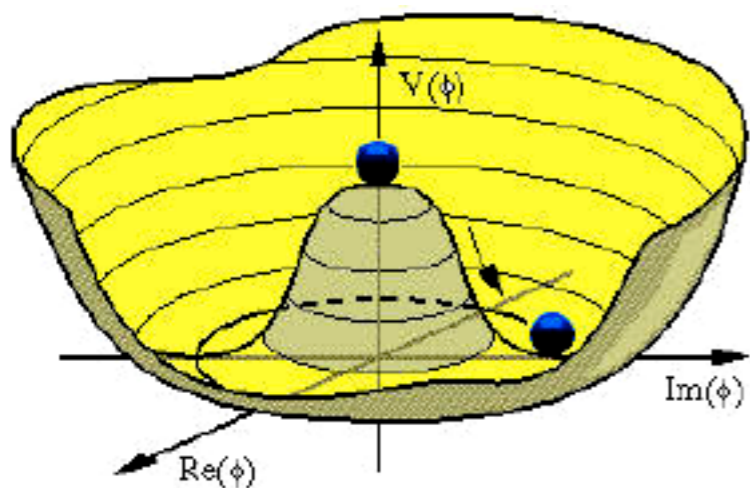
우리는 약전자기 대칭성의 붕괴와 힉스 포텐셜에 대해 얼마나 알고있을까?



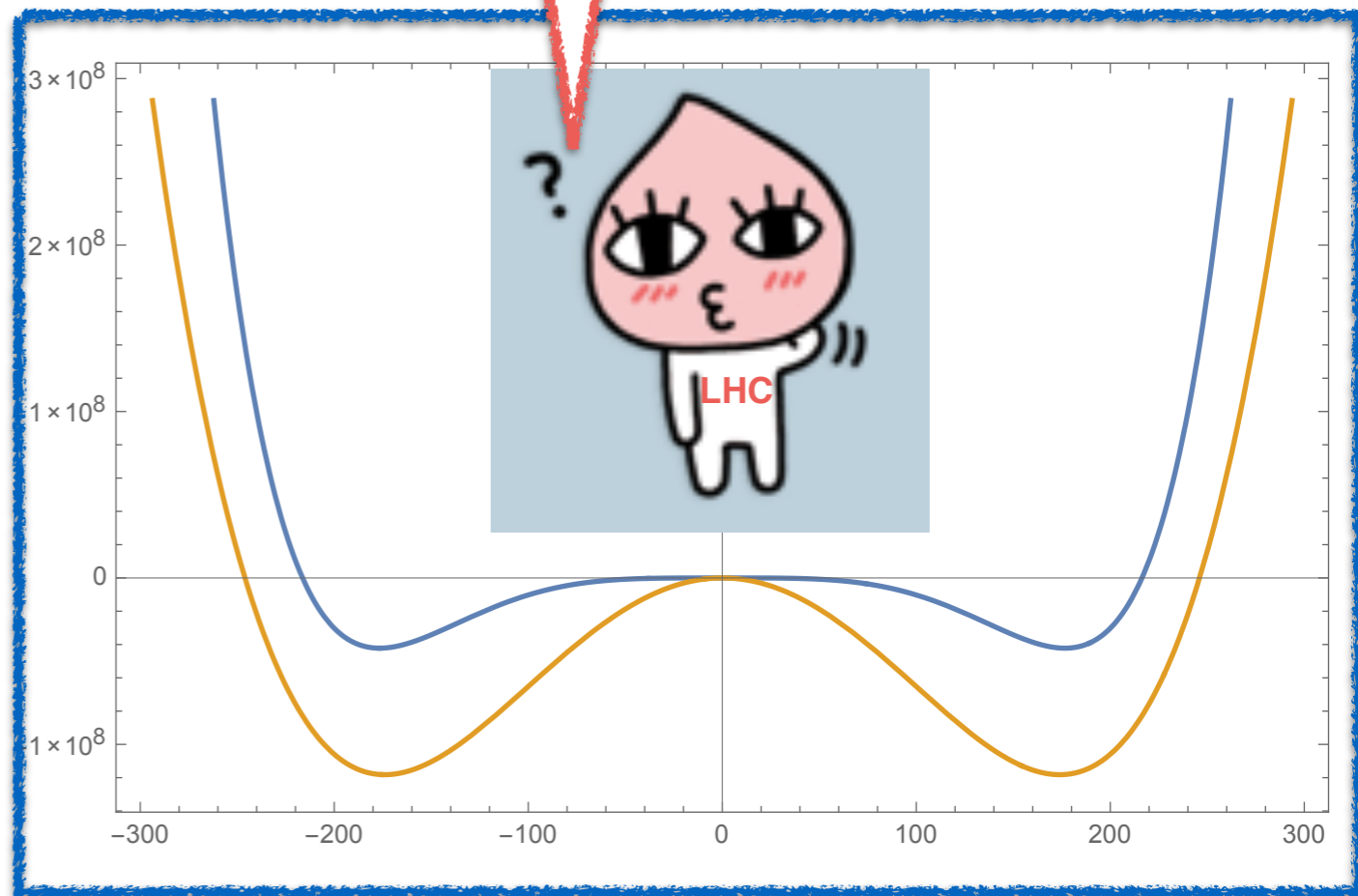
$$V(\tilde{h}) = \tilde{v}^{2\Delta} \tilde{m}^{4-2\Delta} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{c_n}{n!} \left(\frac{\tilde{h}}{\tilde{v}^\Delta} \right)^n$$



우리는 약전자기 대칭성의 붕괴와 힉스 포텐셜에 대해 얼마나 알고있을까?

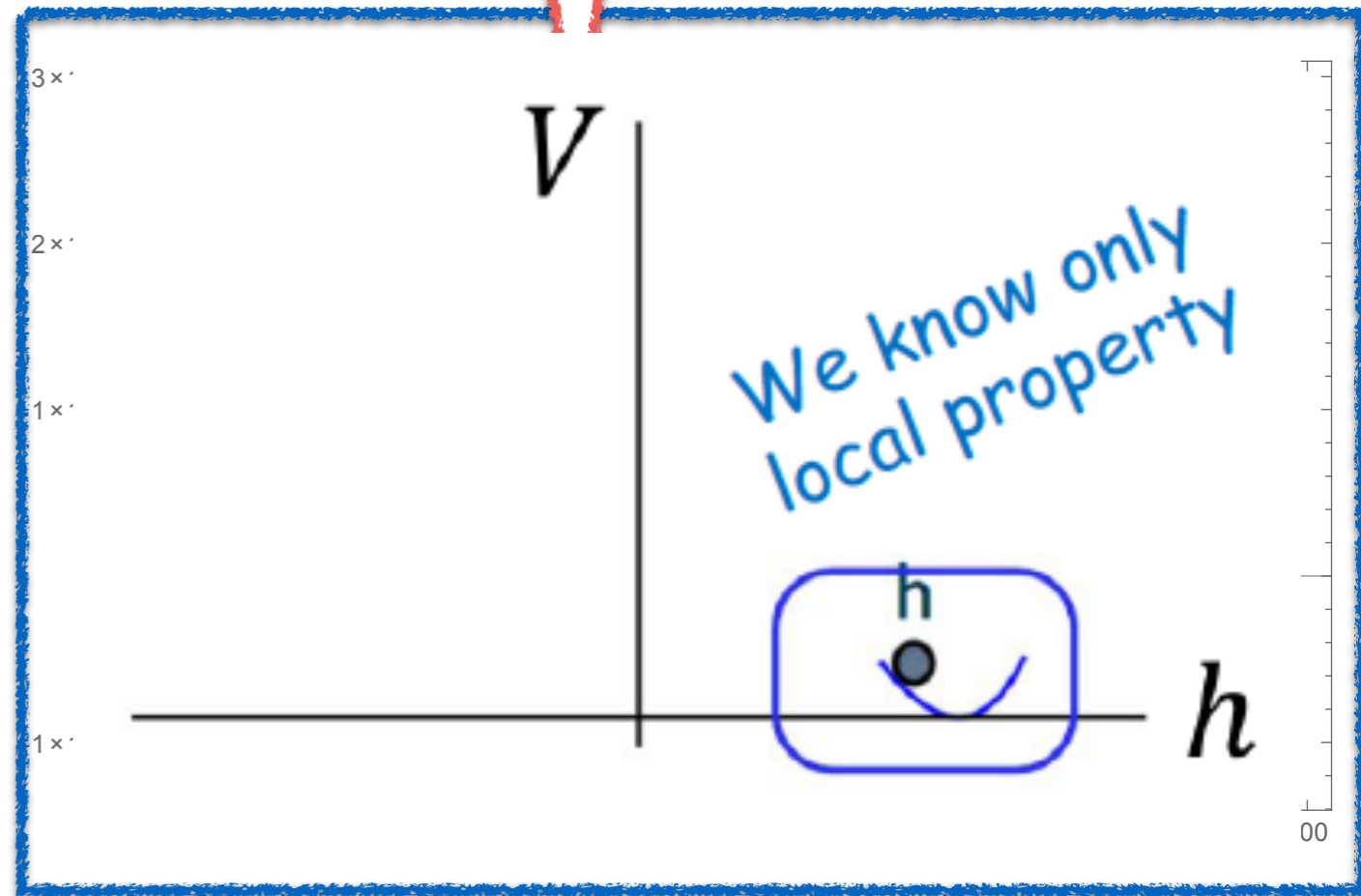
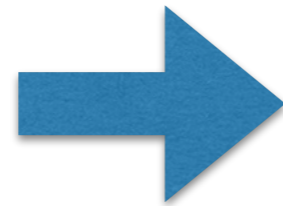
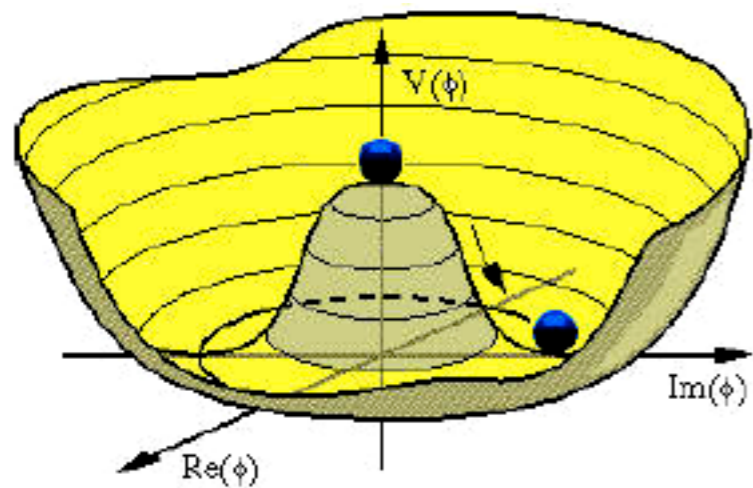


$$V(\tilde{h}) = \tilde{v}^{2\Delta} \tilde{m}^{4-2\Delta} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{c_n}{n!} \left(\frac{\tilde{h}}{\tilde{v}^\Delta} \right)^n$$



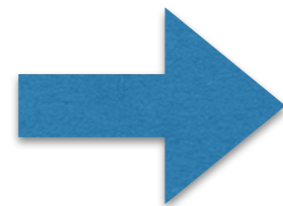
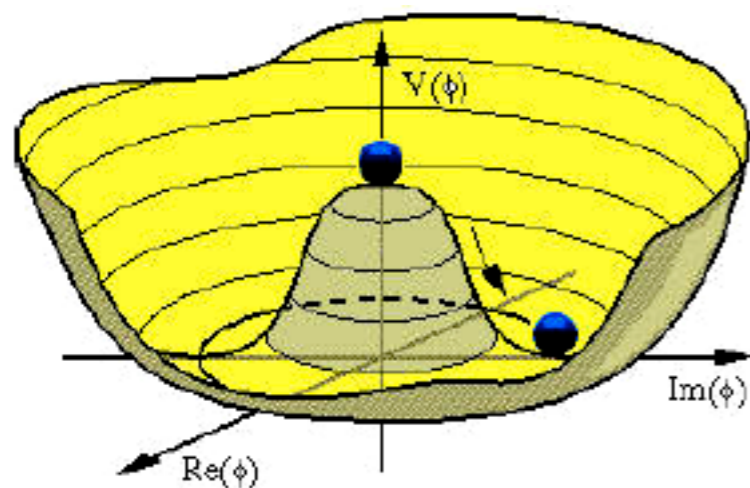
▶ 힉스 포텐셜의 전체적의 그림은 아직까지 전혀 알려지지 않았다!

우리는 약전자기 대칭성의 붕괴와 힉스 포텐셜에 대해 얼마나 알고있을까?

