



## SU(5)超对称大统一理论的唯象研究及相关教学

朱经亚

[zhujy@henu.edu.cn](mailto:zhujy@henu.edu.cn)

河南大学

Based on JHEP 03 (2025) 207, Dong, Wang, Yuan, JZ, Zhu

2025.12.06, 新乡

明德新民 止於至善





# 目录

1. 粒子物理标准模型——物质结构与基本相互作用

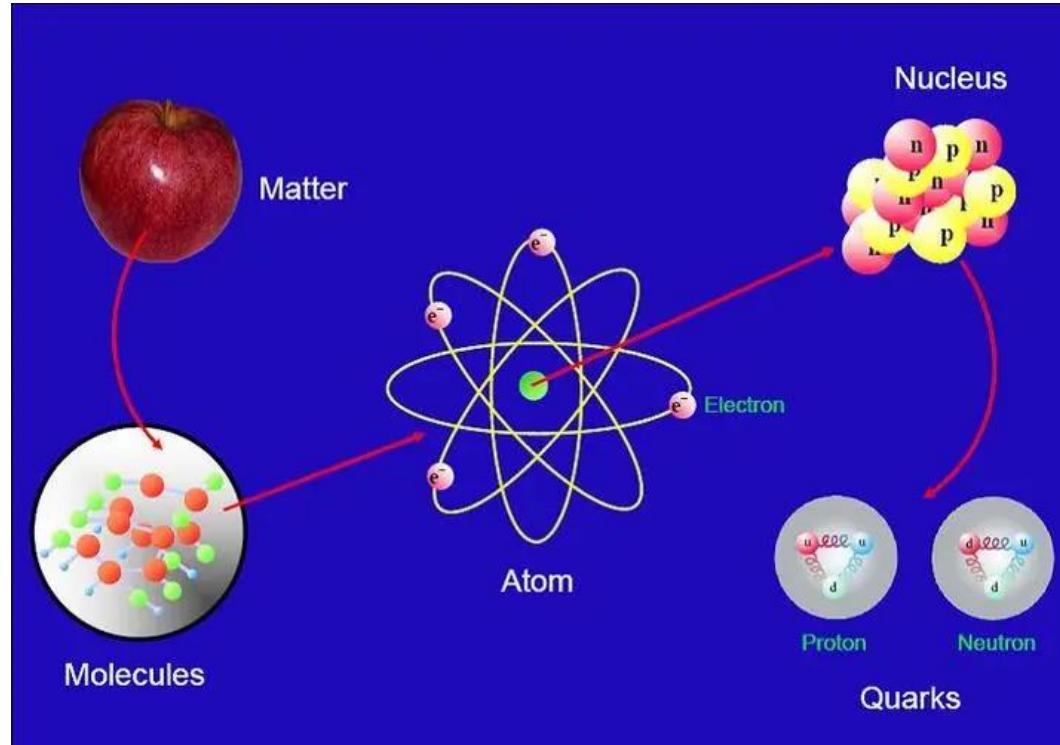
2. mSUGRA——最简单的SU(5)超对称大统一模型

3.  $\tilde{g}$ SUGRA——mSUGRA的非普适gaugino扩展

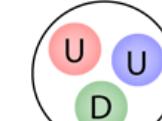
4. 相关教学研究介绍

5. 总结与展望

# 1. 物质结构



质子、中子由夸克组成



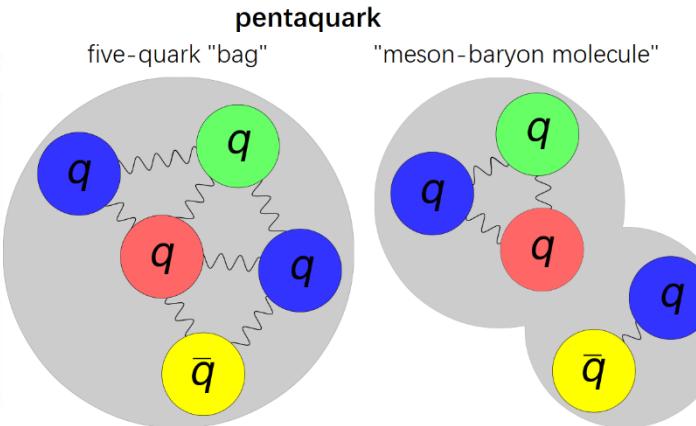
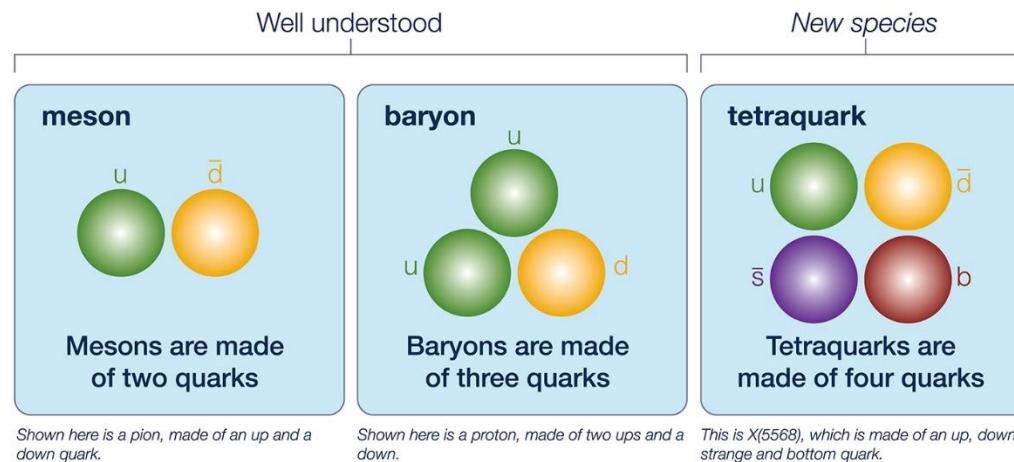
Proton

$U$  = "up" quark  $+\frac{2}{3} e$   
 $D$  = "down" quark  $-\frac{1}{3} e$

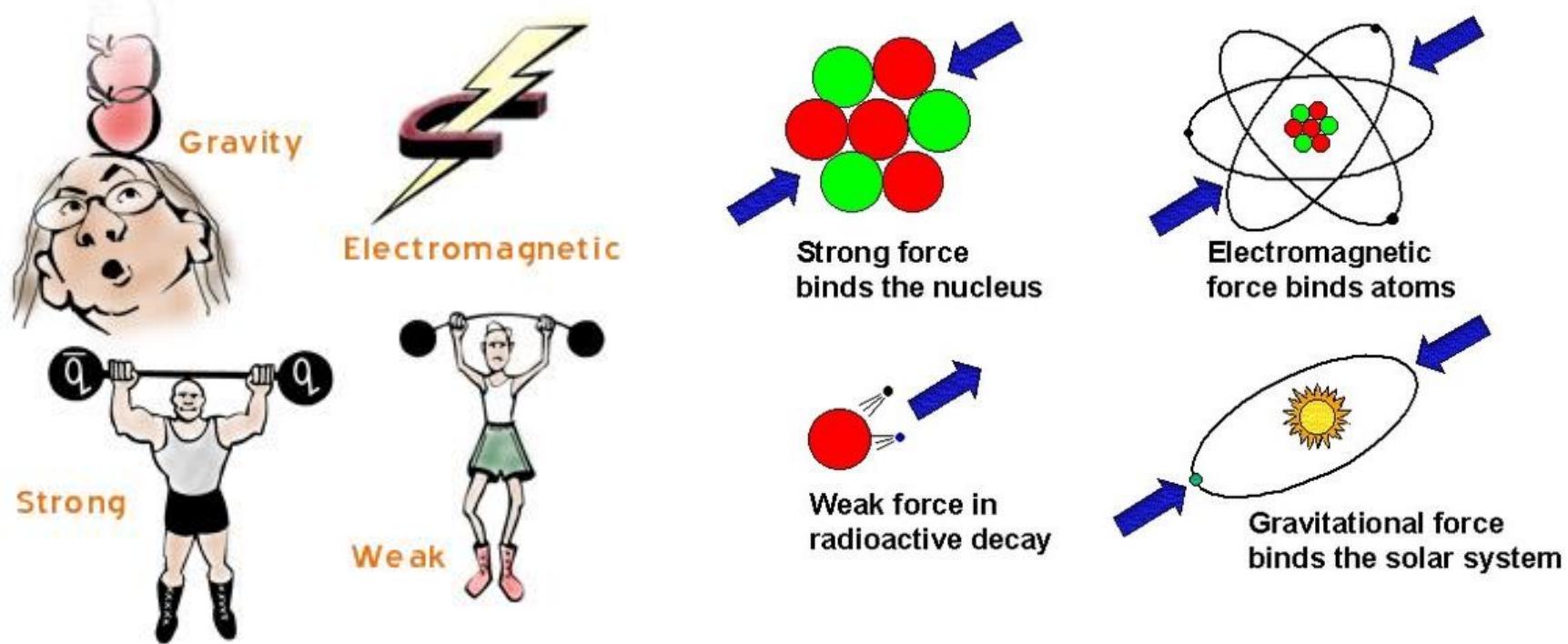


Neutron

介子、重子、  
四夸克态、  
五夸克态

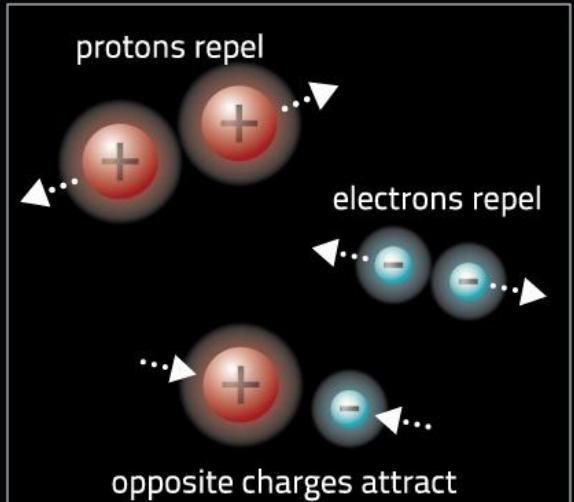


# 四种基本相互作用



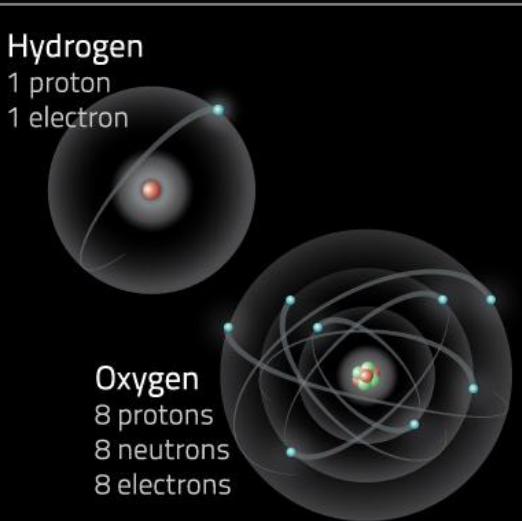
Interaction	Current theory	Mediators	Relative strength	Long-distance behavior	Range (m)
Weak	Electroweak theory (EWT)	$W$ and $Z$ bosons	$10^{25}$	$\frac{1}{r} e^{-m_{W,Z} r}$	$10^{-18}$
Strong	Quantum chromodynamics (QCD)	gluons	$10^{38}$	$\sim r$ (Color confinement)	$10^{-15}$
Electromagnetic	Quantum electrodynamics (QED)	photons	$10^{36}$	$\frac{1}{r}$	$\infty$
Gravitation	General relativity (GR)	gravitons (hypothetical)	1	$\frac{1}{r}$	$\infty$

