

A complex visualization of particle tracks, likely from a particle detector. The tracks are represented by numerous thin, colored lines (blue, green, yellow, orange, red, purple) that radiate from a central point. Some tracks are straight, while others are curved or branched. The tracks are overlaid with clusters of small, colored dots, suggesting interaction points or decay products. The overall appearance is that of a high-energy particle collision event.

希格斯玻色子、Higgs 工厂以及 环形正负电子对撞机简介

阮曼奇



世界是由什么组成的？

世界是怎样运行的？

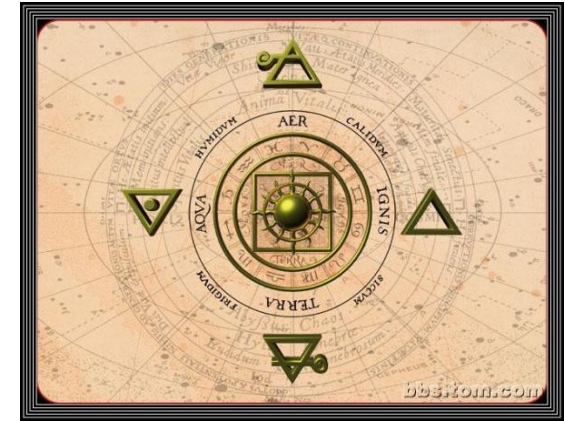
...

希腊

芝诺（-490 → -425 年）：空间是无限可分的（连续的）

德谟克里特（~-460 → -370 年）：世界是由空虚的空间和无数不能再分的、看不见的微小原子组成的

亚里士多德（-384 → -322 年）：物质是由水气火土四种元素组成，天体由第五种元素“以太”构成。



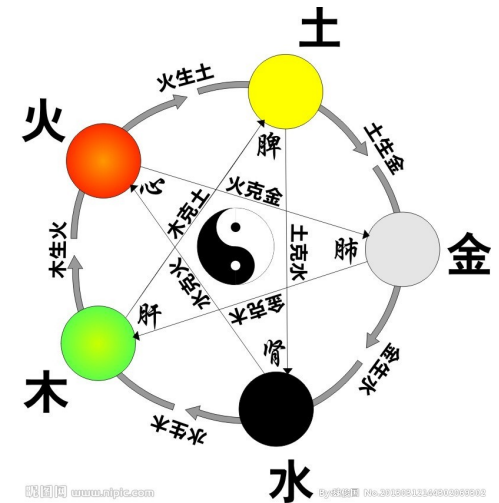
中国

老子（~-571 → -471 年）：道生一，一生二，二生三，三生万物

左丘明（~-566 → -451 年）：以土与金、木、水、火杂以成百物
《国语·郑语》

庄子（~-369 → -286 年）：一尺之棰，日取其半，万世不竭

...



...

1803, 道尔顿
原子说

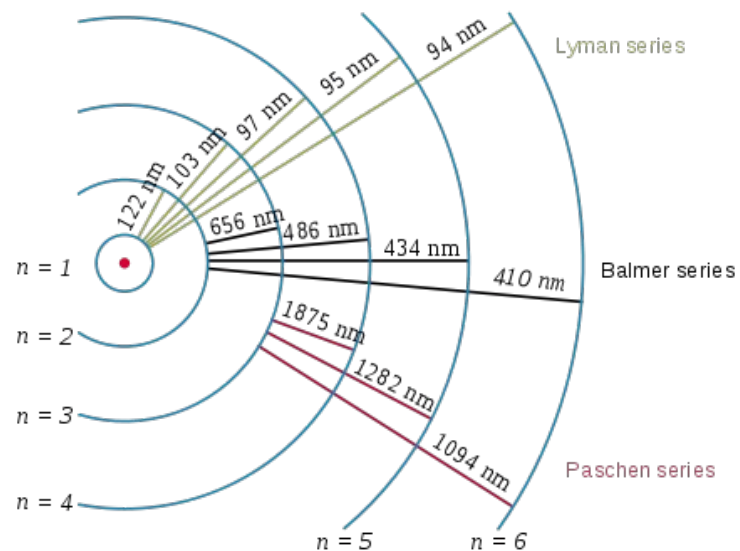
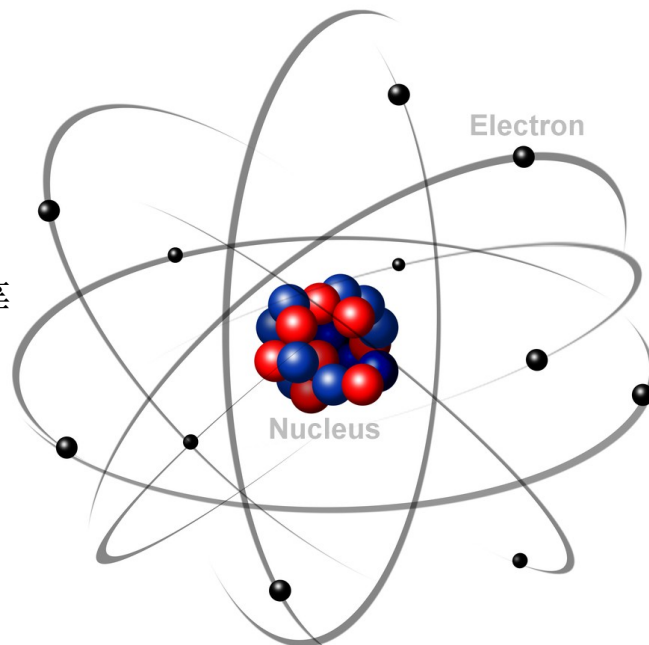
1811, 阿伏伽德罗等
分子说

1869, 门捷列夫
元素周期表

1905, 卢瑟福
原子核

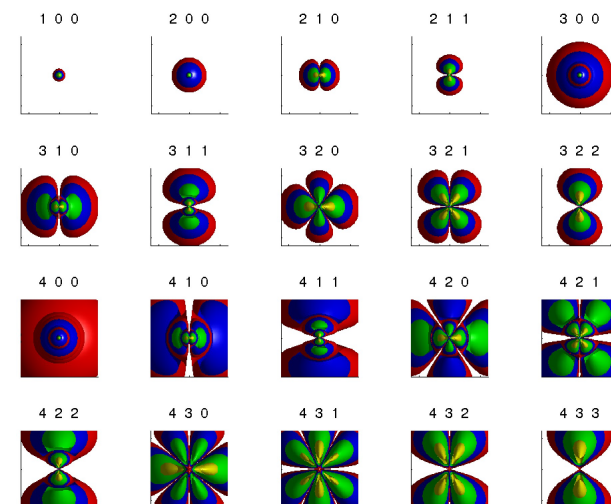
1913, 玻尔
氢原子模型

...



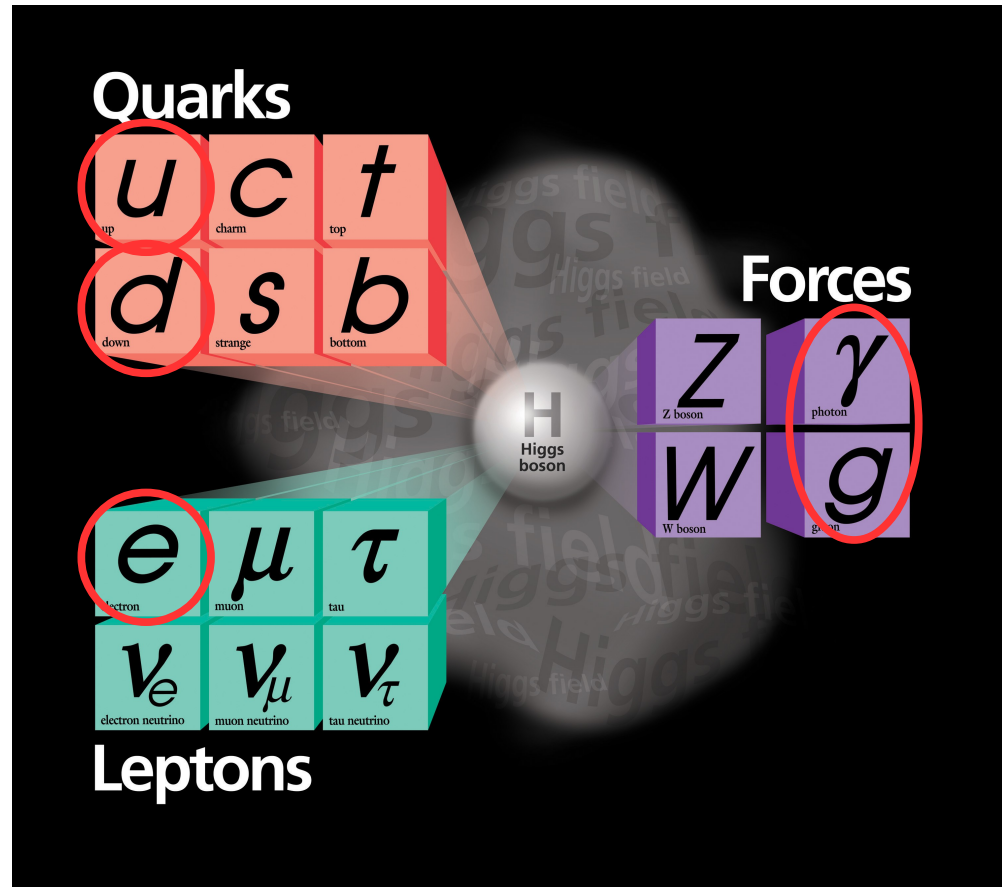
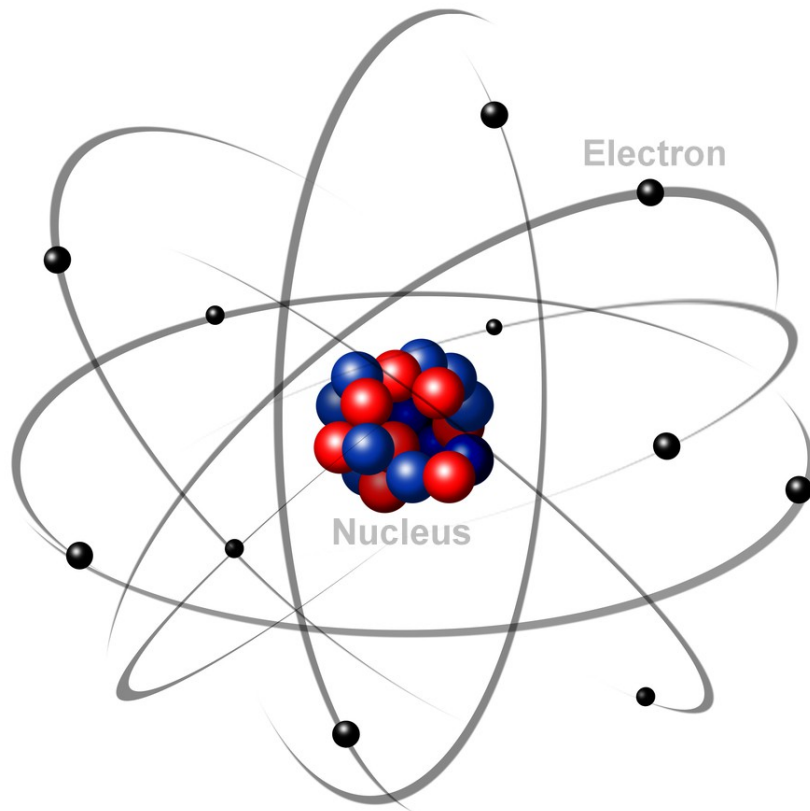
Periodic Table of the Elements

<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div> <p>atomic number</p> <p>atomic weight</p> <p>symbol: <chem>Si</chem></p> <p>name: Silicon</p> <p>state: solid</p> <p>color: blue</p> <p>group: 14</p> <p>period: 3</p> <p>W/Ab: synthetically prepared with stable isotope</p> </div> <div> <p>alkali metals</p> <p>alkaline earth metals</p> <p>transitional metals</p> <p>other metals</p> <p>nonmetals</p> <p>noble gases</p> </div> </div>																		
1	2																	10
3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	
39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	
57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	
75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	
93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	
111	112	113	114	115	116	117	118	119	120									
121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	
139	140	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150	151	152	153	154	155	156	
157	158	159	160	161	162	163	164	165	166	167	168	169	170	171	172	173	174	
175	176	177	178	179	180	181	182	183	184	185	186	187	188	189	190	191	192	



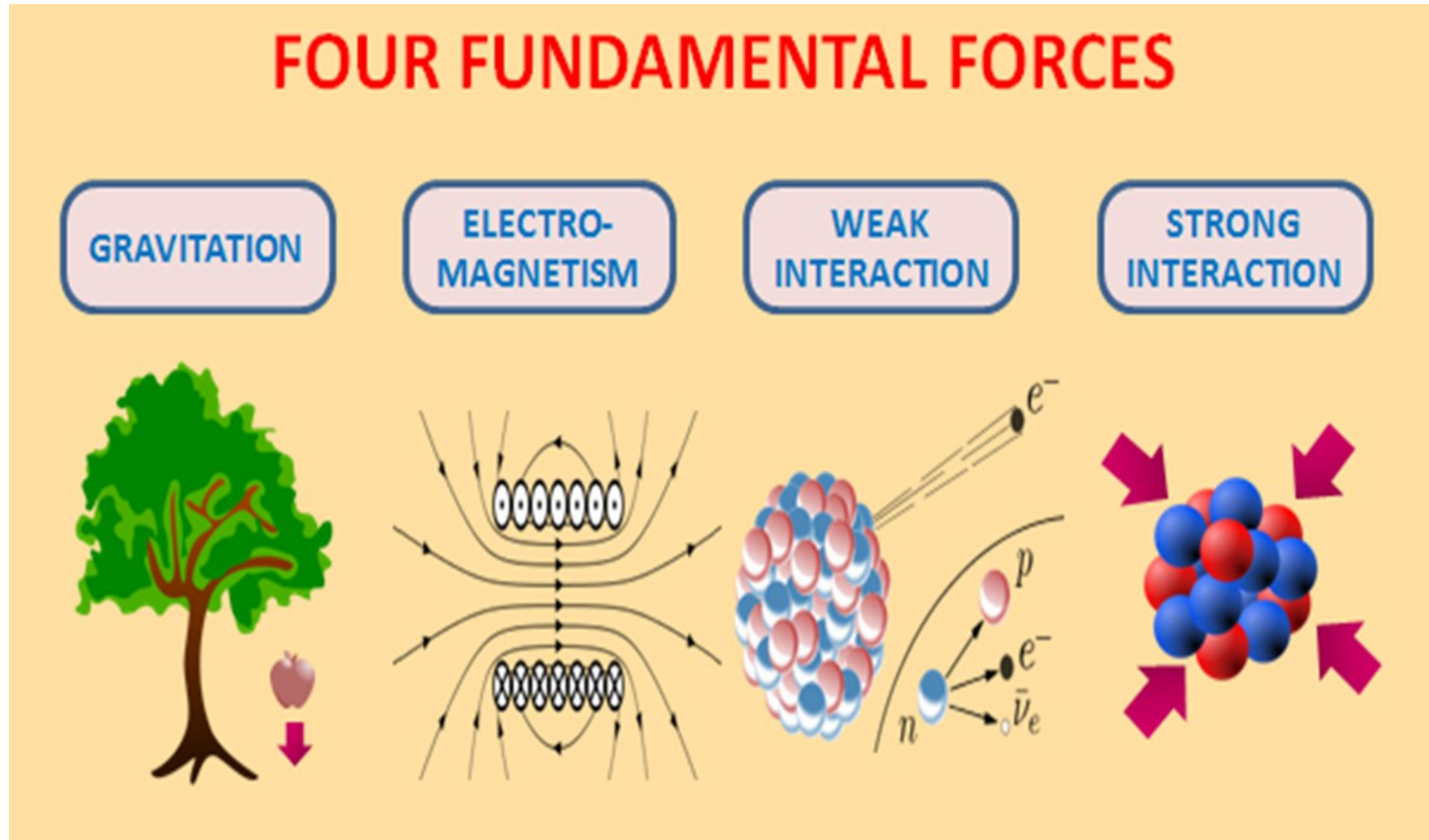
对物质结构的不断探索，奠定了今天文明和技术的基础

标准模型：组元



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（ $\sim 1/3$ 的物理学诺奖）

运行规律：四大相互作用



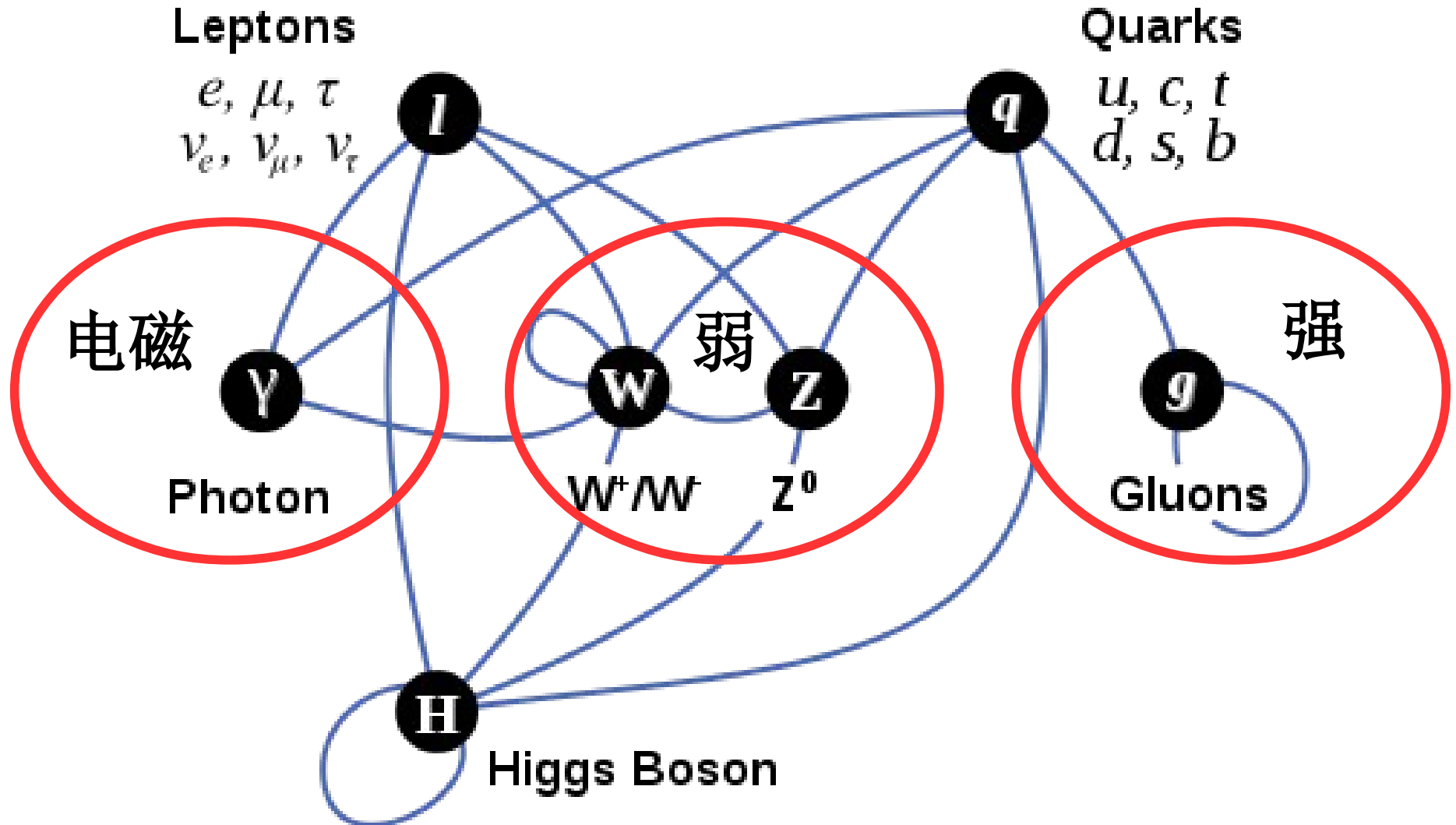
引力

电磁力

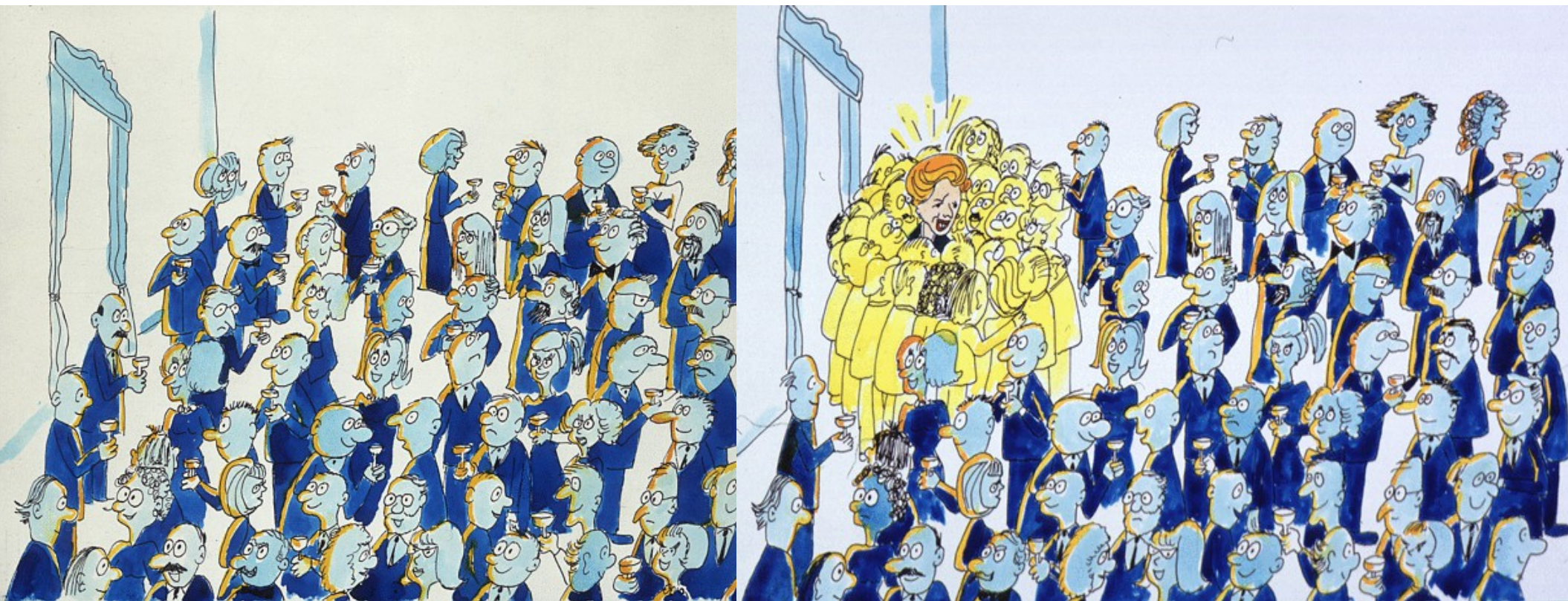
弱力

强力

标准模型中的相互作用



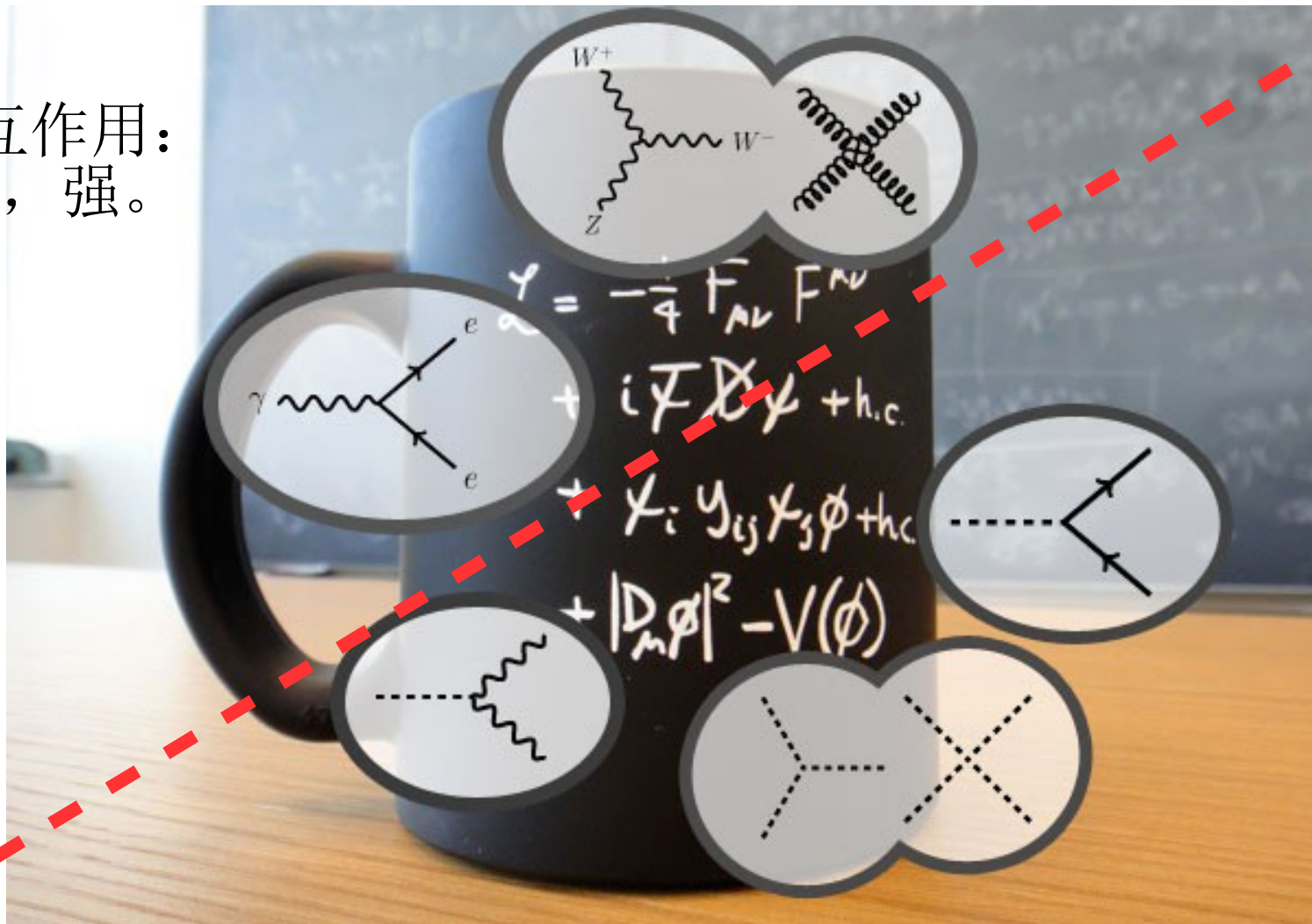
Higgs 场：在宇宙中无处不在



通过相互作用给予其他粒子质量

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

标准模型的拉氏量

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

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 $G_F = 1.16637(1) \times 10^{-5} \text{ GeV}^{-2}$
- ◆ 1 Z^0 mass $m_Z = 91.1876(21) \text{ GeV}/c^2$
- ◆ 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