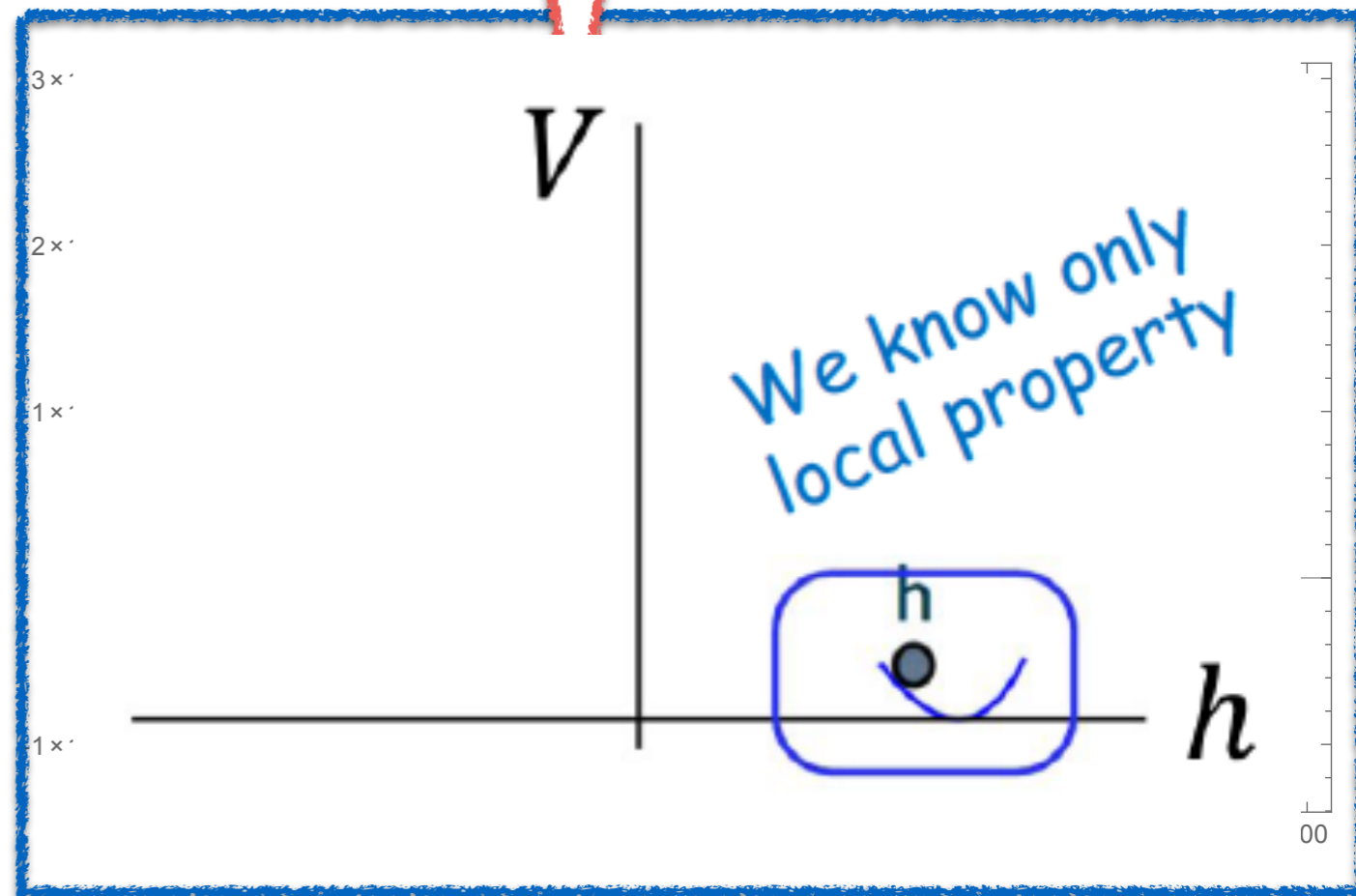


▶ 힉스 포텐셜의 전체적의 그림은 아직까지 전혀 알려지지 않았다!

우리는 약전자기 대칭성의 붕괴와 힉스 포텐셜에 대해 얼마나 알고있을까?

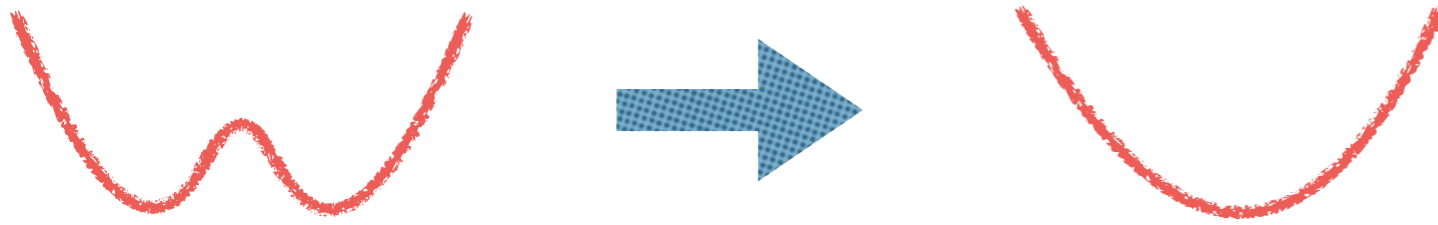


$$V(\tilde{h}) = \tilde{v}^{2\Delta} \tilde{m}^{4-2\Delta} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{c_n}{n!} \left(\frac{\tilde{h}}{\tilde{v}^\Delta} \right)^n$$



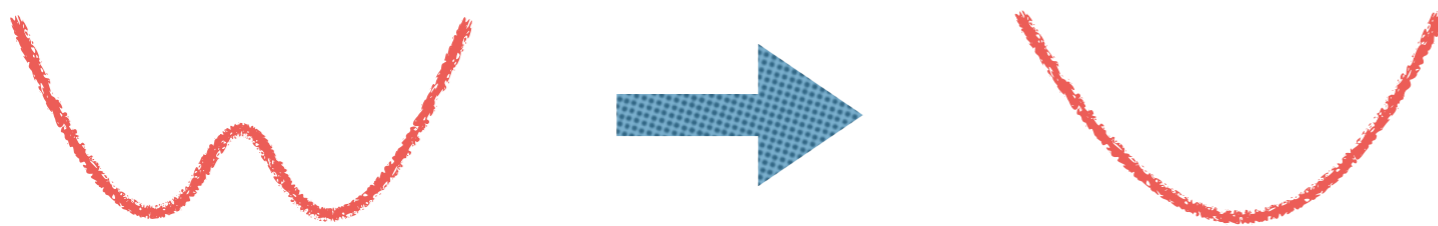
- ▶ **힉스 포텐셜의 전체적인 그림은 아직까지 전혀 알려지지 않았다!**
힉스의 self-couplings은 여러가지 이유로 매우 중요하고 흥미롭다.
(vacuum의 안정성, 자연스러움의 문제, baryogenesis,...).

$SU(2)_L \times U(1)$ 대칭성의 회복에 대해 연구해야 하는 이유

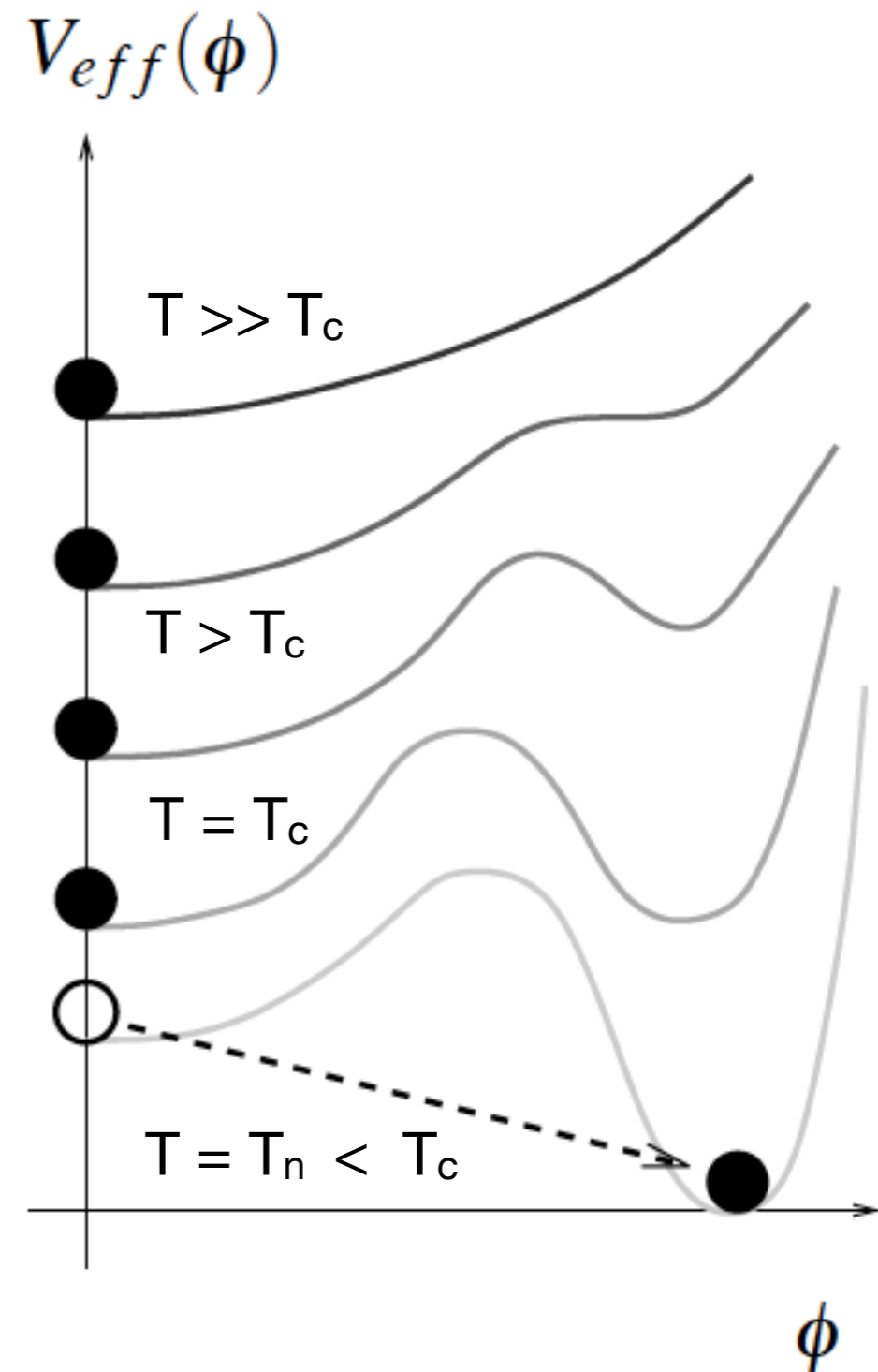


- $4\pi v / g$ 의 고에너지 까
지 가야하는 이유 \Rightarrow
FCC가 필요한 이유

SU(2)_L × U(1) 대칭성의 회복에 대해 연구해야 하는 이유



- $4\pi v / g$ 의 고에너지 까
지 가야하는 이유 \Rightarrow
FCC가 필요한 이유



1차 상전이 현상?

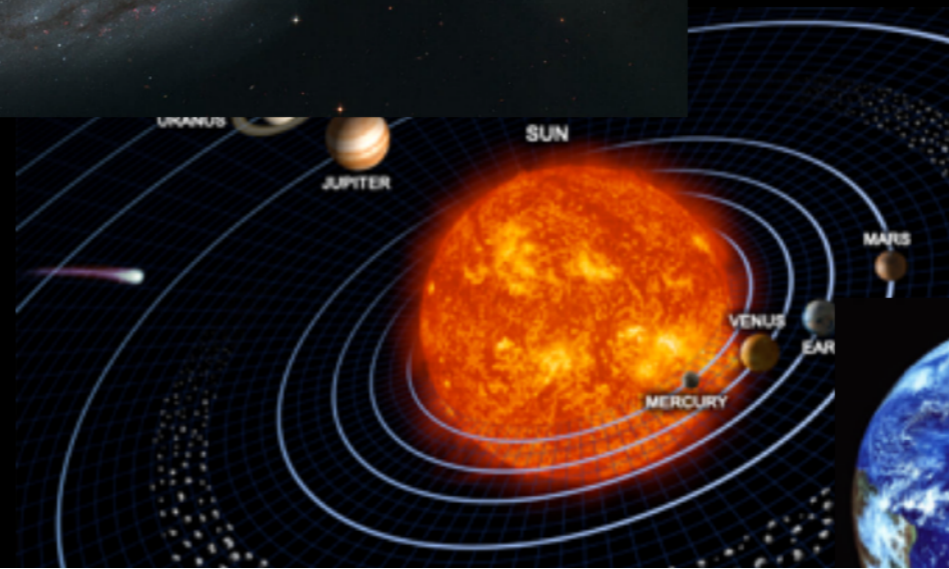
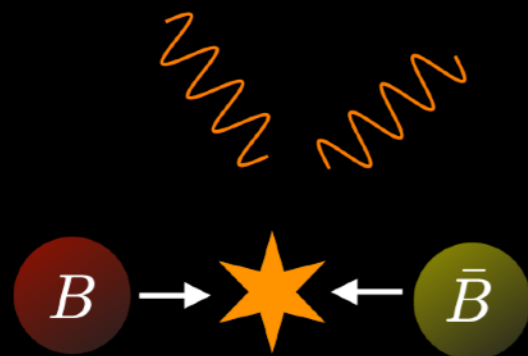
우리 우주의 물질과 반물질의 비대칭

antiprotons ?



clusters : $R \sim 10^7$ lyrs

$$\frac{n_{\bar{B}}}{n_B + n_{\bar{B}}} \lesssim 10^{-7} \text{ antiproton fraction}$$



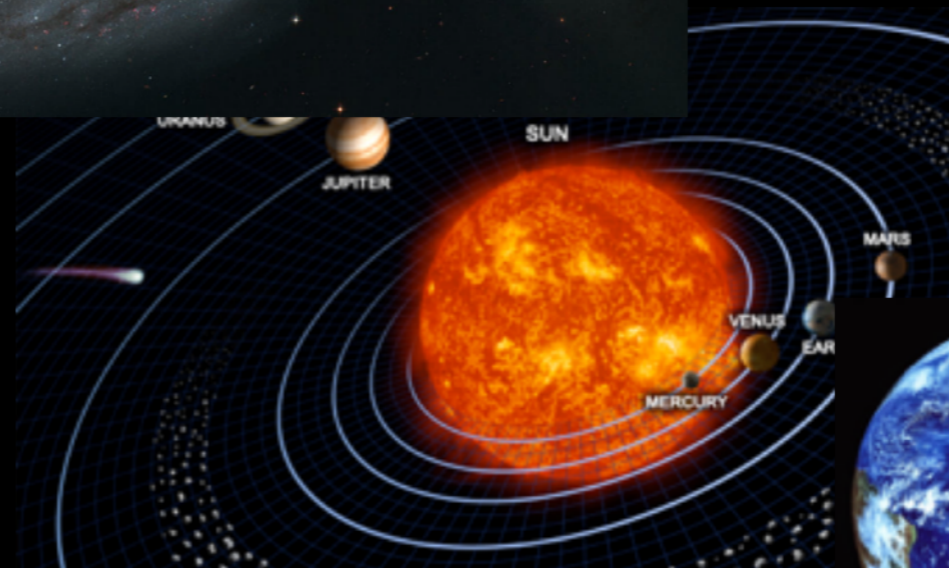
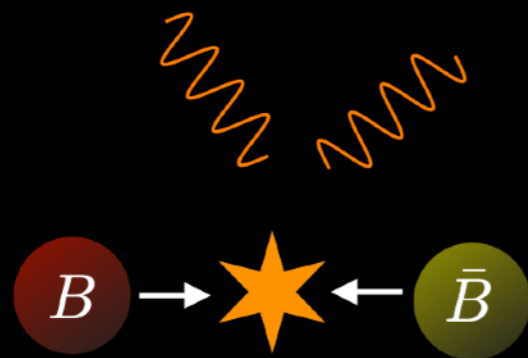
우리 우주의 물질과 반물질의 비대칭

antiprotons ?

