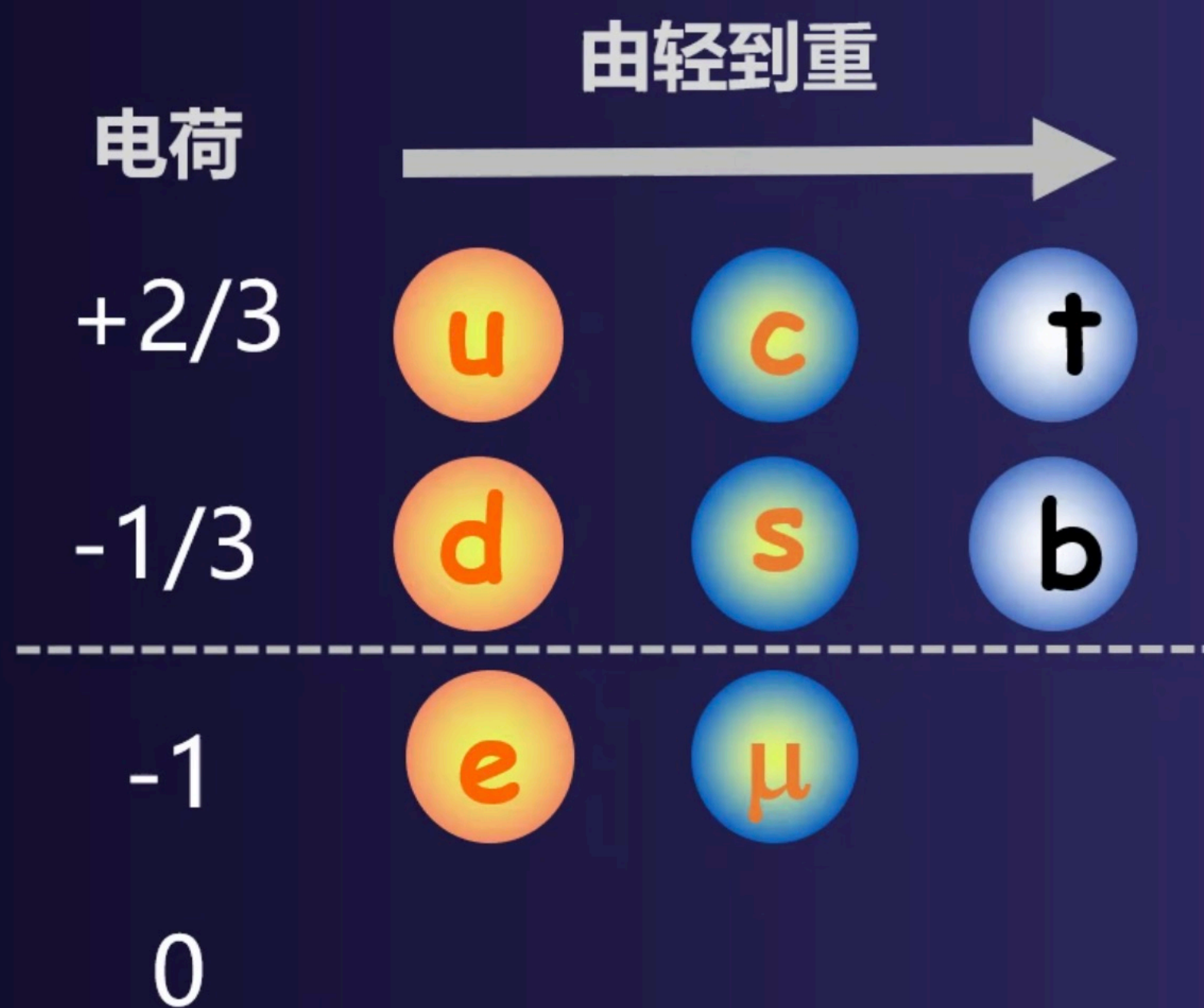


主要内容

- 粒子物理的标准模型
- W粒子及其质量
- CDF实验结果分析
- CDF实验结果的近期验证
- CDF实验结果对标准模型的意义
- 粒子物理实验研究的未来

基本粒子：构成物质世界的基本“砖块”



1964年, 盖尔曼等提出夸克模型



1974年, 丁肇中、B. 里克特发现 J/ψ 粒子
(c \bar{c}), $m_c \sim 1.5\text{GeV}$



1977年, L. 莱德曼发现 Υ (9.5GeV)
(b \bar{b}), $m_b \sim 5\text{GeV}$

1995年, 美国费米实验室 CDF、D0 实验发现 Top 夸克
(t), $m_t \sim 173\text{GeV}$

除夸克之外, 还存在着另一类基本粒子: 轻子

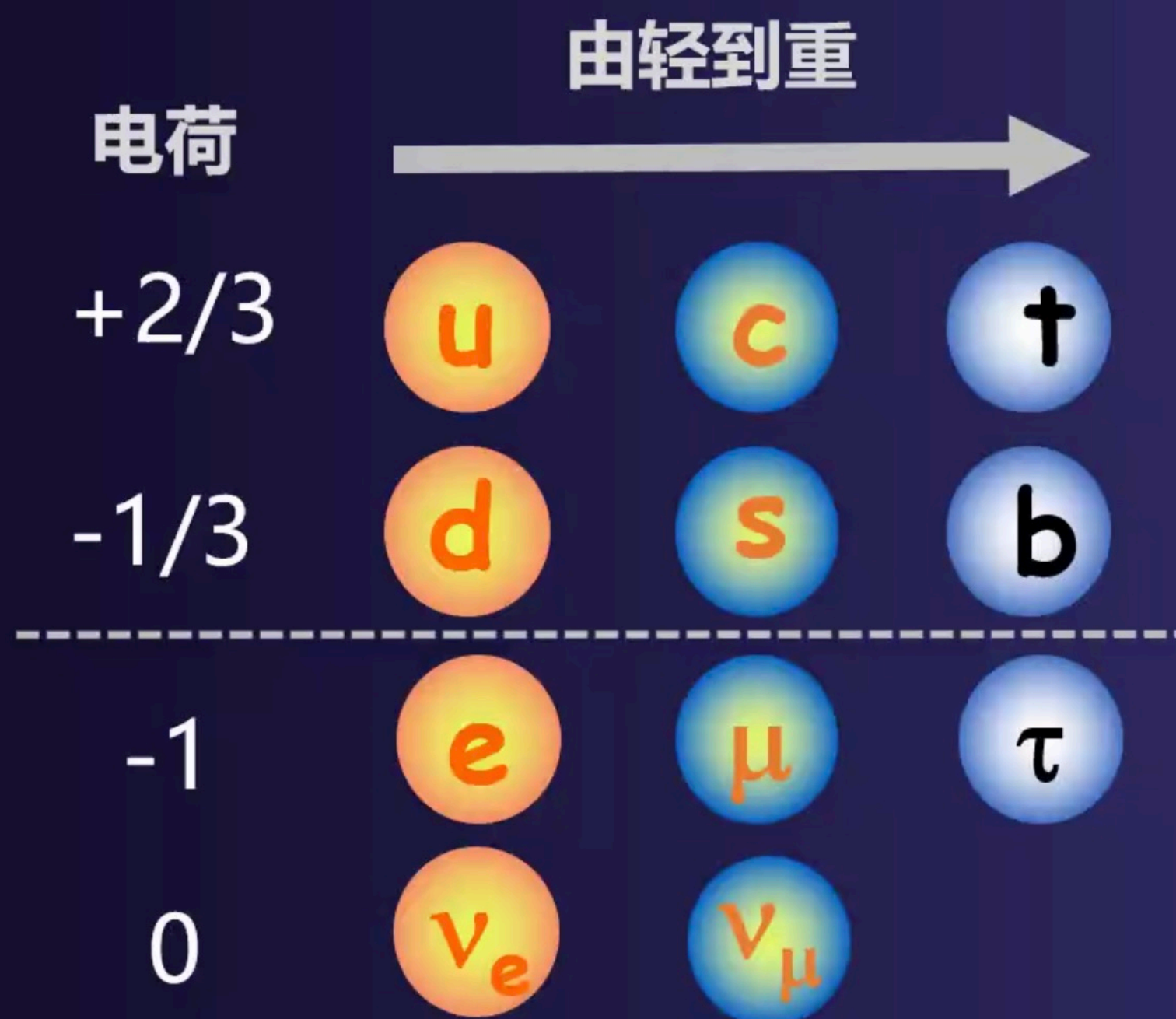
1897年, J.J. 汤姆逊等发现电子



1936年, C.D. 安德森等发现 μ 轻子



基本粒子：构成物质世界的基本“砖块”



1964年, 盖尔曼等提出夸克模型



1974年, 丁肇中、B. 里克特发现 J/ψ 粒子
($c \bar{c}$), $m_c \sim 1.5\text{GeV}$



1977年, L. 莱德曼发现 Υ (9.5GeV)
($b \bar{b}$), $m_b \sim 5\text{GeV}$

1995年, 美国费米实验室 CDF、D0 实验发现 Top 夸克
(t), $m_t \sim 173\text{GeV}$

除夸克之外, 还存在着另一类基本粒子: 轻子

1897年, J.J. 汤姆逊等发现电子



1936年, C.D. 安德森等发现 μ 轻子



1956年, F. 莱因斯等发现 ν_e



1962年, L. 莱德曼等发现 ν_μ



1975年, M. 珀尔等发现 τ 轻子



基本粒子：构成物质世界的基本“砖块”

| 电荷 | 由轻到重 → | | |
|--------|---------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| $+2/3$ | u | c | t |
| $-1/3$ | d | s | b |
| <hr/> | | | |
| -1 | e | μ | τ |
| 0 | ν_e | ν_μ | ν_τ |

1964年, 盖尔曼等提出夸克模型



1974年, 丁肇中、B. 里克特发现 J/ ψ 粒子
($c\bar{c}$), $m_c \sim 1.5\text{GeV}$



1977年, L. 莱德曼发现 Υ (9.5GeV)
($b\bar{b}$), $m_b \sim 5\text{GeV}$

1995年, 美国费米实验室 CDF、D0 实验发现 Top 夸克
(**t**), $m_t \sim 173\text{GeV}$

除夸克之外, 还存在着另一类基本粒子: **轻子**

1897年, J.J. 汤姆逊等发现电子



1936年, C.D. 安德森等发现 μ 轻子



1956年, F. 莱因斯等发现 ν_e



1962年, L. 莱德曼等发现 ν_μ






1975年, M. 珀尔等发现 τ 轻子



2000年, 美国DONUT实验发现 ν_τ

基本粒子：构成物质世界的基本“砖块”

| 电荷 | 由轻到重 | | |
|--------|---|--|---|
| | → | | |
| +2/3 |  |  |  |
| -1/3 |  |  |  |
| -1 |  |  |  |
| 0 |  |  |  |
| 三代物质粒子 | I | II | III |

1964年, 盖尔曼等提出夸克模型 

1974年, 丁肇中、B. 里克特发现 J/ψ 粒子
(c \bar{c}), $m_c \sim 1.5\text{GeV}$ 

1977年, L. 莱德曼发现 Υ (9.5GeV)
(b \bar{b}), $m_b \sim 5\text{GeV}$

1995年, 美国费米实验室 CDF、D0 实验发现 Top 夸克
(t), $m_t \sim 173\text{GeV}$


除夸克之外, 还存在着另一类基本粒子: 轻子

1897年, J.J. 汤姆逊等发现电子 

1936年, C.D. 安德森等发现 μ 轻子 

1956年, F. 莱因斯等发现 ν_e 

1962年, L. 莱德曼等发现 ν_μ 

1975年, M. 珀尔等发现 τ 轻子 

2000年, 美国DONUT实验发现 ν_τ 

1989-1990年, SLC和LEP发现, 基本粒子只有3代

基本粒子的标准模型：“砖块” + “水泥”

- 物质由三代轻子与夸克构成：

$$\begin{pmatrix} e & \mu & \tau \\ \nu_e & \nu_\mu & \nu_\tau \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} u & c & t \\ d & s & b \end{pmatrix}$$



- 传递相互作用的粒子：

| | | | |
|---------------|--------|----|-------------|
| 光子 | — 电磁作用 | ┌→ | 电弱统一理论 |
| W^\pm 和 Z | — 弱作用 | | |
| 胶子 | — 强作用 | → | 量子色动力学(QCD) |

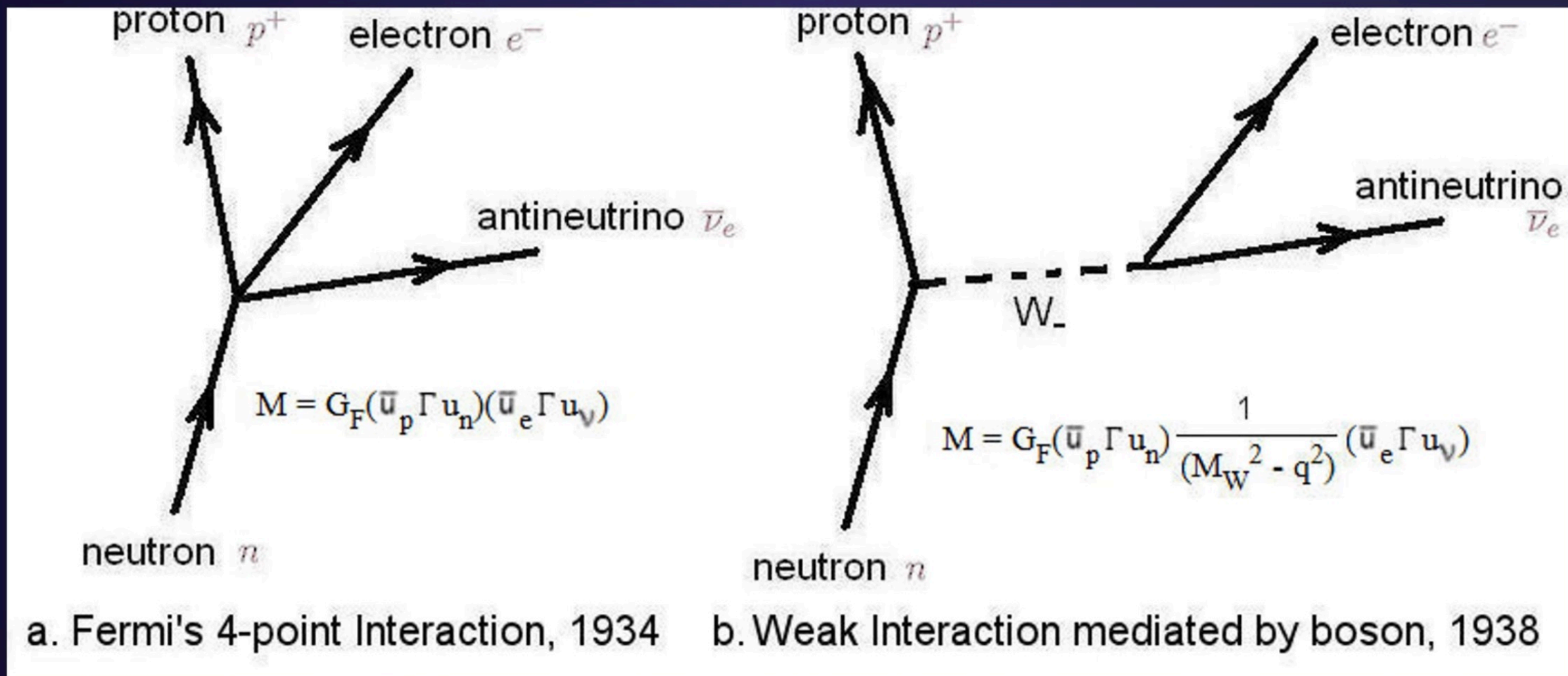


- 质量起源

Higgs



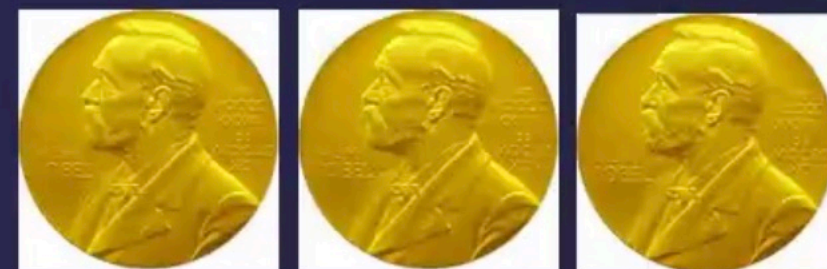
Beta衰变和弱相互作用：W粒子的引入



4 费米子相互作用：成功描述了Beta衰变、Muon-decay等行为

但是4 费米子相互作用截面在高压下是发散的，应当引入有质量的中间玻色子W

弱电统一的标准模型



- 萨拉姆、温伯格和格拉肖提出弱电统一理论：SU(2)×U(1) + Higgs机制

$$\begin{aligned}
 \mathcal{L}_F = & \sum_i \bar{\psi}_i \left(i \not{\partial} - m_i - \frac{m_i H}{v} \right) \psi_i - \frac{g}{2\sqrt{2}} \sum_i \bar{\Psi}_i \gamma^\mu (1 - \gamma^5) (T^+ W_\mu^+ + T^- W_\mu^-) \Psi_i \\
 & - e \sum_i Q_i \bar{\psi}_i \gamma^\mu \psi_i A_\mu - \frac{g}{2 \cos \theta_W} \sum_i \bar{\psi}_i \gamma^\mu (g_V^i - g_A^i \gamma^5) \psi_i Z_\mu .
 \end{aligned}$$

希格斯耦合 W 耦合 电磁耦合 Z 耦合

- 标准模型的几个关键参数服从以下关系

- W、Z玻色子质量
- 费米常数 G_F
- 电磁相互作用常数 α
- 弱混合角 $\sin^2 \theta_W$

$$\begin{aligned}
 \sin^2 \theta_W &= 1 - \frac{m_W^2}{m_Z^2} \\
 m_W^2 \sin^2 \theta_W &= \frac{\pi \alpha}{\sqrt{2} G_F}
 \end{aligned}$$



中性流和弱相互作用: W和Z粒子

- 60年代CERN发展了中微子束流技术, 发现了 ν_μ
- 弱电统一理论预言除W之外, 弱作用还应该通过Z粒子的中性流过程, 并给出Z粒子的质量预言
 - **费米理论只有带电流过程**
- A. Lagarrigue 等提出用中微子束流研究弱相互作用, 建设了Gargamelle 实验
- 1973年, Gargamelle 实验发现了中性流事例 \rightarrow Z粒子的间接发现

