

A complex visualization of particle tracks, likely from a particle detector. The tracks are represented by numerous thin, multi-colored lines (blue, green, yellow, orange, red, purple) that originate from a central point and radiate outwards in various directions. Some tracks are straight, while others are curved or branched. The tracks are overlaid on a background of small, multi-colored dots, suggesting a detector's hit pattern or a simulation of particle interactions.

对话上帝粒子：粒子世界的 未解之谜和未来对撞机

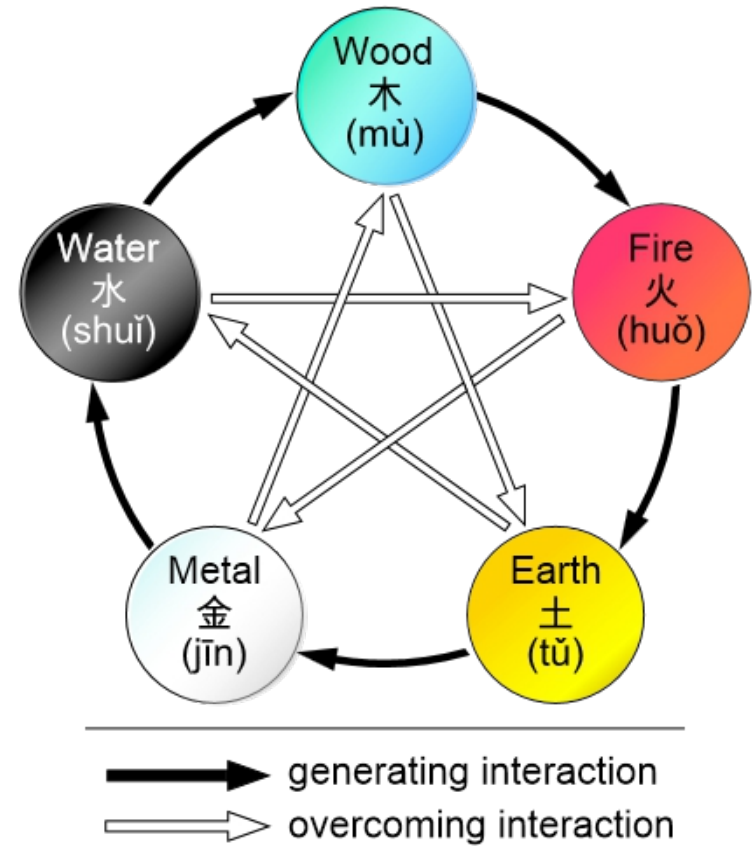
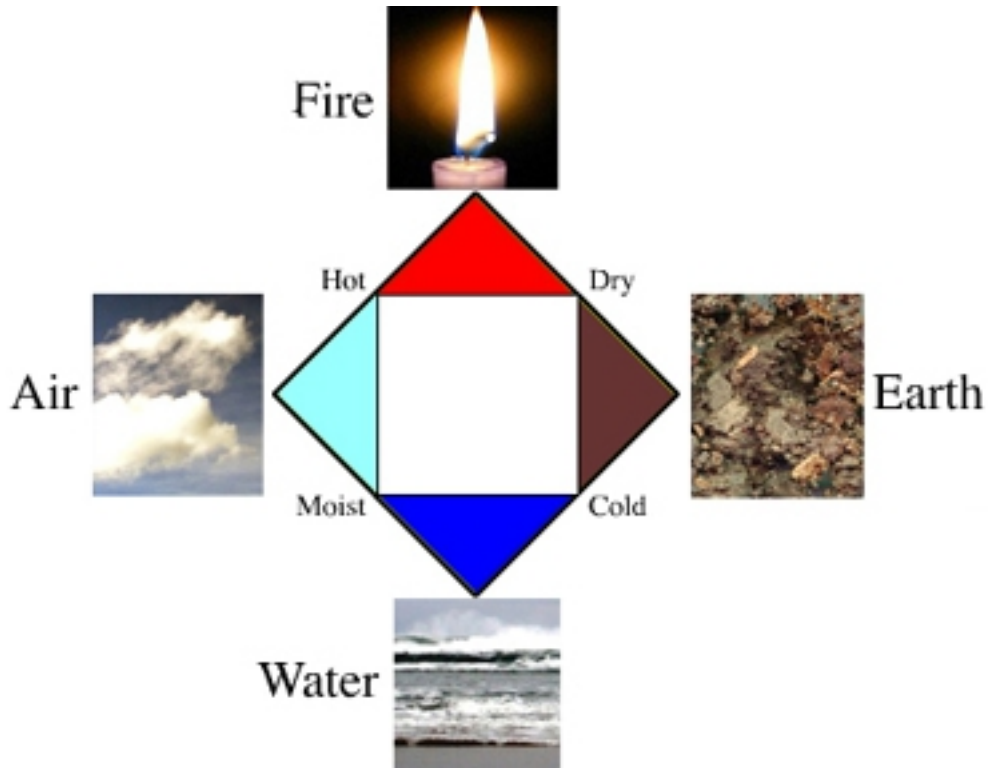
阮曼奇



世界是由什么组成的？

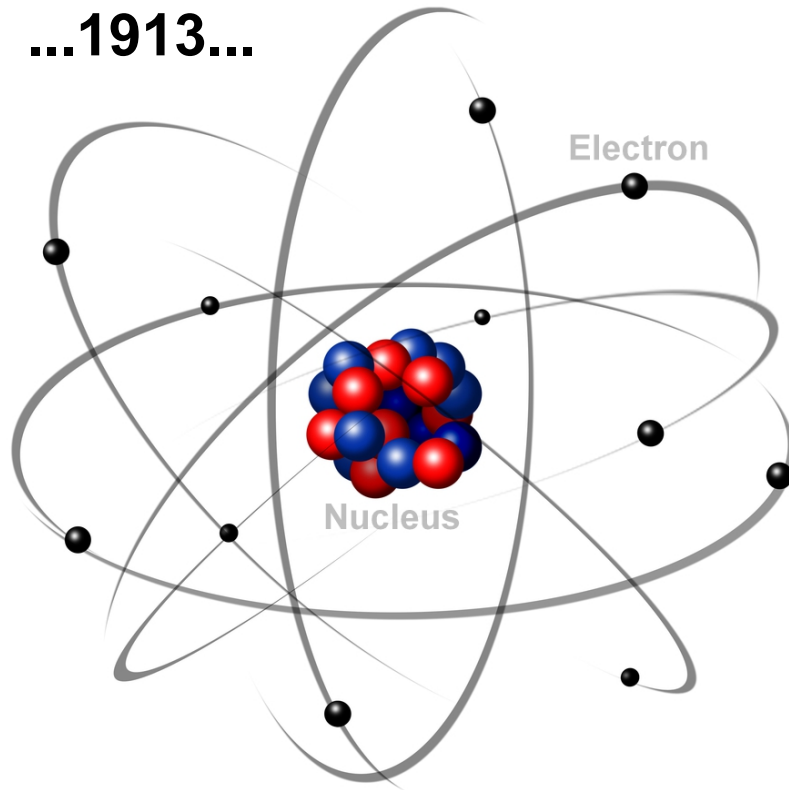
世界是怎样运行的？

~ 3000 年前

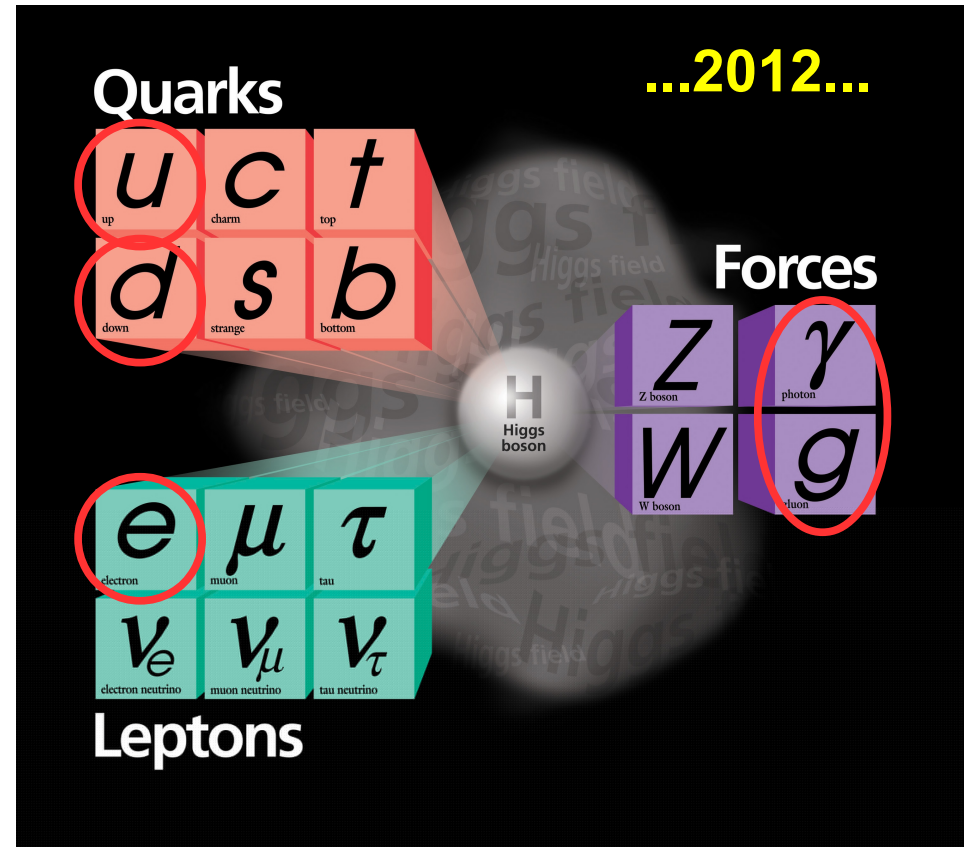


~100 年前 - 今天

...1913...



...2012...



自 50 年代以来，一门新的学科 - 粒子物理从原子物理、核物理中独立出来，并蓬勃发展，取得了瞩目的成就（~ 1/3 的物理学诺奖）

标准模型无法解释的谜团

- 暴涨
- 质量等级
- 中微子质量
- 物质 - 反物质不对称
- 宇宙稳定性：取决于粒子质量
- 暗物质、暗能量：其本质及其质量来源
- ...

标准模型无法解释的谜团

- ... 但是，有线索！ ...
- 暴涨
- 质量等级
- 中微子质量
- 物质 - 反物质不对称
- 宇宙稳定性：取决于粒子质量
- 暗物质、暗能量：其本质及其质量来源

Higgs 场：质量之源，标准模型的核心

规范相互作用：
弱，电，强。

Higgs
粒子
参与的
相互作用

分饰多角的 Higgs

- *Higgs* 场所参与的，是不同于四大相互作用的新相互作用。。。
- 决定了电子的质量和原子的大小
- 决定了真空是否稳定！
 - 决定了顶夸克的质量
 - 决定了 **Higgs** 粒子本身的质量
- 参决定了质子和中子的质量差，保证质子稳定性
- 决定了 **W, Z** 粒子的质量，决定了弱相互作用的力程并影响了其强度
- 通过和物质 / 反物质的不同耦合：物质产生的前提条件
- ...
- 是否是暗物质的质量之源？
- 是否和暗能量、暴涨有深刻的关联？



Higgs

An iceberg floating in a blue ocean under a blue sky with light clouds. The tip of the iceberg is visible above the water, while the much larger, submerged part is visible below the surface. The text is overlaid on this image.