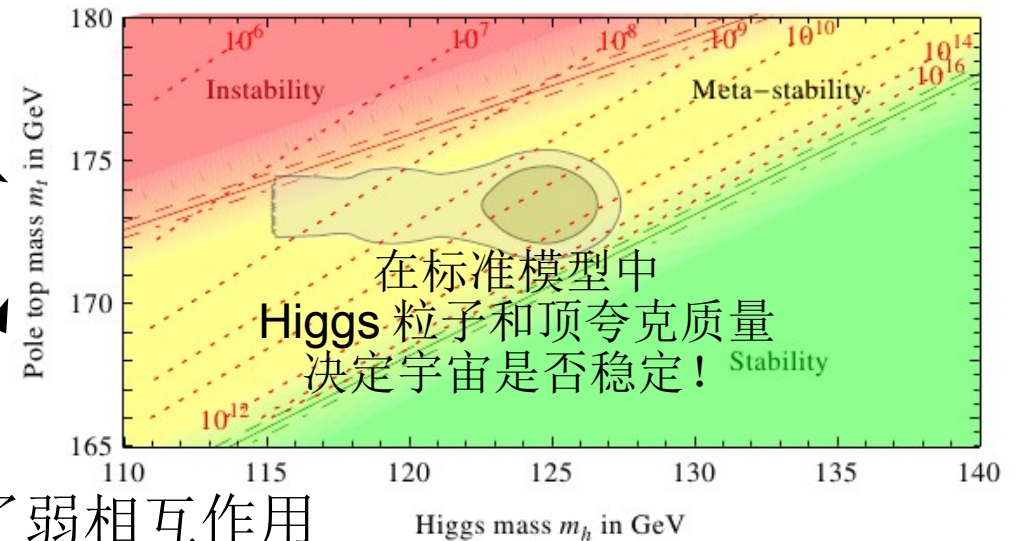
Higgs 粒子：新的相互作用

- Yukawa 相互作用：决定费米子的质量，

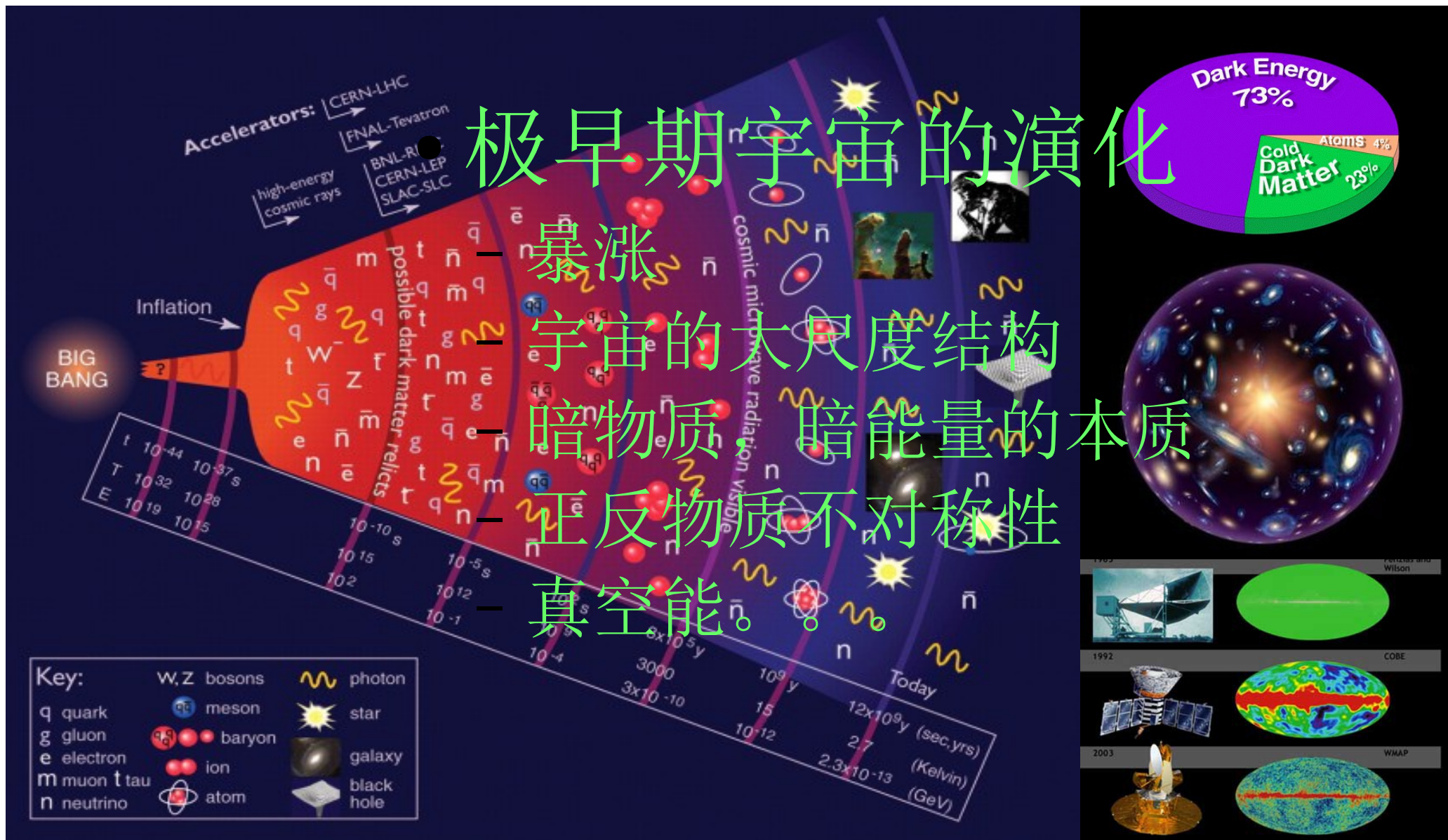
- 可能参与决定了质子和中子的质量差，保证质子的稳定性
- 决定了电子的质量 - 决定了原子的大小
- 决定了顶夸克的质量
- ...

- 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
- ...



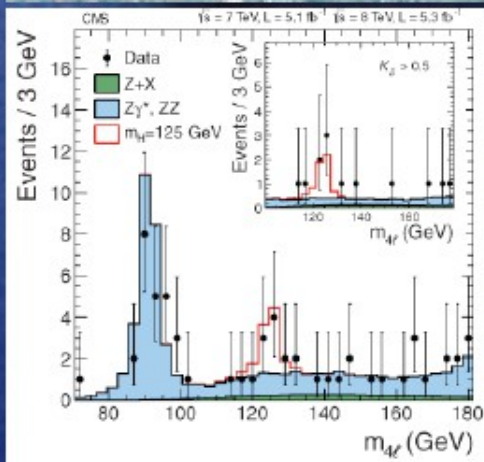
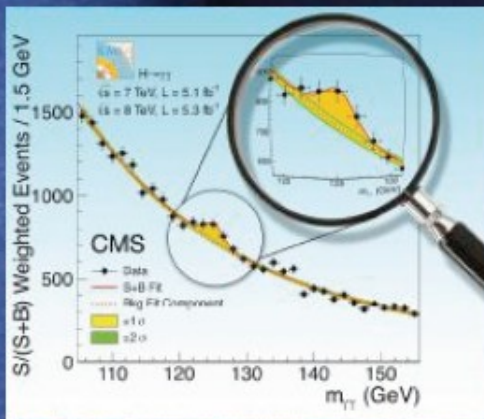
标准模型无法解释的谜团



Higgs 粒子： 极端重要 + 重重谜团

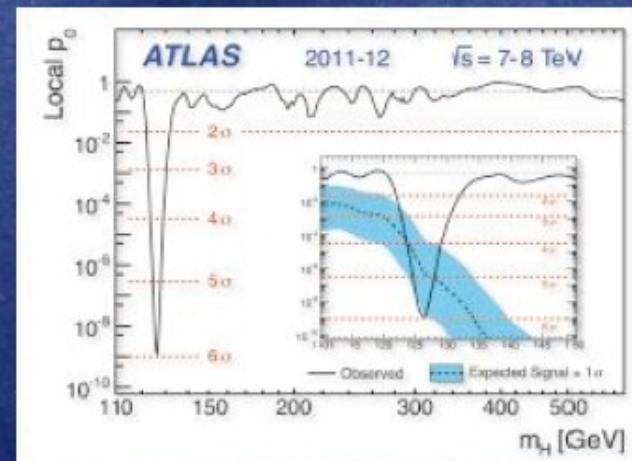
- 唯一的标量粒子
- 同标准模型的绝大部分自由参数和理论疑难相关
- 决定了不同于四大相互作用的基本相互作用
- 决定了宇宙的面貌和宇宙的宿命
- ...
- **可能**同宇宙极早期的演化行为相关
- ...





2013 Nobel Laureates

© The Nobel Foundation.
Photo: Lovisa Engblom.



An iceberg floating in a blue ocean under a blue sky with light clouds. The visible tip of the iceberg is small and jagged, while the submerged part is much larger and more complex. The word "Higgs" is written in orange text across the submerged part of the iceberg.

Higgs

为什么这么能干？
本质是什么？

对撞机

为了精确研究 Higgs 粒子性质，我们需要通过对撞机产生足够多的 Higgs 粒子 - Higgs 工厂

加速器将粒子加速到很高的能量，

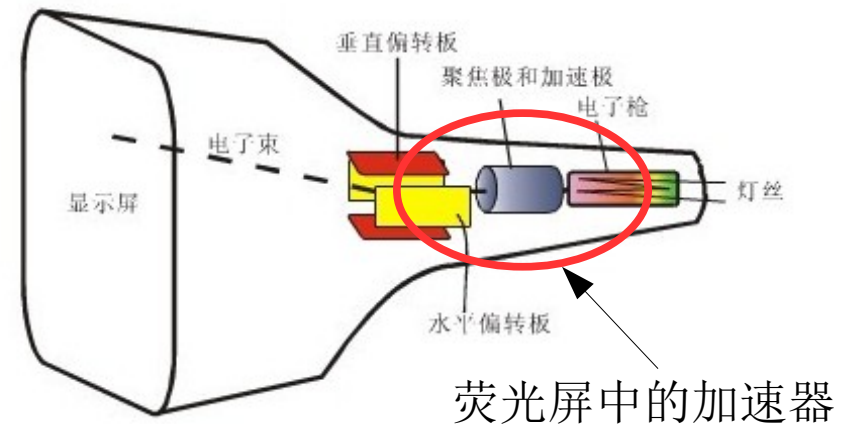
并将粒子束团压缩到很小的尺寸，

以产生大量的对撞事例，

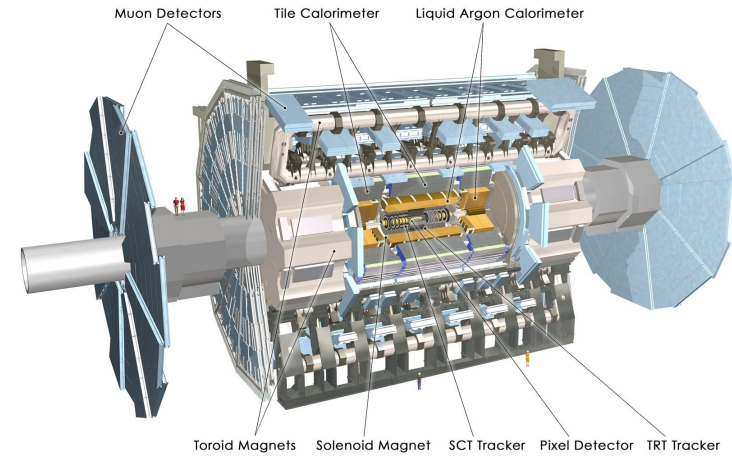
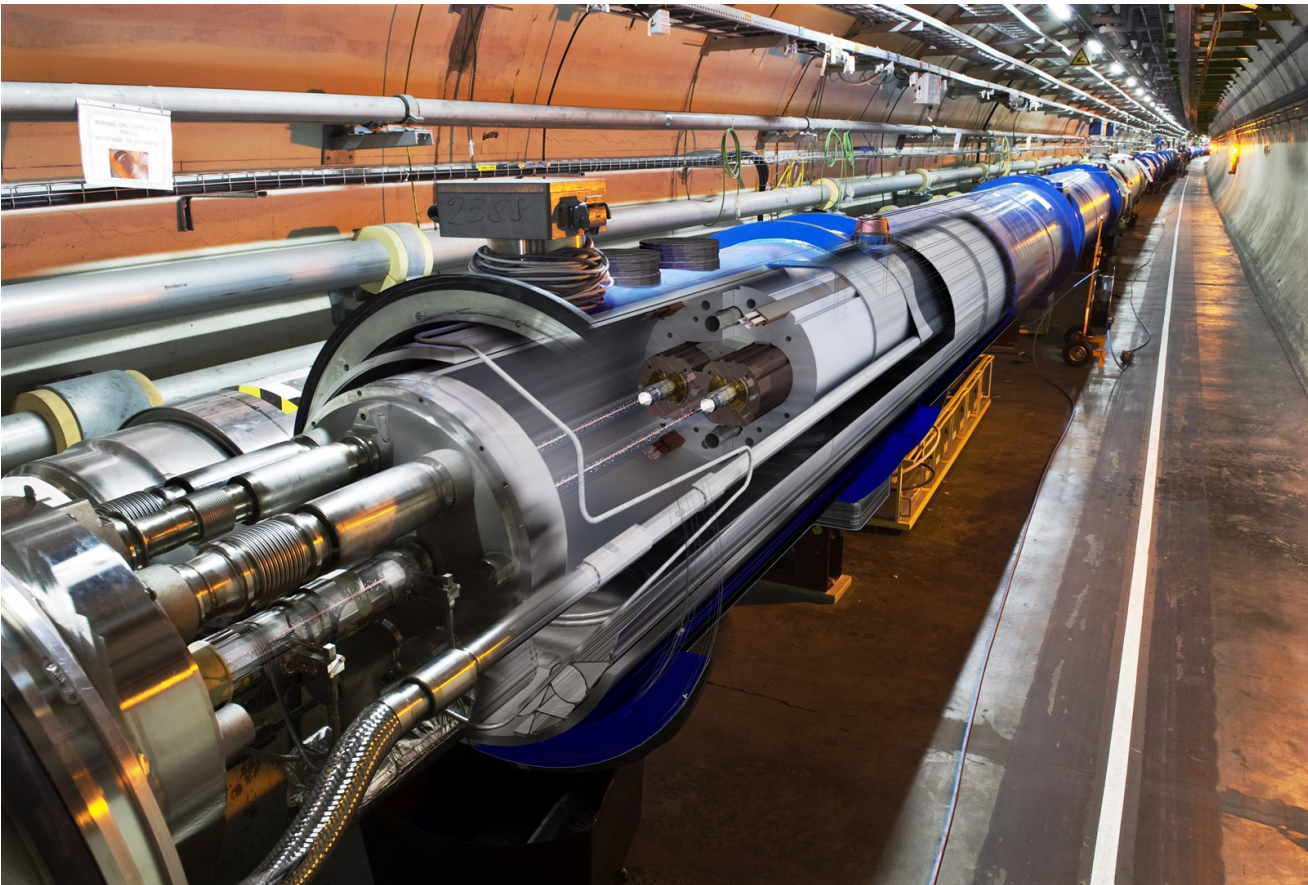
并通过专门的探测器对对撞产物进行测量
探索其中的新现象。

作为 Higgs 工厂的对撞机有很多种：正负电子对撞机，质子对撞机，光子对撞机，电子 - 质子对撞机， Muon 子对撞机。。。

其形状分为直线、环形。。。



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

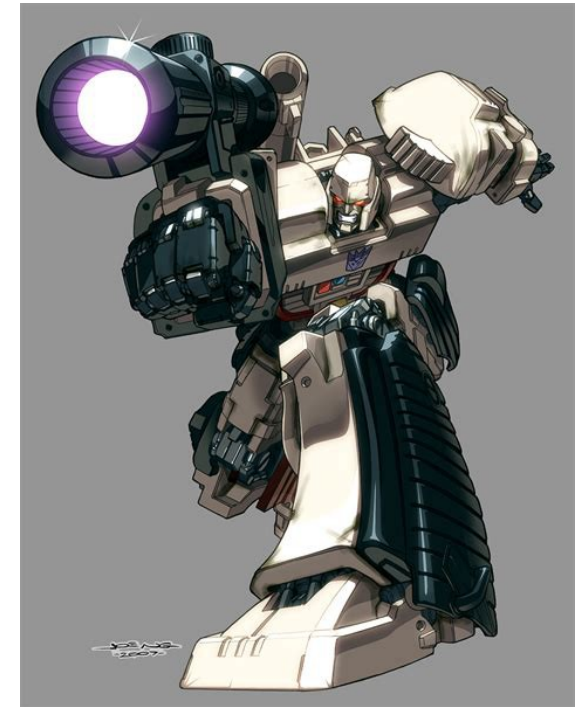
CRYSTAL ELECTROMAGNETIC CALORIMETER (ECAL)
 ~76,000 scintillating PbWO₄ crystals

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

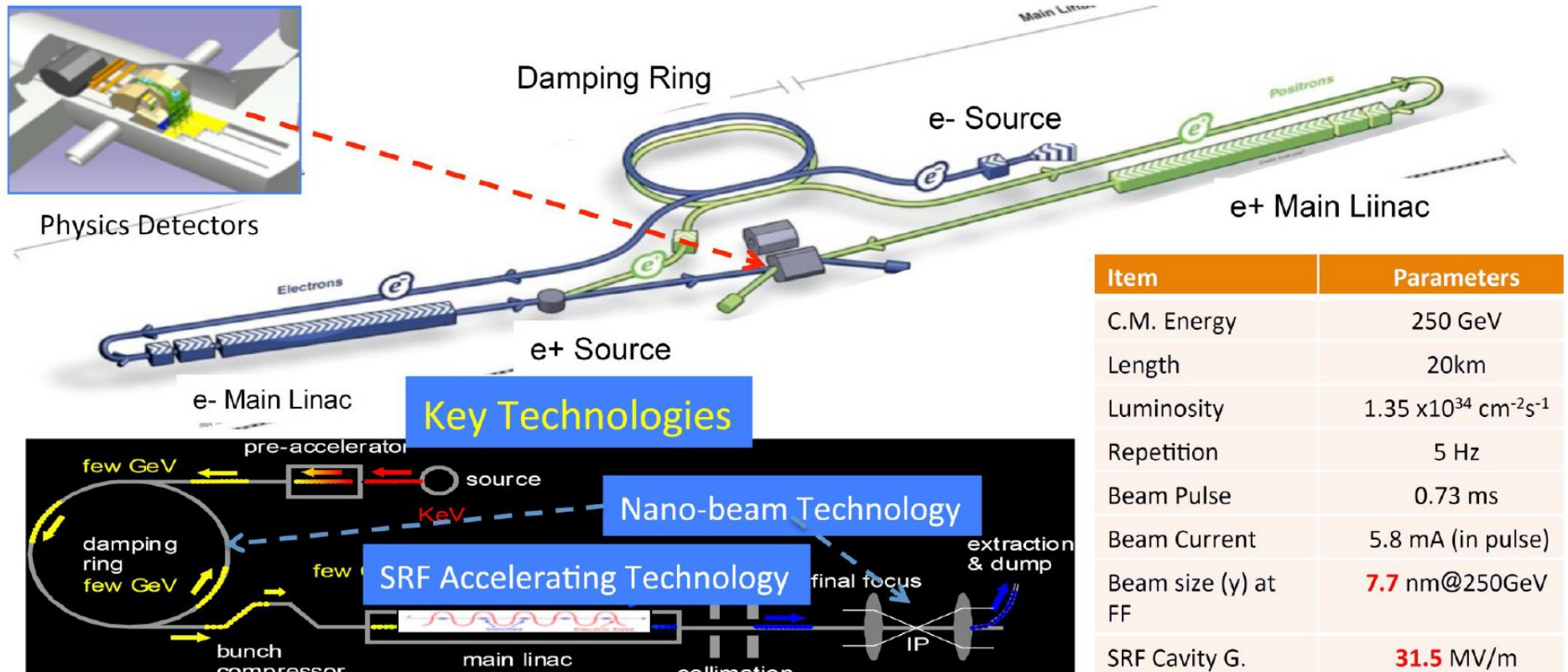
Higgs 工厂 : Tevatron



尽管比 Megatron 强了一百万倍。。。
还是和 Higgs 发现失之交臂



未来可能的 Higgs 工厂： ILC



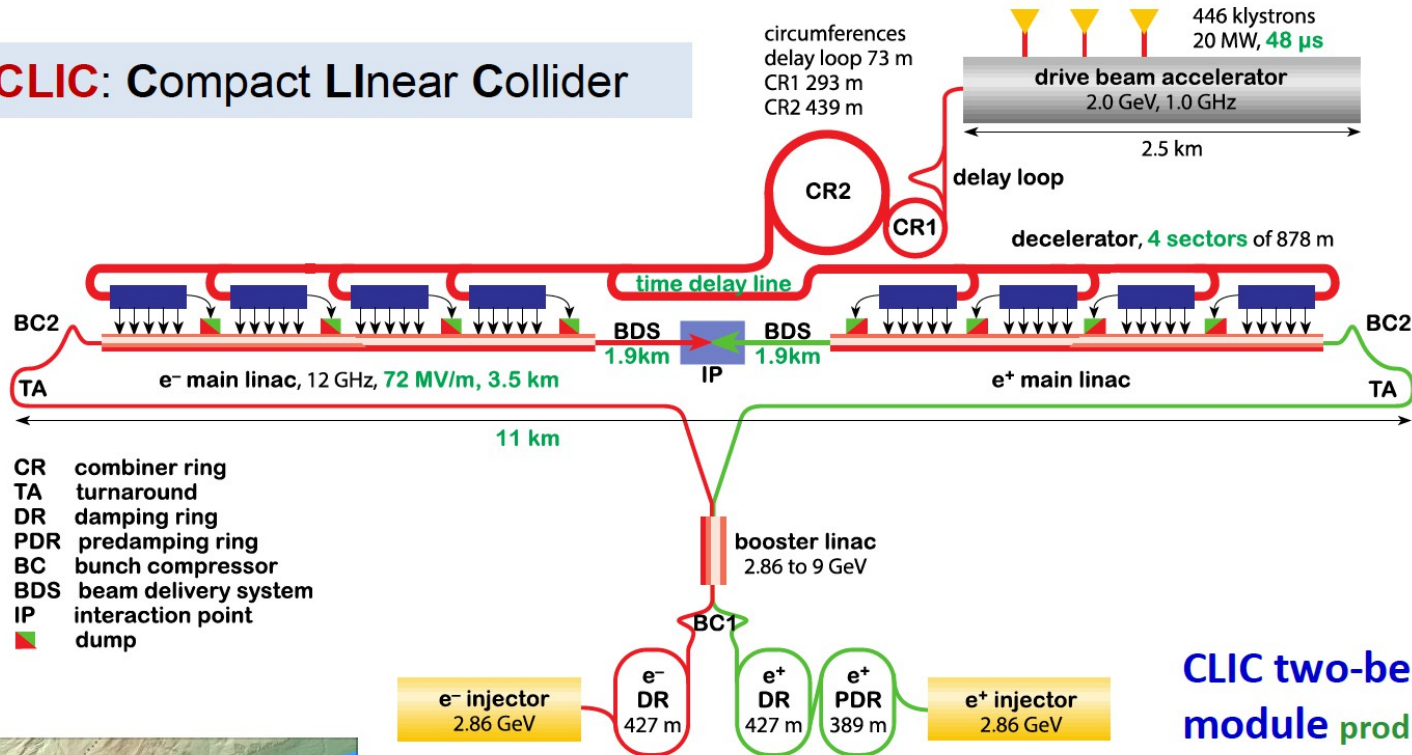
ILC250 - Recent re-scope to start with an initial energy of 250 GeV, key issues:

- Precision on H depends on integrated Lumi
- no $t\bar{t}$ at this stage
- reduced ability for BSM search

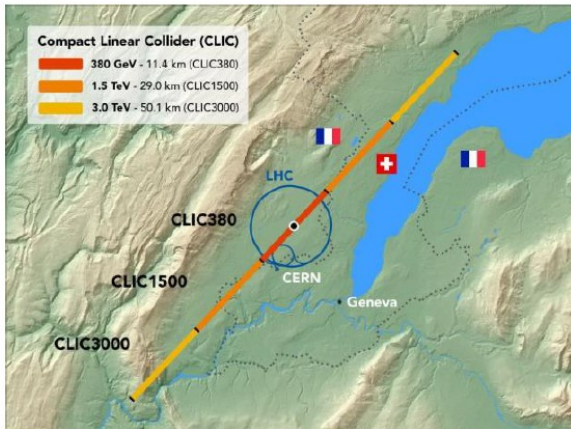
ILC250 does provide impressive precision, and is upgradable in energy.

未来可能的 Higgs 工厂：CLIC

CLIC: Compact Linear Collider



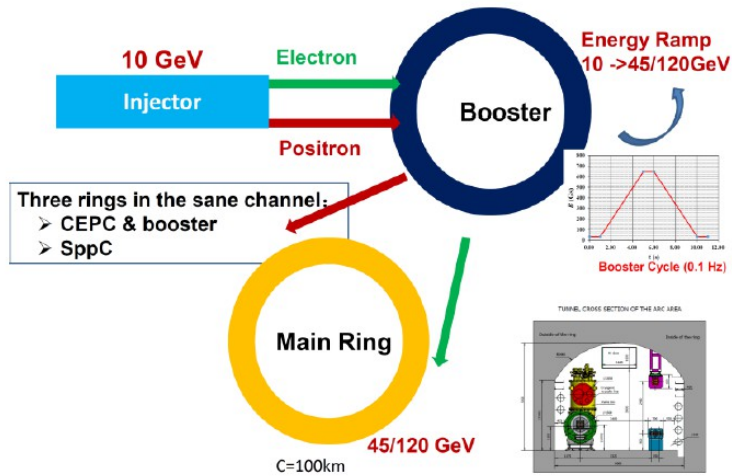
CLIC two-beam
module produces
short, high power RF pulse



accelerating structure
high gradient makes machine cheap

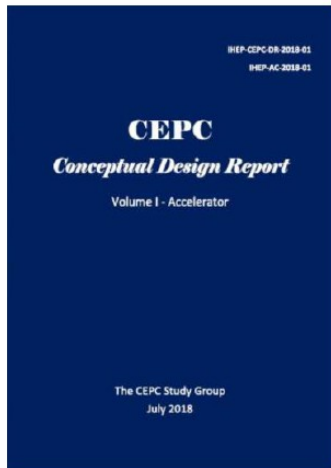


未来可能的 Higgs 工厂： CEPC

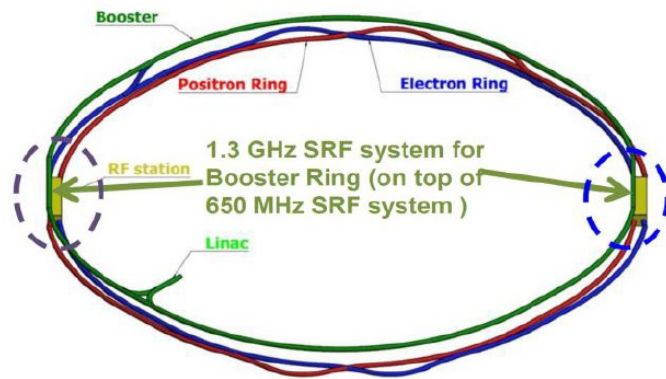


Lumi.	Higgs	W	Z	Z(2T)
$\times 10^{34}$	2.93	11.5	16.6	32.1

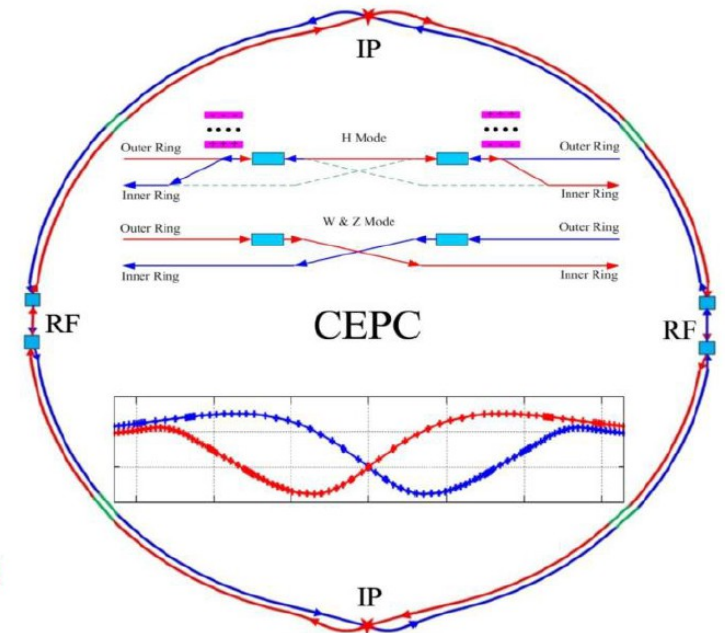
- double ring baseline design (30MW/beam)
- switchable between H and Z/W w/o hardware change (magnet switch)
- use half SRF for Z and W
- can be optimized for Z with 2T detector



reviewed by intl. committee, to be finalized soon.

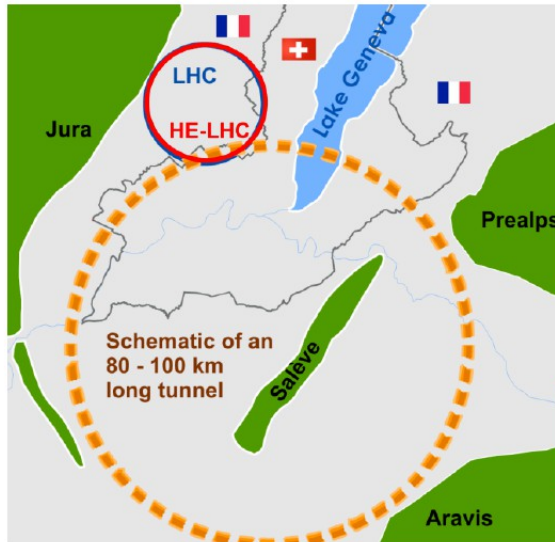


SRF system location of CEPC (two RF stations)



Layout of 650 MHz SRF system for Collider Ring

未来可能的 FCC(ee)



International FCC collaboration (CERN as host lab) to study:

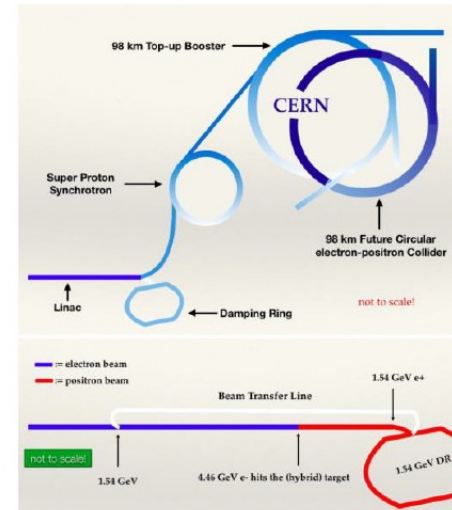
- pp -collider (FCC-hh)
→ long-term goal, defining infrastructure requirements

~16 T ⇒ 100 TeV pp in 100 km

- ~100 km tunnel infrastructure in Geneva area site specific

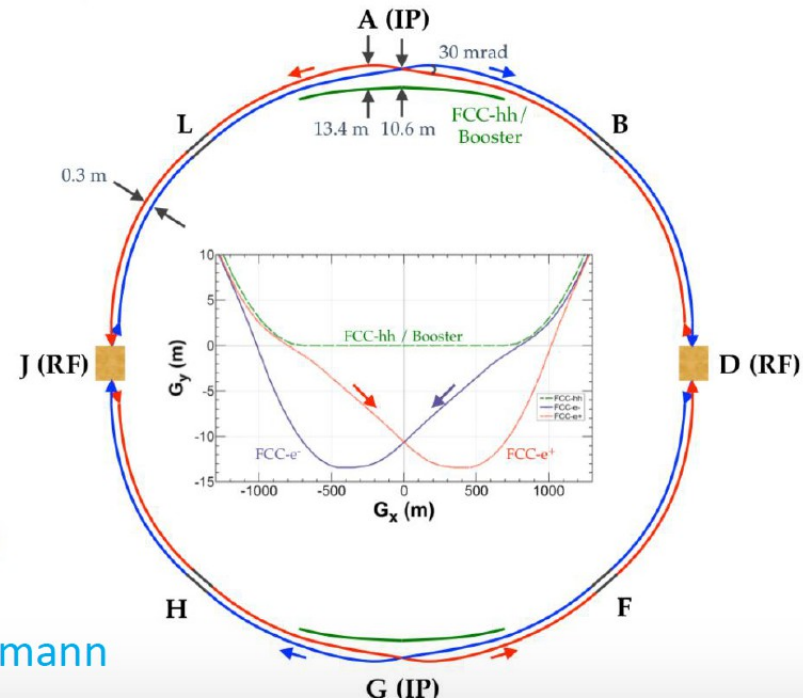
• e^+e^- collider (FCC-ee), as potential first step

• HE-LHC with FCC-hh technology

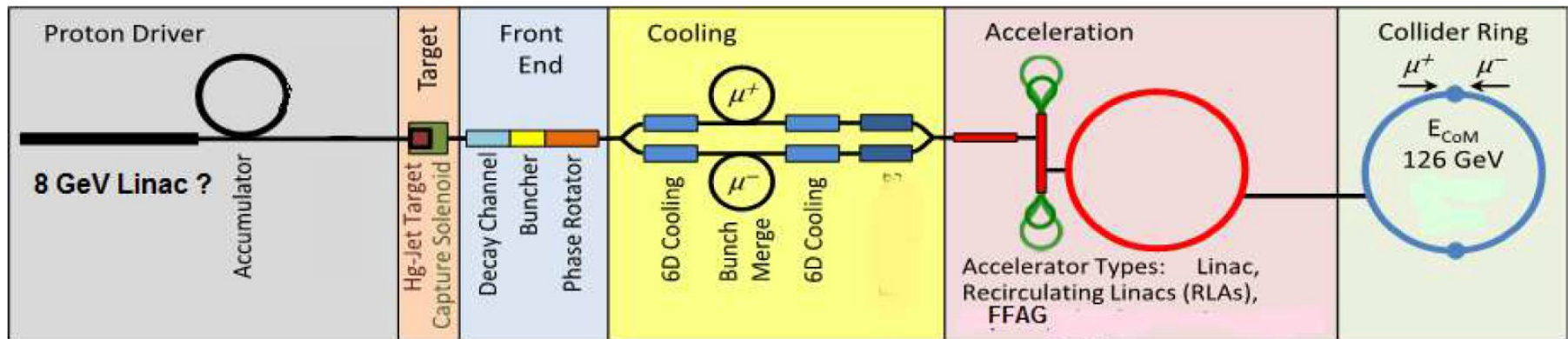
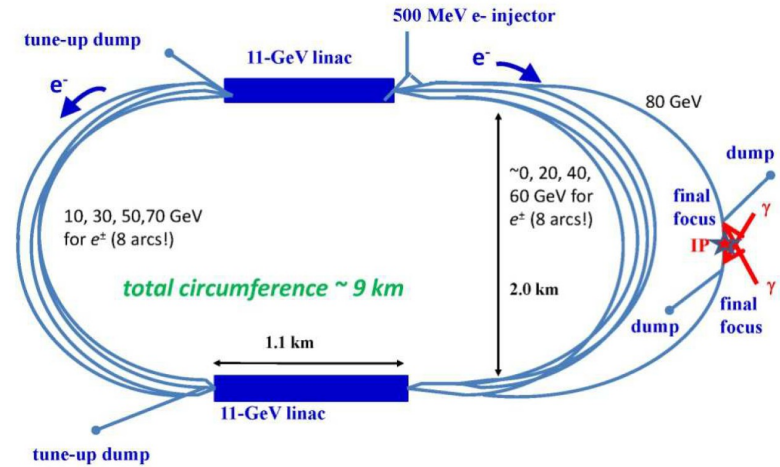
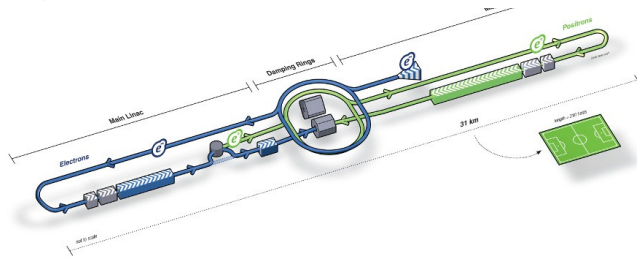
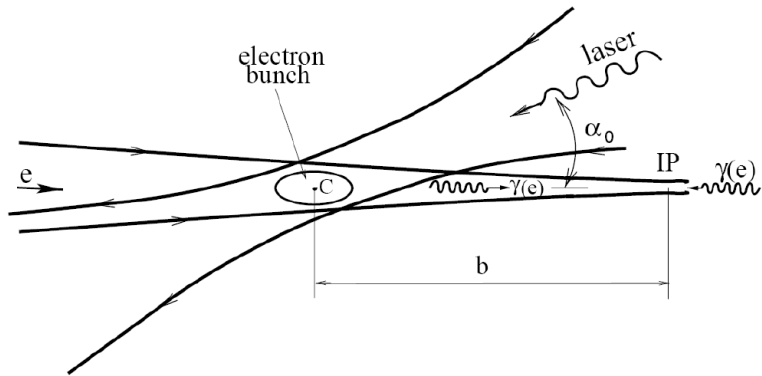


- Injection of 20 GeV beams to Booster;
- Interleaved filling of e^+/e^- ;
- Continuous top-up

- Double ring e^+e^- collider ~100 km
- Follows footprint of FCC-hh, except around IPs
- Asymmetric IR layout and optics to limit synchrotron radiation towards the detector
- 2 IPs, large horizontal crossing angle 30 mrad, crab-waist optics
- Synchrotron radiation power 50 MW/beam at all beam energies
- Top-up injection scheme for high luminosity
- Requires booster synchrotron in collider tunnel

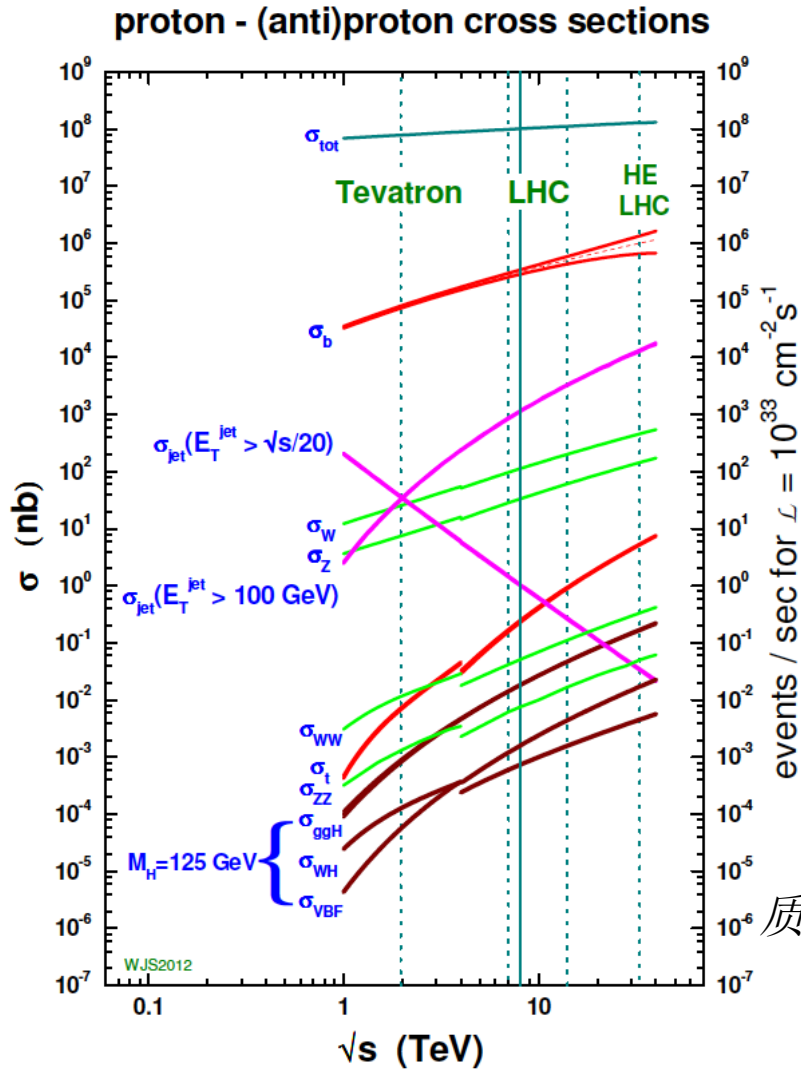


光子, Muon 子对撞机



- Higgs 粒子极为特殊，极为重要！
- 不同 Higgs factory 之间的优缺点？
 - Muon 及新加速技术尚不完全成熟。。。。
 - 光子对撞机？
 - 正负电子对撞机
 - Vs HL-LHC
 - 亮度，能量。。。。

Higgs @ LHC

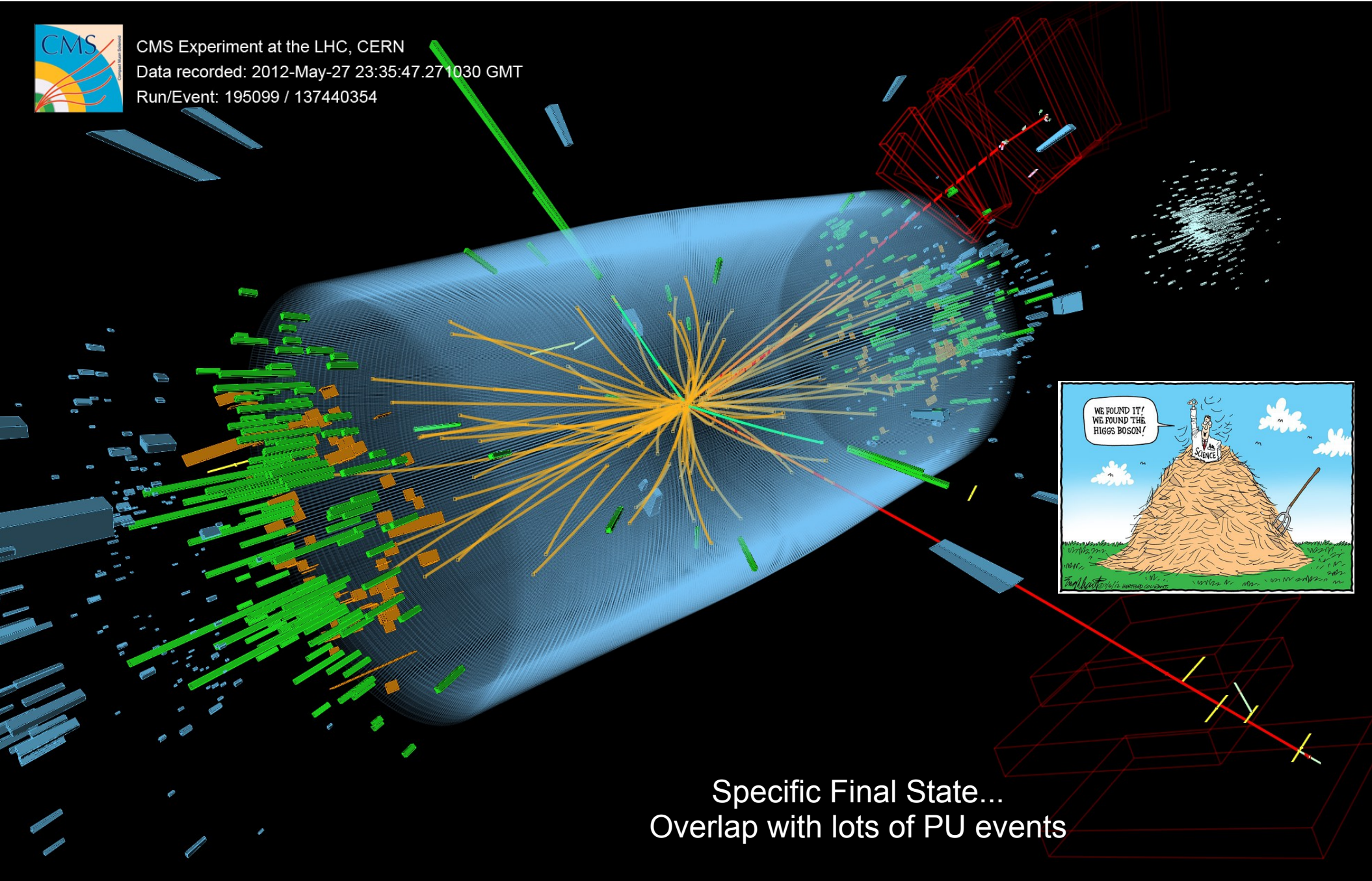


质子对撞机: *Higgs* 粒子产额很高 (LHC 上已产生 100 万 *Higgs* 粒子), 然而探测效率极低, 无法实现绝对测量

海量本底: 约 100 亿次对撞中产生一个 *Higgs* 粒子

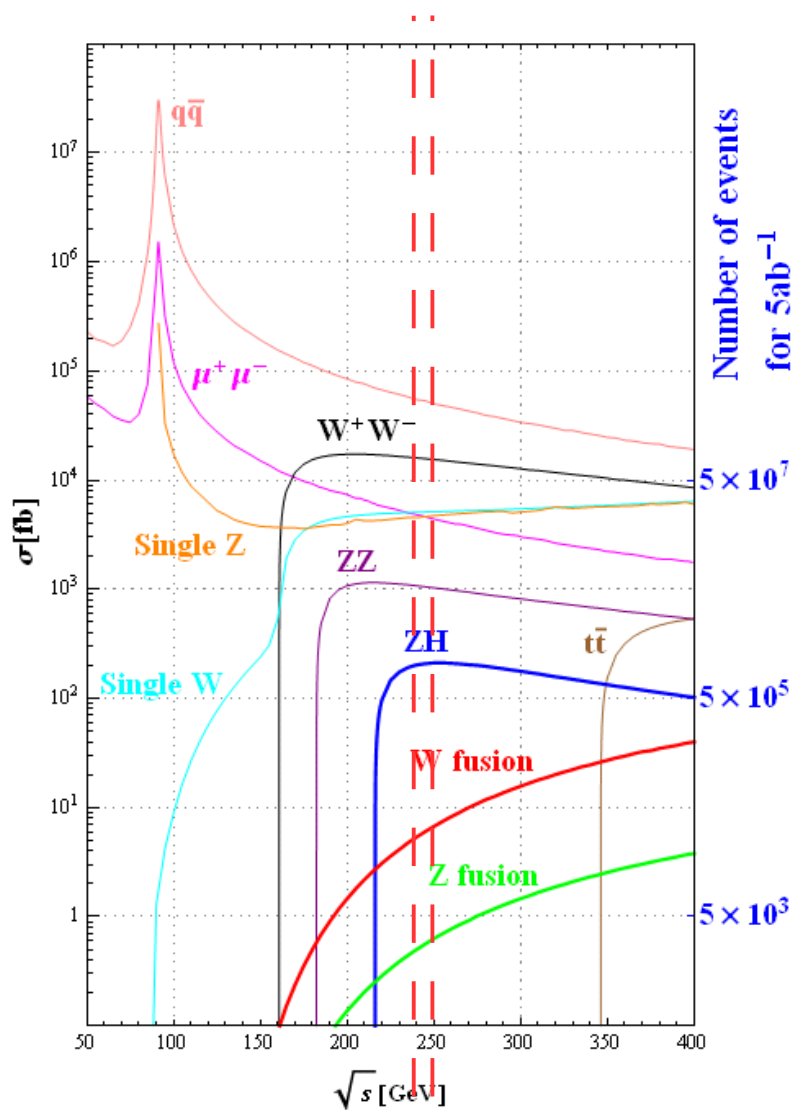


CMS Experiment at the LHC, CERN
Data recorded: 2012-May-27 23:35:47.271030 GMT
Run/Event: 195099 / 137440354