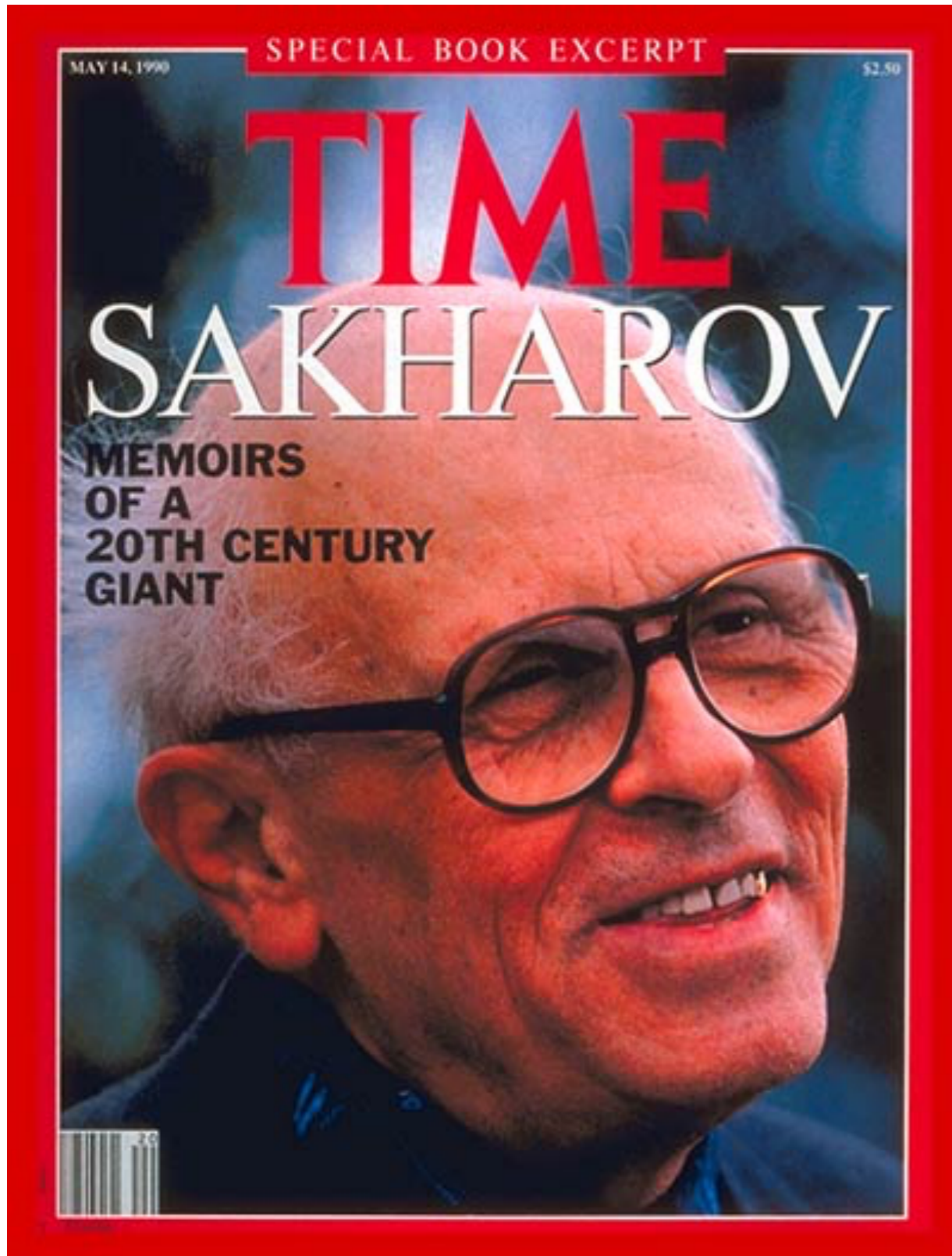


clusters : $R \sim 10^7$ lyrs

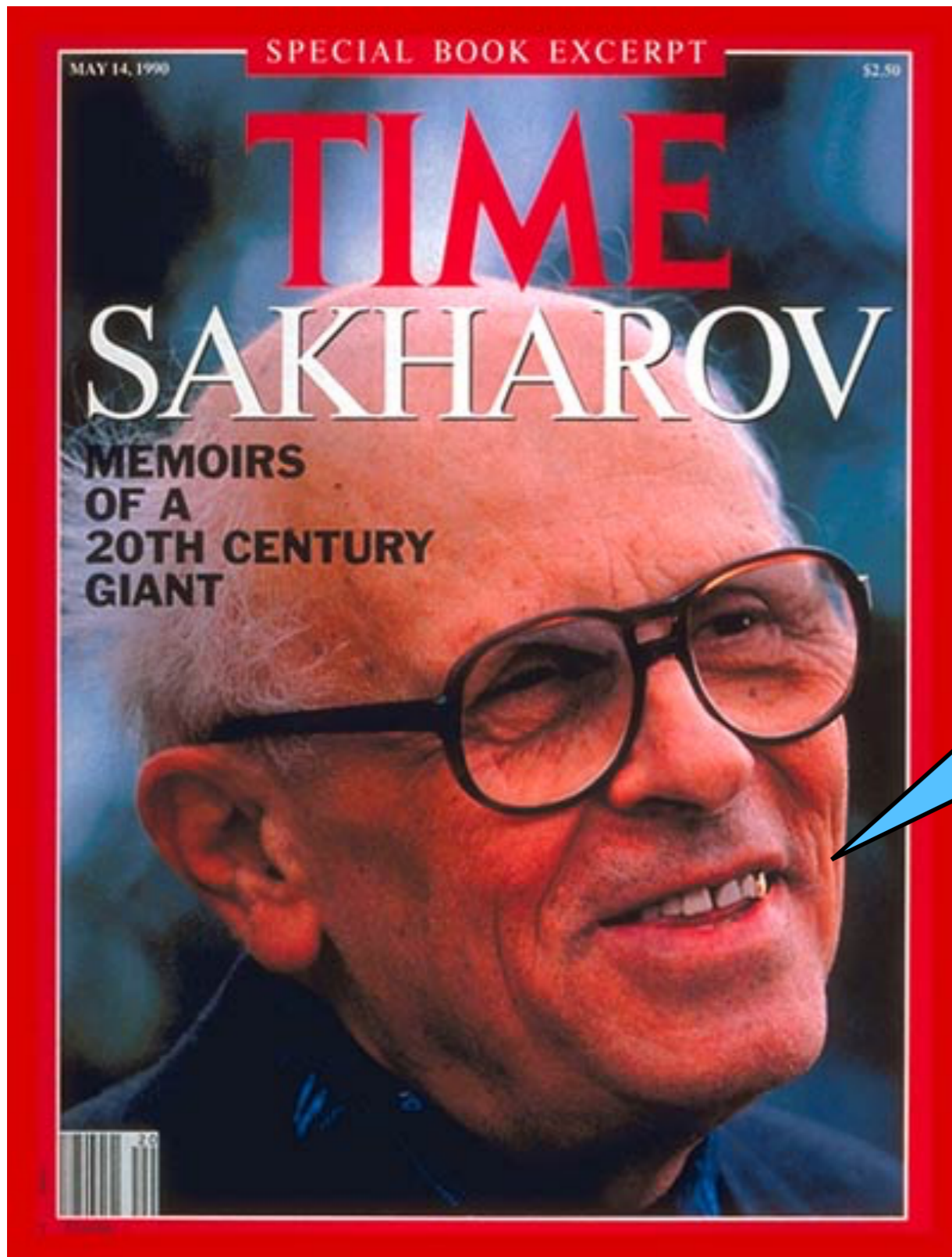
$$\frac{n_{\bar{B}}}{n_B + n_{\bar{B}}} \lesssim 10^{-7} \text{ antiproton fraction}$$



