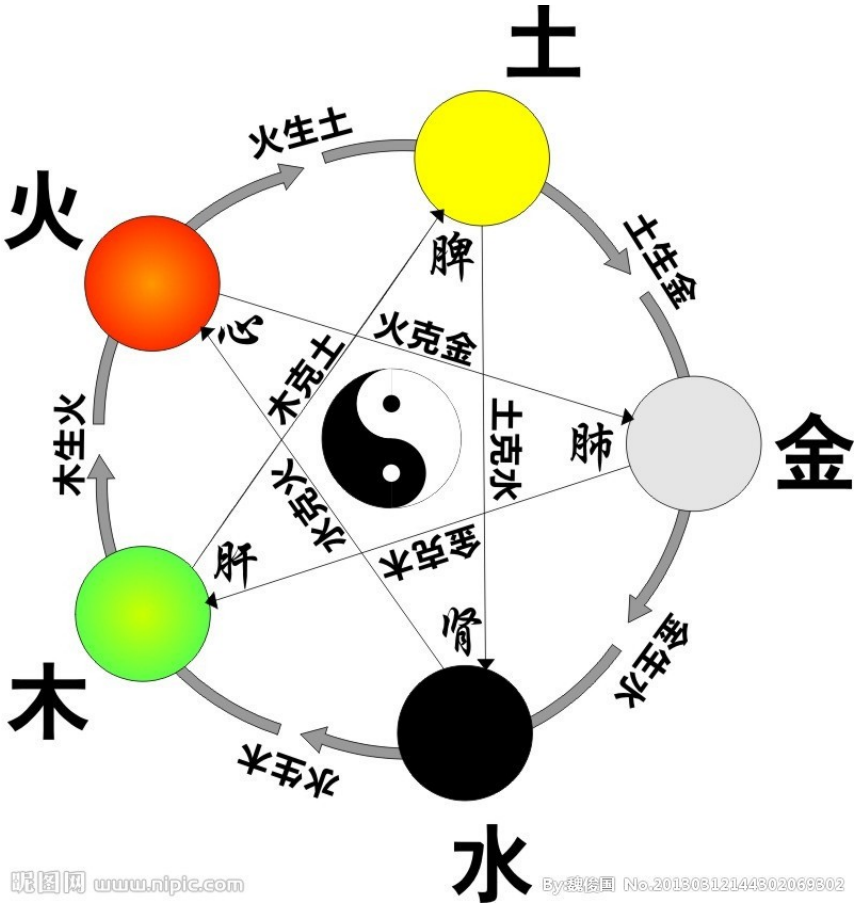
大型对撞机：探索未知的航船和望远镜

阮曼奇


世界是由什么组成的？
世界是怎样运行的？

古典的探索。。。

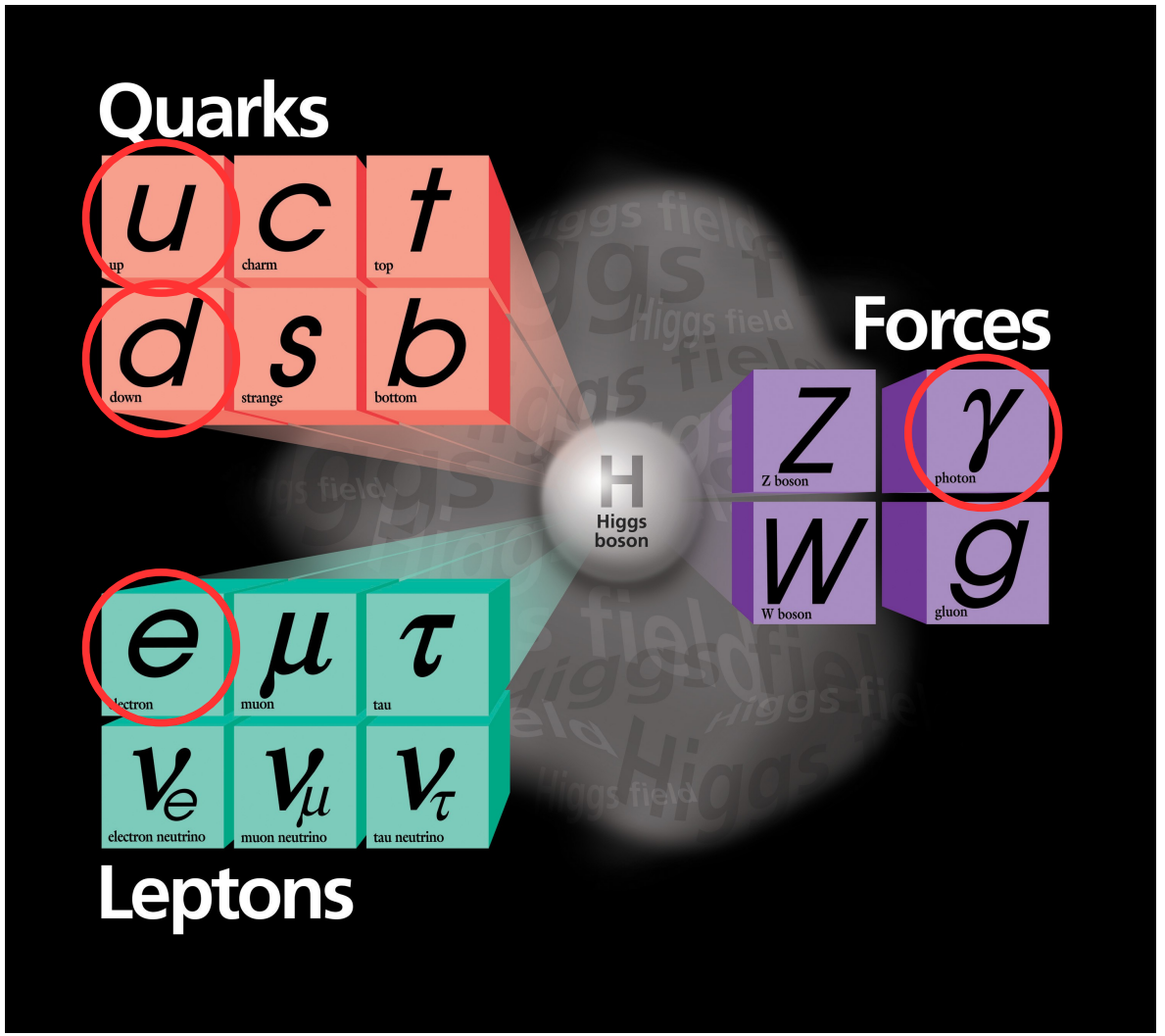


泰勒斯：水源说

赫拉克利特：火源说

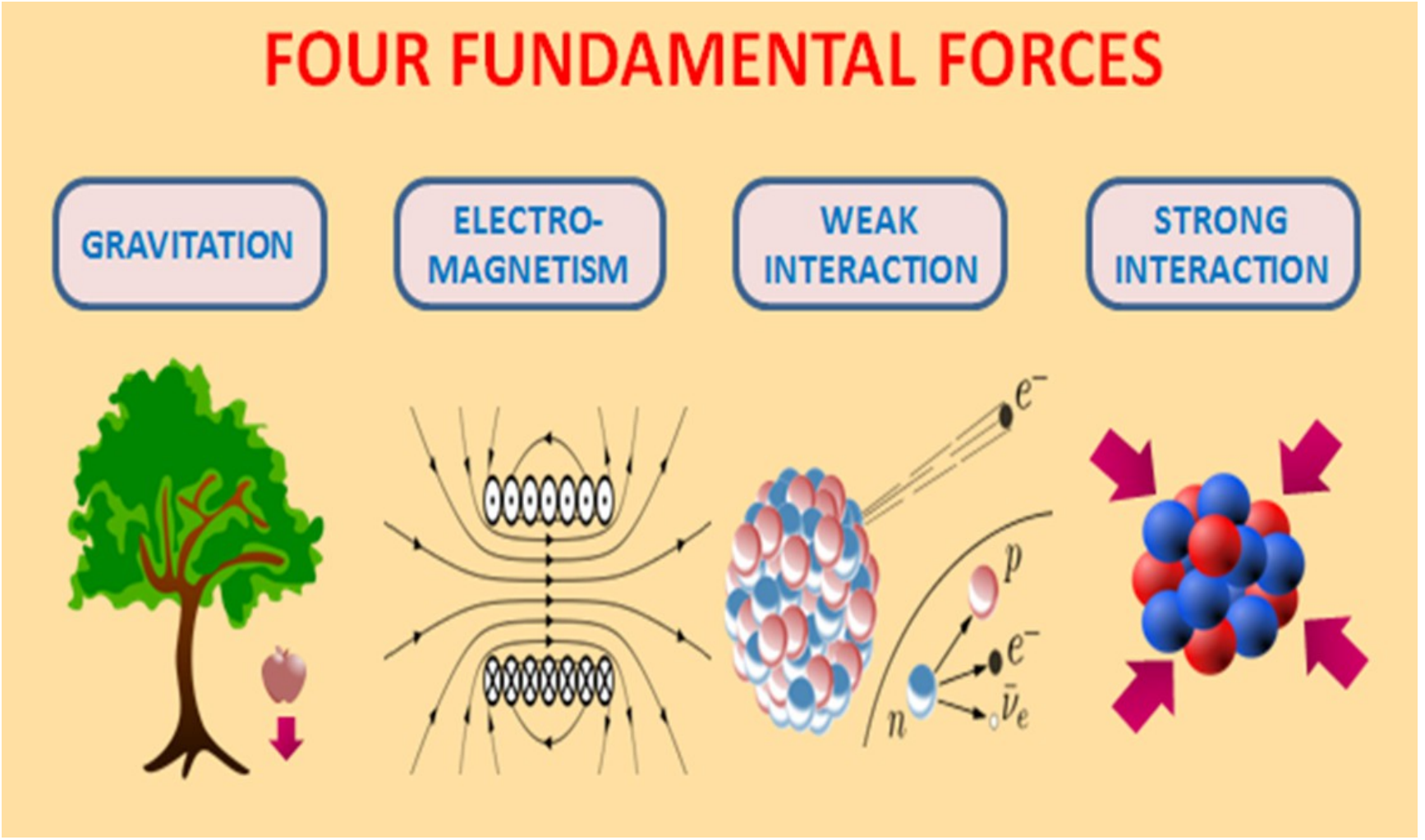
图片来自网络

标准模型：基本组元



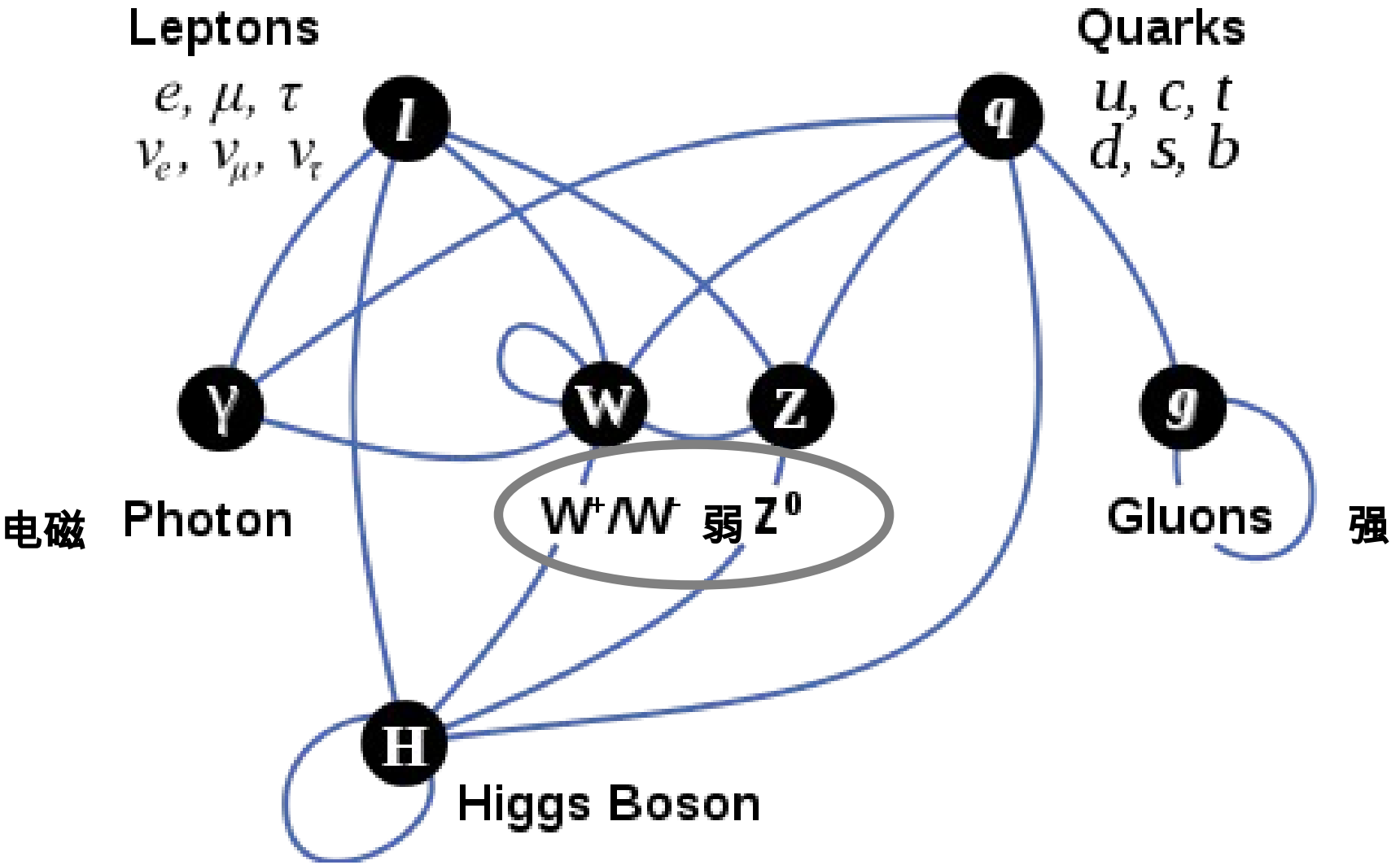
- 常见粒子：
  - 原子核
    - 质子（uud）
      - Q = 2/3 * 2 – 1/3 = 1
    - 中子（udd）
      - Q = 2/3 - 1/3 * 2 = 0
  - 电子
  - 光子
  - ...