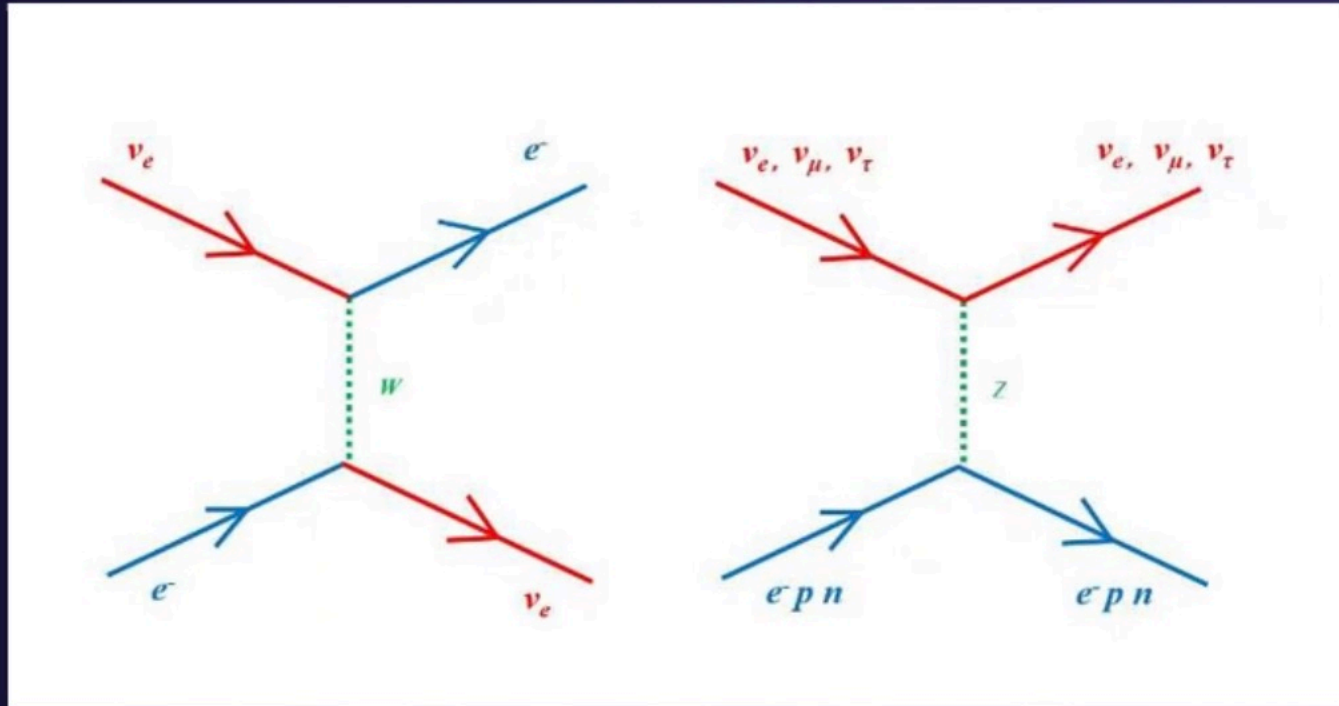
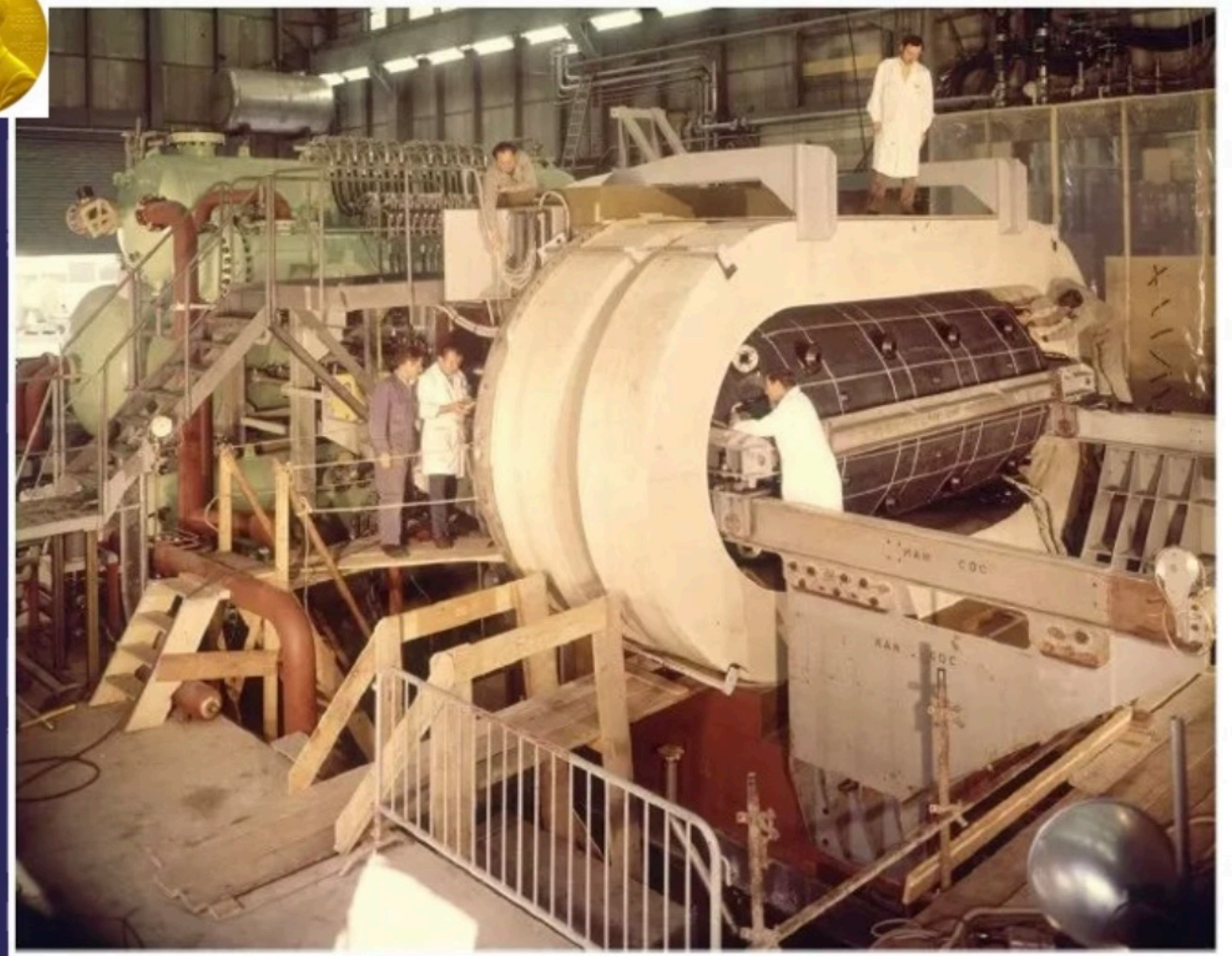


Fig. 1. A hadronic neutral current event, where the interaction of the neutrino from the left produces three secondary particles, all clearly identifiable as hadrons, as they interact with other nuclei in the liquid. There is no charged lepton.



W和Z粒子的直接发现



- C. Rubbia 提出将CERN的质子加速器SPS改为质子反质子对撞机。S. van der Meer采用其1972年发明的随机冷却技术实现了反质子加速器的改建
- 1983年，CERN的UA1和UA2实验发现弱相互作用的传递子 — W与Z
- 粒子物理标准模型就此确立

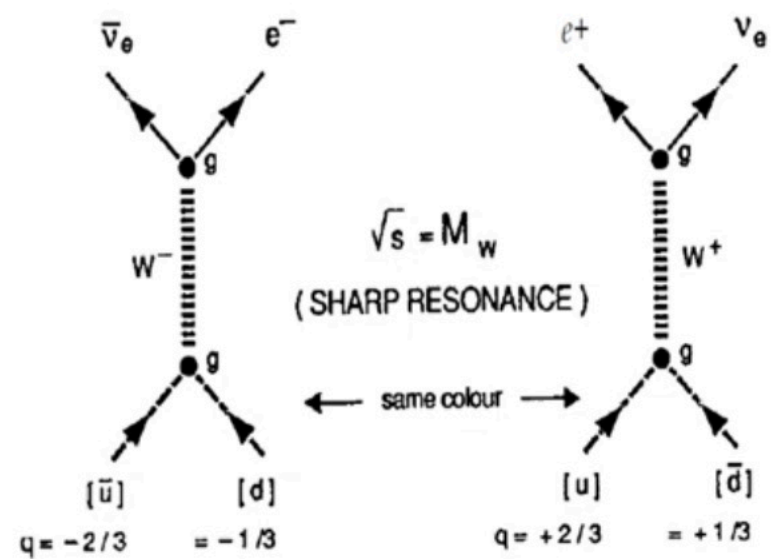
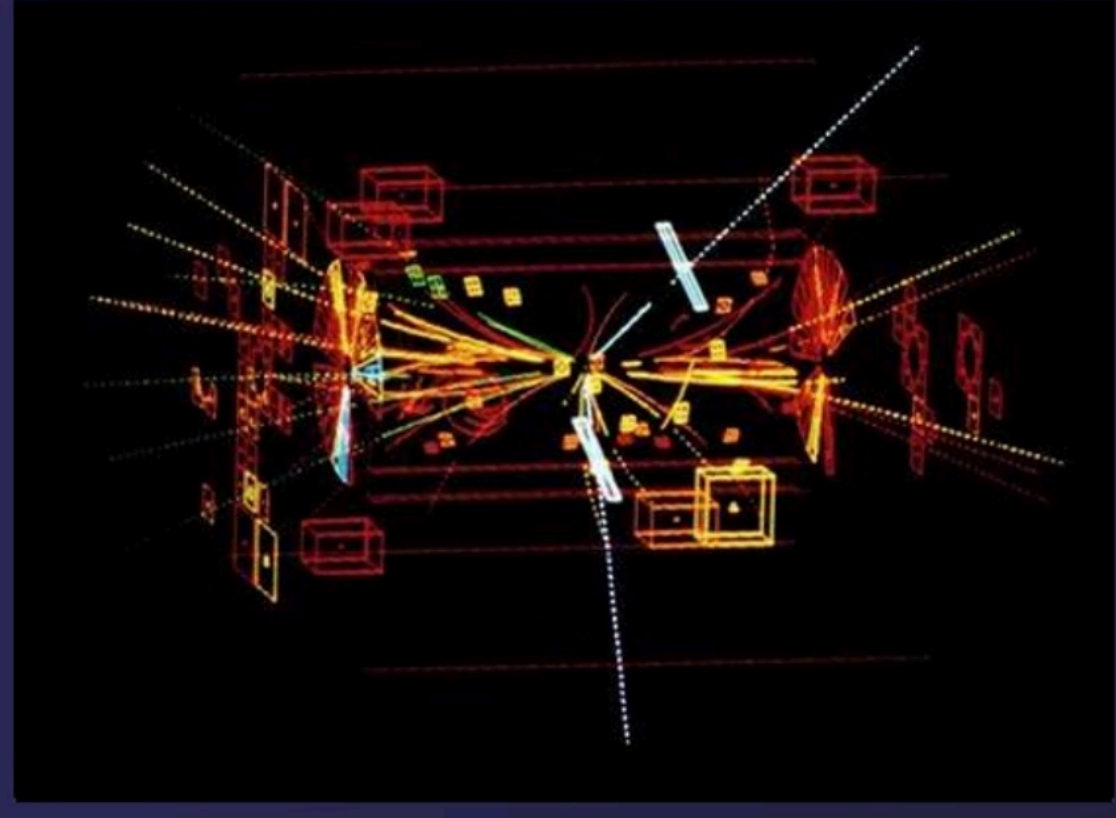
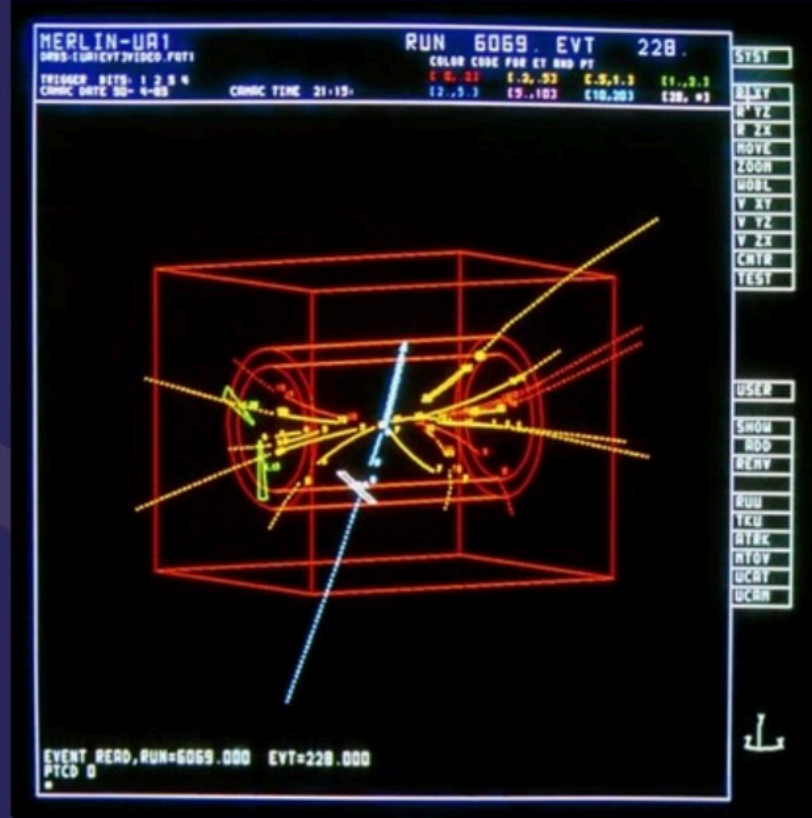


Figure 7: Feynman diagram for the direct production of a W particle.



标准模型中W粒子的质量

正在讲话: YFW;

Electromagnetic constant:
measured in atomic transitions,
 e^+e^- machines

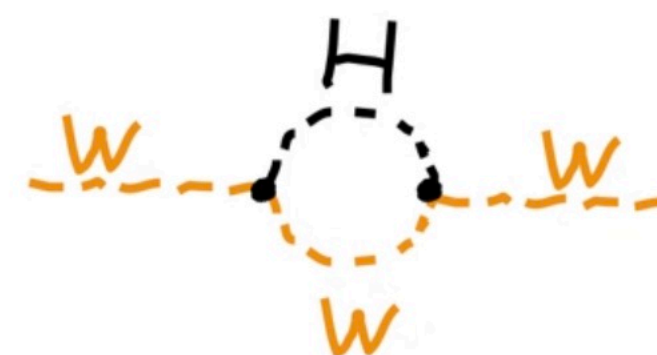
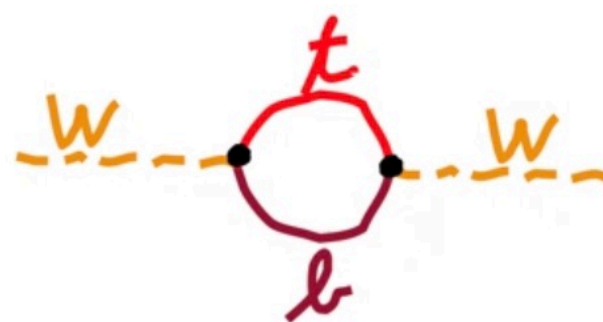
Weinberg angle:
measured at LEP/SLC

$$m_W = \left(\frac{\pi \alpha_{EM}}{\sqrt{2} G_F} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{1}{\sin \theta_W \sqrt{1 - \Delta r}}$$

Fermi constant:
measured in muon decay

Radiative corrections

$$\Delta r \sim f(m_{top}^2, \ln m_H)$$

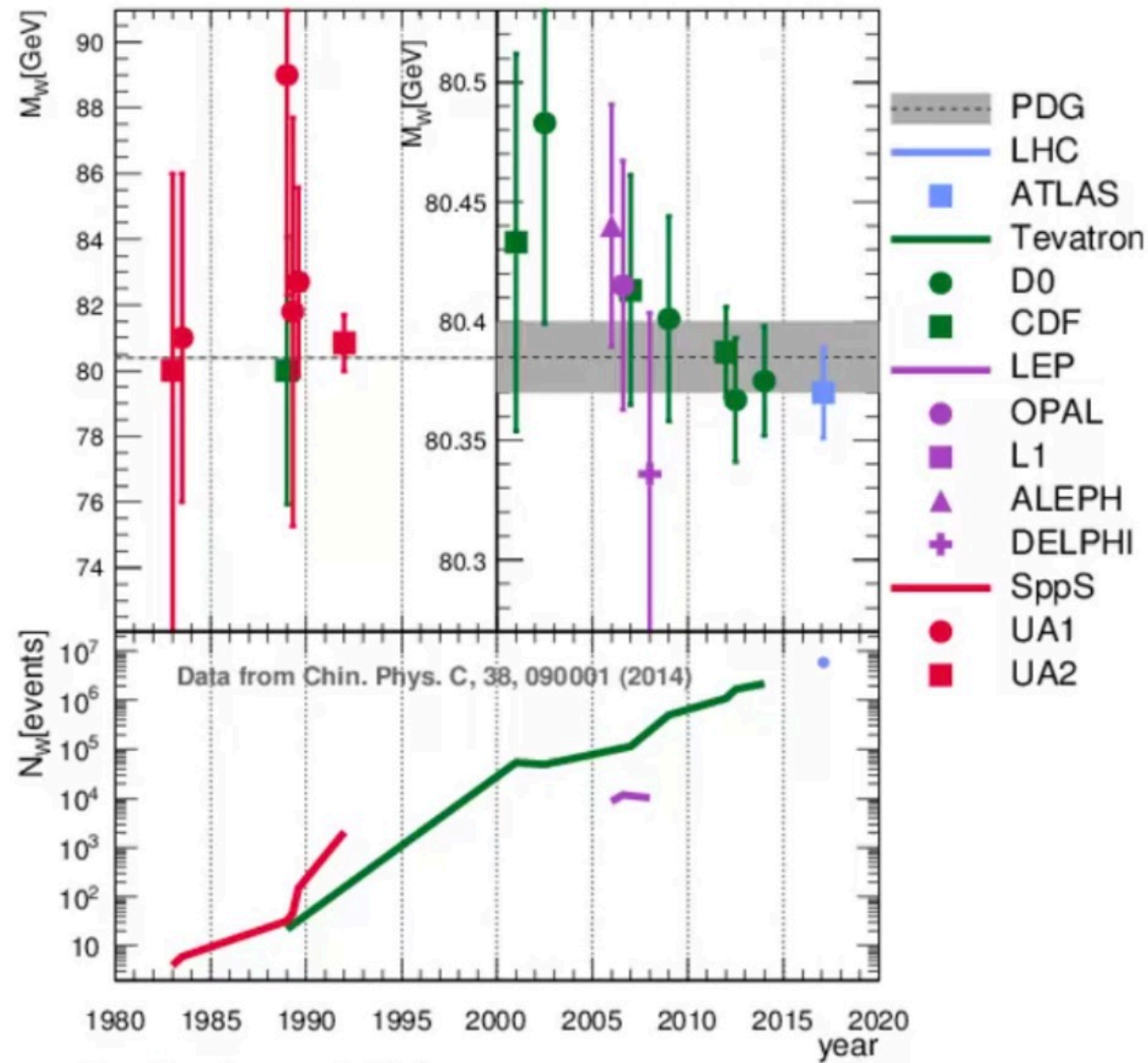


刘艺峰-国科大校学生会



曹诗沫-学生会

W质量测量的历史



• Only four W-boson mass measurements in the last 7 years

➔ Complex measurements which require O(5-7) years

- 1983 CERN SPS – W discovery
- 1983 – UA1
 $m_W = 81 \pm 5 \text{ GeV}$
- 1992 – UA2 (with mZ from LEP)
 $m_W = 80.35 \pm 0.37 \text{ GeV}$
- 2013 – LEP combined
 $m_W = 80.376 \pm 0.033 \text{ GeV}$
- 2013 – Tevatron combined
 $m_W = 80.387 \pm 0.016 \text{ GeV}$
- 2017 – LHC (ATLAS)
 $m_W = 80.370 \pm 0.019 \text{ GeV}$



刘艺峰-国科大校学生会



曹诗沫-学生会

电弱统一理论的全局拟合 – 2021年情况

➤ **电弱基本常数**: 定义明确、相互关联、内在自洽 vs 独立测量

电磁常数
 α

费米常数
 G_F

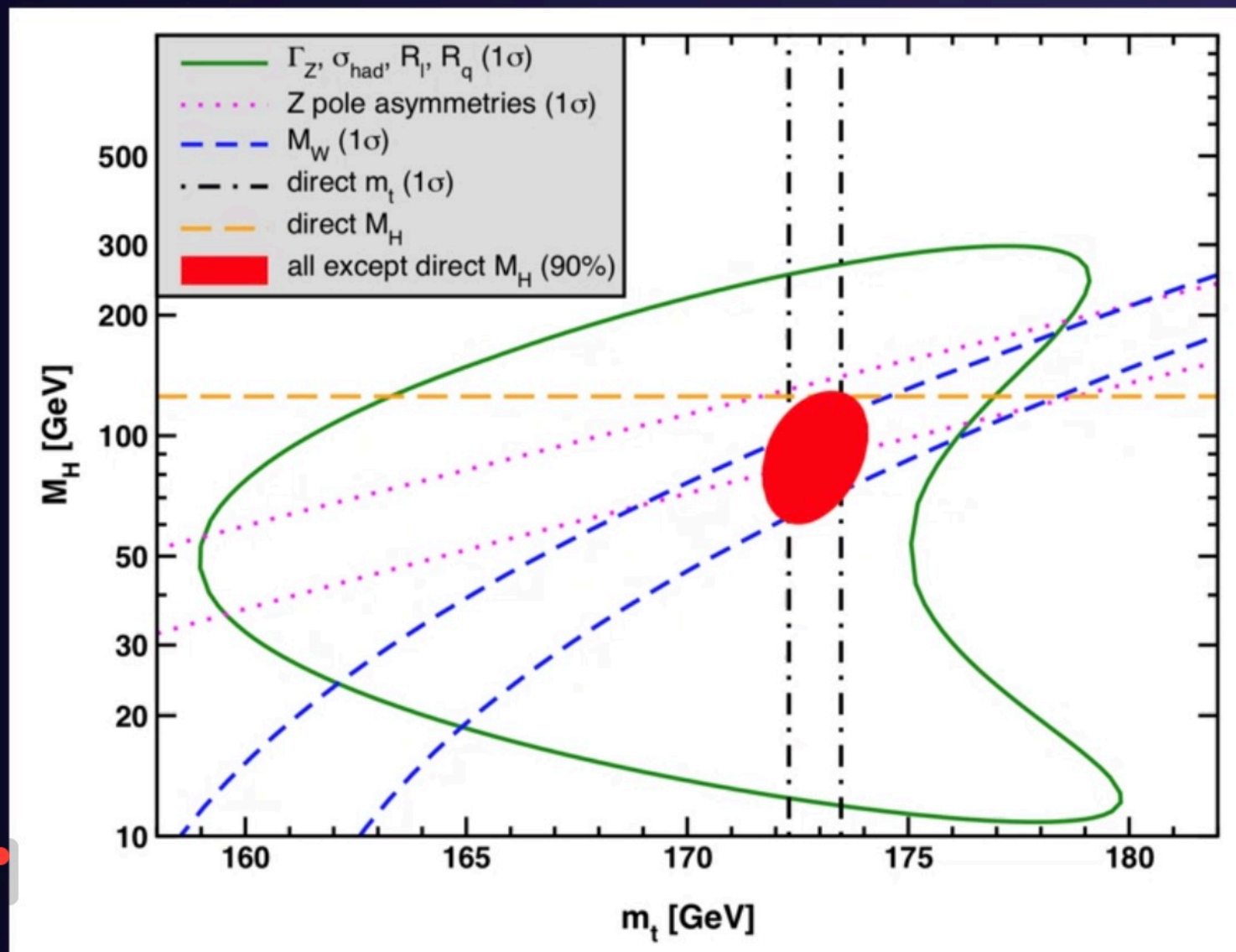
Z粒子质量
 M_Z

W粒子质量
 M_W

弱混合角
 $\sin^2\theta_W$

Higgs质量
 M_H

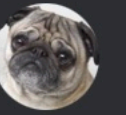
top质量
 m_{top}



| Fundamental constant | $\delta x/x$ | measurements |
|---|---------------------|--------------------|
| $\alpha = 1/137.035999139 (31)$ | 1×10^{-10} | $e^\pm g_2$ |
| $G_F = 1.1663787 (6) \times 10^{-5} \text{ GeV}^{-2}$ | 1×10^{-6} | μ^\pm lifetime |
| $M_Z = 91.1876 \pm 0.0021 \text{ GeV}$ | 1×10^{-5} | LEP |
| $M_W = 80.379 \pm 0.012 \text{ GeV}$ | 1×10^{-4} | LEP/Tevatron/LHC |
| $\sin^2\theta_W = 0.23152 \pm 0.00014$ | 6×10^{-4} | LEP/SLD |
| $m_{top} = 172.74 \pm 0.46 \text{ GeV}$ | 3×10^{-3} | Tevatron/LHC |
| $M_H = 125.14 \pm 0.15 \text{ GeV}$ | 1×10^{-3} | LHC |