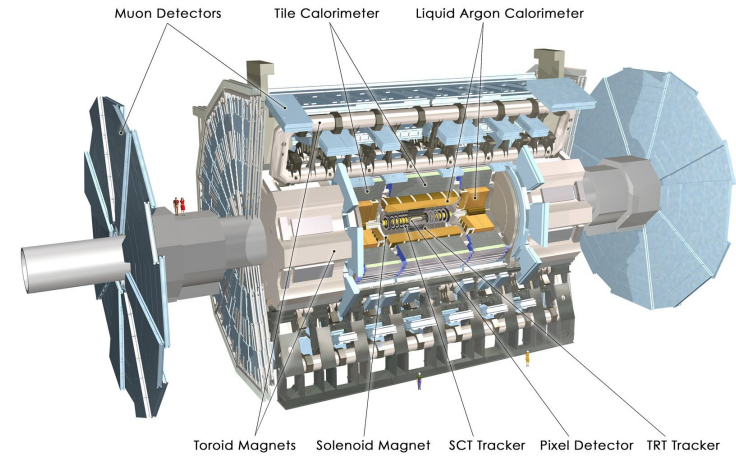
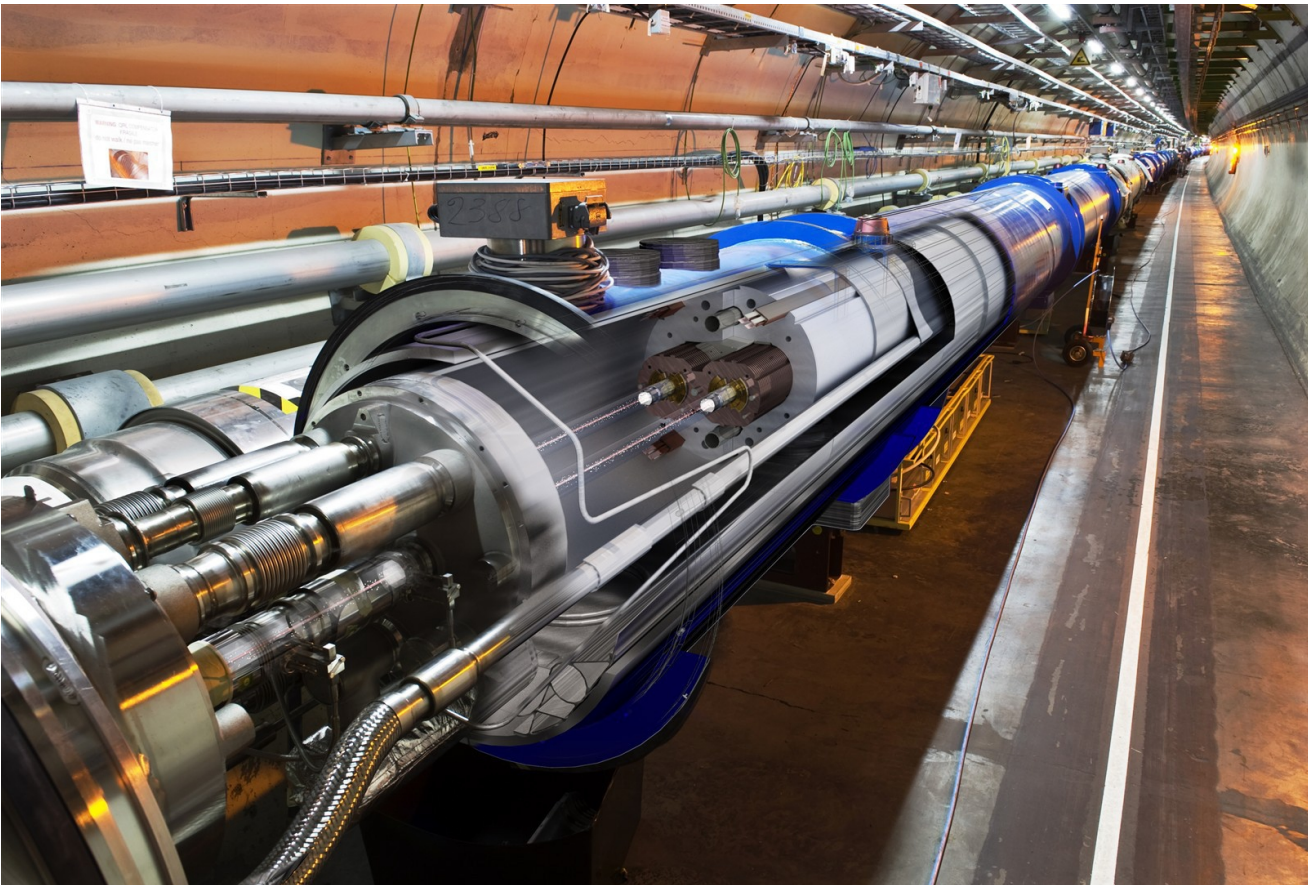
- 唯一的标量粒子
- 同标准模型的绝大部分自由参数和理论疑难相关
- 决定了不同于四大相互作用的基本相互作用
- 决定了宇宙的面貌和宇宙的命运
- ...
- 可能同宇宙极早期的演化行为相关

标准模型的核心，研究未知的窗口

为什么这么能干？本质是什么？

我们需要 Higgs 工厂！

Higgs 工厂: LHC



CMS DETECTOR

Total weight : 14,000 tonnes
 Overall diameter : 15.0 m
 Overall length : 28.7 m
 Magnetic field : 3.8 T

STEEL RETURN YOKE
 12,500 tonnes

SILICON TRACKERS
 Pixel (100x150 μm) ~16m² ~66M channels
 Microstrips (80x180 μm) ~200m² ~9.6M channels

SUPERCONDUCTING SOLENOID
 Niobium titanium coil carrying ~18,000A

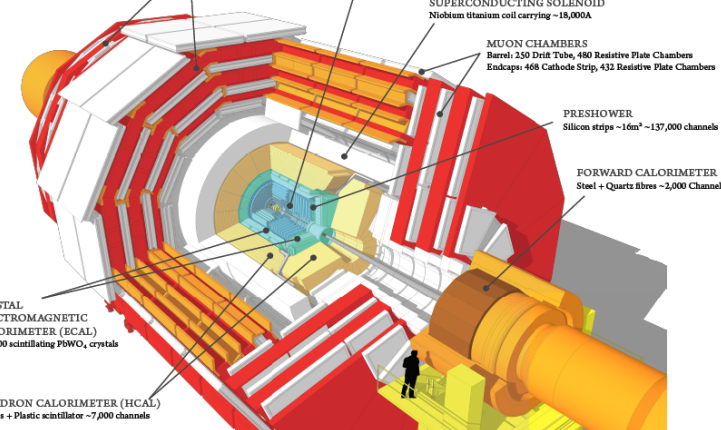
MUON CHAMBERS
 Barrel: 250 Drift Tubes, 480 Resistive Plate Chambers
 Endcaps: 468 Cathode Strip, 432 Resistive Plate Chambers

FRESHOWER
 Silicon strips ~16m² ~137,000 channels

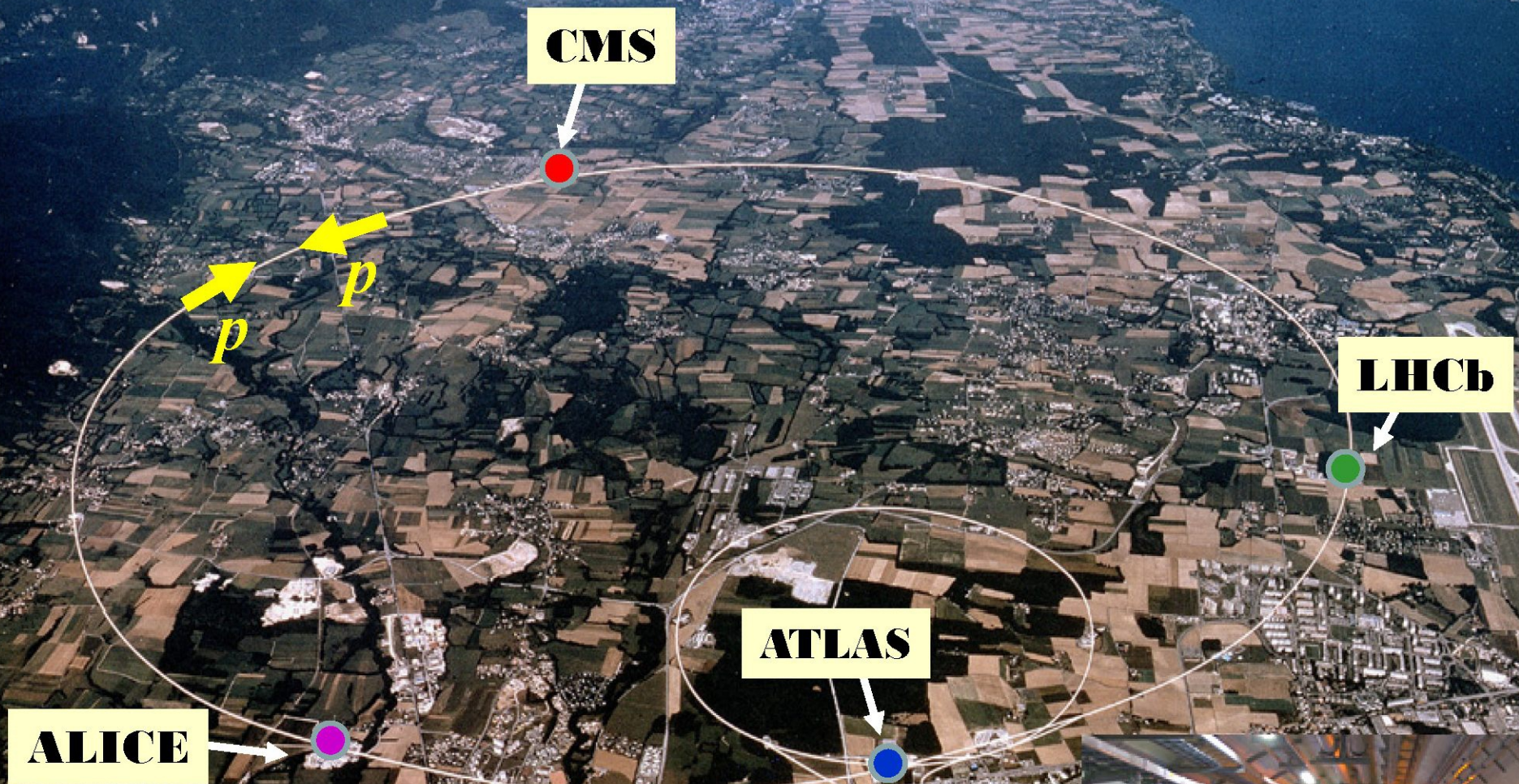
FORWARD CALORIMETER
 Steel + Quartz fibres ~2,000 Channels

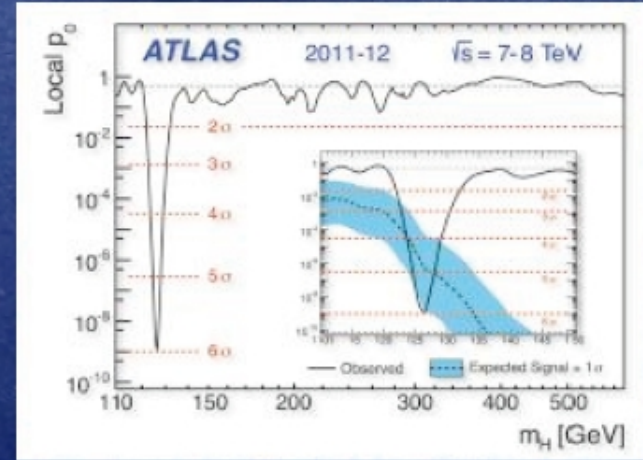
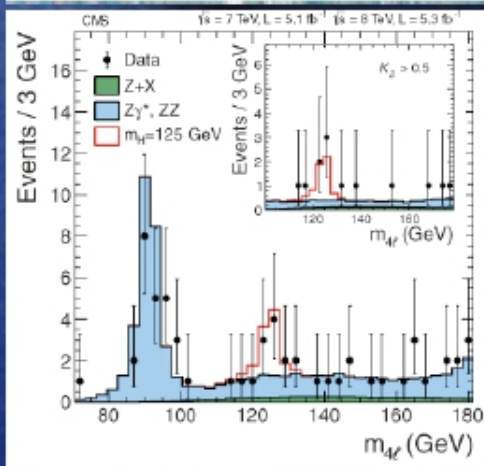
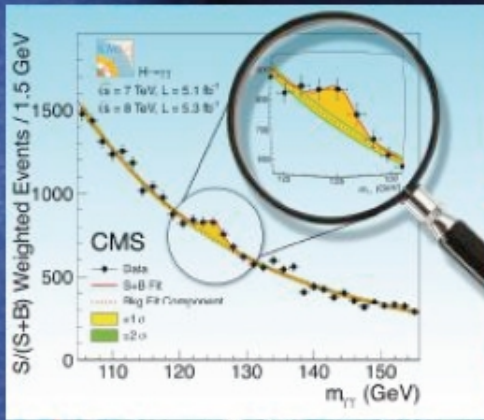
CRYSTAL ELECTROMAGNETIC CALORIMETER (ECAL)
 ~76,000 scintillating PbWO₄ crystals

HADRON CALORIMETER (HCAL)
 Brass + Plastic scintillator ~7,000 channels

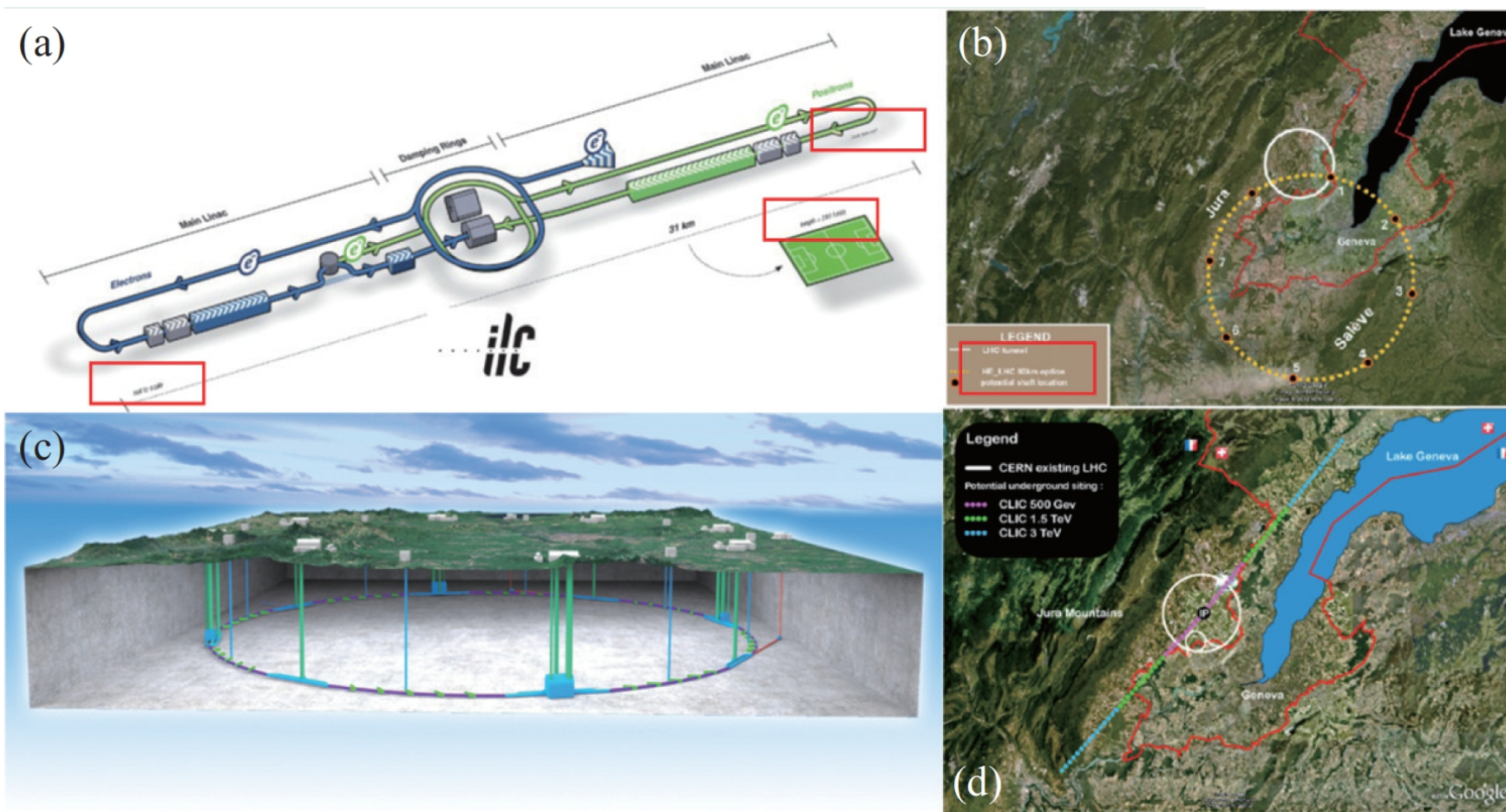


Large Hadron Collider





四个主要的正负电子 Higgs 工厂



- ILC (a): 2013 年完成技术设计报告 (TDR ~ 蓝图)
- FCC (b): 2019 年完成概念设计报告 (CDR ~ 初步设计蓝图)
- CEPC (c): 2018 年完成概念设计报告
- CLIC (d): 2013 年完成概念设计报告