우리 우주의 물질과 반물질의 비대칭

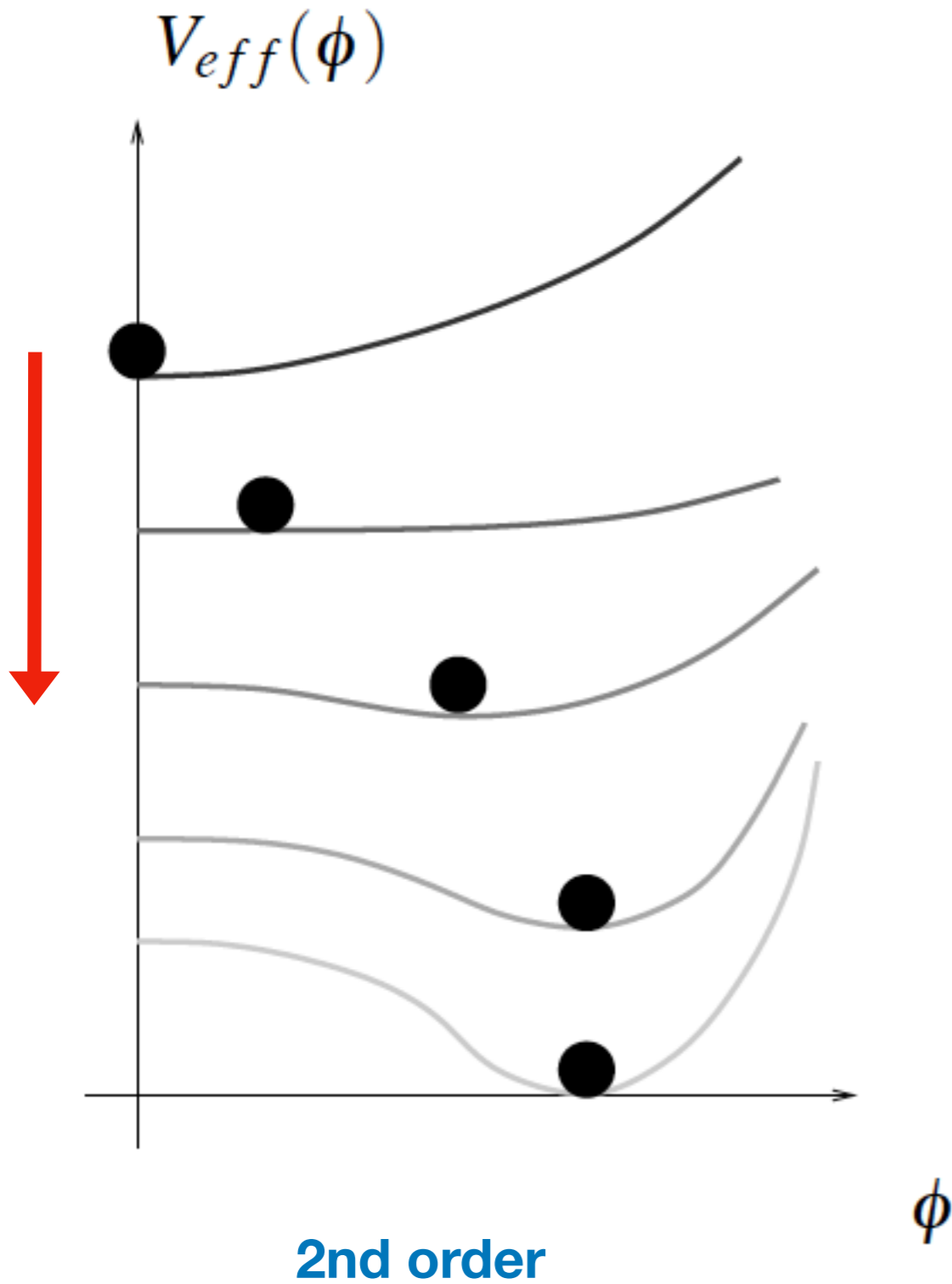


우리 우주의 물질과 반물질의 비대칭

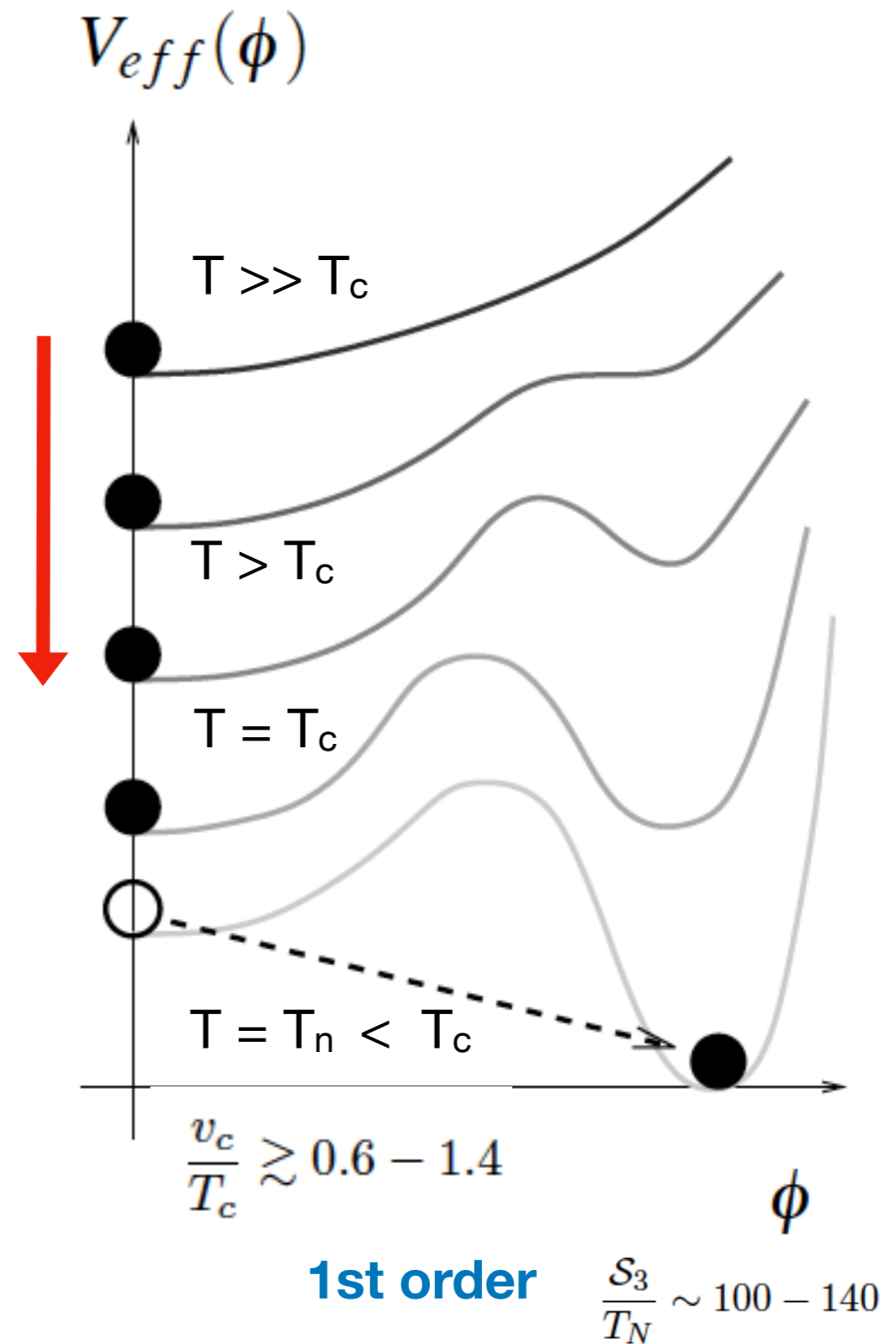


- 1) B- Violation
- 2) C- and CP- Violation
- 3) Thermal In-equilibrium

우주의 역사: 1차 상전이 vs 2차 상전이



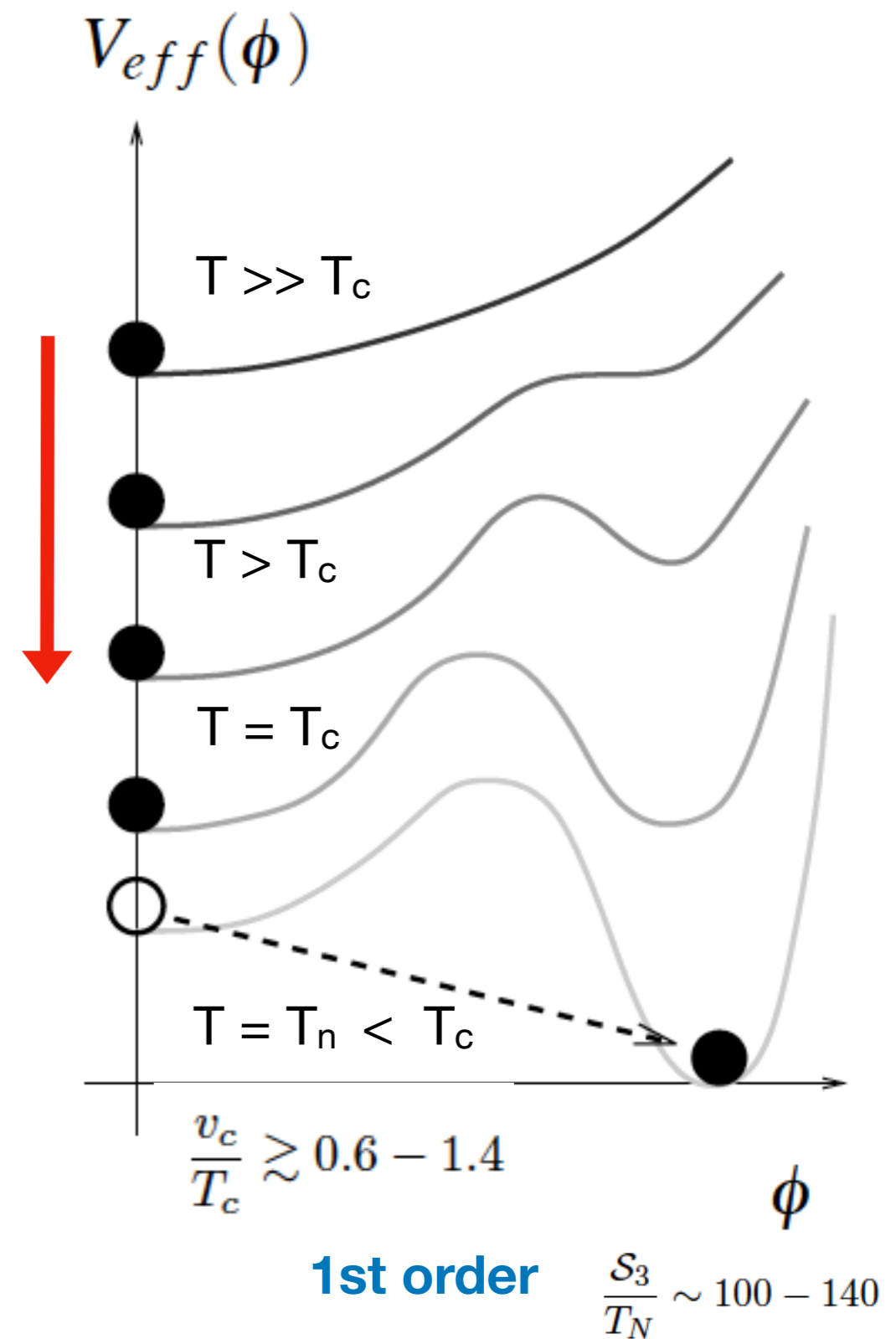
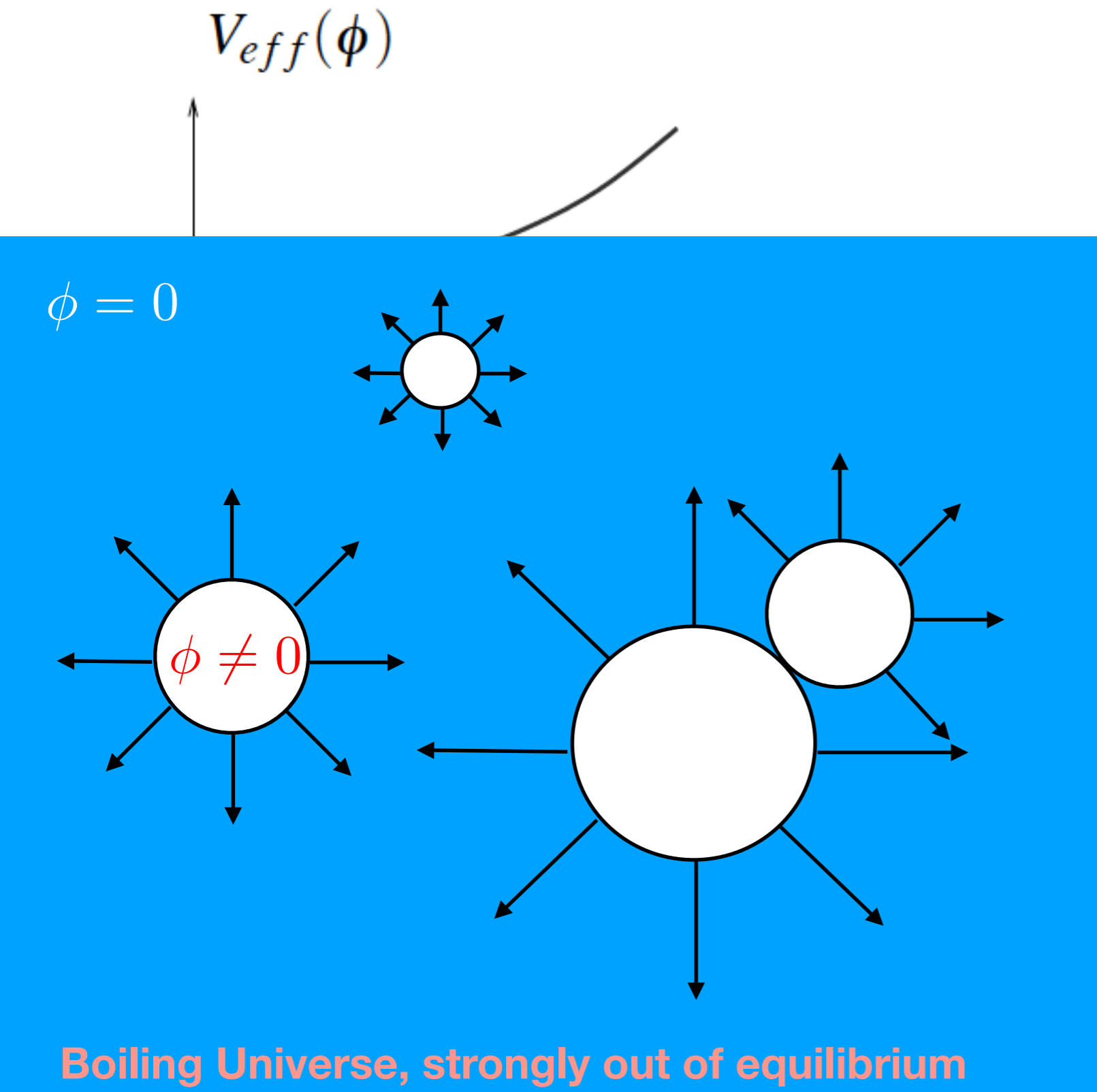
2nd order



