

高能环形正负电子对撞机 前沿物理和潜力

王连涛

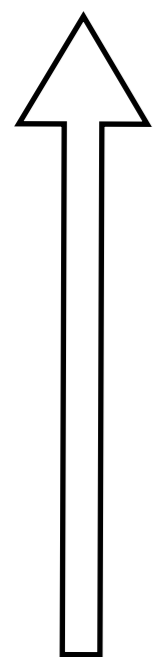
高能环形正负电子对撞机落户雄安可行性研讨会
2018年7月12日

报告主要内容:

- CEPC 的主要物理目标。
- 预期的主要成果以及其深远的科学意义。

基本粒子的世界，标准模型

更高能量
尺度更微观



10^{-18} 米 TeV

10^{-15} 米 GeV

10^{-12} 米 MeV

10^{-6} 米 eV



t W, Z h
weak interaction

τ b c

μ s

e u, d strong interaction

QED

V_3

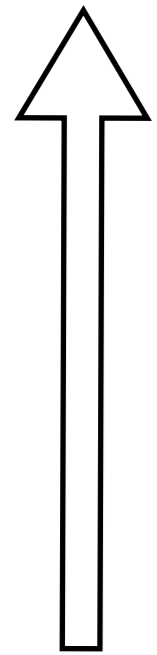
V_2

V_1

希格斯粒子的发现

2013年诺贝尔奖

更高能量
尺度更微观



10^{-18} 米 TeV

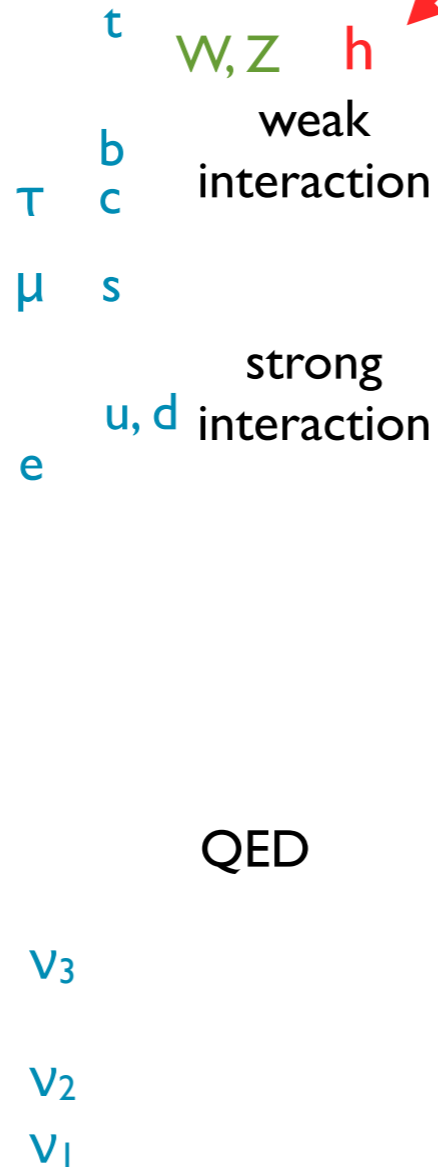
10^{-15} 米 GeV

10^{-12} 米 MeV

10^{-6} 米 eV

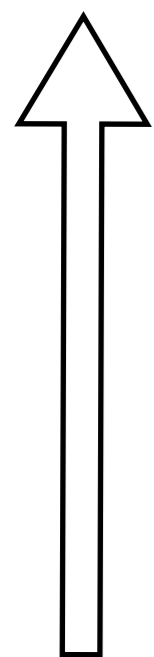


2012 年
LHC, CERN



希格斯粒子的发现

更高能量
尺度更微观



10^{-18} 米 TeV

10^{-15} 米 GeV

10^{-12} 米 MeV

10^{-6} 米 eV



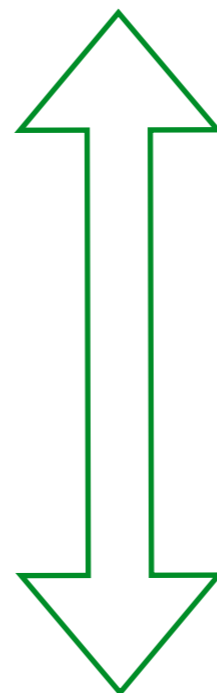
t W, Z h
weak interaction
τ b c
μ s
strong interaction
e u, d