四大相互作用



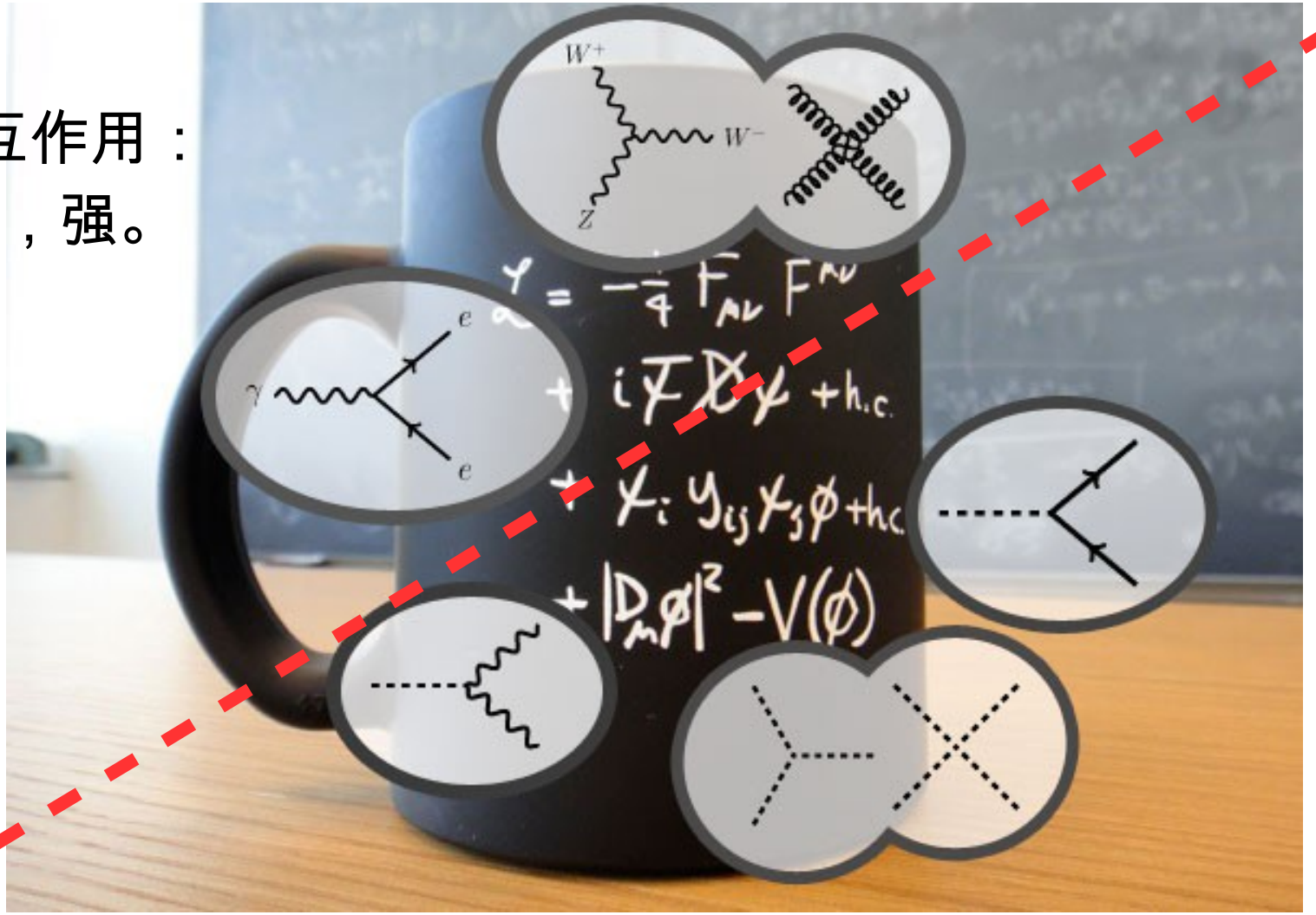
引力　　电磁力　　弱力　　强力

标准模型中的相互作用


Leptons
e, μ, τ
ν_e, ν_μ, ν_τ
l
Quarks
u, c, t
d, s, b
q
γ
W
Z
g
电磁
Photon
W^+/W^- 弱 Z^0
Gluons
强
H
Higgs Boson

标准模型：运行规律

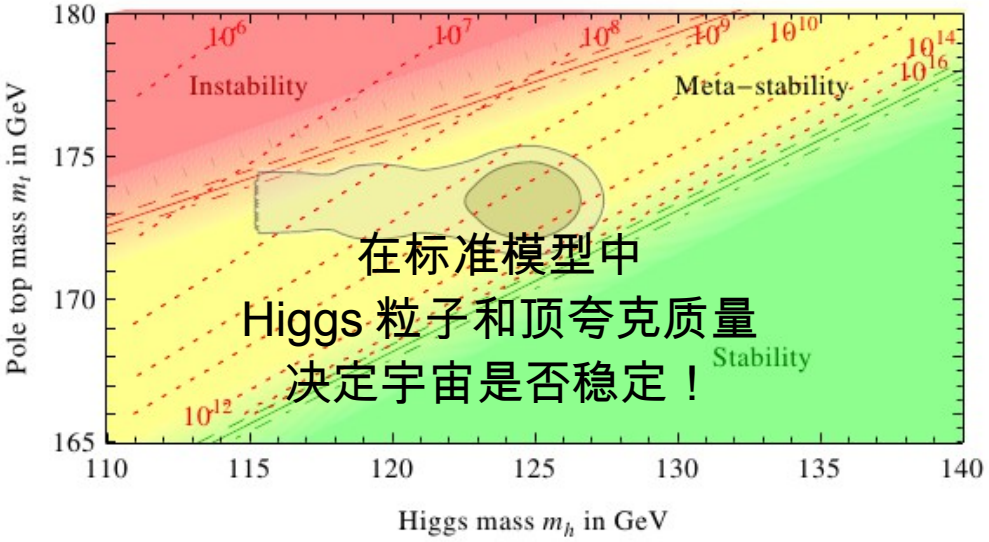
规范相互作用：
弱，电，强。



Higgs
粒子
参与的
相互作用

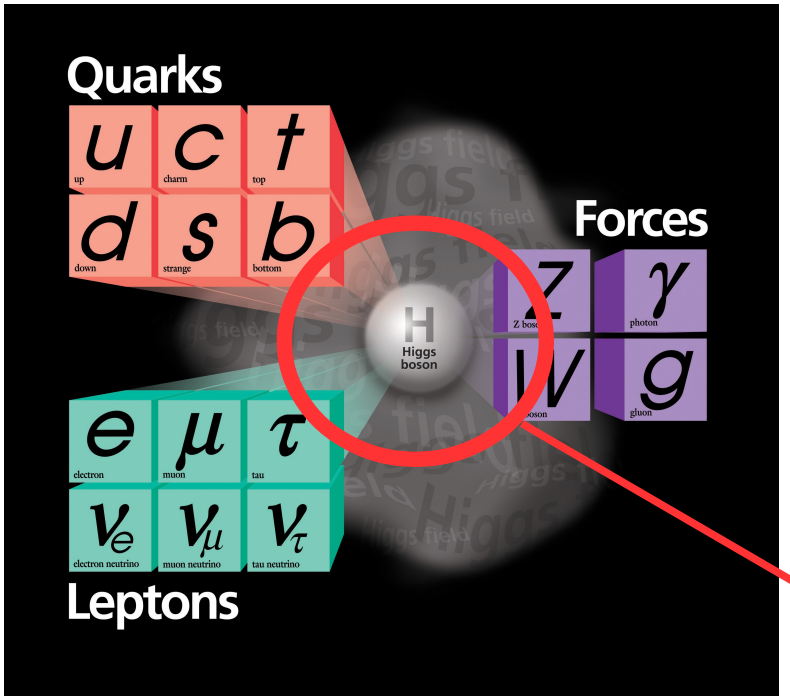
Higgs 粒子：新的相互作用

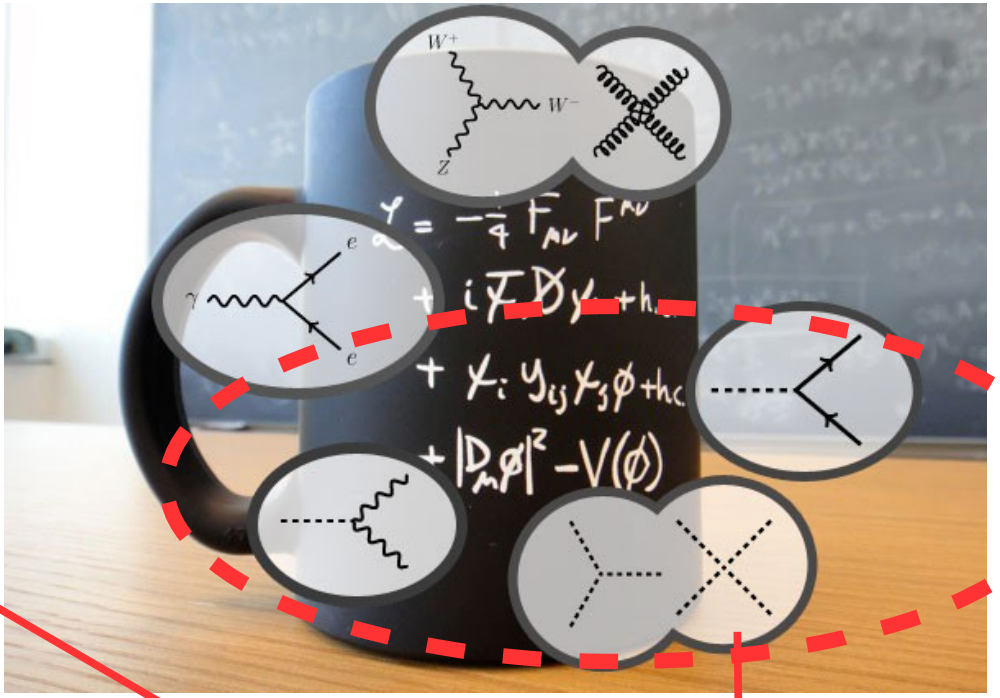
- Yukawa 相互作用：决定费米子的质量，
  - 决定了质子和中子的质量差，保证质子的稳定性
  - 决定了电子的质量 - 决定了原子的大小
  - 决定了顶夸克的质量
  - ...

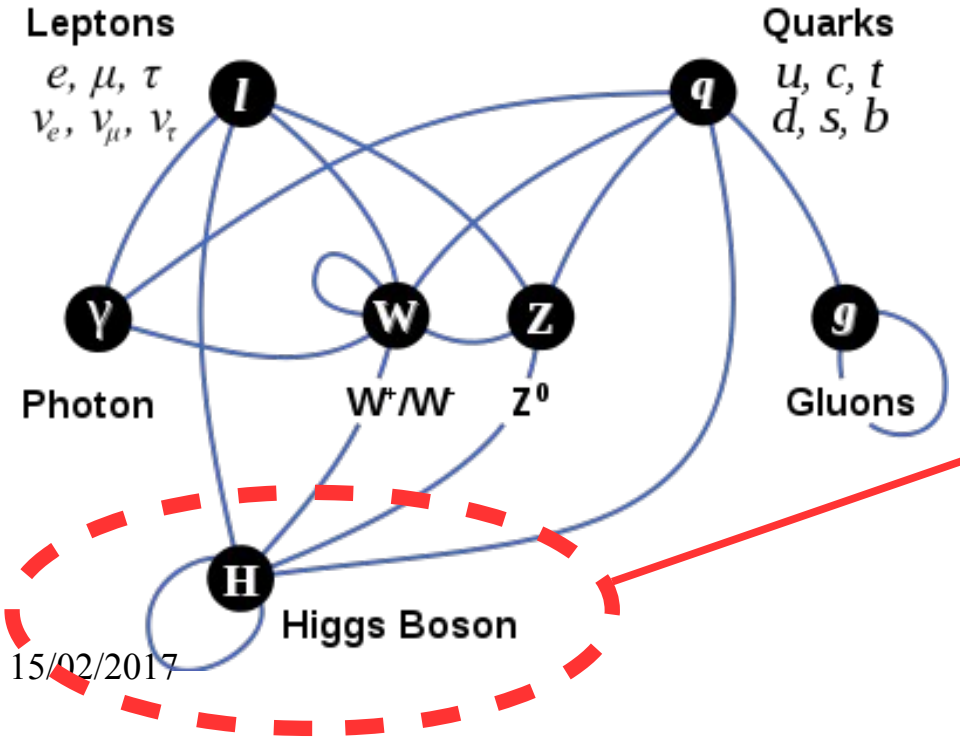


- Higgs 机制
  - 决定了 Higgs 粒子本身的质量
  - 决定了 W, Z 粒子的质量，决定了弱相互作用的力程并影响了其强度
  - ...