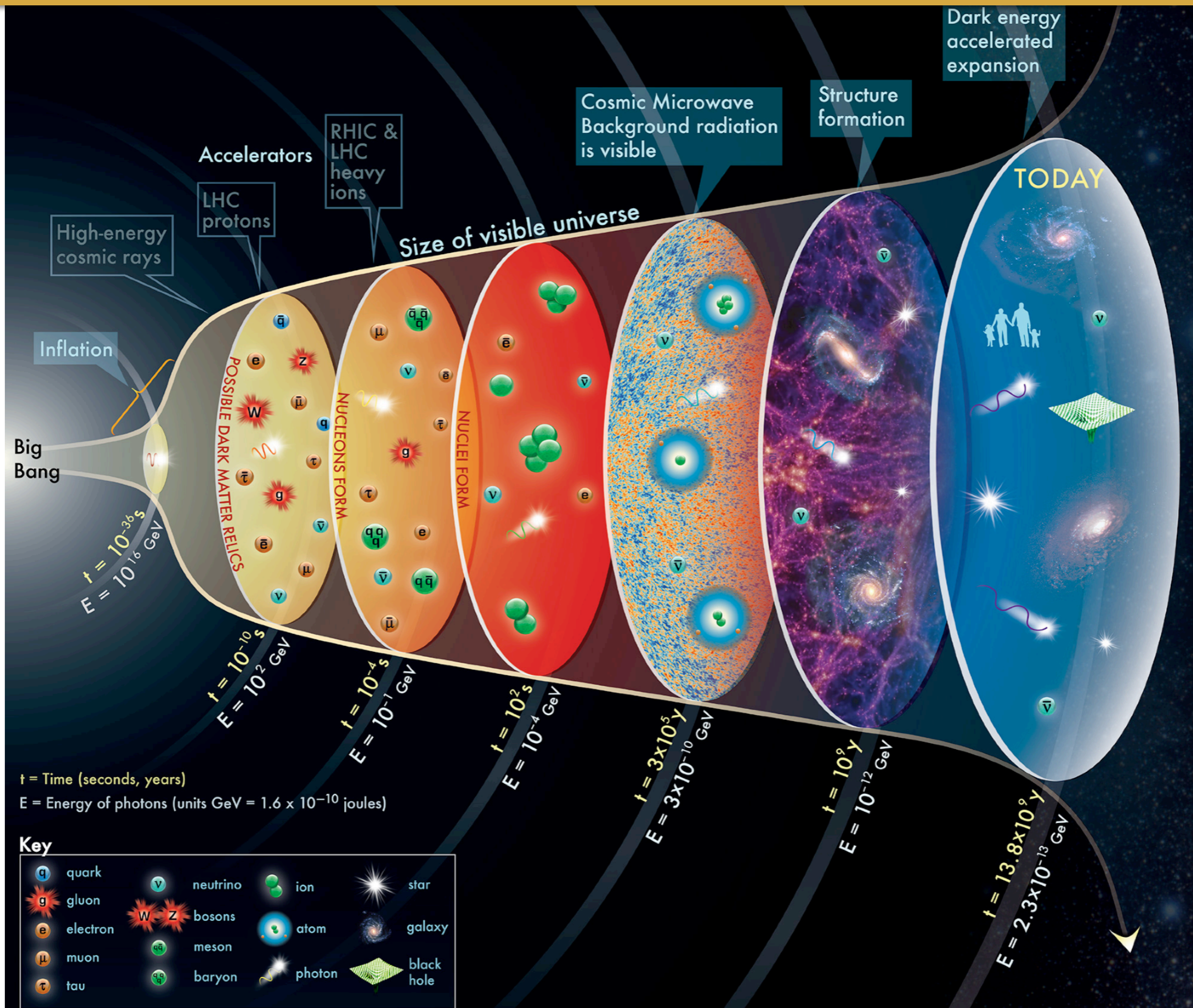
1st order

$$\frac{S_3}{T_N} \sim 100 - 140$$

우주의 역사: 1차 상전이 vs 2차 상전이

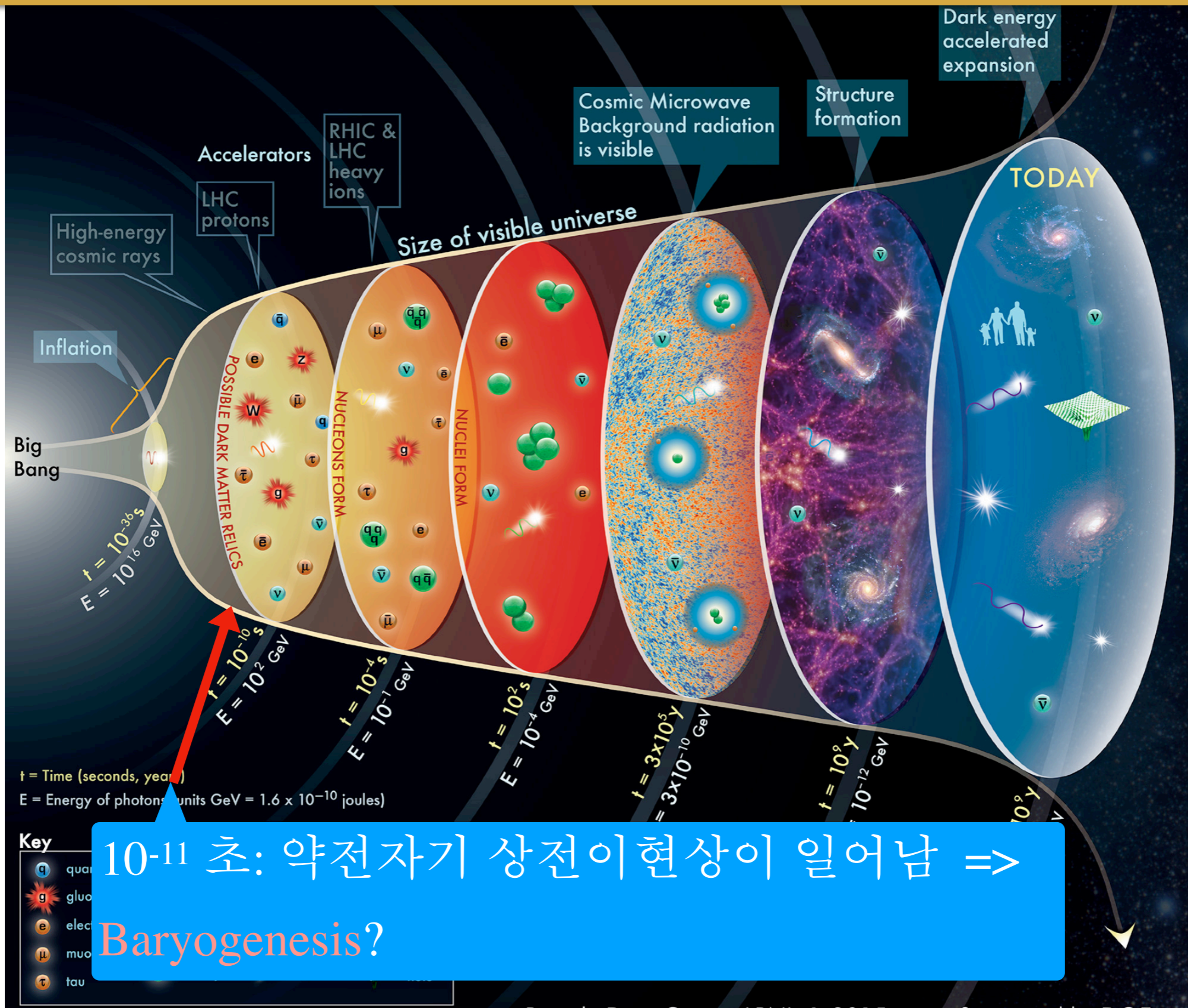


History of the Universe



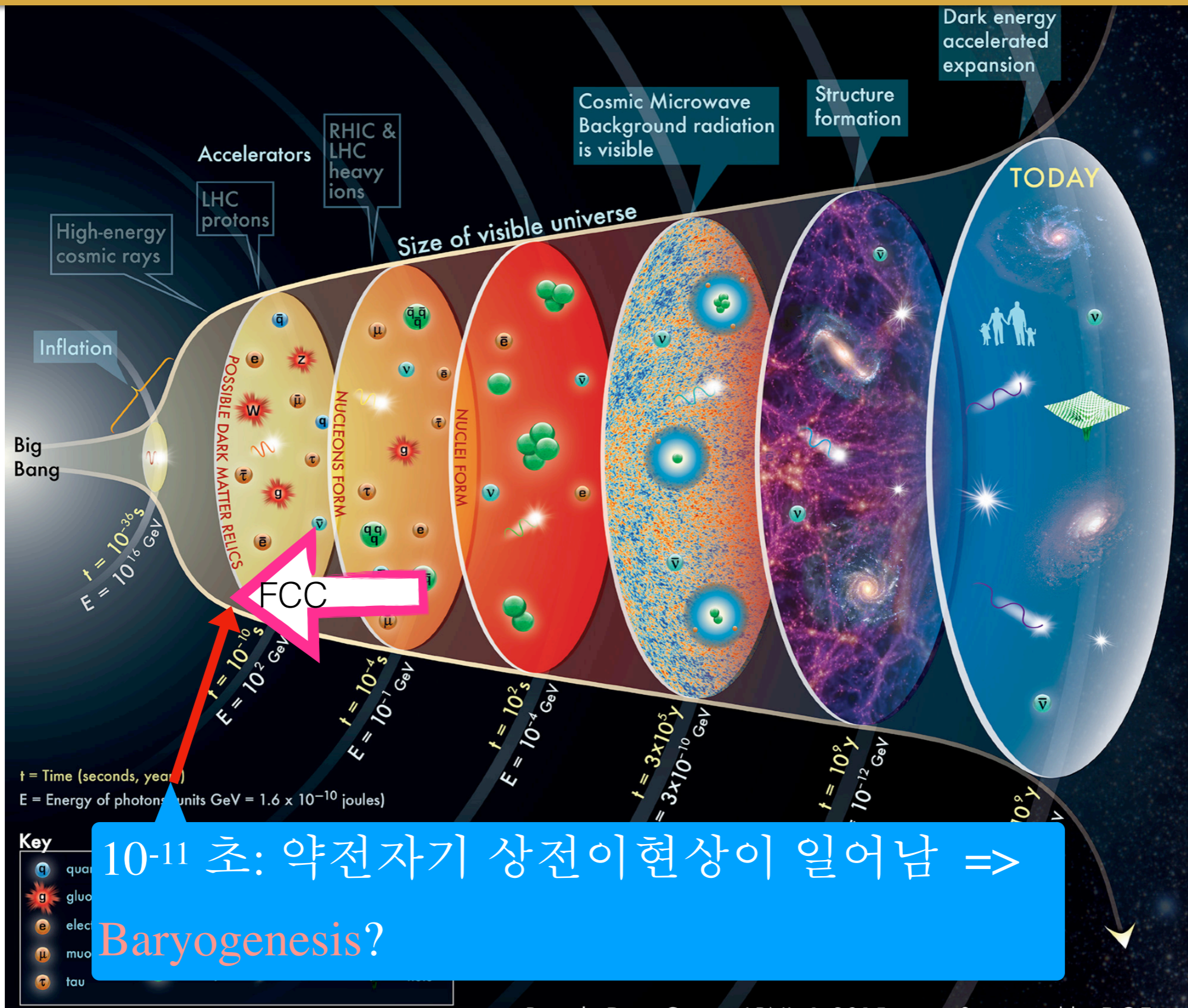
The concept for the above figure originated in a 1986 paper by Michael Turner.

History of the Universe



The concept for the above figure originated in a 1986 paper by Michael Turner.

History of the Universe



The concept for the above figure originated in a 1986 paper by Michael Turner.

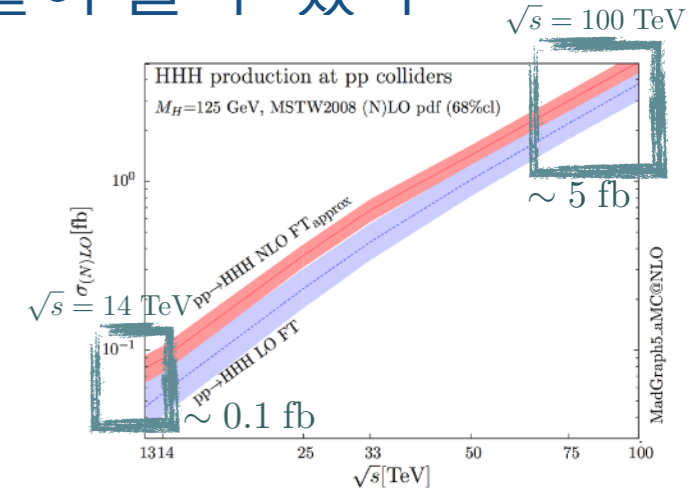
힉스 퍼텐셜과 새로운 물리학

◆ 힉스 퍼텐셜에 대한 새로운 물리의 효과를 일반적으로 아래와 같이 쓸 수 있다

$$V_h = \frac{m_h^2}{2} h^2 + (1 + \kappa_3) \frac{m_h^2}{2v} h^3 + \frac{1}{4} (1 + \kappa_4) \frac{m_h^2}{2v^2} h^4$$

$$\Delta\mathcal{L}_6 \supset \frac{\bar{c}_H}{2v^2} \partial_\mu (H^\dagger H) \partial^\mu (H^\dagger H) + \frac{\bar{c}_u}{v^2} y_t (H^\dagger H \bar{q}_L H^c t_R + \text{h.c.}) - \frac{\bar{c}_6}{v^2} \frac{m_h^2}{2v^2} (H^\dagger H)^3 + \bar{c}_g \frac{g_s^2}{m_W^2} H^\dagger H G_{\mu\nu}^a G^{a\mu\nu},$$

New physics parameters (are they vanishing?)



- ❖ Measurements of the κ parameters yield the exact form of the Higgs potential
 - ★ Knowledge of the electroweak symmetry breaking dynamics
- ❖ κ_3 : may be (modestly) constrained by **diHiggs searches at the LHC**
 - ★ 2σ deviations from the Standard Model could maybe be observed with 3 ab^{-1} [Baglio et al. (JHEP'13)]
- ❖ κ_4 : **impossible to probe at the LHC** (too low tri-Higgs cross section)

◆ FCC에서는 얼마나 정교하게 측정 가능할까 (100 TeV)?

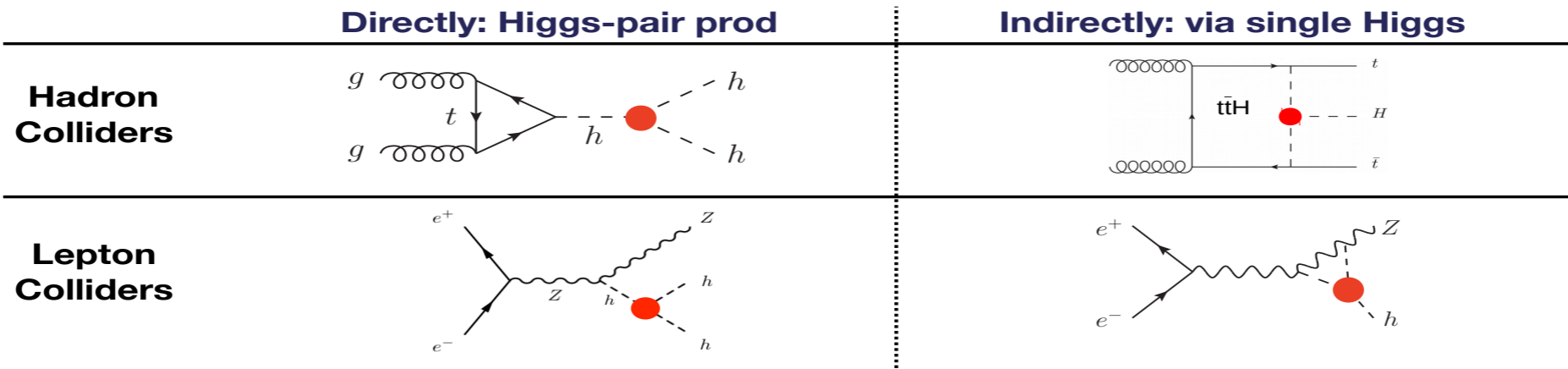
- ❖ Triple Higgs probes are sensitive to both κ parameters
- ❖ Double Higgs can help to constrain κ_3 to the 3-4% level [Azatov, Contino, Panico & Son (PRD'15)]
[Contino et al. (CERN yellow report on Physics at 100 TeV)]

Higgs self-coupling.

Higgs self-couplings is very interesting for a multitude of reasons (vacuum stability, hierarchy, baryogenesis, GW, EFT probe...).

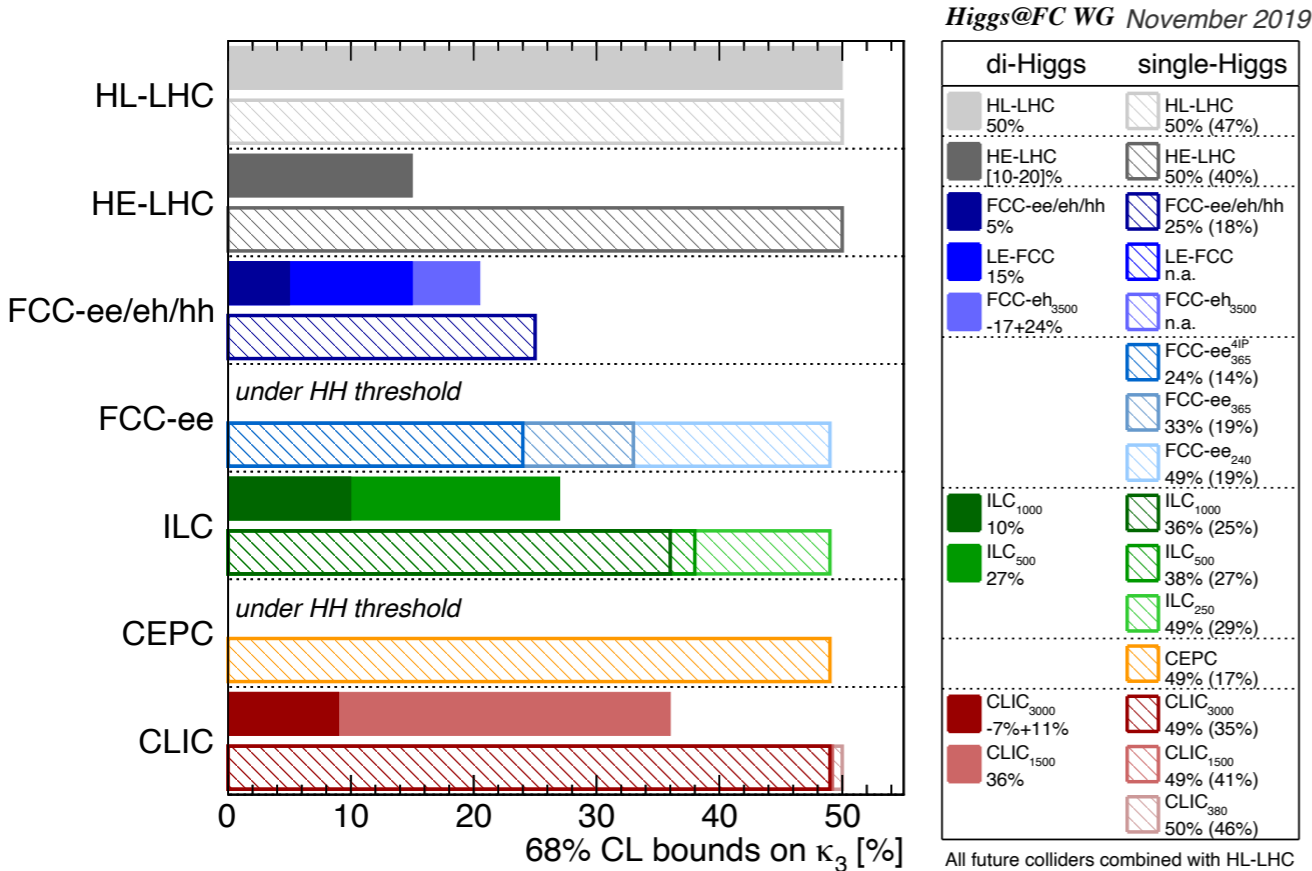
표준모형의 예측을 확인하거나, 혹은 다르게 나온 값을 측정할 수 있는가?