YFW



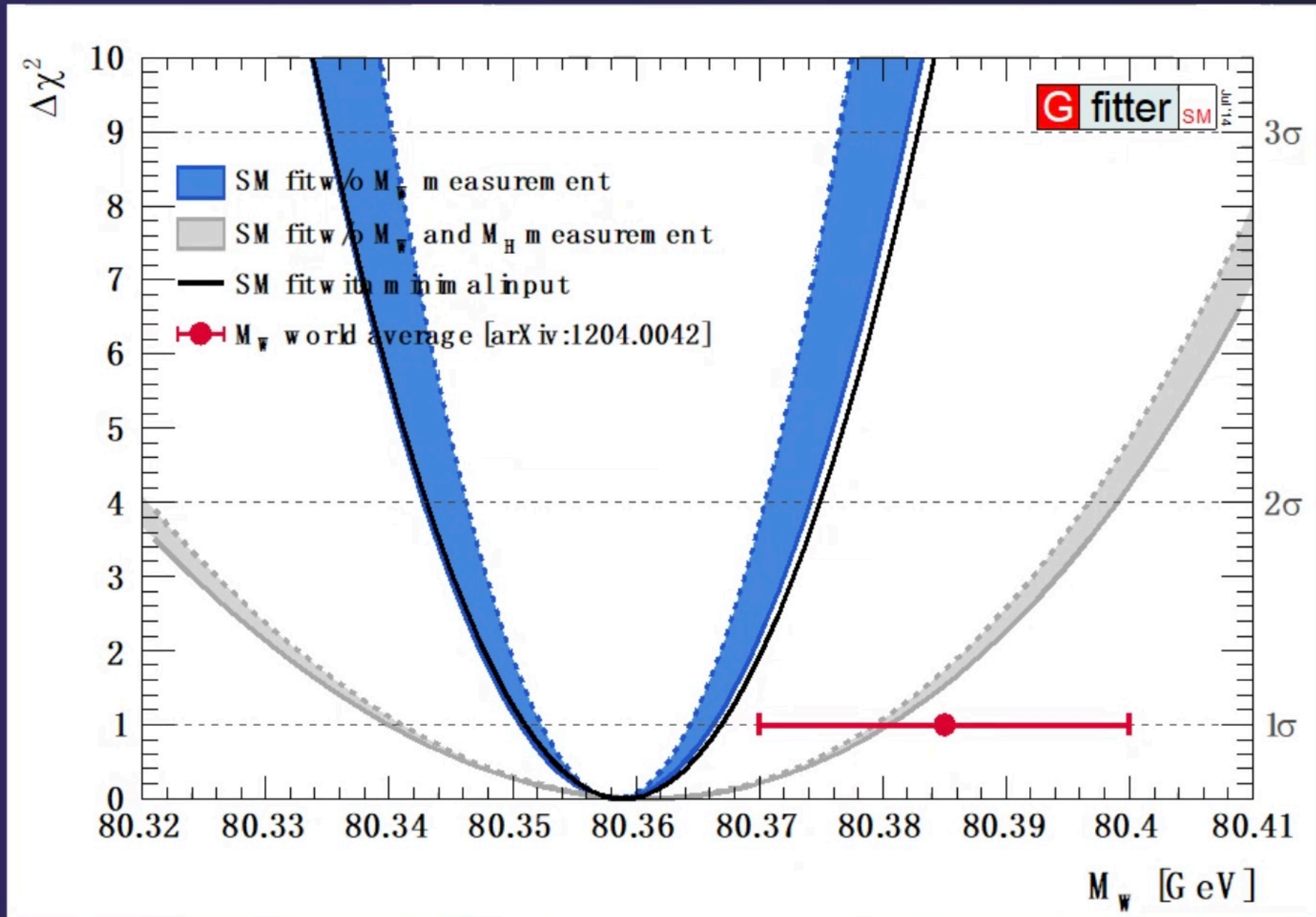
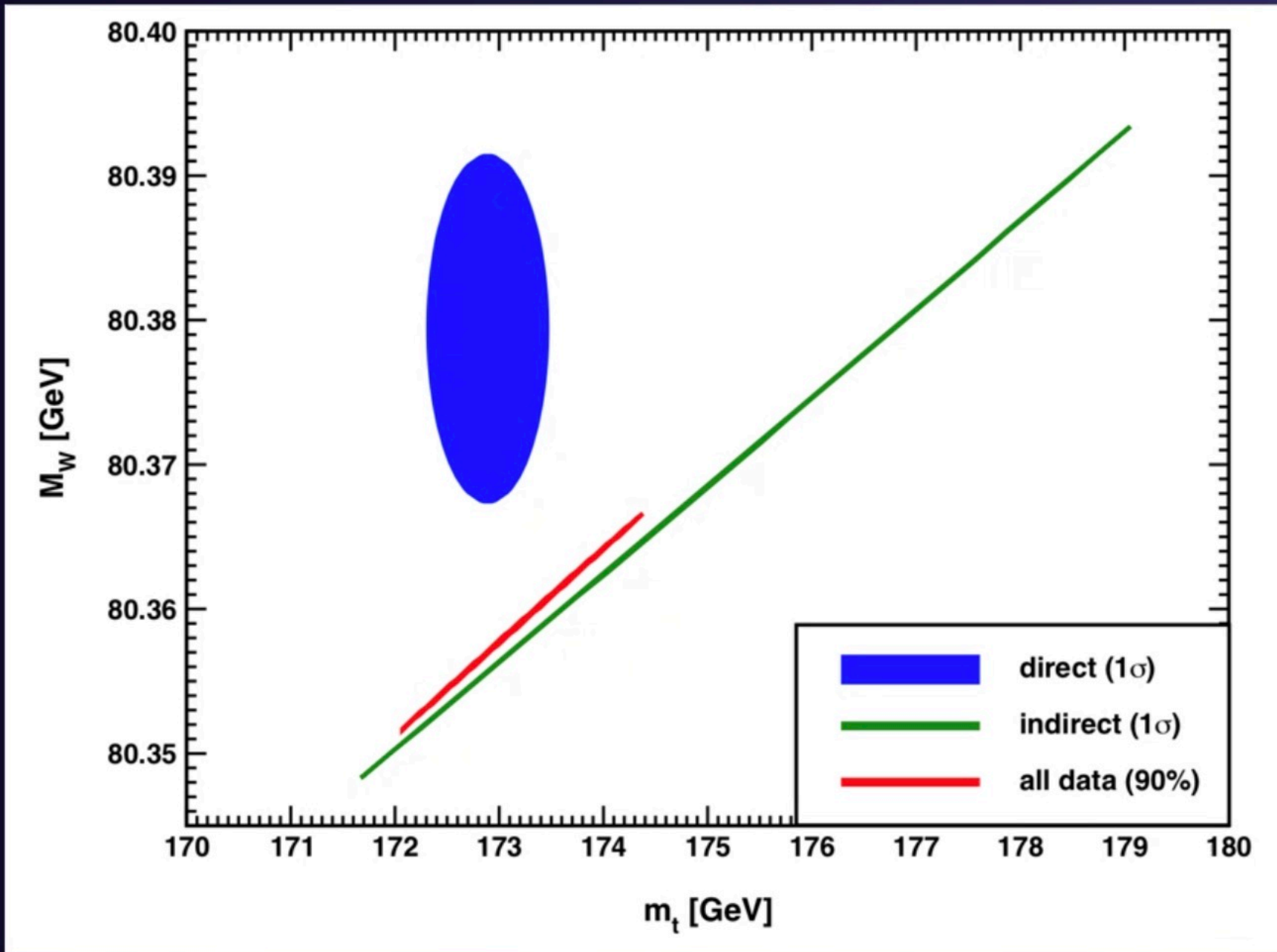
刘艺峰-国科大校学生会



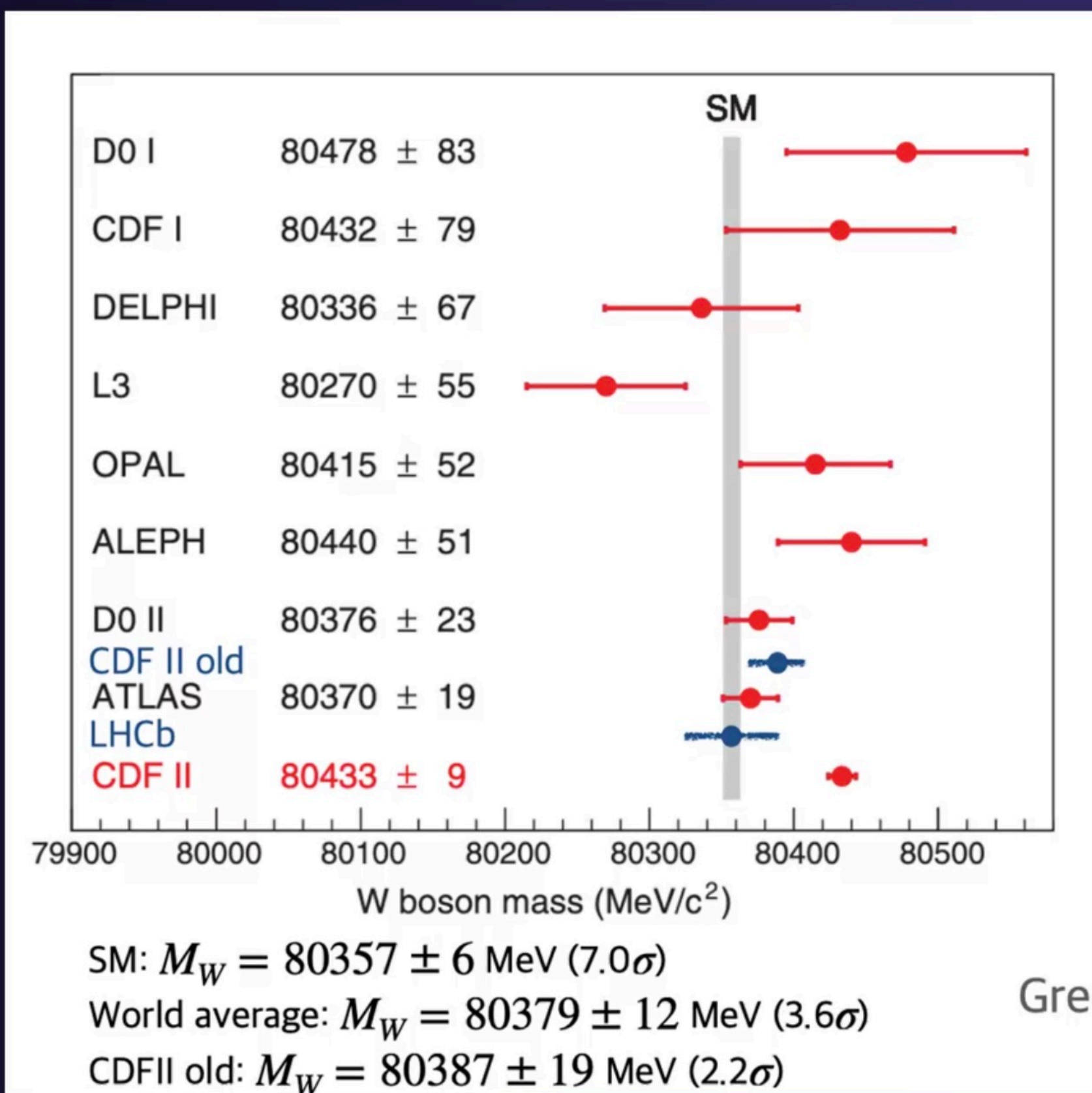
曹诗沫-学生会

电弱统一理论全局拟合2021年的结果

➤直到2021年，W玻色子质量的直接测量值比电弱理论全局拟合值高 2σ



CDF II 实验的最新结果



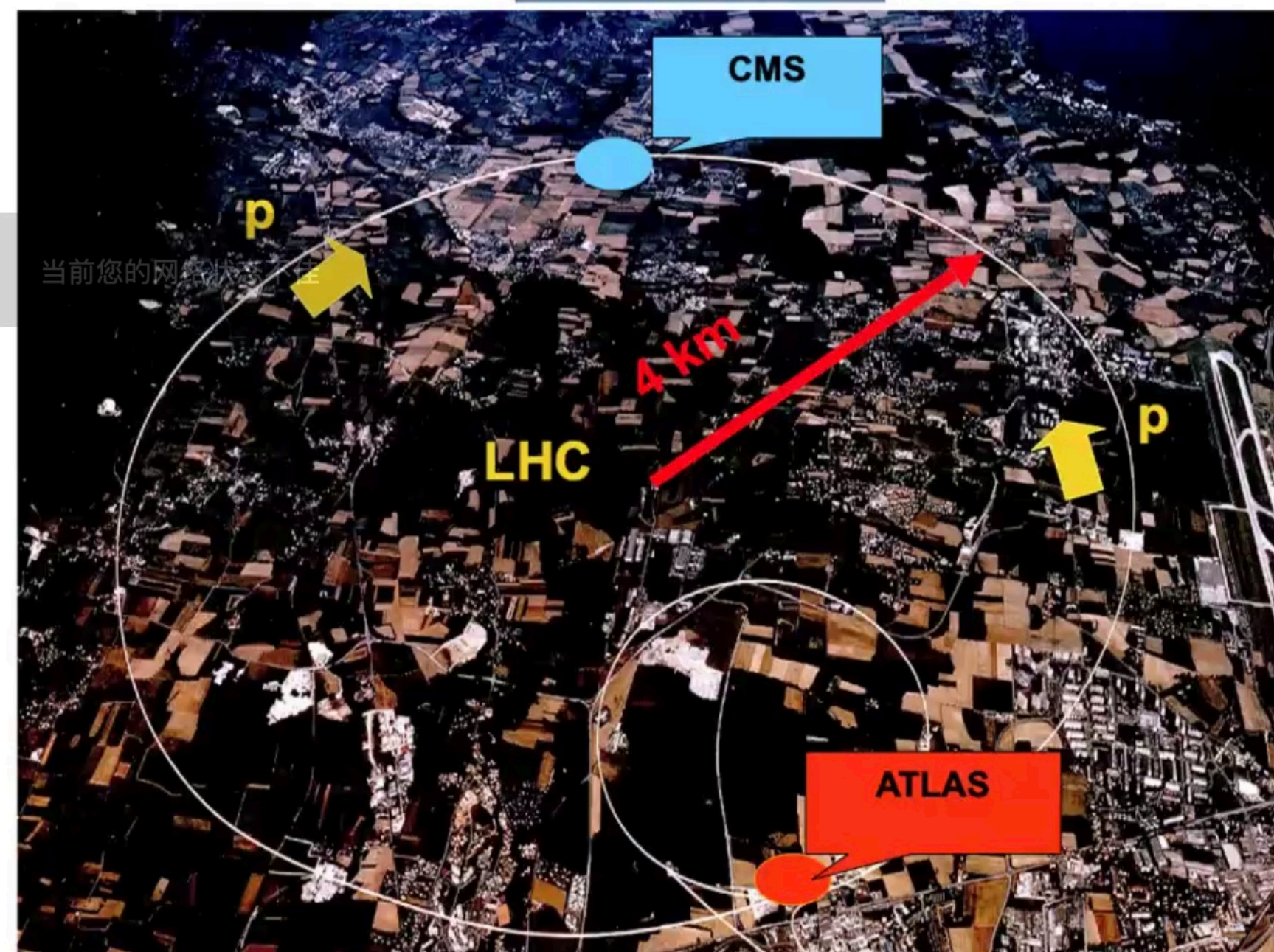
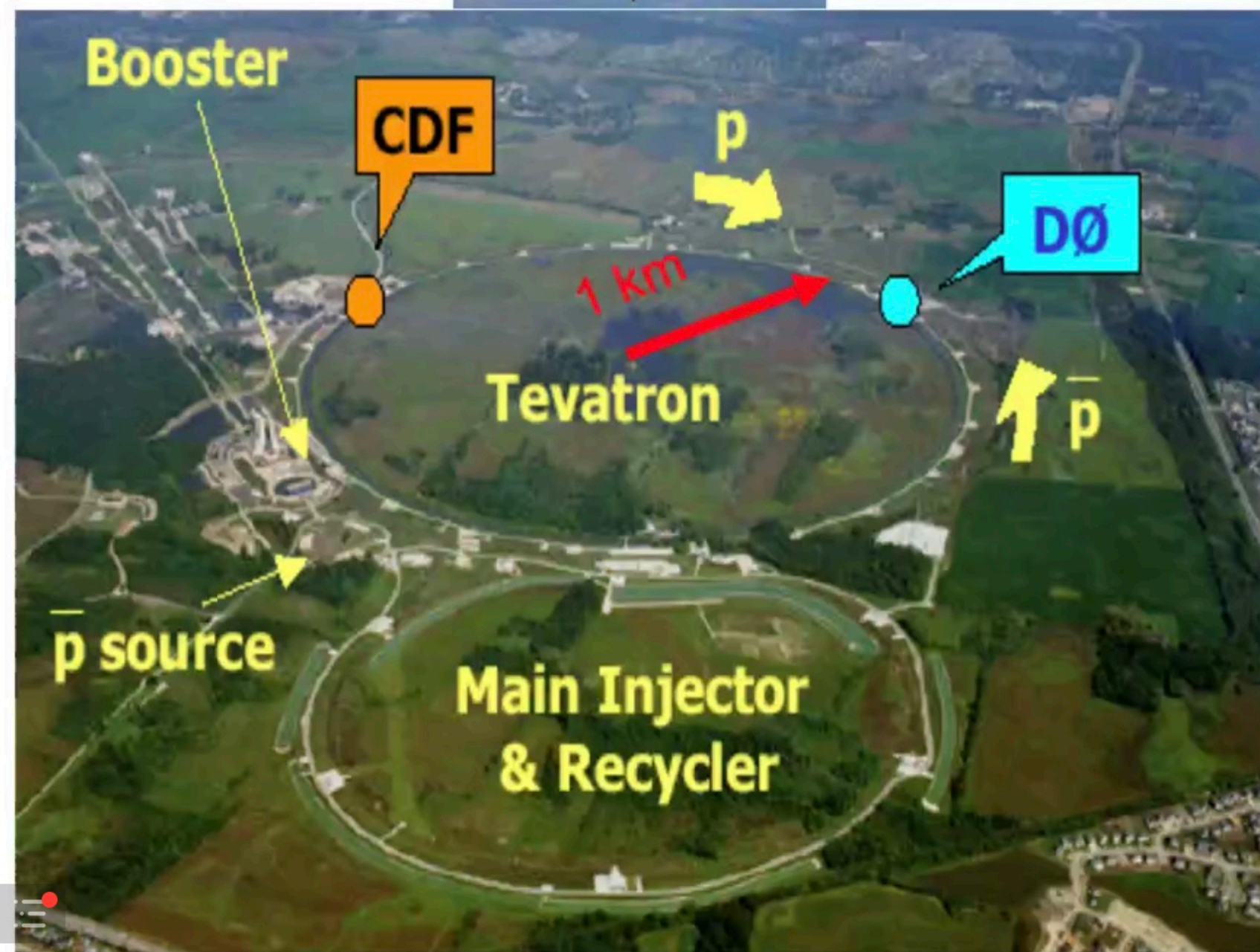
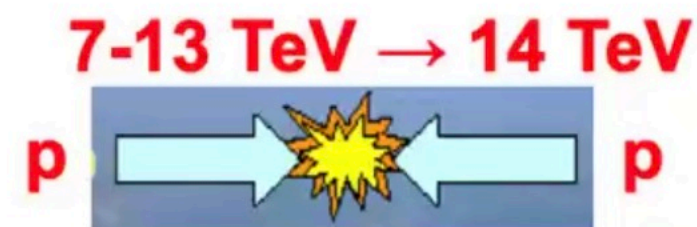
Hadron Colliders

正在讲话: YFW;

Tevatron, Fermilab, Chicago
highest energy collider up to 2009



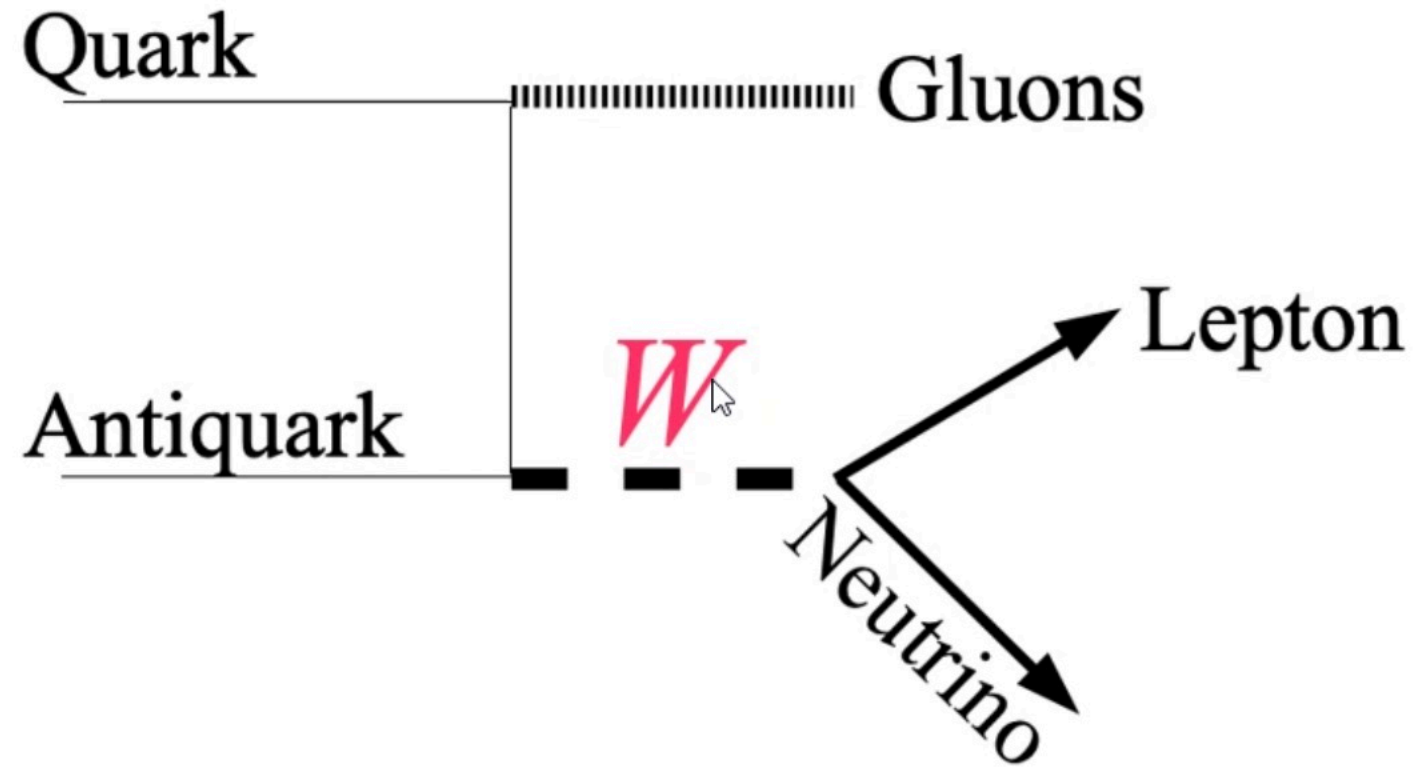
LHC
highest energy collider now



x 30-50 luminosity?