新相互作用，指代不同于四大基本相互作用


Quarks
u c t
up charm top
d s b
down strange bottom
Forces
Z photon
W gluon
H
Higgs boson
e μ τ
electron muon tau
νe νμ ντ
electron neutrino muon neutrino tau neutrino
Leptons



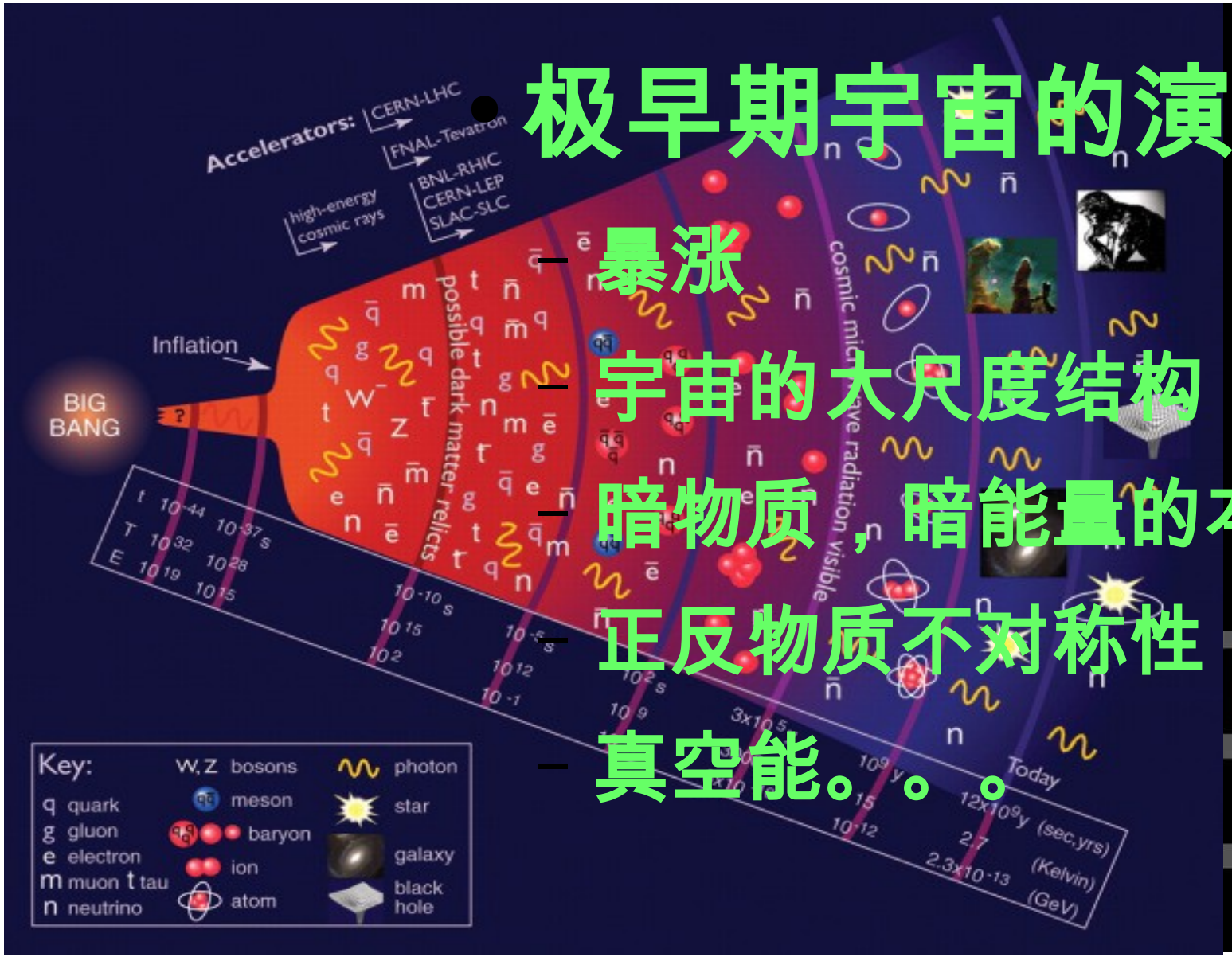

Leptons
e, μ, τ
νe, νμ, ντ
l
Quarks
u, c, t
d, s, b
q
γ
W
Z
g
Photon
W+/W-
Z0
Gluons
H
Higgs Boson

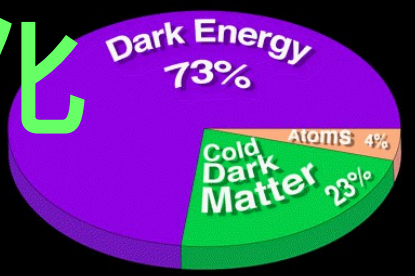

THE
HIGGS
BOSON
H

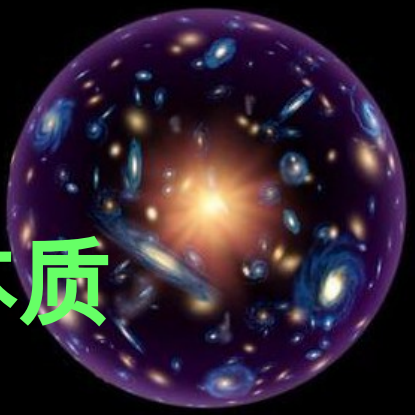
主角： Higgs 粒子

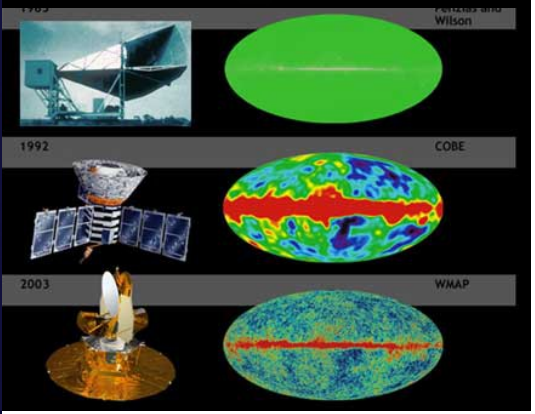
标准模型无法解释的谜团

- 极早期宇宙的演化
  - 暴涨
  - 宇宙的大尺度结构
  - 暗物质，暗能量的本质
  - 正反物质不对称性
  - 真空能。。。









这些谜团同 Higgs 粒子的关系？？

Higgs 粒子：极端重要 + 谜团笼罩

- 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宿命
- ...
- **可能同宇宙极早期的演化行为相关**

Higgs 粒子为什么这么“能干”？
Higgs 粒子的本质是什么？？？


Higgs

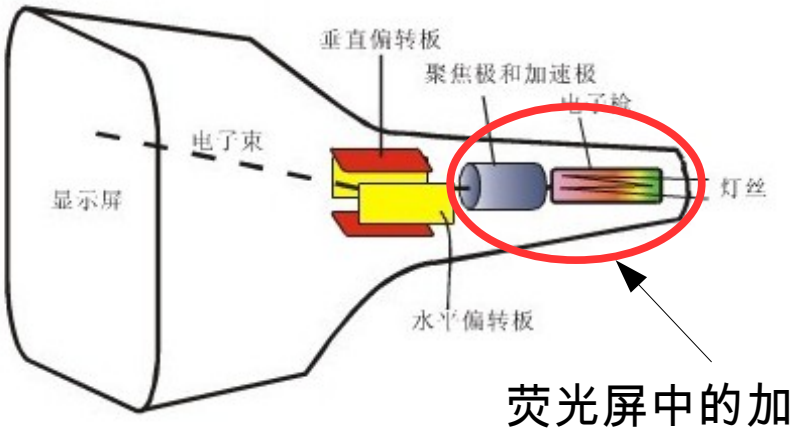
加速器 & 对撞机

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，

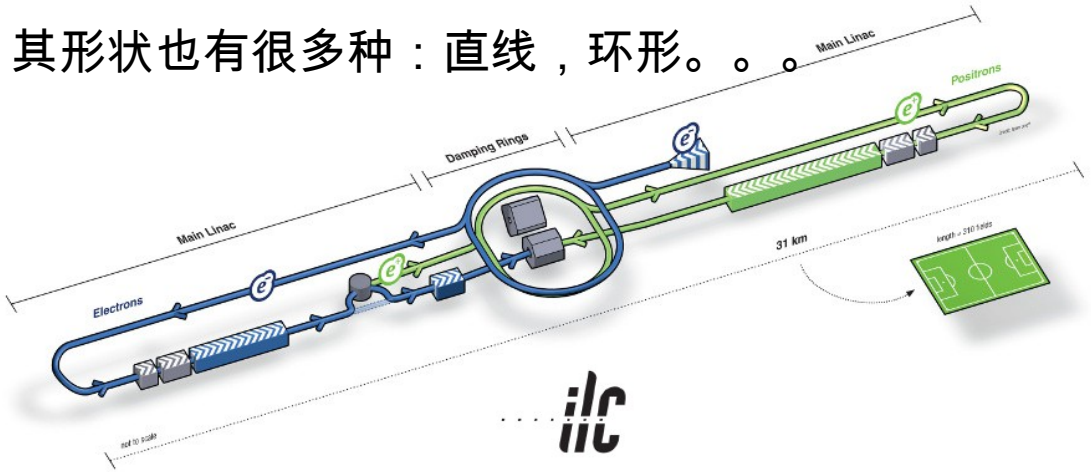
并通过专门的探测器对对撞产物进行测量
探索其中的新现象。

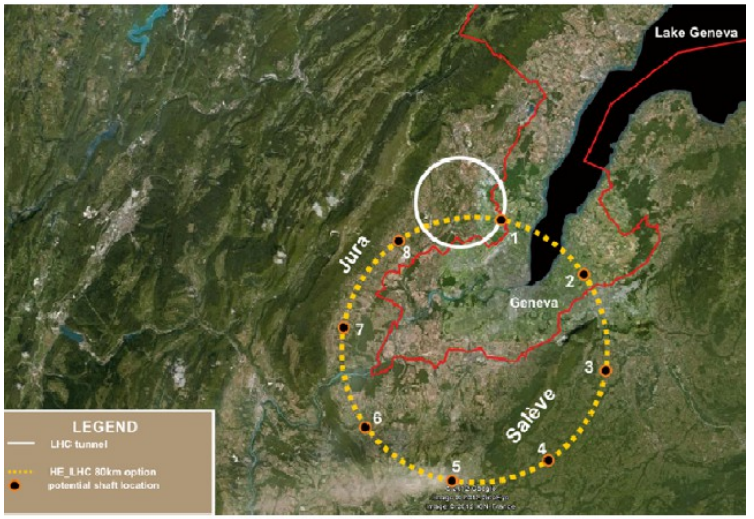


荧光屏中的加速器

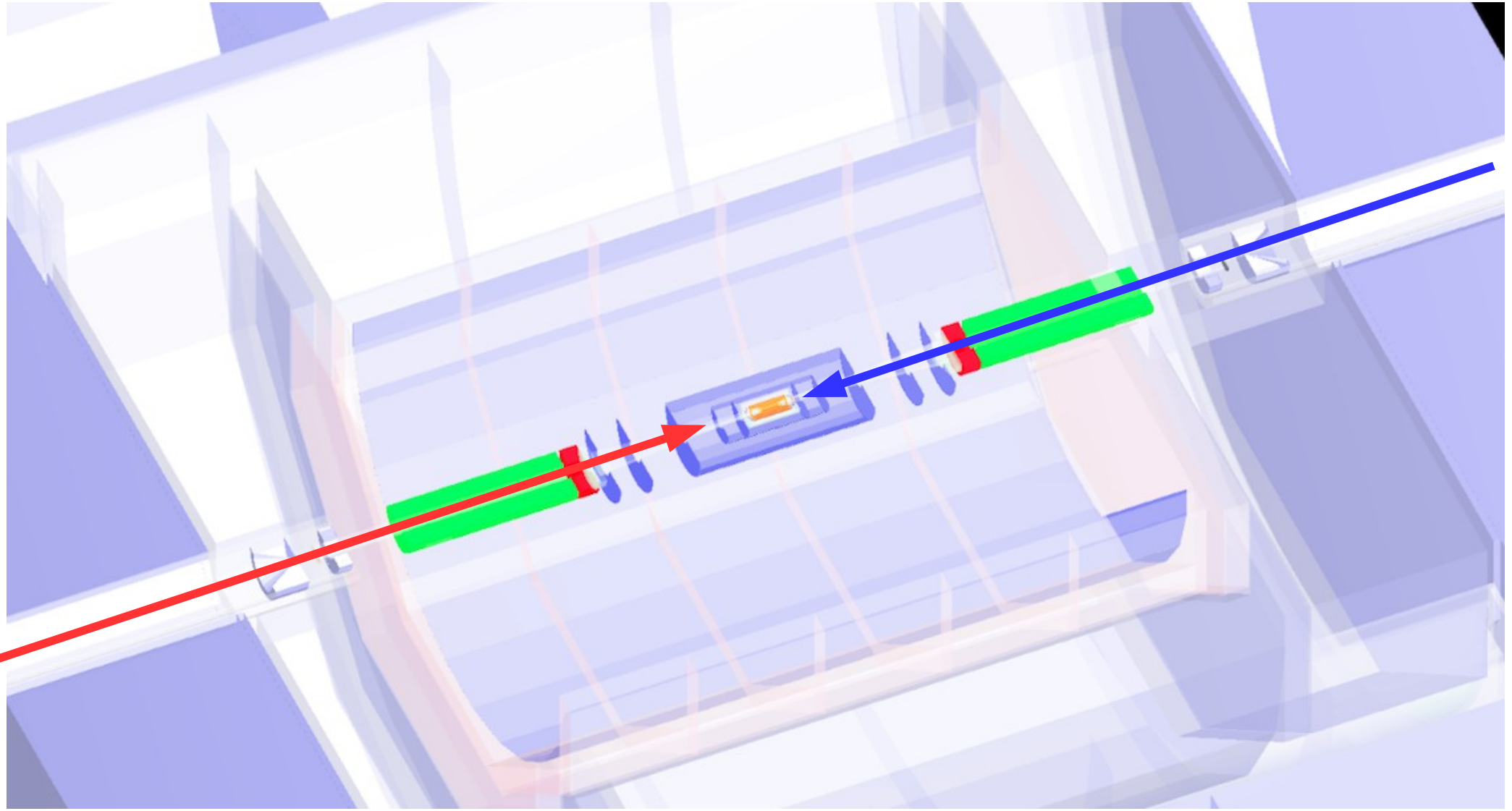
以粒子物理研究为目的的对撞机有很多种：正负电子对撞机，质子对撞机，
光子对撞机，电子 - 质子对撞机，重离子对撞机， Muon 子对撞机。。。