QED

V_3

V_2

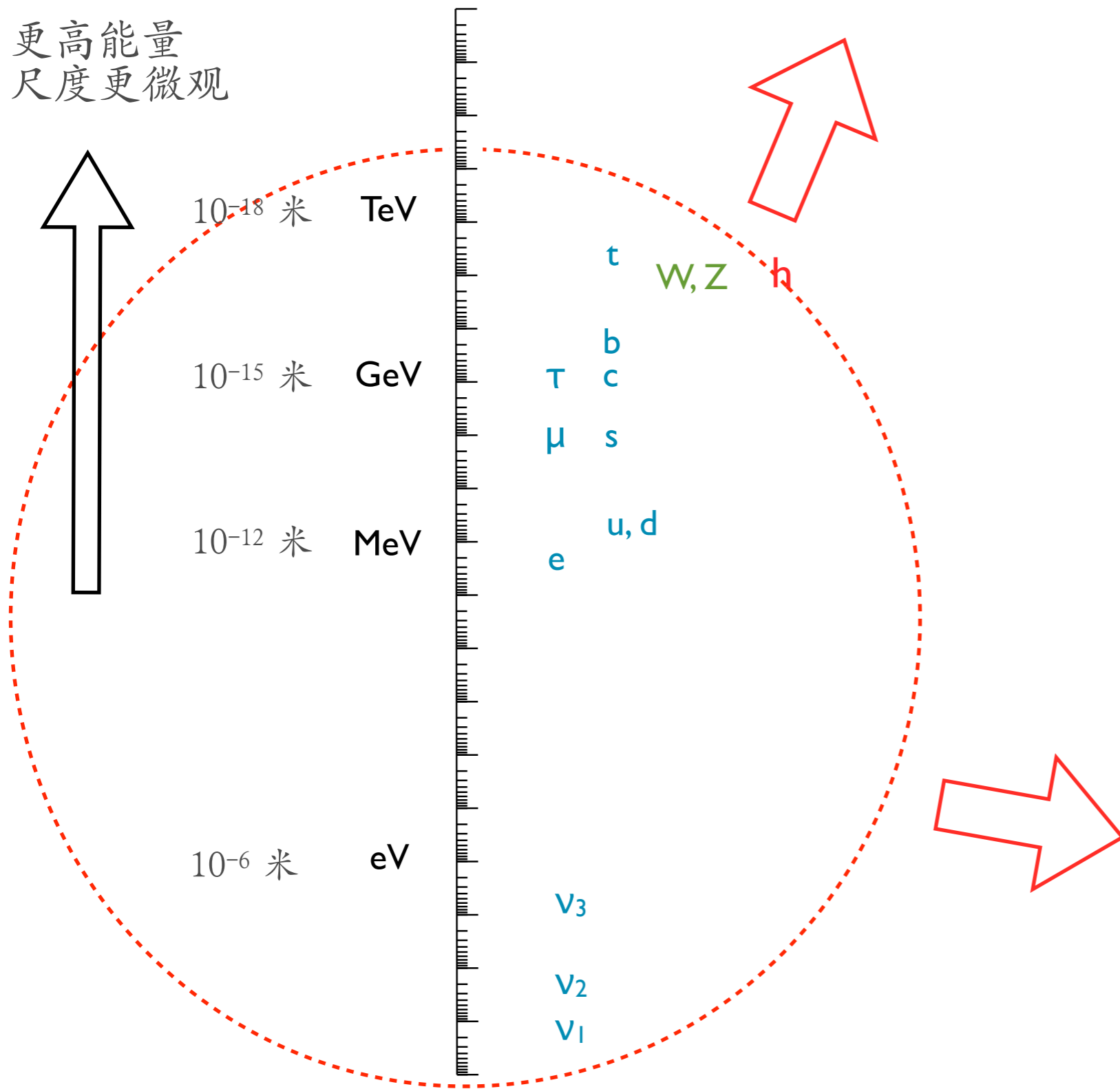
V_1



一个世纪以来粒子物理学
发展的高峰

新的时代的开端

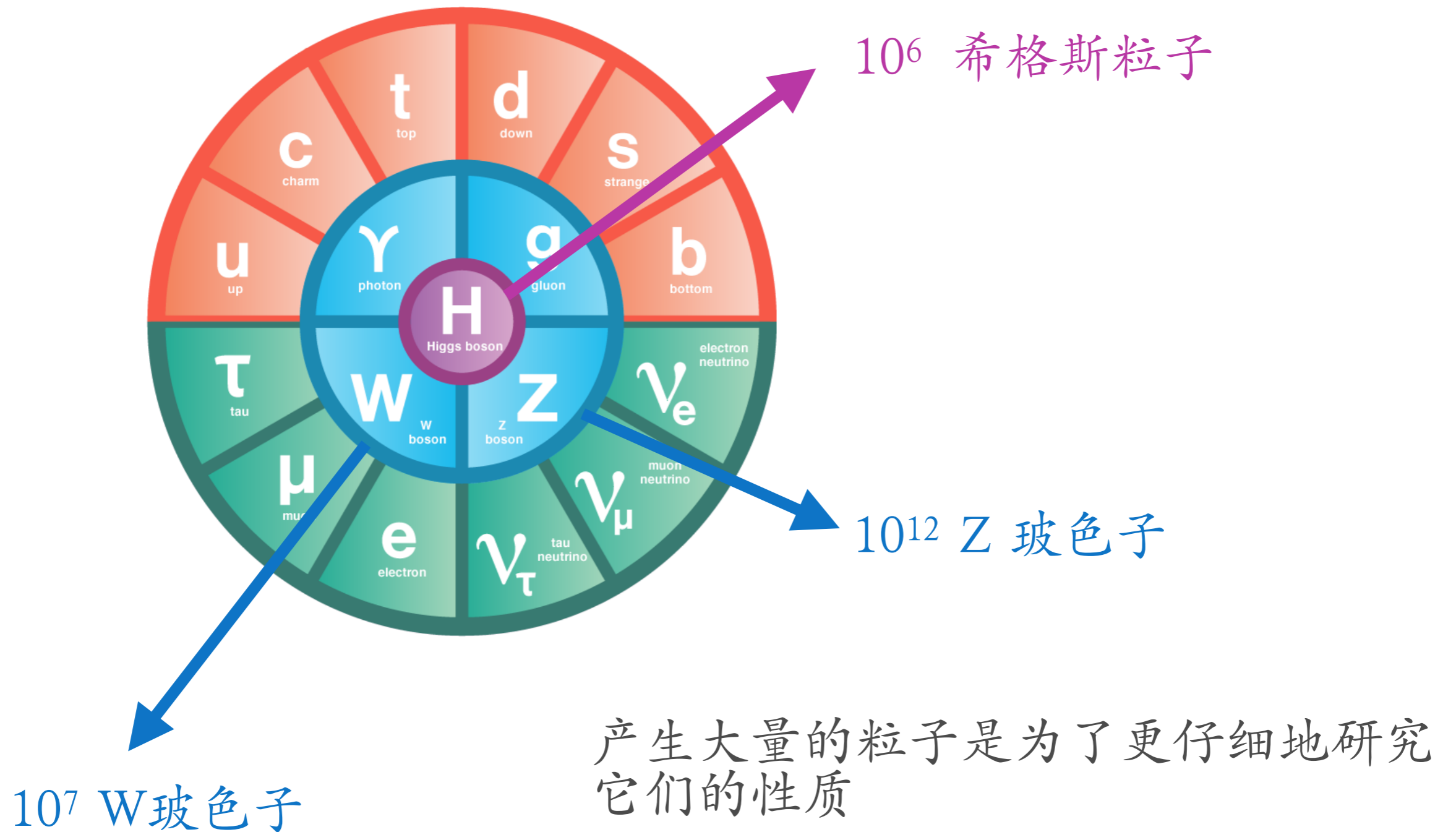
更高能量
尺度更微观



未知的世界

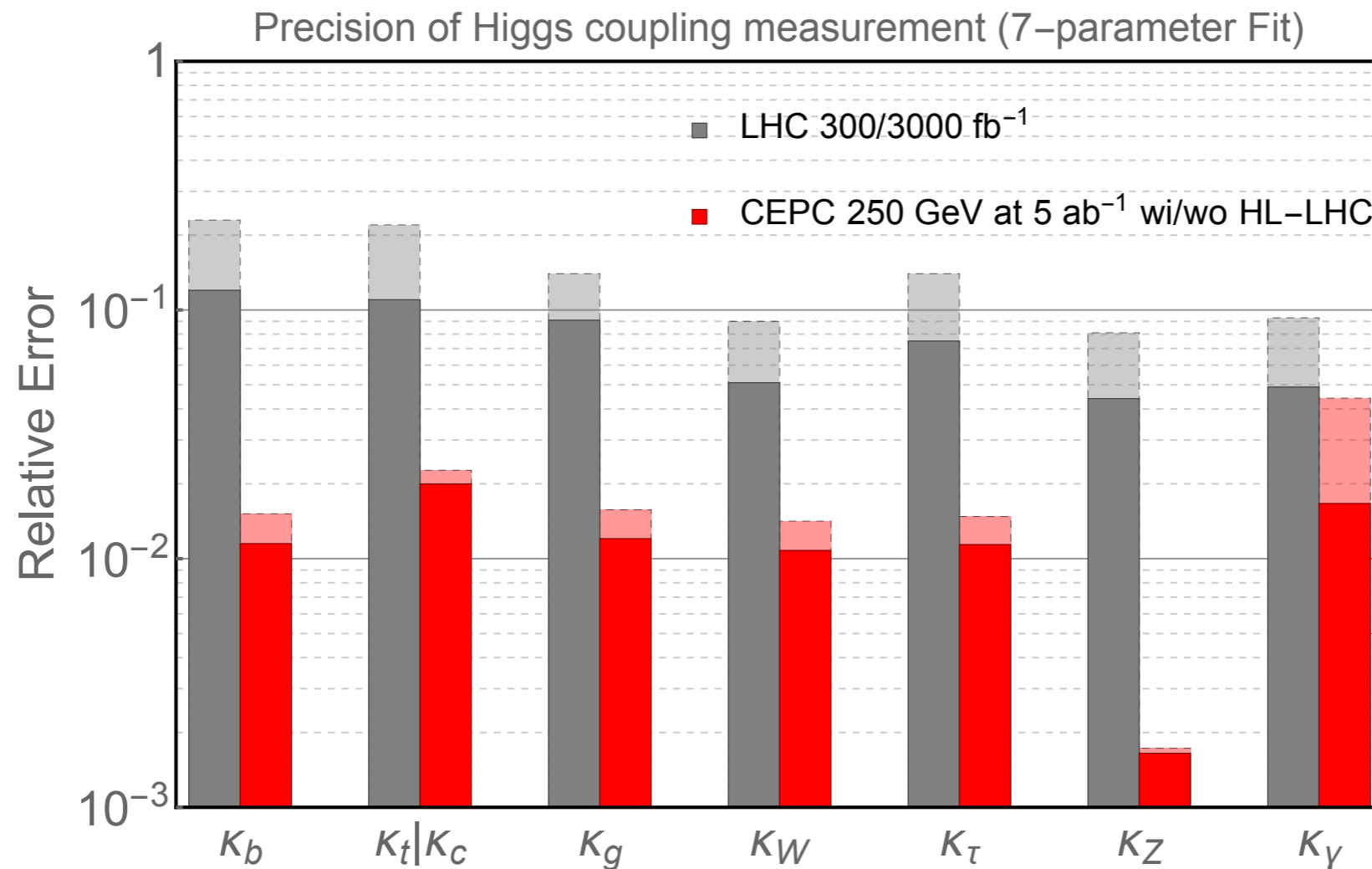
CEPC将迈出
探索未知的重要一步

CEPC运行的计划



数量越多，精度越高

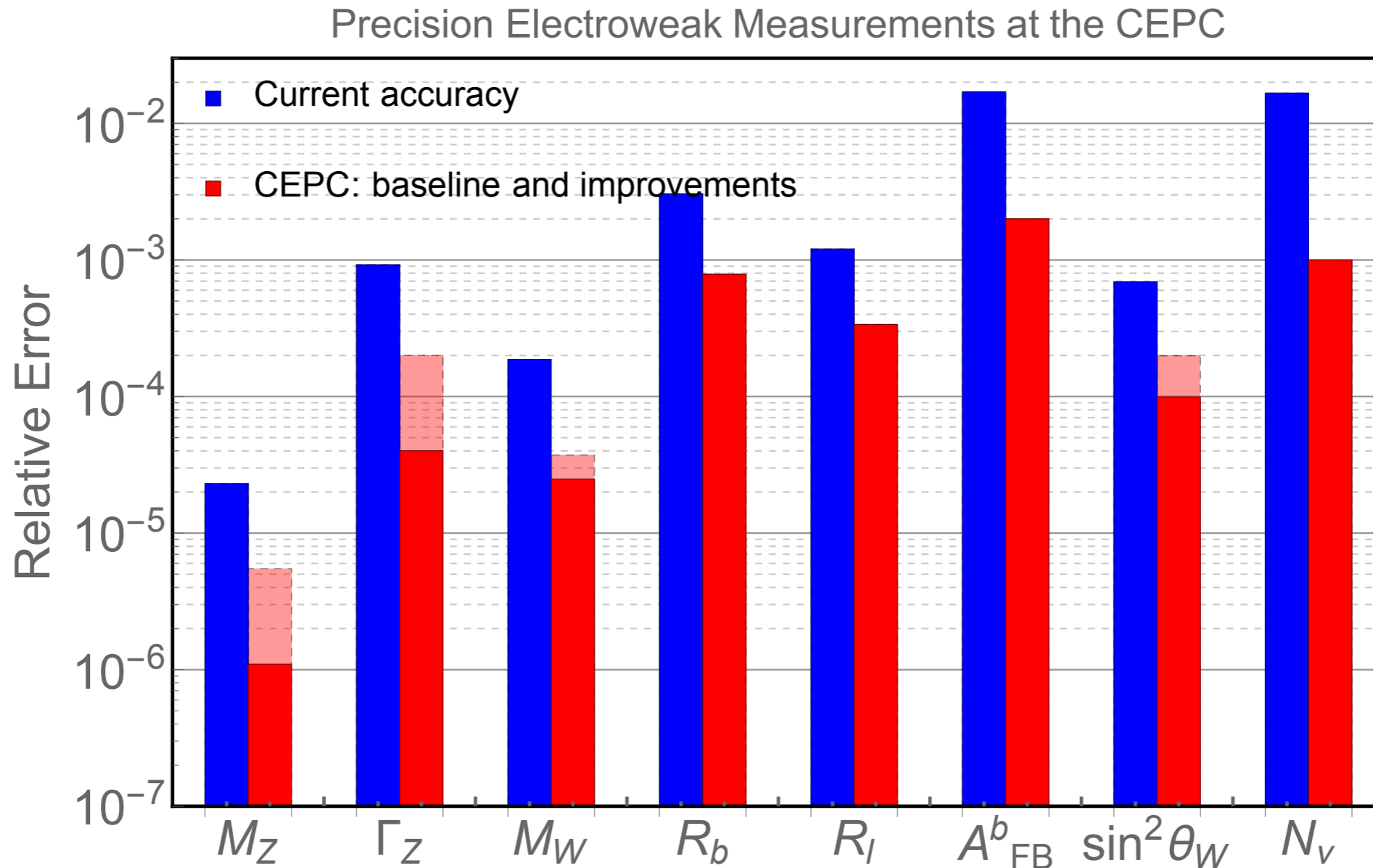
CEPC 的主要物理目标: 精确测量希格斯粒子的性质



这也是欧洲核子中心(CERN)大型强子对撞机(LHC)今后15-20年首要物理目标之一

CEPC 精度超过大型强子对撞机10到几十倍

CEPC 的主要物理目标: 精确的测量W和Z玻色子的性质

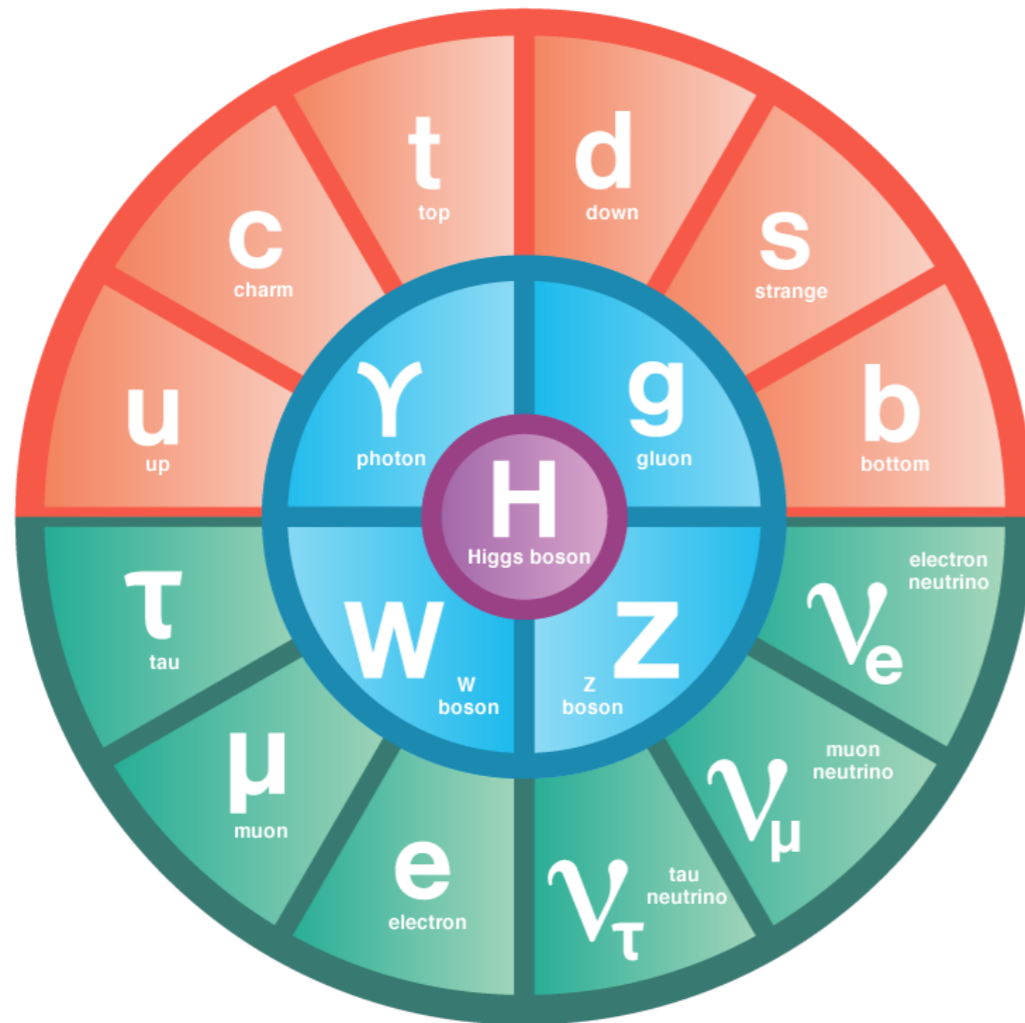


精度提高10倍以上

为什么要对这些粒子作深入研究？

可以解决基本粒子以及宇宙学
中一系列最重大的前沿问题

标准模型



12种基本粒子
3种基本相互作用

可以解释绝大多数
自然现象

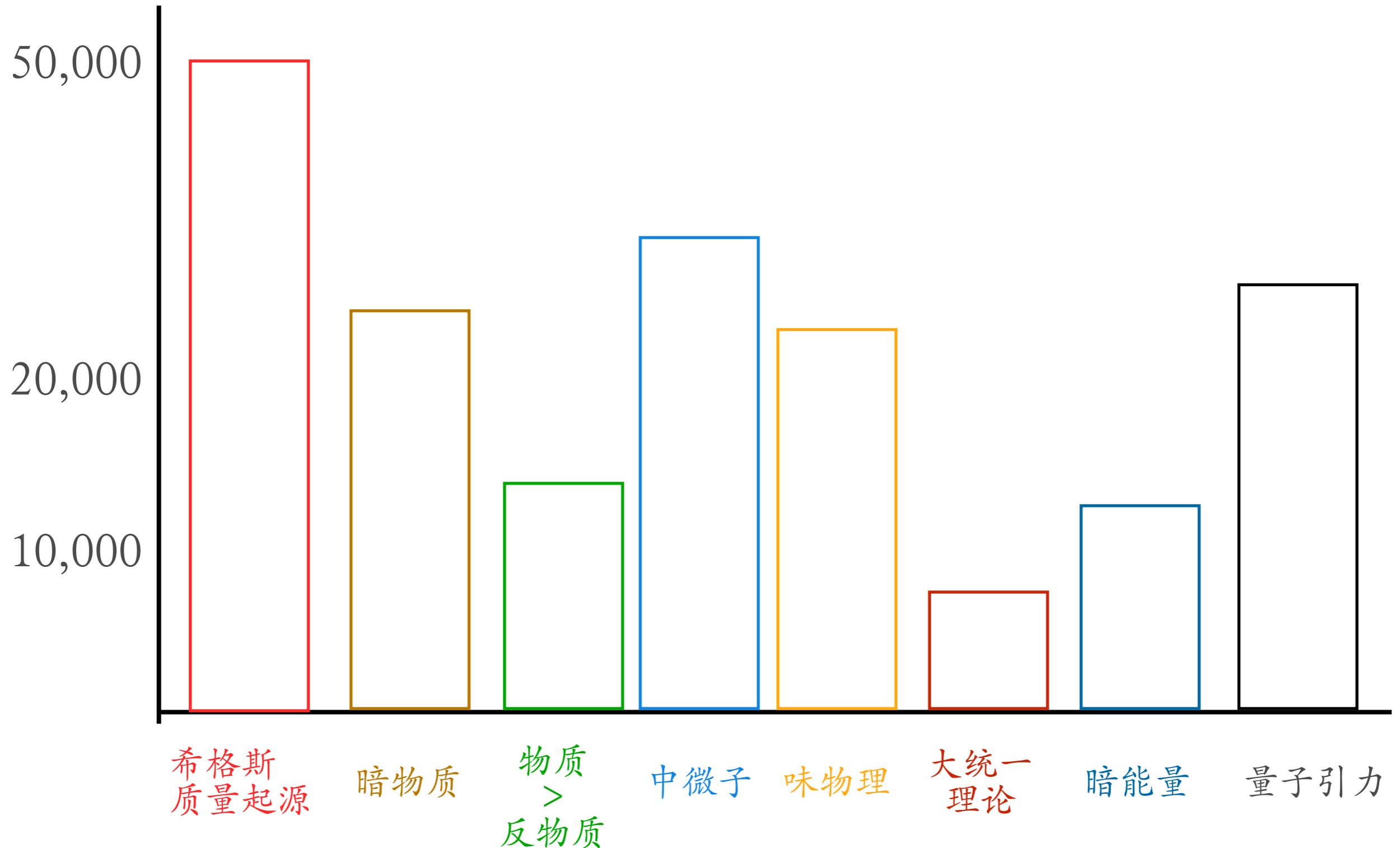
然而，这背后蕴含着更深刻的问题

物理学基础的悬而未决的重大问题

- 基本粒子的质量起源。
- 宇宙中物质多于反物质的原因。
- 暗物质是什么。
- 中微子的质量。
- 基本粒子的多样性，“味”问题。
- 大统一理论。
- 暗能量是什么。
- 量子引力。

基础物理的重大课题

论文数 (从2000年至今)



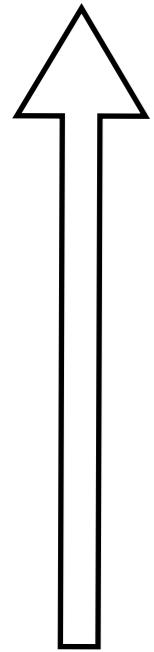
物理学基础的悬而未决的重大问题

- 基本粒子的质量起源。
- 宇宙中物质多于反物质的原因。
- 暗物质是什么？
- 中微子的质量
- 基本粒子的多样性，“味”问题。
- 大统一理论。
- 暗能量是什么？
- 量子引力。

CEPC可以直接深入地研究，并取得突破

基本粒子质量起源

更高能量
尺度更微观



10^{-18} 米 TeV

10^{-15} 米 GeV

10^{-12} 米 MeV

10^{-6} 米 eV



t W,Z 弱相互作用

τ b c

μ s

e u, d

基本物质粒子

ν_3

ν_2

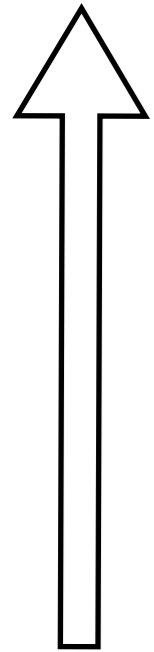
ν_1

h

希格斯

基本粒子质量起源

更高能量
尺度更微观



10^{-18} 米 TeV

10^{-15} 米 GeV

10^{-12} 米 MeV

eV



t W,Z 弱相互作用

b

c

τ

s

μ

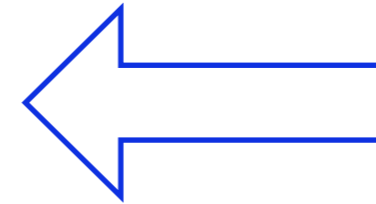
u, d

e

基本物质粒子

h

希格斯



标准模型确立了
共同的质量起源
是希格斯粒子

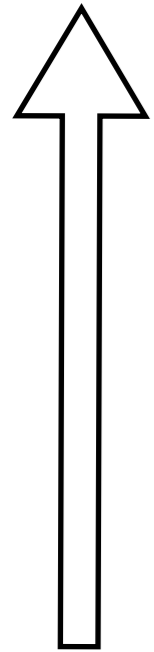
ν_3

ν_2

ν_1

基本粒子质量起源

更高能量
尺度更微观



10⁻¹⁸ 米 TeV

10⁻¹⁵ 米 GeV

10⁻¹² 米 MeV

eV



t W, Z 弱相互作用

b
c

τ

s

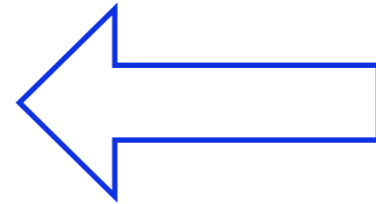
μ

u, d

e

h

希格斯



基本物质粒子

标准模型确立了
共同的质量起源
是希格斯粒子

ν₃

ν₂

ν₁

但是，标准模型不能预言质量的大小。
没有解释希格斯粒子的质量的起源。
需要更深层的基本理论！

希格斯粒子的质量起源

基本理论在什么微观尺度？

.....