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

Higgs @ CEPC

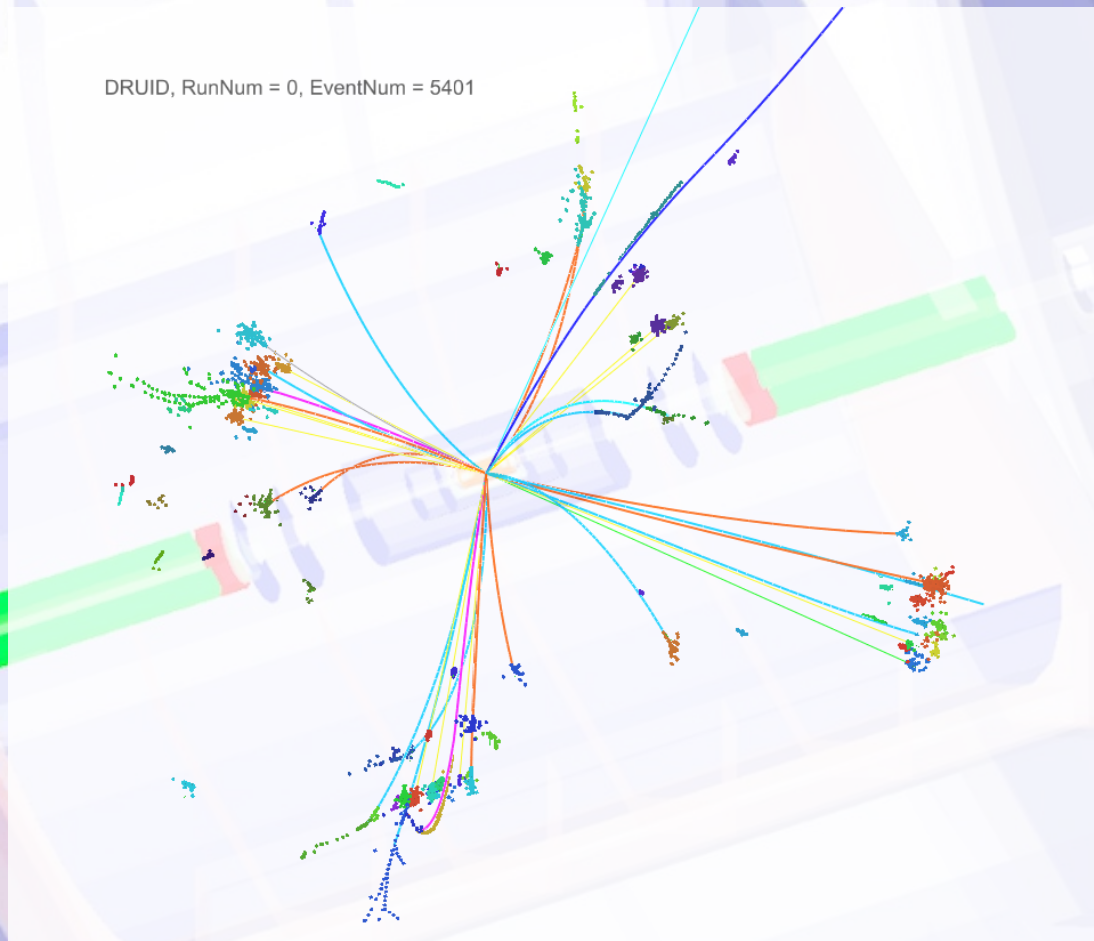


干净：每 1000 个事例中产生一个 Higgs

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)

CEPC 上的预期 Higgs 事例



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

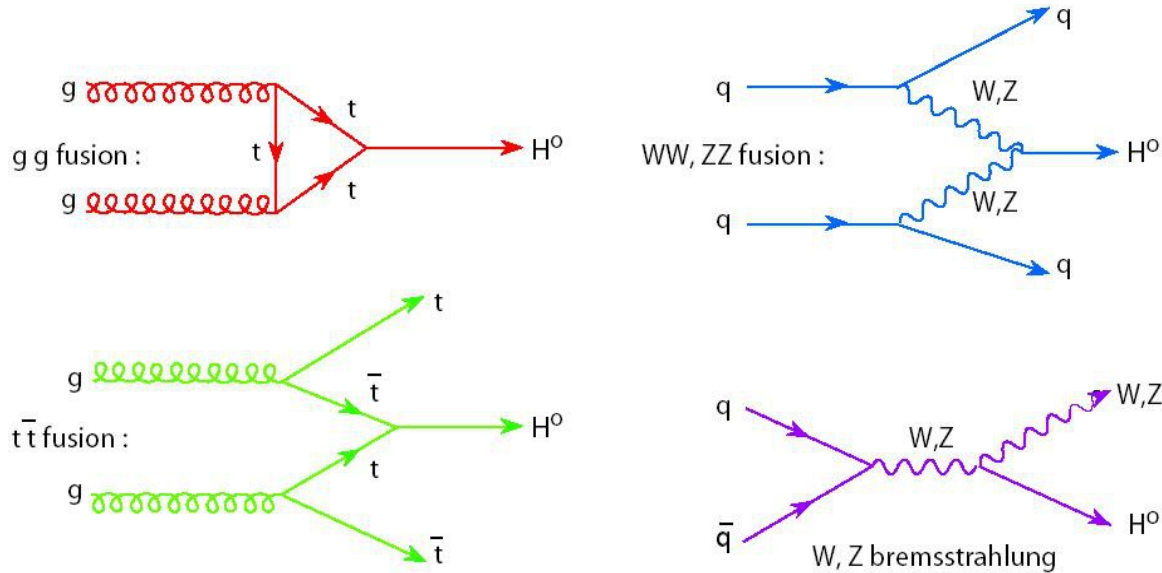
$Z \rightarrow 2 \text{ jet},$
 $H \rightarrow 2 \text{ tau}$
 $\sim 5\%$

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

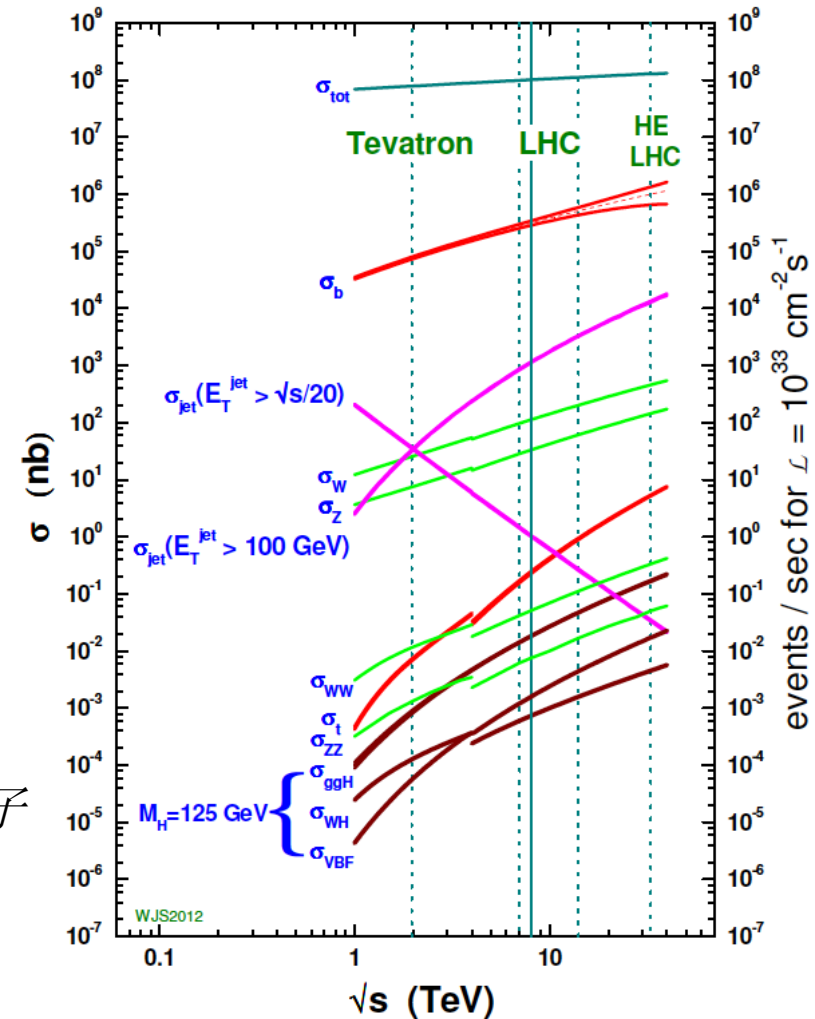
$\dots \sim 25\%, \nu\nu H \dots$

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

Higgs @ LHC



proton - (anti)proton cross sections



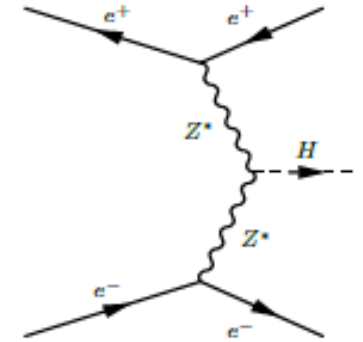
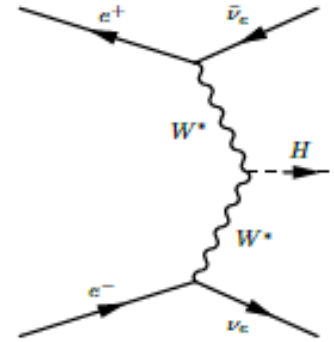
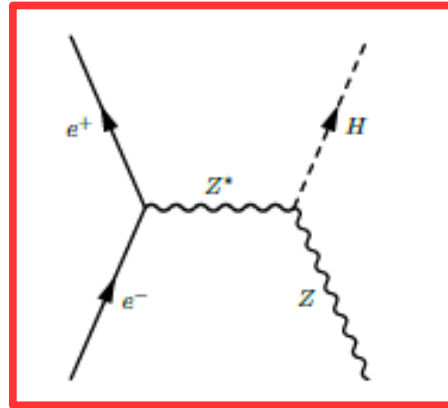
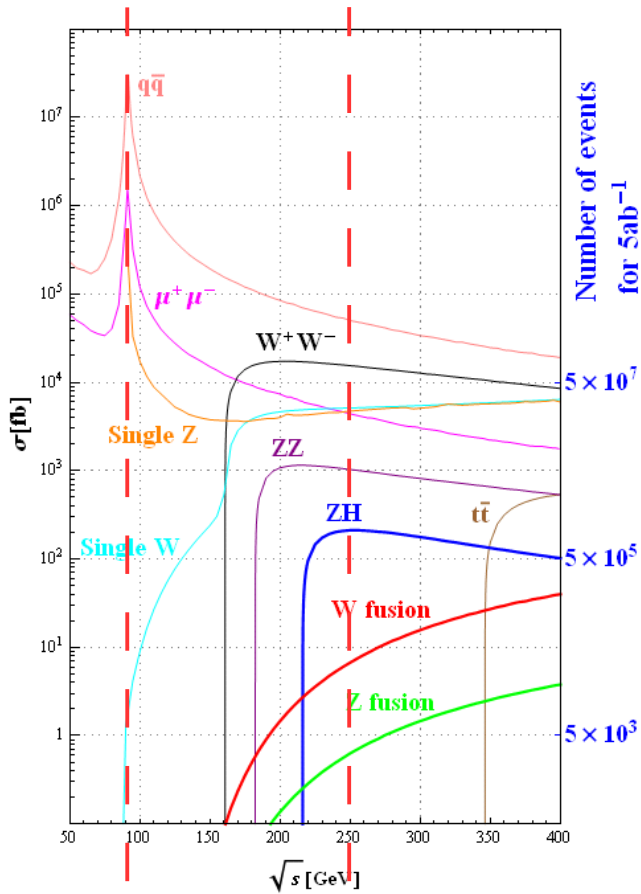
质子对撞机: **Higgs** 粒子产额很高 (LHC 上已产生 100 万量级的 Higgs 粒子), 然而探测效率极低

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

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

Higgs @ CEPC



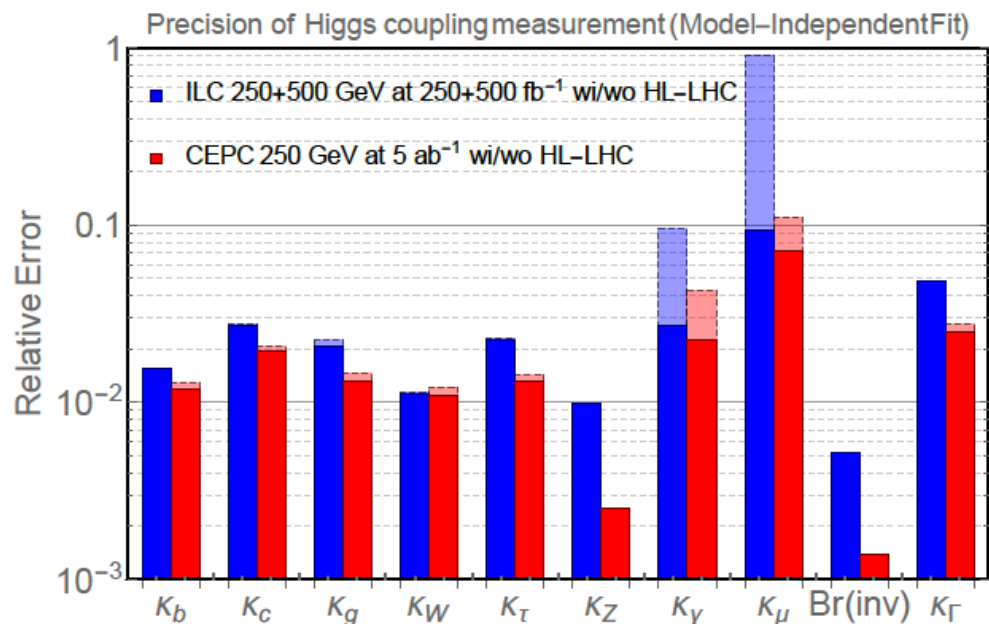
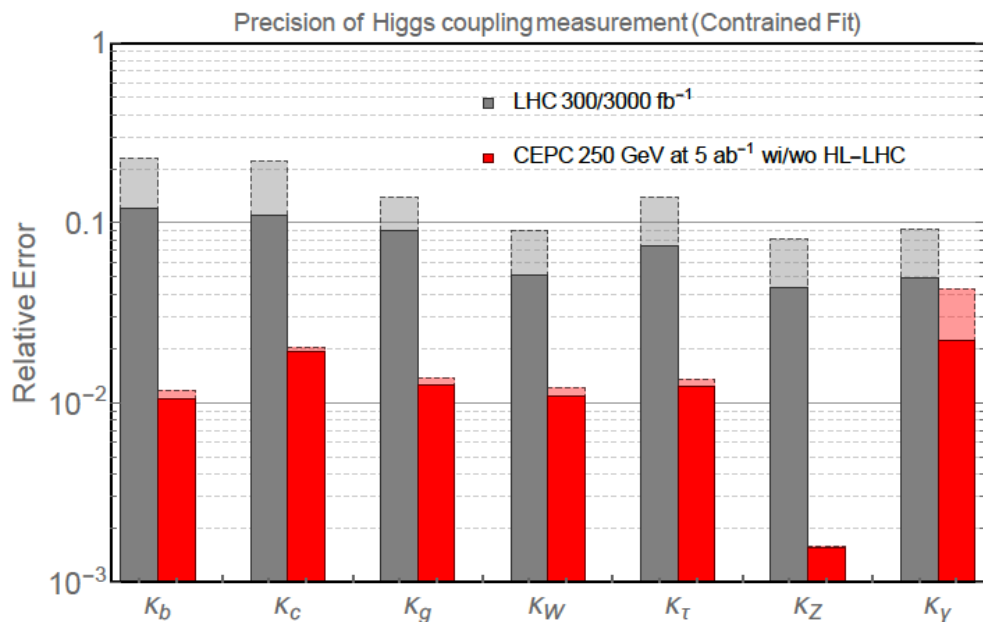
Process	Cross section	Events in 5 ab ⁻¹
Higgs boson production, cross section in fb		
$e^+e^- \rightarrow ZH$	212	1.06×10^6
$e^+e^- \rightarrow \nu\bar{\nu}H$	6.72	3.36×10^4
$e^+e^- \rightarrow e^+e^-H$	0.63	3.15×10^3
Total	219	1.10×10^6

$S/B \sim 1:100 - 1000$

观测量: Higgs mass, CP, $\sigma(ZH)$, event rates ($\sigma(ZH, \nu\nu H) \cdot \text{Br}(H \rightarrow X)$), Diff. distributions

Derive: **Absolute** Higgs width, branching ratios, **couplings**

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

亮度、能量比较

正负电子对撞机在 Higgs 性质测量上具有巨大优势，

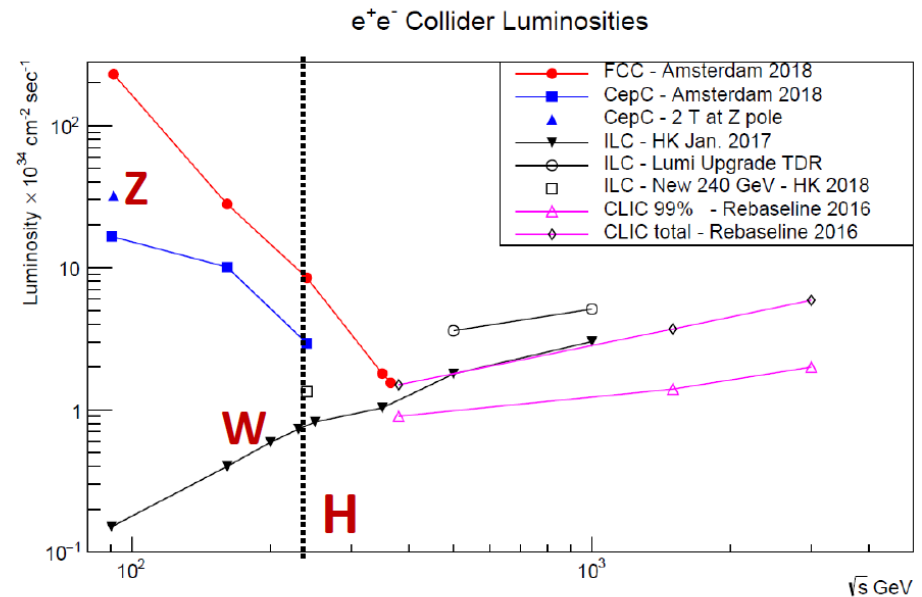
Luminosity vs. CM energy

Circular:

offers higher lumi. @ LE
⇒unprecedented Z,W,+H program
mature technology
HE synchrotron light source (?)
very long term: pp upgrade path

Linear:

very impressive Higgs precision
best Lumi. at higher energies, or only option for VHE
(ILC lumi upgrade even better at the Higgs)



F. Bedeschi, INFN-Pisa

circular & linear colliders are ideally complementary to each other

与国际上其它未来的可能性比较

	科学意义	可扩展性	技术成熟度	经济性	时间进度
CEPC	*****	*****	*****	*****	*****
SppC	*****	*	**	***	***
ILC	*****	*	***	*****	*****
FCC-ee	*****	*****	*****	*****	?
FCC-pp	*****	*	**	**	***
CLIC	*****	**	**	***	**
VLHC	*****	***	*****	**	?
Muon collider	*****	*****	*	*	?
新加速原理	*****	?	??	?	??