其形状也有很多种：直线，环形。。。



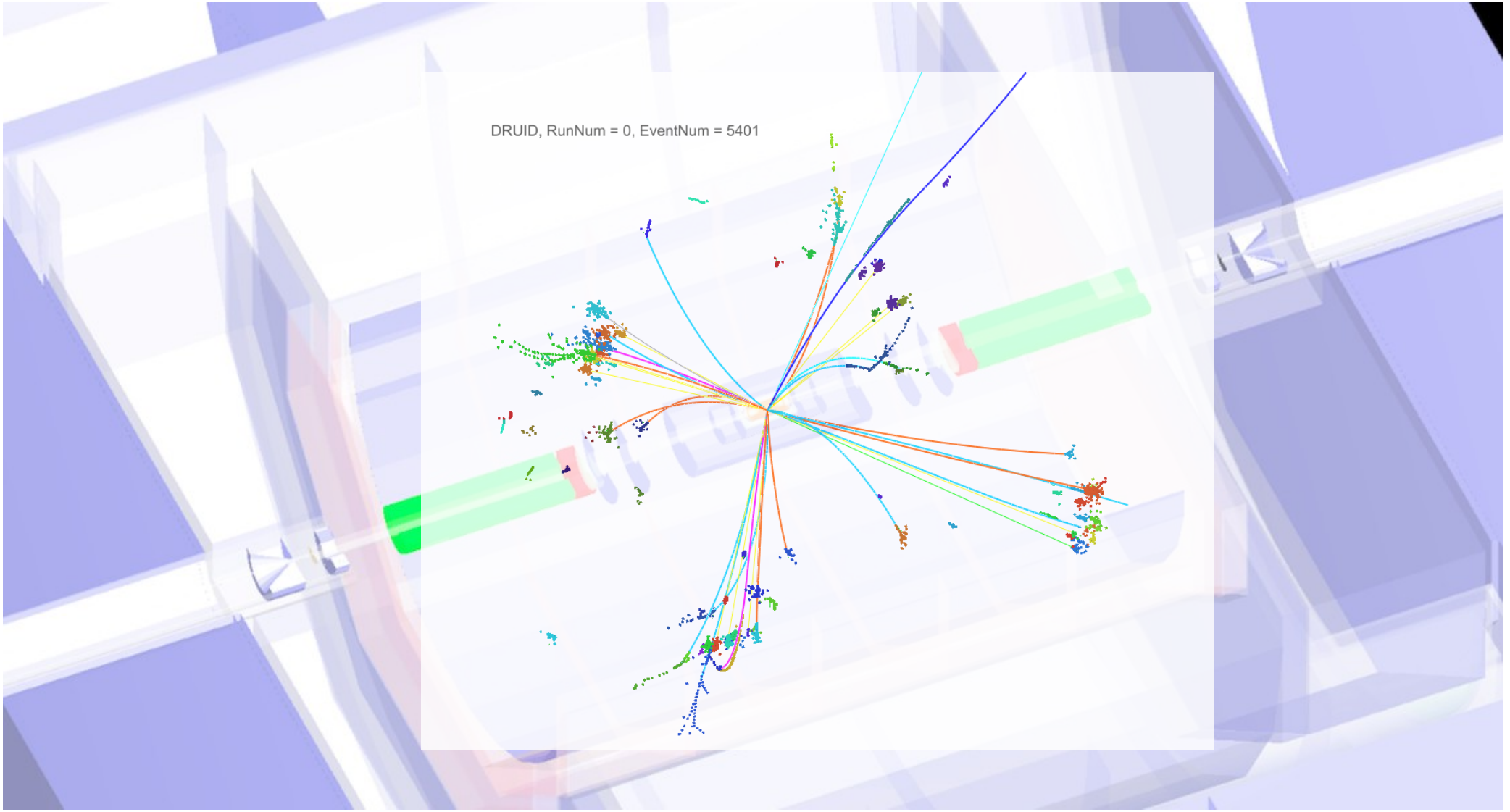


探测器



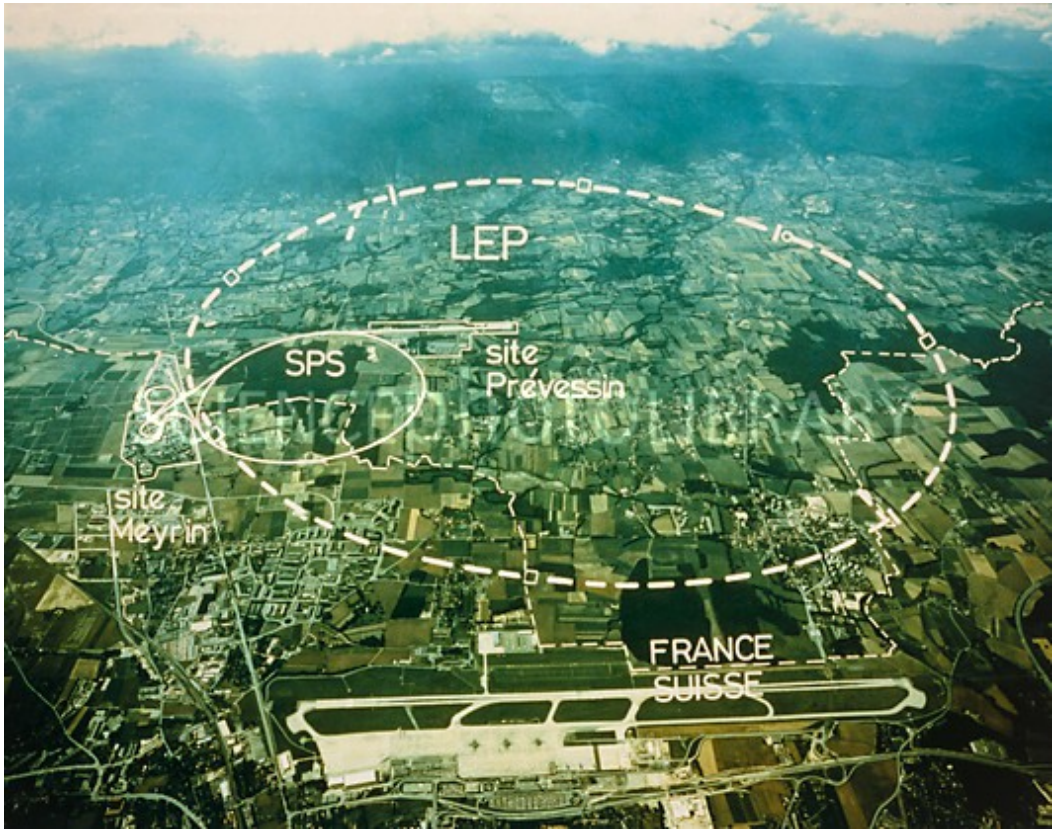
高能对撞机上探测器的尺寸 ~ 10 米

对撞产生物理事例




回顾上帝粒子被发现的传奇历史
预言－限定－发现

精细测量：望远镜



在较低能区进行精确测量，以此寻找高能区新物理的蛛丝马迹

事实上，在 Higgs 粒子发现之前，前期实验，特别是 LEP 实验
就已经通过精细测量确认了 Higgs 粒子可能存在的质量范围

Limites sur la masse du Higgs

→ direct searches at LEP

M_H >114 GeV at 95% C.L.

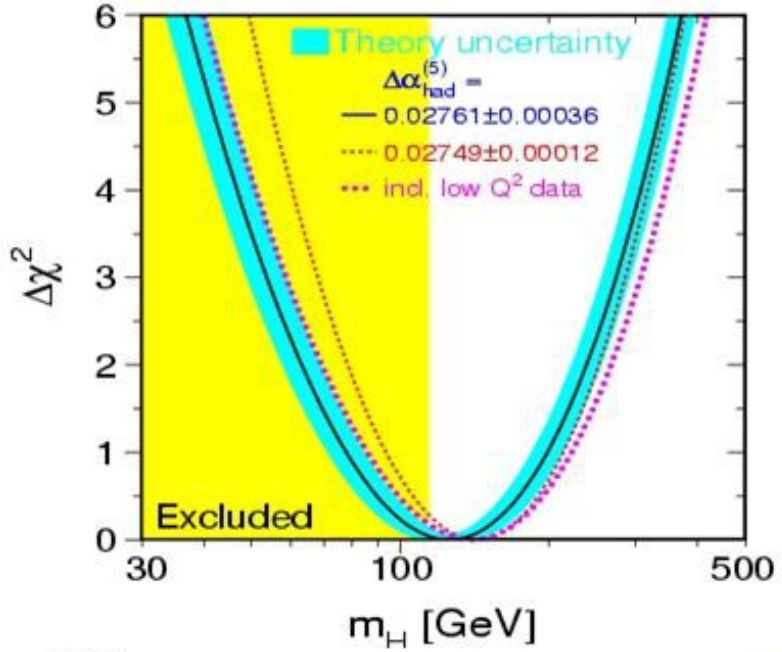
→ precision EW fits (winter 2005)

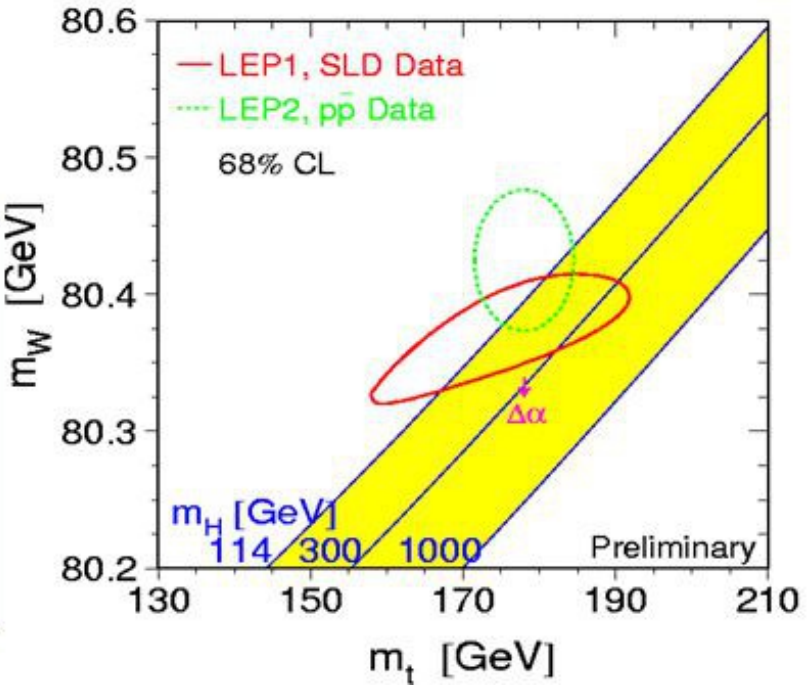
$M_H = 126^{+73}_{-48}$ GeV

$M_H \leq 280$ GeV @ 95% C.L.

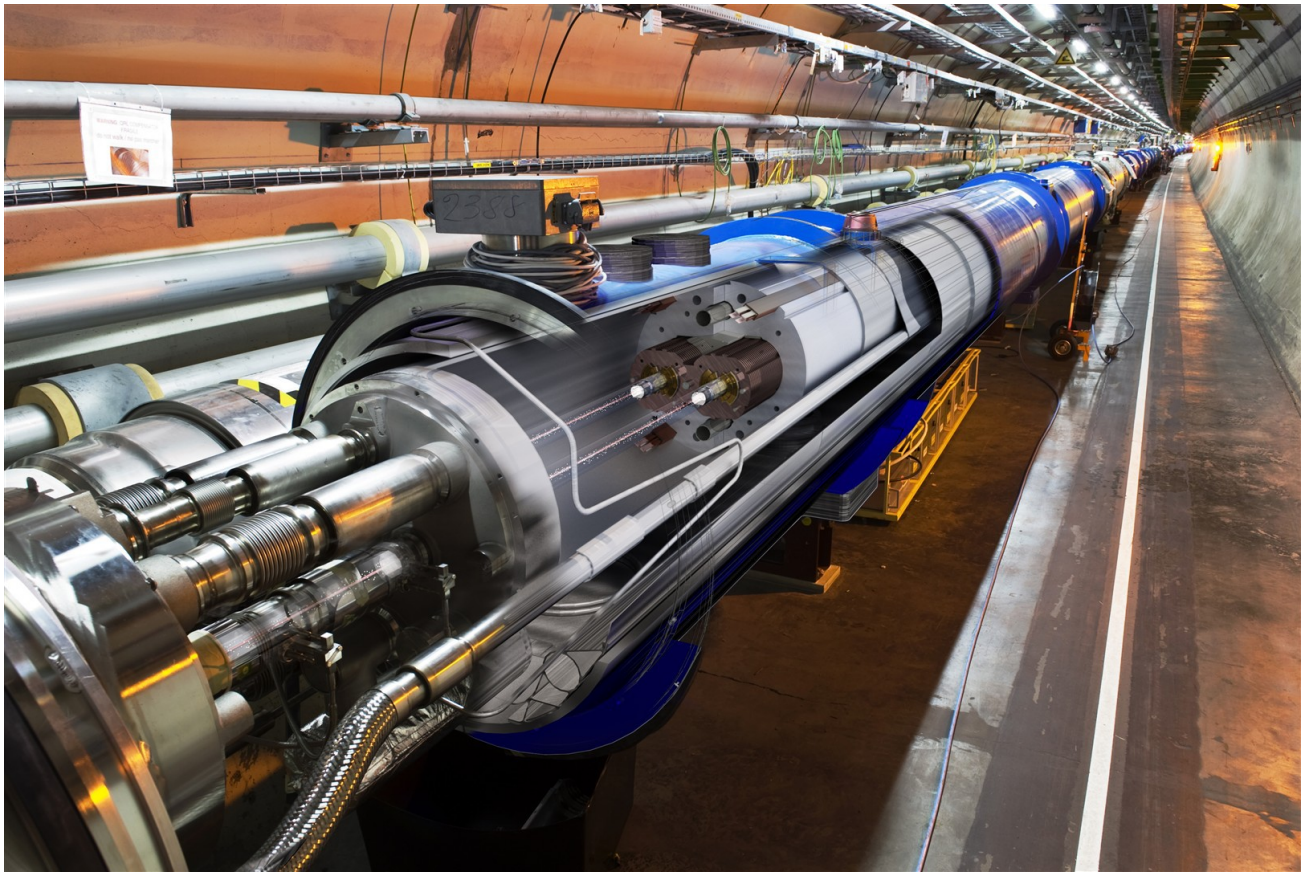
→ Light Higgs favored

Tevatron provides:
Precision measurements of m_{top} & M_W
and
Direct searches:
→ SM Higgs
→ non-SM Higgs