希格斯粒子 100 GeV, 10^{-17} m.

希格斯粒子的质量起源

.....

基本理论在什么微观尺度？

是否在量子引力的尺度

$M_{\text{Planck}} = 10^{19} \text{ GeV}, 10^{-33} \text{ m}?$

为什么会和希格斯的能量尺度如此不同？

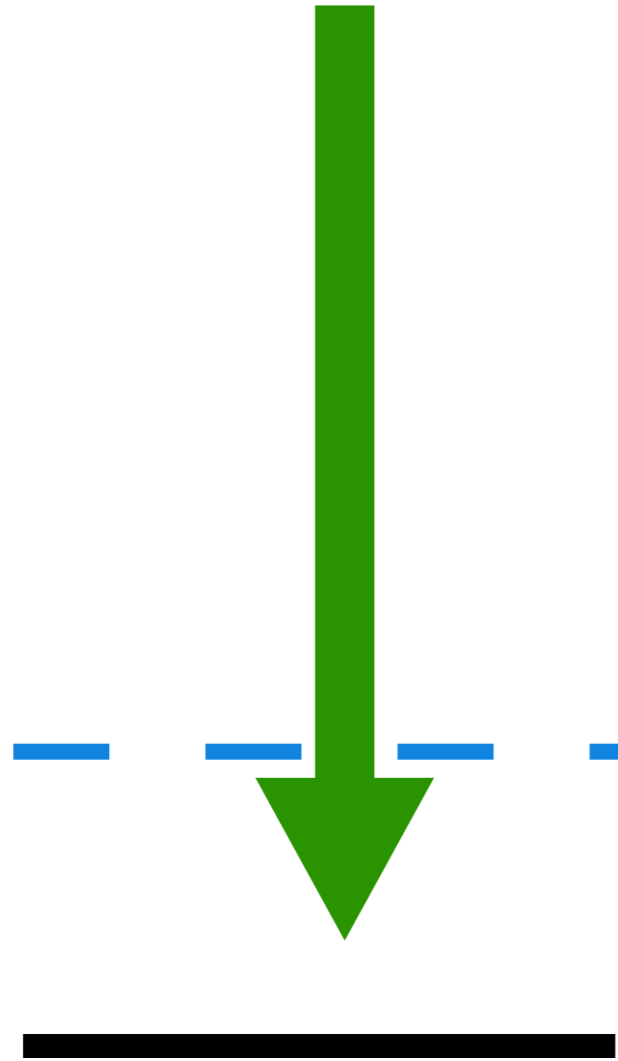


希格斯粒子 $100 \text{ GeV}, 10^{-17} \text{ m}.$

希格斯粒子的质量起源

基本理论在什么微观尺度？

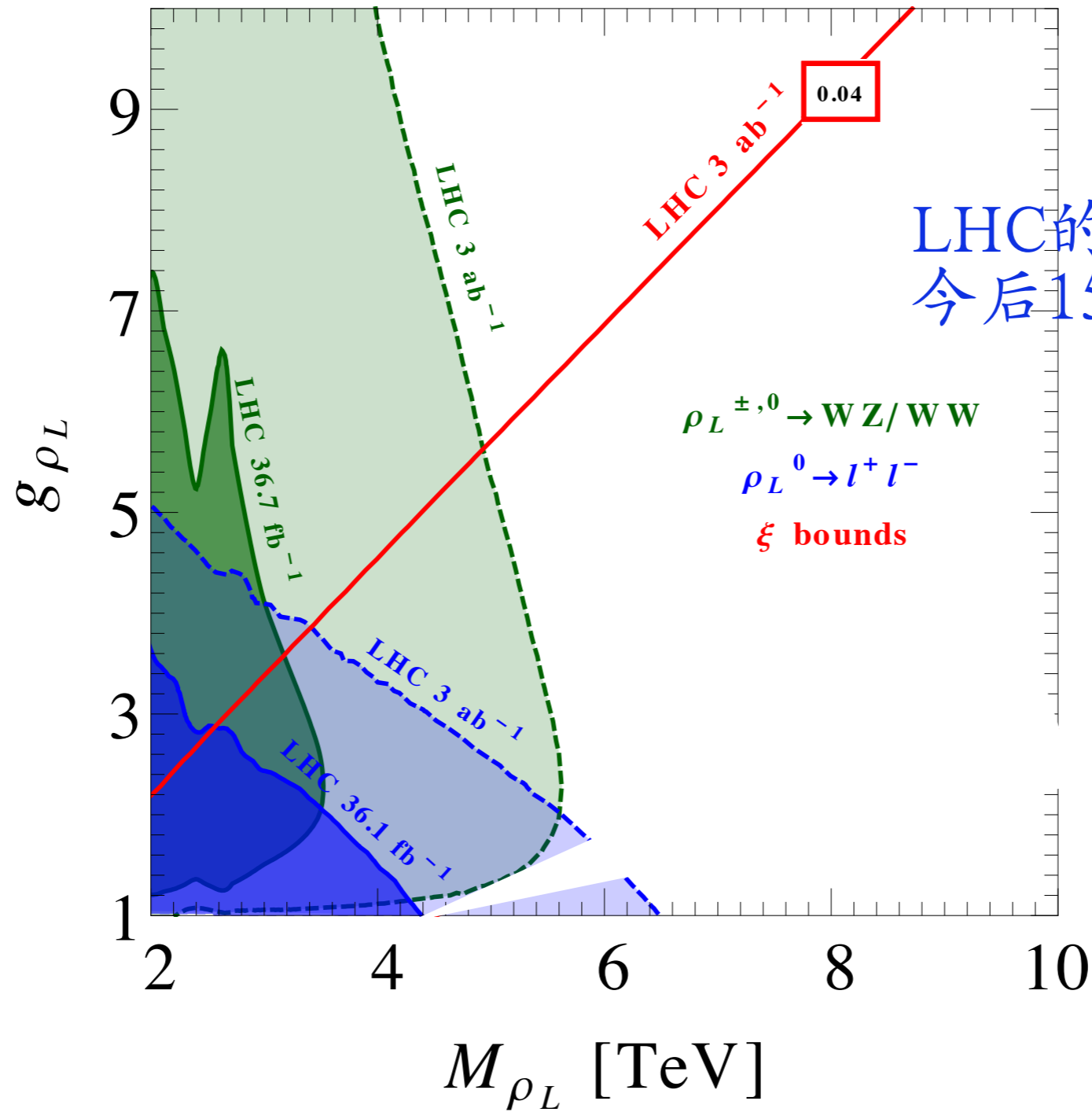
.....



为了解决这个问题 有很多的新理论。
精确了解希格斯粒子的性质是有力工具。
这是CEPC大展身手的地方。

希格斯粒子 100 GeV, 10^{-17} m.