## The Electromagnetic Force in Forming Matter



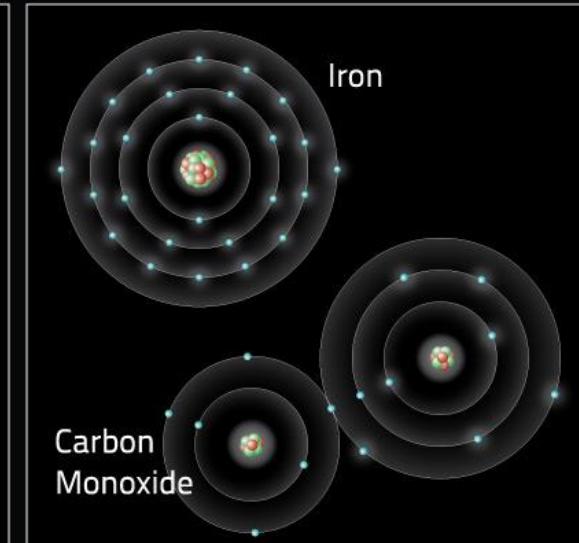
### Coulomb's Law

Like charges repel, unlike charges attract. Protons repel each other, and the same is true for electrons, but the electromagnetic force attracts electrons to protons.



### Electron Capture

The electromagnetic force pulls electrons into orbit around positively charged atomic nuclei. The larger the nuclei, the more electrons are pulled in.



### Atoms & Molecules

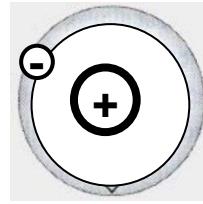
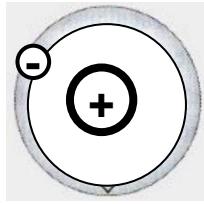
The electromagnetic force holds atoms and molecules together. Electrons occupy energy levels around atomic nuclei balancing out positive and negative charges.

原子核 + 电子  $\xrightleftharpoons{\text{电磁相互作用}}$  原子  $\xrightleftharpoons{\text{电磁相互作用}}$  分子  $\xrightleftharpoons{\text{电磁相互作用}}$  凝聚态物质

# 强相互作用与物质构成

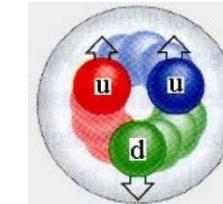
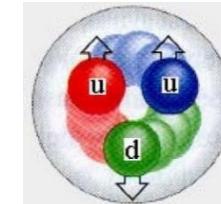


Van der Waals force

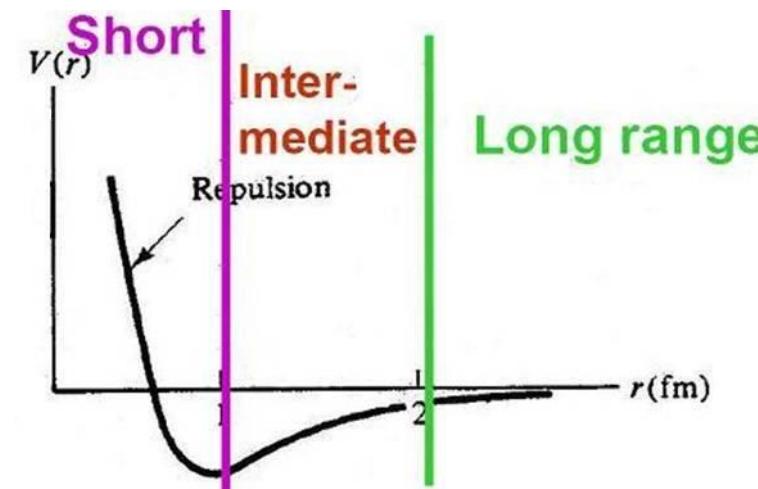
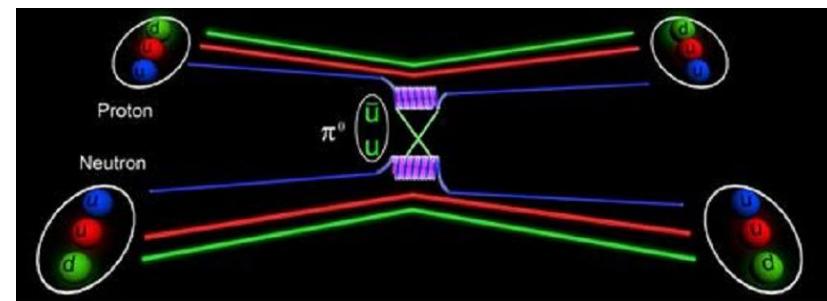


The effective interaction between neutral atoms: the residual force of electromagnetic interaction outside atom.

Nuclear force

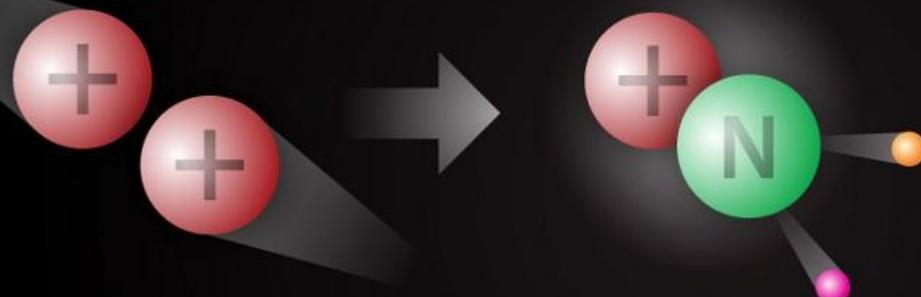


Residual force of the QCD strong interaction outside the nucleon



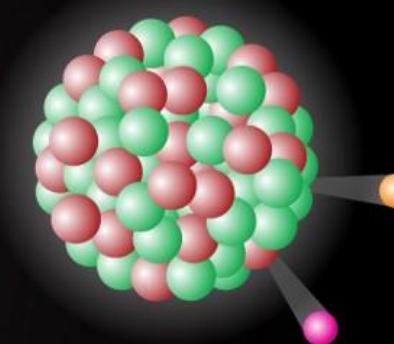
夸克  $\xleftrightarrow{\text{强相互作用}}$  质子中子  $\xleftrightarrow{\text{强相互作用}}$  原子核

## Weak Nuclear Force



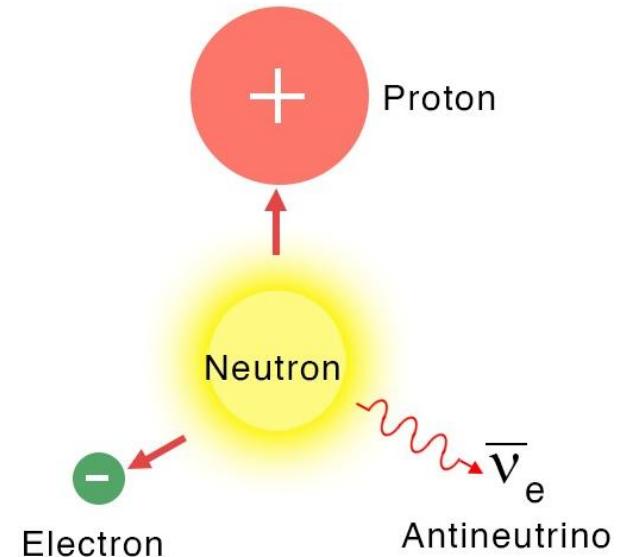
### Converting protons into neutrons

When two protons collide and fuse, a disruption in the weak nuclear force emits a positron and neutrino, which converts one of the positively charged proton to a neutrally charged Neutron. Without the weak nuclear force converting protons into neutrons, certain complex nuclei cannot form.



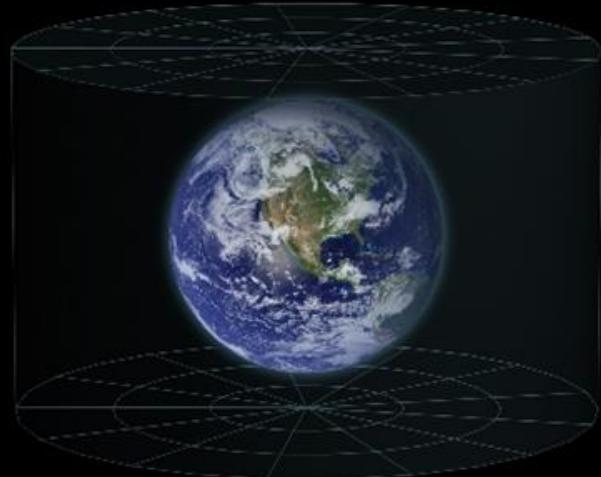
### Releasing radiation

Heavy atoms have an imbalance of protons and neutrons, so the weak nuclear force converts protons to neutrons releasing radiation.