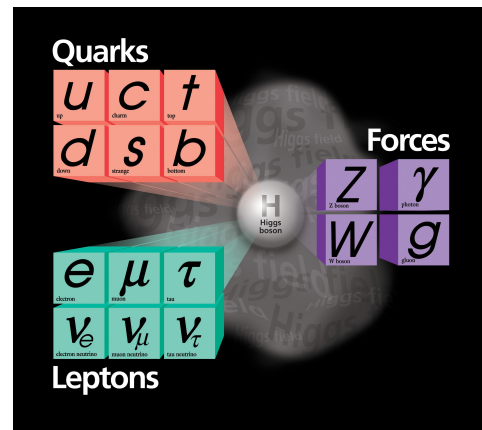
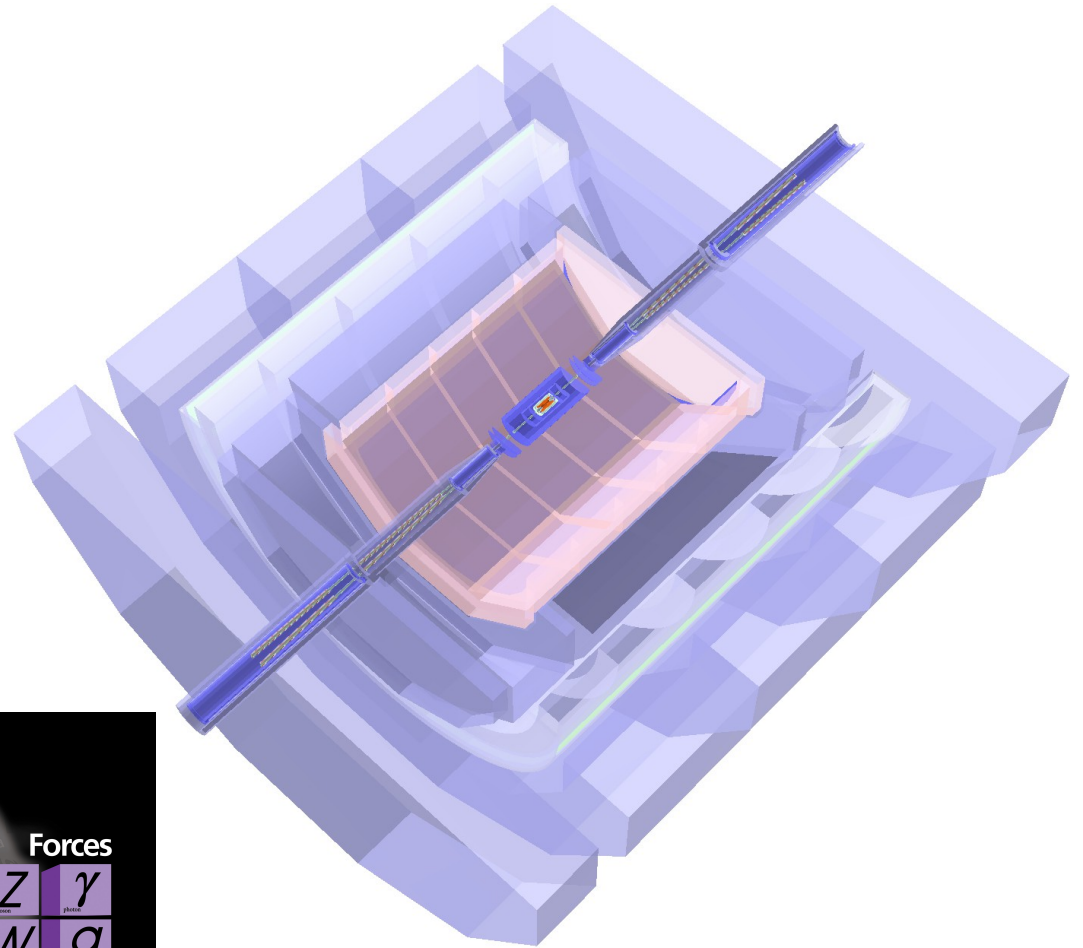
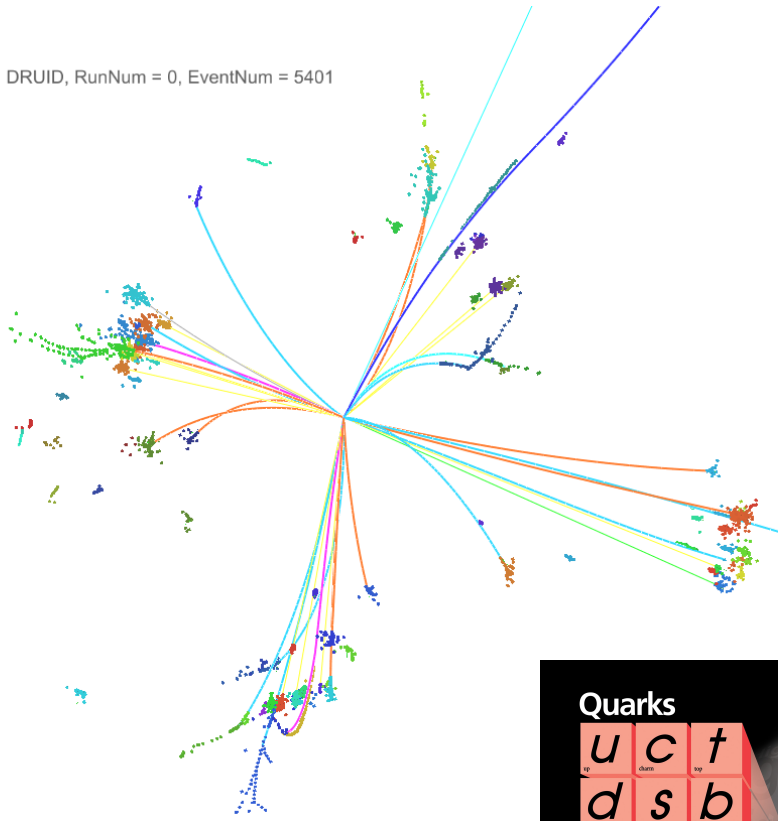
CEPC+SppC 是最好组合

国内外广泛共识

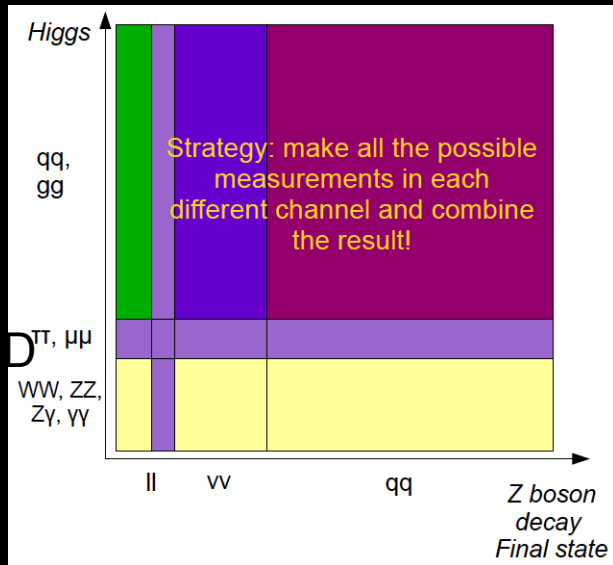
- 2013年6月12-14日香山会议：“**环形正负电子对撞机Higgs工厂(CEPC) + 超级质子对撞机(SppC)是我国高能物理发展的重要选项和机遇**”
- 2016年8月中国物理学会高能物理分会：“**CEPC是我国未来高能加速器物理发展的首选项目**”
- 2014年2月国际未来加速器委员会(ICFA)：“**ICFA支持能量前沿环形对撞机研究并鼓励全球的协调**”
- 2014年7月ICFA再次就环形对撞机及其与ILC的关系，未来高能物理发展方向等作出结论：“**ICFA继续鼓励国际环形对撞机的研究，其最终目的是能量远超过LHC的质子质子对撞**”
- 2016年3月亚洲未来加速器委员会(ACFA) 与亚洲高能物理委员会就ILC、CEPC与高能物理未来发展发表声明：“**过去几年，对大型环形对撞机的兴趣一直在增长。这首先是一个希格斯工厂，最终成为一台高能质子质子对撞机。我们鼓励中国领导的这个方向，并期望尽快看到技术设计的完成**”

照相机： 基线探测器

DRUID, RunNum = 0, EventNum = 5401



探测器及重建



Performance at

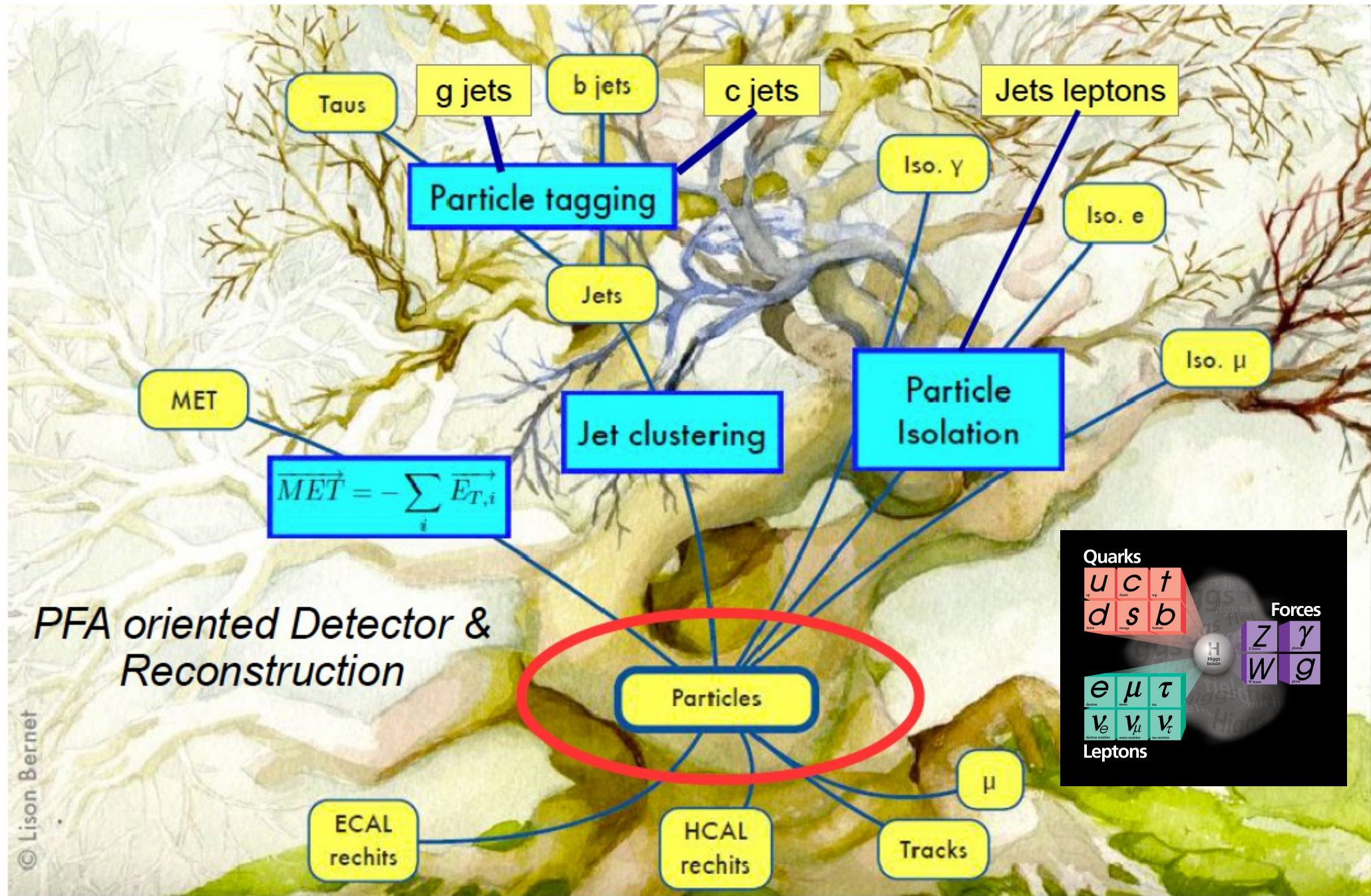
Lepton

Kaon

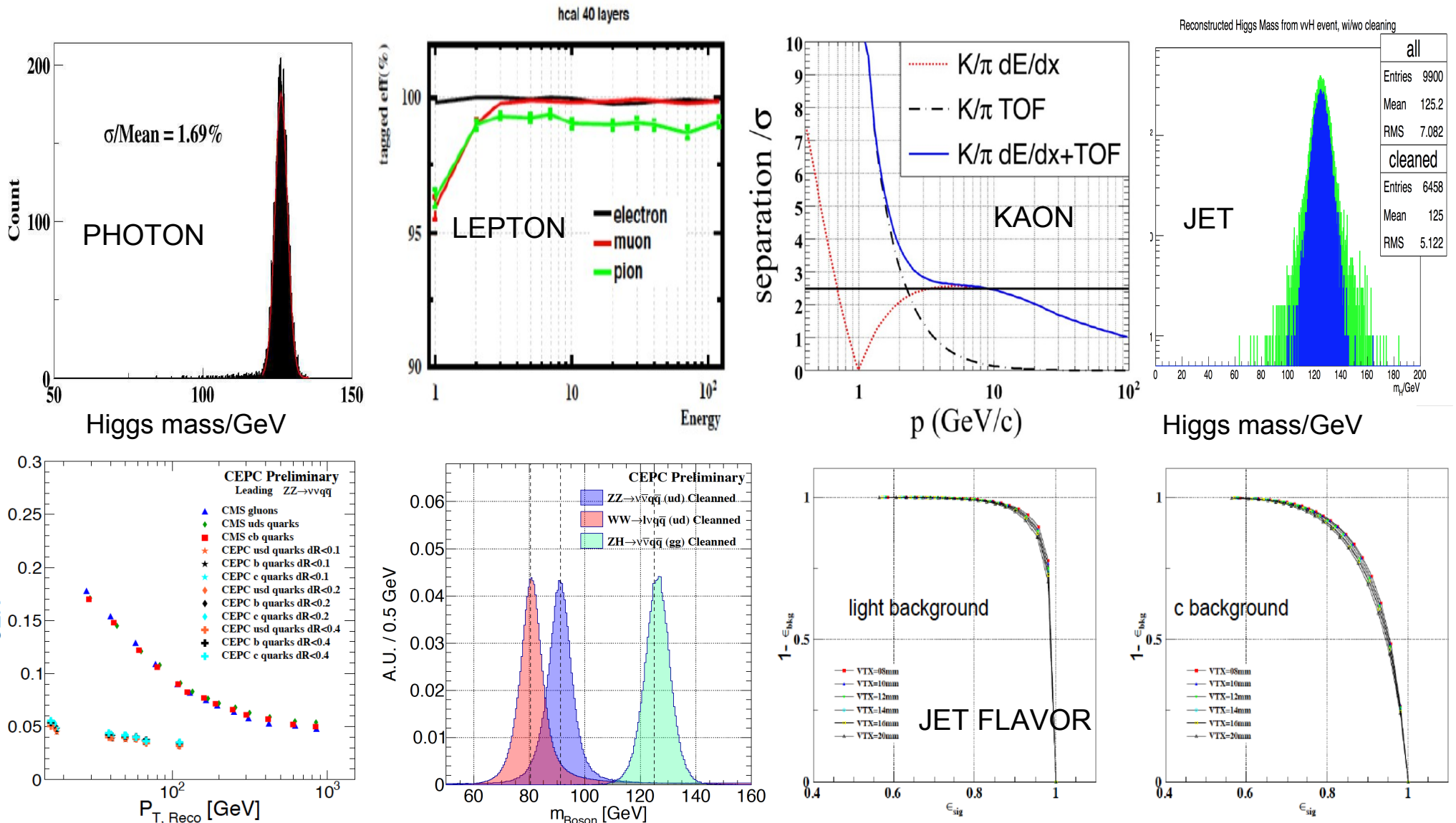
Photon

Tau

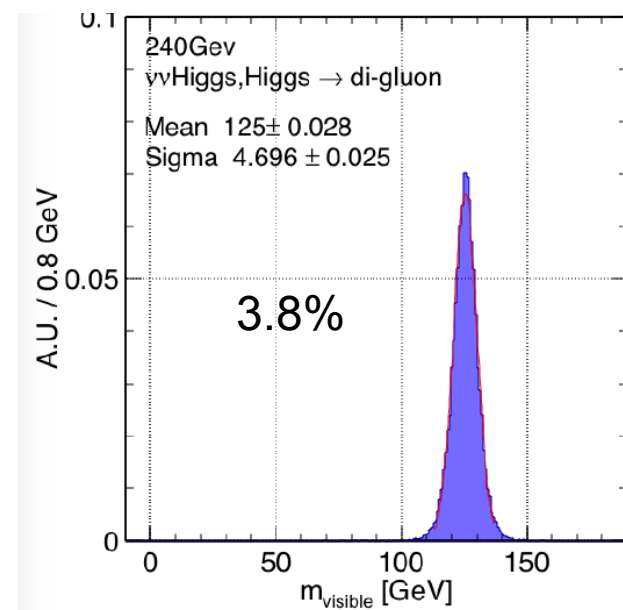
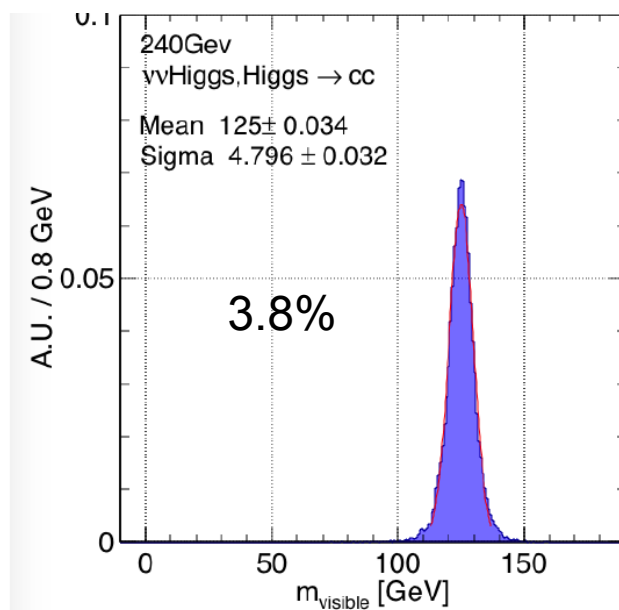
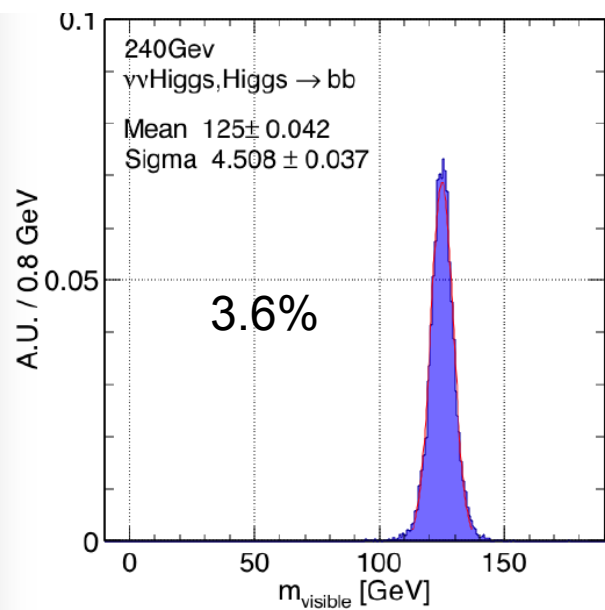
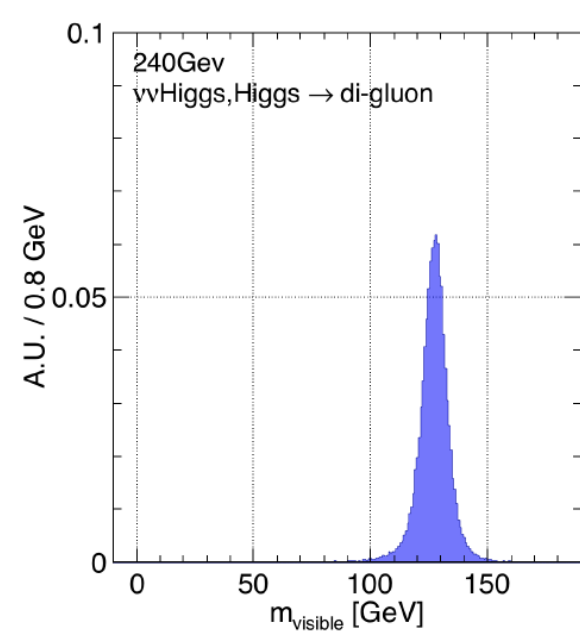
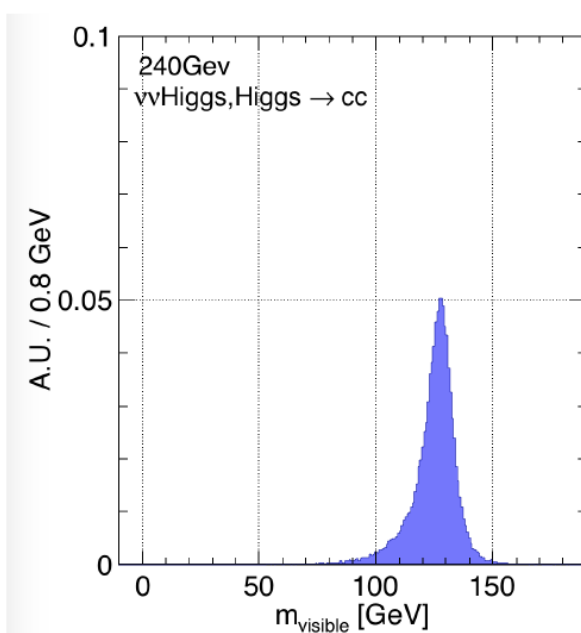
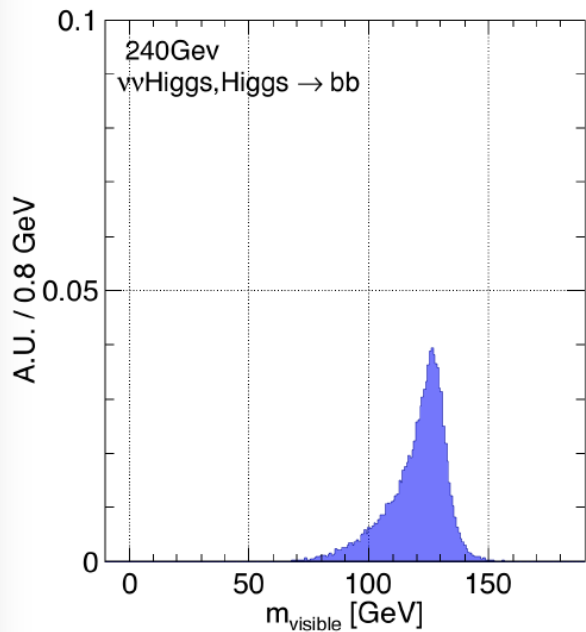
JET