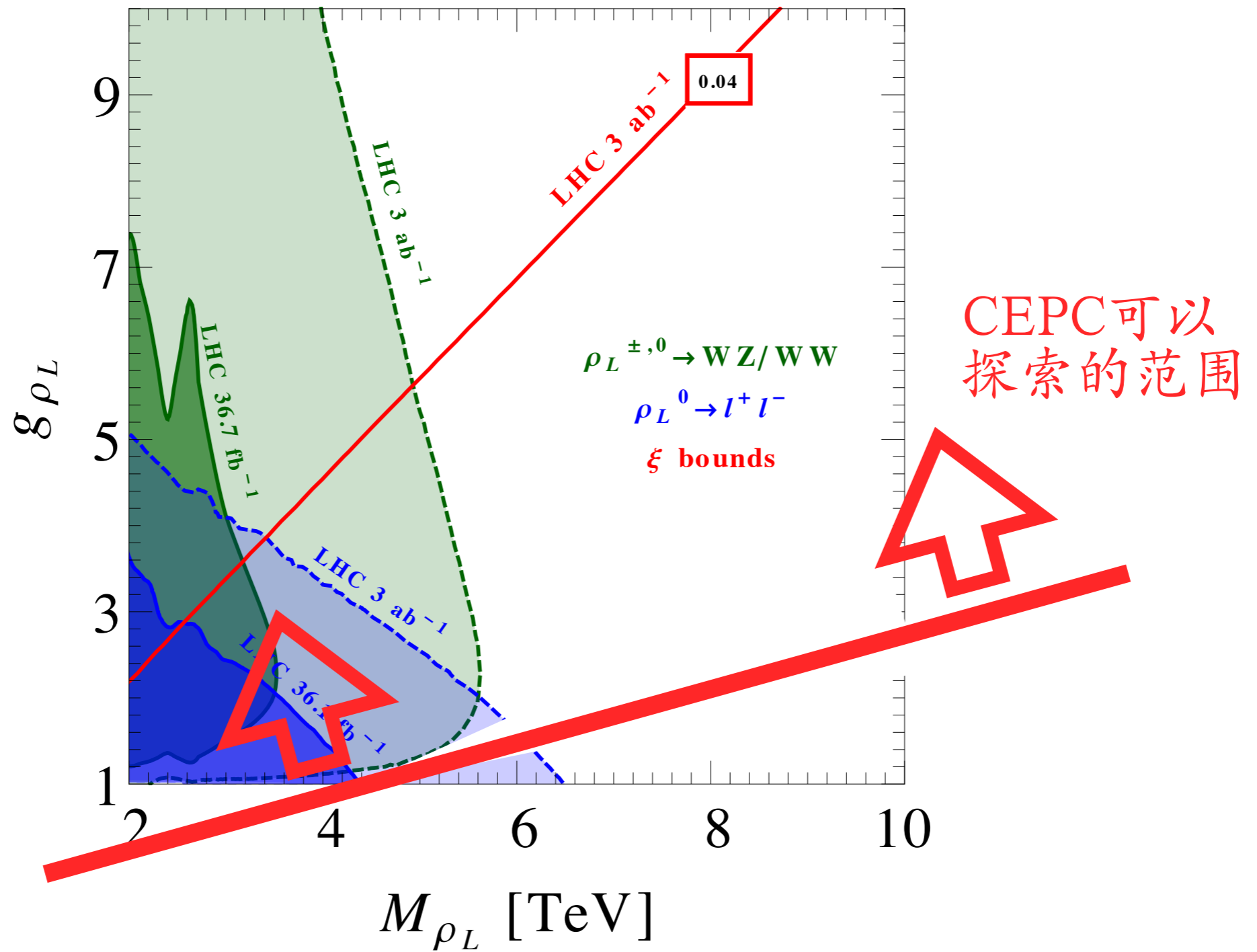
希格斯质量起源的理论



LHC的主要搜索目标之一
今后15年可以搜索的范围

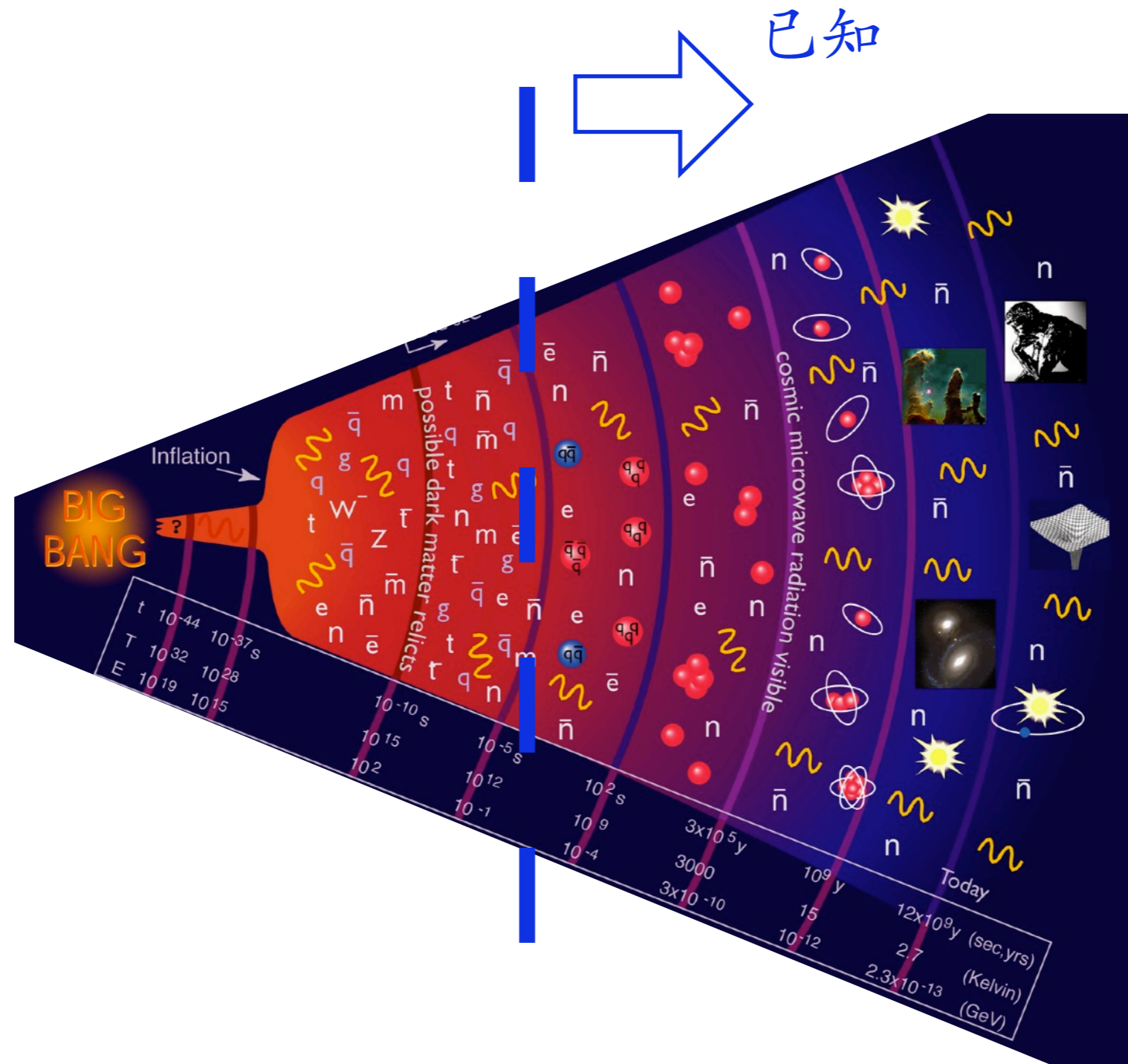
新理论: 复合希格斯粒子

希格斯质量起源的理论



新理论: 复合希格斯粒子

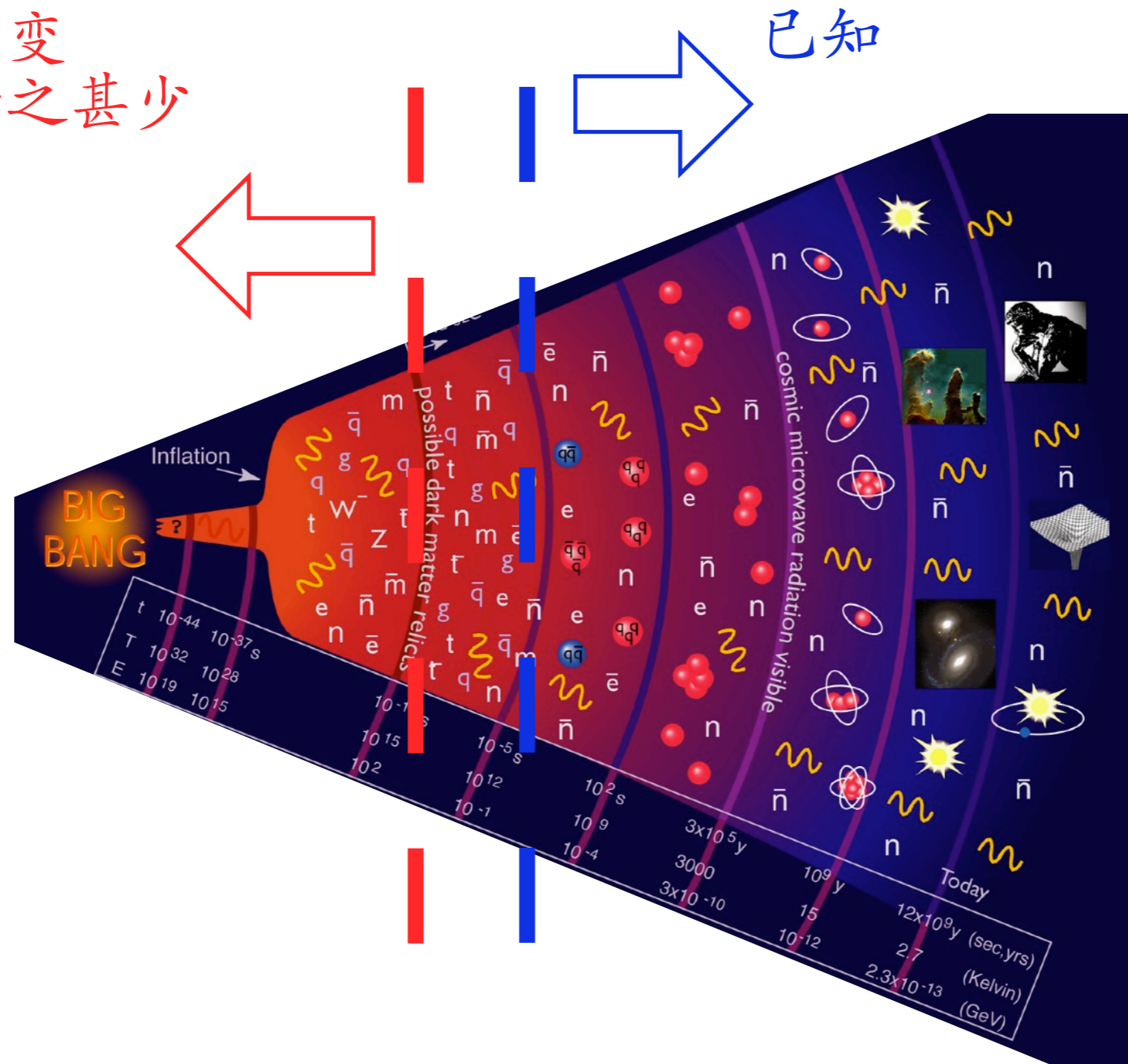
早期宇宙演化的重要里程碑



早期宇宙演化的重要里程碑

电弱相变
我们知之甚少

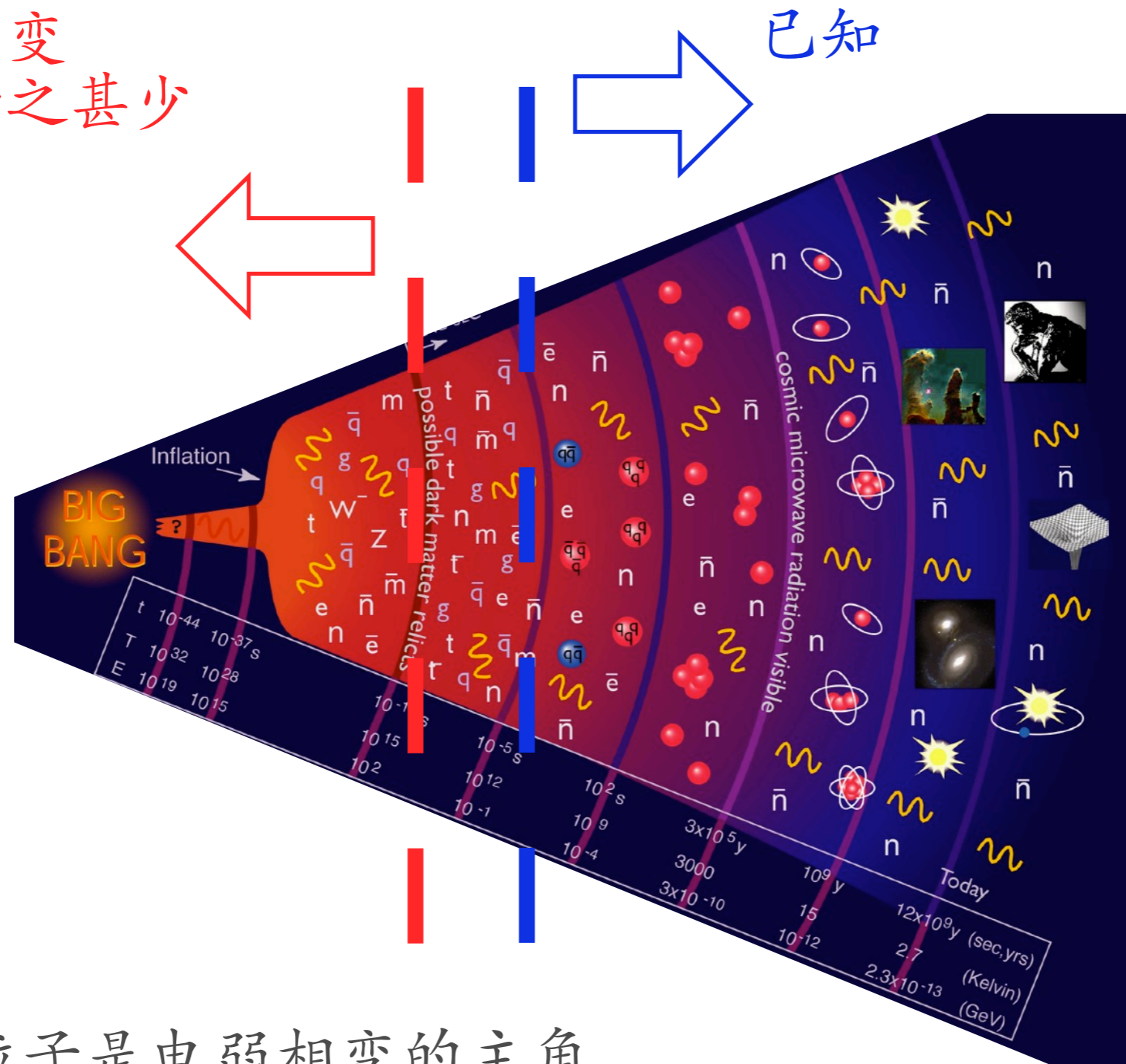
已知



早期宇宙演化的重要里程碑

电弱相变
我们知之甚少

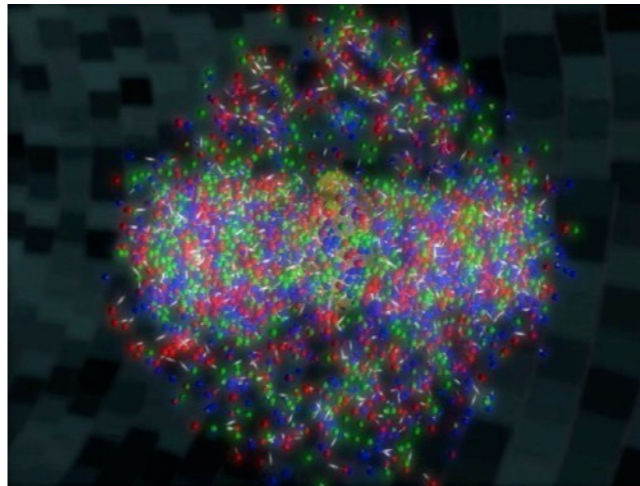
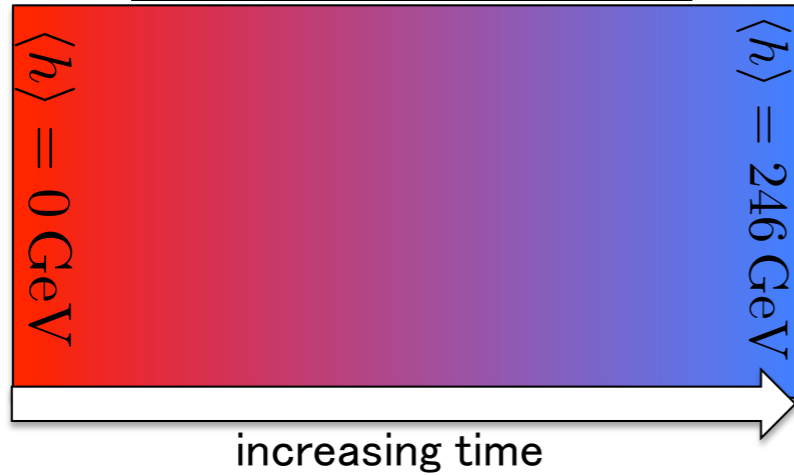
已知