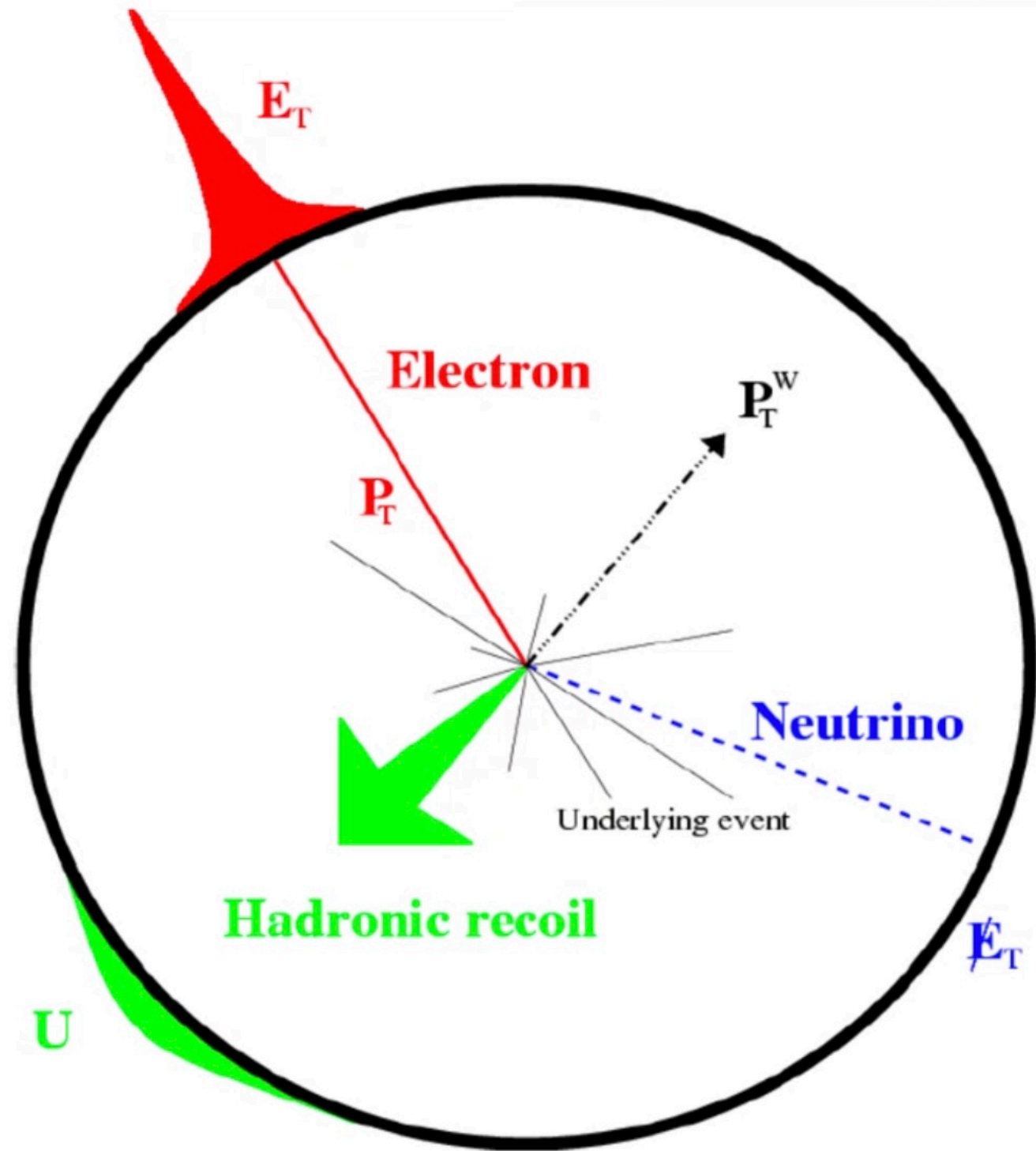


Tevatron质子-反质子对撞机上W粒子的产生机制



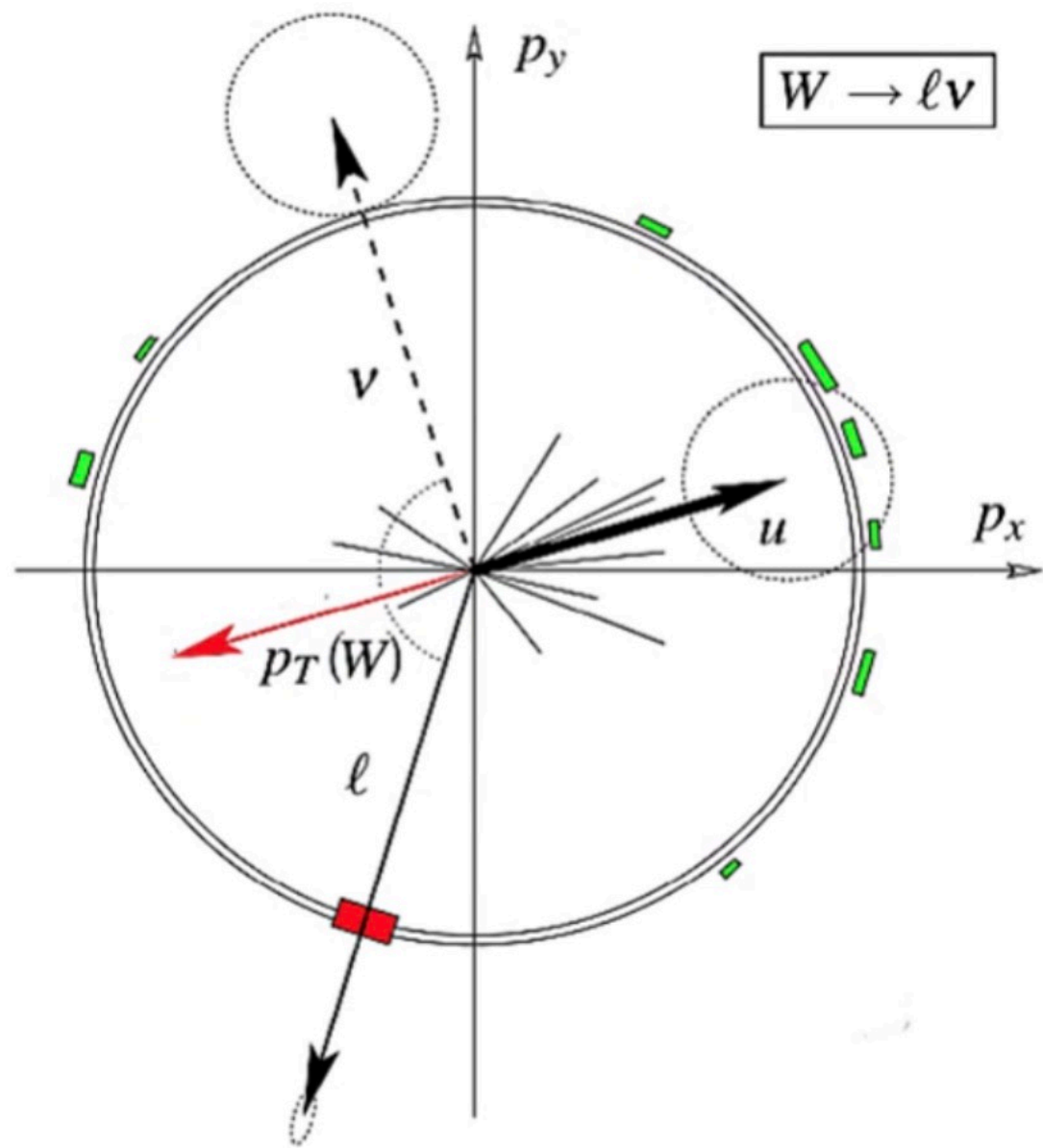
Quark-antiquark annihilation dominates (80%)

Lepton p_T carries most of W mass information, can be measured precisely (achieved 0.004%)

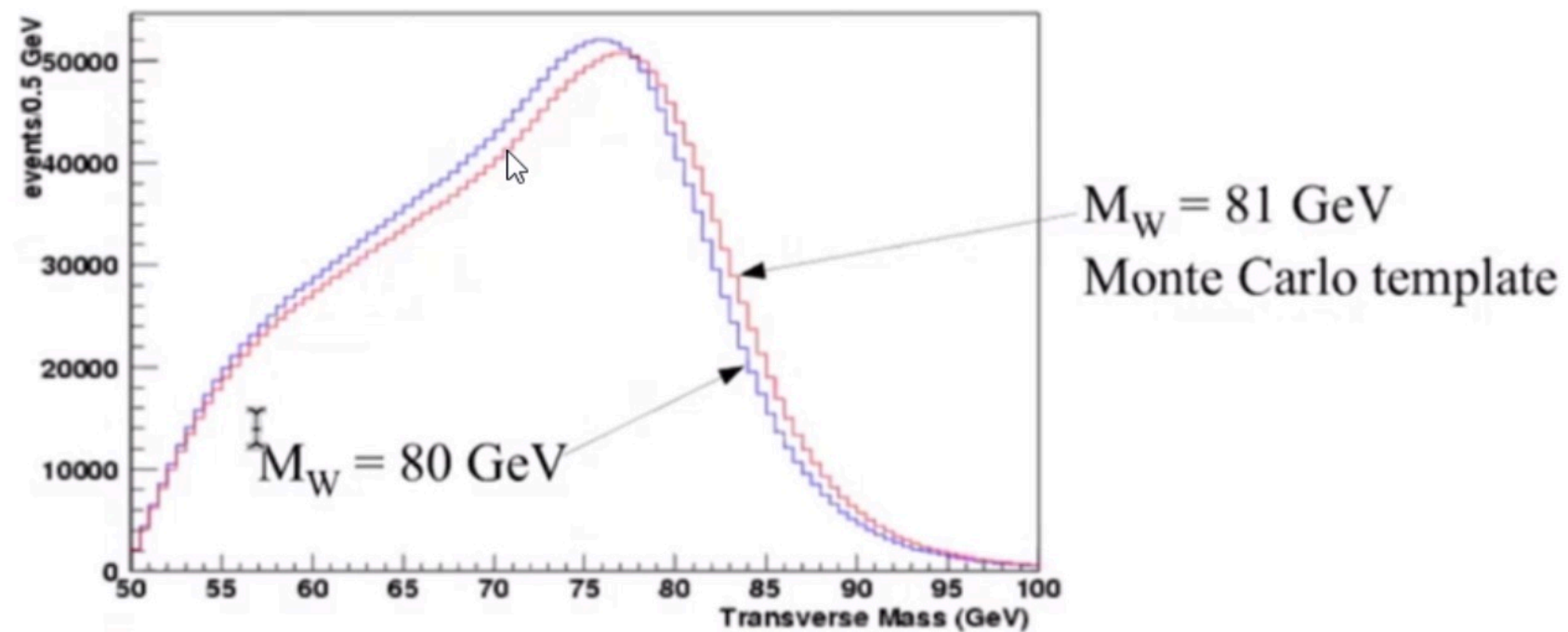


CDF实验上 W 质量的测量

M_W is extracted from kinematic distributions for both electron and muon channels



- Hadronic recoil: $\vec{u}_T = \sum_i \vec{E}_{T,i}$, excluding electron/muon
- Missing E_T : $\vec{p}_T^{\nu} = -\vec{p}_T^l - \vec{u}_T$
- Transverse mass: $m_T = \sqrt{2p_T^l p_T^{\nu} (1 - \cos\Delta\phi)}$



刘艺峰-国科大校学生会



曹诗沫-学生会

CDF I (2.2 fb⁻¹) 与 CDF II (8.8 fb⁻¹) 的结果比较

正在讲话: YFW;

Uncertainty

Previous CDF results (2.2 fb⁻¹)

| Source | Uncertainty (MeV) |
|--------------------------|-------------------|
| Lepton Energy Scale | 7 |
| Lepton Energy Resolution | 2 |
| Recoil Energy Scale | 4 |
| Recoil Energy Resolution | 4 |
| $u_{ }$ efficiency | 0 |
| Lepton Removal | 2 |
| Backgrounds | 3 |
| $p_T(W)$ model | 5 |
| Parton Distributions | 10 CTEQ6.6 NLO |
| QED radiation | 4 |
| W boson statistics | 12 |
| Total | 19 |

New CDF results (8.8 fb⁻¹)

Improved COT alignment and drift model

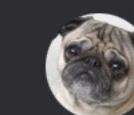
| Source | Uncertainty (MeV) | |
|--------------------------|-------------------|----------------------------|
| Lepton energy scale | 3.0 | Higher order QED |
| Lepton energy resolution | 1.2 | |
| Recoil energy scale | 1.2 | Recoil model |
| Recoil energy resolution | 1.8 | |
| Lepton efficiency | 0.4 | |
| Lepton removal | 1.2 | Close |
| Backgrounds | 3.3 | Close |
| p_T^Z model | 1.8 | New constrains added |
| p_T^W/p_T^Z model | 1.3 | |
| Parton distributions | 3.9 | NNPDF3.1 NNLO, more inputs |
| QED radiation | 2.7 | |
| W boson statistics | 6.4 | More statistics |
| Total | 9.4 | |

Central value

| | |
|---|----------|
| Detailed treatment of parton distribution functions | +3.5 MeV |
| Resolved beam-constraining bias in CDF reconstruction | +10 MeV |



YFW



刘艺峰-国科大校学生会



曹诗沫-学生会

实验误差: CDFII与ATLAS和LHCb的比较

| Source | Size [MeV] |
|--|------------|
| Parton distribution functions | 9 |
| Theory (excl. PDFs) total | 17 |
| Transverse momentum model | 11 |
| Angular coefficients | 10 |
| QED FSR model | 7 |
| Additional electroweak corrections | 5 |
| Experimental total | 10 |
| Momentum scale and resolution modelling | 7 |
| Muon ID, trigger and tracking efficiency | 6 |
| Isolation efficiency | 4 |
| QCD background | 2 |
| Statistical | 23 |
| Total | 32 |

| Source | Uncertainty |
|----------|-------------|
| Muon | 6.6 |
| Electron | 6.4 |
| Recoil | 2.9 |
| Bkg | 4.5 |
| QCD | 8.3 |
| EW | 5.5 |
| PDF | 9.2 |
| Stat. | 6.8 |
| Total | 18.5 |

| Source | Uncertainty (MeV) |
|--------------------------|-------------------|
| Lepton energy scale | 3.0 |
| Lepton energy resolution | 1.2 better |
| Recoil energy scale | 1.2 |
| Recoil energy resolution | 1.8 close |
| Lepton efficiency | 0.4 |
| Lepton removal | 1.2 |
| Backgrounds | 3.3 close |
| p_T^Z model | 1.8 |
| p_T^W/p_T^Z model | 1.3 |
| Parton distributions | 3.9 better |
| QED radiation | 2.7 better, b |
| W boson statistics | 6.4 close |
| Total | 9.4 |

ATLAS high mu (4.1-4.6 inv fb)

New CDF results (8.8 inv fb)

ATLAS low mu (0.257, 0.34 inv fb): Stat~12, 8

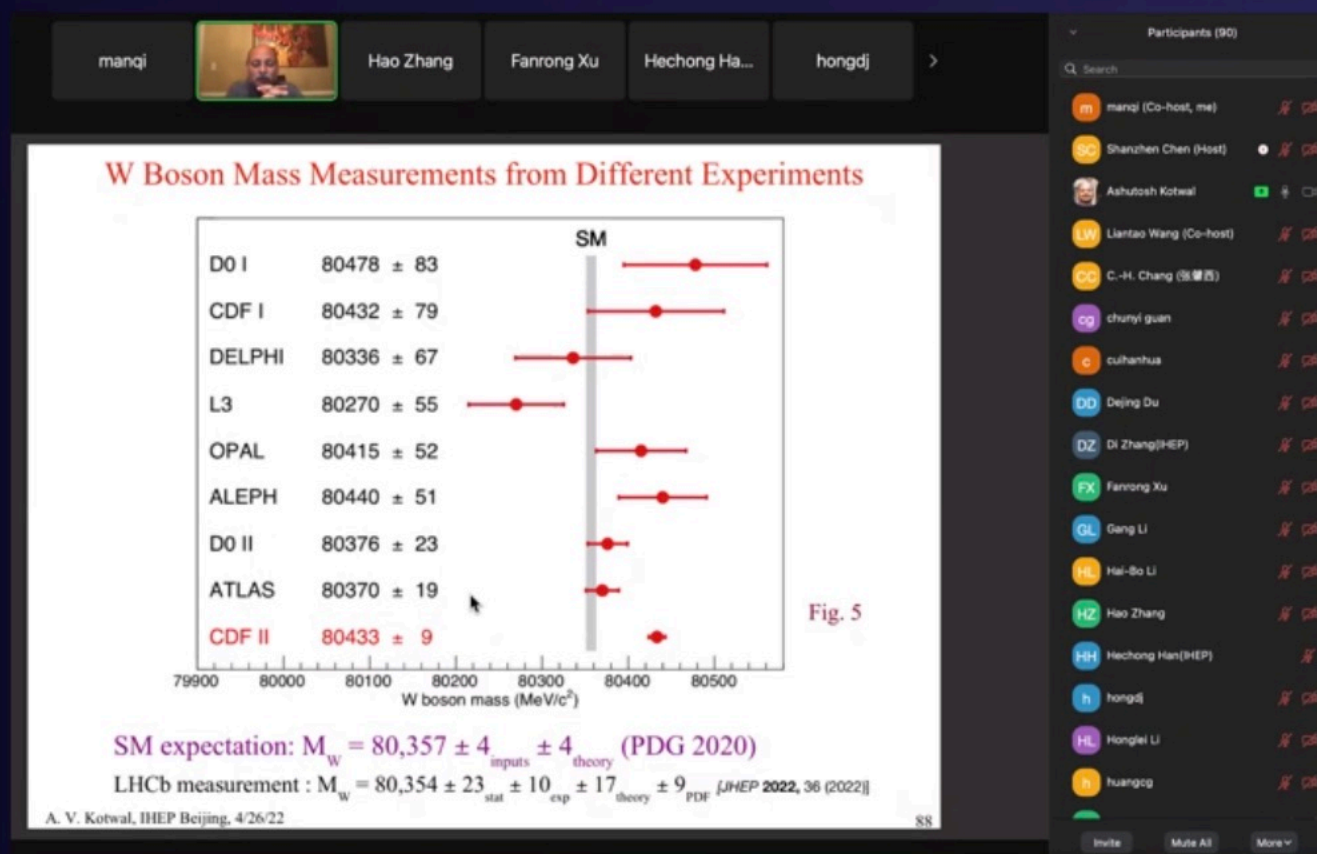
ATLAS, Eur.Phys.J.C (2018) 78:110

LHCb



国内关于CDFII结果的几次讨论会

正在讲话: YFW;