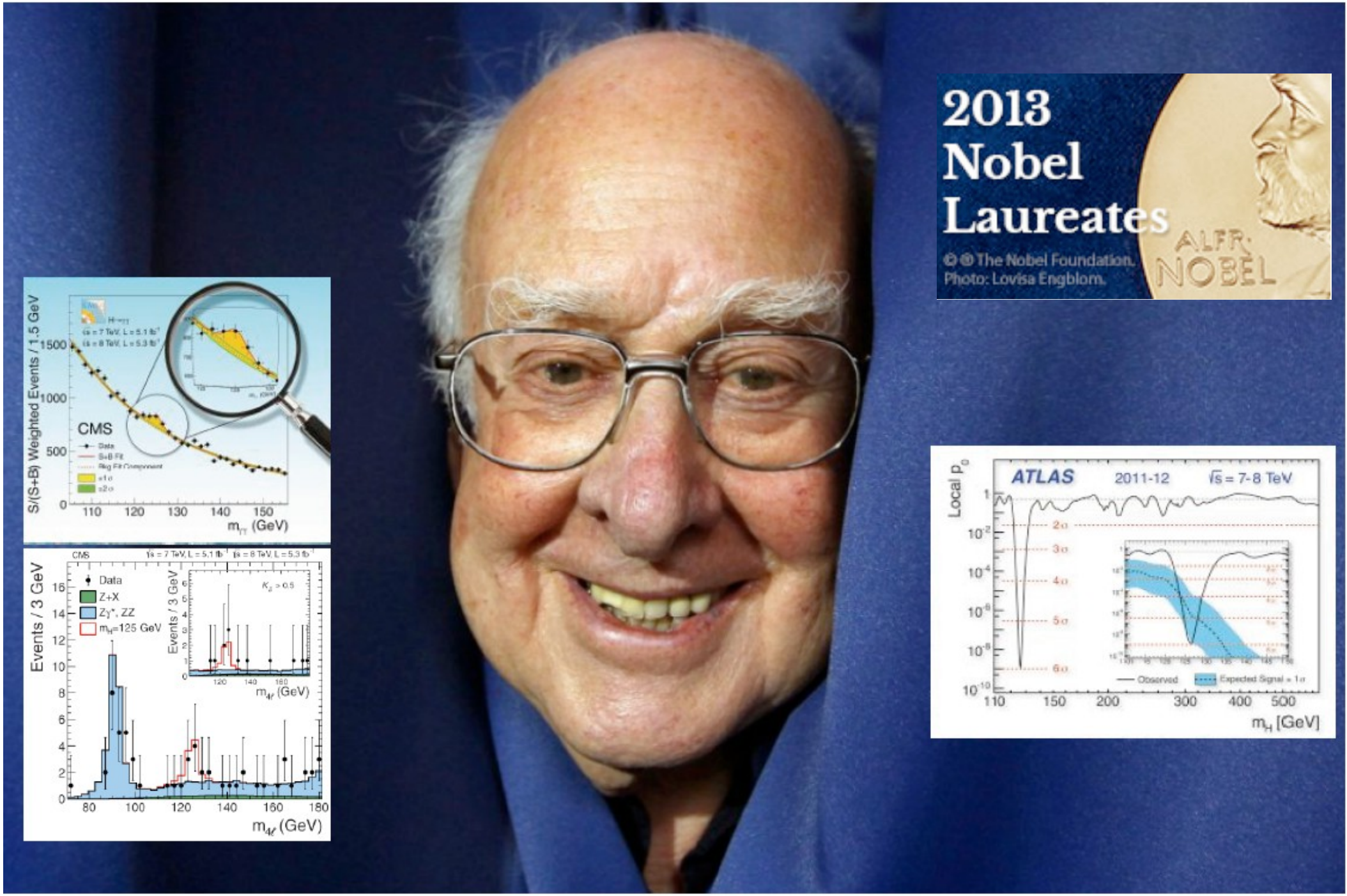




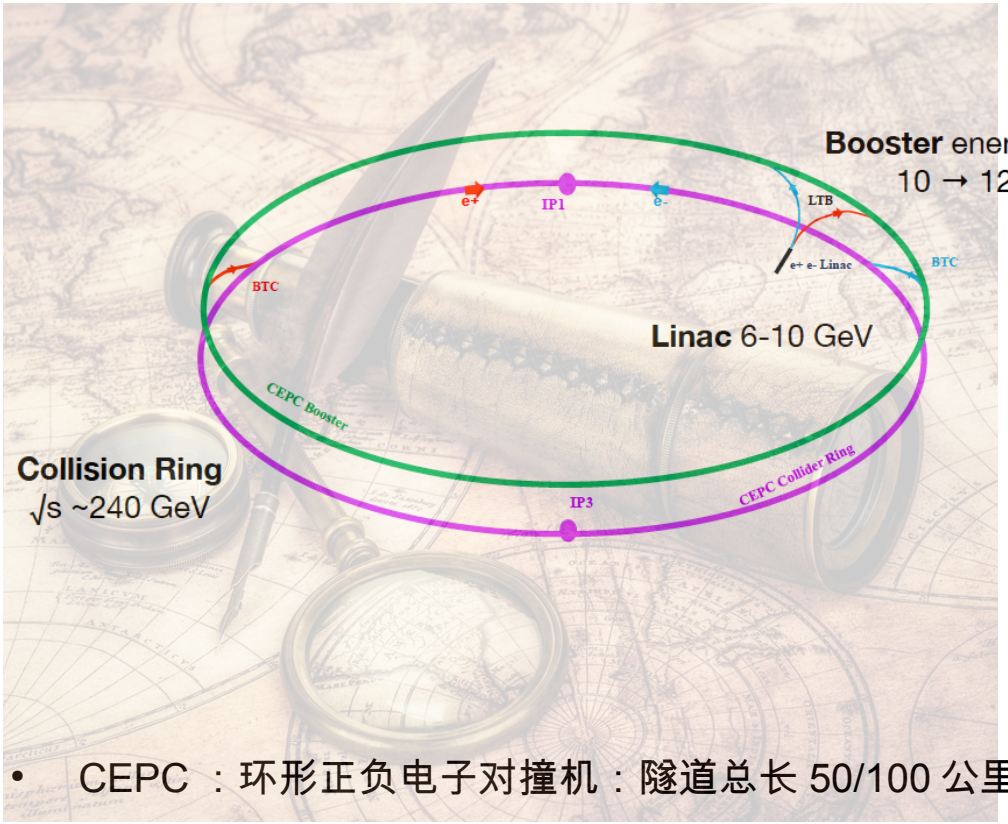
直接测量：航船

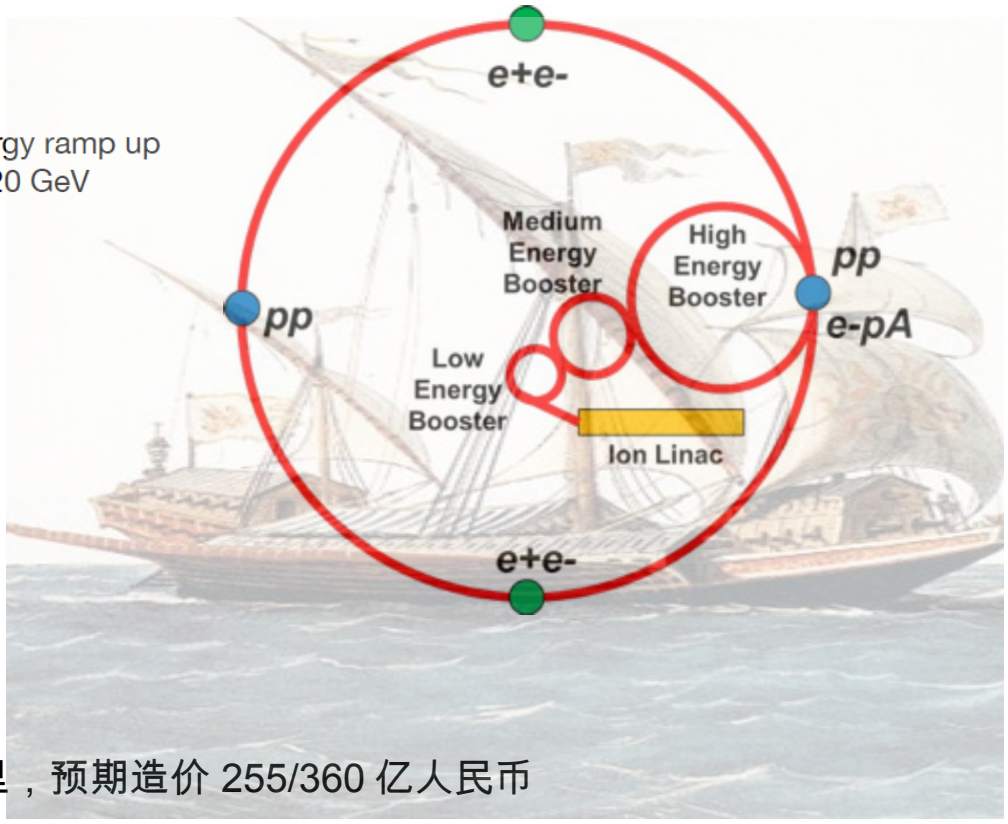


将对撞能量提高到目标能区，直接产生新粒子、观测新现象


2013
Nobel
Laureates
© The Nobel Foundation.
Photo: Lovisa Engblom.
ALFR.
NOBEL
CMS
S/(S+B) Weighted Events / 1.5 GeV
$m_{\gamma\gamma}$ (GeV)
CMS
Data
Z+X
$Z\gamma^*$, ZZ
m_H=125 GeV
Events / 3 GeV
$m_{4\ell}$ (GeV)
ATLAS
2011-12
$\sqrt{s}$ = 7-8 TeV
Local p_0
Observed
Expected Signal + 1σ
m_H [GeV]

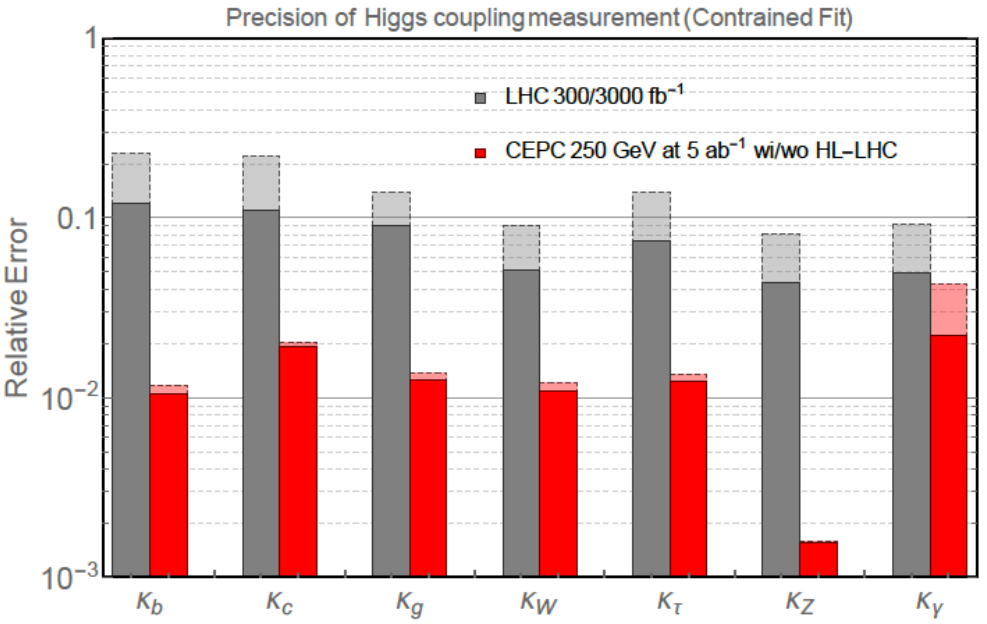
CEPC-SPPC

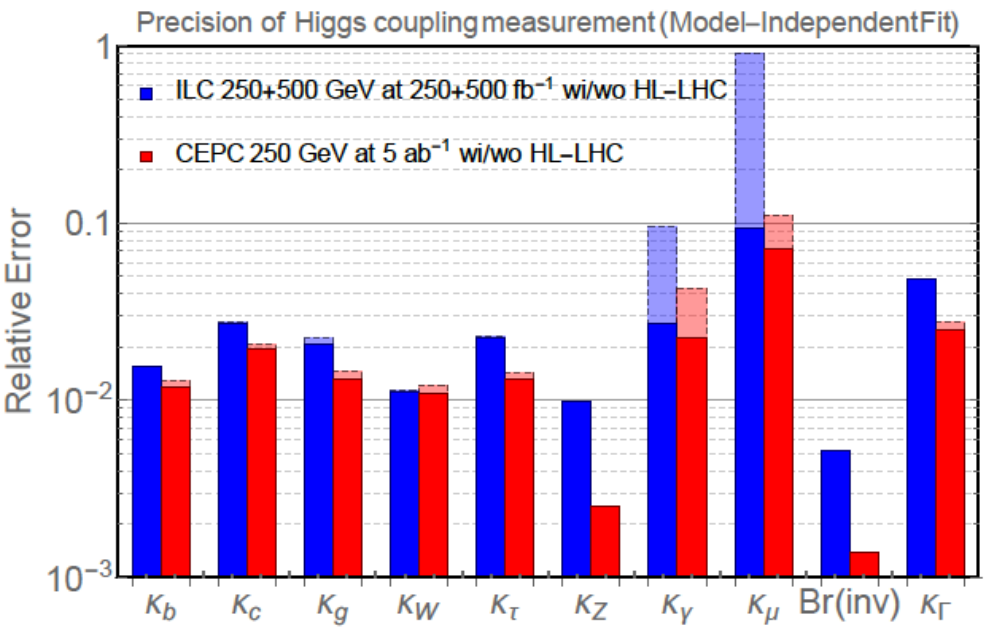




- CEPC ：环形正负电子对撞机：隧道总长 50/100 公里，预期造价 255/360 亿人民币
  - Higgs 工厂：一百万干净的 Higgs 事例
  - EW 精细测量： 100 亿 Z 粒子
  - 可能的新物理搜索：暗物质， Exotic Higgs 衰变， Higgs 宽度
- 未来升级： SPPC ，超级质子对撞机。对撞能量及造价取决于磁铁研究的进展。预期质心能量 100 TeV 量级

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: $10^{7\text{-}8}$	~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	~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