希格斯粒子是电弱相变的主角
是研究它的主要工具。

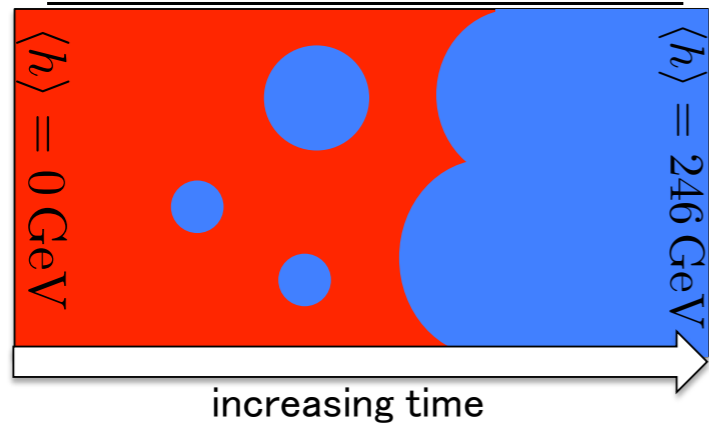
电弱相变的性质

Continuous Crossover



更接近哪一种？

First Order Phase Transition



电弱相变的性质和意义

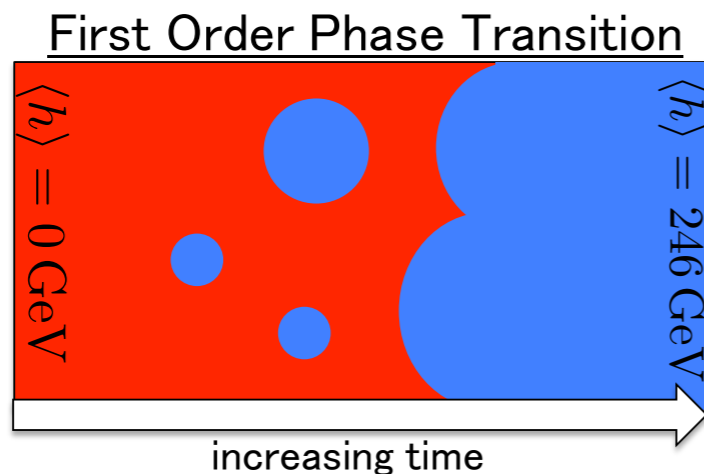
现在宇宙中物质多于反物质。
然而宇宙早期处于热平衡状态，正反物质是一样多的。

要打破这个对称性，一个必要条件是偏离热平衡

电弱相变的性质和意义

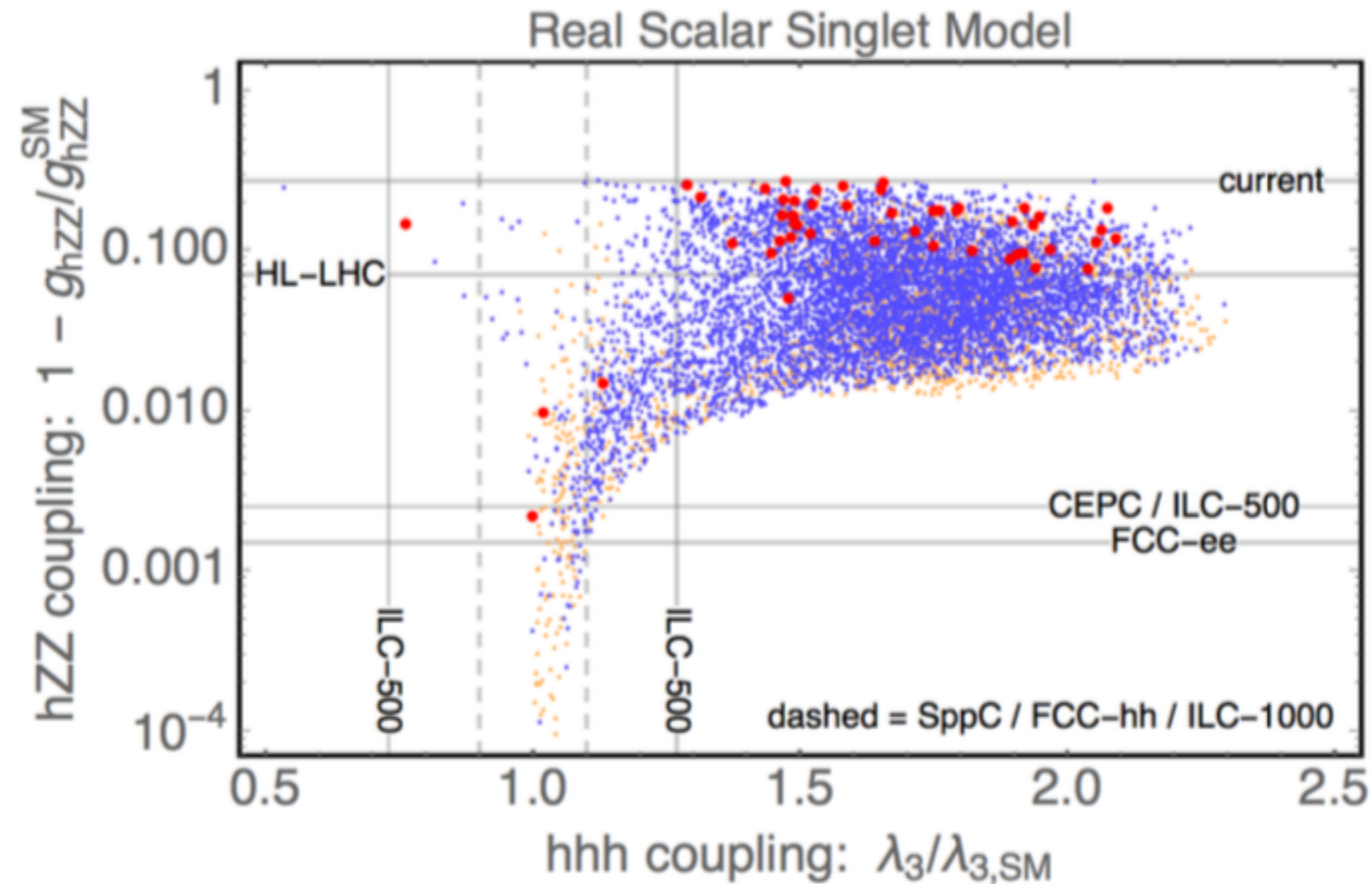
现在宇宙中物质多于反物质。
然而宇宙早期处于热平衡状态，正反物质是一样多的。

要打破这个对称性，一个必要条件是偏离热平衡



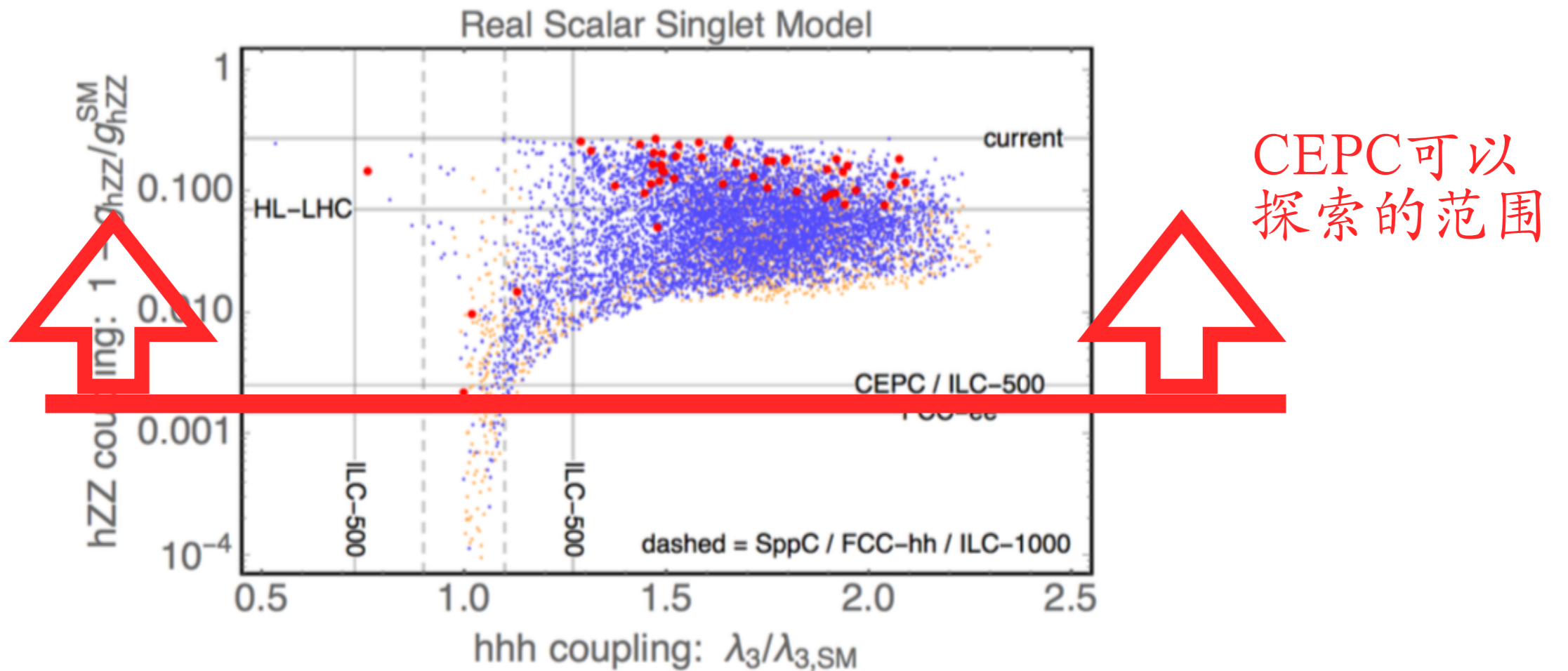
如果电弱相变是这样的，将为产生正反物质的不对称提供重要的舞台。

由希格斯探索电弱相变的性质



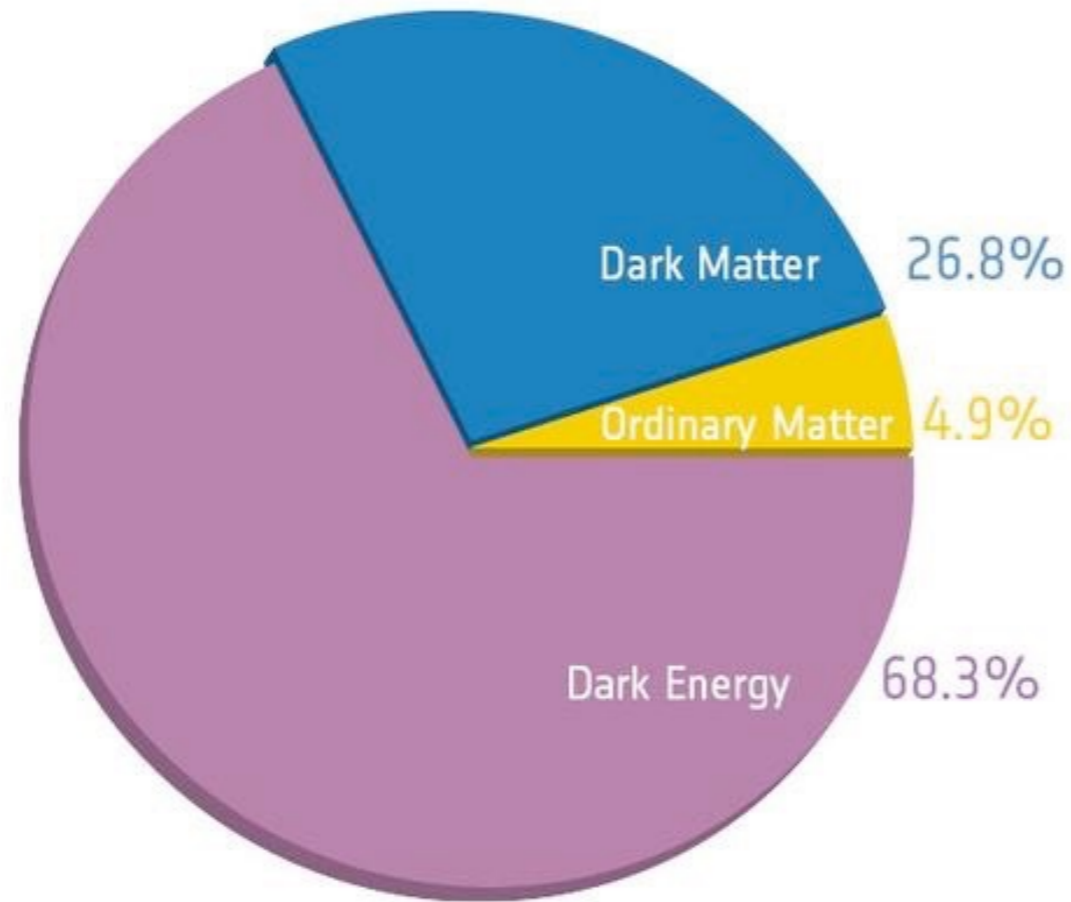
- Orange** = first order phase transition, $v(T_c)/T_c > 0$
- Blue** = “strongly” first order phase transition, $v(T_c)/T_c > 1.3$
- Red** = very strongly 1PT, could detect GWs at eLISA

由希格斯探索电弱相变的性质



- Orange = first order phase transition, $v(T_c)/T_c > 0$
- Blue = “strongly” first order phase transition, $v(T_c)/T_c > 1.3$
- Red = very strongly 1PT, could detect GWs at eLISA

暗物质



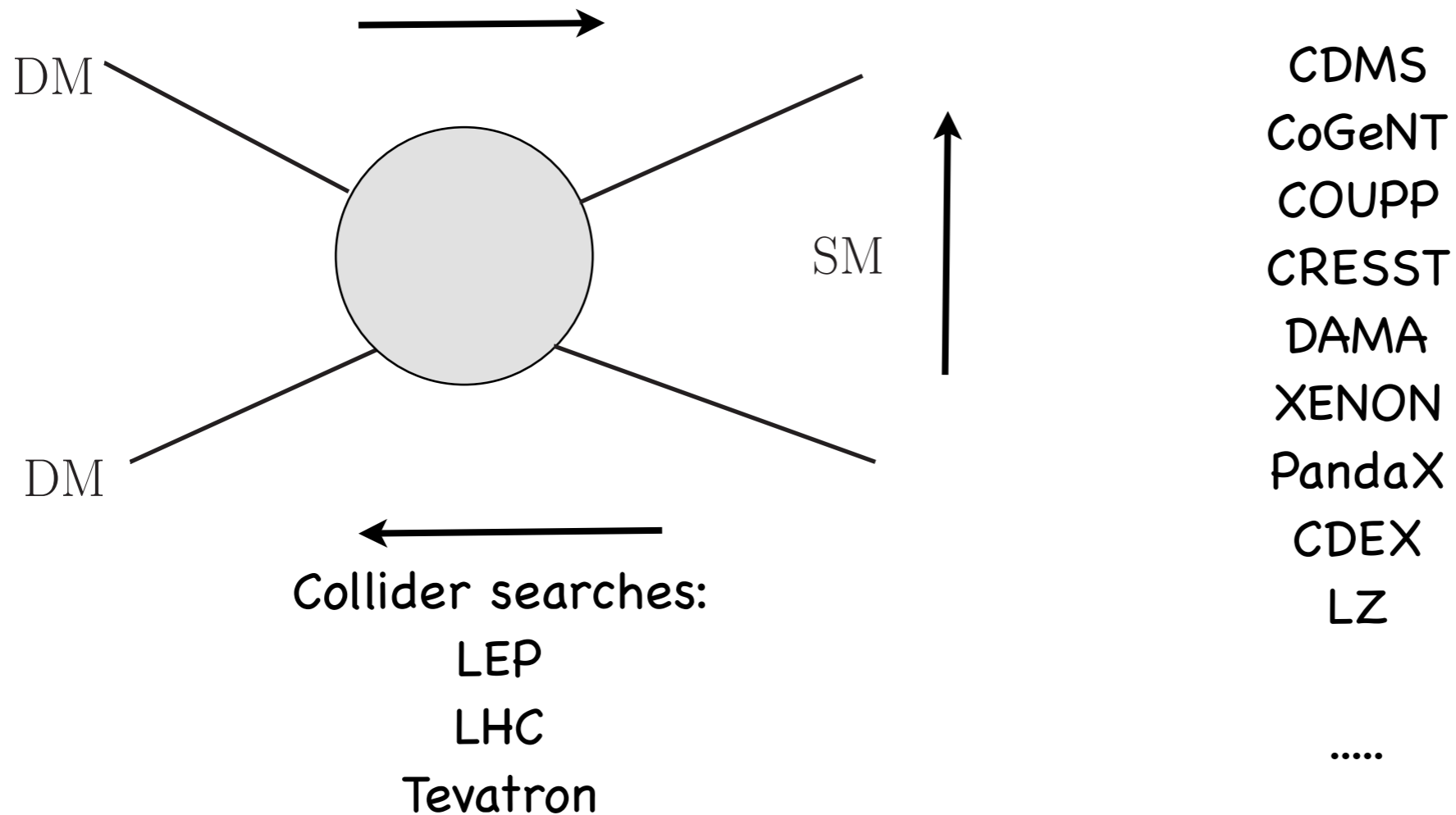
宇宙中绝大部分的物质的组成是未知的，称为暗物质

了解暗物质是探索宇宙的最紧迫的一步

暗物质探测： 粒子物理学的中心课题之一

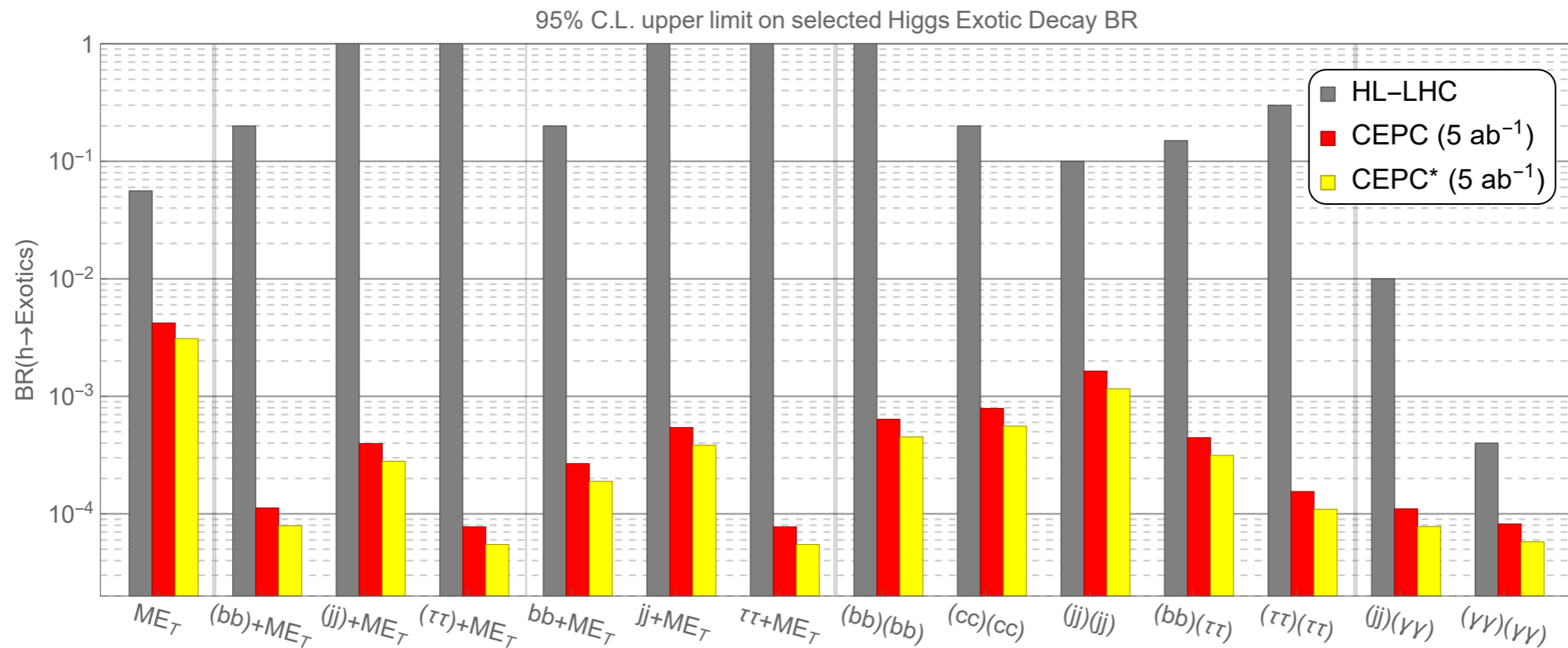
AMS2, PAMELA, Fermi-LAT, DAMPE

.....