W mass discussion

Tuesday, April 26, 2022 from 08:00 to 18:00 (Asia/Shanghai)

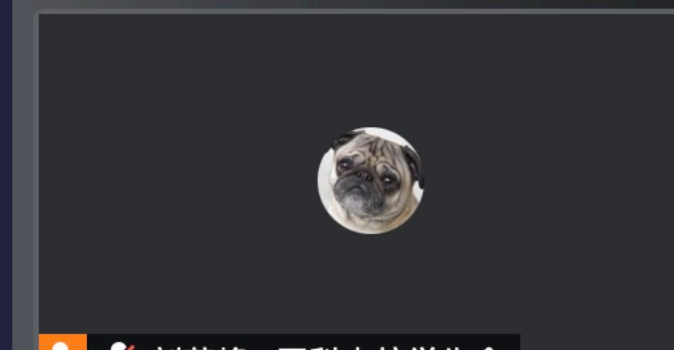
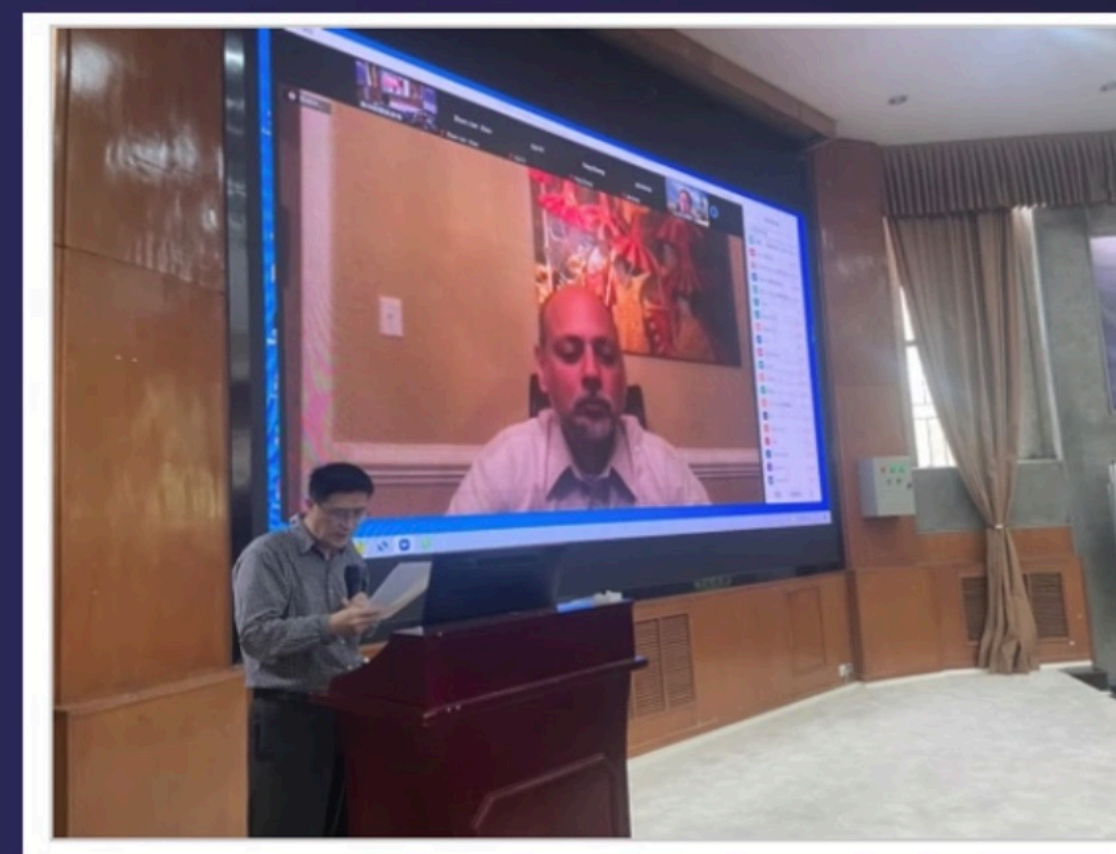
Description
 W bosons mediate the weak interaction, one of the fundamental forces in physics. The Standard Model (SM) of particle physics places tight constraints on the mass of the W boson, thus determine the W boson mass provide a critical test to the SM.
 The Collider Detector at Fermilab (CDF) Collaboration recently announced a precise measurement of the W boson mass extracted from data taken at the Tevatron particle accelerator. Surprisingly, the researchers found that the mass of the boson was significantly larger than the SM predicts, with a discrepancy of 7 standard deviations (<https://www.science.org/doi/10.1126/science.aba1781>). Prof. Ashutosh Kotwal from Duke University will introduce this exciting result on behalf of the CDF Collaboration.
 This results have significant influence for the New Physics hunting in particle physics. After Prof. Kotwal's presentation, a Panel discussion will be organized, to discuss the theoretical interpretation of this measurement, as well as the implications for future experiments, especially the CEPC.
 This event is online only, with following remote link.

<https://oem.zoom.us/j/67414191376?pwd=ehaZ0Fp3l0R040OFF1bFpjdjRZZz09>
 Meeting Number: 674 1419 1376
 Passed: 489983

Material: Video

Tuesday, April 26, 2022

- 08:30 - 09:30 High precision measurement of the W-boson mass with the CDF II detector 1h0'
 Speaker: Prof. KOTWAL Ashutosh (Duke University)
 Material: Slides
- 09:30 - 09:40 Break 10'
- 09:40 - 09:50 Discussion - Slides from Tao Han 10'
 Material: Slides
- 09:50 - 10:00 Discussion - Slides from Lingfeng LI 10'
 Material: Slides
- 10:00 - 10:10 Discussion - Slides from Liantao Wang
 Material: Slides
- 10:10 - 12:00 Discussion 1h50'



刘艺峰-国科大校学生会



M_W at hadron colliders in light of the CDF measurement: Theoretical considerations

Tao Han
 Pittsburgh Particle physics, Astrophysics and Cosmology Center
 University of Pittsburgh

- A. EW global fit
- B. $M_T(e\nu)$ variable
- C. BSM Physics



曹诗沫-学生会

讨论会的结论：可能的实验问题

● 部分子分布函数 (PDF)

- CDFII采用NNFDP3.1, 但事实上可以采用最新的NNPDF4.0, 也许会带来中心值变化及误差提高($\sim <2$ 倍) \rightarrow 减小与标准模型预言的偏差 ($7\sigma \rightarrow 5\sigma$?)

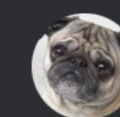
● 探测器刻度与测量误差赋值

- 信号与本底的Monte Carlo 模拟程序不同, 也许对结果有影响
- 增加Z粒子及其它检查 (不像有大问题), 最多 ($7\sigma \rightarrow 6\sigma$?)

● 同时拟合W质量与宽度

- 增加W质量拟合误差 ~ 6 MeV ($7\sigma \rightarrow 6\sigma$)

无论如何理论与实验有 4σ 以上的偏差！



刘艺峰-国科大校学生会

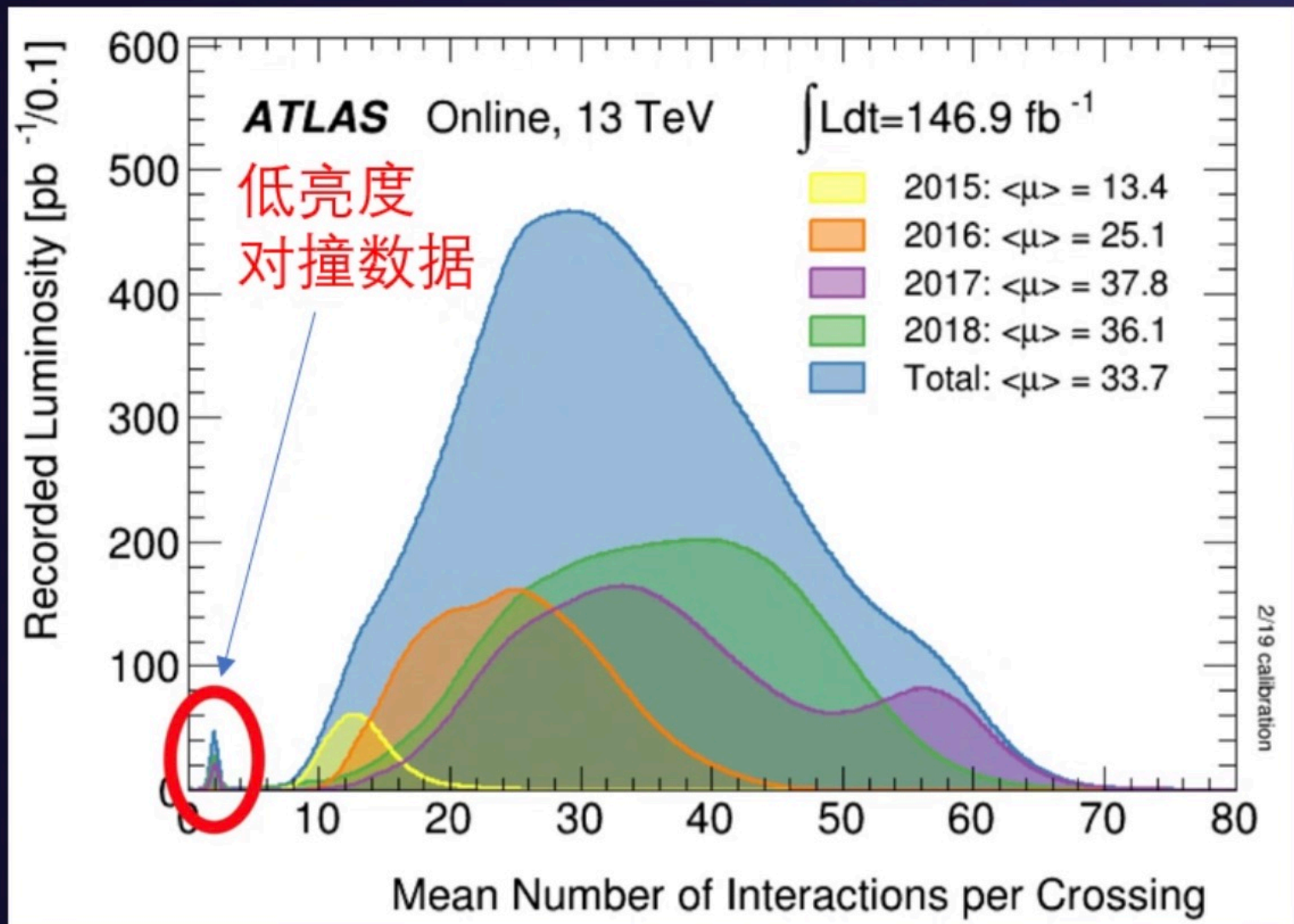
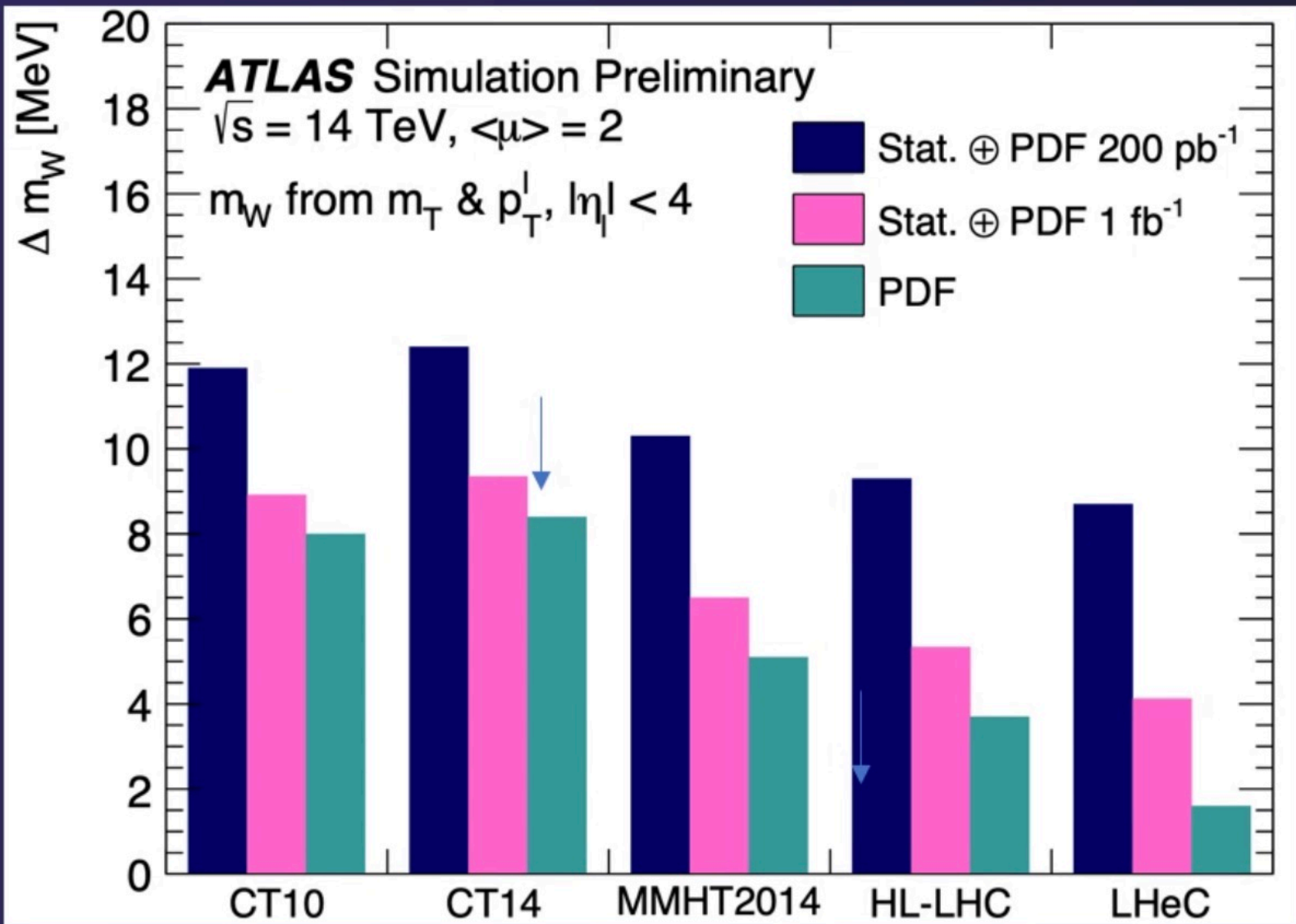


曹诗沫-学生会

未来的实验验证: ATLAS + CMS 为主

ATL-PHYS-PUB-2018-026

- pp对撞, PDF的误差较ppbar对撞更大
- 大部分数据无法用于精确测量,堆积背景过高
- 每年只有机会取1~2周低亮度对撞数据,用于精确测量→数据量不够,统计误差大



2022-2025年

预期精度:
11 MeV

2029-2035年

预期精度:
5 MeV



YFW



刘艺峰-国科大校学生会

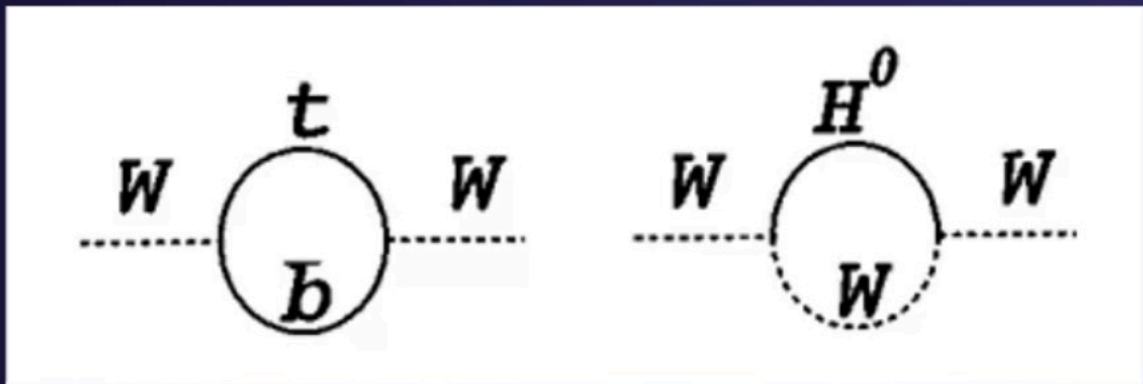


曹诗沫-学生会

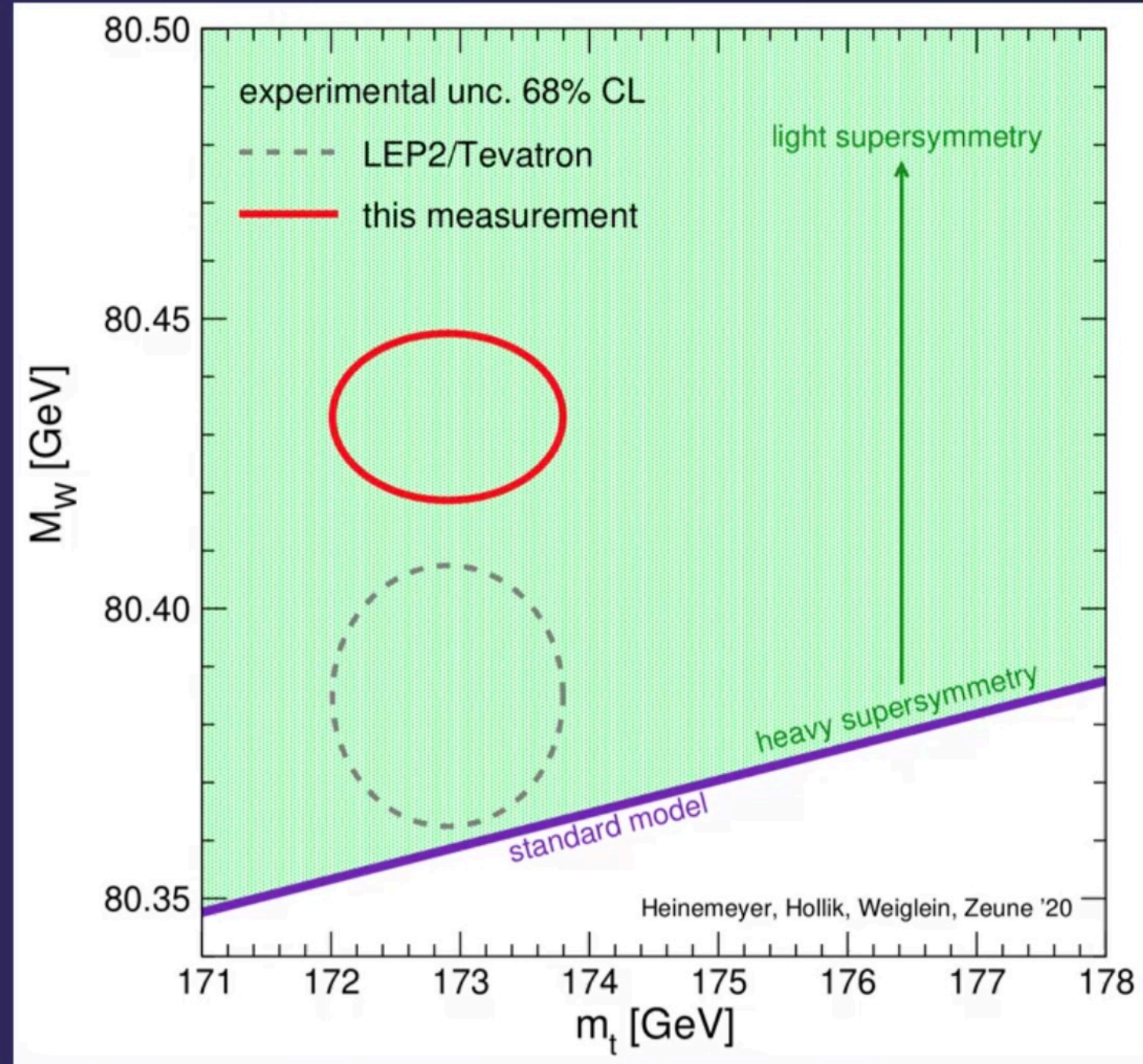
如果CDF测量正确，如何理解W粒子的质量偏差

- W粒子的质量偏差无法在标准模型内修正

$$m_W^2 \left(1 - \frac{m_W^2}{m_Z^2} \right) = \frac{\pi\alpha}{\sqrt{2}G_\mu} (1 + \Delta r)$$