Science at CEPC-SPPC

- Tunnel ~ **100 km**
- CEPC (90 – 250 GeV)

FERMILAB-CONF-13-037-APC
 IHEP-AC-2013-001
 SLAC-PUB-15370
 CERN-ATS-2013-032
[arXiv:1302.3318](https://arxiv.org/abs/1302.3318)

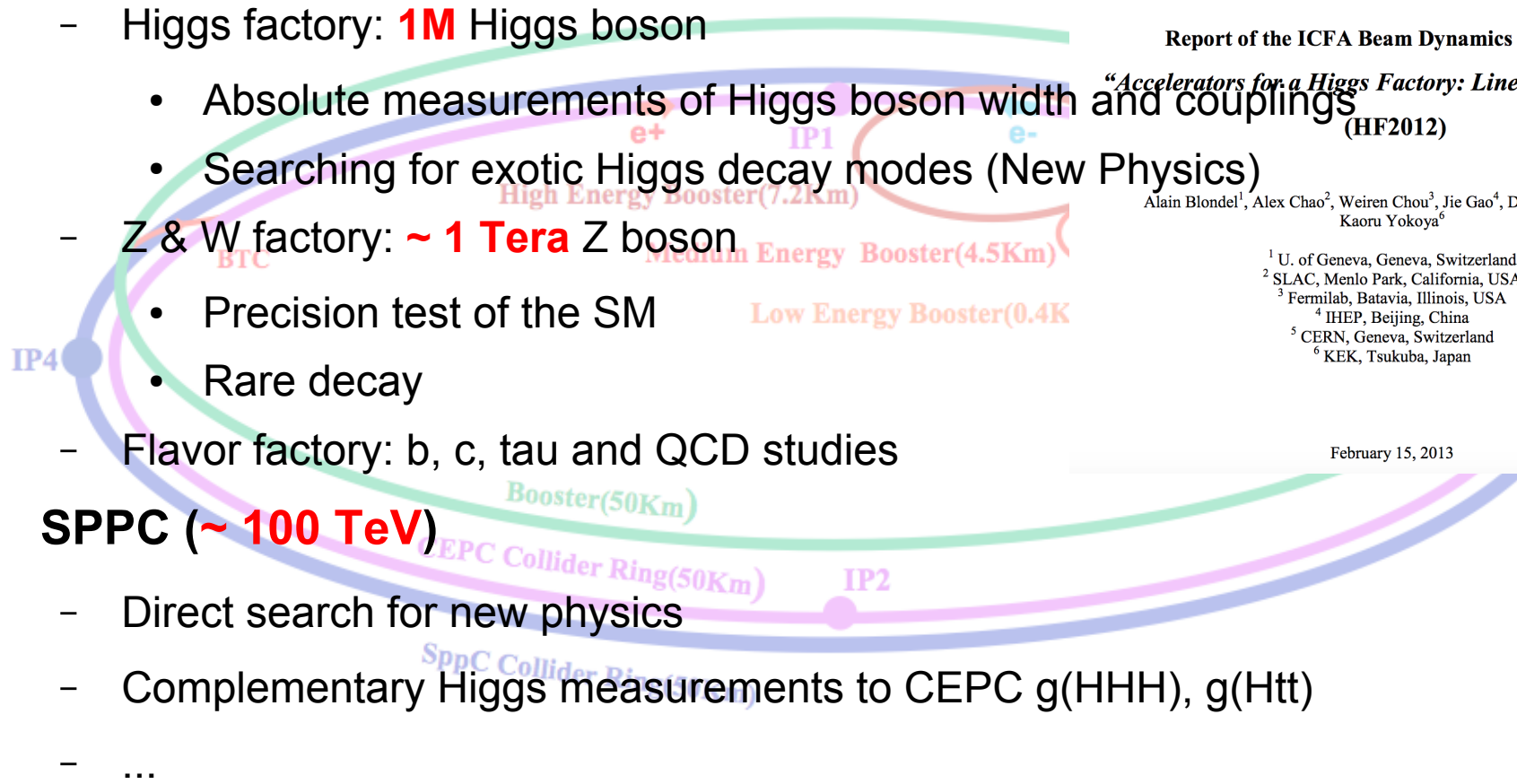
Report of the ICFA Beam Dynamics Workshop

“Accelerators for a Higgs Factory: Linear vs. Circular”
 (HF2012)

Alain Blondel¹, Alex Chao², Weiren Chou³, Jie Gao⁴, Daniel Schulte⁵ and Kaoru Yokoya⁶

- ¹ U. of Geneva, Geneva, Switzerland
- ² SLAC, Menlo Park, California, USA
- ³ Fermilab, Batavia, Illinois, USA
- ⁴ IHEP, Beijing, China
- ⁵ CERN, Geneva, Switzerland
- ⁶ KEK, Tsukuba, Japan

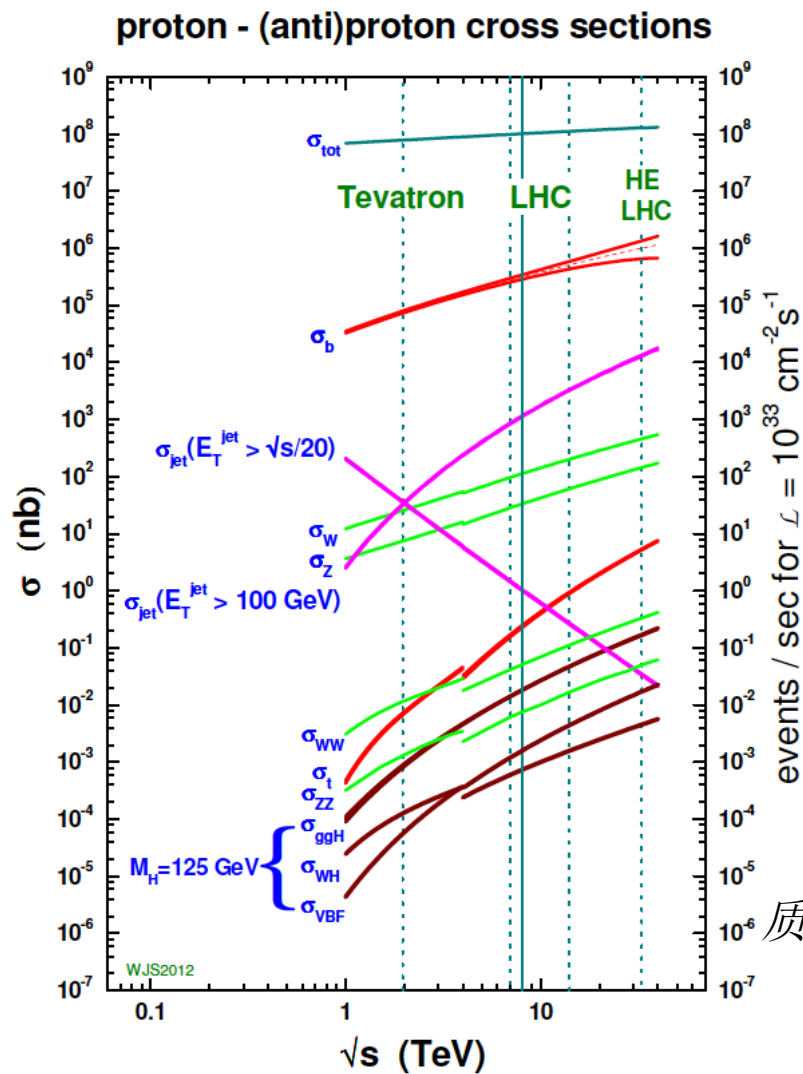
February 15, 2013



- Higgs factory: **1M** Higgs boson
 - Absolute measurements of Higgs boson width and couplings
 - Searching for exotic Higgs decay modes (New Physics)
- Z & W factory: ~ **1 Tera** Z boson
 - Precision test of the SM
 - Rare decay
- Flavor factory: b, c, tau and QCD studies
- SPPC (~ **100 TeV**)
 - Direct search for new physics
 - Complementary Higgs measurements to CEPC $g(\text{HHH})$, $g(\text{Htt})$
 - ...
- Heavy ion, e-p collision...