ECFA Higgs study group '19



	di-Higgs	single-H
exclusive	<p>1. di-H, excl.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Use of $\sigma(HH)$ • only deformation of $\kappa\lambda$ 	<p>3. single-H, excl.</p> <ul style="list-style-type: none"> • single Higgs processes at higher order • only deformation of $\kappa\lambda$
global	<p>2. di-H, glob.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Use of $\sigma(HH)$ • deformation of $\kappa\lambda$ + of the single-H couplings (a) do not consider the effects at higher order of $\kappa\lambda$ to single H production and decays (b) these higher order effects are included 	<p>4. single-H, glob.</p> <ul style="list-style-type: none"> • single Higgs processes at higher order • deformation of $\kappa\lambda$ + of the single Higgs couplings

Higgs self-coupling.



1

Don't need to reach HH threshold to have access to h^3 .
Z-pole run is very important if the HH threshold cannot be reached

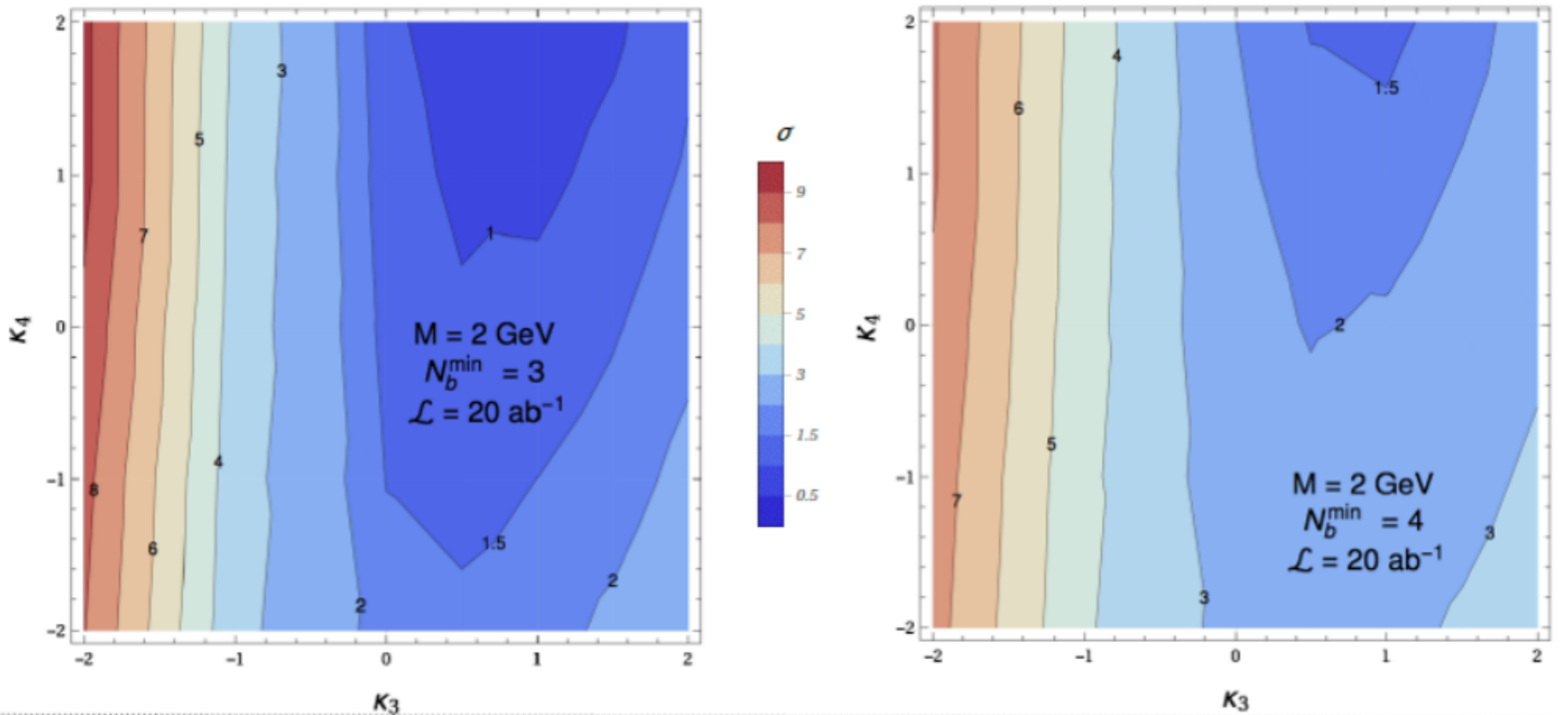
2

The determination of h^3 at FCC-hh relies on HH channel, for which FCC-ee is of little direct help. But the extraction of h^3 requires precise knowledge of y_t .
 $1\% y_t \leftrightarrow 5\% h^3$
Precision measurement of y_t needs ee

50% sensitivity: establish that $h^3 \neq 0$ at 95%CL
20% sensitivity: 5σ discovery of the SM h^3 coupling
5% sensitivity: getting sensitive to quantum corrections to Higgs potential

Higgs Potential

Quartic Higgs coupling: a direct test of EW phase transition



Fuks, Kim, SJL

Higgs Chapter of the report on Physics at 100 TeV

Summary

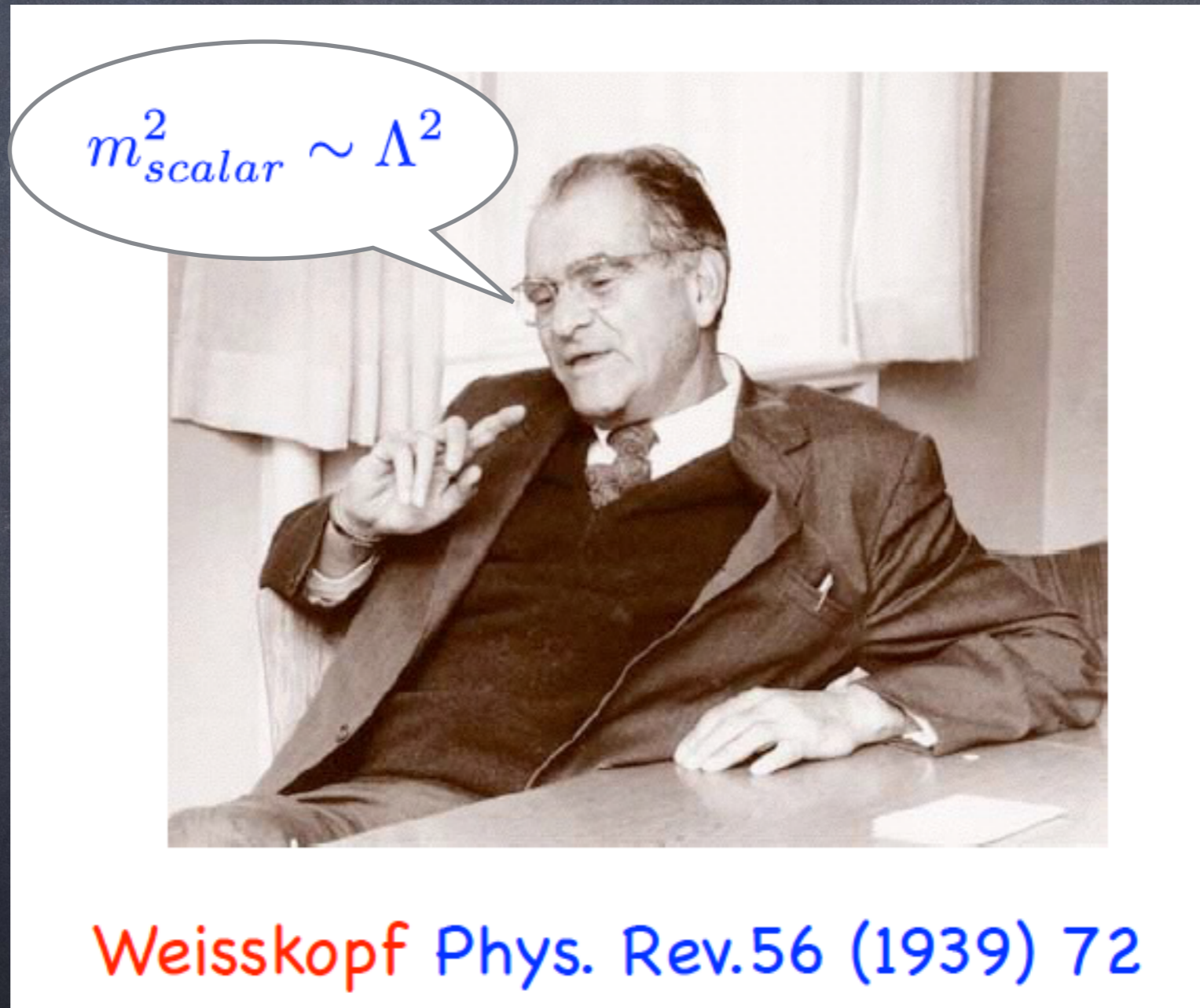
- 전자기-약대칭성의 깨짐을 이해하는 것은 현대입자물리학의 중요한 과제중 하나이며, 이를 위해 LHC와 같은 인류 역사상 가장 큰 규모의 실험이 진행 중에 있다. 힉스 입자의 발견은 이를 향한 첫번째 발걸음이지만, 아직까지 힉스 메커니즘의 근원은 규명되지 않았다. FCC는 힉스 메커니즘이 정말 우주의 기본 입자(예를 들면 전자)에 해당하는지, 그리고 약전자기-대칭성의 깨짐의 특성(힉스장의 포텐셜과 상전이현상)과 근원을 밝혀낸다는 중요한 미션을 갖고있다.

게이지 계층성 문제: way before
it was even discovered



Weisskopf Phys. Rev. 56 (1939) 72

게이지 계층성 문제: way before
it was even discovered



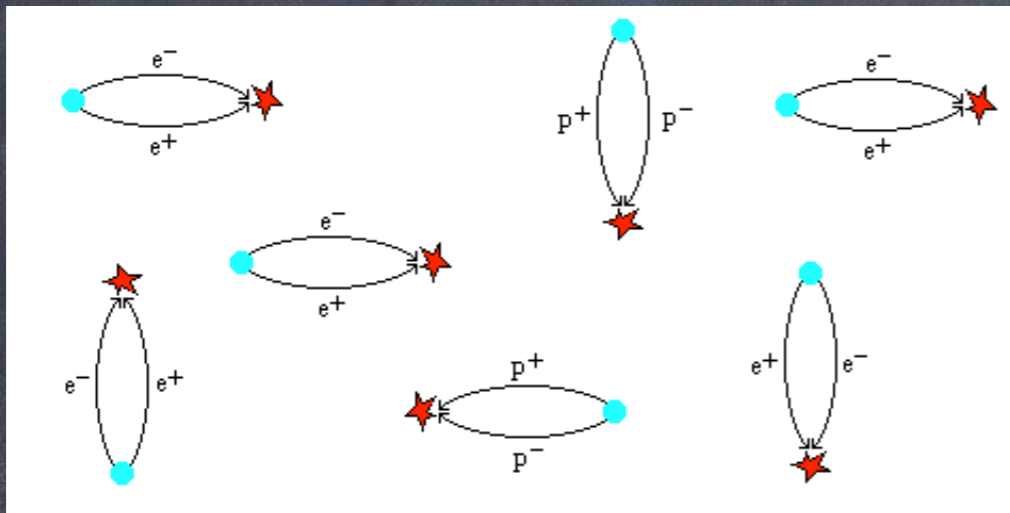
Vacuum(진공)은 텅 비어있지 않다

- 불확정성의 원리 때문에 진공은 양자의 요동으로 가득 차 있다

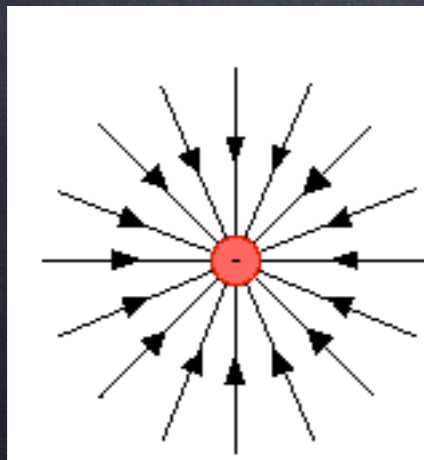
$$\Delta E \Delta t \gtrsim h/2\pi, E=mc^2$$

if $\Delta E \sim \hbar/\Delta t$ and $\Delta E > 2m_e c^2$

can see e^+e^- pair



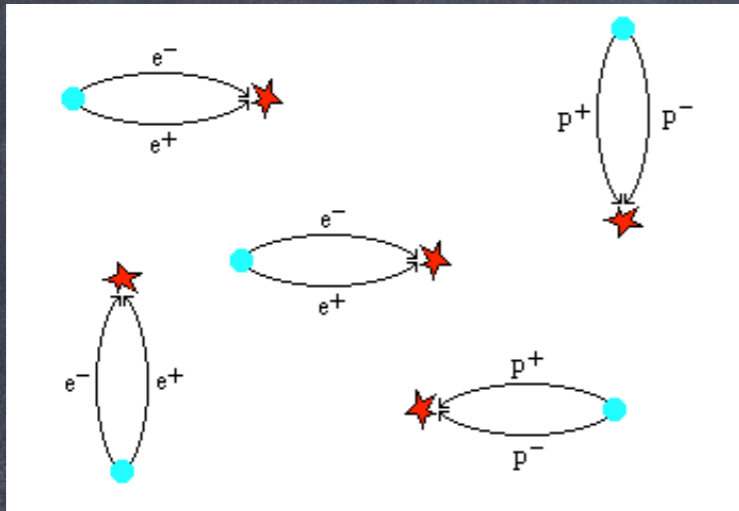
- Resolve the old classical problem: Landau and Lifshitz concluded that the classical electromagnetism cannot be applied to distance scales shorter than $e^2/(4\pi\epsilon_0 m_e c^2) = 2.8 \times 10^{-13}$ cm.



classically: infinite energy of point electron

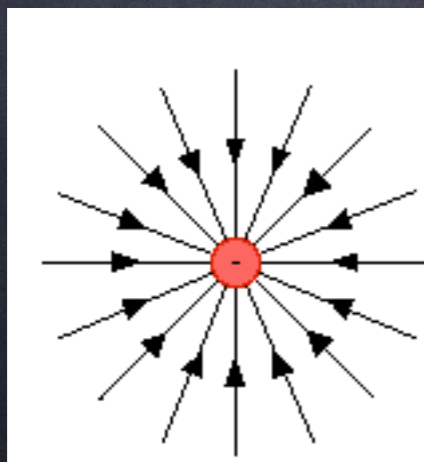
Vacuum(진공)은 텅 비어있지 않다

- 불확정성의 원리
차 있다



resolve old classical mystery

due to e^+e^- , e^- effective charge
decreases with distances smaller than
 $\hbar/m_e c$



classically: infinite energy
of point electron

가득

at the
cm.