- 只有引入新粒子才可以调整 Δr ，并调整W粒子的质量



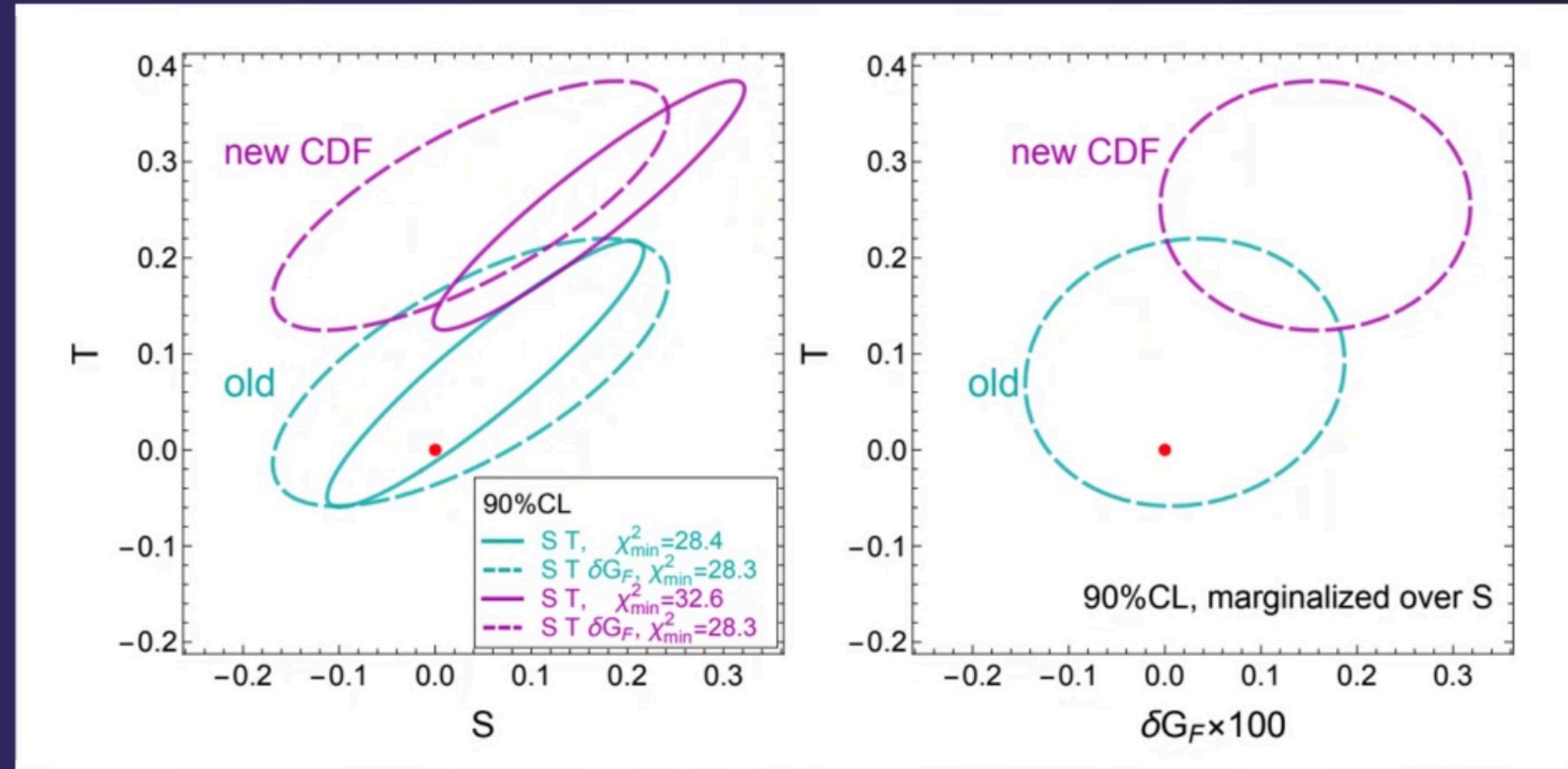
刘艺峰-国科大校学生会



曹诗沫-学生会

例如

- W'及Z'模型
- Compositd Higgs Model with Top partner
- Top squark
- 2HDM 模型
- 类轴子粒子
- 超对称
- Higgs相关的暗物质模型
- ...



Lots of theoretical activities and fast increasing:
 Y.-Z. Fan, T.-P. Tang, Y. Tsai, L. Wu: 2204.03693 (DM); C. Lu, L. Wu, Y. Wu, B. Zhu: 2204.03996 (g-2); G.-W. Yuan, L. Zu, L. Feng, Y.-F. Cai: 2204.04183 (axion); Strumia: 2204.04191 (Z', T); J.M. Yang & Y. Zhang: 2204.04202 (SUSY) J. Blas, et al.: 2204.04204 (EFT, top fit); J. Gu, Z. Liu, T. Ma, J. Shu; [arXiv:2204.05296](https://arxiv.org/abs/2204.05296); (W',Z',SUSY); M. Endo, S. Mishima: [2204.05965](https://arxiv.org/abs/2204.05965); T. Biekottrt, S. Heinemetre, G. Weiglain: 2204.05975 (Higgs);



新物理对W质量的贡献

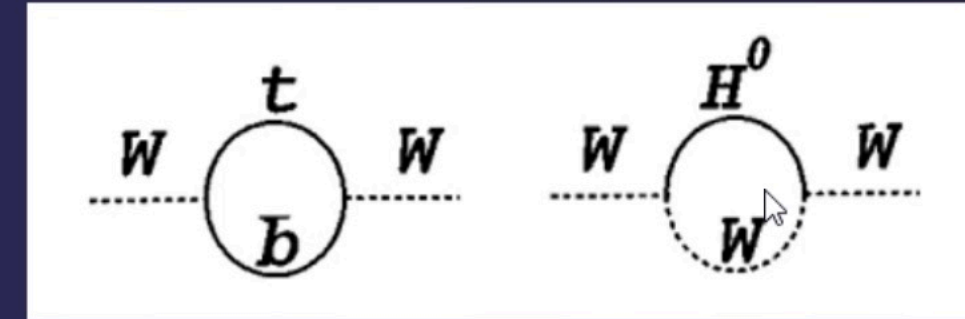
$$\frac{1}{\Lambda^2} |H^\dagger D_\mu H|^2 \quad \frac{1}{\Lambda^2} (H^\dagger \tau^a H) W_{\mu\nu}^a B^{\mu\nu}$$

For a 10^{-3} correction to the W mass: $\Lambda \simeq 6\text{TeV}$

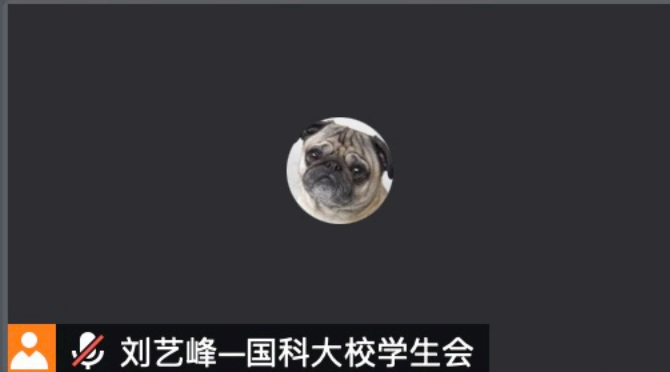
Also, new physics must couple to the Higgs

$$\text{SM 1-loop couplings (e.g. } h \rightarrow gg, h \rightarrow \gamma\gamma\text{): } \sim \frac{1}{(4\pi v)^2} H^\dagger H F^2 \sim \frac{1}{(\text{afew TeV})^2} H^\dagger H F^2$$

The correction to these can be as large as 10(s)% for $h \rightarrow gg$
and a few percent for $h \rightarrow \gamma\gamma$



将以上圈图内的已知粒子换成新粒子！

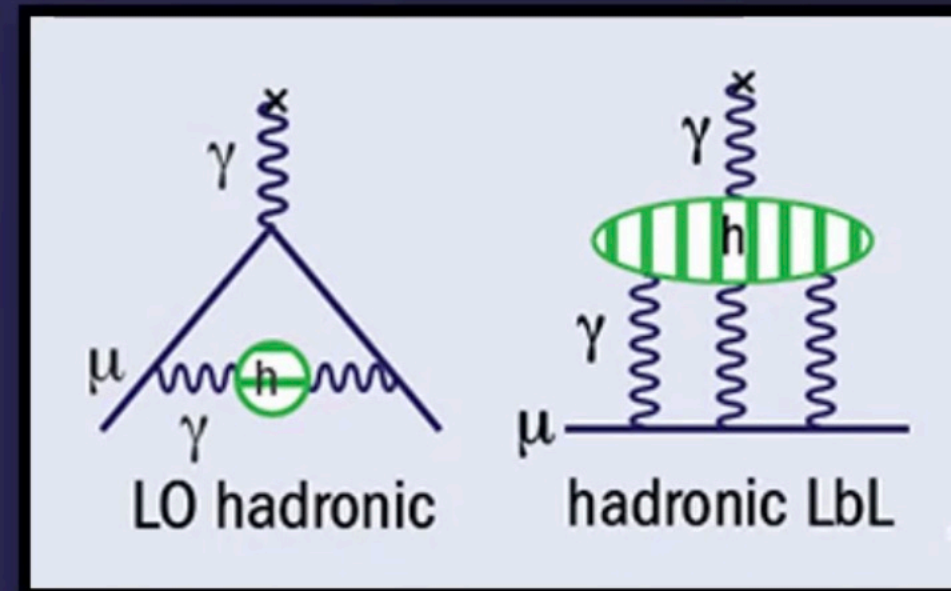
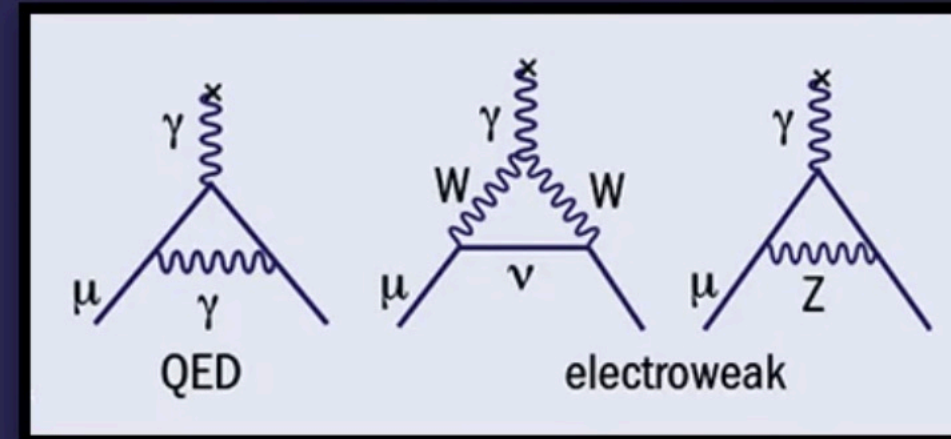


缪子反常磁矩也会受到新物理的影响

以下的理论计算似乎也已经穷尽所能，如果测量正确，需要在圈图中引入新粒子

- 量子电动力学 (QED) 微扰论贡献 (到 α^5 阶)
- 弱规范玻色子和希格斯玻色子相关圈图 (EW两圈)
- 强子强相互作用通过圈图修正产生的贡献:
 - 强子真空极化 (HVP)
 - 强子Light-by-Light散射 (HLbL)

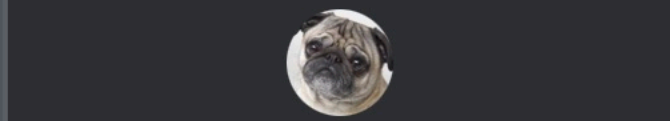
| $a_\mu \equiv (g_\mu - 2)/2$ | 理论中心值 ($\times 10^{11}$) | 理论误差 |
|------------------------------|----------------------------|----------------------------|
| QED贡献 | 116584718.931 | ± 0.104 |
| EW贡献 | 153.6 | ± 1.0 |
| HVP贡献 | 6845 | ± 40 |
| HLbL贡献 | 92 | ± 18 |
| SM结果 | 116591810 | ± 43 |



$$a_\mu^{\text{SM}} = a_\mu^{\text{QED}} + a_\mu^{\text{EW}} + a_\mu^{\text{HVP}} + a_\mu^{\text{HLbL}}$$

$$= 116\,591\,810(43) \times 10^{-11}$$

T. Aoyama et al., Phys. Rep. 887 (2020) 1-166



刘艺峰-国科大校学生会



曹诗沫-学生会

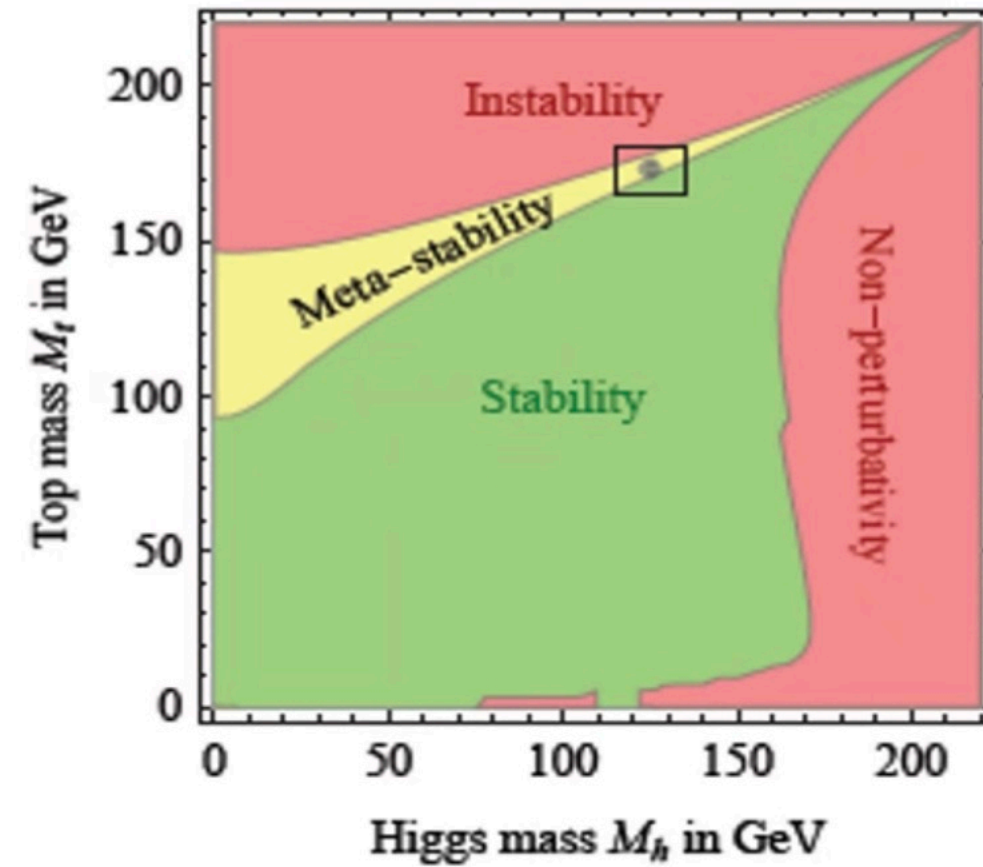
小结：标准模型上空的“乌云”

● 实验

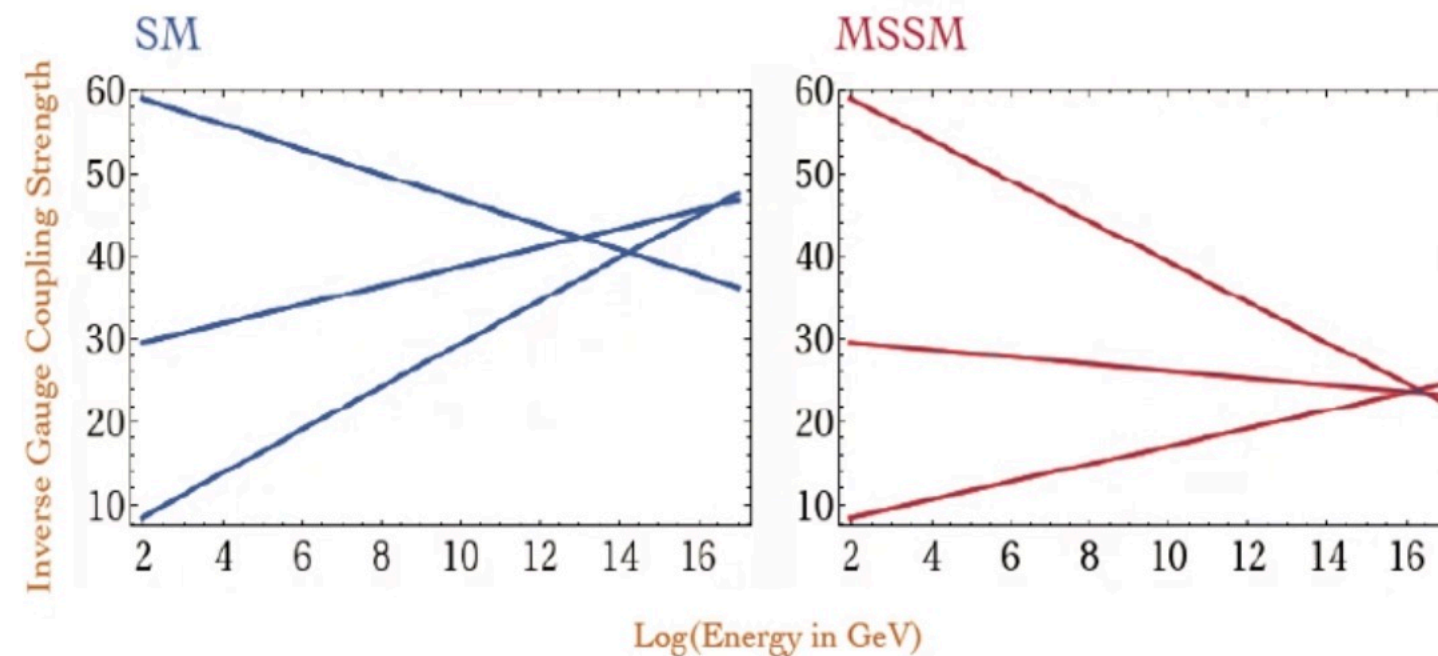
- W粒子的质量
- $g-2$
- 中微子振荡
- 耦合常数几乎但是不相交

● 理论：

- 真空不稳定
- 希格斯粒子质量来源
- 味对称
- 基本粒子质量的巨大差距、参数的精细调节
- 暗物质粒子、CP破坏（物质反物质不对称）



$$\begin{pmatrix} e & \mu & \tau \\ \nu_e & \nu_\mu & \nu_\tau \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} u & c & t \\ d & s & b \end{pmatrix}$$



正在讲话: YFW;



粒子物理的未来：各国的未来加速器选项

• e^+e^-

• 直线对撞机：

- ILC: 250 GeV, $1 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$, ~7B\$, ~2025/2035
- CLIC: 380 GeV, $1 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$, ~7B\$, ~2030/2040

• Circular Collider

- FCC-ee: 90-350 GeV, $8 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$, ~10B\$, ~2030/2040
- CEPC: 90-250 GeV, $5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$, ~5B\$, ~2025/2035

• proton-proton

- FCC-hh: 100 TeV, $\sim 1 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$, ~20B\$, ~2050/2060
- SPPC: 100 TeV, $\sim 1 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$, ~10B\$, ~2045/2055

• ep: LHeC

• $\mu^+\mu^-$

- Proton driver: muon cooling ?
- e^+ : enough intensity ?

• 新原理加速器

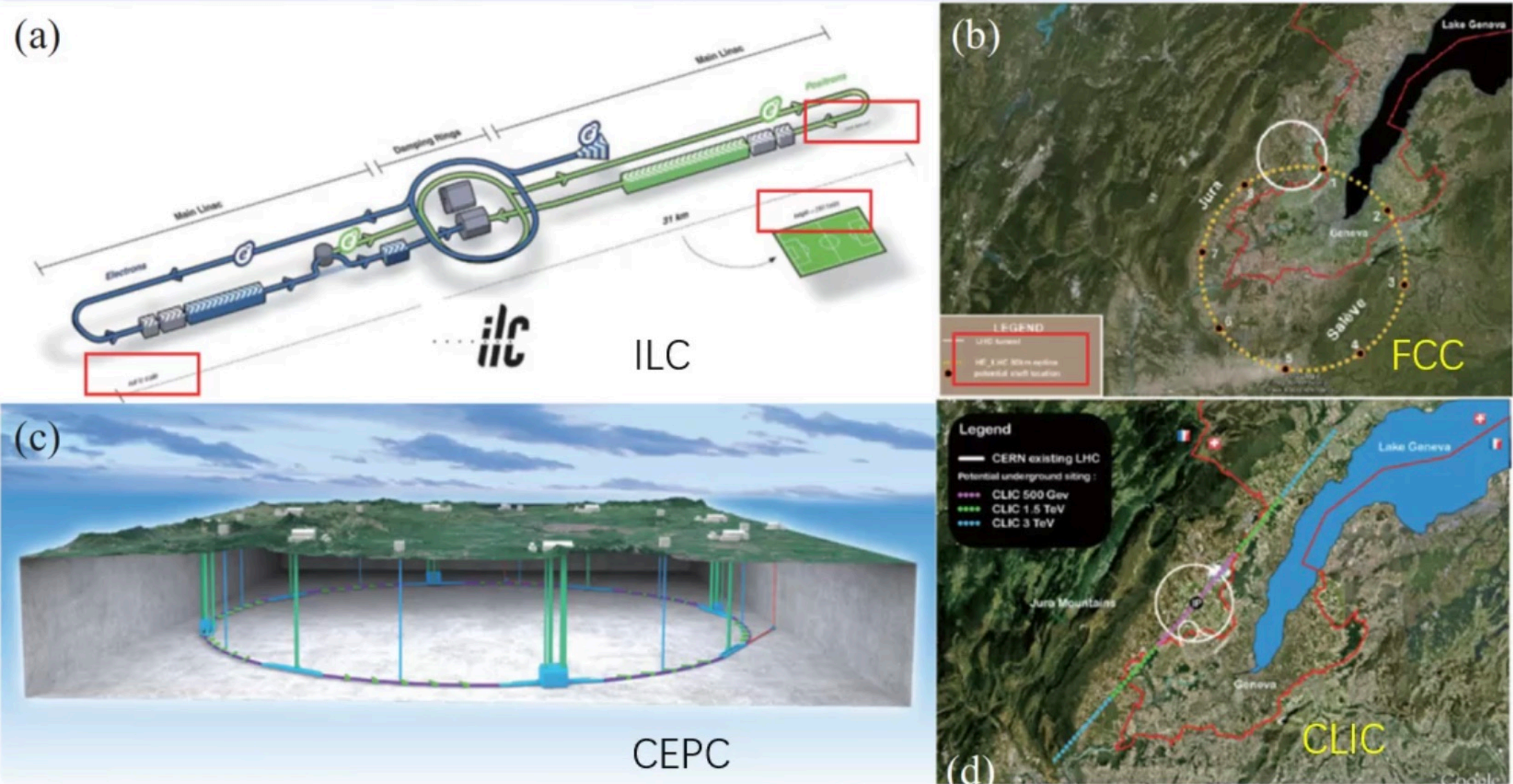
正在讲话: YFW;



小结：标准模型上的“乌云”

- 实验
 - W粒子的质量
 - 中微子振荡
 - 稀有衰变/轻子数不守恒
- 理论
 - 真空不稳定性
 - 希格斯粒子的质量来源
 - 暗物质
 - 基本粒子质量的巨大起源，夸克的精确质量
 - 暗物质粒子、CP破缺、物质反物质不对称

各国方案的聚焦：正负电子Higgs工厂



High-priority future initiatives

EUSPP 2020

An electron-positron Higgs factory is the highest-priority next collider. For the longer term, the European particle physics community has the ambition to operate a proton-proton collider at the highest achievable energy. Accomplishing these compelling goals will require innovation and cutting-edge technology:

中国：2012.9提出CEPC-SPPC设想；
2016.8中国高能物理学会指出
“CEPC是我国未来对撞机发展的
首选项目”

日本：自90年代起推动ILC在日本
建设

欧洲(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 ...