Complementary

为什么在有了强子对撞机后，还需要一个正负电子 Higgs 工厂？

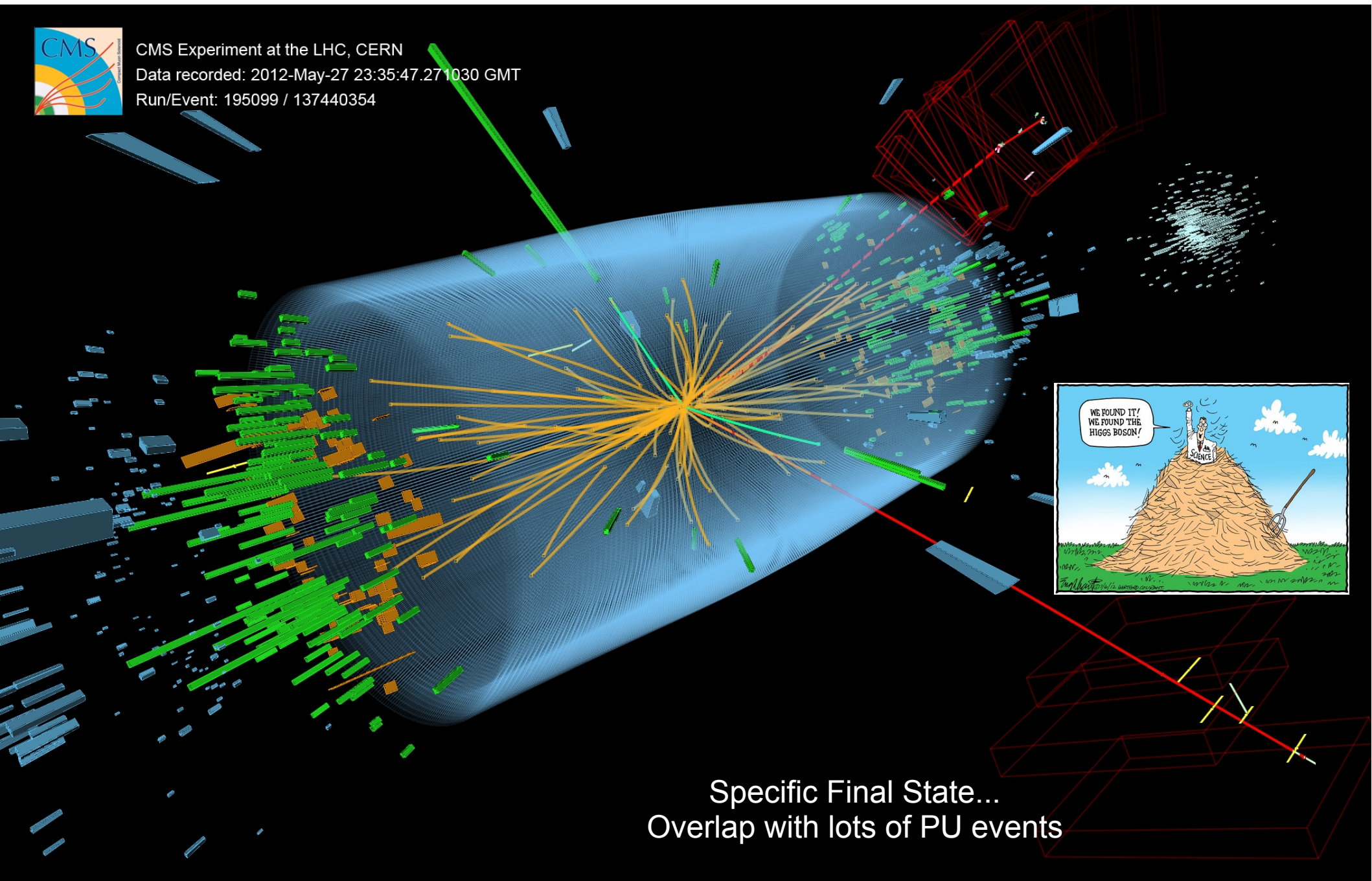


质子对撞机：Higgs 粒子产额很高（LHC 上已产生 100 万 Higgs 粒子），然而探测效率极低，无法实现绝对测量

海量本底：约 100 亿次对撞中产生一个 Higgs 粒子

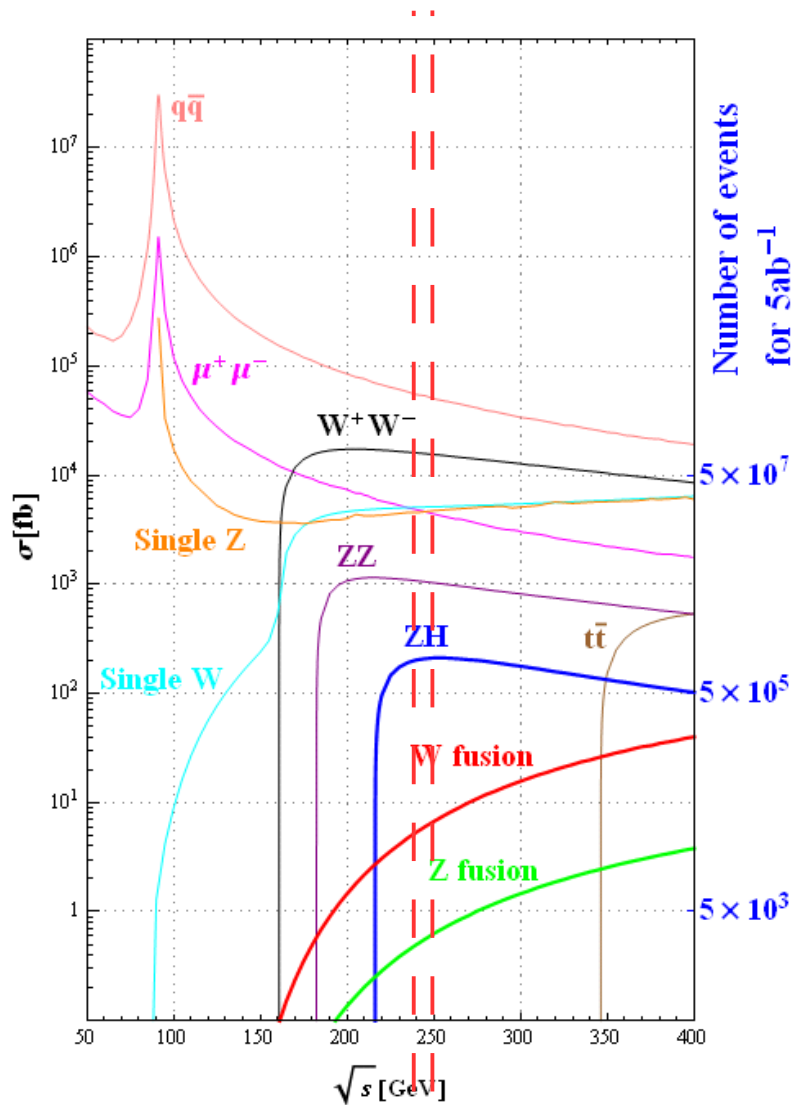


CMS Experiment at the LHC, CERN
Data recorded: 2012-May-27 23:35:47.271030 GMT
Run/Event: 195099 / 137440354



Specific Final State...
Overlap with lots of PU events

Higgs @ CEPC



干净：每 1000 个事例中产生一个 Higgs

主要可观测量：Higgs 粒子的质量、产生截面、衰变产物及衰变分支比

可对 Higgs 粒子进行绝对测量 (直接测量耦合常数)

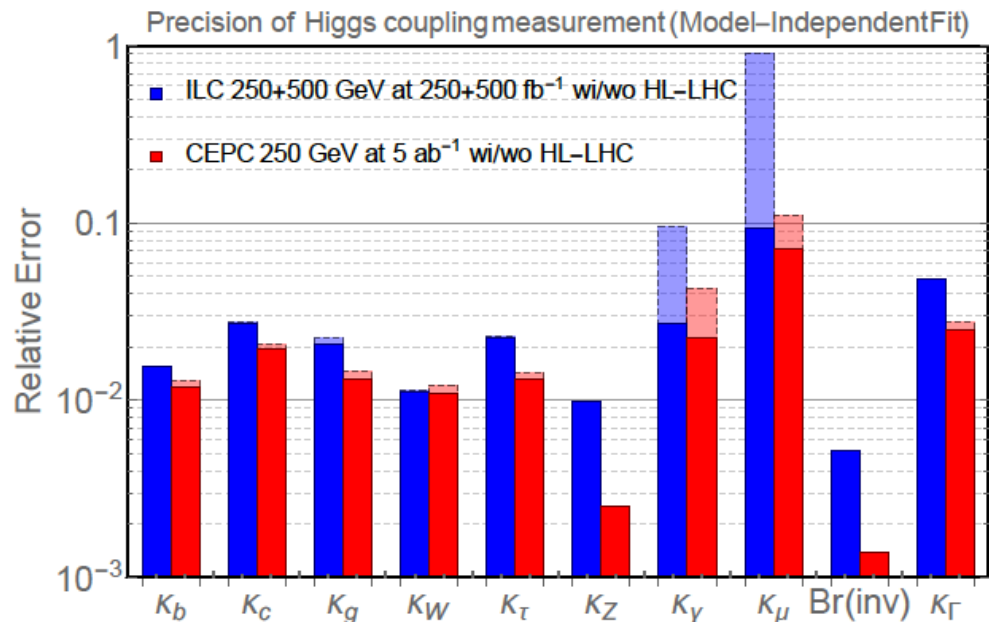
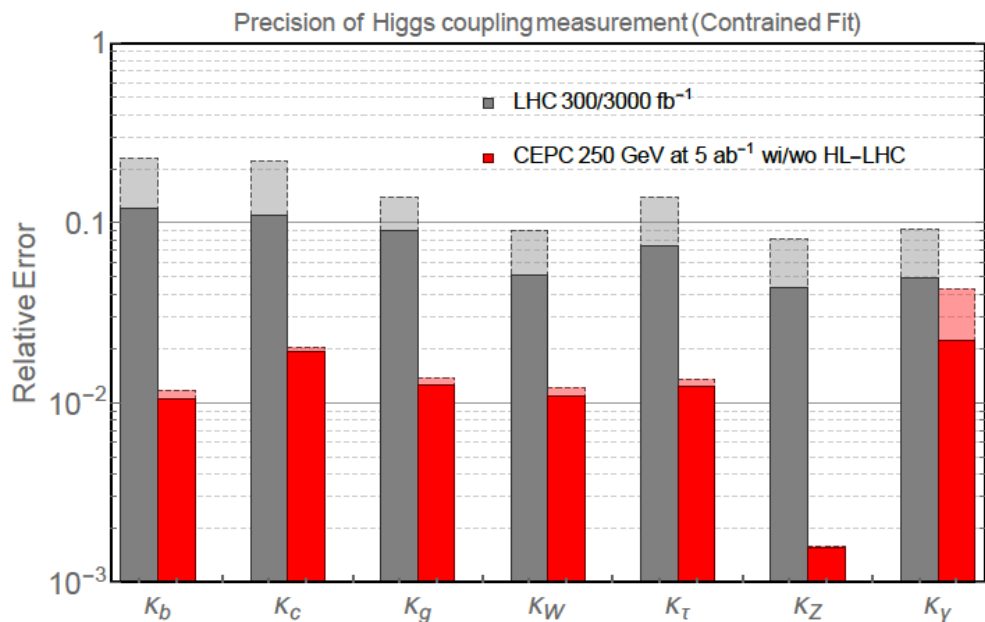
$Z \rightarrow 2 \text{ muon},$
 $H \rightarrow 2 \text{ b}$
 $\sim 2\%$

$Z \rightarrow 2 \text{ jet},$
 $H \rightarrow 2 \text{ tau}$
 $\sim 5\%$

$ZH \rightarrow 4 \text{ jets}$
 $\sim 50\%$

$Z \rightarrow 2 \text{ muon}$
 $H \rightarrow WW^* \rightarrow eevv$
 $\sim 1\%$

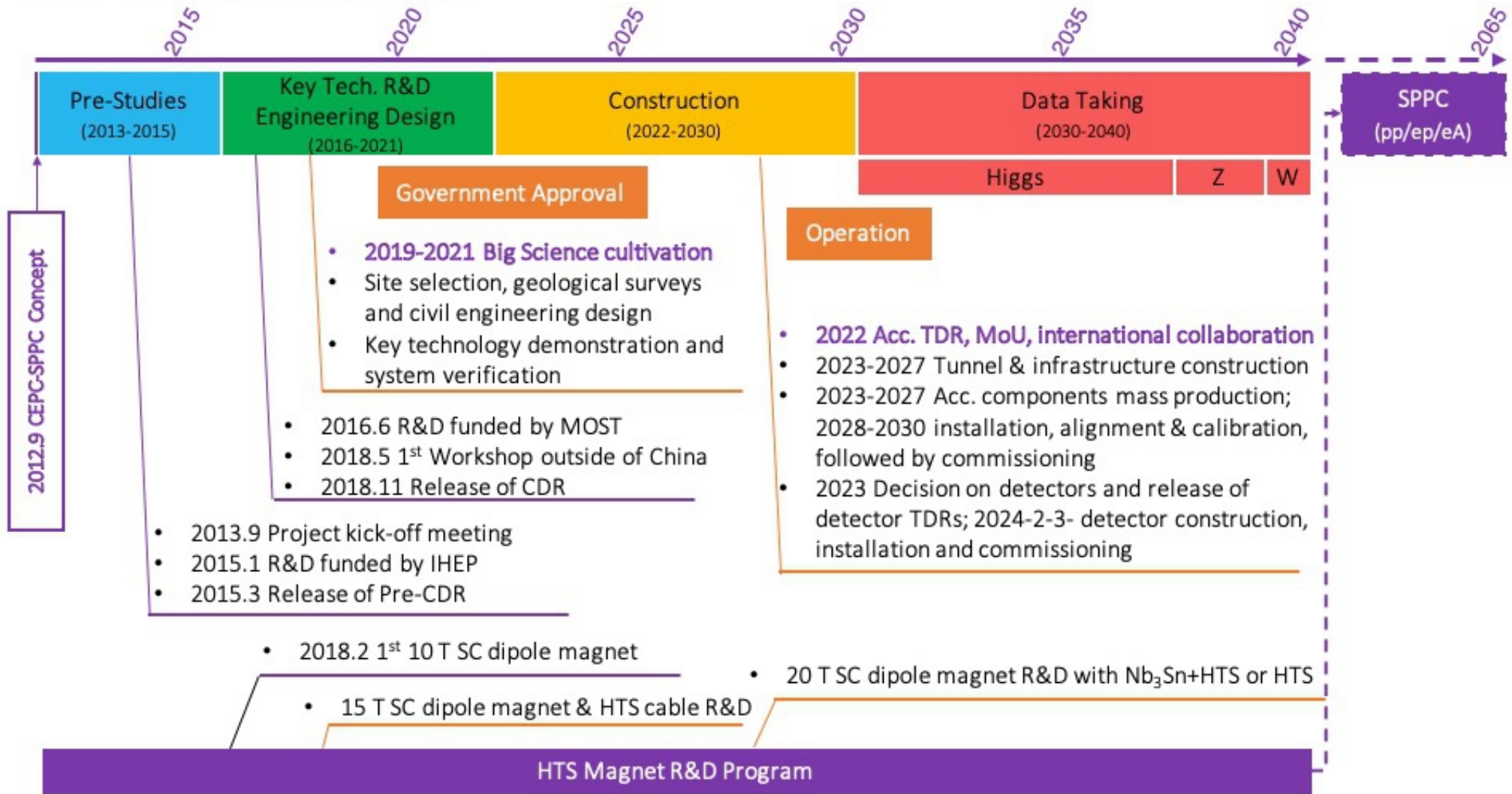
Higgs 粒子的预期测量精度



	产额	探测效率	其他特点
LHC	Run 1: 10^6 Run 2/HL: 10^{7-8}	$\sim \mathcal{O}(10^{-3})$	本底极高，误差较大，无法实现对 Higgs 粒子的绝对测量
CEPC	10^6	$\sim \mathcal{O}(1)$	本底很低，绝对测量，对 Higgs 粒子的测量精度大大超过质子对撞机。 可对 TeV 能区物理进行扫描

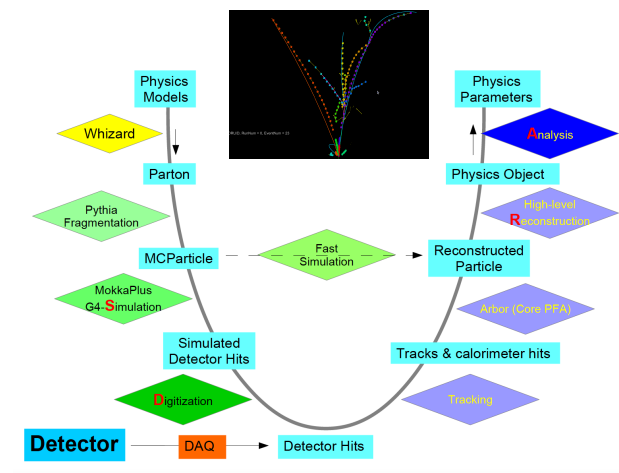
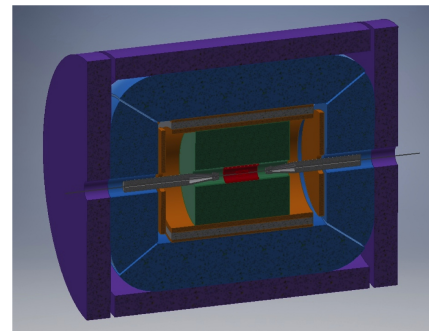
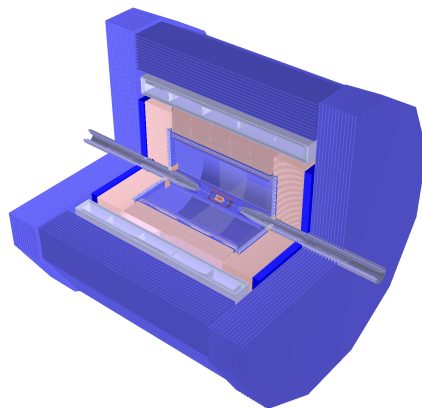
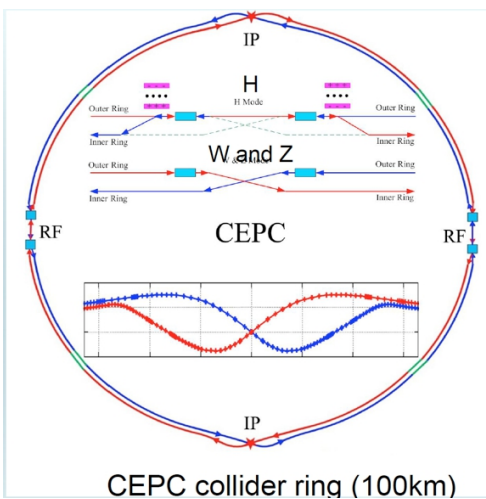
Timeline