性能：完成所有物理标的物的高精度重建



Higgs to bb, cc, gg



Higgs to WW, ZZ

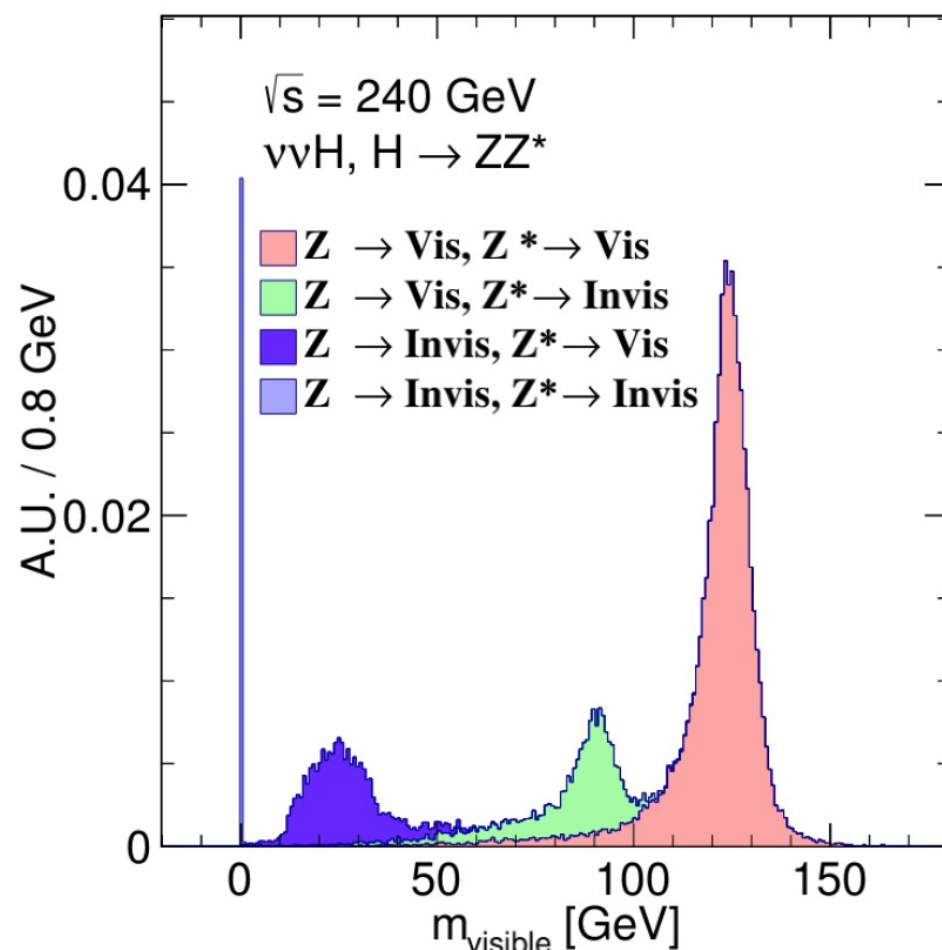
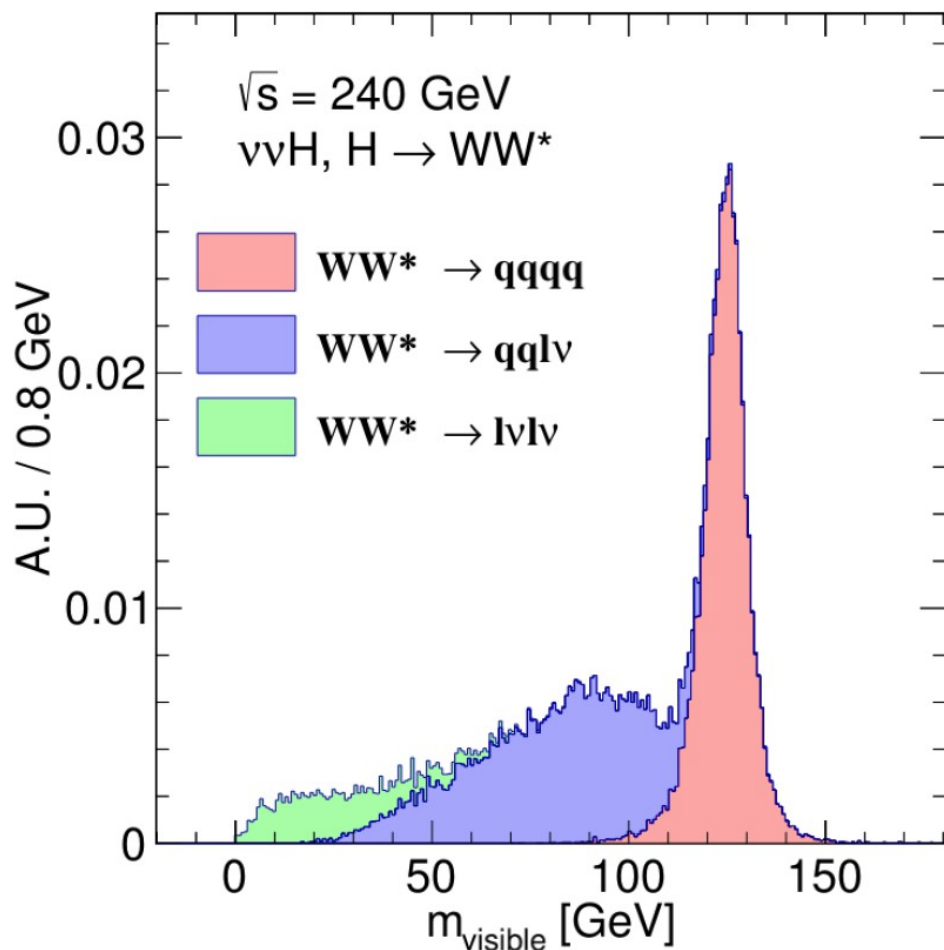


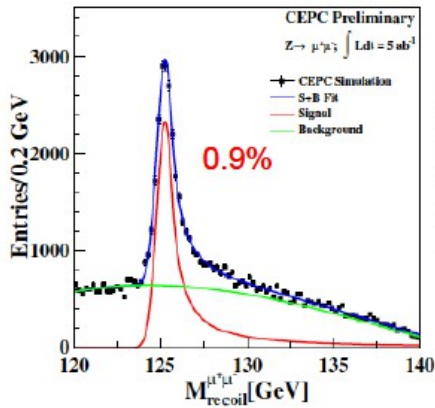
Table 2. Benchmark resolutions ($\sigma/Mean$) of reconstructed Higgs boson mass, comparing to LHC results.

	Higgs $\rightarrow \mu\mu$	Higgs $\rightarrow \gamma\gamma$	Higgs $\rightarrow bb$
CEPC (APODIS)	0.20%	2.59% ¹	3.63%
LHC (CMS, ATLAS)	$\sim 2\%$ [19, 20]	$\sim 1.5\%$ [21, 22]	$\sim 10\%$ [23, 24]

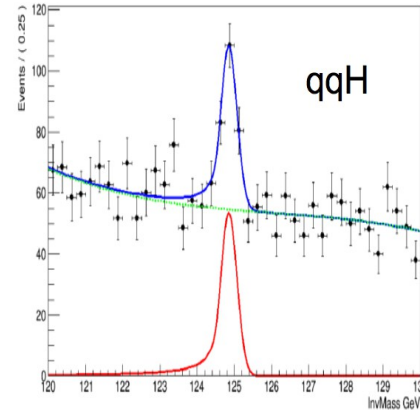
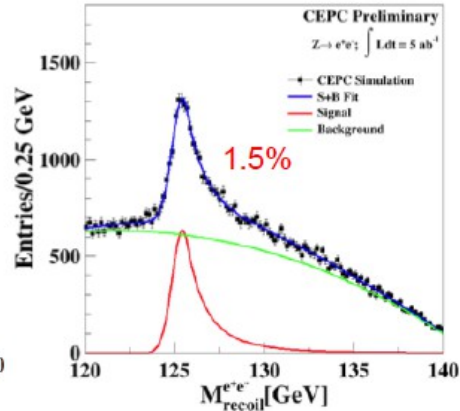
¹ primary result without geometry based correction and fine-tuned calibration. <https://arxiv.org/abs/1806.04992>

Benchmark Higgs Analysis

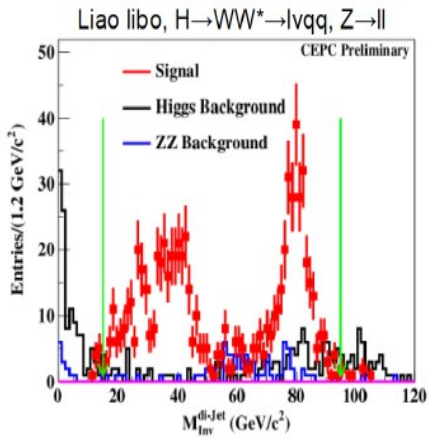
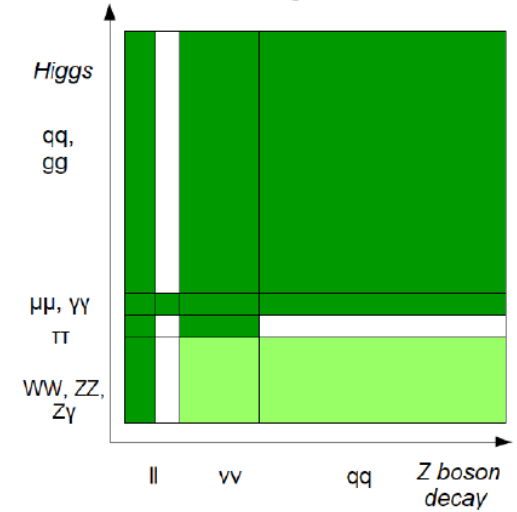
Zhenxing Chen & Yacine Haddad



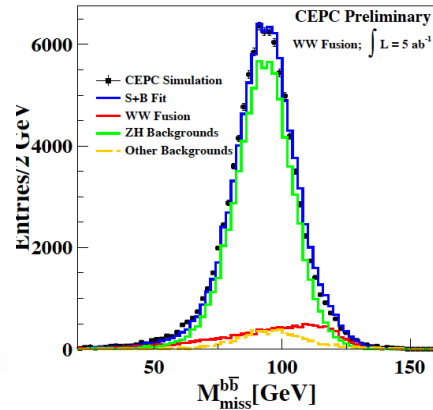
$\sigma(\text{ZH})$ measurements



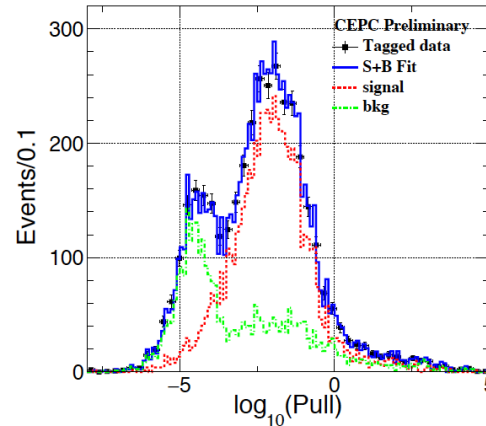
$\text{Br}(\text{H} \rightarrow \mu\mu)$



$\text{Br}(\text{H} \rightarrow \text{WW})$



$\sigma(\text{vvH}) * \text{Br}(\text{H} \rightarrow \text{bb})$



$\text{Br}(\text{H} \rightarrow \pi\pi)$

	PreCDR (Jan 2015)	Now (Aug 2016)
$\sigma(\text{ZH})$	0.51%	0.50%
$\sigma(\text{ZH}) * \text{Br}(\text{H} \rightarrow \text{bb})$	0.28%	0.21%
$\sigma(\text{ZH}) * \text{Br}(\text{H} \rightarrow \text{cc})$	2.1%	2.5%
$\sigma(\text{ZH}) * \text{Br}(\text{H} \rightarrow \text{gg})$	1.6%	1.2%
$\sigma(\text{ZH}) * \text{Br}(\text{H} \rightarrow \text{WW})$	1.5%	1.0%
$\sigma(\text{ZH}) * \text{Br}(\text{H} \rightarrow \text{ZZ})$	4.3%	4.3%
$\sigma(\text{ZH}) * \text{Br}(\text{H} \rightarrow \pi\pi)$	1.2%	1.0%
$\sigma(\text{ZH}) * \text{Br}(\text{H} \rightarrow \gamma\gamma)$	9.0%	9.0%
$\sigma(\text{ZH}) * \text{Br}(\text{H} \rightarrow \text{Z}\gamma)$	-	$\sim 4 \sigma$
$\sigma(\text{ZH}) * \text{Br}(\text{H} \rightarrow \mu\mu)$	17%	12%
$\sigma(\text{vvH}) * \text{Br}(\text{H} \rightarrow \text{bb})$	2.8%	2.8%
Higgs Mass/MeV	5.9	5.0
$\sigma(\text{ZH}) * \text{Br}(\text{H} \rightarrow \text{inv})$	95% CL = 1.4e-3	1.4e-3
$\text{Br}(\text{H} \rightarrow \text{ee}/\text{emu})$	-	1.7e-4/1.2e-4
$\text{Br}(\text{H} \rightarrow \text{bb}\gamma\gamma)$	$< 10^{-3}$	3.0e-4

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

CEPC：物理世界全新的海图

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？



Timeline



Milestones

1st, PreCDR (end of 2014)

2nd, R&D funding from MOST (Middle 2016, 35 M CNY/5yr for the 1st phase)

3rd, CDR (this autumn !)

...



小结

- **Higgs** 粒子，极为特殊，极为重要：物理学前进的钥匙
- 围绕 **Higgs** 粒子的精确测量，粒子物理学界在 **HL-LHC** 的基础上提出多种 **Higgs** 工厂的设计，其中 **CEPC** 具有非常明显的优势
- **CEPC** ，超级的 **Higgs** ， **Z** ， **W** 粒子工厂
- 目前 **CEPC** 基线探测器 / 算法采用粒子流导向设计，性能优越，可准确测量 **Higgs** 信号
- **瞄准 2030**

谢谢大家 & 期待未来

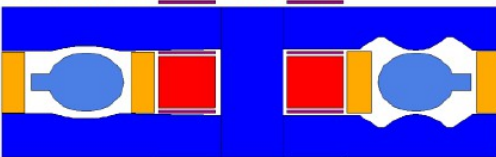
Manqi.ruan@ihep.ac.cn

CEPC Industrial Promotion Consortium (CIPC)

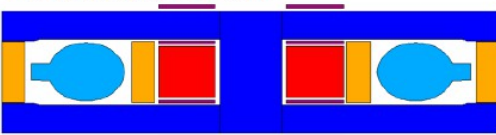
was established in 2017 to prepare for industrial production of CEPC components



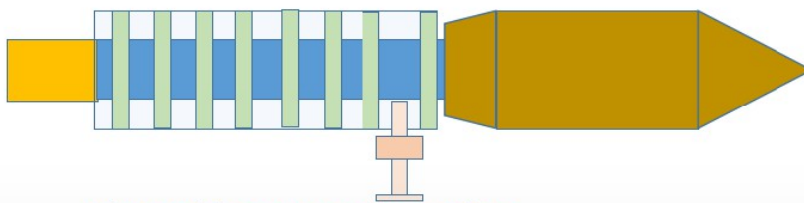
The first and the last segments - sextupole combined



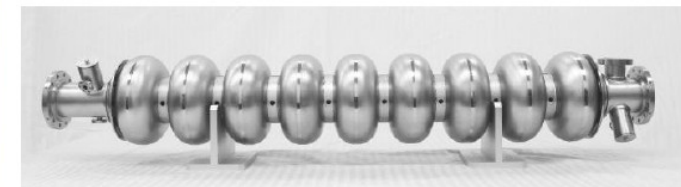
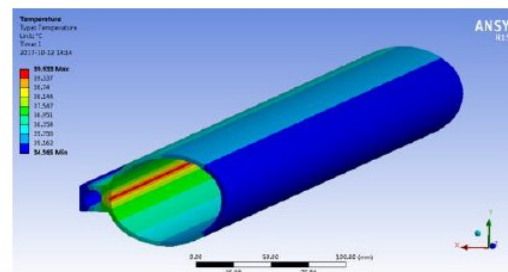
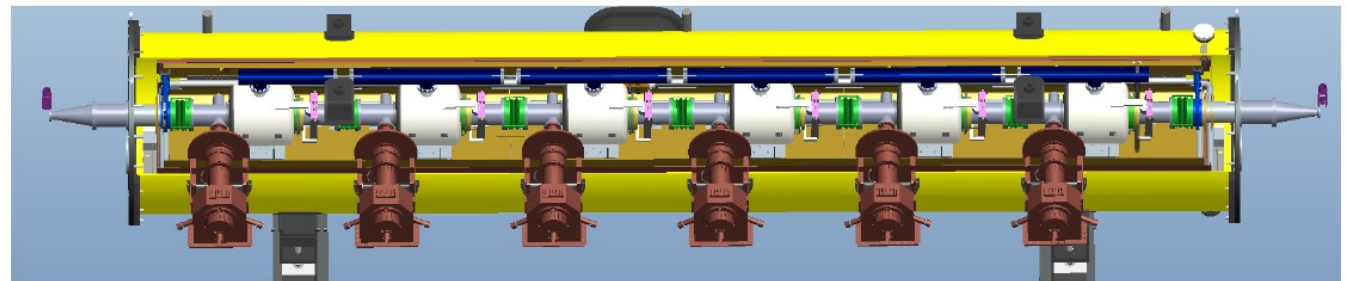
The three middle segments - dipole only



- Core - steel
- Main coil - aluminum
- Radiation shielding - lead
- Trim coil - aluminum

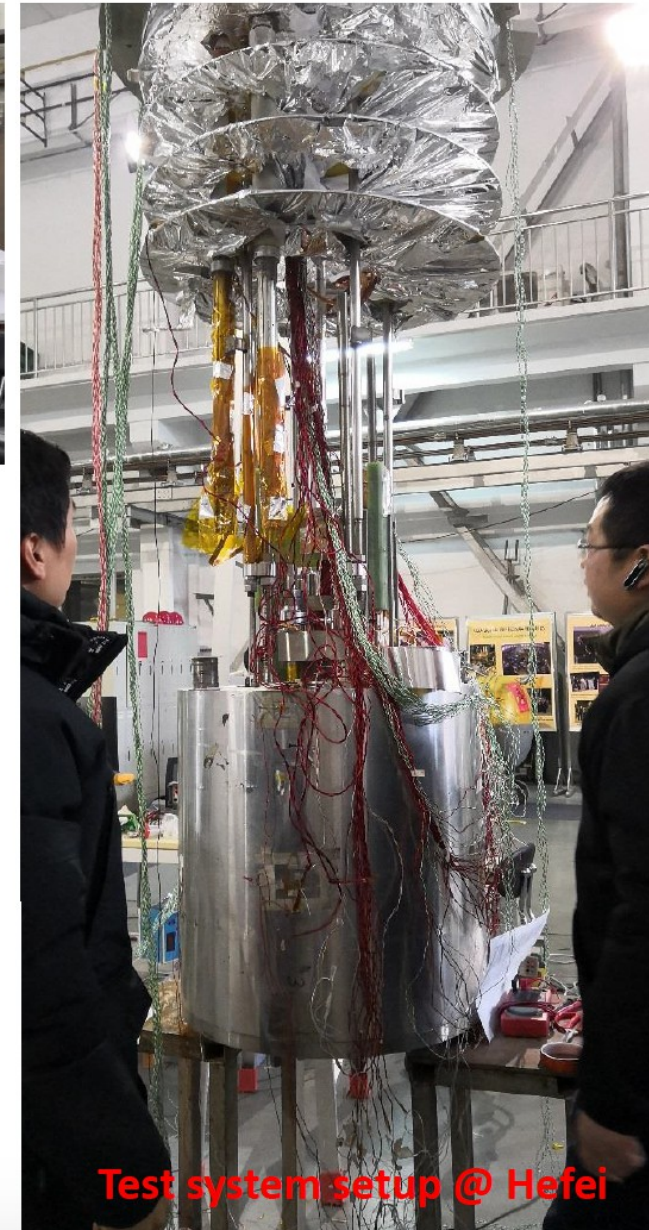
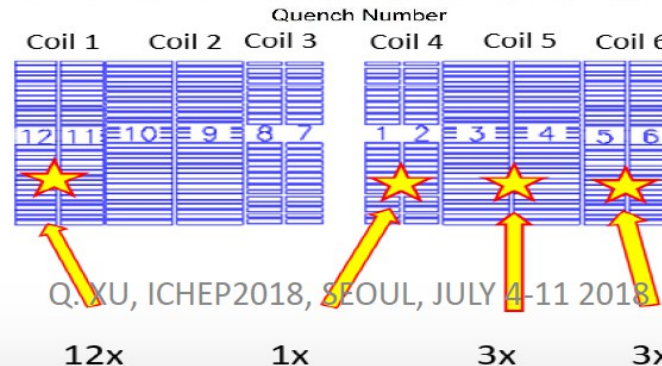
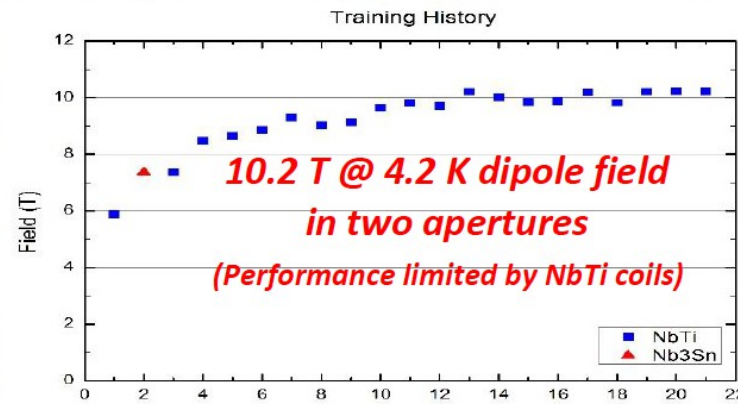
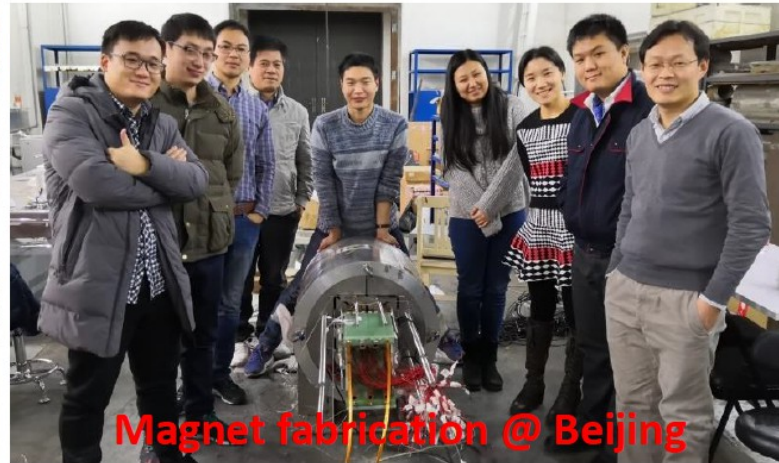


High Efficiency RF cavity section



R&D of 12T Twin-aperture Dipole Magnet

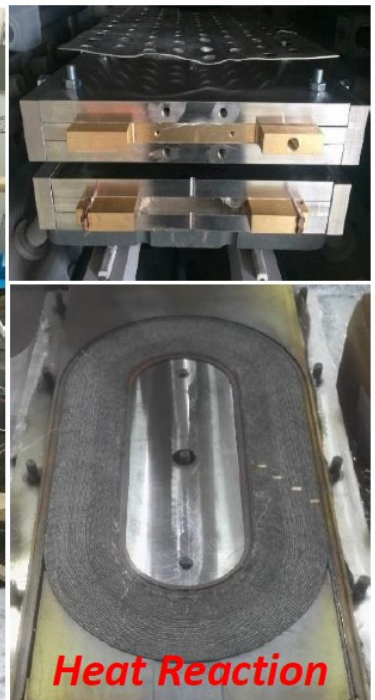
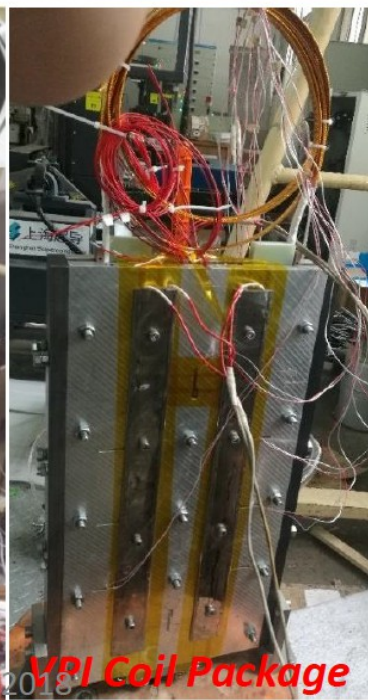
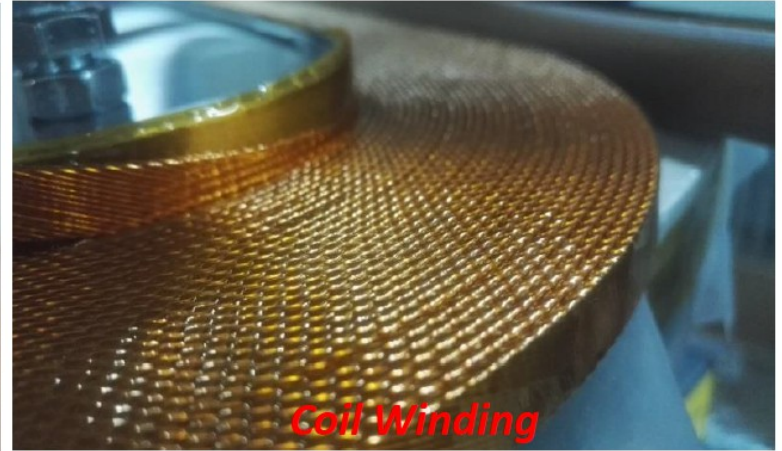
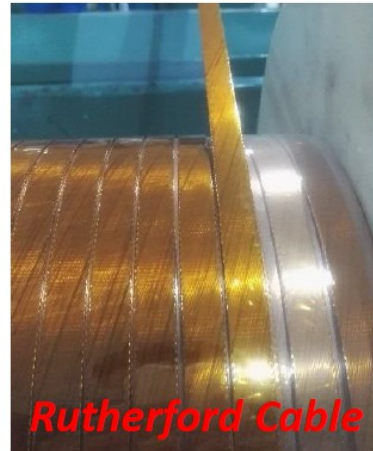
1st test result of the 1st high-field dipole magnet in China Feb. 2018



R&D of 12T Twin-aperture Dipole Magnet

Fabrication of the 1st model dipole magnet (NbTi+Nb₃Sn)

Cabling → Coil winding → HT → VPI → Magnet assembly → Test



CEPC造价估计

	编号	设备名称	总价 (万元) 50公里	总价 (万元) 100公里
2				
3				
4	1	合计	2549806.46	3605118.32
5	2	加速器	1597277.31	2313154.43
522	3	探测器	250227.56	250227.56
691	4	同步辐射装置	32635.00	32635.00
723	5	土建	669666.58	1009101.34
724	5.1	建筑工程(钻爆法、6m、	279276.57	413820.89
926	5.2	机电设备安装工程	220962.28	342853.59
1003	5.3	金属结构设备安装工程	17664.63	26174.59
1010	5.4	临时工程	28749.46	42218.60
1039	5.5	独立费用	47286.37	69815.84
1052	5.6	不可预见费10%	59393.93	89488.35
1053	5.7	其他费用	16333.33	24729.48

- 方法1: 分项估计相加
- 方法2: 与已建成的同类装置类比, 结合实际情况修正

预研完成后会更加准确

这个估价可靠吗？

- 国际上不成功的经验：ISABELLE, SSC, FAIR,...
 - 全新技术，质子加速器,...
 - 漏项、预研不充分，设计修改、人员、外部环境、管理等问题
- 国际上成功的经验：SLAC/SPEAR, LEP, LHC, PEP-II, KEKB/SuperKEKB, ...
 - 相对较成熟技术，特别是电子加速器,...
 - 管理到位
- 国内成功的经验：BEPC/BEPC-II, 散裂, 大亚湾/江门...
 - 包括电子/质子加速器, 靶站/谱仪, 地下隧道, ...
 - 成熟的管理模式/制度, 技术/管理能力与队伍, ...
 - 投入：像装修自家房屋一样对待经费、质量、进度...