美国：正在Snowmass讨论

(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)

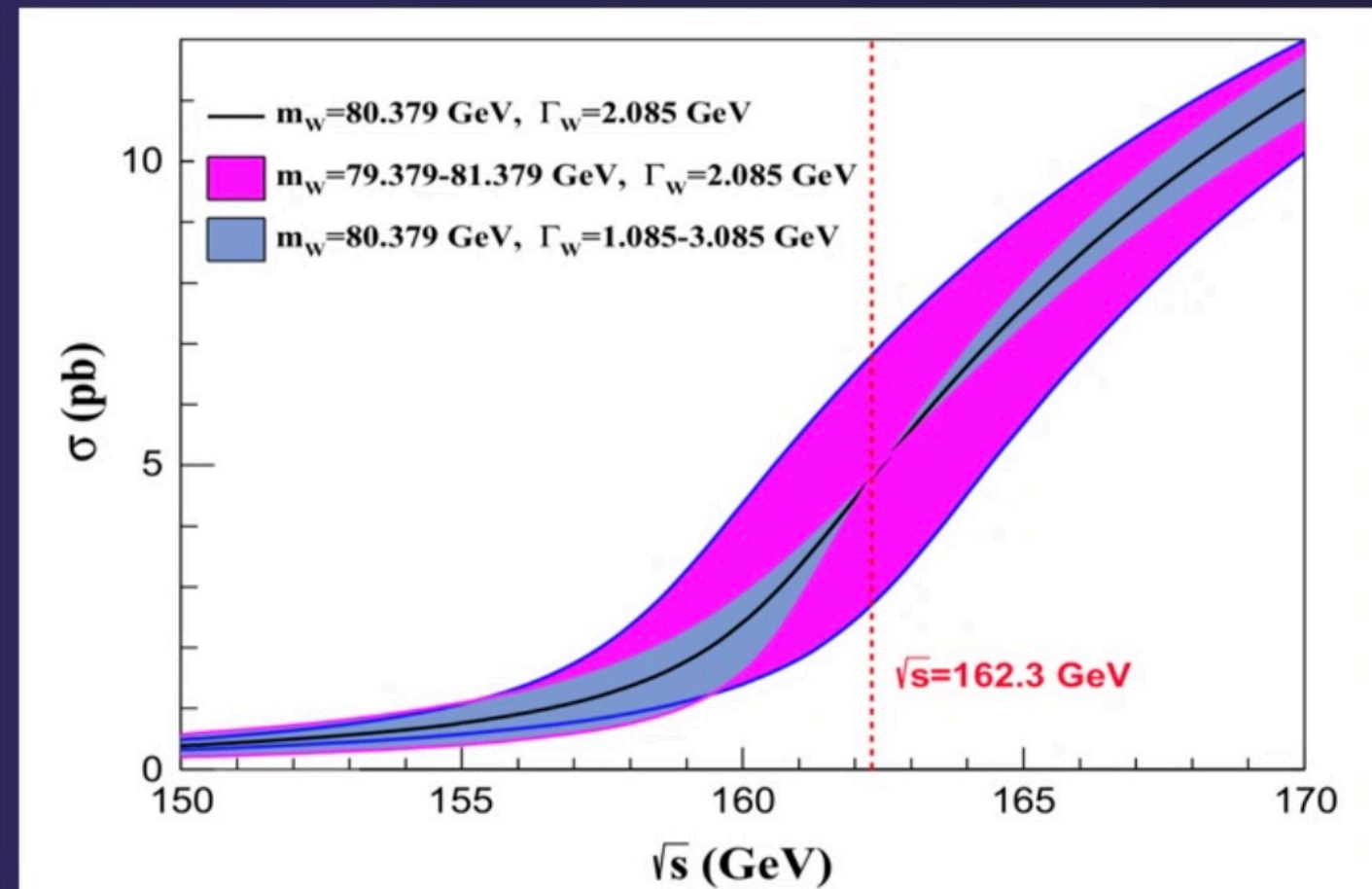


CEPC上精确测量W粒子质量

- 扫描W粒子产生随束流能量的变化, 精确测量WW粒子对的产生阈值, 从而精确测定其质量
- 优化的扫描方案已基本确立: 1年扫描时间, 获得约 1400 万WW 事例 (LEP2的400倍)
 - 3个能量点:** 157.5, 161.5, 162.5 GeV

| Observable | m_W | Γ_W |
|-------------|-------------------|------------|
| Source | Uncertainty (MeV) | |
| Statistics | 0.8 | 2.7 |
| Beam energy | 0.4 | 0.6 |
| Beam spread | — | 0.9 |
| Corr. syst. | 0.4 | 0.2 |
| Total | 1.0 | 2.8 |

| E_{cm} (GeV) | Lumiosity (ab^{-1}) | Cross section (pb) | Number of WW pairs (M) |
|----------------|-------------------------|--------------------|------------------------|
| 157.5 | 0.5 | 1.25 | 0.6 |
| 161.2 | 0.2 | 3.89 | 0.8 |
| 162.3 | 1.3 | 5.02 | 6.5 |



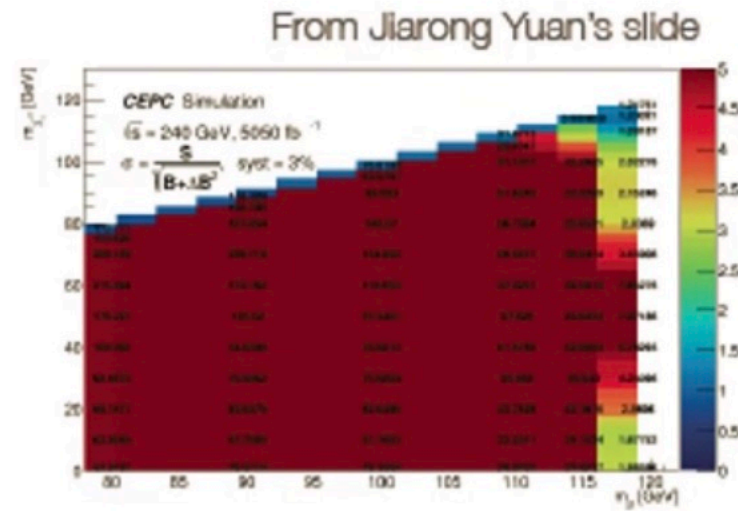
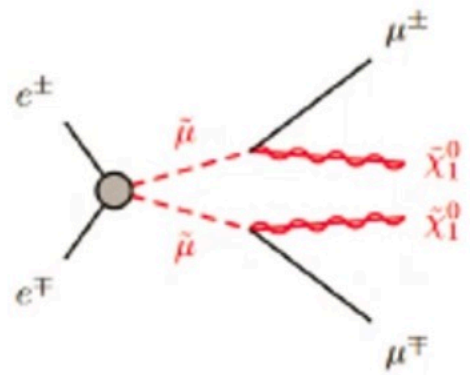
刘艺峰-国科大校学生会



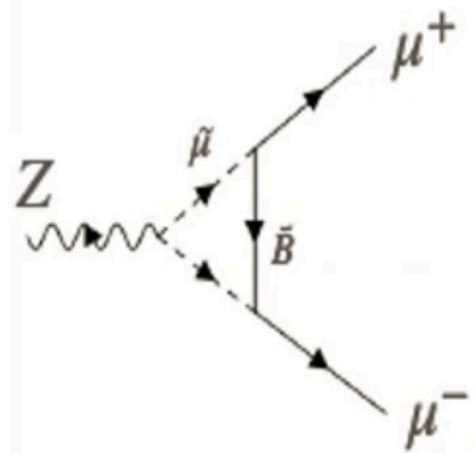
曹诗沫-学生会

Effects of $g-2$ at CEPC

1-loop effects



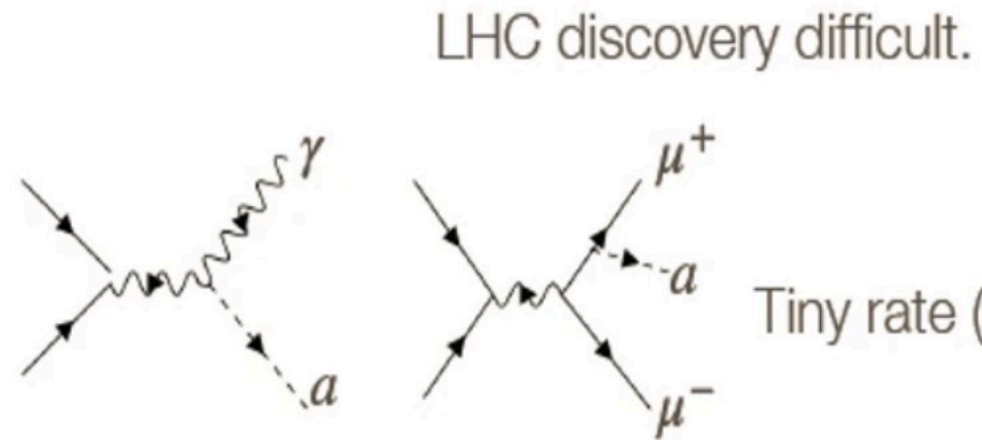
Direct search limited by E_{CM} (extra motivation for $t\bar{t}$ bar).



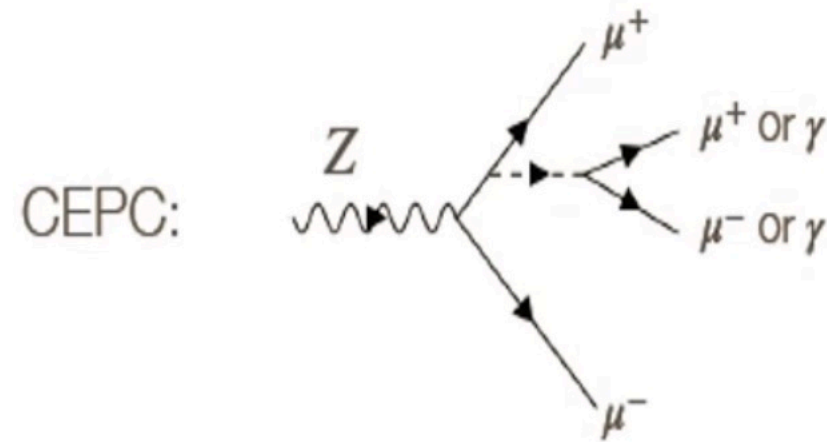
$$\frac{\delta\Gamma_{\mu}}{\Gamma_{\mu}} \sim 10^{-4} - 10^{-5}$$

Precision Z measurement at CEPC could provide complementary information.

2-loop effects



Tiny rate ($\sim \text{ab}$), large background



$$\text{BR}(Z \rightarrow 4\mu \text{ or } 2\mu 2\gamma) \sim 10^{-7}$$

Within the reach of Tera Z.

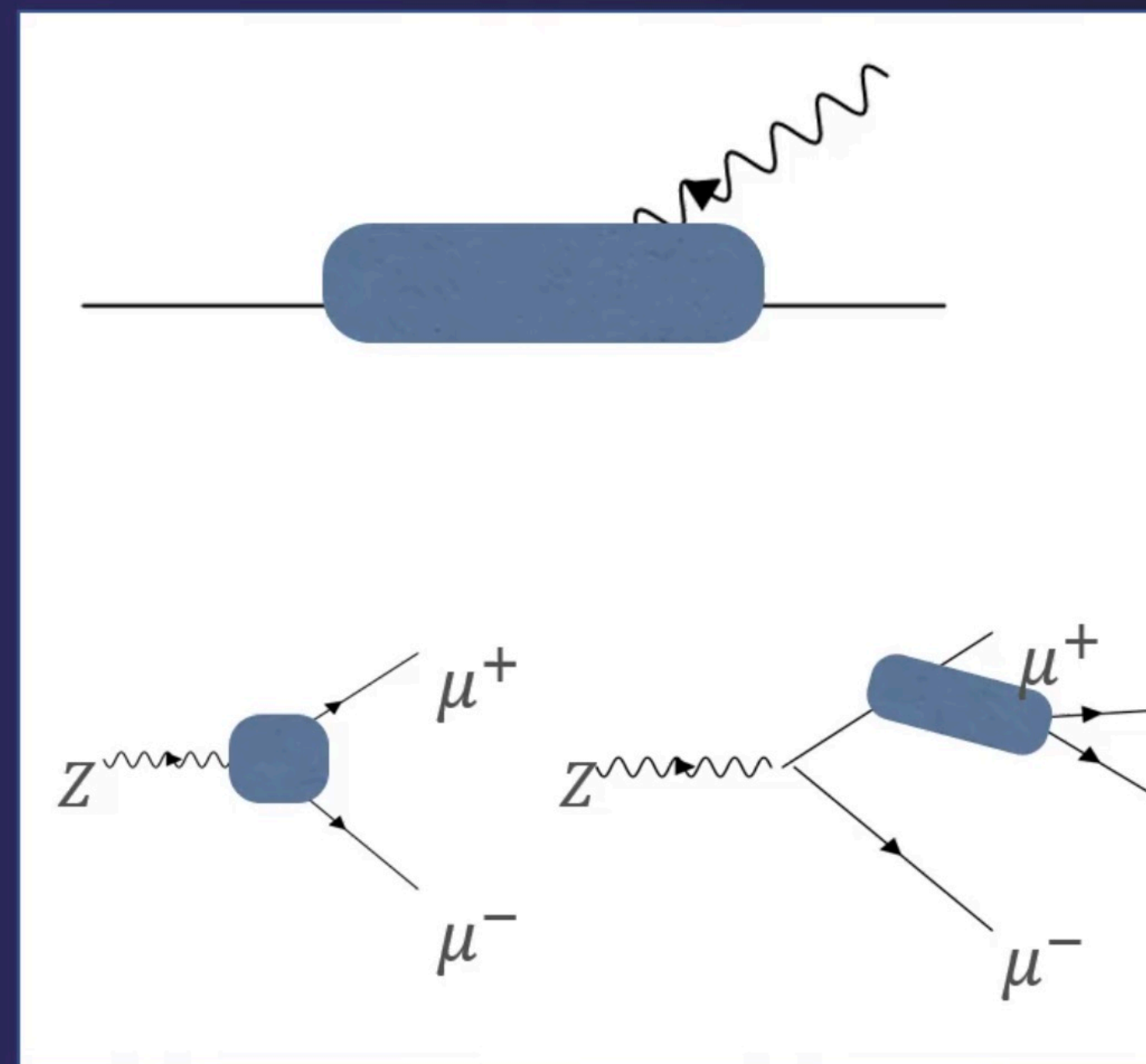
Pseudo scalar Higgs also probed by EW precision tests, flavor physics at CEPC

By L.T. Wang



Muon Substructure

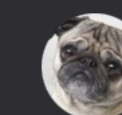
- **Compositeness at around 100 GeV**
 - Not yet a complete model, but an interesting direction to pursue.
 - Coupling specifically to muon, could be difficult for the LHC.
- **At CEPC: Z decays gives 10^{10} s muons**
 - Great opportunities to pursue such new physics!



By L.T. Wang



YFW



刘艺峰-国科大校学生会



曹诗沫-学生会

规划中的美国：各种直线(回收型)/环形希格斯工厂

- C3: Cool Copper Collider (2203.07646): 120 MV/m
- Helen: High Energy Lepton Collider (2203.08211): 55 – 90 MV/m
- XCC: X-ray FEL-based gamma-gamma Collider (2203.08484)
- Energy Recovery technology: CERC (ERL boosted FCC), ERLC (Twin LC), ReliC (Recycling Linear Collider)

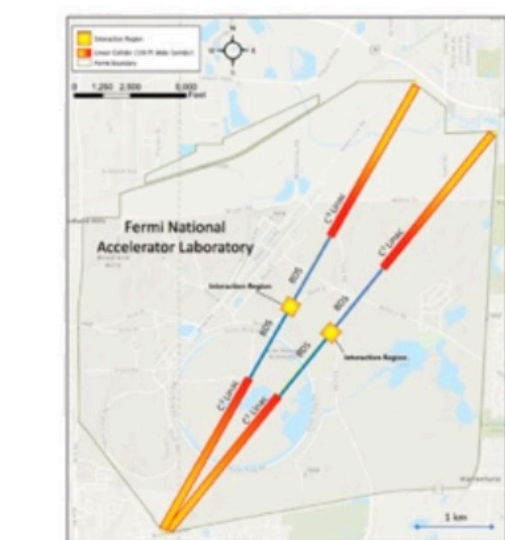
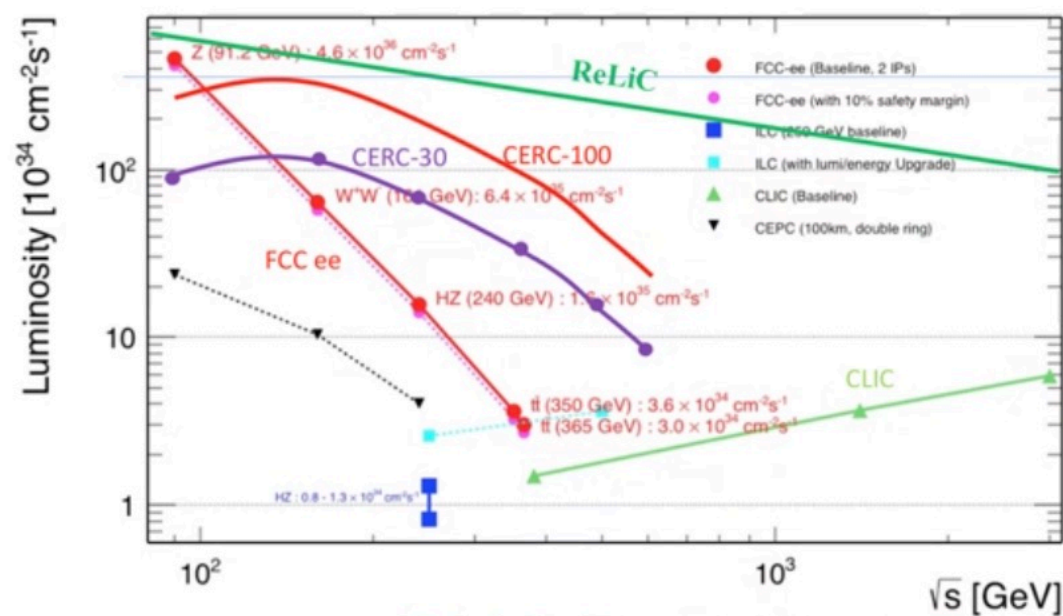


Figure 3: Possible locations for a 7-km footprint linear collider on Fermilab site considered for C3.