CEPC Project Timeline

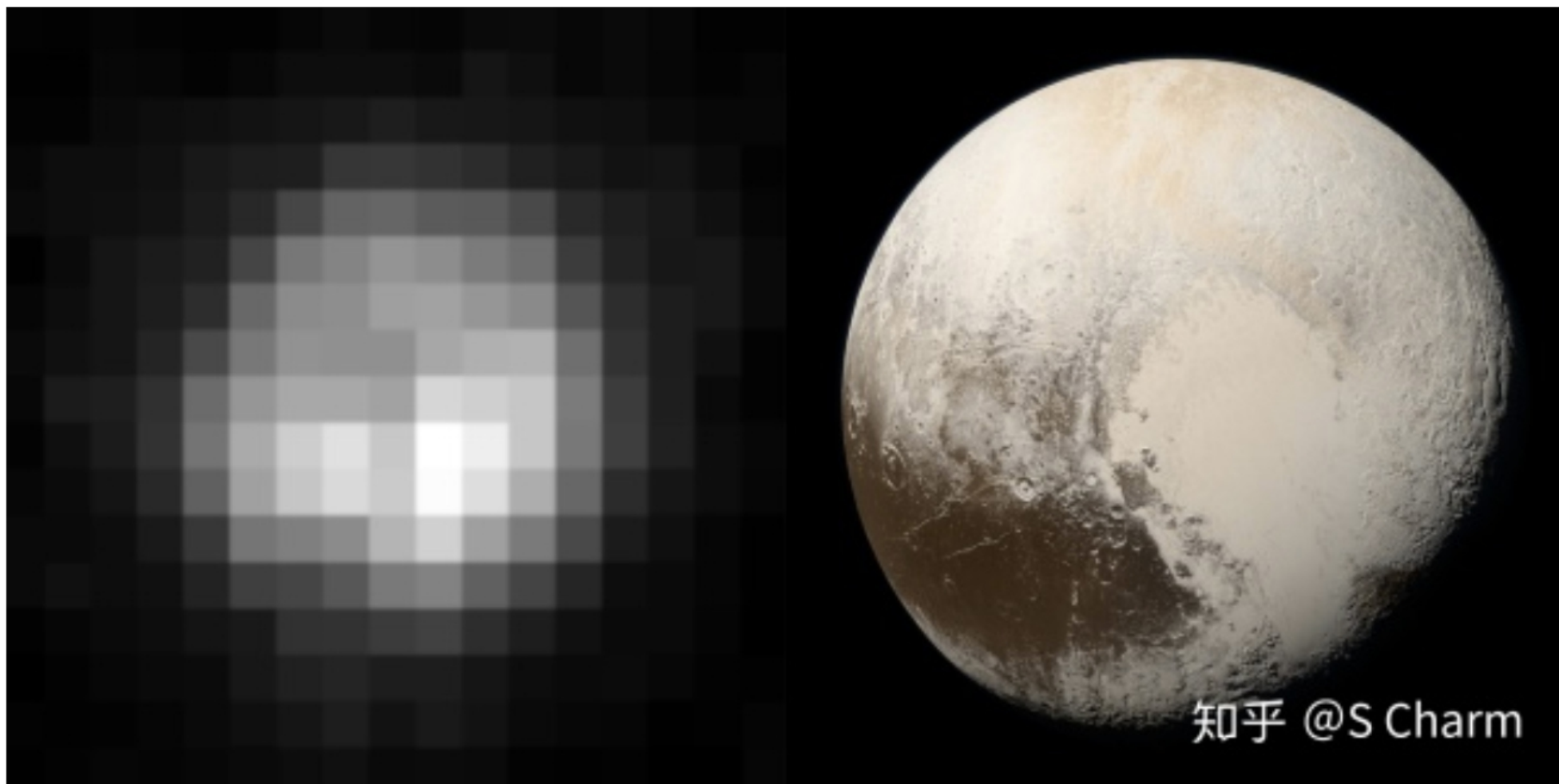


CDR @ 2018

- Baseline Accelerator, Detector, operation scenario
 - 1 Million Higgs boson in 7 years
 - 6E11 Z boson in 2 years
 - WW threshold scan: 1 year (1E7 W bosons)
- Baseline simulation tool:
 - Quantify the physics potential & comparative advantages
 - Guide the design/optimization of the facility & the detector



看得更清晰意味着什么？



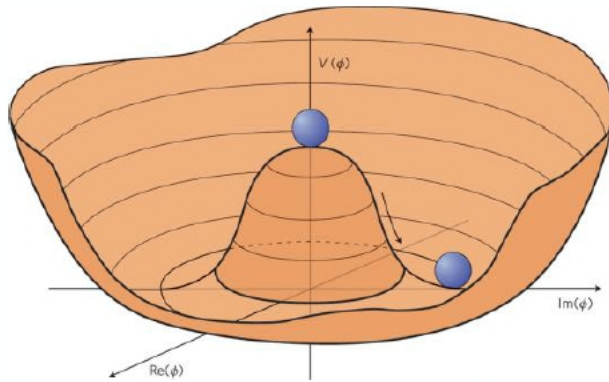
1994年和2018年人类所认知的冥王星的对比图。左图来自哈勃空间望远镜，右图来自新视野号航天器。
(图片来源：NASA)

Higgs 粒子和暗物质

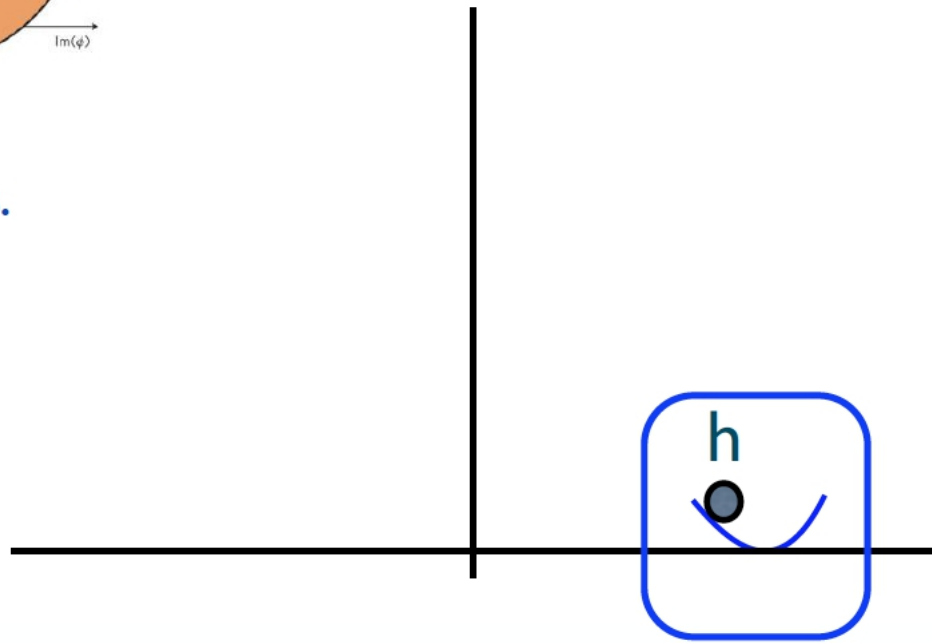
只要有大于千分之一的 Higgs 粒子衰变为不可见粒子 - 暗物质粒子, CEPC 将能够确认这一信号

任意导致 Higgs 粒子衰变行为发生变化的新物理信号 → Higgs 粒子的宽度可被测至 3% 的相对精度

We know very little about the Higgs.



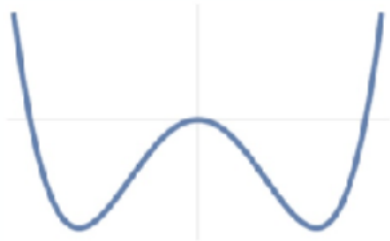
What model says.



What we know now

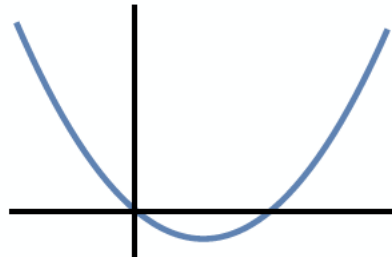
Shape of Higgs Potential

Landau-Ginzburg Higgs



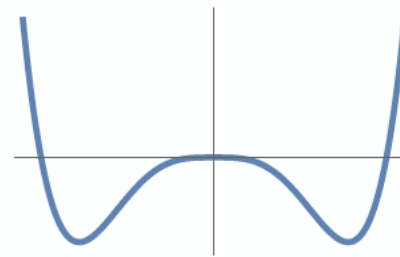
$$V(\phi) = -m^2 \phi^\dagger \phi + \lambda (\phi^\dagger \phi)^2$$

Tadpole-induced Higgs



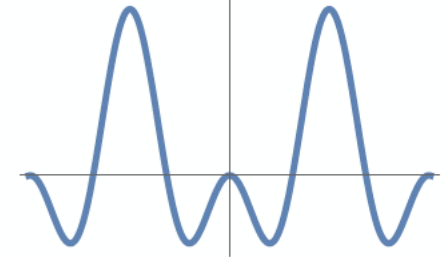
$$V(\phi) = -\mu^3 \sqrt{\phi^\dagger \phi} + m^2 \phi^\dagger \phi$$

Coleman Weinberg Higgs



$$V(\phi) = \lambda (\phi^\dagger \phi)^2 + \epsilon (\phi^\dagger \phi)^2 \log \frac{\phi^\dagger \phi}{\mu^2}$$

Pseudo-Goldstone Higgs



$$V(\phi) = -a \sin^2(\phi/f) + b \sin^4(\phi/f)$$

Fundamental

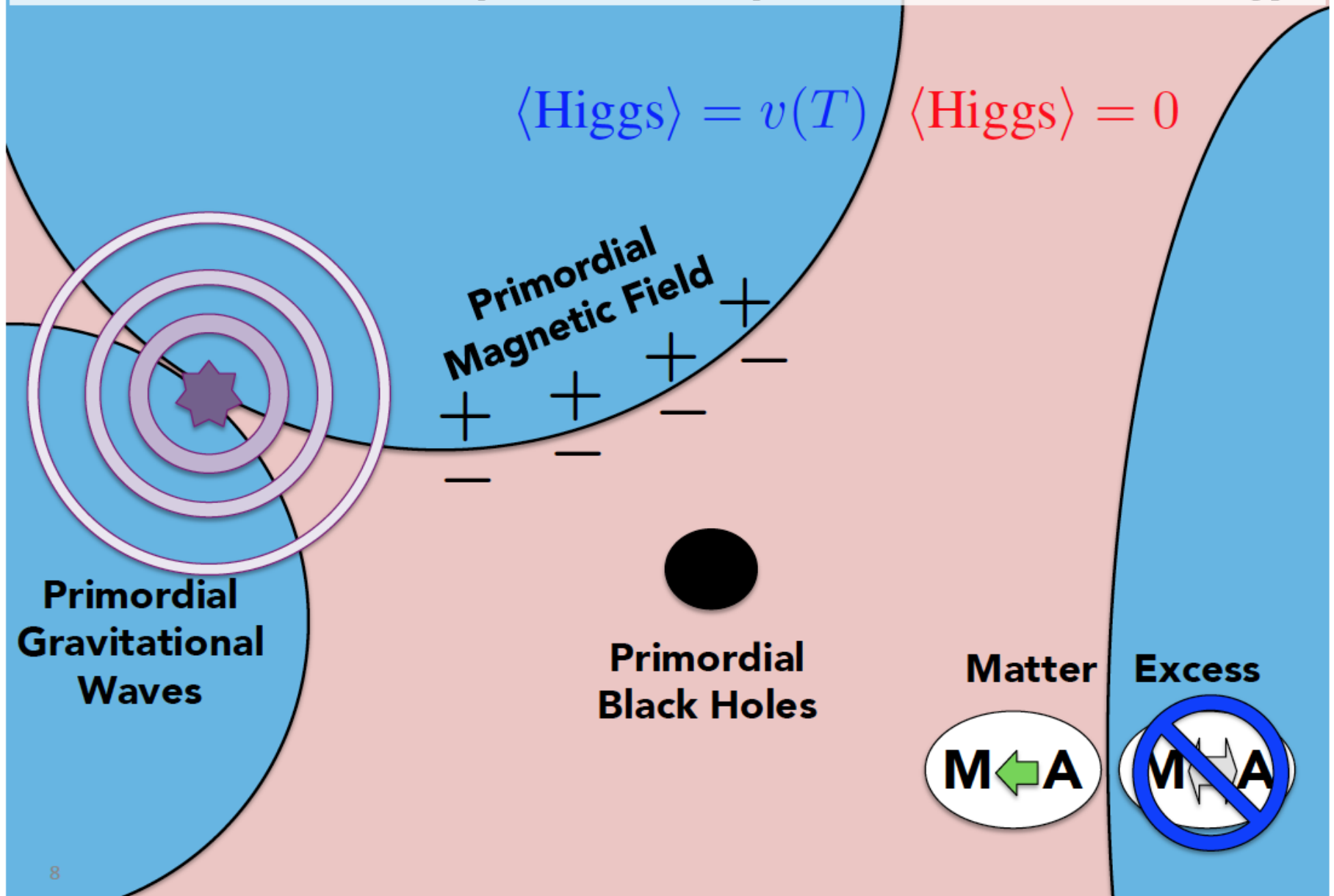
Partial Fund.