我们有信心和能力，按指标、预算、进度完成建设任务

经费来源：调动各方面的积极性

- 中央政府：科学设施建设（70-80%）与运行费
 - 重大国际合作专项？
- 地方政府：土地与配套设施建设，办公与研究环境建设，科学城规划，研究中心部分运行费
 - 对地方发展推动巨大；推动土地升值
- 国际合作：部分（~ 20-30%）科学设施建设与运行费
 - 国际惯例，先进的设施，重大成果的期望
 - 已有经验：北京谱仪(~100万美元)、大亚湾(~1000万美元)、江门(~5000万欧元)
- 私人与企业赞助：提高设施的性能；科学城建设
 - 生活设施建设，土地开发回报，。。。
- 科学院：研究中心运行费、人员费

预研目标及其意义

- 加速器/探测器的概念设计、工程设计
- 土建方面的选址、规划、地质勘探、设计、评估、评审。。。.
- 几项关键技术预研:
 - 超导射频加速腔
 - 用于各种加速器, 国内有样机但尚未实用, 指标需提高, 没有生产能力
 - 目标: 达到高性能(Q值 4×10^{10} 、加速梯度等), 国产化, 批量生产
 - 微波功率源 (大功率速调管、固态功率源)
 - 广泛用于加速器、广播、通讯、雷达等。大功率速调管依赖进口
 - 目标: 达到高性能(效率 $>80\%$ 、功率 800kW 、寿命等), 国产化, 批量生产
 - 低温制冷机
 - 广泛用于民用、科研、航天等。基本依赖进口, 大型制冷机禁运。国内有样机
 - 目标: 达到高性能(功率 $12\text{kW}@4.5\text{K}/2.5\text{kW}@2\text{K}$)、高可靠性, 国产化
 - 高温超导线
 - 广泛用于民用、科研等。国内水平较好, 性能与价格有待大幅度提高
 - 目标: 大大提高性价比, 实现输电等民用领域的应用
 - 抗辐照半导体探测器及读出芯片
 - 高场超导磁铁, 束流测量与诊断, 自动控制、计算机, 精密机械, ...

设备国产化率可达95%以上

投入产出比

- 国际上,欧美日均研究过大型加速器设施的投入产出比,结论一致为1:3左右,即投入1元,收获3元
- 主要的直接产出为:
 - 企业产值
 - 技术水平的提高及其在其它领域的直接应用
- 主要的间接产出为:
 - 创新型人才培养
 - 科学普及
 - 企业研发能力的提高
 - 企业无形资产的提高:影响力,知名度,国际市场,...

1:3 甚至更大

John Womersley. Impact of the Tevatron on Technology and Innovation.

[2012-6-11] <http://www.fnal.gov/pub/tevatron/files/120611Womersely.pdf>

Bianchi-Streit etc. Economic utility resulting from CERN contracts (second study).

<http://cds.cern.ch/record/156911/files/CERN-84-14.pdf>

Massimo Florio et al., arXiv: 1603.00886

野村综合研究所: ILC的经济波及效果

http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chousa/shinkou/038/gaiyou/1357655.htm

HTC Superconducting Cables

- Huge impact If magnet can be used at $\sim 4.5\text{K} - 20\text{K}$
- Fe-based HTC cable
 - Metal, easy to process; Isotropic; Cheap in principle
- Background in CAS
 - World highest T_c Fe-based materials
 - World first $\sim 115\text{ m}$ Fe-based SC cables: $12000\text{ A/cm}^2 @ 10\text{ T}$
- A collaboration on “HTC SC materials” : Institute of Physics, USTC, Institute of electric engineering, IHEP, 3 SC cable companies in China
 - Iron based HTC cables
 - ReBCO & Bi-2212
 - Goal: $\sim 3-5\text{ \$ /kA}\cdot\text{m}$
 - Current density: $\times 10$
 - Cost/m: $\div 10$



Common Issues with HEPS

- HEPS-TF approved by NCDR
- HEPS(80 km from IHEP) to be approved in 2018 ?
- Applicable to CEPC: Beam diagnostics, vacuum, mechanics, ...
- A large R&D platform for accelerators and detectors, supported by the Municipal Government of Beijing



Beam Energy: 6 GeV
Beam Current: 200 mA
Circumference: 1300 m
Emittance: 0.06 nm·rad

Requiring a factor of 10
better orbit precision,
magnet precision &
stability, etc.

Site selections (a few main candidates)



1)



2)



3)

1) Qinhuangdao

2) Shanxi Province

3) Near Shenzhen and Hongkong

建设一个国际科学城：成为世界文明中心的一个标志

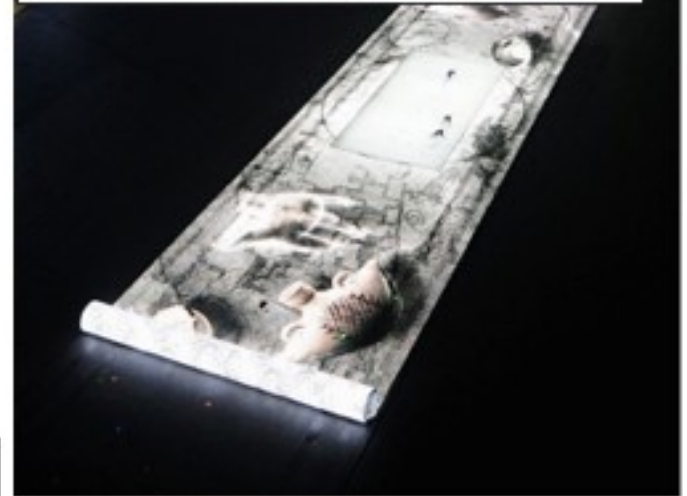
- 大型科学设施：
 - 正负电子对撞机CEPC, 质子对撞机SppC
 - 同步辐射光源(CEPC), 自由电子激光(注入器), ...
- 科学研究与技术研究中心：
 - 粒子物理研究
 - 多学科研究：物理、化学、材料、生物、医药、。。。
 - 先进技术：加速器、探测器、精密机械、微波、低温、超导、电子、自动控制、计算机、。。。
- 科学城
 - 人才基地:上万名世界各地的科学家、工程师、学生
 - 设备供应商：精密机械、微波、低温、超导、电子、。。。
 - 研究单位与企业研究院：物理、材料、生物、医药、。。。
 - 辅助与生活服务、教育培训设施
 - 国际化的管理,体制改革
 - 国际合作与外交

中国能花得起这个钱吗？

- 文明大国的应有贡献？
- 十八届五中全会：“发起国际大科学计划和工程”
- 刘延东在高能所：“希望中科院、高能所在未来的十年，不仅为我们国家的科学事业做出贡献，还应该为世界的科学事业发展、人类的文明进步做出中国人应有的贡献”

BEPC: 造价/4年/中国1984年GDP ≈ 0.0001
SSC: 造价/10年/美国1992年GDP ≈ 0.0001
LEP: 造价/8年/欧洲1984年GDP ≈ 0.0002
LHC: 造价/10年/欧洲2004年GDP ≈ 0.0003
ILC: 造价/8年/日本2018年GDP ≈ 0.0002
CEPC: 造价/8年/中国2020年GDP ≈ 0.00005
SppC: 造价/8年/中国2036年GDP ≈ 0.0001

2008 北京 奥运开幕式：
造纸、毛笔、活字印刷、太极。。。



2012 伦敦 奥运开幕式：
原子核、CERN、互联网



中国人能负担得起这样的花费吗？

- 如果建在中国（13亿人）：每个人要出 ~ 4 美元(每年0.4美元, 一瓶矿泉水)，是年人均GDP的万分之五
- 如果建在美国（3亿人），每个人至少要出30美元（在美国造, 至少贵一倍），是年人均GDP的万分之五
- 如果建在日本（1.2亿人），每个人至少要出80美元（在日本造, 至少贵一倍），是年人均GDP的万分之十五
- 如果建在马来西亚（0.3亿人），每个人要出170美元，是年人均GDP的万分之二百
- 如果建在墨西哥（1.2亿人），每个人要出40美元，是年人均GDP的万分之五十

我们是世界上最有能力承担这样项目的国家之一
我们想承担科学前沿的领导责任吗？

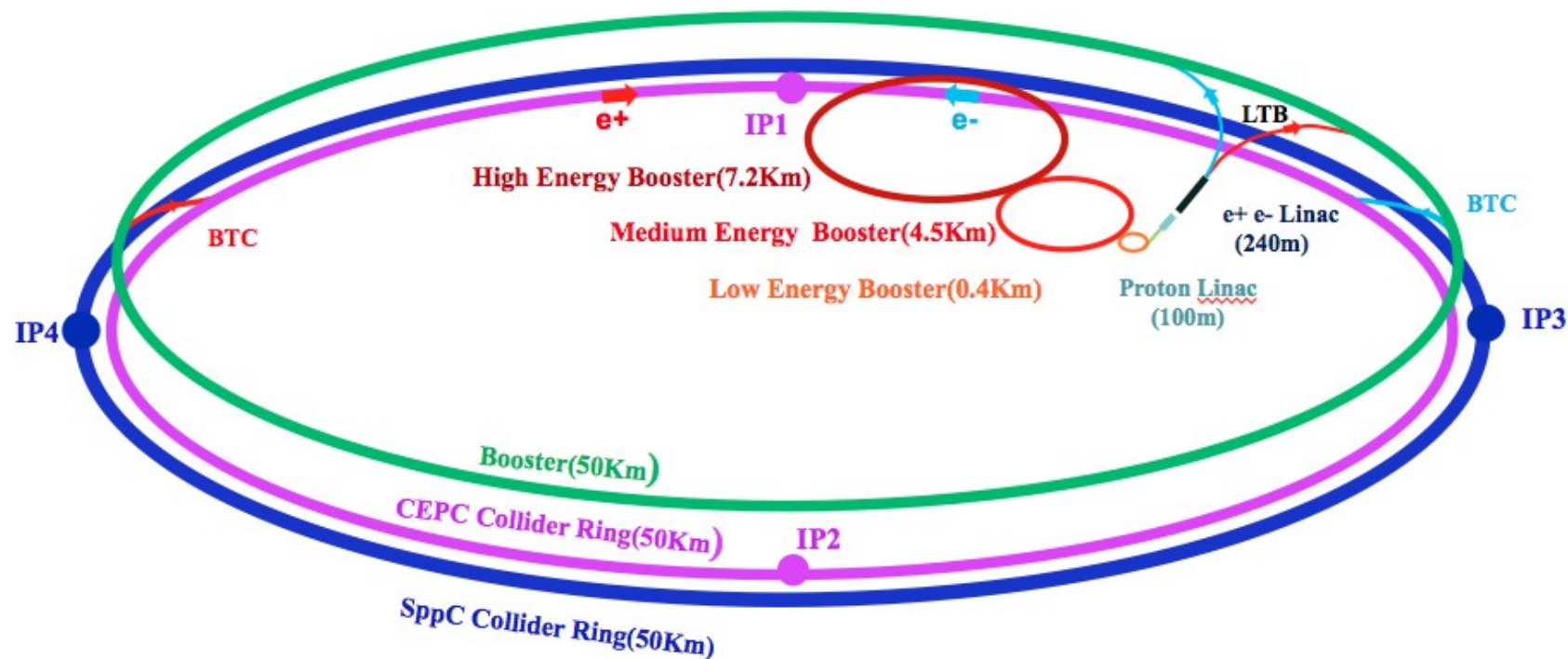
小结

- 我国的高能物理发展，起点很高，三十多年来发展顺利。
- 目前面临重大发展机遇，建设CEPC，可以使我们
 - 在一个重大科学领域领先国际
 - 在一批关键技术领先国际
 - 有一个大型多学科研究平台
 - 获得巨大的经济与社会效益
 - 地方发展，社会影响
 - 技术进步，企业机遇
 - 国际人才吸引和青年人才培养
 - 国际化理念、管理
 - 国际影响力和国家软实力
- 科学意义重大，技术上可行，经济上有能力，作为中国发起的国际大科学项目，CEPC是最好的候选
- 提供选项，是我们科学家的责任。最终的决定，由政治家们去做



随着国力的提高，我们会有更多的大科学装置，会逐步赶上并引领世界。让我们一起努力！

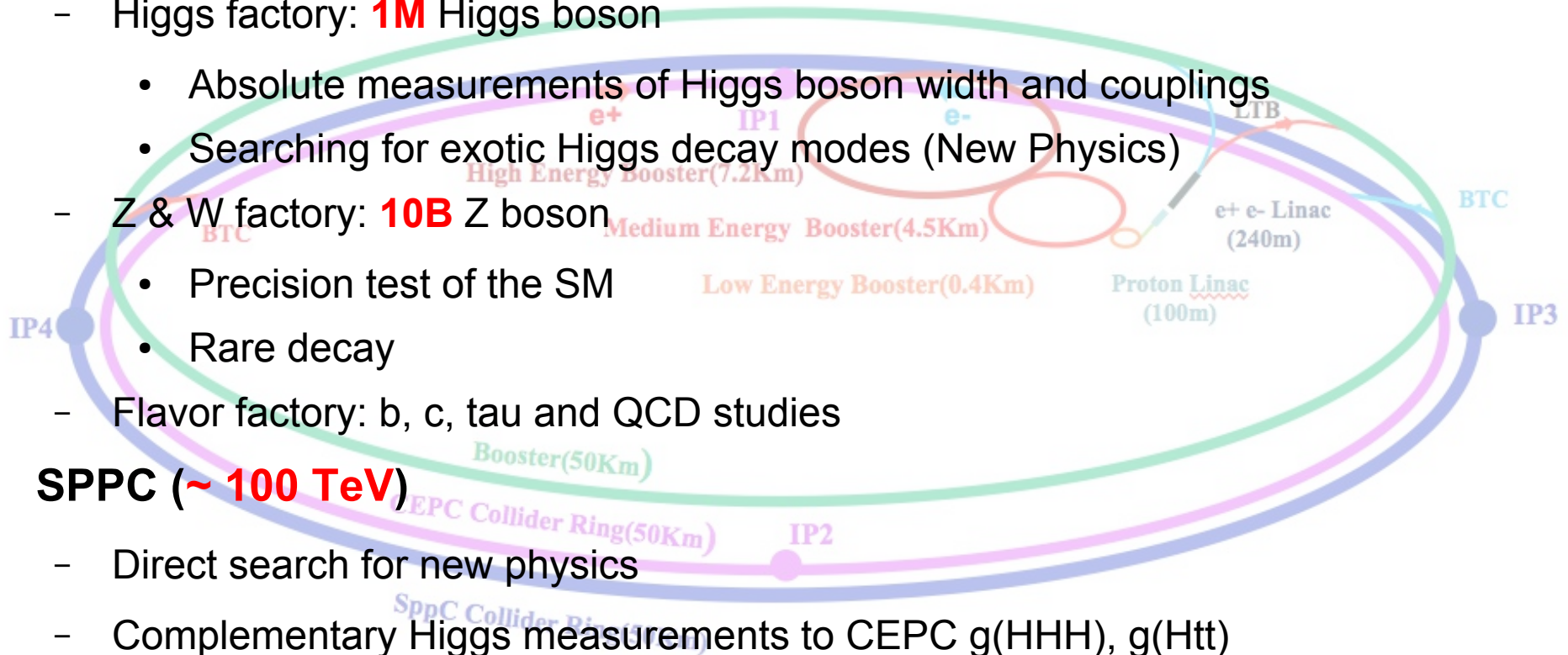
环形正负电子对撞机：干净 / 精确的 Higgs 粒子工厂



- Higgs 粒子的质量是 125 GeV，这使得建造环形正负电子希格斯工厂 (CEPC) 成为可能。我们能够通过 CEPC 上产生的 100 万希格斯粒子，以及 100 亿 Z 粒子对希格斯粒子和标准模型进行精确测量，并进行新物理搜索。
- 该工厂可被升级为能量达 100 TeV 量级的超级质子对撞机 (SPPC)，从而对超出标准模型的新粒子、新规律进行直接搜索

Science at CEPC-SPPC

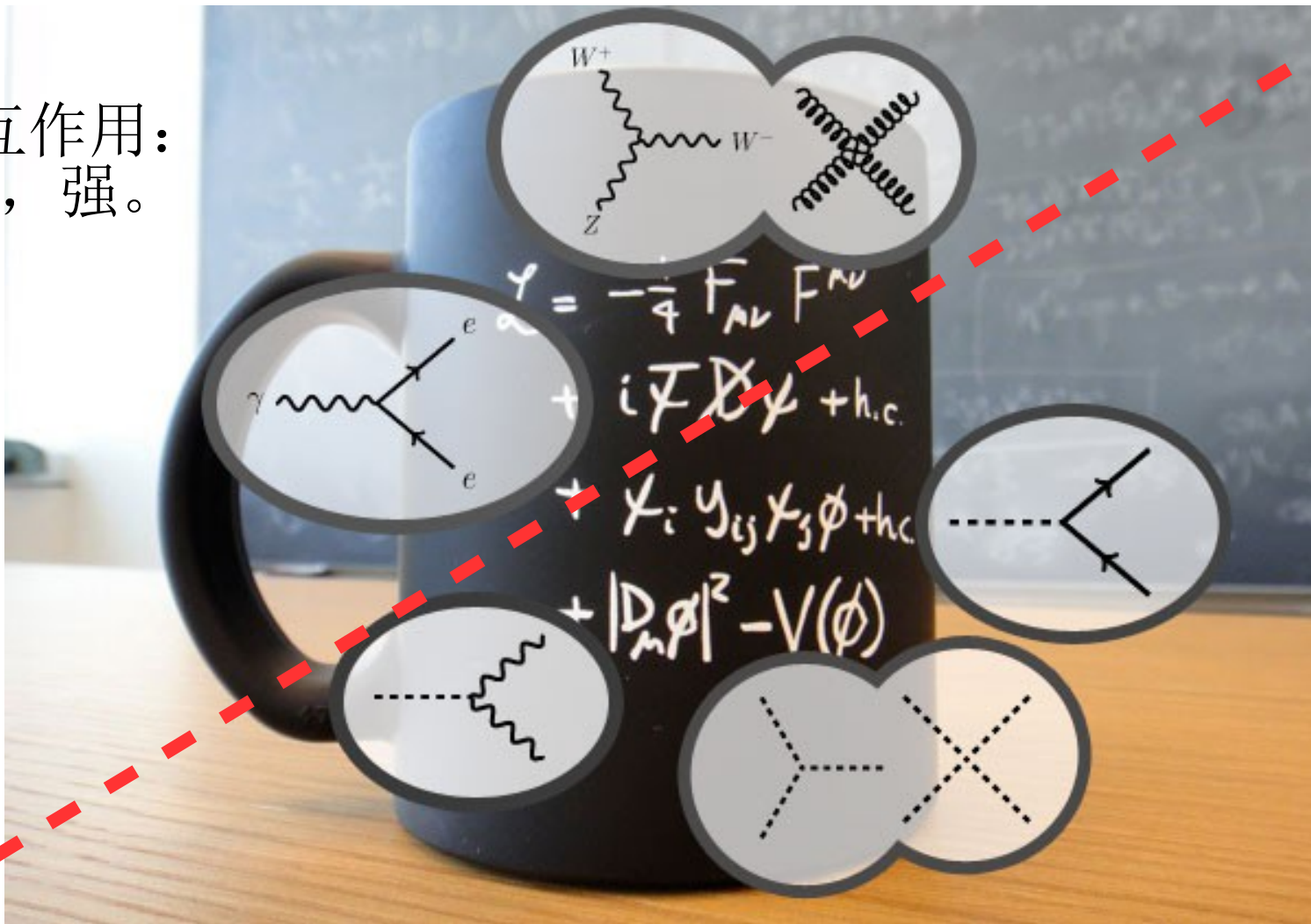
- Tunnel ~ **100 km**
- CEPC (90 – 250 GeV)
 - Higgs factory: **1M** Higgs boson
 - Absolute measurements of Higgs boson width and couplings
 - Searching for exotic Higgs decay modes (New Physics)
 - Z & W factory: **10B** Z boson
 - Precision test of the SM
 - Rare decay
 - Flavor factory: b, c, tau 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