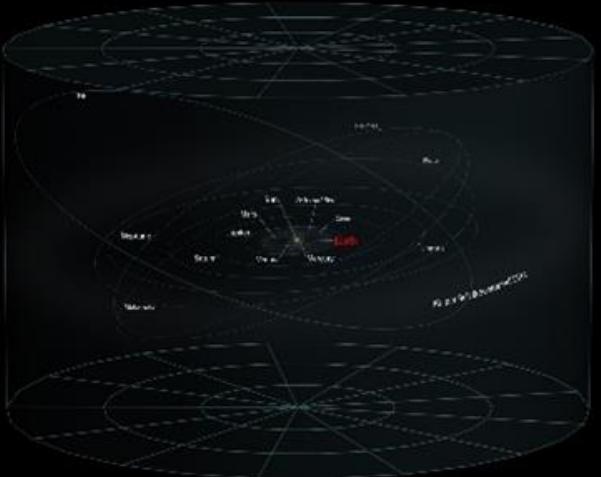


# 引力相互作用与天体运行

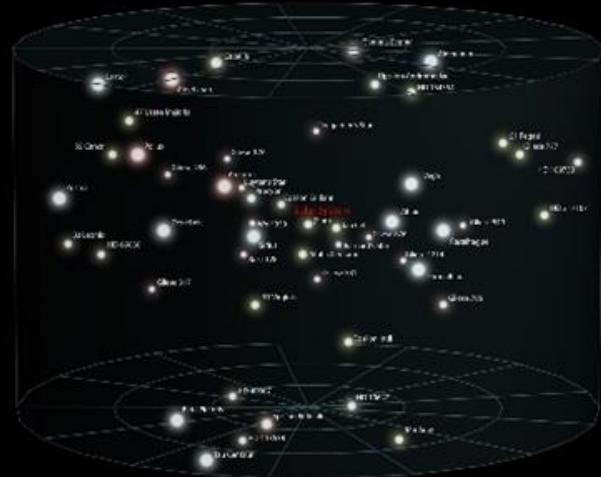
EARTH



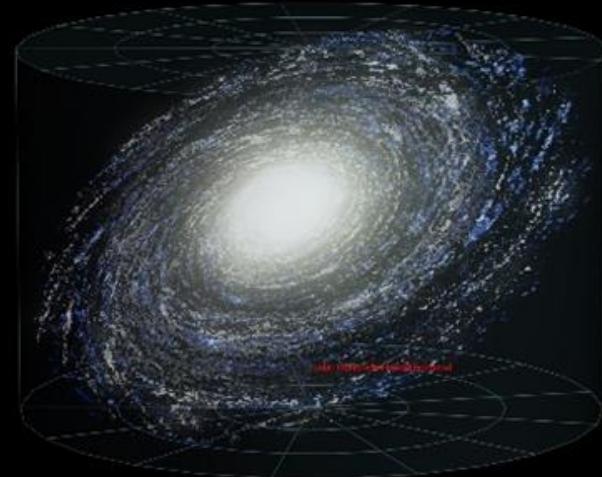
SOLAR SYSTEM



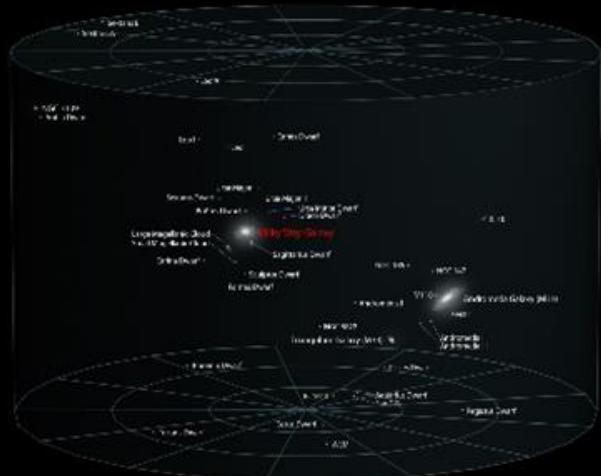
INTERSTELLAR NEIGHBORHOOD



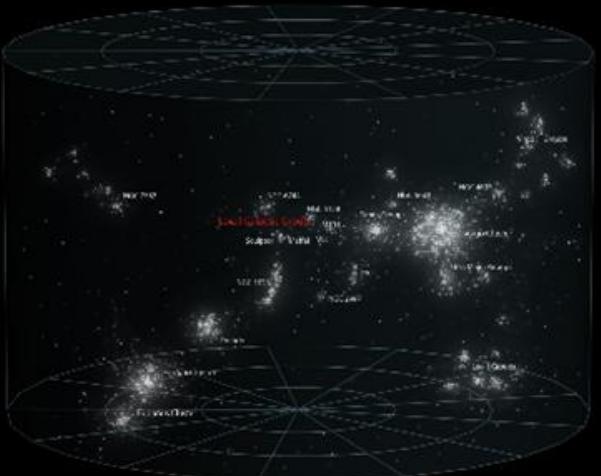
MILKY WAY GALAXY



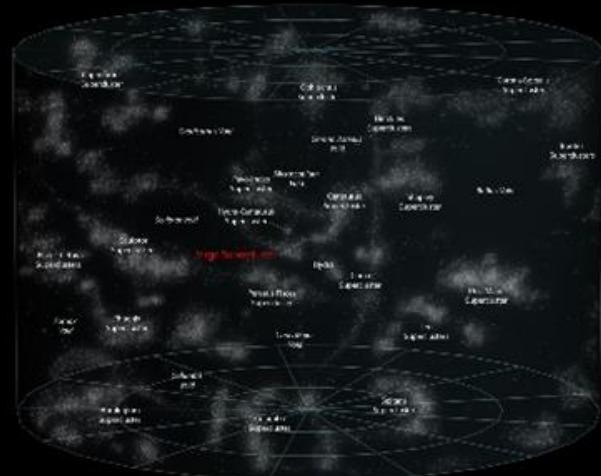
LOCAL GALACTIC GROUP



VIRGO SUPERCLUSTER



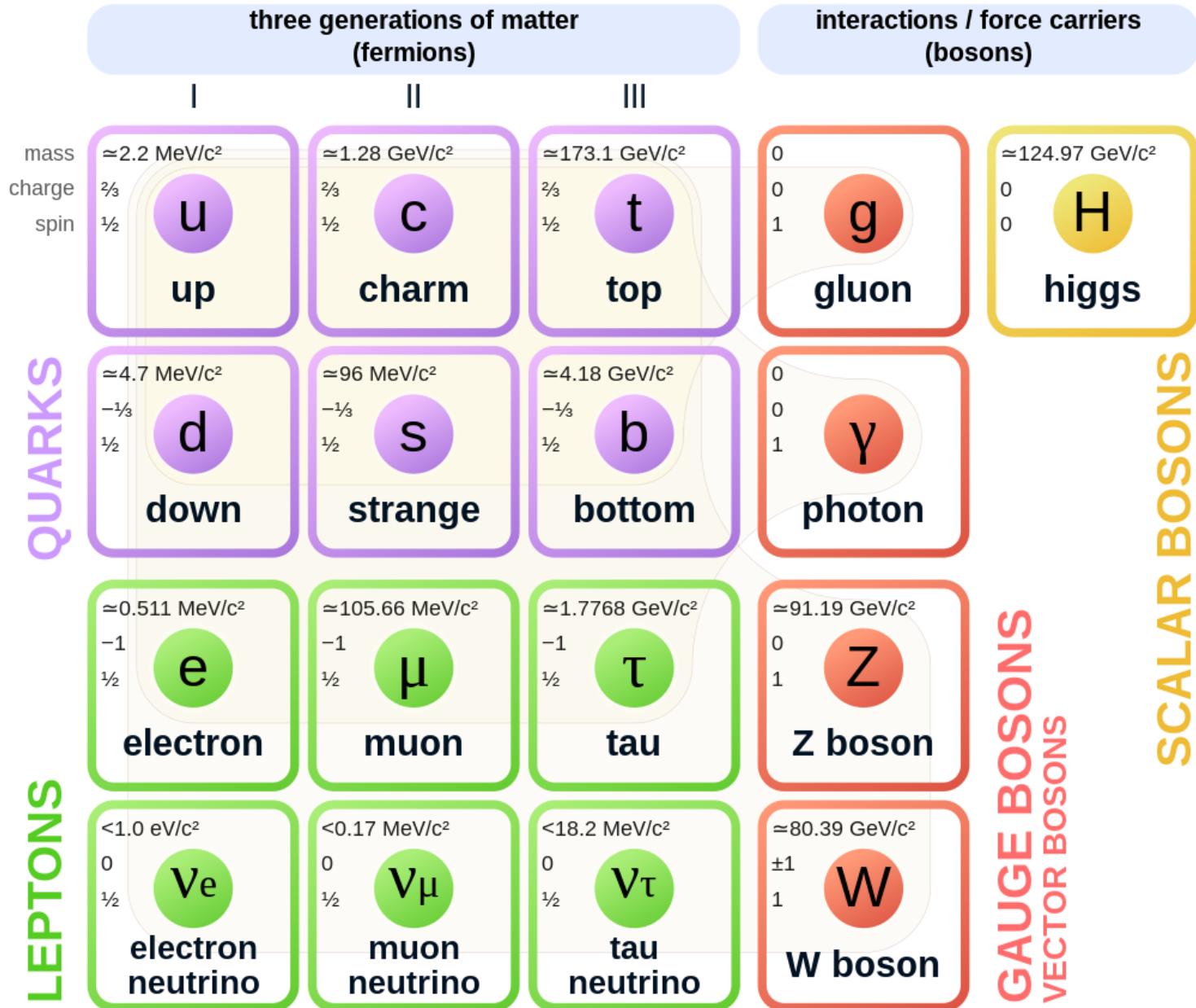
LOCAL SUPERCLUSTERS



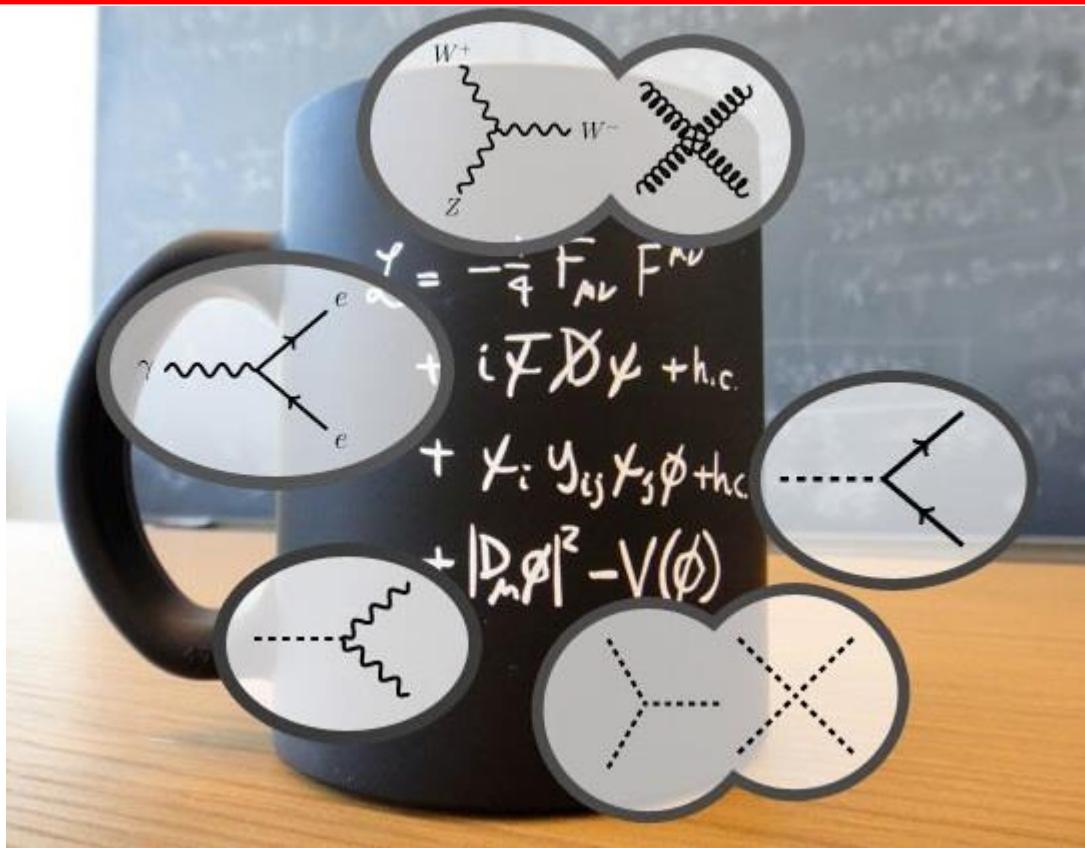
OBSERVABLE UNIVERSE



# Standard Model of Elementary Particles



# 粒子物理标准模型中的相互作用：强、弱、电磁



Before electroweak breaking

$$SU(3)_C \otimes SU(2)_L \otimes U(1)_Y$$

$$F_{\mu\nu}^a = \partial_\mu A_\nu^a - \partial_\nu A_\mu^a + g f^{abc} A_\mu^b A_\nu^c$$

$$D_\mu \equiv \partial_\mu - i \frac{g'}{2} Y B_\mu - i \frac{g}{2} T_j W_\mu^j$$

$$\phi = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} \phi^+ \\ \phi^0 \end{pmatrix}$$