多种探测手段，各国参与

希格斯粒子：通向暗物质的窗口

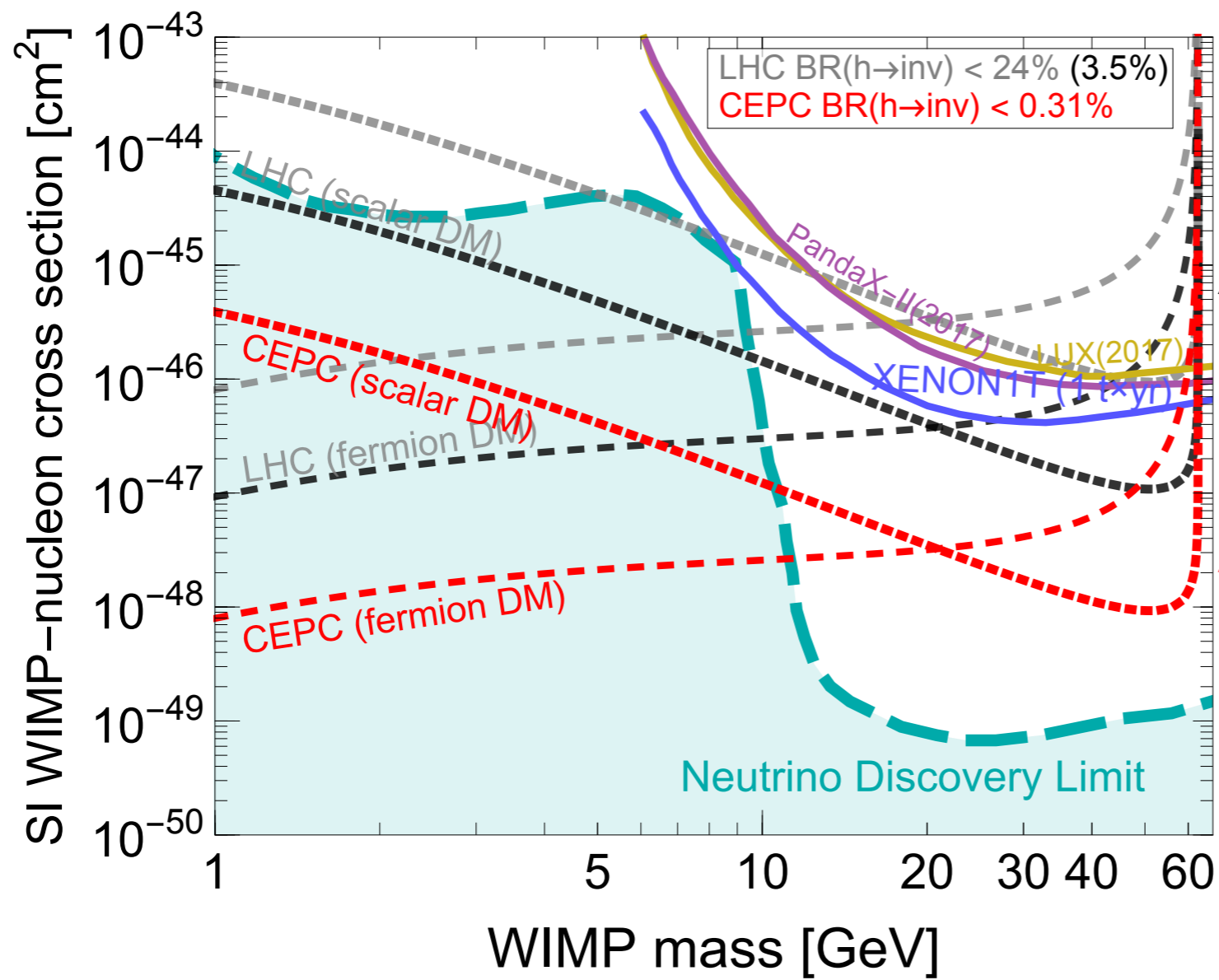


希格斯是标准模型中粒子质量的起源

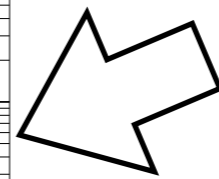
同时也可能是暗物质质量的起源。

这样，希格斯是通向暗物质世界的窗口。

CEPC可以以空前的精度探索这个窗口



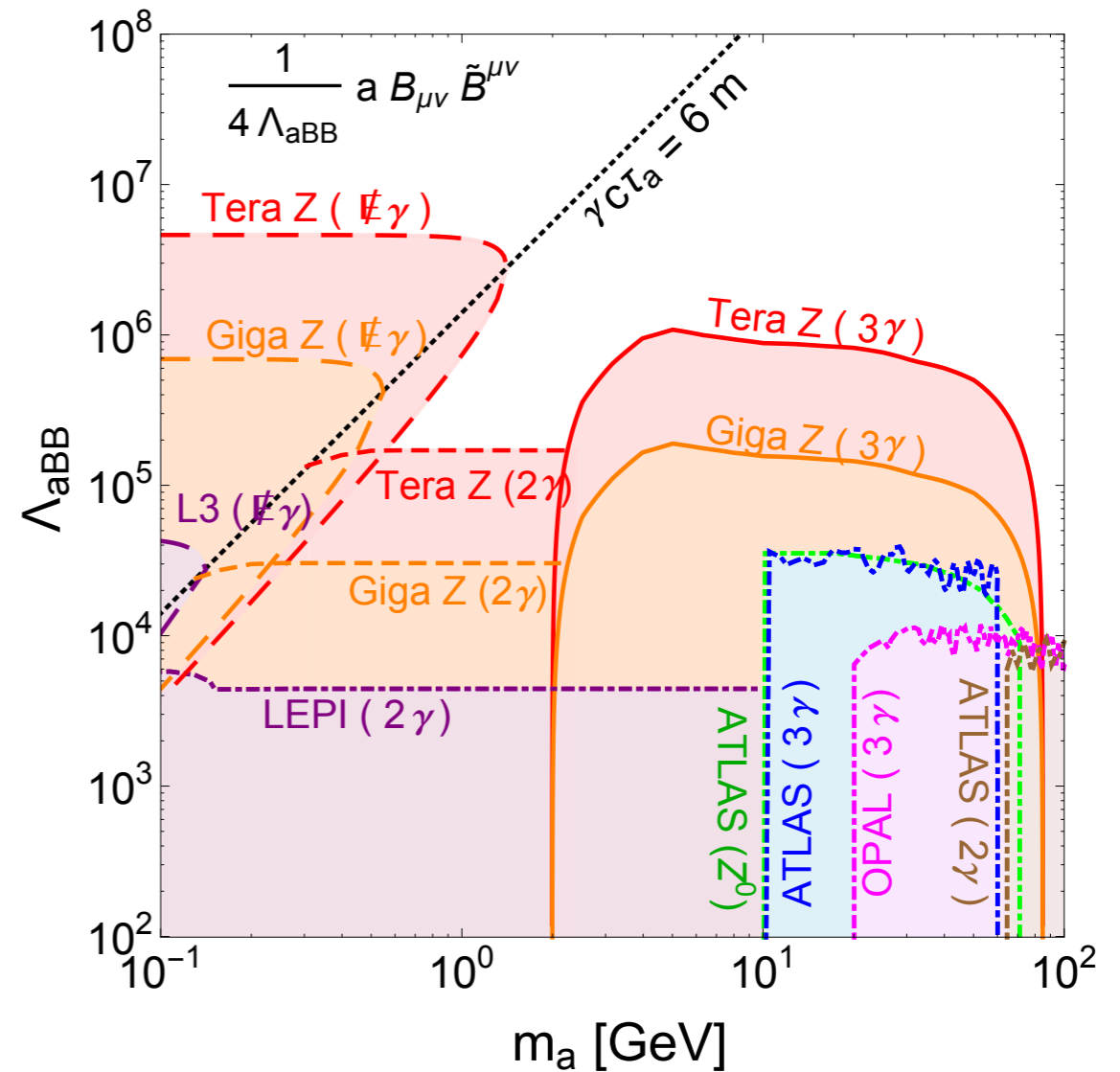
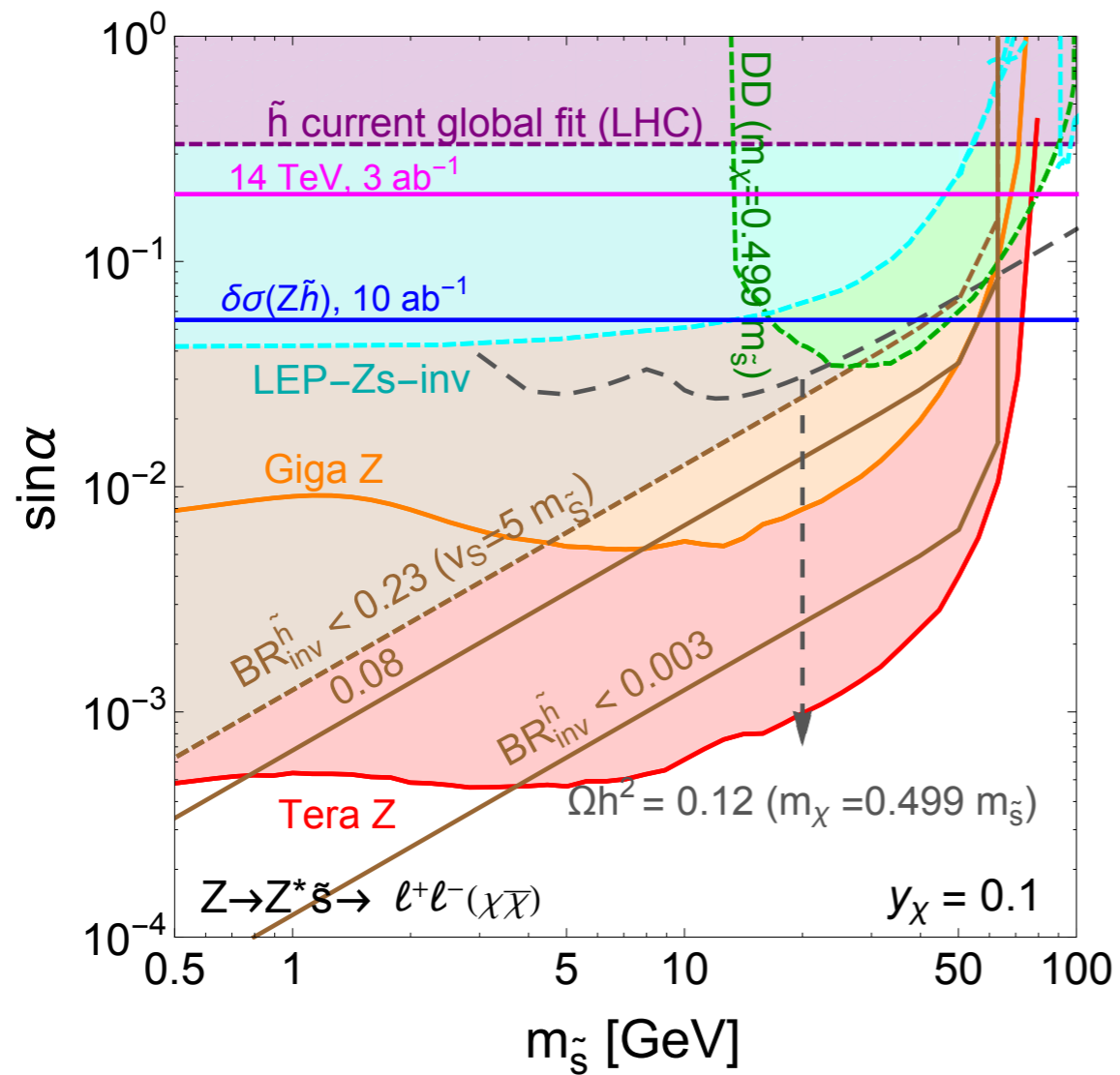
LHC 15年后可以达到的精度