Conformal

Full Composite

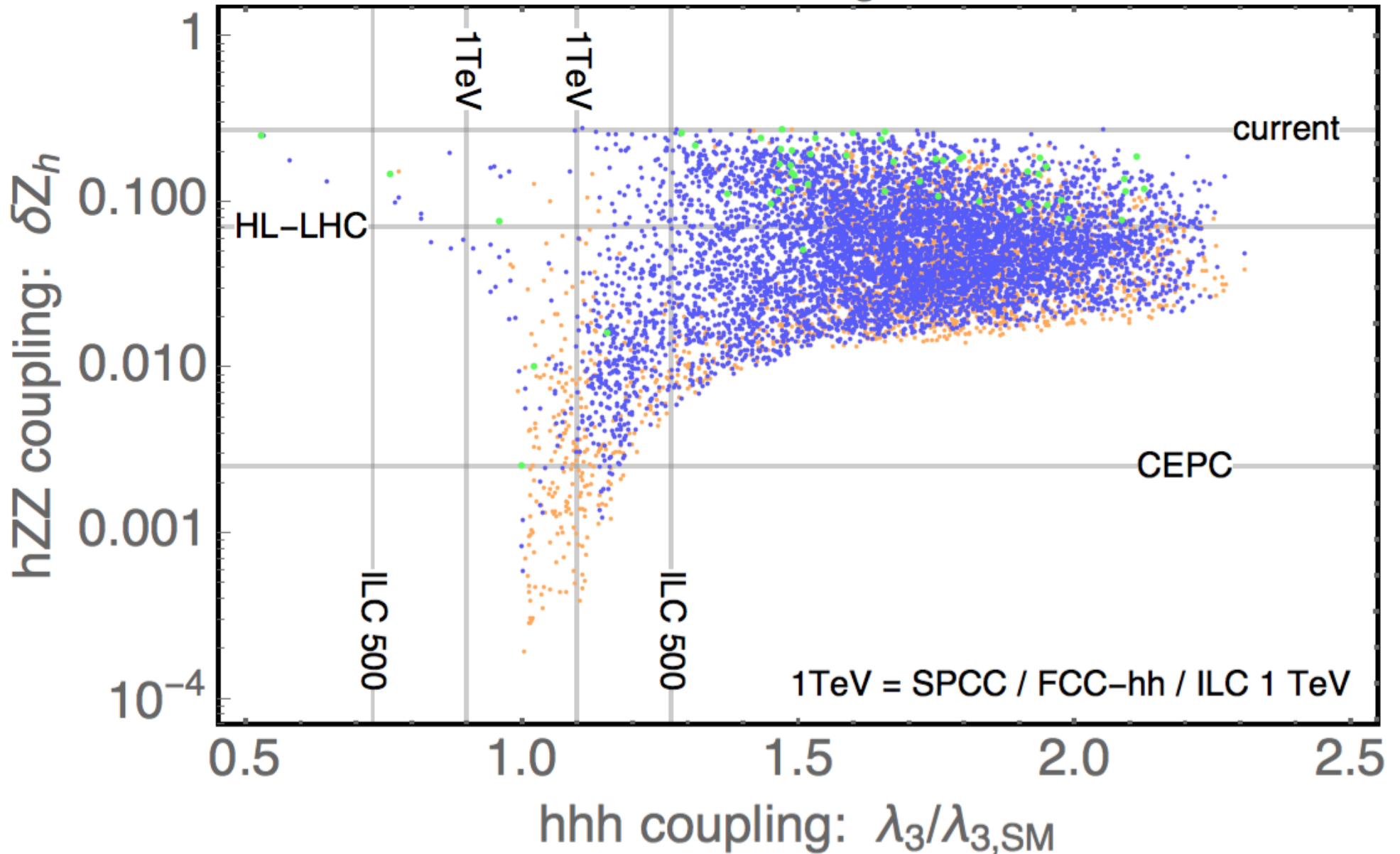
Shape of Higgs potential: **very different!**

1st Order EWPT has profound implications for cosmology



8

Real Scalar Singlet Model



全球粒子物理战略下的正负电子 Higgs 工厂

- 中国，物理学会高能物理分会（2016.8）：CEPC 是我国未来对撞机发展的首选项目
- 日本：积极推动 ILC 在日本的建设
- EUSPP(2020): 正负电子 Higgs 工厂是未来对撞机发展的最高优先级。。。期望建设能量尽可能高的质子对撞机。
- ...

(My) remarks:

Fabiola Gianotti, CERN DG, June 2020

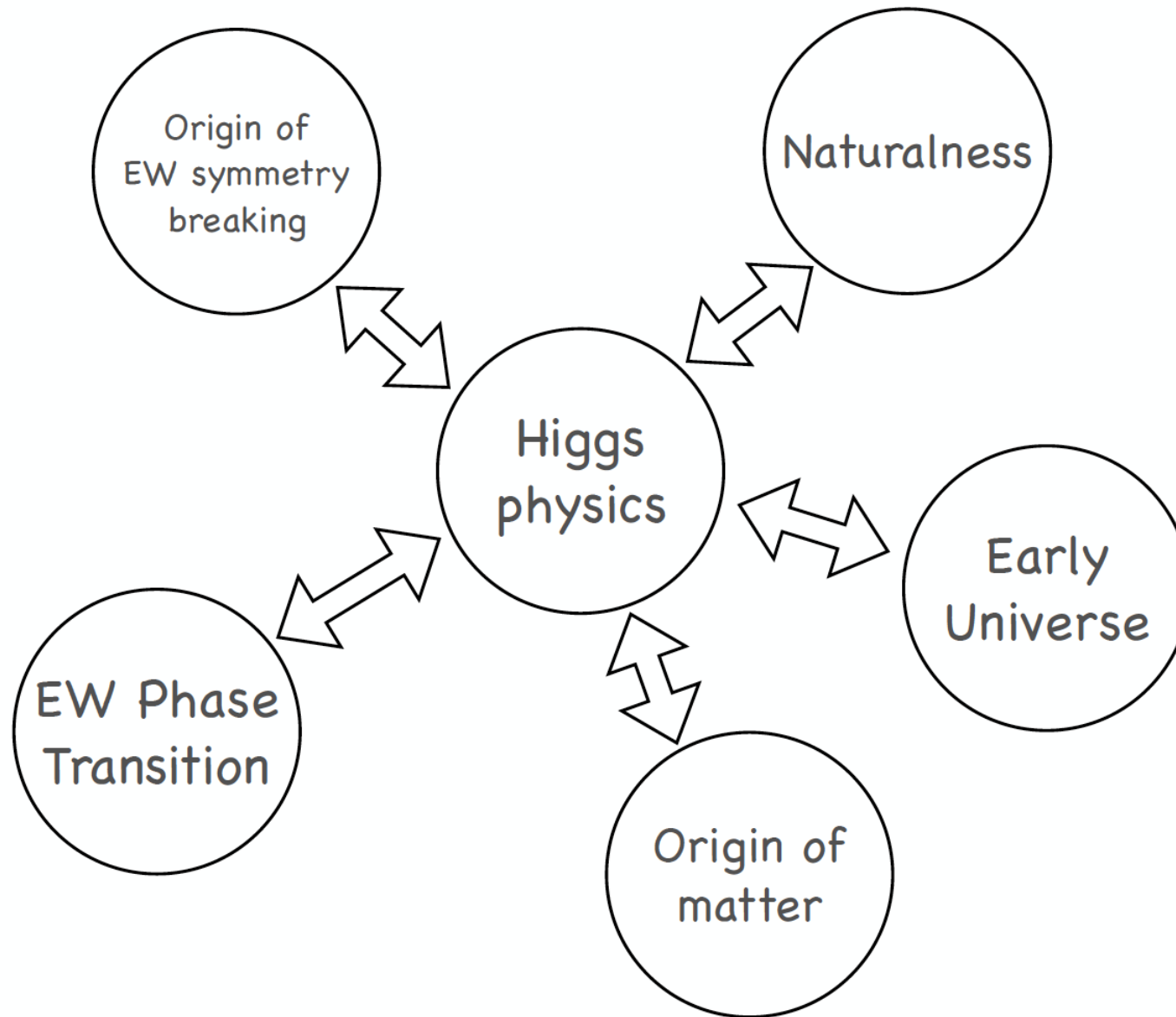
- ❑ Strategy gives a direction for future collider(s) at CERN (FCC). Prudent: feasibility study first.
- ❑ Intensified accelerator R&D to prepare alternatives if FCC feasibility study fails
- ❑ No consensus in European community on which type of Higgs factory (linear or circular)
If FCC feasibility study successful and project approved → FCC-ee is natural choice at CERN
- ❑ ILC: - compatible with ESPP if timely (otherwise conflict of resources with next collider at CERN)
- are ILC and FCC-ee complementary enough in terms of physics? No consensus
- ❑ Chinese colliders (CepC, SppC): direct competition → if CepC goes ahead, Europe would go directly to FCC-hh (if feasible)

小结

- 标准模型取得了巨大成功。但它存在大量理论疑难、无法解释一系列重大问题。大量线索都指向 **Higgs**：它是标准模型的核心，和上述问题息息相关，也为上述问题的探索提供了全新的、有力的探针
- 正负电子 **Higgs** 工厂可在 **HL-LHC** 的基础上大幅提升我们对标准模型、特别是 **Higgs** 场的认识，是未来高能物理对撞机实验发展的核心。全球倡议建设多个正负电子 **Higgs** 工厂，其中包括 **CEPC**。**CEPC** 的技术指标和最终精度呈量级超过现有水平；它有望通过 **Higgs** 粒子这一窗口，研究关键问题，挖掘出更加基础的物理规律。
- **CEPC** 一旦建成，将成为全球粒子物理实验旗舰，将使我国在粒子物理实验领域处于世界领先水平；将容纳上万名国际顶级科学家、工程师及其家人来华工作生活，将推动一系列关键技术的发展。在得到政府支持的情况下，**CEPC** 预计将在 **2030** 年左右建成并开始采集数据。

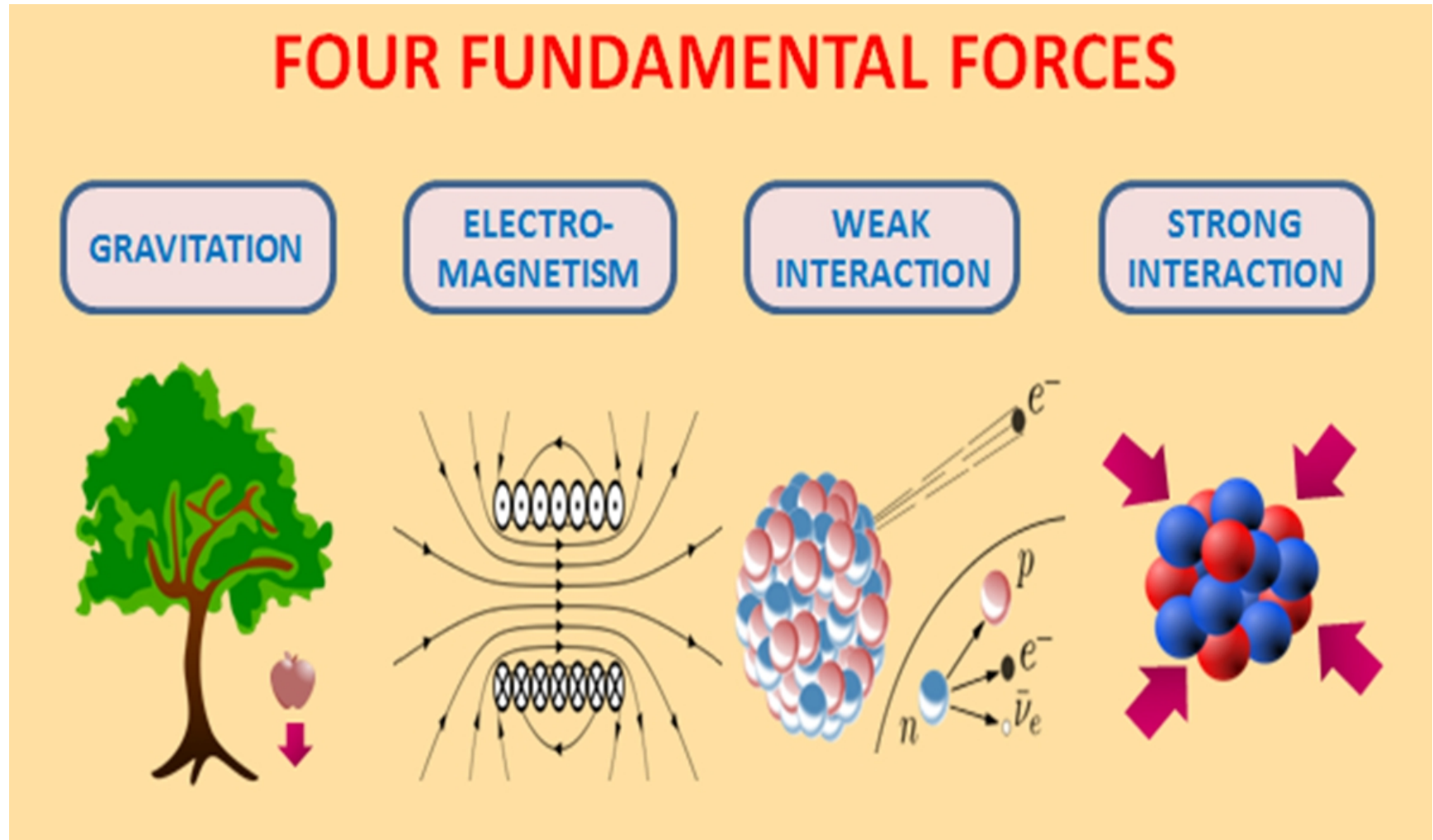
谢谢大家 & 期待未来

Manqi.ruan@ihep.ac.cn



Possible links with inflation, dark energy, ...