After electroweak breaking

$$SU(3)_C \otimes U(1)_{EM}$$

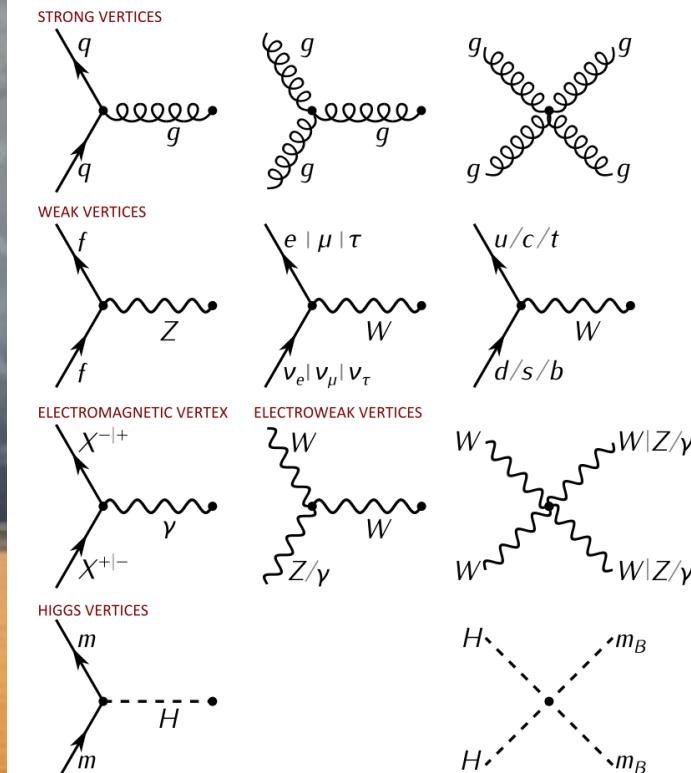
$$W^\pm = \frac{1}{\sqrt{2}} (W_1 \mp i W_2)$$

$$\begin{pmatrix} \gamma \\ Z^0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_W & \sin \theta_W \\ -\sin \theta_W & \cos \theta_W \end{pmatrix} \begin{pmatrix} B \\ W_3 \end{pmatrix}$$

$$Q = T_3 + \frac{1}{2} Y_W$$

$$M_W = \frac{1}{2} v g$$

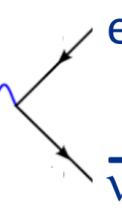
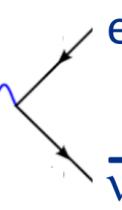
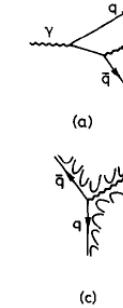
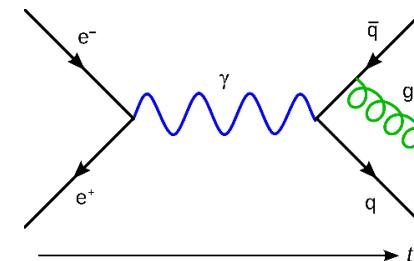
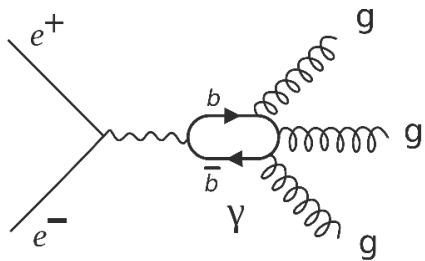
$$M_Z = \frac{1}{2} v \sqrt{g^2 + g'^2}$$



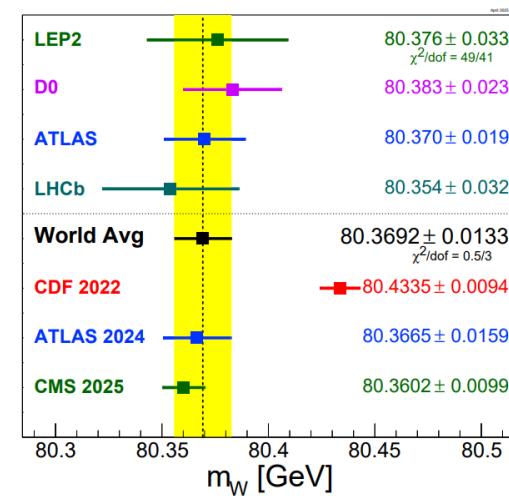
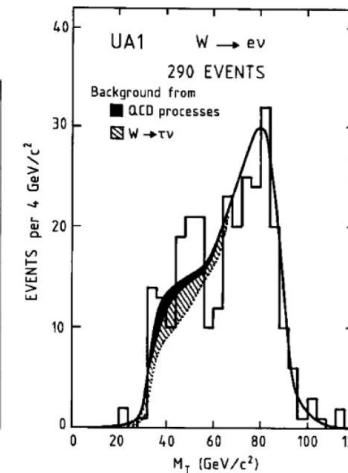
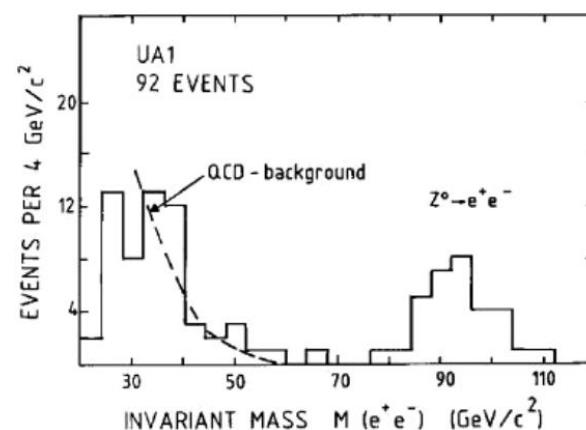
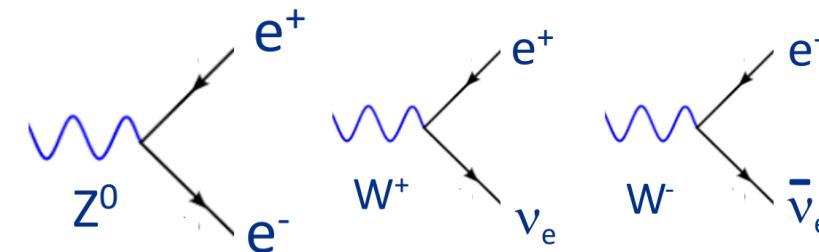
# 强、弱相互作用的实验验证



Strong interaction  
Gluon discovered  
1979, at PETRA  
2004 Nobel Prize  
to QCD theorists



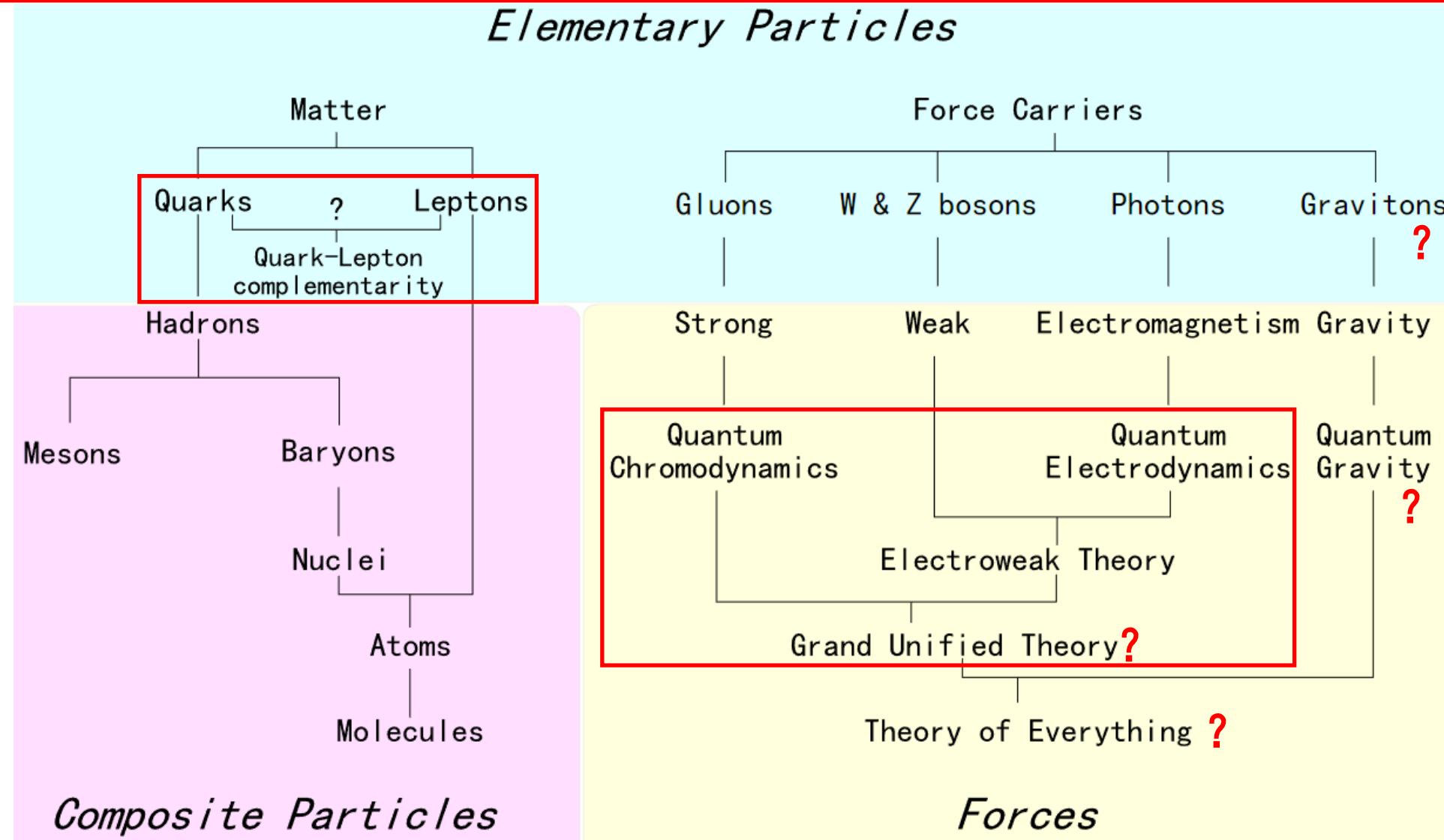
Weak interaction  
Z & W discovered  
1983, at CERN  
1984 Nobel Prize  
to experimentalists