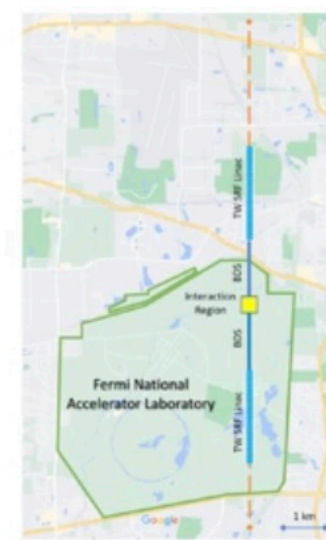
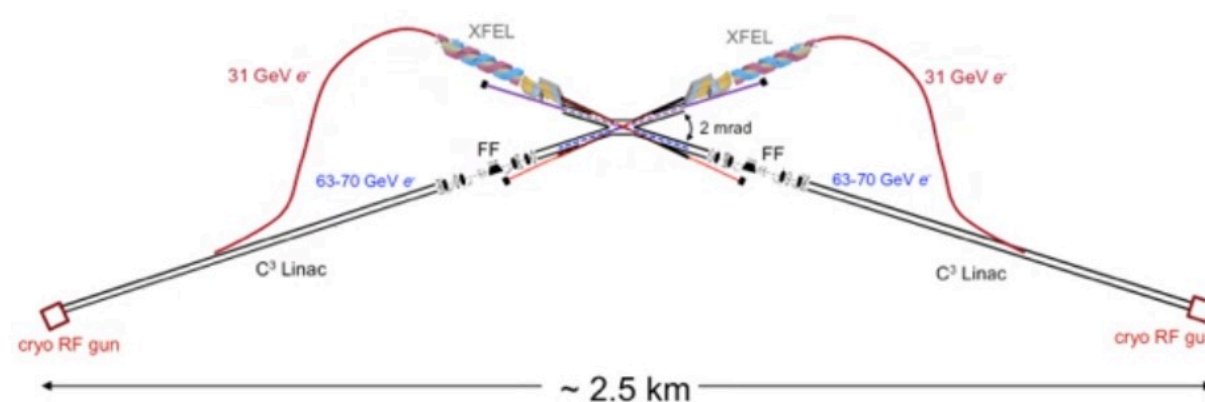
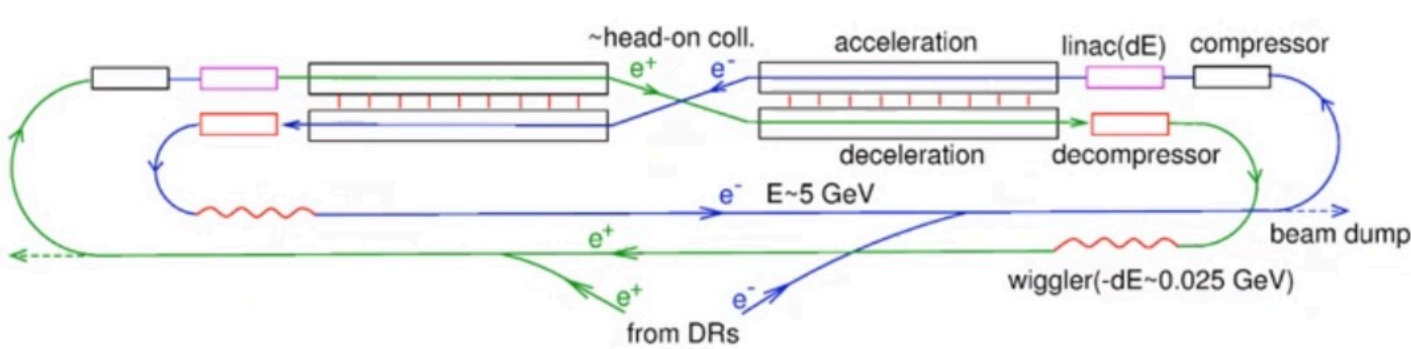


Figure 5: Possible string of the 200-GeV REBELS colliders at Fermilab. The TW section is shown. The orange shaded line indicates a 10 km stretch that might be available for a linear upgrade of REBELS to 200 GeV.



Figure 7: Fermilab site showing the proposed 16-km site-filler collider ring.

Twin LC with energy recovery



刘艺峰-国科大校学生会



曹诗沫-学生会

更远的未来：新加速原理？

- 用**激光**或带电**粒子束**产生**等离子体**电场，加速带电粒子
 - 梯度比传统加速器大~1000倍 → 尺寸小~1000倍 → 造价小~1000倍？
- 自80年代被提出以来，**电子**加速得到快速发展，有望走入应用：
 - 高能**直线**加速器
 - 小型“桌面”自由电子激光
 - 桌面型超快X射线、辐照装置、工业CT、生物影像。。。
- 目前的主要问题
 - 缺乏对正电子加速的研究，质子加速后的束流品质较差
 - 激光驱动的电子加速在**总功率**、**能量转换效率**、**束流品质**和**电荷量**等各方面均比传统加速器低几个量级
 - 用传统加速器粒子束驱动的电子加速性能较好，有望用于高能加速器
 - 高效级联加速是一个共同问题，需要解决
- 结论：
 - 高能正负电子对撞机可能会在20年后成熟，用于1-10TeV**直线**对撞机
 - 即使上述问题全被解决，作为**H/Z/W**的**高亮度环形**对撞机不可能被取代



国内研究进展：

- CEPC注入器
- 正电子和质子加速方案
- 高品质束流相空间操控与外注入级联
- 自由电子激光的产生
- 超短超强激光器
- X射线源应用研究

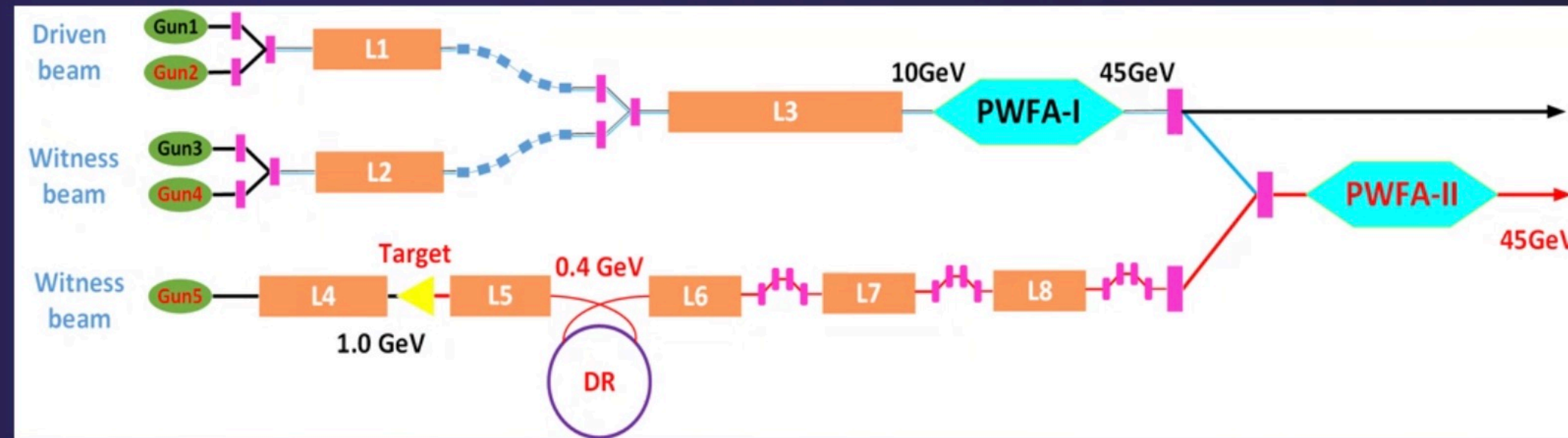
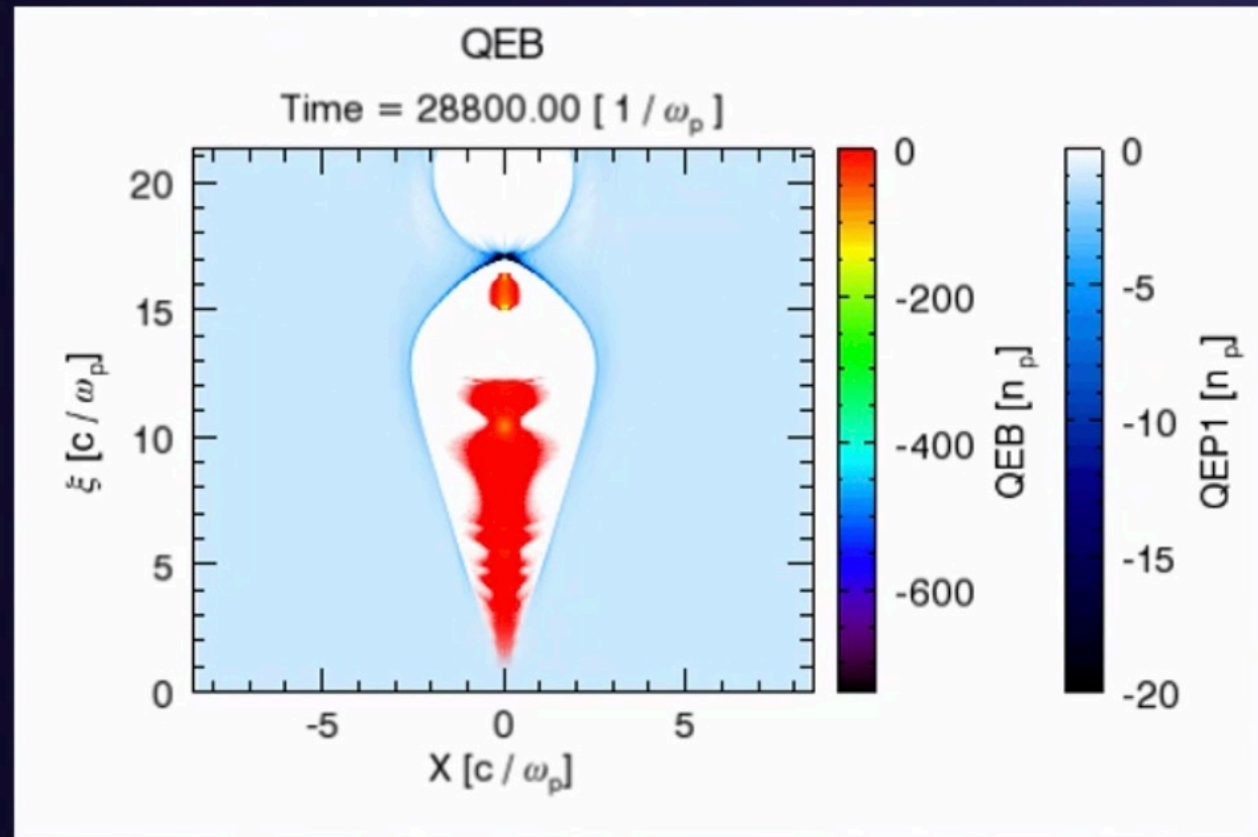
王贻芳、鲁巍《科学通报》
67(9),805(2022)

正在讲话: YFW;



基于等离子体加速的CEPC注入器

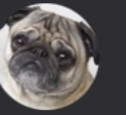
正在讲话: YFW;



- 国际上等离子体加速研究还在实验室阶段，还没有真正用于高能加速器
- 我们的创新方案：将传统加速器与等离子体加速器结合，克服各自的缺点：
 - 用传统加速器给出高束流品质，用等离子体将束流能量加(3-6)倍,再用传统加速器整理束流品质 → 提高注入器能量，简化增强器设计，大大降低造价
 - 传统方案保底 → 耗电、造价高、性能受影响
- 得到国际评估赞扬：模拟研究证明方案可行，束流质量满足要求
- 一些验证实验将在清华、上海和SLAC完成
- 如果成功可以用在未来光源（如南方光源）的注入器上



YFW



刘艺峰-国科大校学生会



曹诗沫-学生会

开展高温超导磁体研究，为未来的SPPC做准备

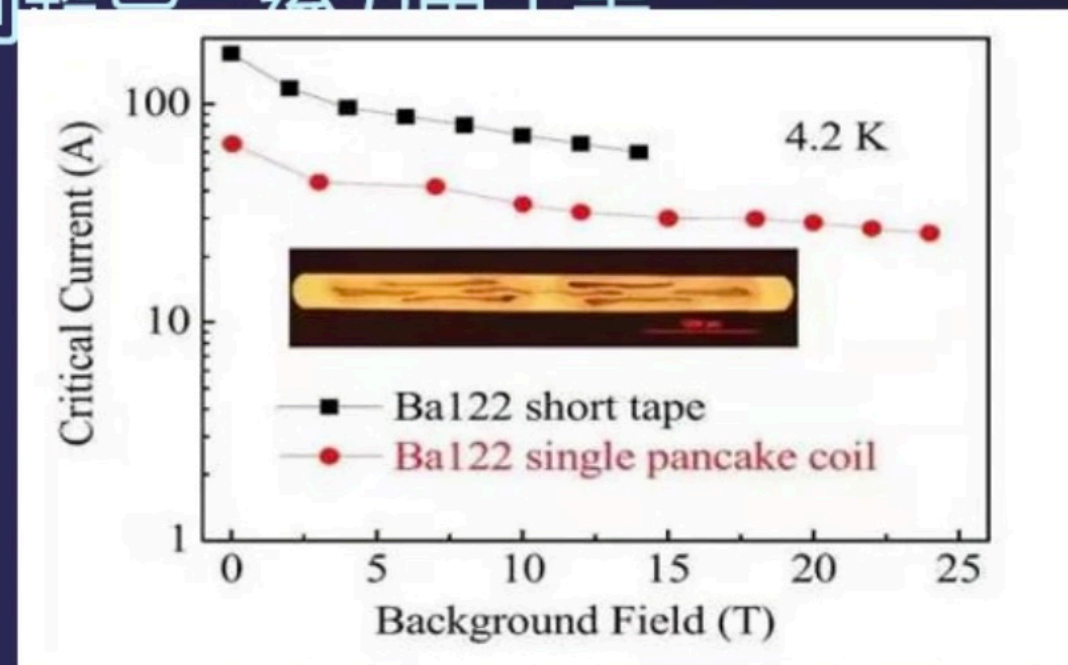
正在讲话: YFW;

- 超导的应用范围极其广阔，但受限于低温、高成本，潜能远远未能发挥
- 我们在国际上首次提出未来的高能质子加速器（其能量受限于让粒子“拐弯”的磁场强度）磁铁应该采用高温超导，特别是铁基超导 → 比低温超导提高1倍以上
 - 目标1：超导电缆的电流密度 ↑ 10 倍，价格 ↓ 10倍 → 性价比 ↑ 100 倍
 - 目标2：极大地推动超导技术发展，就像当年Tevatron推动了MRI技术发展一样
- 2016年10月成立“实用化高温超导材料产学研合作组”，成员包括高能所、物理所、电工所、中科大、合肥物质院、清华、南大、西部超导、上海超导、上创超导、纳力申等

- 目标：发展出实用化的超导材料，~ 20元/千安米
- 铁基：各向同性、金属性、制造简单、成本低
 - 基础研究国际领先：最高温度材料
 - 导线制备国际领先：~ 115 m 12000 A/cm² @ 10 T

■ 已获得中科院先导B支持

- 10.2T (NbTi+Nb₃Sn)二级磁铁成功
- 制作国际首个铁基超导线圈，并完成其在 24T下的测试



Viewpoint by NHMFL

IBS are ideal candidates for applications... Moreover, the cost of IBS wire can be 4 to 5 times lower than that of Nb₃Sn.



刘艺峰-国科大校学生会



曹诗沫-学生会

结语

- 粒子物理标准模型是人类文明史上最激动人心的科学成果之一
 - 但它尚不完备，也不完全自治，还有许多其不能解释的实验证据
- 我们没有机会对它的建立做贡献，但也许可以对它的修改、升华做贡献
- 科学的发展是无止境的，不会以个人的意志为转移
 - **开尔文勋爵**：“物理大厦已经落成，…现在它的美丽而晴朗的天空出现两朵乌云…”
 - **普朗克的老师菲利普·冯·约利教授**曾忠告他，“物理学基本是一门已经完成了的科学”
 - **迈克耳孙**：“当然无法绝然肯定物理科学不再会有像过去那么惊人的奇迹，但非常可能的是大部分宏伟的基本原理业已确立，而今后的进展仅在于将这些原理严格地应用于我们所关注的现象上。…物理科学未来的真理将在小数点后六位数上求索”
 - 1899年，**美国专利局局长**断言，“所有能够发明的，都已经发明了”
 - 《**Heisenberg** in the Atomic Age》by Cathryn Carson: “Heisenberg has always, his colleague suggested, shown a ‘certain dislike for accelerators’, … and had written letters to block DESY’s funding”; “His expectations for the machine’s payoff drew from his sense of the future of particle physics”
 - **60年代**有物理学家预言粒子物理的问题无法解决，并离开了这个领域。他们失掉了标准模型



刘艺峰-国科大校学生会



曹诗沫-学生会

给年轻人的几句话

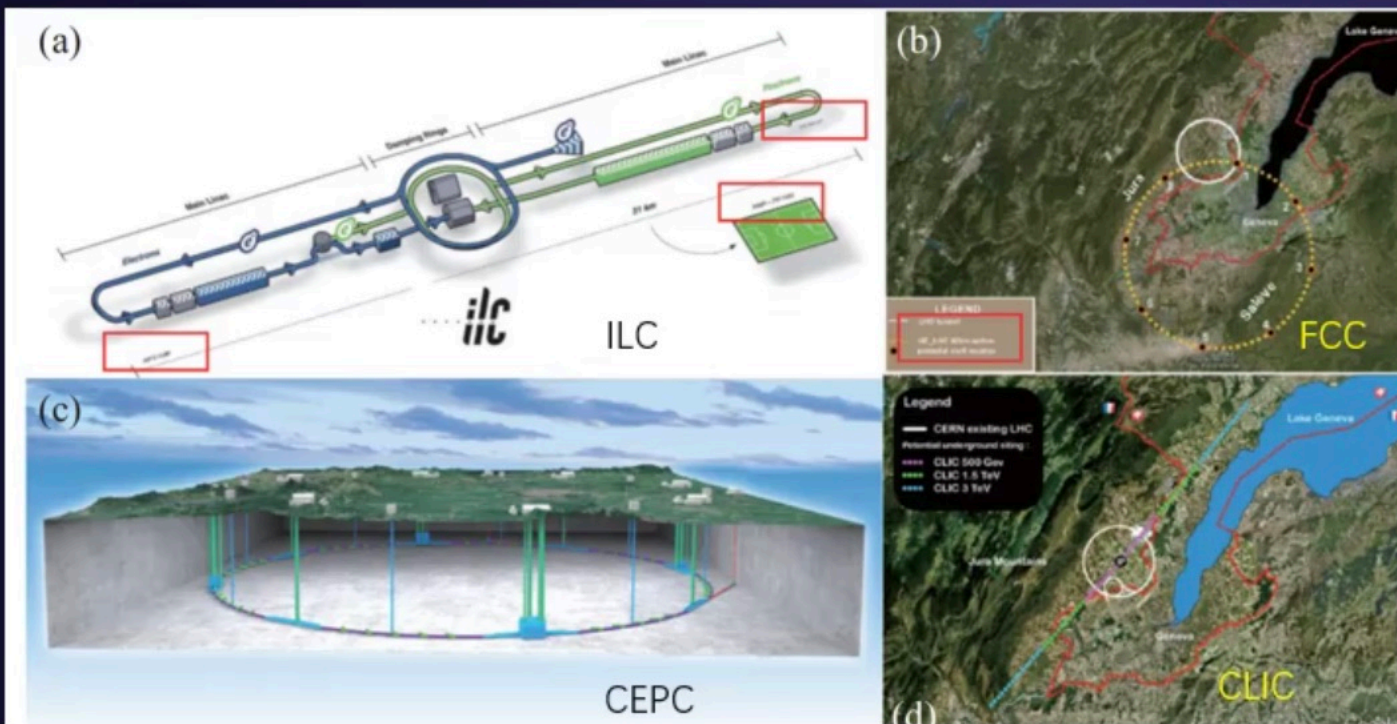
- 不要迷信权威
- 机会只会留给乐观的人，因为悲观的人早就离开了
- 要勇于挑战重大问题，不满足于有经费、有饭吃
- 对自己的领域要追求“博古通今”，要拒绝平庸，追求创造性
- 相信机遇，时刻准备着

你们中间一定有人会远远超过我们这代人
中国的科学在你们手上一定会走到世界前列
欢迎大家参加我们的粒子物理研究！



Microsoft PowerPoint ribbon with various tool icons for editing, drawing, and presentation control.

各国方案的聚焦：正负电子Higgs工厂



High-priority future initiatives

EUSPP 2020

An electron-positron Higgs factory is the highest-priority next collider. For the longer term, the European particle physics community has the ambition to operate a proton-proton collider at the highest achievable energy. Accomplishing these compelling goals will require innovation and cutting-edge technology.

中国：2012.9提出CEPC-SPPC设想；2016.8中国高能物理学会指出“CEPC是我国未来对撞机发展的首选项目”

日本：自90年代起推动ILC在日本建设

欧洲(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 ...

美国：正在Snowmass讨论

(My) remarks:

- 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)

Fabiola Gianotti, CERN DG, June 2020

单击此处添加备注

正在讲话: 曹诗沫-学生会; YFW;



Lenovo

基本粒子未来-国科大-2022-5-6 -V4 - PowerPoint

文件 开始 插入 设计 切换 动画 幻灯片放映 审阅 视图 帮助 Acrobat 告诉我你想要做什么 共享

剪切 复制 格式刷 新建 幻灯片 节 字体 段落 绘图 编辑 Adobe Acrobat

形状填充 形状轮廓 形状效果 查找 替换 选择 创建并共享 Adobe PDF

谢谢大家

感谢梁志军、阮曼奇、王连涛、姜辛丑、贾英华、王晨芳、Ashutosh Kotwal 等帮助、提供、美化和审阅ppt

单击此处添加备注

幻灯片 第 46 张, 共 46 张 中文(中国) 76%

正在讲话: 曹诗沫-学生会; YFW;