Higgs 粒子和暗物质

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

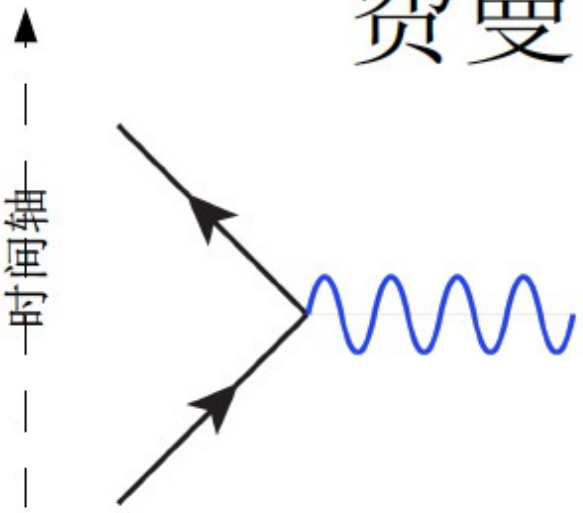
- *Higgs 粒子的宽度可被 CEPC 测量至 3% 的相对精度：对任意导致 Higgs 粒子衰变行为发生变化的新物理信号敏感*

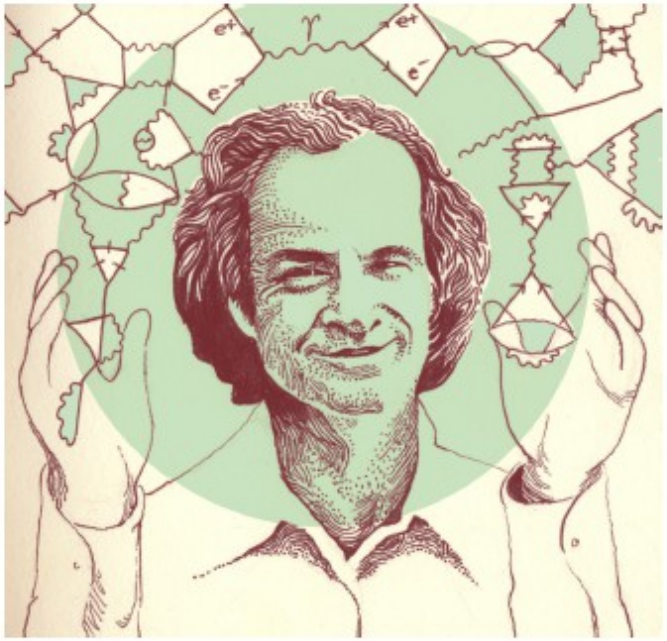

CEPC ：全新的海图
额外维
暗物质
组分 Higgs 模型
真空相变
超对称
…
也许：未知的新大陆？


Higgs 粒子，21 世纪粒子物理学大厦上的乌云
我们期待针对 Higgs 的探索将带来的全新知识
也期待着这些知识蕴藏的无限可能
愿探索的小船一往无前

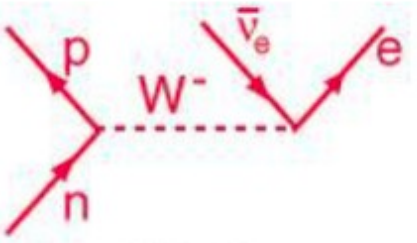
谢谢大家

费曼图：定域相互作用

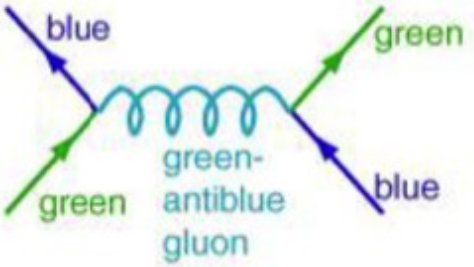




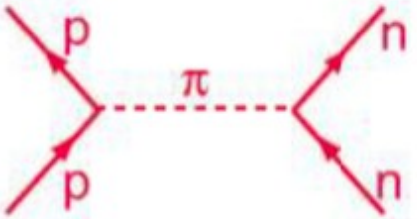
Electromagnetic Interaction



Weak Interaction



between quarks



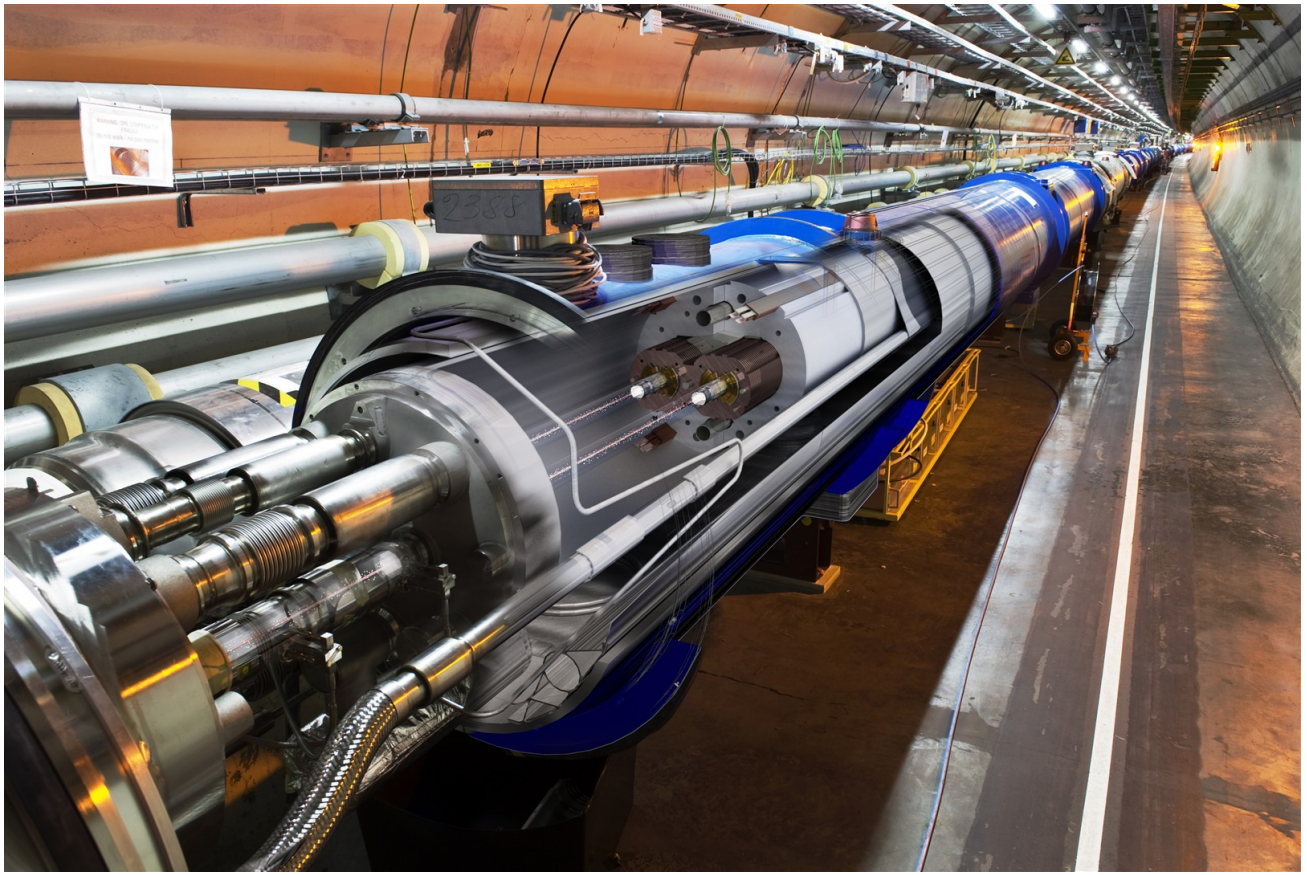
between nucleons

Strong Interaction

定域相互作用：
相互作用发生在一个时间，一个地点

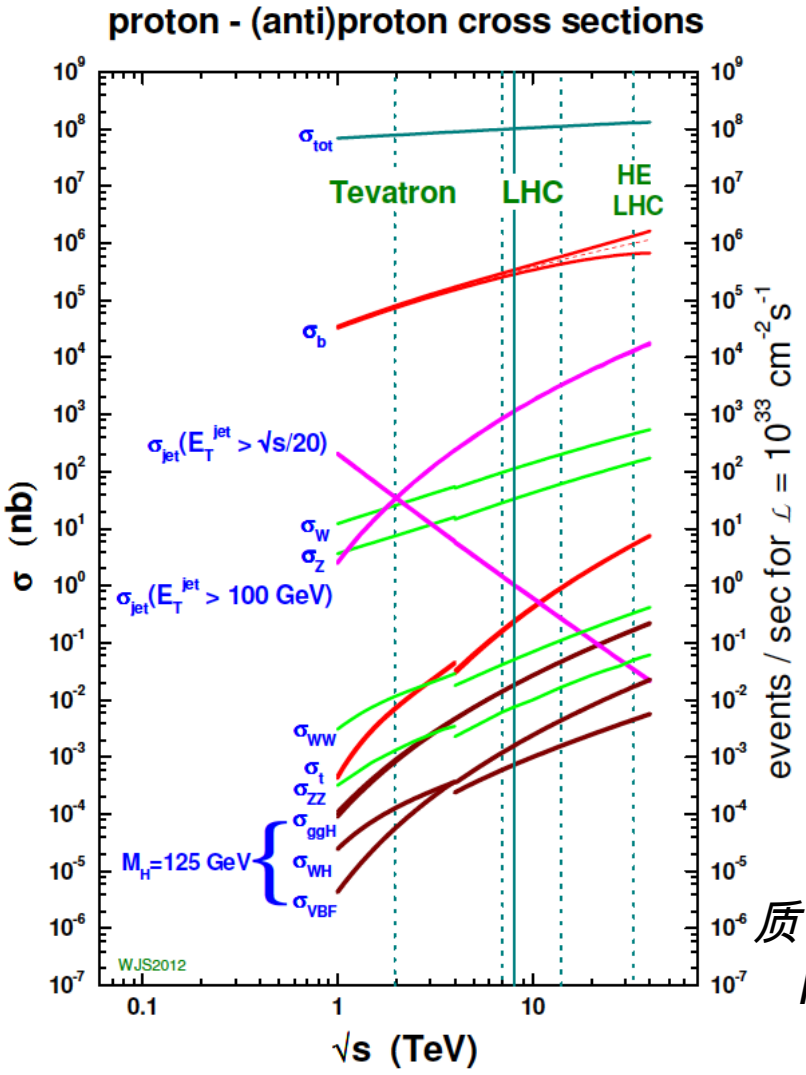
天问

Higgs discovery at LHC



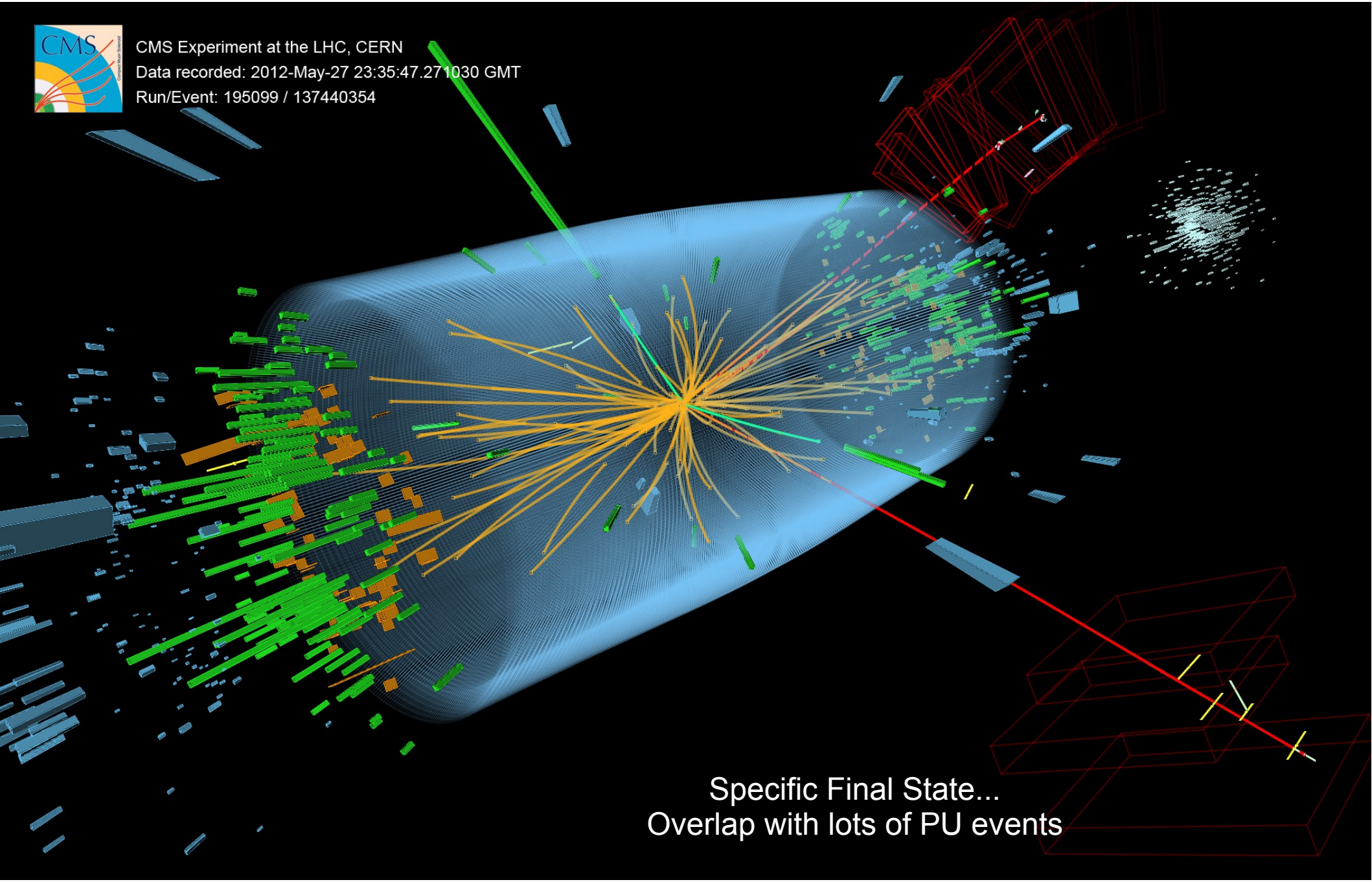
将对撞能量提高到感兴趣的能区，直接产生新粒子、观测新现象

Higgs @ LHC



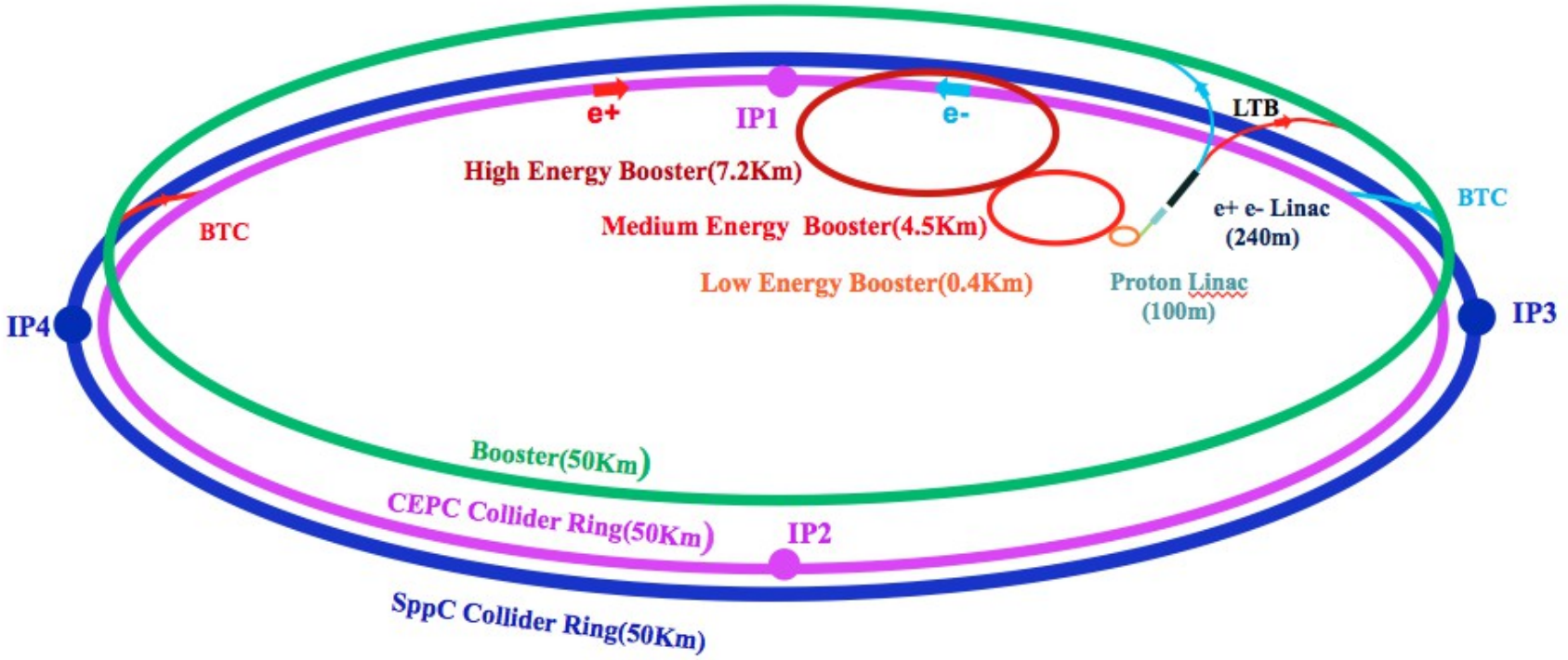
质子对撞机：Higgs 粒子产额很高（LHC 上已产生 100 万 Higgs 粒子），然而探测效率极低，无法实现绝对测量

海量本底：约 100 亿次对撞中产生一个 Higgs 粒子

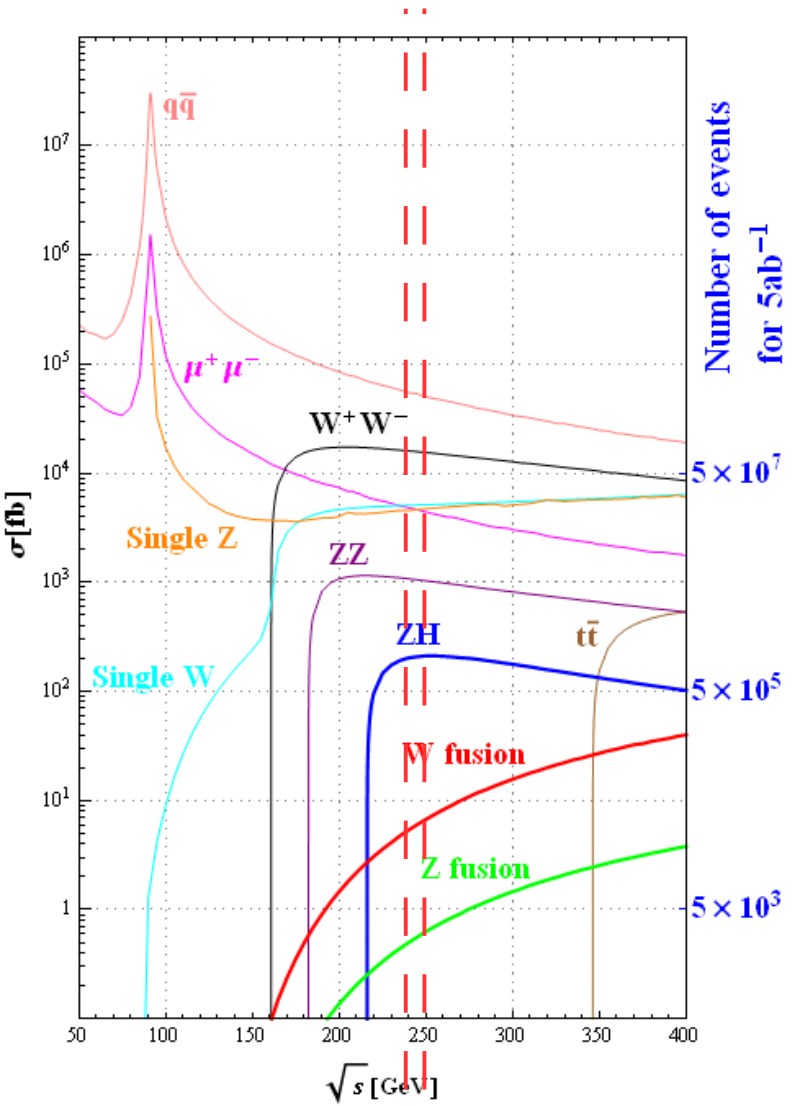

CMS Experiment at the LHC, CERN
Data recorded: 2012-May-27 23:35:47.271030 GMT
Run/Event: 195099 / 137440354
Specific Final State...
Overlap with lots of PU events

CEPC: a precise Higgs factory

- Higgs mass ~ 125 GeV, it is possible to build a Circular e+e- Higgs factory (CEPC), followed by a proton collider (SPPC) in the same tunnel
- Looking for Hints (from Higgs) at CEPC → direct search at SPPC
- CEPC: 1 M Higgs boson + 10 Billion Z bosons...



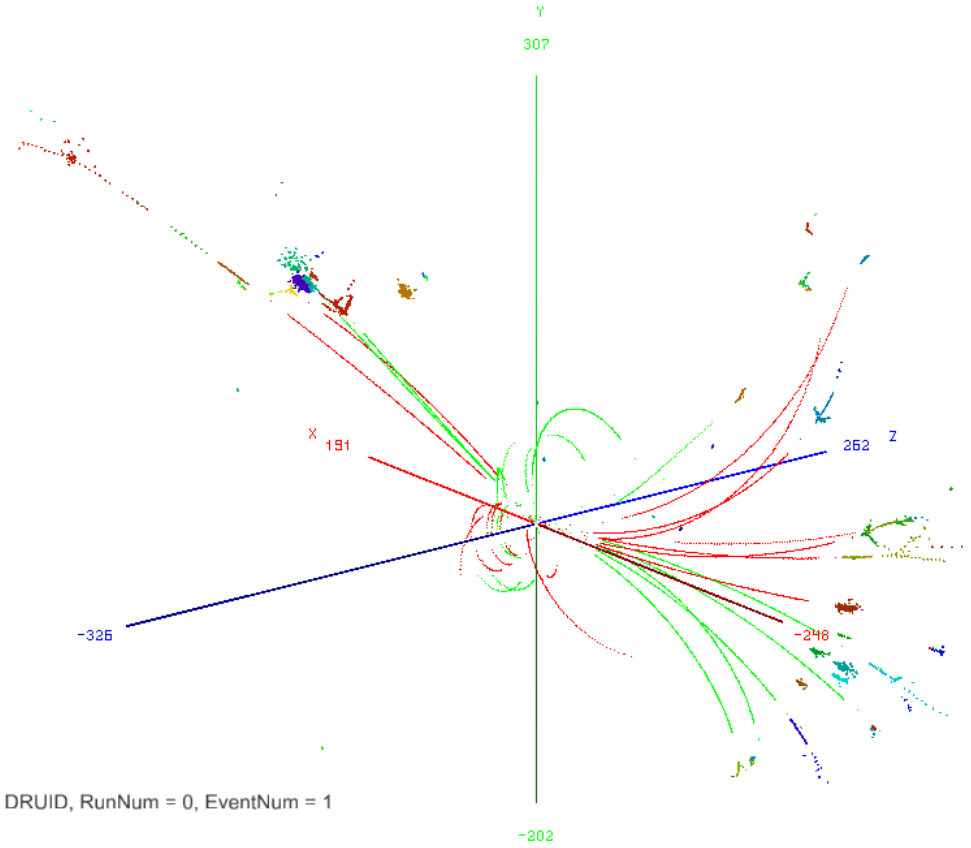
Higgs @ CEPC

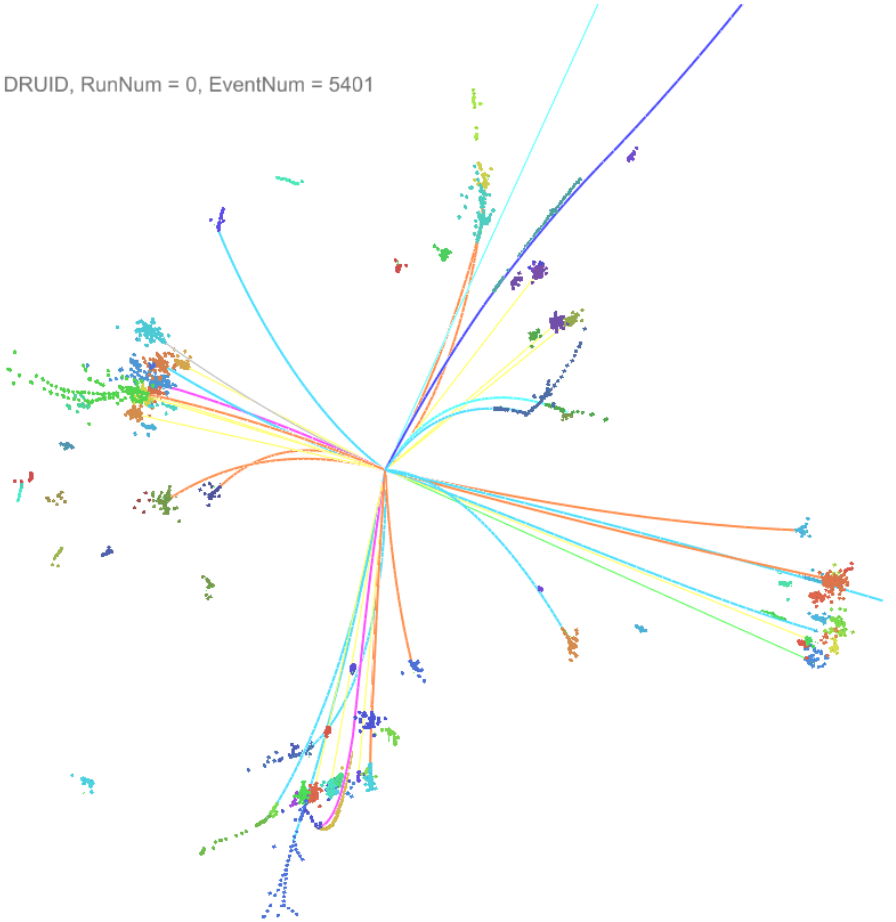


干净：每 1000 个事例中产生一个 Higgs

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）





Sim Higgs @ CEPC