# 物质场的统一 & 相互作用的统一



## Elementary Particles



## 2. 从标准模型到大统一



- Gauge symmetry:

$$SU(3)_C \otimes SU(2)_L \otimes U(1)_Y \xrightarrow{\text{EW scale}} SU(3)_C \otimes U(1)_{EM}$$

$$g : (8, 1)_0, \quad W_{1,2,3} : (1, 3)_0, \quad B : (1, 1)_0$$

- Matter fields:  $Q_L, L_L, u_L^c, d_L^c, \ell_L^c$

$$Q_L : (3, 2)_{+1/6}$$

$$L_L : (1, 2)_{-1}$$

$$u_L^c : (\bar{3}, 1)_{-2/3}$$

$$d_L^c : (\bar{3}, 1)_{+1/3}$$

$$\ell_L^c : (1, 1)_{+1}$$

- Higgs:  $(1, 2)_{+1/2}$

# 没有超对称的SU(5) 大统一模型



The minimal Simple Group including SM gauge groups:

$$SU(5) \supset SU(3)_C \otimes SU(2)_L \otimes U(1)_Y$$

Filling with the 24 gauge bosons

$$V_\mu = \begin{pmatrix} G_1^1 - \frac{2B}{\sqrt{30}} & G_2^1 & G_3^1 & \bar{X}_1 & \bar{Y}_1 \\ G_1^2 & G_2^2 - \frac{2B}{\sqrt{30}} & G_3^2 & \bar{X}_2 & \bar{Y}_2 \\ G_1^3 & G_2^3 & G_3^3 - \frac{2B}{\sqrt{30}} & \bar{X}_3 & \bar{Y}_3 \\ X_1 & X_2 & X_3 & \frac{W^3}{\sqrt{2}} + \frac{3B}{\sqrt{30}} & W^+ \\ Y_1 & Y_2 & Y_3 & W^- & -\frac{W^3}{\sqrt{2}} + \frac{3B}{\sqrt{30}} \end{pmatrix}$$

Filling with the 15 fermion fields

$$\psi_{\bar{5}} = \begin{pmatrix} d_r^c \\ d_g^c \\ d_b^c \\ \ell \\ v_\ell \end{pmatrix}, \quad \psi_{10} = \begin{pmatrix} 0 & u_b^c & -u_g^c & -u_r & -d_r \\ -u_b^c & 0 & u_r^c & -u_g & -d_g \\ u_g^c & -u_r^c & 0 & -u_b & -d_b \\ u_r & u_g & u_b & 0 & -\ell^c \\ d_r & d_g & d_b & \ell^c & 0 \end{pmatrix}$$

Higgs:  $\Phi_{24} = (\phi_j^i)$ ,  $\Phi_5 = (\varphi^i)$ ,  $i, j = 1, \dots, 5$ ,  $\sum \phi_i^i = 0$

$$\langle \phi_j^i \rangle = \begin{pmatrix} -1/3 & & & & \\ & -1/3 & & & \\ & & -1/3 & & \\ & & & 1/2 & \\ & & & & 1/2 \end{pmatrix} a, \quad \langle \varphi^i \rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ v \end{pmatrix}$$

$$SU(5) \xrightarrow{\text{GUT scale}} SU(3)_C \otimes SU(2)_L \otimes U(1)_Y \xrightarrow{\text{EW scale}} SU(3)_C \otimes U(1)_{EM}$$

Dynamics terms of Higgs

$$L_\Phi = (D^\mu \Phi_{24})^\dagger (D_\mu \Phi_{24}), \quad L'_\Phi = (D'^\mu \Phi_5)^\dagger (D'_\mu \Phi_5)$$

Gauge bosons getting mass,  $12 \sim M_{GUT}$ ,  $3 \sim M_{EW}$

$$m_X, m_Y \sim 10^{16} \text{ GeV}, \quad m_W, m_Z \sim 10^2 \text{ GeV}, \quad \sin^2 \theta_W(10^2 \text{ GeV}) \sim 0.2$$

Yukawa interaction:

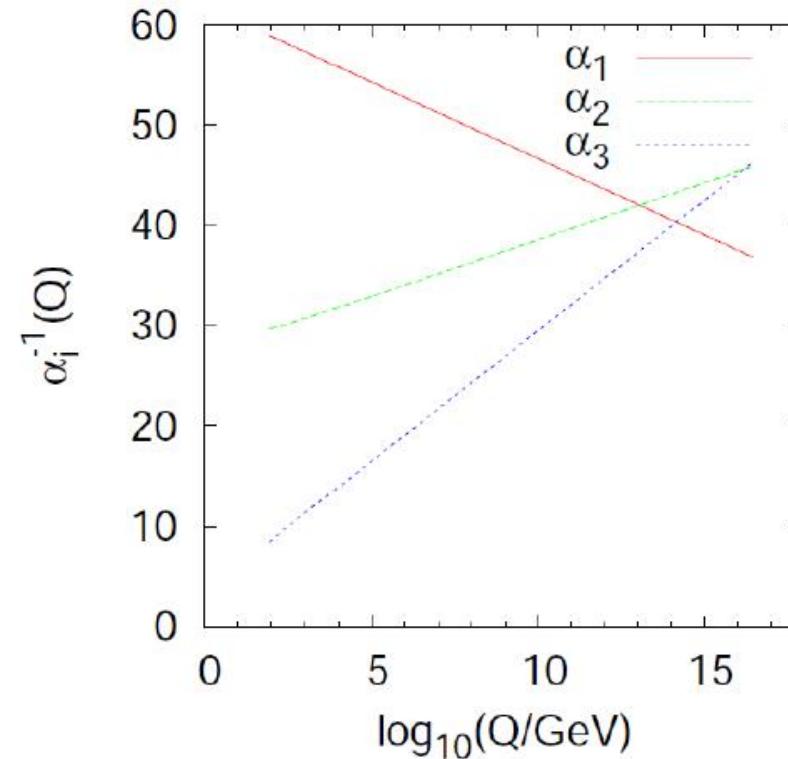
$$L_Y = A \bar{\psi}_{ijL} \varphi^i \psi_R^j + B \frac{2}{2!2!} \varepsilon_{ijklm} \psi_L^{Tij} C^{-1} \varphi^k \psi_L^{lm} + h.c.$$

Fermions getting mass, at  $M_{GUT}$  scale:

$$m_d = m_\ell = Av, \quad m_u = 2Bv, \quad m_{v_\ell} = 0$$

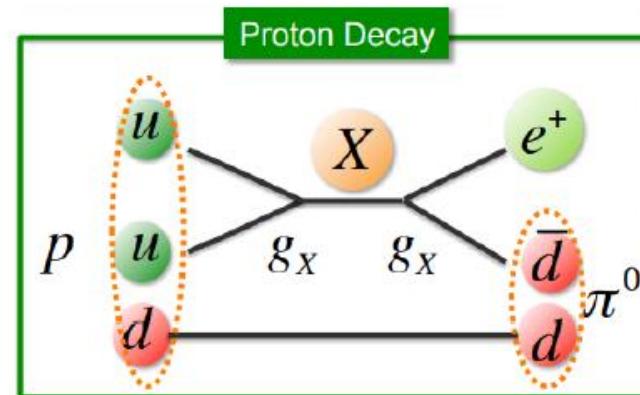
# Cons of the minimal SU(5) GUT

- Gauge couplings unification
- Neutrino mass
- Proton life time
- Flavor unification

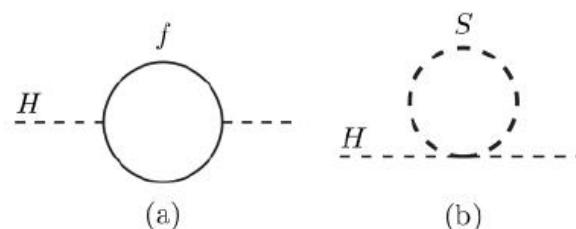


Solutions:

SUSY-GUT, SO(10), SO(18), ...



# 超对称 (SUSY)

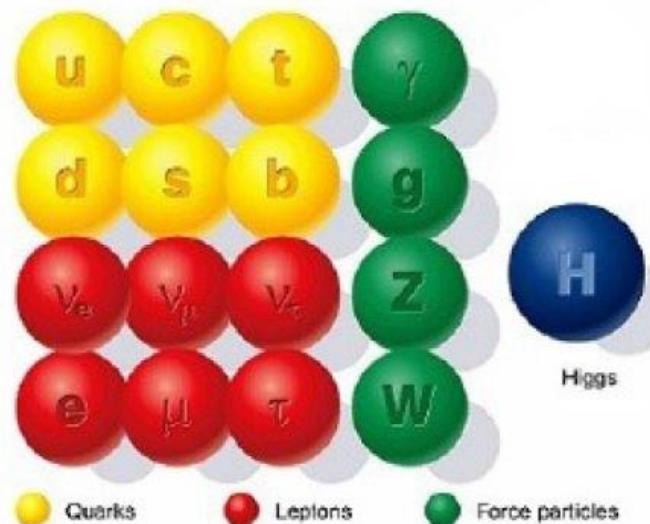


$$\Delta m_{H(a)}^2 = -\frac{|\lambda_f|^2}{8\pi^2} \Lambda_{\text{UV}}^2 + \dots$$

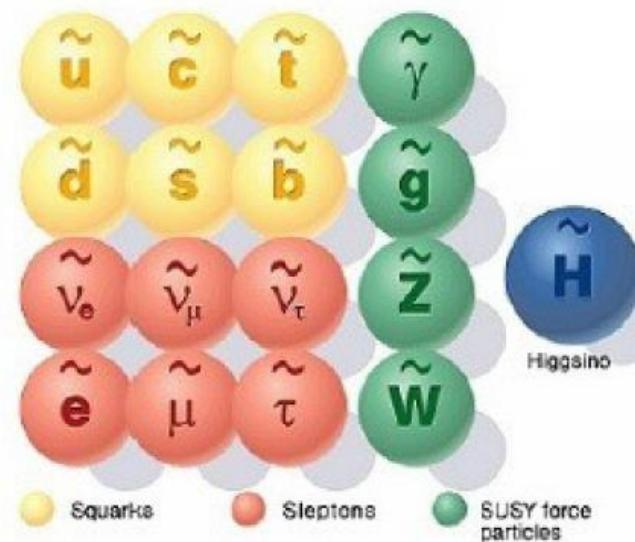
$$\Delta m_{H(b)}^2 = \frac{\lambda_S}{16\pi^2} [\Lambda_{\text{UV}}^2 - 2m_S^2 \ln(\Lambda_{\text{UV}}/m_S) + \dots]$$