힉스 질량과 자연스러움의 문제

- 표준모형에서 힉스 질량은 보호받지 않는다 (스케일라 입자는 다른 입자들과 다르다)
- 힉스입자 질량은 이론적인 UV 스케일에 비례한다:



R. Rattazzi

힉스 질량과 자연스러움의 문제

- 표준모형에서 힉스 질량은 보호받지 않는다 (스케일라 입자는 다른 입자들과 다르다)
- 힉스입자 질량은 이론적인 UV 스케일에 비례한다:



R. Rattazzi

힉스 질량과 자연스러움의 문제

- 표준모형에서 힉스 질량은 보호받지 않는다 (스케일라 입자는 다른 입자들과 다르다)
- 힉스입자 질량은 이론적인 UV 스케일에 비례한다:



$$\delta m_H \propto k^2: \int \frac{d^4 k}{(2\pi)^4} \frac{1}{k^2 - m^2} \propto \Lambda^2 \quad \int \frac{d^4 k}{(2\pi)^4} \frac{k^2}{(k^2 - m^2)^2} \propto \Lambda^2$$

R. Rattazzi

힉스 질량과 자연스러움의 문제

- 표준모형에서 힉스 질량은 보호받지 않는다 (스케일라 입자는 다른 입자들과 다르다)
- 힉스입자 질량은 이론적인 UV 스케일에 비례한다:



$$\delta m_H \propto k^2: \int \frac{d^4 k}{(2\pi)^4} \frac{1}{k^2 - m^2} \propto \Lambda^2 \quad \int \frac{d^4 k}{(2\pi)^4} \frac{k^2}{(k^2 - m^2)^2} \propto \Lambda^2$$

$$\Lambda \rightarrow M_{Pl}:$$

R. Rattazzi

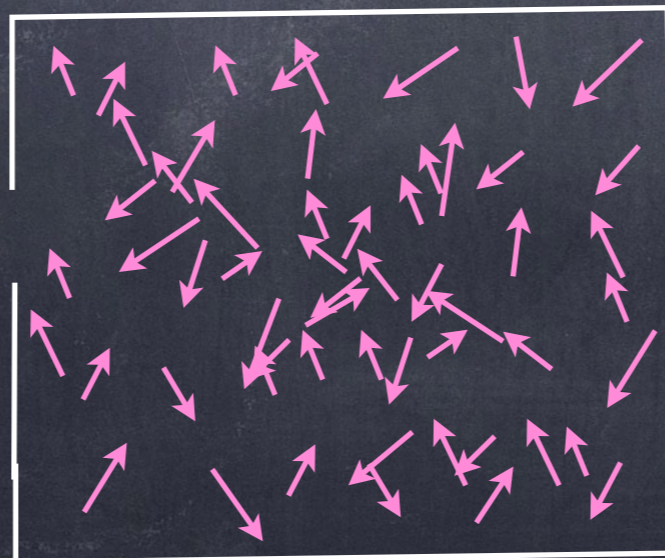
힉스 질량과 자연스러움의 문제

- 표준모형에서 힉스 질량은 보호받지 않는다 (스케일라 입자는 다른 입자들과 다르다)
- 힉스입자 질량은 이론적인 UV 스케일에 비례한다:



$$\delta m_H \propto k^2: \int \frac{d^4k}{(2\pi)^4} \frac{1}{k^2 - m^2} \propto \Lambda^2 \quad \int \frac{d^4k}{(2\pi)^4} \frac{k^2}{(k^2 - m^2)^2} \propto \Lambda^2$$

$$\Lambda \rightarrow M_{Pl}:$$



$$T \sim 10^{16} E_{EW}$$

R. Rattazzi

힉스 질량과 자연스러움의 문제

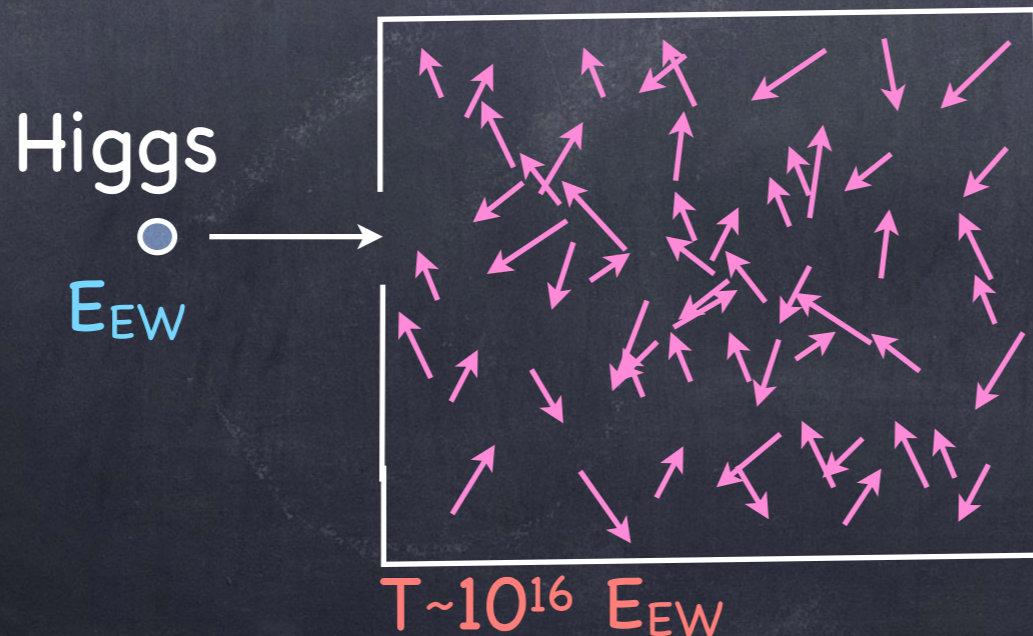
- 표준모형에서 힉스 질량은 보호받지 않는다 (스케일라 입자는 다른 입자들과 다르다)

- 힉스입자 질량은 이론적인 UV 스케일에 비례한다:



$$\delta m_H \propto k^2: \int \frac{d^4k}{(2\pi)^4} \frac{1}{k^2 - m^2} \propto \Lambda^2 \quad \int \frac{d^4k}{(2\pi)^4} \frac{k^2}{(k^2 - m^2)^2} \propto \Lambda^2$$

$$\Lambda \rightarrow M_{Pl}:$$



R. Rattazzi

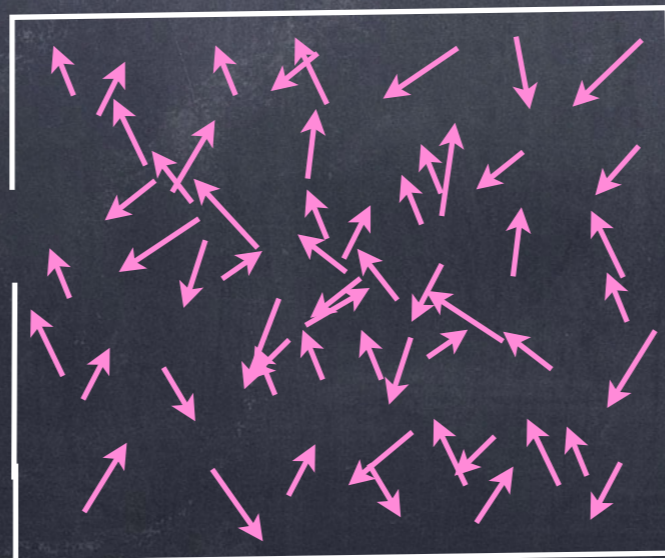
힉스 질량과 자연스러움의 문제

- 표준모형에서 힉스 질량은 보호받지 않는다 (스케일라 입자는 다른 입자들과 다르다)
- 힉스입자 질량은 이론적인 UV 스케일에 비례한다:



$$\delta m_H \propto k^2: \int \frac{d^4 k}{(2\pi)^4} \frac{1}{k^2 - m^2} \propto \Lambda^2 \quad \int \frac{d^4 k}{(2\pi)^4} \frac{k^2}{(k^2 - m^2)^2} \propto \Lambda^2$$

$$\Lambda \rightarrow M_{Pl}:$$



$$T \sim 10^{16} E_{EW}$$

R. Rattazzi

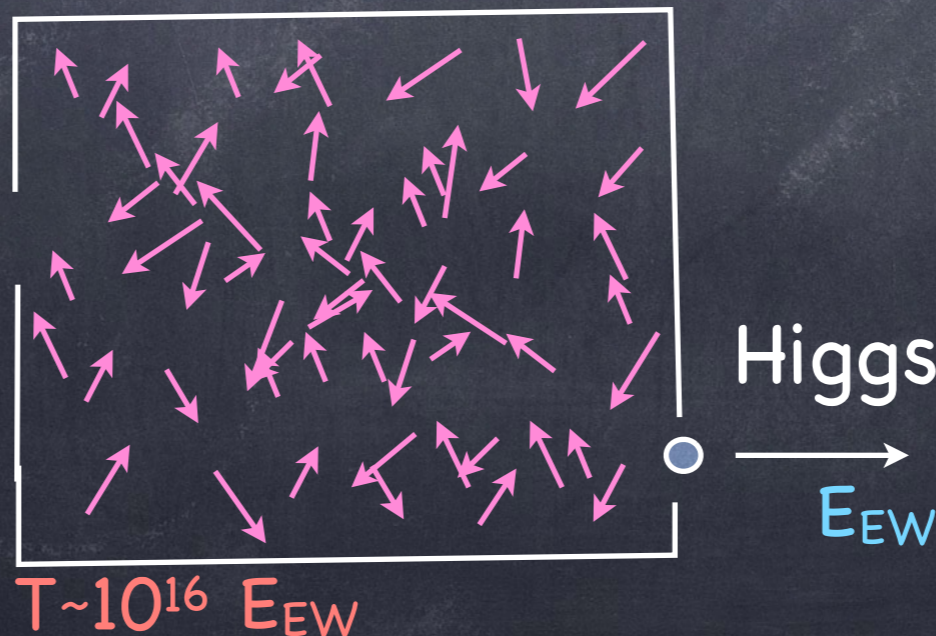
힉스 질량과 자연스러움의 문제

- 표준모형에서 힉스 질량은 보호받지 않는다 (스케일라 입자는 다른 입자들과 다르다)
- 힉스입자 질량은 이론적인 UV 스케일에 비례한다:



$$\delta m_H \propto k^2: \int \frac{d^4k}{(2\pi)^4} \frac{1}{k^2 - m^2} \propto \Lambda^2 \quad \int \frac{d^4k}{(2\pi)^4} \frac{k^2}{(k^2 - m^2)^2} \propto \Lambda^2$$

$$\Lambda \rightarrow M_{Pl}:$$



R. Rattazzi

힉스 질량과 자연스러움의 문제

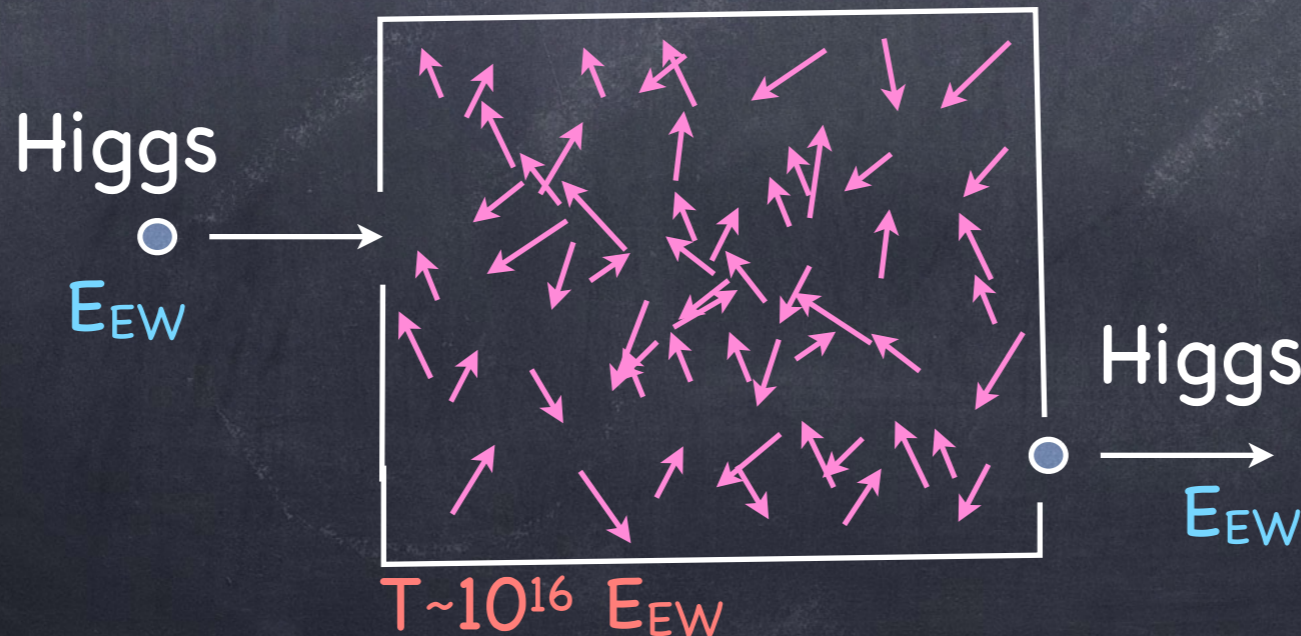
- 표준모형에서 힉스 질량은 보호받지 않는다 (스케일라 입자는 다른 입자들과 다르다)

- 힉스입자 질량은 이론적인 UV 스케일에 비례한다:



$$\delta m_H \propto k^2: \int \frac{d^4k}{(2\pi)^4} \frac{1}{k^2 - m^2} \propto \Lambda^2 \quad \int \frac{d^4k}{(2\pi)^4} \frac{k^2}{(k^2 - m^2)^2} \propto \Lambda^2$$