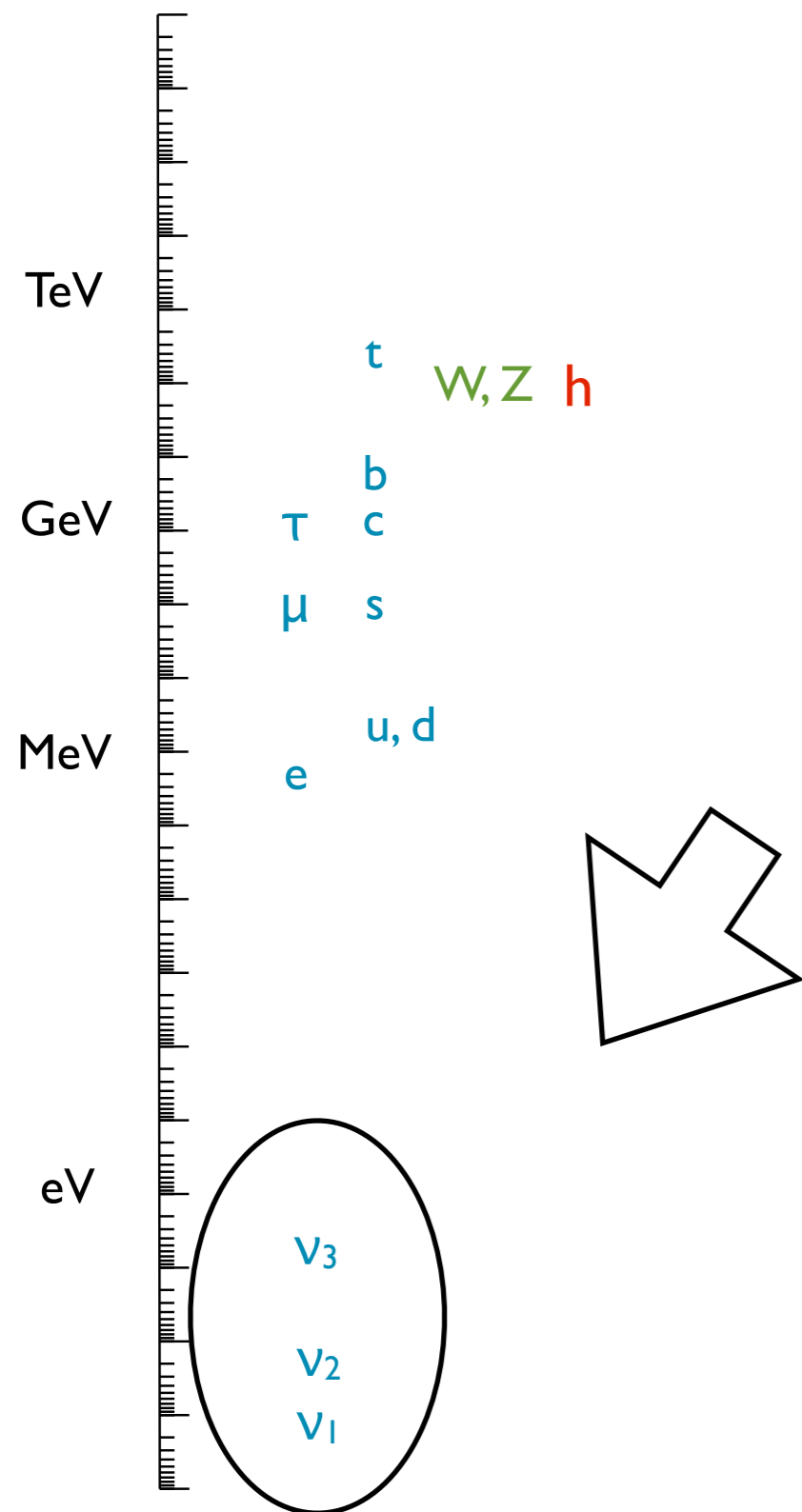
CEPC将精度提高10倍



10¹² Z玻色子，探测暗物质



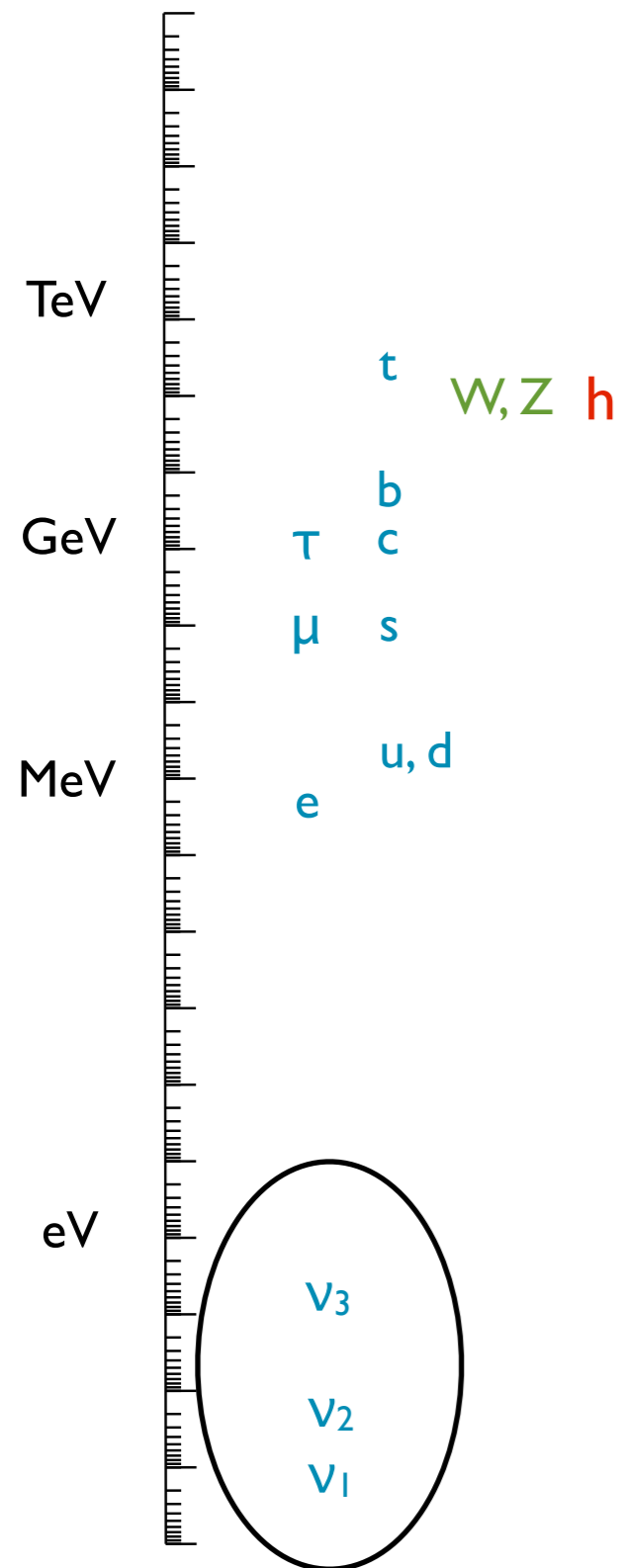
中微子质量的起源



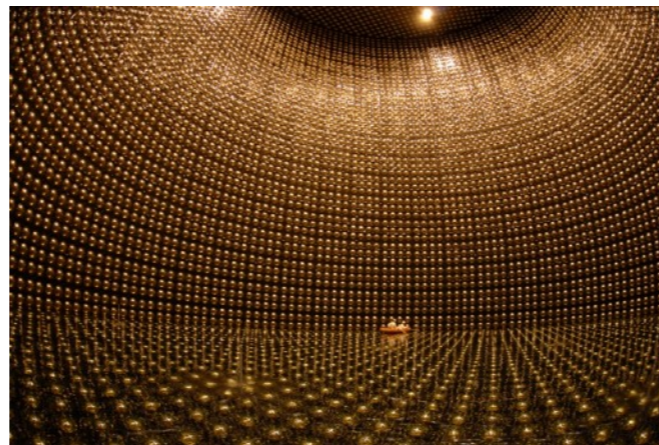
中微子远远轻于其它基本粒子
相互作用微弱
质量起源的机制可能有本质不同

中微子质量的起源

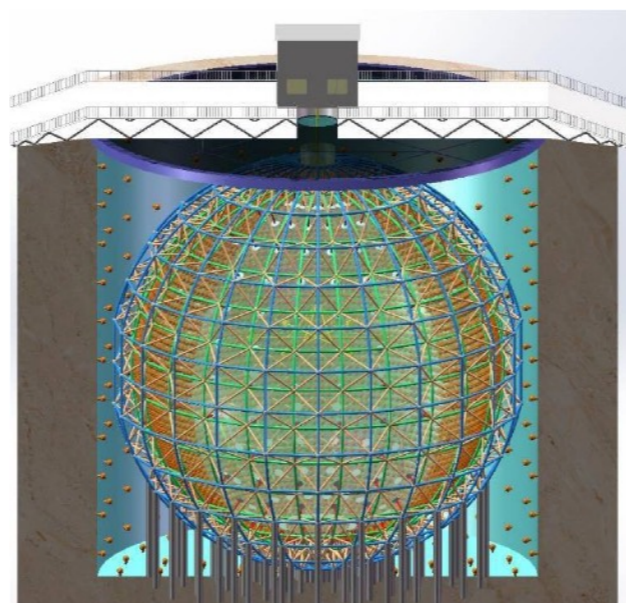
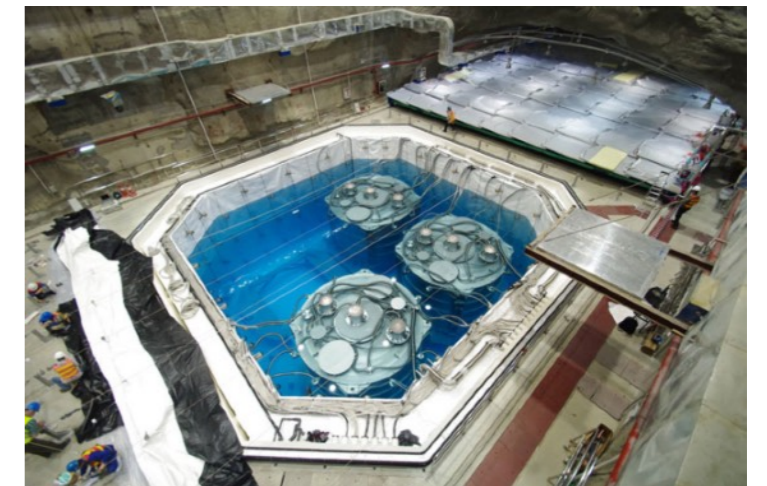
中微子性质是国际粒子物理学界中心议题之一