Martin, arXiv:9709356

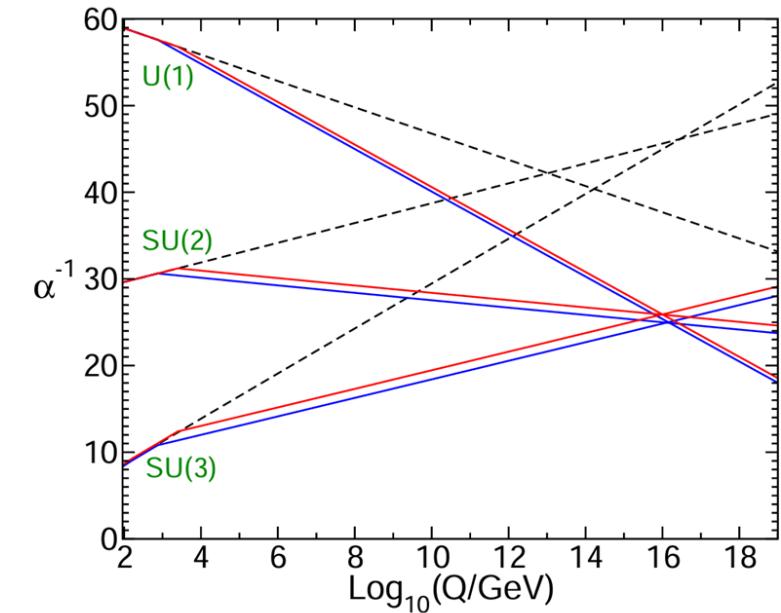
## SUPERSYMMETRY



Standard particles



SUSY particles



$$V^{\text{SUSY}} = V_F + V_D + V_{\text{soft}},$$

$$V_F = F^{*i} F_i, \quad F^{*i} = -W^i = -\frac{\delta W}{\delta \hat{\Phi}_i},$$

$$W = \mu \hat{H}_u \cdot \hat{H}_d + Y_u \hat{Q} \cdot \hat{H}_u \hat{U} - Y_d \hat{Q} \cdot \hat{H}_d \hat{D} - Y_e \hat{L} \cdot \hat{H}_d \hat{E},$$

$$V_D = \frac{G^2}{8} (|H_d|^2 - |H_u|^2)^2 + \frac{g_2^2}{2} (|H_d|^2 |H_u|^2 - |H_u \cdot H_d|^2),$$

$$\begin{aligned} V_{\text{soft}} = & -\frac{1}{2} \left( \mathbf{M_3}^2 \tilde{g} \tilde{g} + \mathbf{M_2}^2 \tilde{W} \tilde{W} + \mathbf{M_1}^2 \tilde{B} \tilde{B} + h.c. \right) \\ & - \left( \tilde{\bar{u}} \mathbf{A_u} \tilde{Q} H_u - \tilde{\bar{d}} \mathbf{A_d} \tilde{Q} H_d - \tilde{\bar{e}} \mathbf{A_e} \tilde{L} H_d + h.c. \right) \\ & - \tilde{Q}^\dagger \mathbf{m_Q^2} \tilde{Q} - \tilde{L}^\dagger \mathbf{m_L^2} \tilde{L} - \tilde{\bar{u}} \mathbf{m_{\bar{u}}^2} \tilde{\bar{u}}^\dagger - \tilde{\bar{d}} \mathbf{m_{\bar{d}}^2} \tilde{\bar{d}}^\dagger - \tilde{\bar{e}} \mathbf{m_{\bar{e}}^2} \tilde{\bar{e}}^\dagger \\ & - \mathbf{m_{H_u}^2} H_u^* H_u - \mathbf{m_{H_d}^2} H_d^* H_d - (\mathbf{B_\mu} H_u H_d + h.c.). \end{aligned}$$

## MSSM

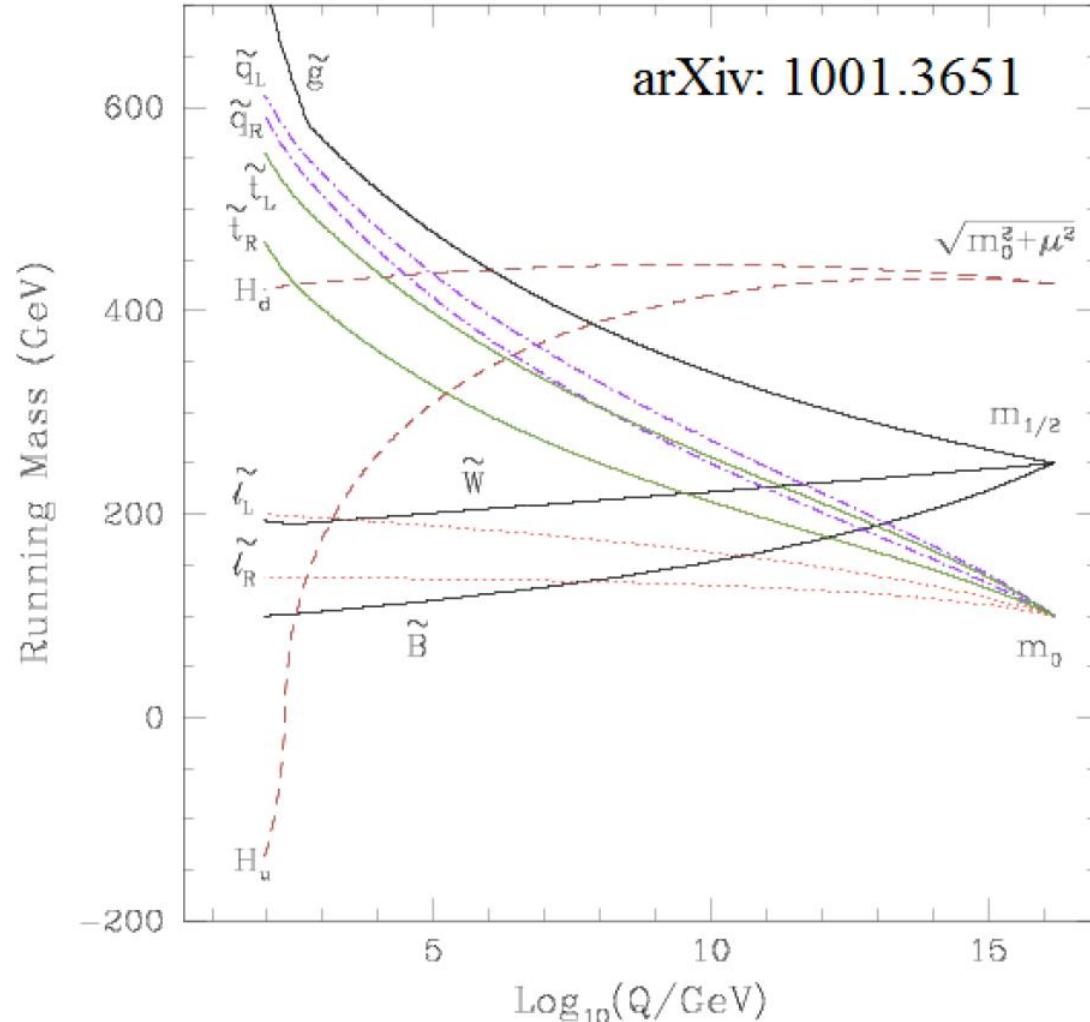
Names	Spin	$P_R$	Gauge Eigenstates	Mass Eigenstates
Higgs bosons	0	+1	$H_u^0 \ H_d^0 \ H_u^+ \ H_d^-$	$h^0 \ H^0 \ A^0 \ H^\pm$
squarks	0	-1	$\tilde{u}_L \ \tilde{u}_R \ \tilde{d}_L \ \tilde{d}_R$ $\tilde{s}_L \ \tilde{s}_R \ \tilde{c}_L \ \tilde{c}_R$ $\tilde{t}_L \ \tilde{t}_R \ \tilde{b}_L \ \tilde{b}_R$	(same) (same) $\tilde{t}_1 \ \tilde{t}_2 \ \tilde{b}_1 \ \tilde{b}_2$
sleptons	0	-1	$\tilde{e}_L \ \tilde{e}_R \ \tilde{\nu}_e$ $\tilde{\mu}_L \ \tilde{\mu}_R \ \tilde{\nu}_\mu$ $\tilde{\tau}_L \ \tilde{\tau}_R \ \tilde{\nu}_\tau$	(same) (same) $\tilde{\tau}_1 \ \tilde{\tau}_2 \ \tilde{\nu}_\tau$
neutralinos	1/2	-1	$\tilde{B}^0 \ \tilde{W}^0 \ \tilde{H}_u^0 \ \tilde{H}_d^0$	$\tilde{N}_1 \ \tilde{N}_2 \ \tilde{N}_3 \ \tilde{N}_4$
charginos	1/2	-1	$\tilde{W}^\pm \ \tilde{H}_u^\pm \ \tilde{H}_d^-$	$\tilde{C}_1^\pm \ \tilde{C}_2^\pm$
gluino	1/2	-1	$\tilde{g}$	(same)
goldstino (gravitino)	1/2 (3/2)	-1	$\tilde{G}$	(same)

# CMSSM/mSUGRA——最简单的超对称大统一模型

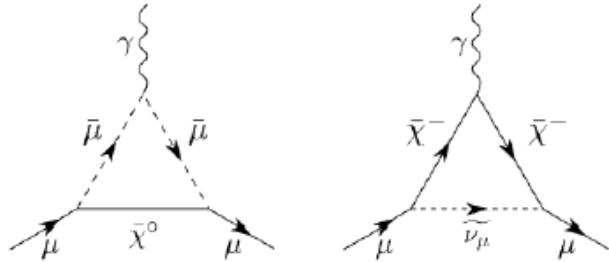


$$\text{Sign}(\mu), \quad \tan \beta = \frac{v_u}{v_d},$$

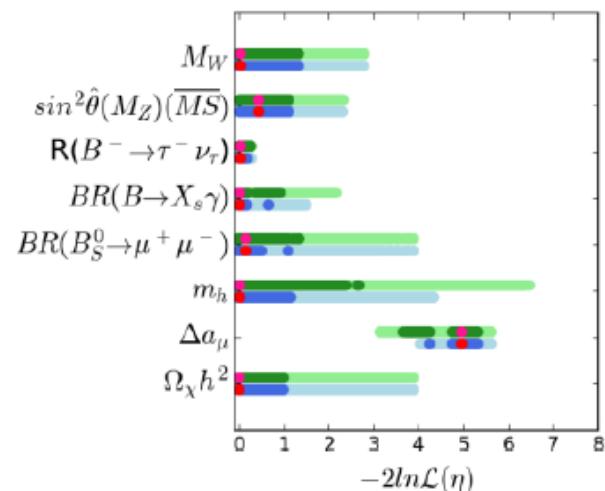
At  $M_{\text{GUT}}$  scale:  $M_{1,2,3} = M_{1/2}, \quad M_{\tilde{q}, \tilde{\ell}, H} = M_0, \quad A_{q, \ell} = A_0$