四大相互作用 - 世界如何运行



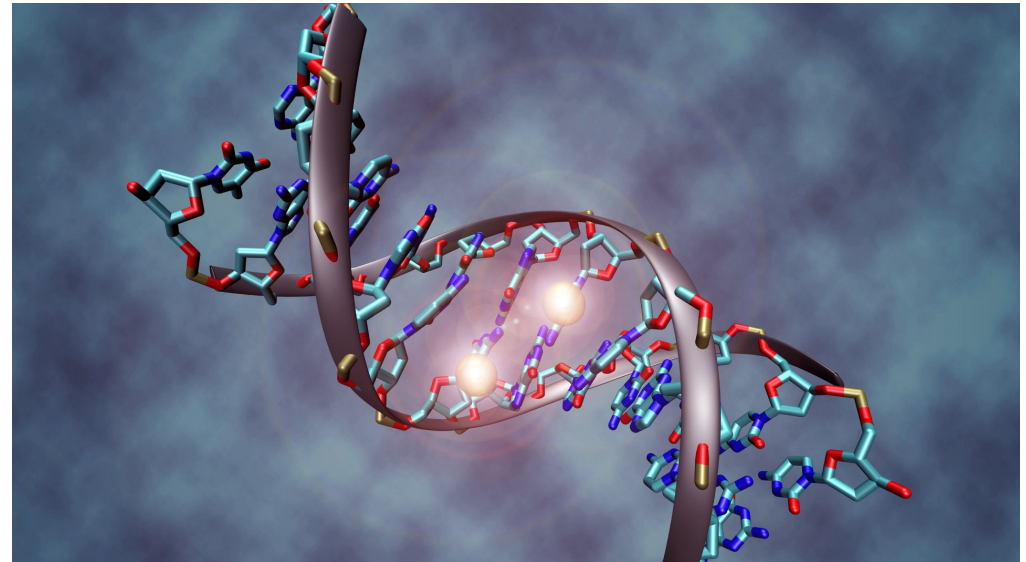
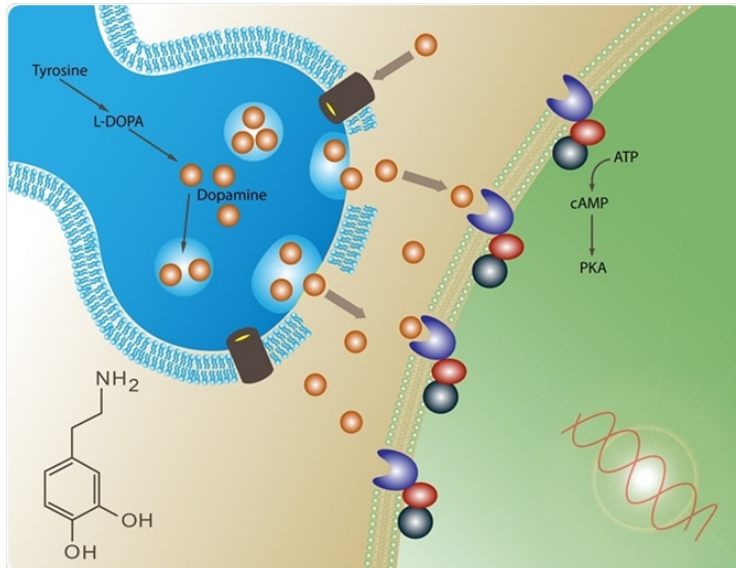
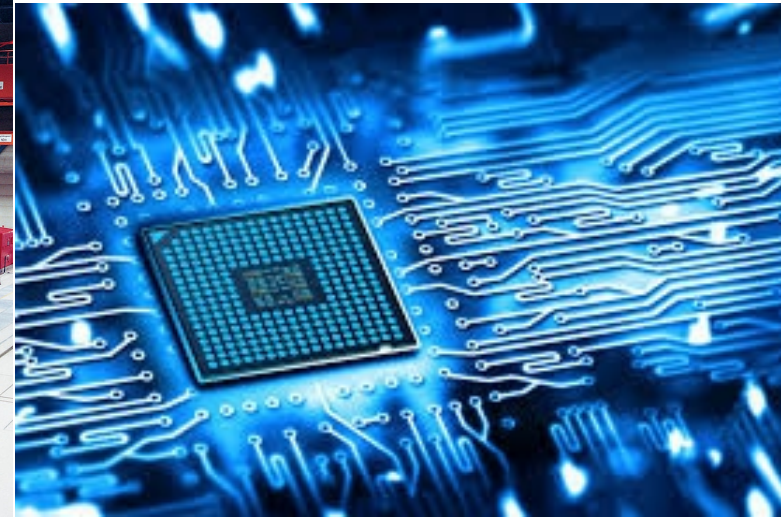
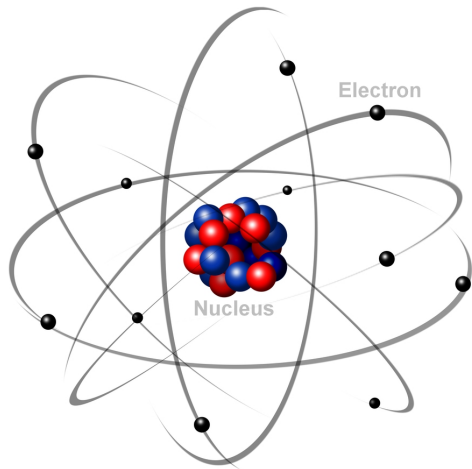
引力

电磁力

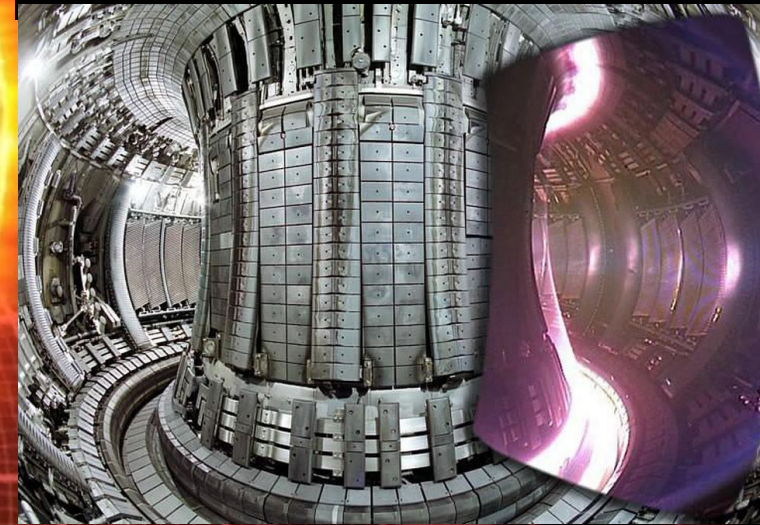
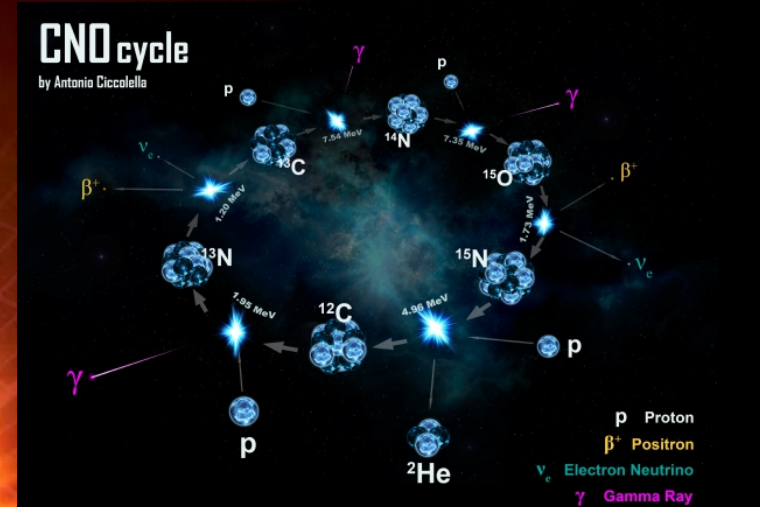
弱力

强力

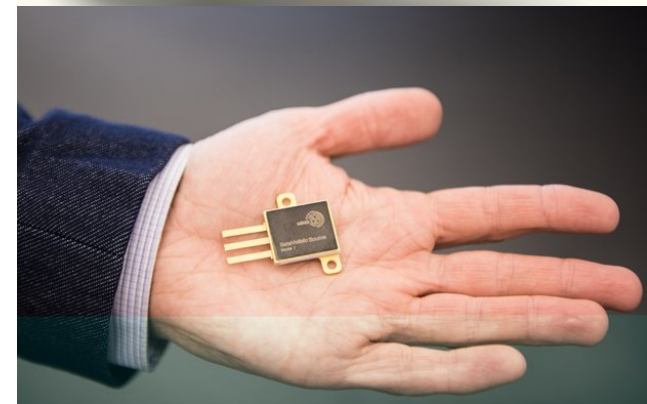
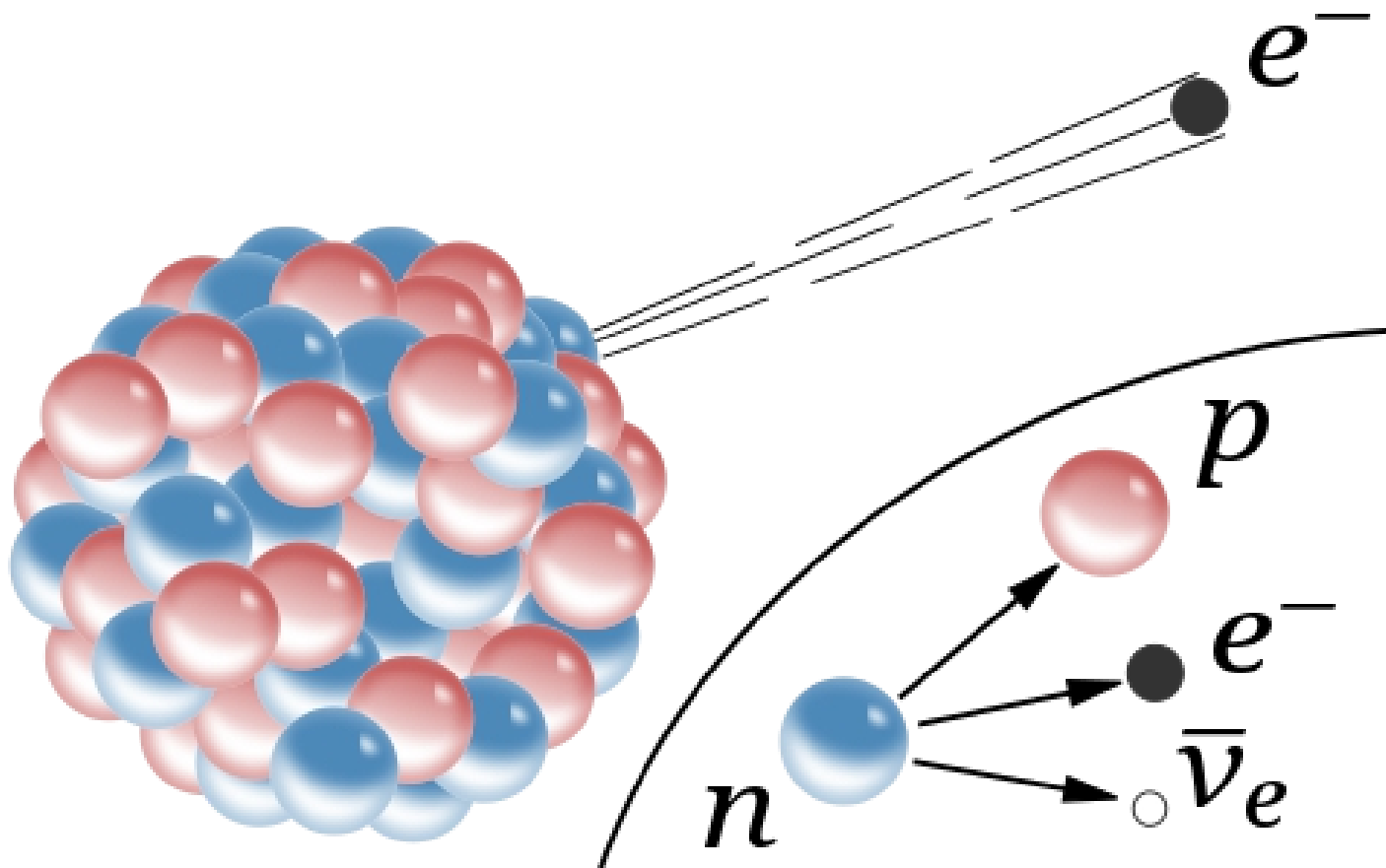
电磁相互作用： Everything