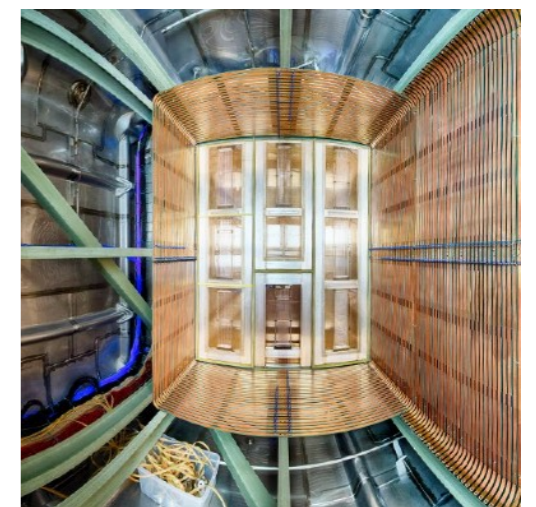
超级神冈, 日本



大亚湾, 中国



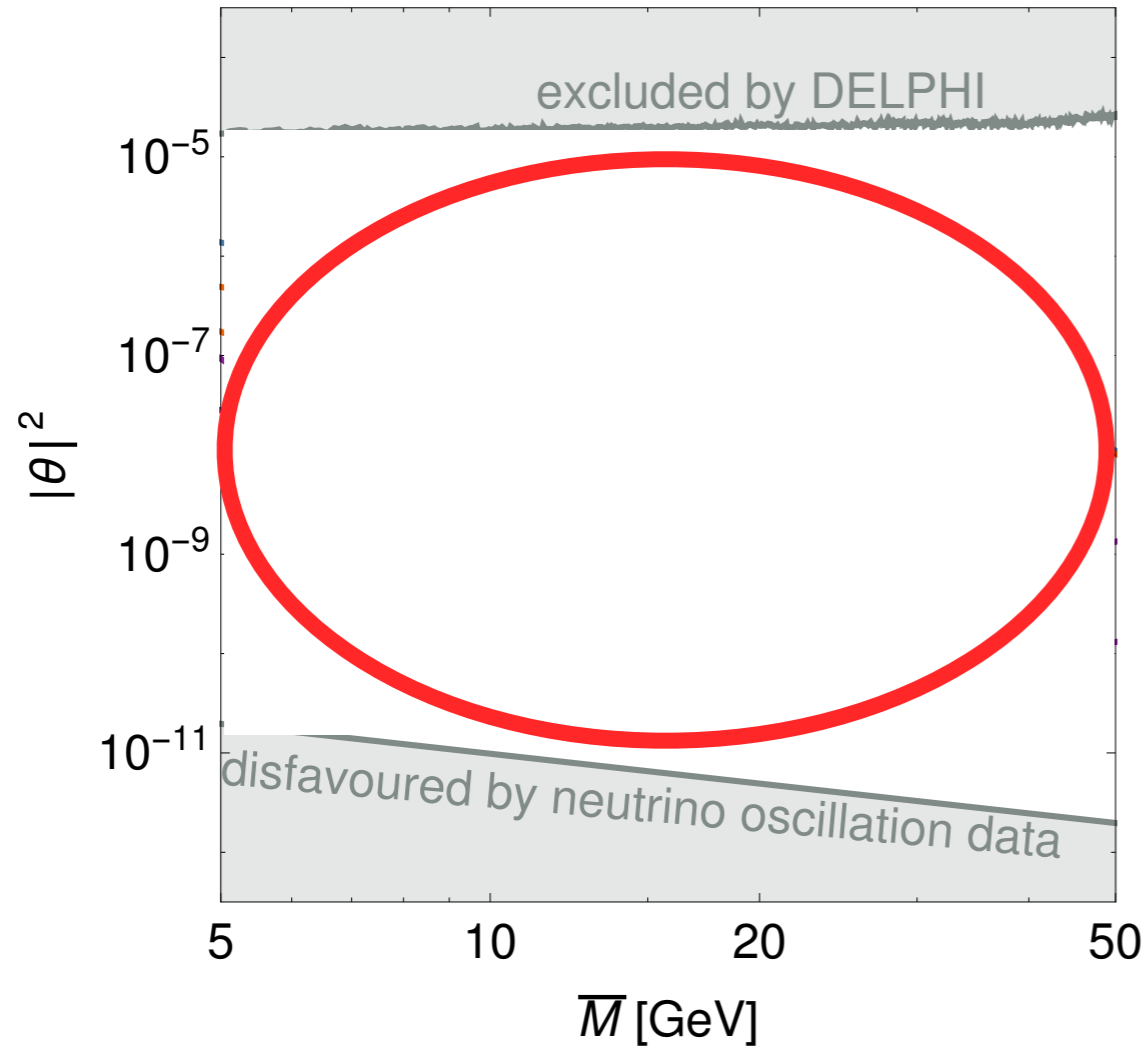
江门, 中国



DUNE, 美国

探索中微子质量的起源

Inverted Ordering

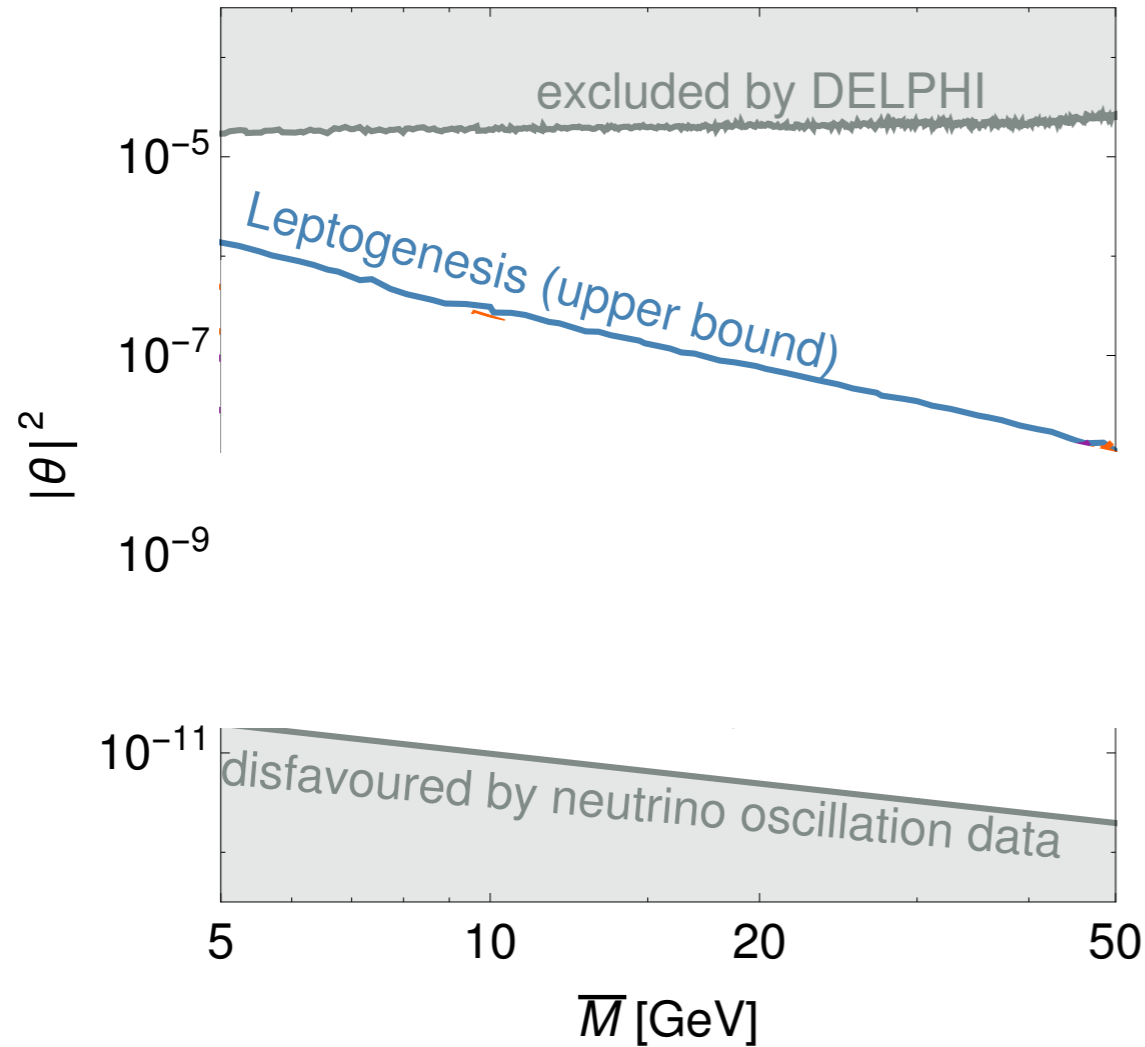


这里的模型可以
给出中微子质量的
满意解释

See-Saw 模型

探索中微子质量的起源

Inverted Ordering

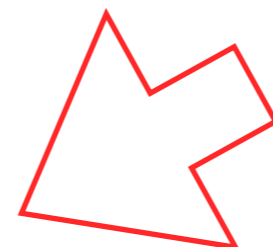
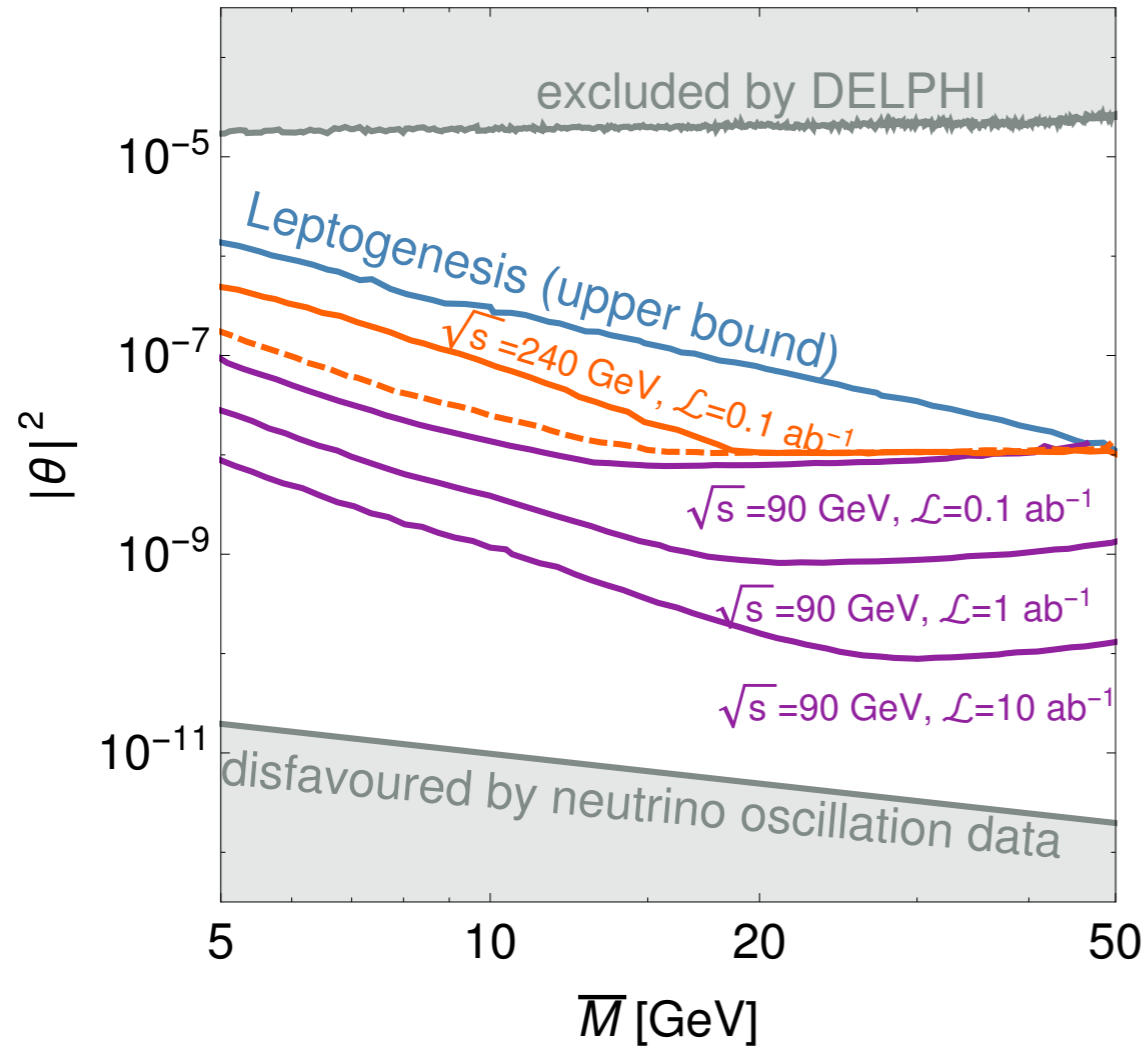


对宇宙物质和反物质的非对称性可以给出解释

See-Saw 模型

探索中微子质量的起源

Inverted Ordering



CEPC 可以对这些模型
进行全面探索

See-Saw 模型

其它正负电子对撞机的提议

International Linear Collider (ILC), 国际直线对撞机。日本

ILC 15 年 (2030年开始) :

0.6×10^6 希格斯粒子, 没有专门 Z和W玻色子的运行方案

如果再加10 年, 升级到更高能量 500 GeV:

再产生 1.2×10^6 希格斯粒子,

产生 10^6 顶夸克对

CEPC 10年 (2030年开始) :

10^6 希格斯粒子, 10^{12} Z玻色子, 10^7 W玻色子

其它正负电子对撞机的提议

Future Circular Collider (FCC-ee)
未来环形对撞机 (正负电子), 欧洲核子中心

FCC-ee 14 年 (2039 年开始):
 1.3×10^6 希格斯粒子, 10^{13} Z玻色子, 3×10^7 W玻色子
 10^6 顶夸克对

CEPC 10年 (2030年开始):
 10^6 希格斯粒子, 10^{12} Z玻色子, 10^7 W玻色子

FCC-ee 开始的时候, CEPC已完成其基本物理目标。
可以进行进一步升级: 提高到顶夸克对的能量, 质子对撞机

总结

- 希格斯粒子的发现是基本粒子物理学一个新时代的开端，超越标准模型是主题
 - ▶ 一系列重大问题有待解决。
- CEPC将是这个探索征程的重要一步。
 - ▶ 在大型强子对撞机的基础上将精度提高10到100倍。
- CEPC可以在一系列粒子物理的中心问题上取得重大进展：质量问题，宇宙早期电弱相变，暗物质，中微子，等等。
- 和其它正负电子对撞机的提议相比，在时间以及物理能力上有优势。

extra

Probing NP with precision measurements

- Lepton colliders: ILC, FCC-ee, CEPC, CLIC

clean environment, good for precision.

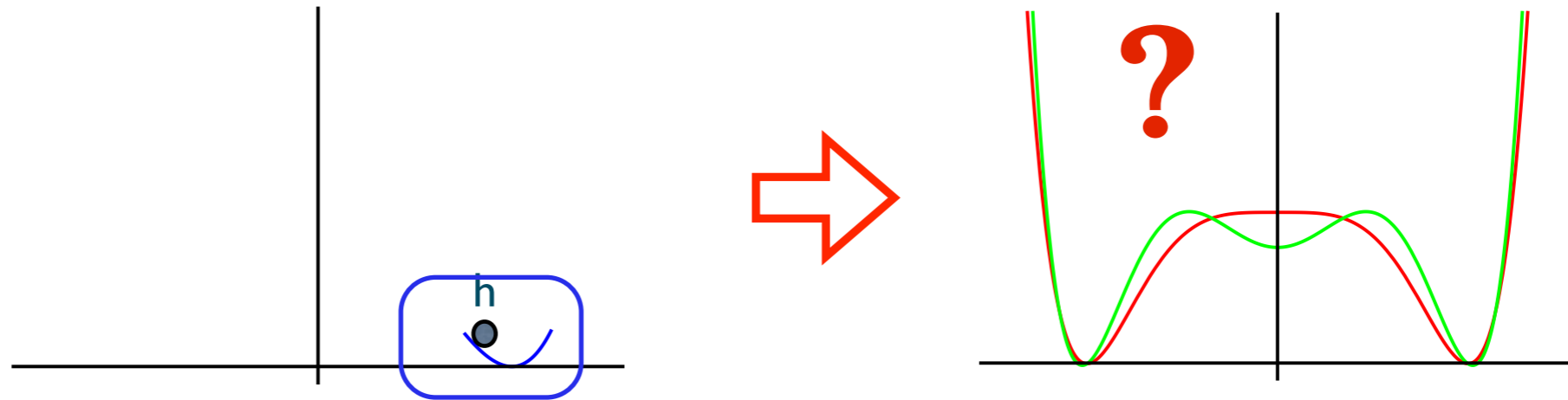
- We are going after deviations of the form

$$\delta \simeq c \frac{v^2}{M_{\text{NP}}^2}$$

M_{NP} : mass of new physics
 c : $\mathcal{O}(1)$ coefficient

- Take for example the Higgs coupling.
 - ▶ LHC precision: 5-10% \Rightarrow sensitive to $M_{\text{NP}} < \text{TeV}$
 - ▶ However, $M_{\text{NP}} < \text{TeV}$ largely excluded by direct NP searches at the LHC.
 - ▶ To go beyond the LHC, need 1% or less precision.

Nature of EW phase transition

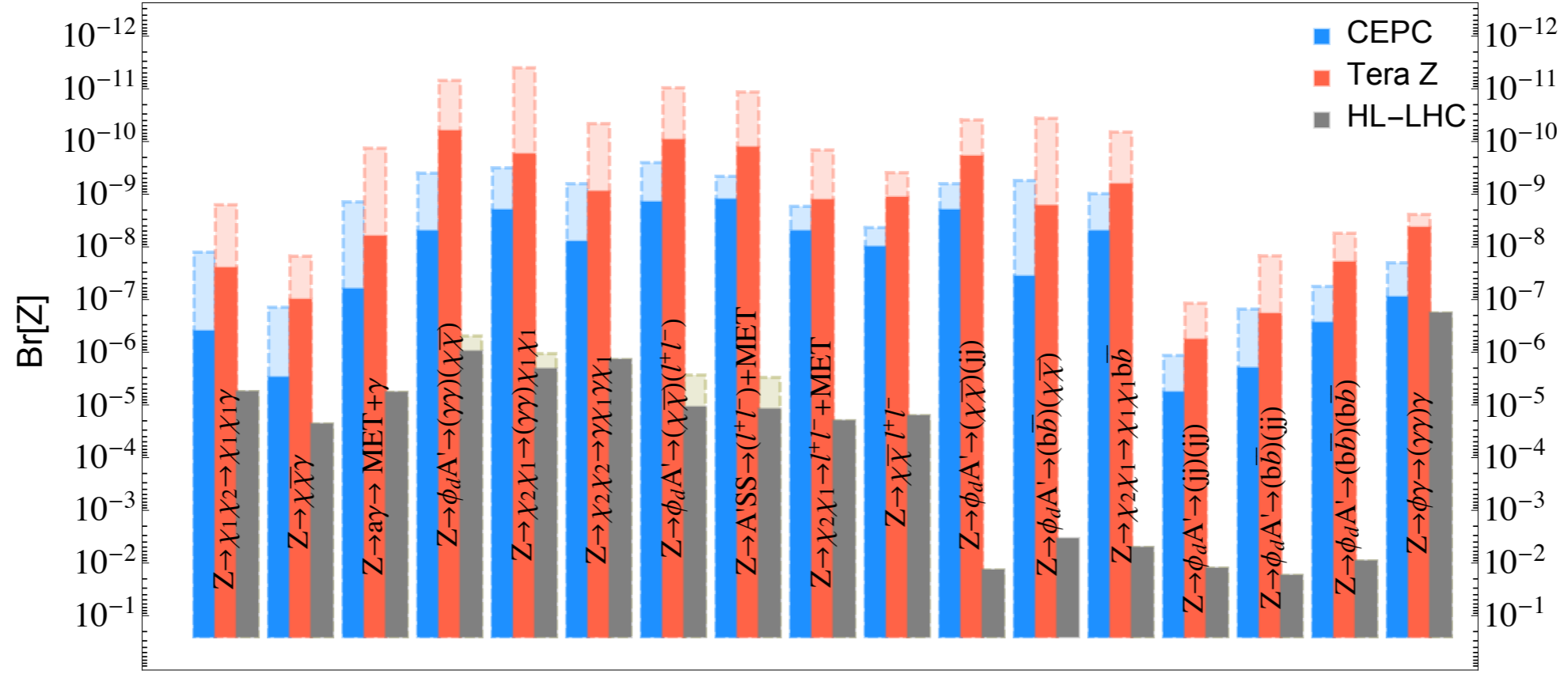


What we know from LHC
LHC upgrades won't go much further

“wiggles” in Higgs potential

Big difference in triple Higgs coupling

Z玻色子



概念设计报告

CEPC

Conceptual Design Report

Volume II - Physics & Detector

The CEPC Study Group

Fall 2018

CONTENTS

Acknowledgments	iii
1 Introduction	1
1.1 The CEPC-SPPC Study Group and the CDR	1
1.2 The Case for the CEPC-SppC in China	1
1.3 The Science in the CDR	1
1.4 The Accelerator and the Experiment	1
2 Overview of the Physics Case for CEPC-SppC	3
2.1 CEPC: Precision Frontier	3
2.2 Higgs and Electroweak Symmetry Breaking	6
2.2.1 Naturalness	6
2.2.2 Understanding the nature of electroweak phase transition	14
2.3 Exploring new physics	22
2.3.1 Higgs Exotic Decays	23
2.3.2 Exotic Z decay	25
2.3.3 Dark matter and hidden sectors	28
2.3.4 Neutrino Connection	41
2.4 QCD precision measurement	51
2.4.1 Precision α_s determination	51
2.4.2 Jets rates at CEPC	52
2.4.3 Non-global logarithms	53
2.4.4 QCD event shapes and light quark Yukawa coupling	54