标准模型的拉氏量

$$
\begin{aligned}
\mathcal{L} \;=\; & -\frac{1}{4}B_{\mu\nu}B^{\mu\nu} - \frac{1}{8}tr(\mathbf{W}_{\mu\nu}\mathbf{W}^{\mu\nu}) - \frac{1}{2}tr(\mathbf{G}_{\mu\nu}\mathbf{G}^{\mu\nu}) && \text{(U(1), SU(2) and SU(3) gauge terms)} \\
& +(\bar{\nu}_L, \bar{e}_L)\,\tilde{\sigma}^{\mu} i D_{\mu} \begin{pmatrix} \nu_L \\ e_L \end{pmatrix} + \bar{e}_R \sigma^{\mu} i D_{\mu} e_R + \bar{\nu}_R \sigma^{\mu} i D_{\mu} \nu_R + (\text{h.c.}) && \text{(lepton dynamical term)} \\
& -\frac{\sqrt{2}}{v}\left[(\bar{\nu}_L, \bar{e}_L)\,\phi M^{e} e_R + \bar{e}_R \bar{M}^{e} \bar{\phi} \begin{pmatrix} \nu_L \\ e_L \end{pmatrix}\right] && \text{(electron, muon, tauon mass term)} \\
& -\frac{\sqrt{2}}{v}\left[(-\bar{e}_L, \bar{\nu}_L)\,\phi^{*} M^{\nu} \nu_R + \bar{\nu}_R \bar{M}^{\nu} \phi^{T} \begin{pmatrix} -e_L \\ \nu_L \end{pmatrix}\right] && \text{(neutrino mass term)} \\
& +(\bar{u}_L, \bar{d}_L)\,\tilde{\sigma}^{\mu} i D_{\mu} \begin{pmatrix} u_L \\ d_L \end{pmatrix} + \bar{u}_R \sigma^{\mu} i D_{\mu} u_R + \bar{d}_R \sigma^{\mu} i D_{\mu} d_R + (\text{h.c.}) && \text{(quark dynamical term)} \\
& -\frac{\sqrt{2}}{v}\left[(\bar{u}_L, \bar{d}_L)\,\phi M^{d} d_R + \bar{d}_R \bar{M}^{d} \bar{\phi} \begin{pmatrix} u_L \\ d_L \end{pmatrix}\right] && \text{(down, strange, bottom mass term)} \\
& -\frac{\sqrt{2}}{v}\left[(-\bar{d}_L, \bar{u}_L)\,\phi^{*} M^{u} u_R + \bar{u}_R \bar{M}^{u} \phi^{T} \begin{pmatrix} -d_L \\ u_L \end{pmatrix}\right] && \text{(up, charmed, top mass term)} \\
& +\overline{(D_{\mu}\phi)} D^{\mu}\phi - m_h^2[\bar{\phi}\phi - v^2/2]^2/2v^2. && \text{(Higgs dynamical and mass term)} \qquad (1)
\end{aligned}
$$