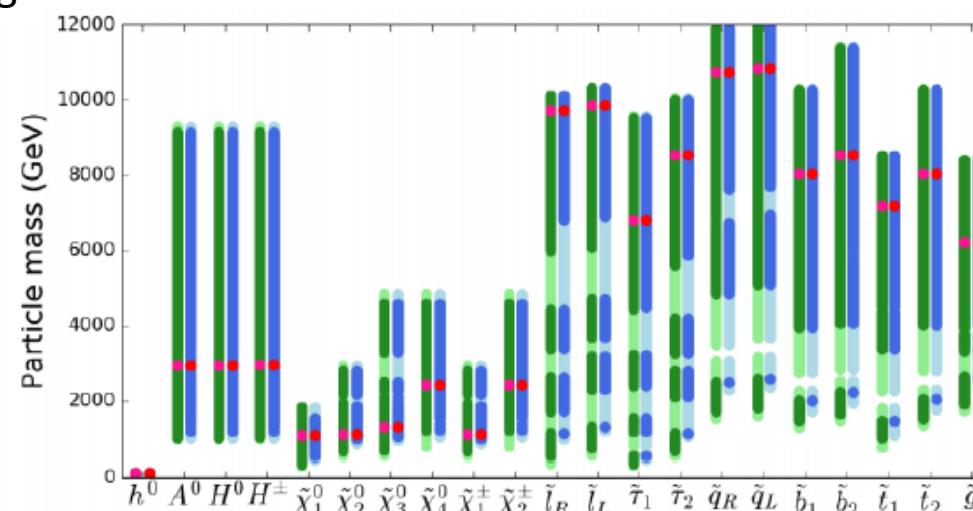
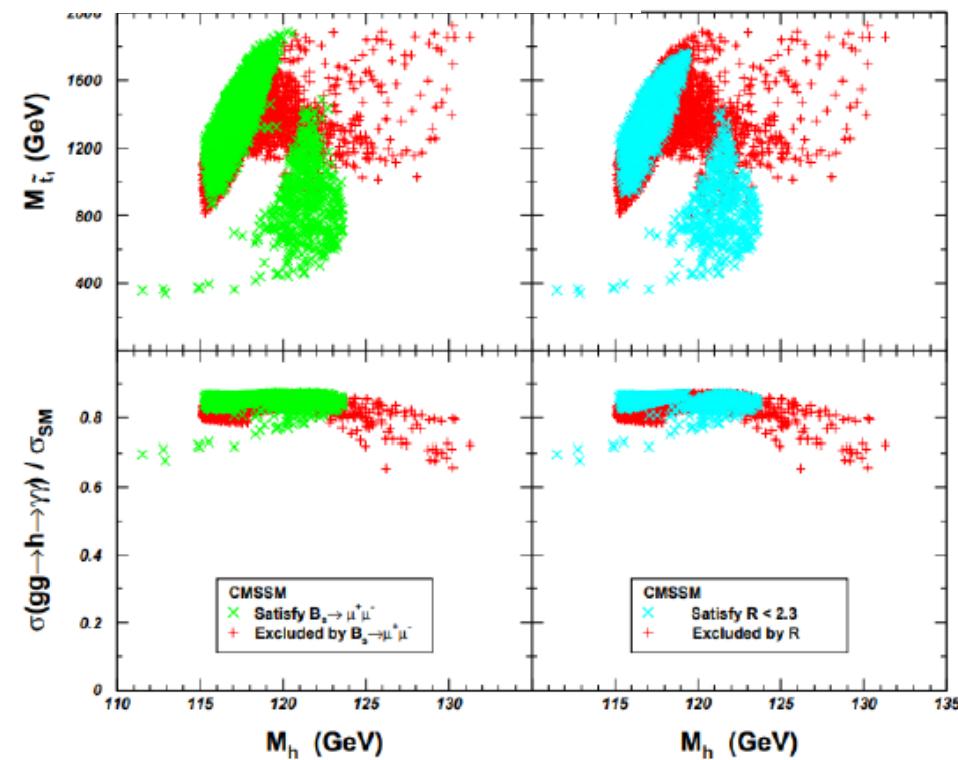
- 125 GeV SM-like Higgs mass
- High mass bound of the gluino  
 $m_{\tilde{g}} \approx 2M_{1/2} \gtrsim 2 \text{ TeV}$
- Dark matter relic density and direct detection  
 $m_{\chi_1^0} \approx 0.4M_{1/2} \gtrsim 400 \text{ GeV}$
- Muon g-2

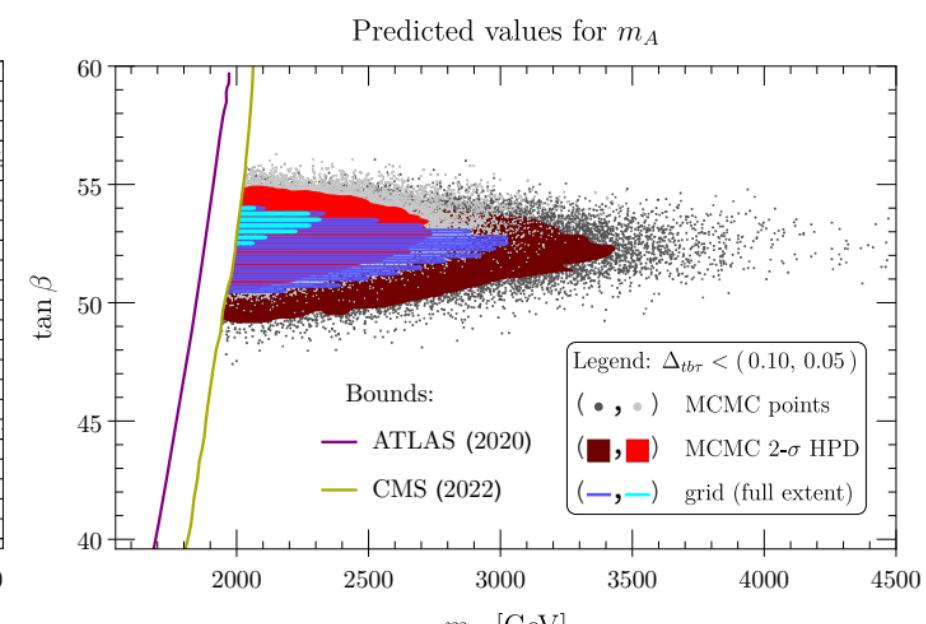
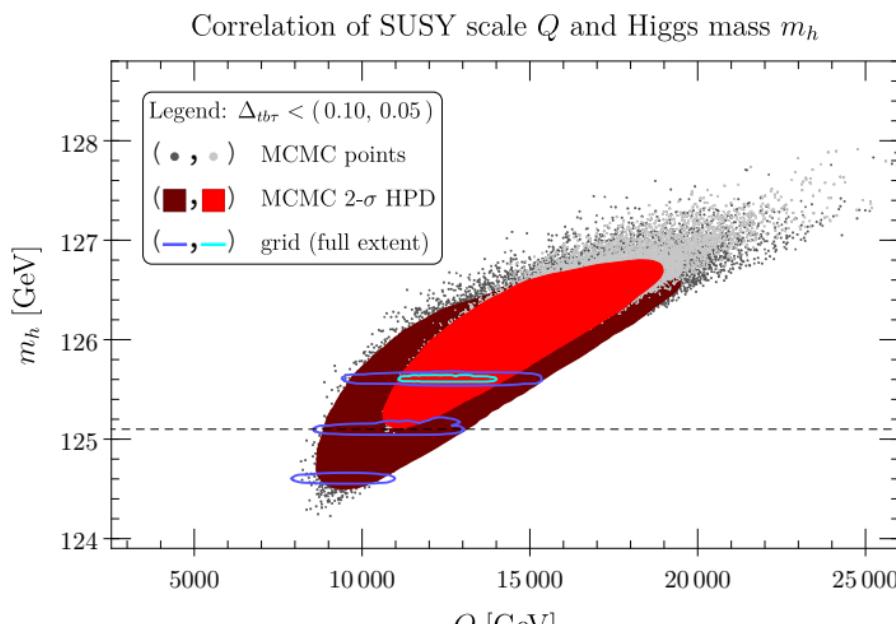
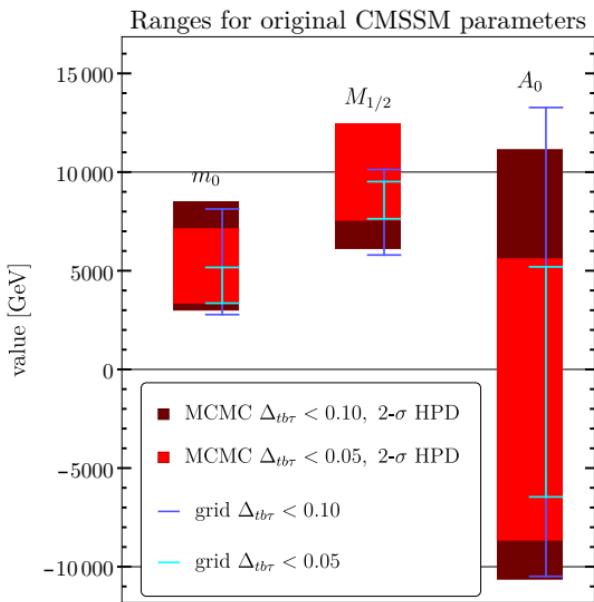


PLB 2017, Han, Hikasa, Wu, Yang, Zhang

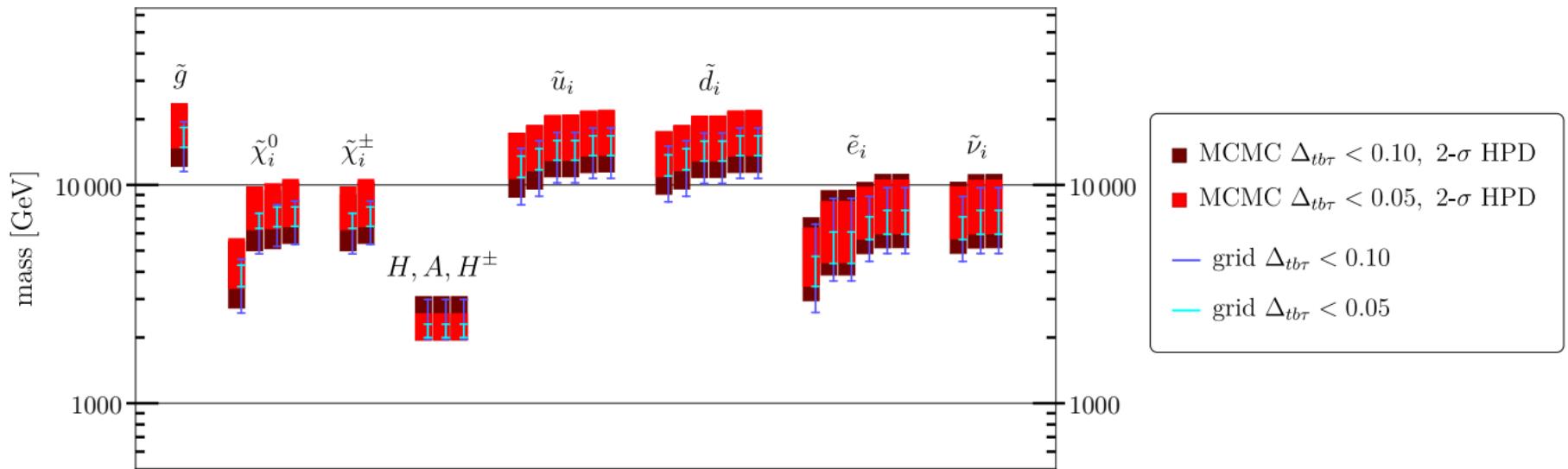


PLB 2012, Cao, Heng, Li, Yang





arXiv:2509.13437,  
Antusch, Saad, Susic



### 3. $\tilde{g}$ SUGRA 超对称大统一模型

JHEP 2018, Wang, Wang, Yang, JZ



In most general case, gaugino masses can be given by the following non-renormalizable superpotential terms

$$W \supseteq \frac{f_a}{4} [W^a W^a + a_1 \frac{T}{\Lambda} W^a W^a + b_1 \frac{1}{\Lambda} W^a \Phi_{ab} W^b + c_1 \frac{T}{\Lambda^2} W^a \Phi_{ab} W^b],$$

with  $\Lambda$  upon GUT scale, chiral superfield  $T$  as a GUT group singlet. After  $\Phi_{ab}$  or  $T$  acquiring an F-term VEVs, soft SUSY breaking gaugino masses will be predicted.