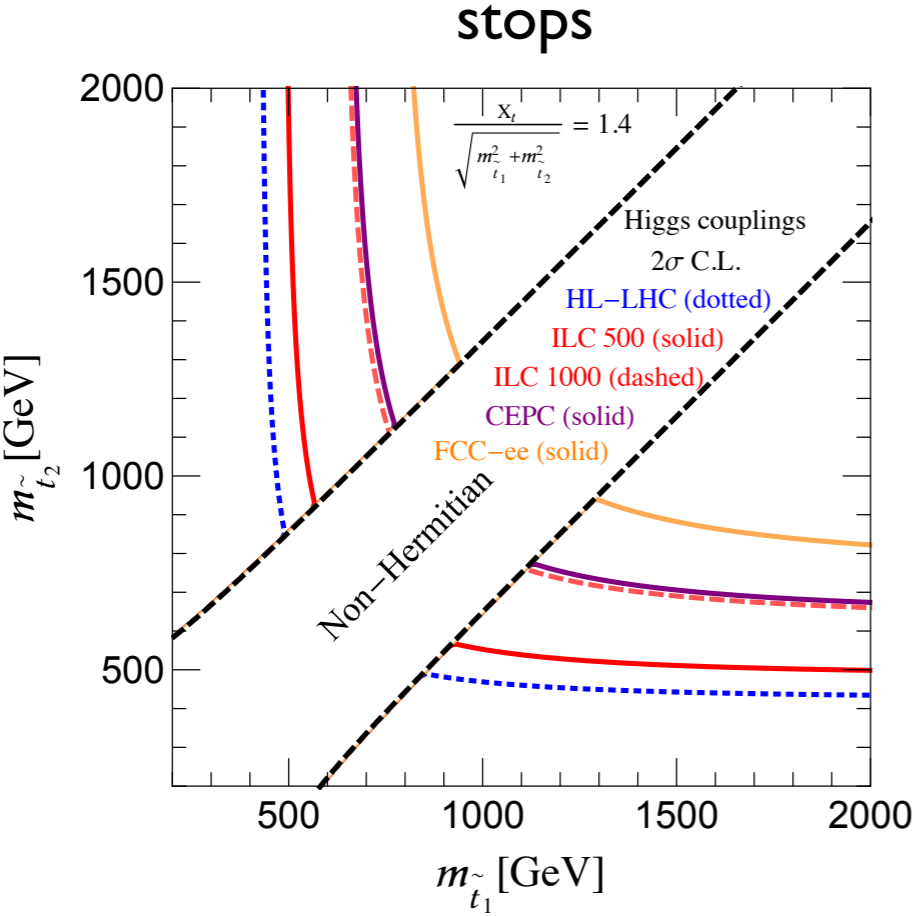
$$\Lambda \rightarrow M_{Pl}:$$



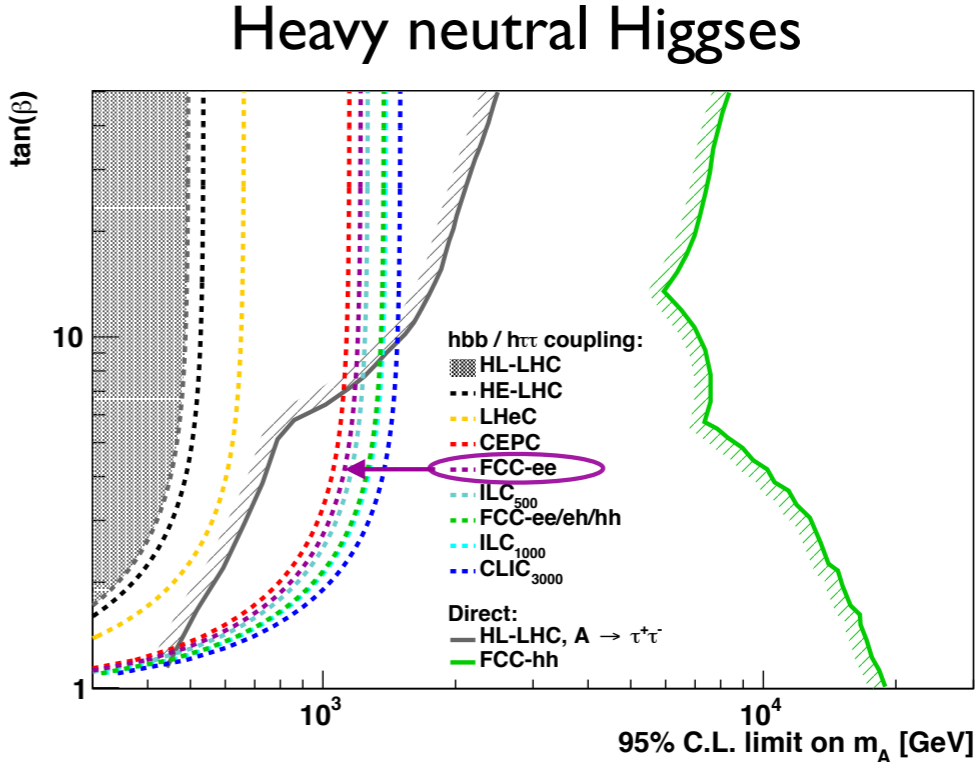
R. Rattazzi

Discovery Potential Beyond LHC.

Precisely measured EW and Higgs observables are sensitive to heavy New Physics
 Examples of improved sensitivity wrt direct reach @ HL-LHC: SUSY



Fan, Reece, Wang '14



ESU Physics BB '19

Discovery Potential Beyond LHC.

Precisely measured EW and Higgs observables are sensitive to heavy New Physics
 Examples of improved sensitivity wrt direct reach @ HL-LHC: Composite Higgs

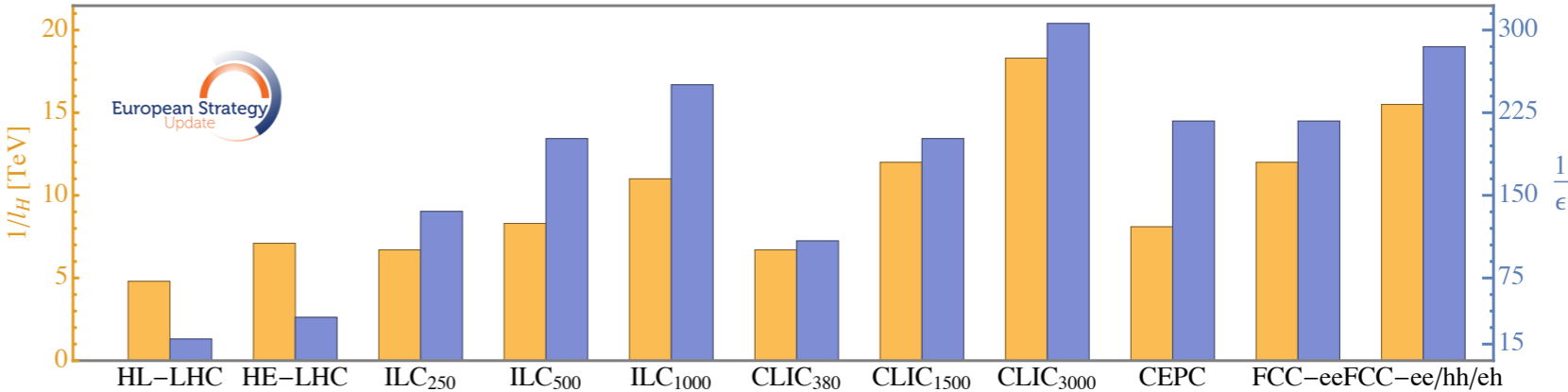
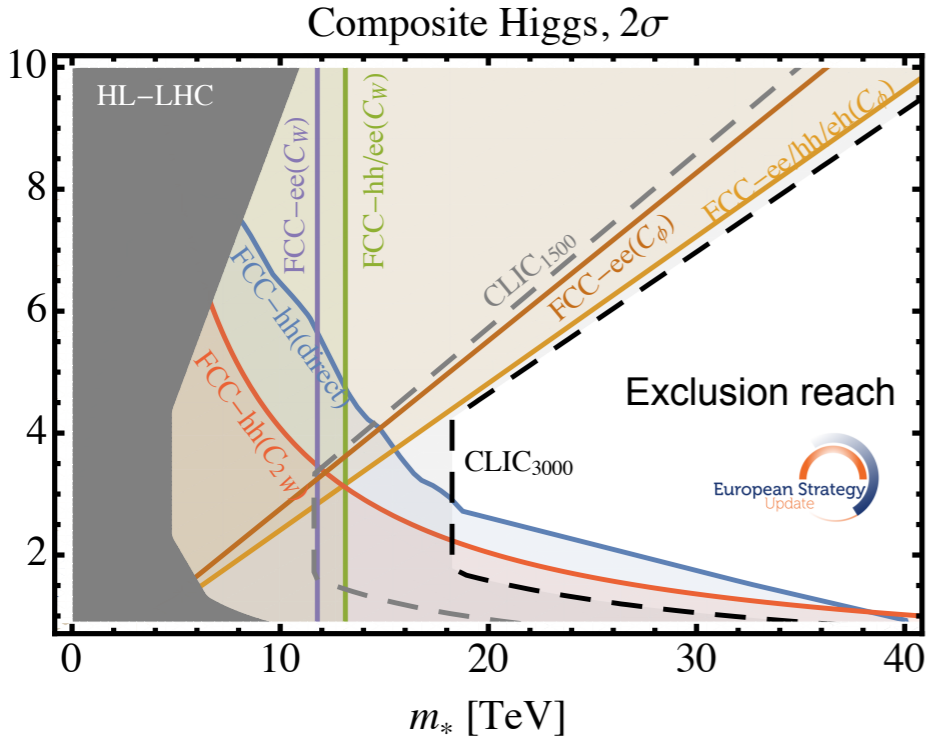


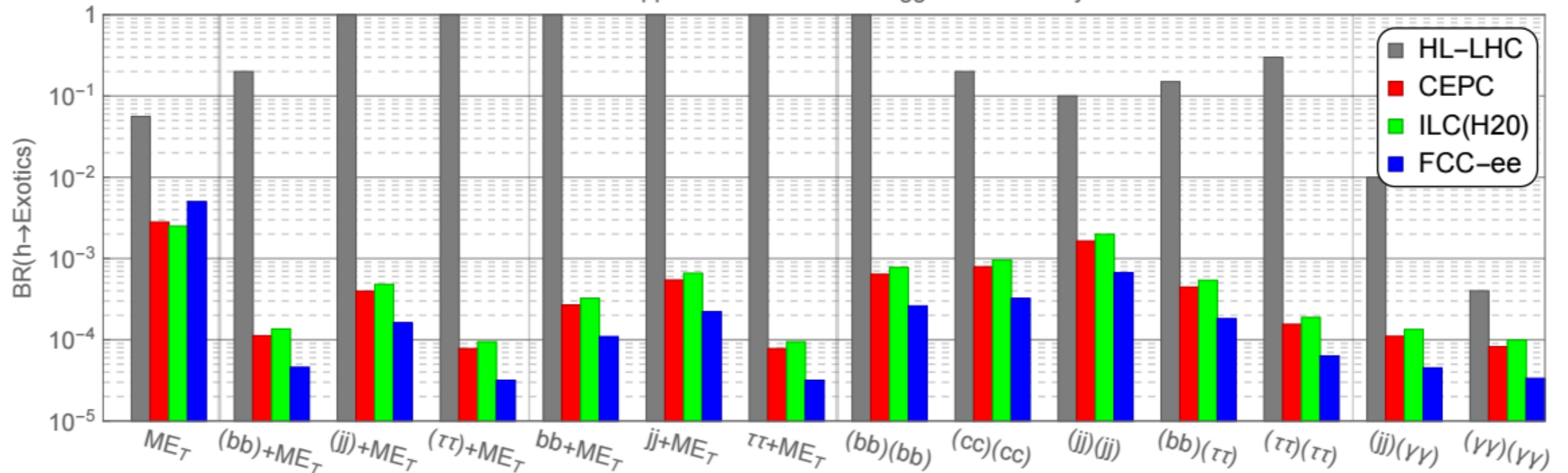
Fig. 8.5: Exclusion reach of different colliders on the inverse Higgs length $1/l_H = m_*$ (orange bars, left axis) and the tuning parameter $1/\epsilon$ (blue bars, right axis), obtained by choosing the weakest bound valid for any value of the coupling constant g_* .

Exotics/Long Lived Particles.

Z. Liu @ CEPC 2020

The Higgs could be a good portal to Dark Sector
— rich exotic signatures —

95% C.L. upper limit on selected Higgs Exotic Decay BR



How to improve?

> Dedicated detectors, see e.g. talk by [R. Gonzalez Suarez @ FCC week 2021](#)

FCC의 기본 목표

한번도 가보지 않은 고에너지 (초기우주 상태)의 영역에 간다는 감격을 제외하더라도,

- * 일반적인 물질을 구성하는 전자와 같은 기본 입자들의 질량이 힉스메커니즘 때문인지 확인
- * 약전자기 vacuum의 안정성 (우리 우주의 운명)은 어떻게 될까에 대한 답변
- * 물질-반물질 비대칭성 (1st order phase transition required)?
- * 약전자기 대칭성 붕괴의 비밀
- * 약전자기 대칭성 붕괴와 자연스러움 (왜 힉스 질량은 플랑크 스케일 보다 천문학적으로 작을까)
- * 우주암흑물질? (본 강연에서는 다루지 않음)
- * 초기우주의 inflation에서 힉스의 역할?
- * ...

The big question - 얼마면 되나?

- *가격: FCC 는 대략 1단계에서 \$10 billion
FCCe+e- (\$5 billion quoted + 땅굴파기)
- *대략 10년 정도의 공사 기간
- *2045, 은 되야 정상가동하는 것을 보게될 예정이
다. 두번째 단계인 100 TeV 는 죽기전에 가능할r
까?

매우 값비싼 실험이다

- 항공모함 USS Ford: \$12 billion
- 미국 대통령이 탑승하는 항공기 Air Force One: \$4 billion
- 전투기 B2 Stealth bomber \$1.2 billion, program cost \$30 billion
- 전투기 Global Hawk program: \$10 billion
- F-35 program: \$1.5 trillion (estimated through 2070)
- LA Rams complex: \$5 billion (private)
- James Webb Space Telescope: \$10 billion
- Mars 2020 Rover: \$2 billion
- NASA annual budget: \$21 billion

매우 값비싼 실험이다

- 항공모함 USS Ford: \$12 billion
- 미국 대통령이 탑승하는 항공기 Air Force One: \$4 billion

• 전 billion

• 전 하지만, LA의 미식축구 구장 2개 값으로
FCC 실험을 할 수 있다

• F- 이를 통해 발견하게될 우주의 비밀은 항공모함 한척 보다 훨씬
값진게 아닐까?

- L
- James Webb Space Telescope: \$10 billion

• Mars 2020 Rover: \$2 billion

• NASA annual budget: \$21 billion