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

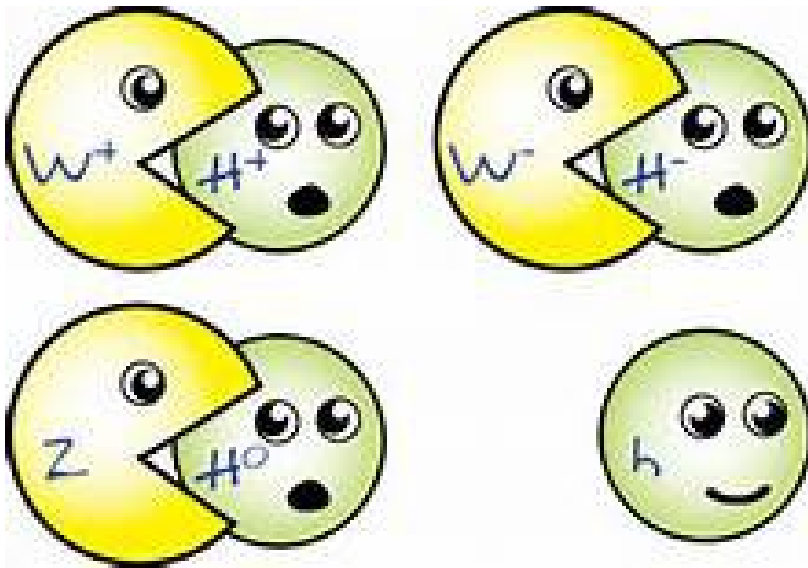
$$+ \psi_i y_{ij} \psi_j \phi + h.c$$

$$+ |D_M \phi|^2 - V(\phi)$$

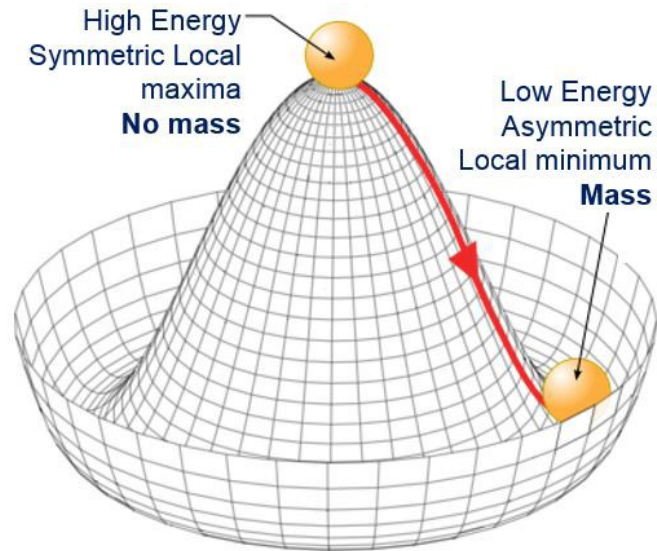
Yukawa 耦合：费米子质量



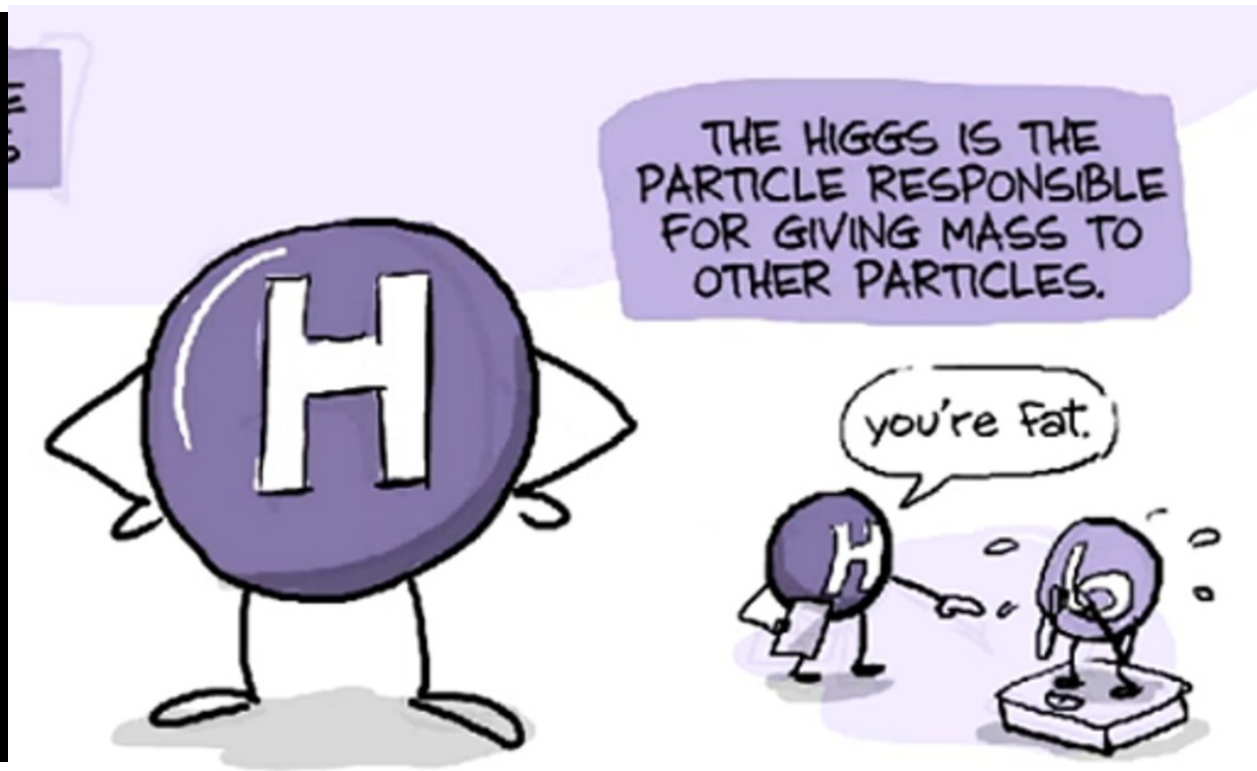
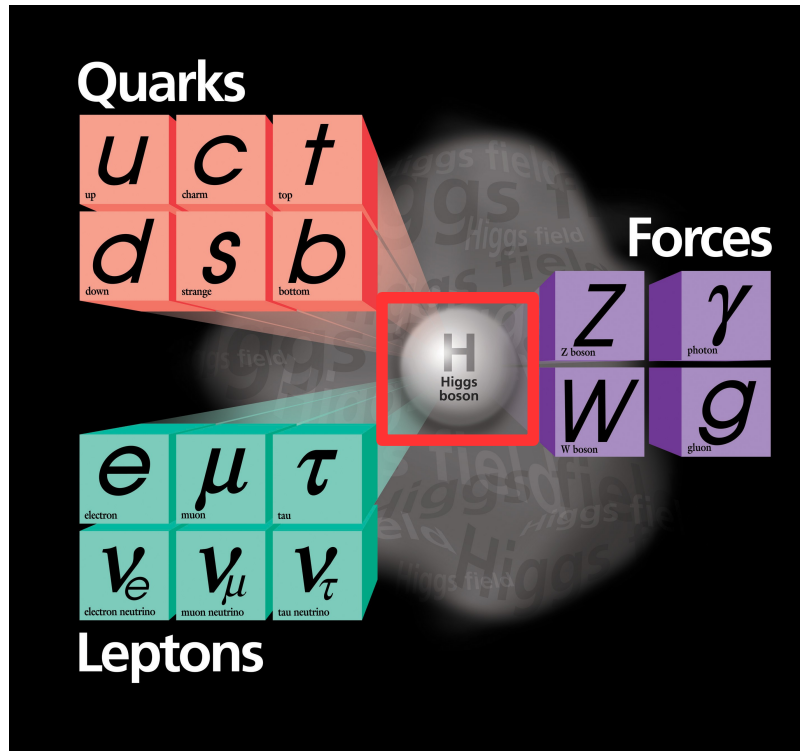
Higgs 机制：W/Z 粒子质量

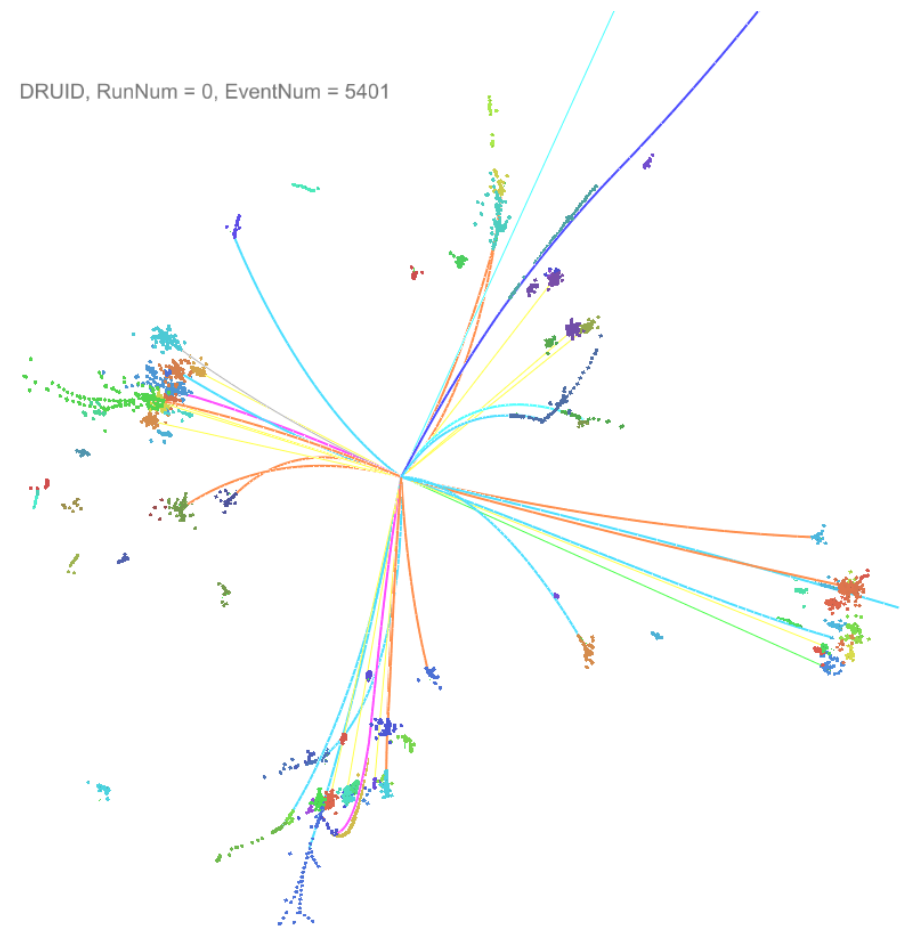
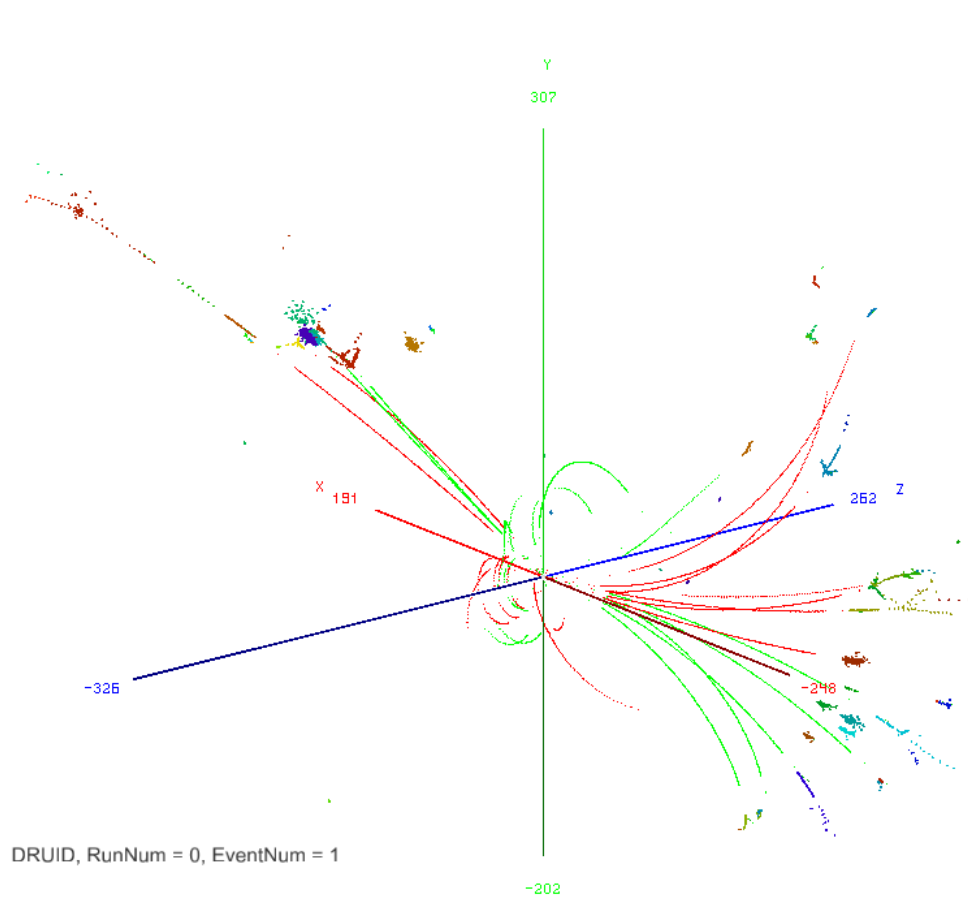


Higgs 场的真空期望值 (势能最低点)， Higgs 粒子质量



Higgs 粒子：质量之源





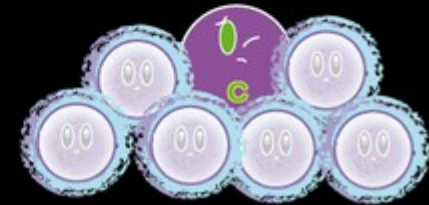
Sim Higgs @ CEPC

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu}$$



$$+ i\bar{\psi} \not{D} \psi + h.c$$

$$+ \bar{\psi}_i \gamma_{ij} \psi_j \phi + h.c$$



$$+ |D_\mu \phi|^2 - V(\phi)$$



CEPC是我国高能物理乃至整个科学发展的一个重大机遇

- Higgs研究的重大科学意义
- Higgs 质量较小（125 GeV），可以建环形 e^+e^- 对撞机
- 国际环境：无暇它顾
 - 欧洲手上有LHC
 - 日本：ILC
 - 美国：中微子
- 我们有科学、技术及经济能力
- 我国的优势
 - 隧道建设能力与优势
 - 大型项目建设与管理经验
 - 年轻的队伍，较低的成本。。。
 - 我们有30年北京 e^+e^- 对撞机设计、建造、科学研究的基础

中国发起的国际大科学工程
地方的社会与经济发展
国际科学技术研究中心
人才引进和培养基地
国际化的科研体制建设
科技外交与中国软实力

预研例：超导高频加速系统

设计

- 主环650 MHz: 400 - 500 个超导腔, 新设计、新技术
- 增强器1.3 GHz: 256 个 9-cell 超导腔, ILC/XFEL技术
- 高频系统总体规模与刚建成的Euro-XFEL相当

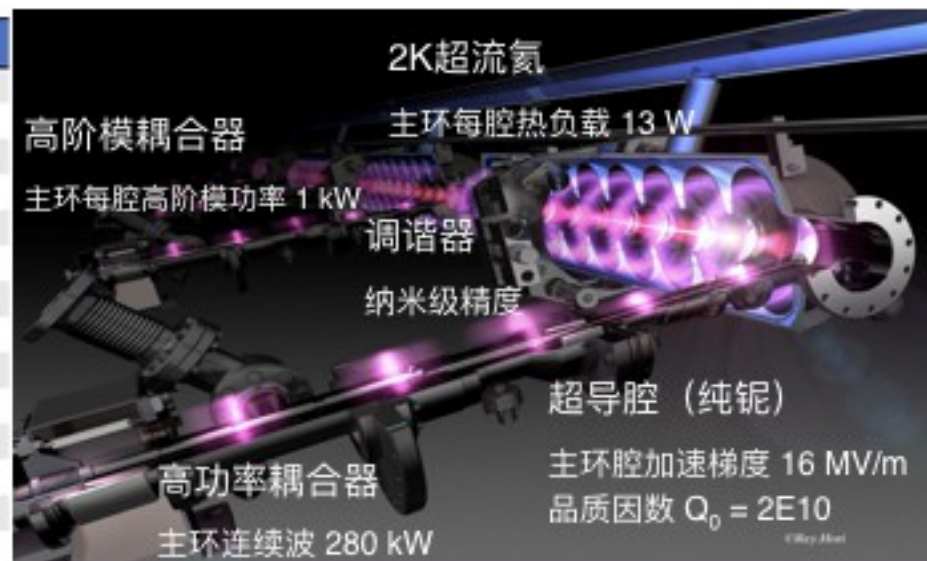
全新关键技术

- 氮掺杂高Q超导腔
- 高阶模抑制
- 高功率耦合器



CEPC 650MHz超导腔 氮掺杂腔垂直测试

对应物理参数: wangfou20160918/23 (周长 61 km)	H	H Low Power	H High Lums	W	Z
能量 (GeV)	120	120	120	80	45.5
主环类型	单环		双环或 (改进型) 局部双环		
亮度 / IP ($10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)	2.0	2.0	3.1	4.3	4.5
同步辐射总功率 (MW)	100	66	100	43	9
单束流强 (mA)	16.6	11.0	16.9	36.5	67.6
高频腔压 V_{RF} (GeV)	7	3.51	3.48	0.75	0.12
650 MHz 超导腔	5-cell	2-cell	2-cell	2-cell	2-cell
超导腔数目	384	480	480	192	32
低温恒温器 (超导组元) 数目	96	80	80	32	16
加速梯度 E_{acc} (MV/m)	16.2	16.0	15.8	8.5	8
品质因数 Q_0 @ 2 K	4E10	2E10	2E10	2E10	2E10
每腔匹配输入功率 (kW)	267	137	209	226	277
每腔高阶模功率 (kW)	3.7	0.5	0.7	0.8	0.9
腔壁损耗 @ 4.5 K eq. (kW)	23	22.5	22.1	2.5	0.4



预研例：微波功率源

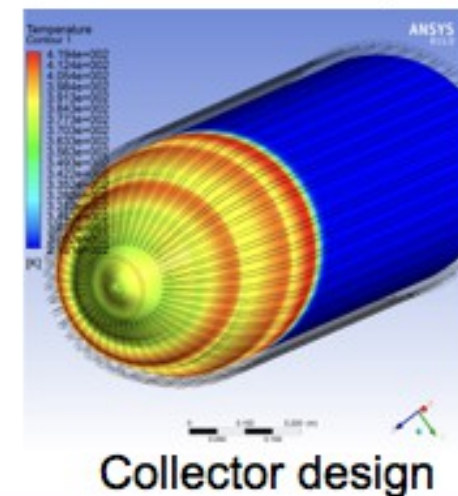
新型高功率、高效率速调管设计

Parameters mode	Now	Future
Centre frequency (MHz)	650+/-0.5	650+/-0.5
Output power (kW)	800	800
Beam voltage (kV)	80	70
Beam current (A)	16	15
Efficiency (%)	65	80

与企业合作，
开展高功率、
高效率速调管
研制



Gun assembly



Collector design

CEPC作为中国发起的国际大科学项目

- 中国已参加了ITER(9%)、SKA(10%?)、TMT(10%?)、LHC(0.1%) 等国际大科学工程, 总投入约50-100亿人民币。
- 该自己发起并主导 1-2项大科学工程 了! CEPC是理想的候选者!
 - 有确切的重大科学目标和意义; 有重大和广泛的技术带动作用; 有国际贡献...
- 目标: 国际贡献 ~ 20-30%, 10亿美元
 - 美、欧、日各3亿美元, 分10年, 每年3000万美元
- 世界各大高能实验室均已表示愿意参加CEPC合作
 - 合作内容已纳入中美、中意、中法、中日年度高能物理会谈纪要
 - 已与美国芝加哥大学、SLAC、BNL, 俄罗斯BINP, 以色列Tel Aviv 大学及匈牙利、塞尔维亚、南非等国大学和研究所签署合作协议
- 管理权限与经费贡献成正比, 模式有待研究: ITER
- 作为一个起步, 我们成立了“Center for Future HEP”, 并开始引进“外专千人”。
- 成立了国际顾问委员会: 国际各大实验室前任或现任领导人、诺奖获得者、著名科学家等 ~ 30人参加



为什么美国人不做？

- 美国人曾想做ILC，但尚未从SSC的阴影里走出
- 巨大的赤字和债务，官僚主义和极为繁琐的管理文化，极高的管理成本，使其做任何大项目都很难
- 仍然想做：
 - HEPAP: As work proceeds worldwide on long-term future-generation accelerator concepts, the US should be counted among the potential host nations
 - 至少会参与 R&D与技术发展
- **SSC 为什么被砍掉**
 - 政府赤字，在空间站与SSC之间选择，两党政治斗争，区域竞争，管理不善，...

P5 report:

A very high-energy proton-proton collider is the most powerful future tool for direct discovery of new particles and interactions under any scenario of physics results that can be acquired in the P5 time window. Colliders of energy up to 100 TeV, with a circumference of about 100 km with an option of e^+e^- , are presently under study at CERN, in China, and in the U.S. Extensive

S. Wojcicki, *Rev. of Acce. Sci. and Tech.* Vol. 1 (2008) 259-302; Vol. 2 (2009) 265-301
M. Riordan, L. Hoddson, A. Kolb, *Tunnel Visions*, The University of Chicago Press, 2015

投资大项目还是分散到小项目

- 小项目风险小吗？
 - 每年基金委的经费是美国NSF的一半，成果也有一半？
 - NSF历史性的成果：投资 LIGO约10亿美元，发现引力波！
- 基金委/科技部的科研（小）项目，有多少进了国外仪器设备公司的腰包？
 - 小项目不可能研发仪器，
 - 专门的仪器项目不一定满足要求
 - 企业人才不足
- 大项目会研制专用设备，培养设备研制人才，出重大科学成果
- 总体来说，中国对大科学装置项目投入不足，比例偏低
 - 当然也需要做好选择，保证出成果 → 看过去的记录

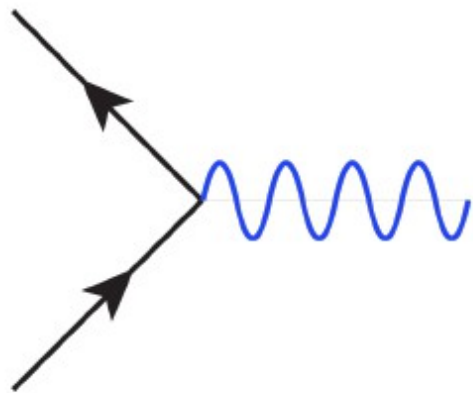
都要有，不可偏废。要研究合适的比例

中微子振荡的条件

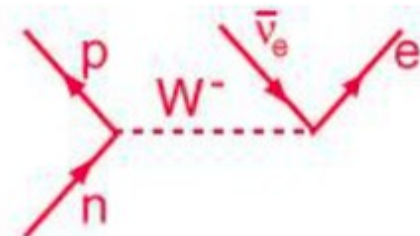
- ◆ 中微子在飞行中将发生振荡，即从一种中微子变成另一种中微子，如果
 - ⇒ 中微子有质量，且
 - ⇒ 中微子味道本征态不等于质量本征态
- ◆ 振荡：**中微子有质量**（但特别轻，至今没有测出来）
 - ⇒ 中微子也有右旋态！（但至今没有测出来）
 - ⇒ 有可能破坏CP对称性！（但至今没有测出来）
 - ⇒ 质量起源：它有可能是它自己的反粒子！（但至今没有证据）
- ◆ **中微子振荡，首次也是唯一，发现超出标准模型的现象。**

费曼图：定域相互作用

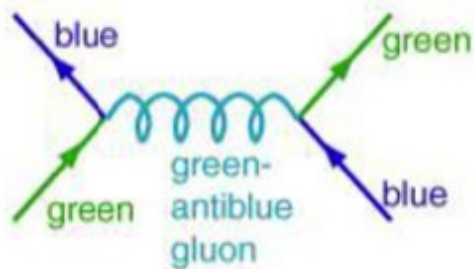
↑
—
时间轴
—
↓



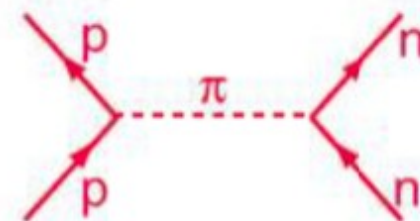
Electromagnetic Interaction



Weak Interaction

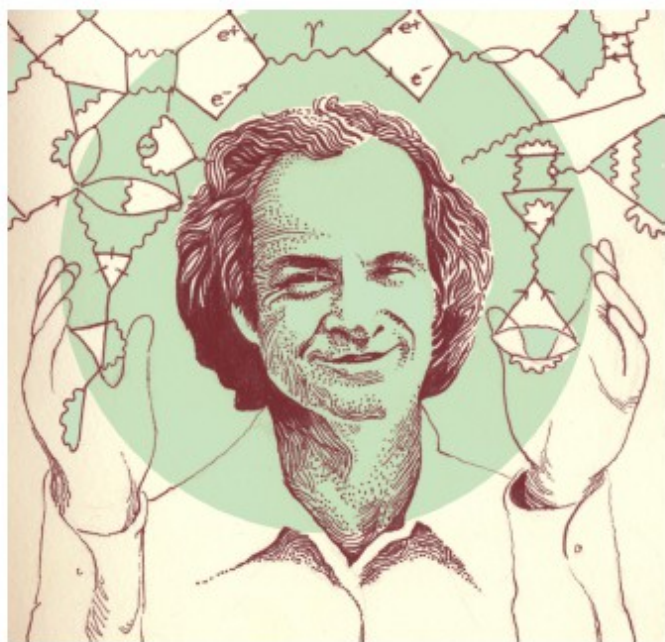


between quarks



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

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，
LEP 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

$M_H > 114 \text{ GeV}$ at 95% C.L.

→ precision EW fits (winter 2005)

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

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

→ Light Higgs favored

Tevatron provides:
Precision measurements of m_{top} & M_w
and

Direct searches:
→ SM Higgs
→ non-SM Higgs