Higgs 粒子同标准模型中的参数

- 9 fermion masses (+ 3 m_ν)
- 3 CKM mixing angles + 1 phase (+ 3+1 for $m_\nu \neq 0$)
- 1 electromagnetic coupling constant α
- 1 strong coupling constant α_s
- 1 weak coupling constant $G_F = 1.16637(1) \times 10^{-5}\,\mathrm{GeV}^{-2}$
- 1 Z^0 mass $m_Z = 91.1876(21)\ \mathrm{GeV}/c^2$
- 1 Higgs mass

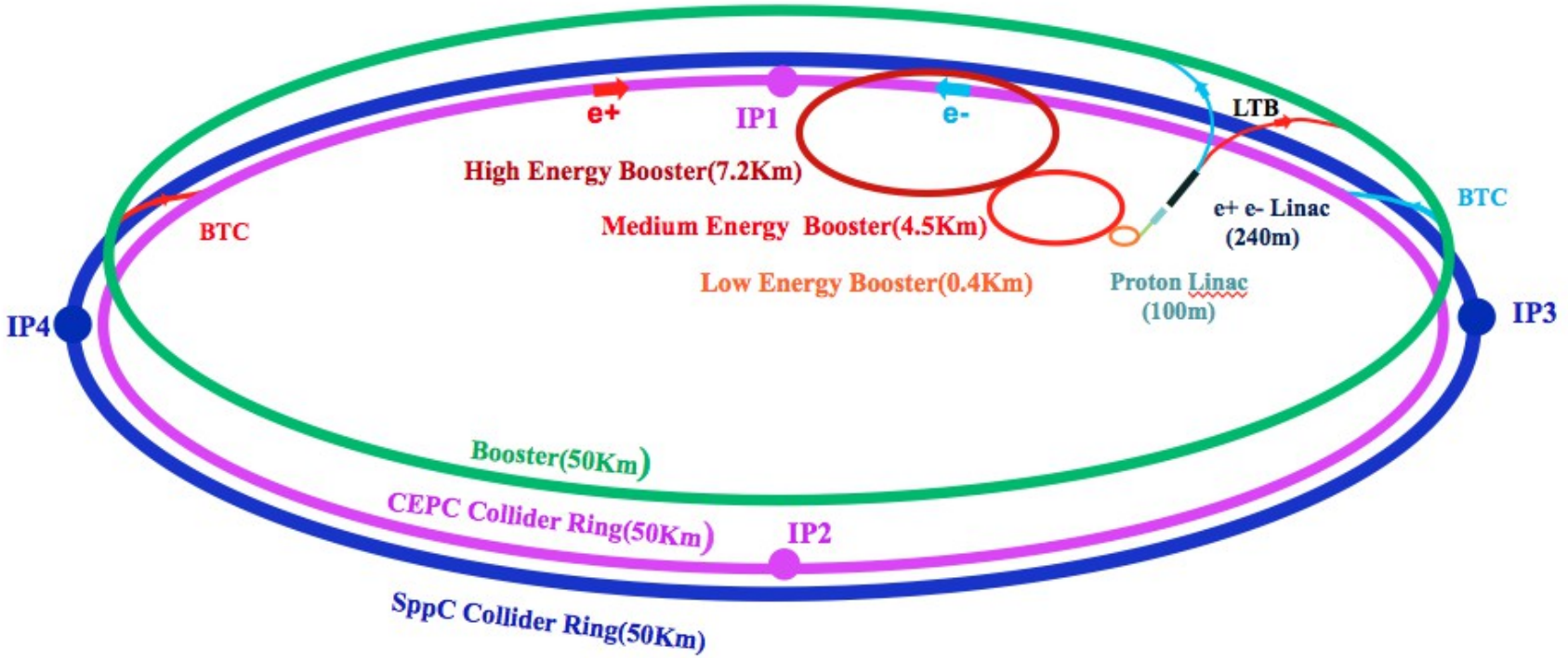
标准模型中唯一的标量粒子

同绝大多数 标准模型参数 以及

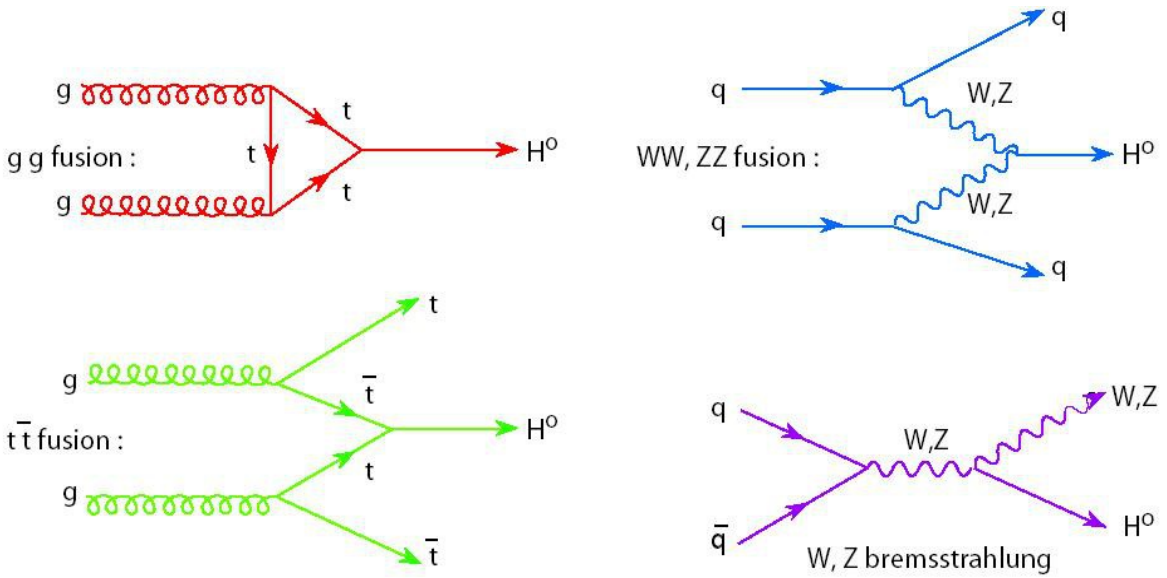
理论疑难直接相关

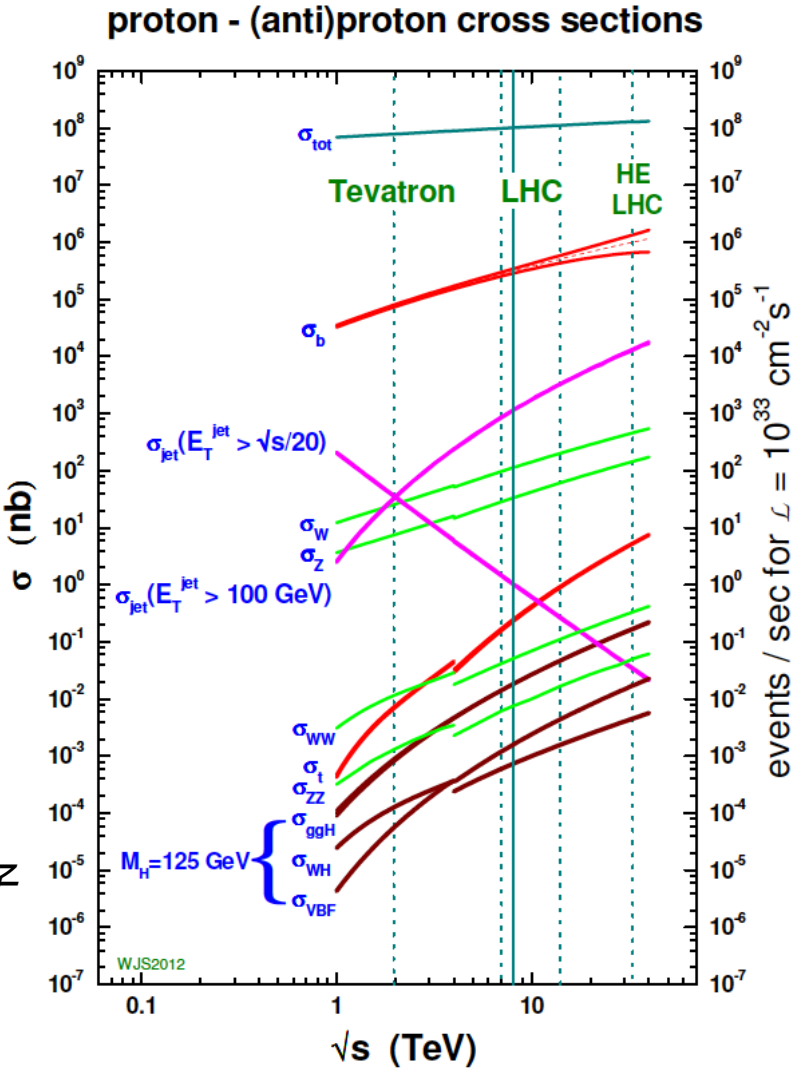
Key: a precise Higgs factory

- Higgs mass ~ 125 GeV, it is possible to build a Circular e+e- Higgs factory (CEPC), followed by a proton collider (SPPC) in the same tunnel
- Looking for Hints (from Higgs) at CEPC → direct search at SPPC



Higgs @ LHC



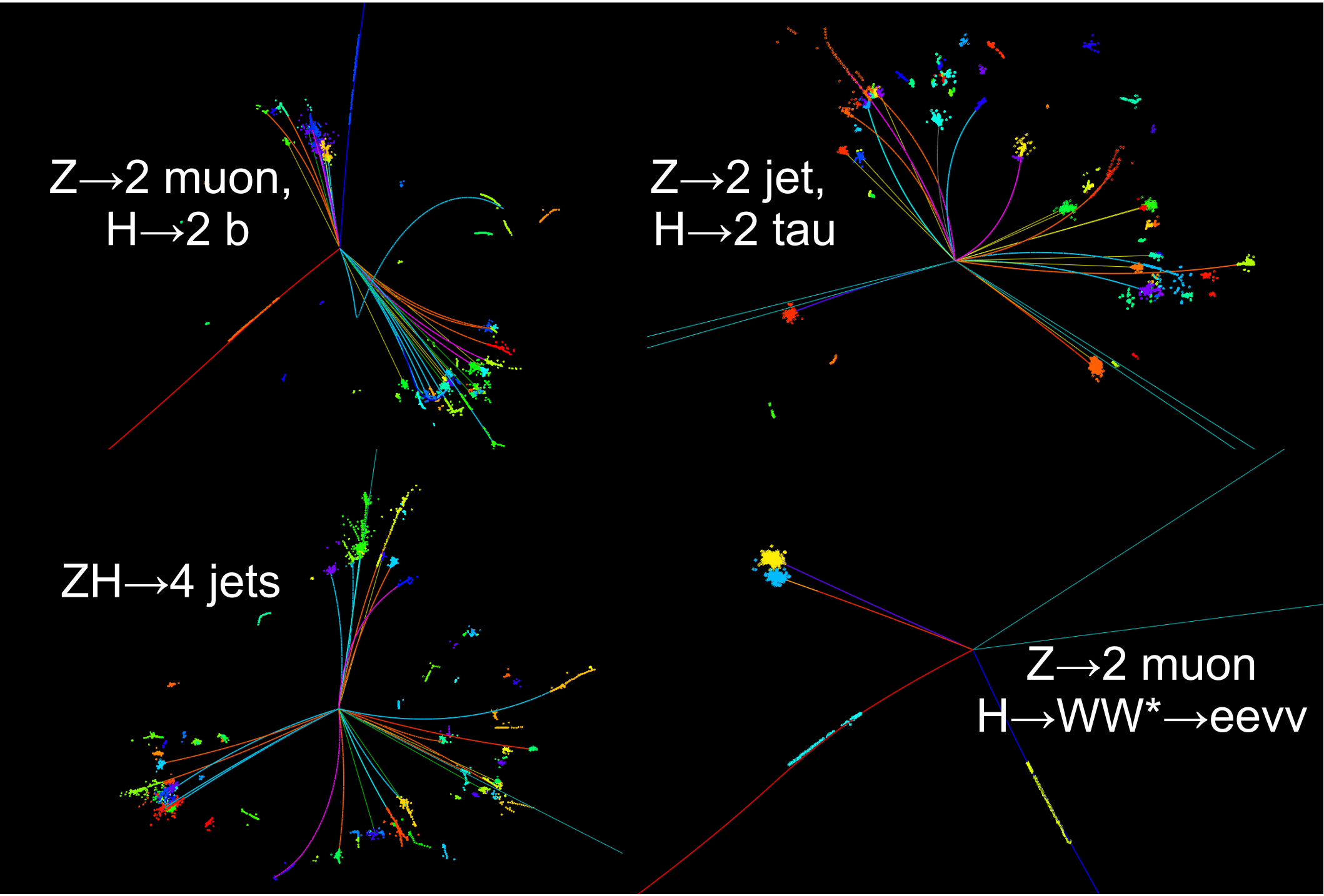


质子对撞机：Higgs 粒子产额很高（ LHC 上已产生 100 万量级的 Higgs 粒子），然而探测效率极低

海量本底：约 100 亿 -1000 亿次对撞中只要一个 Higgs 粒子

无法实现绝对测量

$$\sigma(AA \to H \to BB) \sim g^2(HAA) g^2(HBB) / \Gamma_{total}$$


Z→2 muon,
H→2 b
Z→2 jet,
H→2 tau
ZH→4 jets
Z→2 muon
H→WW*→eevv