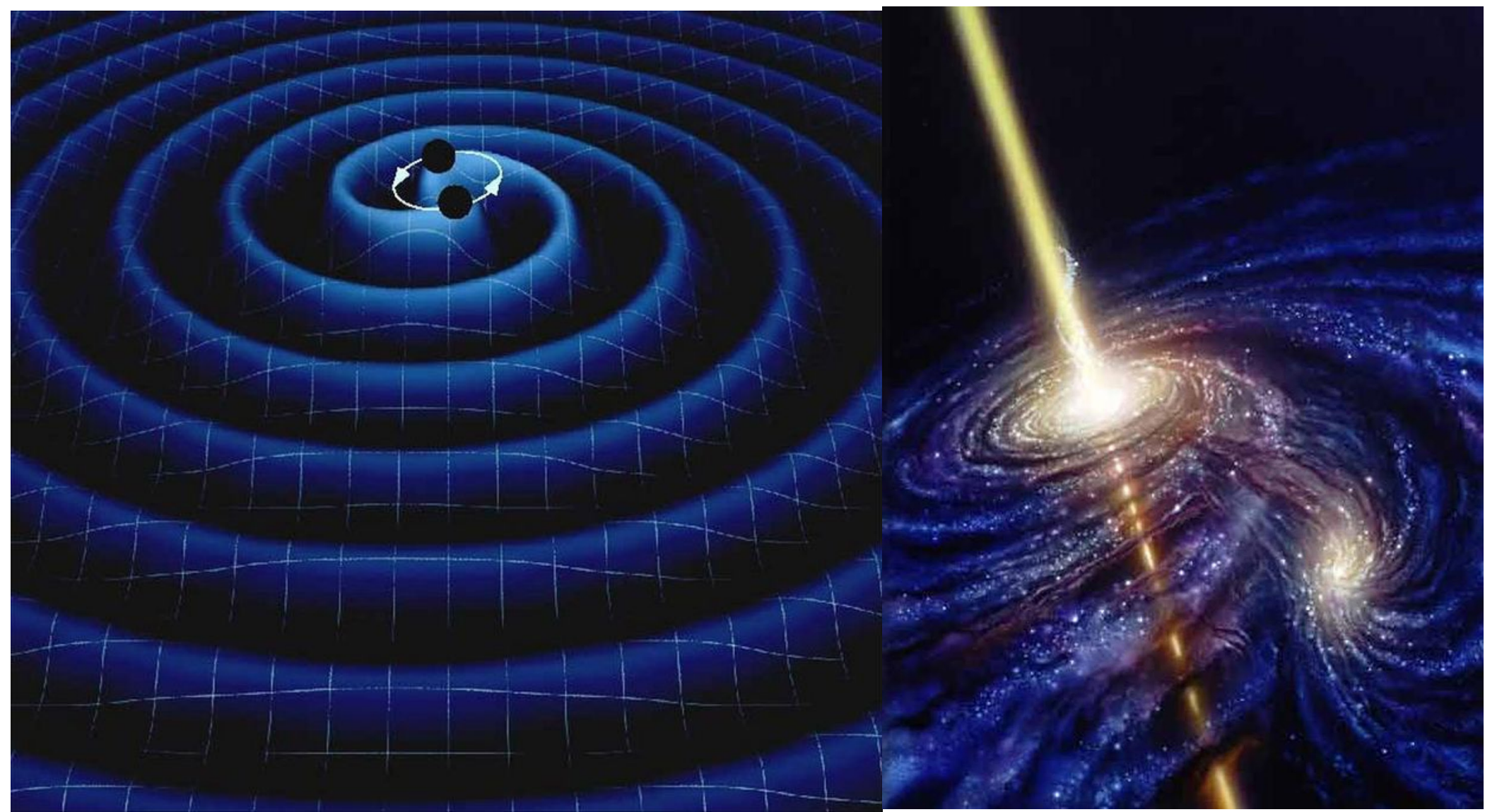
强相互作用：聚变



弱相互作用：裂变



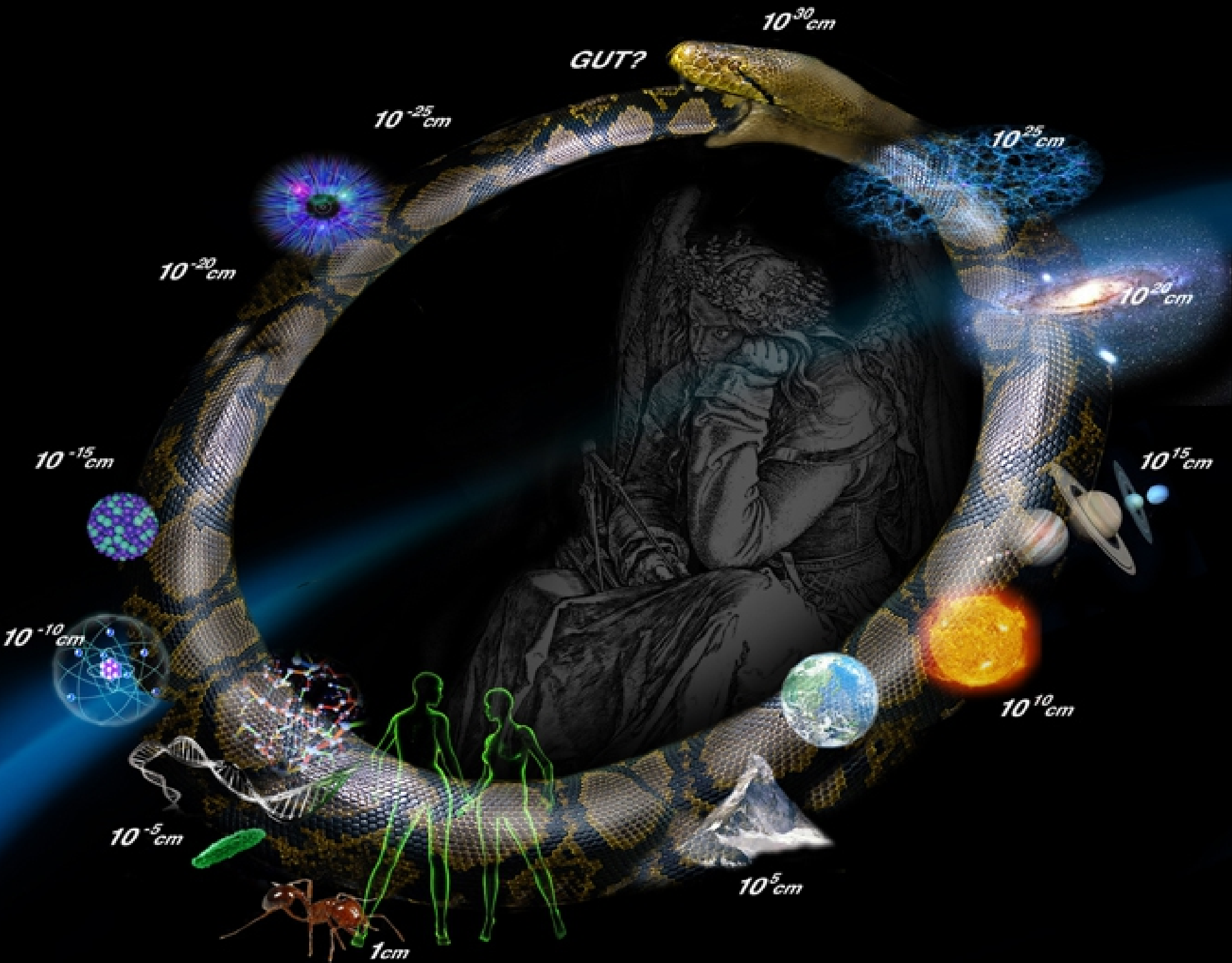
引力相互作用：黑洞，天体。。。



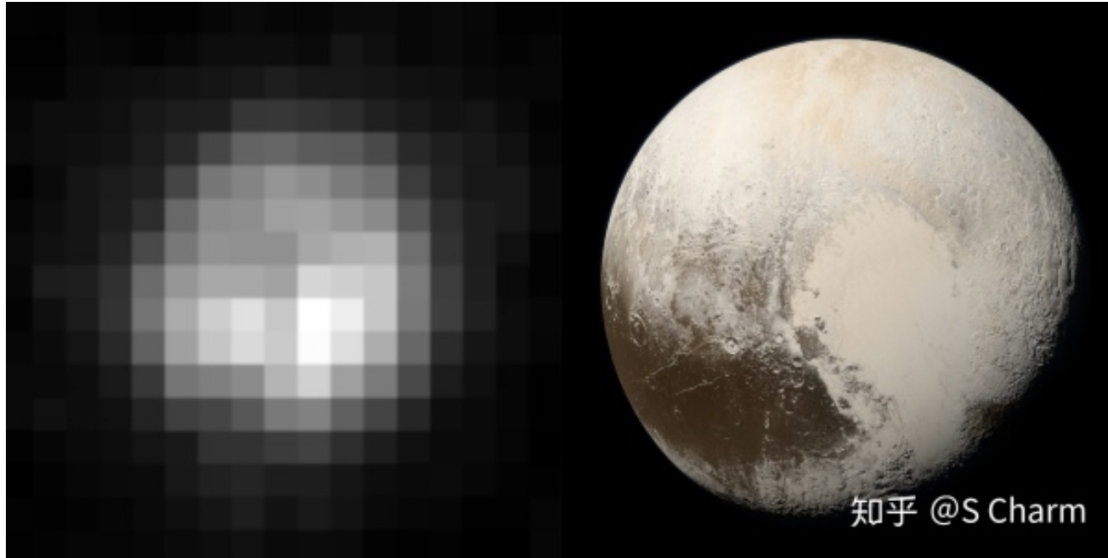
宇宙是稳定的吗？

宇宙是稳定的吗？

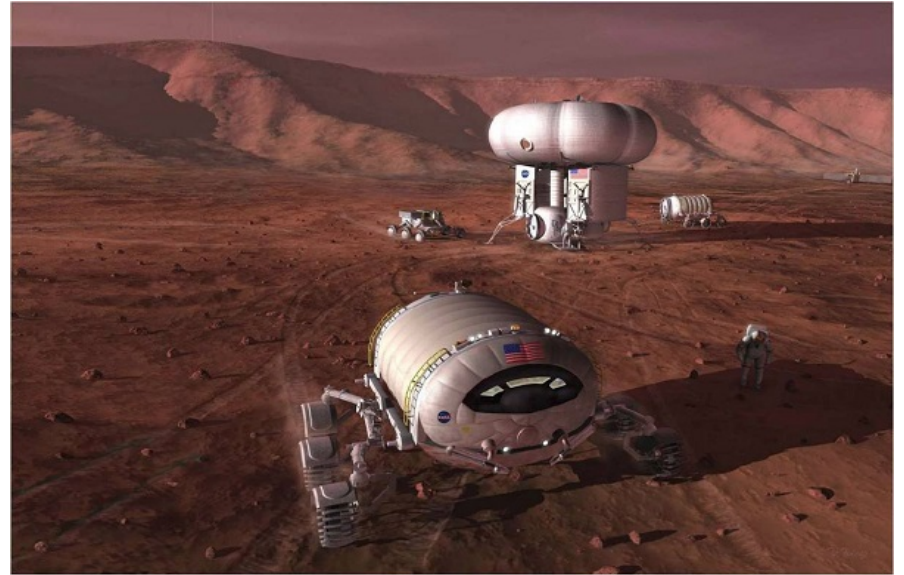




CEPC 的可能升级计划



1994年和2018年人类所认知的冥王星的对比图。左图来自哈勃空间望远镜，右图来自新视野号航天器。
(图片来源: NASA)



- 高能量
- 高亮度
- **SPPC**: 质子对撞, 质心能量 100TeV, 超过 LHC 近一个量级
- 具体升级高度依赖于 **CEPC** 的观测结果, 以及相关技术的研发准备

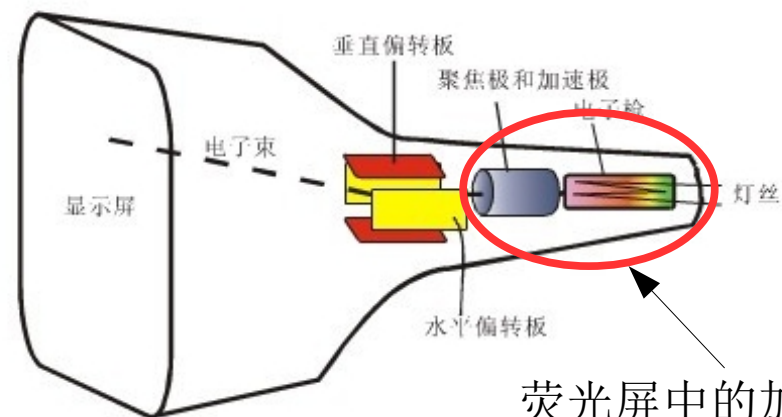


CEPC : 望远镜 - 在我们能力范围内是否有新大陆?

SPPC : 航船 - 新大陆是怎样的?

加速器 & 对撞机

加速器将粒子加速到很高的能量，
并将粒子束团压缩到很小的尺寸，
以产生大量的对撞事例，
并通过专门的探测器对对撞产物进行测量
探索其中的新现象。



荧光屏中的加速器

以粒子物理研究为目的的对撞机有很多种：正负电子对撞机，质子对撞机，光子对撞机，电子-质子对撞机，重离子对撞机，Muon子对撞机。。。

其形状也有很多种：直线，环形。。。