In  $SU(5)$  GUT, chiral superfield  $\Phi_{ab}$  can lie in any representations of

$$(\mathbf{24} \otimes \mathbf{24})_{\text{symm}} = \mathbf{1} \oplus \mathbf{24} \oplus \mathbf{75} \oplus \mathbf{200}.$$

We can consider the most general combination involving the **24**, **75** and **200** representations of Higgs fields of  $SU(5)$  GUT group and the gauge singlet  $T$

$$\mathcal{L} = \int d^2\theta \left( \frac{f_a}{4} W^a W^b \right) \frac{1}{\Lambda} \left[ c_0 T \delta_{ab} + c_1 (H_{\mathbf{24}})_{ab} + c_2 (H_{\mathbf{75}})_{ab} + c_3 (H_{\mathbf{200}})_{ab} \right]$$

The VEVs of the Higgs field  $\Phi_{24}$  can be expressed as a  $5 \times 5$  matrix

$$\langle \Phi_{24} \rangle = v_U \sqrt{\frac{3}{5}} \text{diag} \left( -\frac{1}{3}, -\frac{1}{3}, -\frac{1}{3}, \frac{1}{2}, \frac{1}{2} \right),$$

while the VEVs of the Higgs field  $\Phi_{75}$  can be expressed as a  $10 \times 10$  matrix

$$\langle \Phi_{75} \rangle = \frac{v_U}{2\sqrt{3}} \text{diag} \left( \underbrace{1, \dots, 1}_3, \underbrace{-1, \dots, -1}_6, 3 \right).$$

Similarly, the VEVs of the Higgs field  $\Phi_{200}$  can be expressed as a  $15 \times 15$  matrix

$$\langle \Phi_{200} \rangle = \frac{v_U}{2\sqrt{3}} \text{diag} \left( \underbrace{1, \dots, 1}_6, \underbrace{-2, \dots, -2}_6, \underbrace{2, \dots, 2}_3 \right).$$

As  $T_0$  is a GUT group singlet, the VEV  $T_0$  can be of order  $\Lambda$  without spoiling GUT. The kinetic term after substituting the lowest component VEV will take the form

$$W \supseteq \frac{f_a}{4} W^a W^b \left[ (1 + a_1 \frac{T}{\Lambda}) \delta_{ab} + \sum_r c_i \frac{v_U}{\Lambda} \langle M_{ab}^r \rangle \right].$$

As  $v_U \ll \Lambda$  and  $T_0 \simeq \Lambda$ , the term proportional to  $\delta_{ab}$  will be the leading normalization factor.

Gaugino mass ratios  $M_1 : M_2 : M_3$  in different SU(5) representations:

Representations	GUT scale	EW scale
<b>1</b>	1 : 1 : 1	1 : 2 : 6
<b>24</b>	$1 : \frac{1}{3} : -\frac{1}{2}$	3 : 2 : -9
<b>75</b>	$-\frac{1}{5} : \frac{1}{3} : 1$	-3 : 10 : 90
<b>200</b>	$\frac{1}{10} : \frac{1}{2} : 1$	1 : 10 : 60

arbitrary gaugino ratio at the GUT scale can be obtained with

$$M_1 : M_2 : M_3 = \left[ c_0 - \frac{c_1}{4\sqrt{15}} + \frac{5c_2}{4\sqrt{3}} + \frac{5c_3}{2\sqrt{3}} \right] : \left[ c_0 - \frac{3c_1}{4\sqrt{15}} - \frac{3c_2}{4\sqrt{3}} + \frac{c_3}{2\sqrt{3}} \right] : \left[ c_0 + \frac{c_1}{2\sqrt{15}} - \frac{c_2}{4\sqrt{3}} + \frac{c_3}{4\sqrt{3}} \right]$$

**NUGM** : tan  $\beta$ ,  $A_0$ ,  $M_0$ ,  $M_1$ ,  $M_2$ ,  $M_3$

**$\tilde{g}$ SUGRA**:  $M_3 \gg M_1, M_2$

$$p_{j,k}^{\text{GUT}} = A_0, M_0, M_1, M_2, M_3$$

For the linear-correlation parameters

$$p_i^{\text{SUSY}} = A_t, A_\tau, A_\mu, M_1^{\text{SUSY}}, M_2^{\text{SUSY}}, M_3^{\text{SUSY}}$$

we calculate the coefficients by

$$C_{ij} = \frac{\Delta p_i^{\text{SUSY}}}{\Delta p_j^{\text{GUT}}}$$

For the quadratic-correlation parameters

$$p_i^{\text{SUSY}} = \mu^2, M_{H_u}^2, M_{H_d}^2, M_{Q_3}^2, M_{U_3}^2, M_{L_3}^2, M_{E_3}^2, M_{L_2}^2, M_{E_2}^2$$

we calculate the coefficients by

$$C_{ijk(k \geq j)} = \frac{n \Delta p_i^{\text{SUSY}}}{\Delta p_j^{\text{GUT}} \Delta p_k^{\text{GUT}}} \quad (n = 2 \text{ for } k = j, n = 1 \text{ for } k > j)$$

# $\tilde{g}$ SUGRA: parameters and constraints



## The NUGM scenario

6 free parameters

$$M_1, M_2, M_3, M_0, A_0, \tan\beta, \text{sign}(\mu)$$

Predict heavy gluino and squark to escape constraints

Give light wino bino to satisfy other observed results

$$M_3 \gg M_1, M_2$$

$\tilde{g}$ SUGRA

$$\begin{aligned} \text{sign}(\mu) &= +1 \\ |A_0|, |M_3| &< 10 \text{ TeV} \\ 1 < \tan\beta < 50 \\ 0 < M_0 < 1 \text{ TeV} \\ |M_1|, |M_2| &< 1 \text{ TeV} \end{aligned}$$

Parameter select

JHEP 2025, Dong, Wang, Yuan, **JZ**, Zhu

## Constraints

- The constraints of **SM-like Higgs mass**:  $m_H = 125 \pm 2 \text{ GeV}$ .
- The constraints on the **squark, gluino, slepton, and chargino masses**:

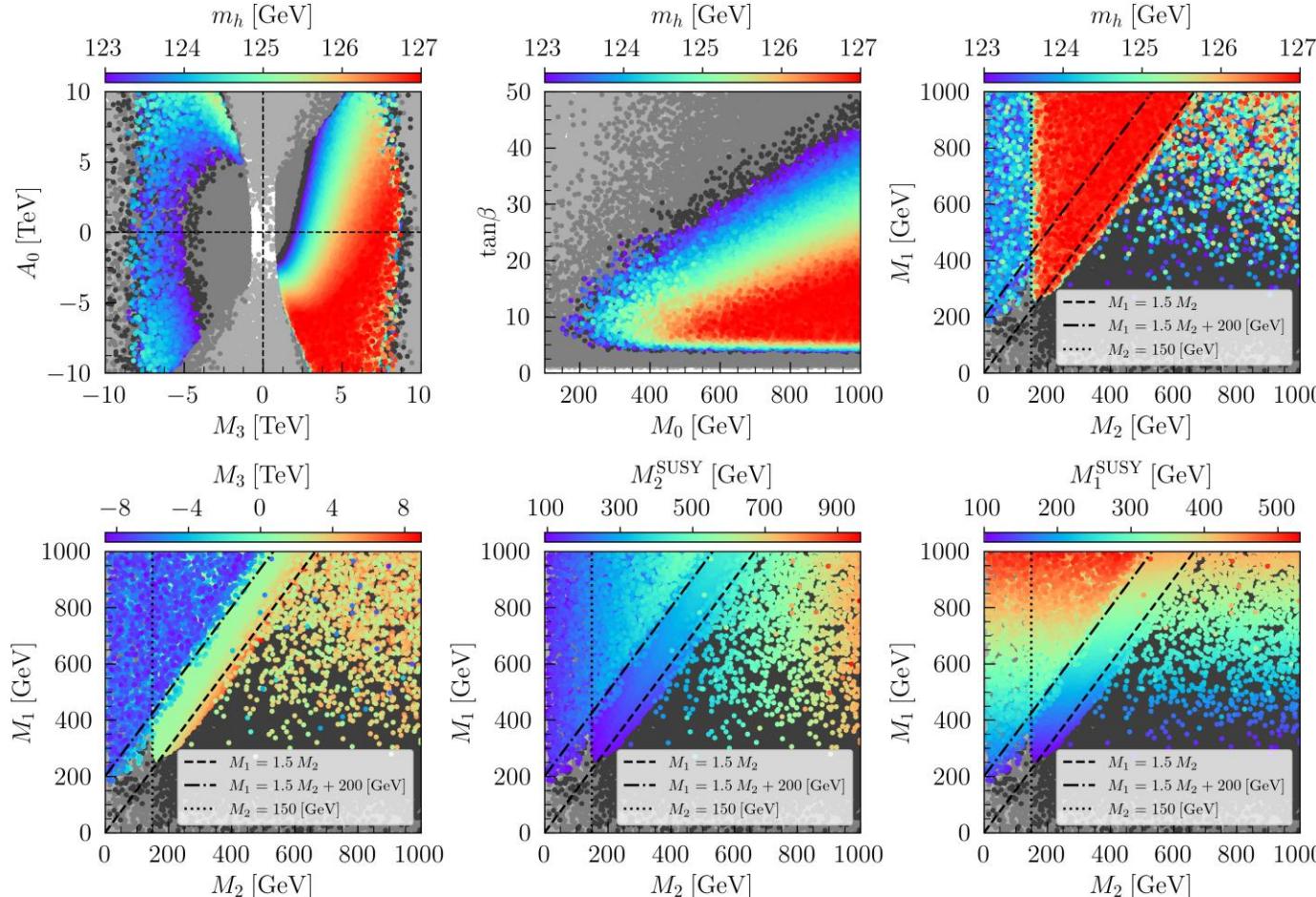
$$\begin{aligned} m_{\tilde{q}_{1,2}}, m_{\tilde{g}} &> 2 \text{ TeV}, \quad m_{\tilde{t}} > 0.7 \text{ TeV}, \\ m_{\tilde{\tau}} > 93.2 \text{ GeV}, \quad m_{\tilde{\chi}^\pm} > 103.5 \text{ GeV}. \end{aligned}$$

- The constraints from **direct searches for Higgs and signal compatibility** of SM-like Higgs.
- The constraints from **dark matter relic density** and **direct search results for dark matter**:  $0 < \Omega h^2 < 0.12$ .
- The constraints from **B physics**:

$$\begin{aligned} \text{Br}(B \rightarrow s\gamma) &= (3.49 \pm 0.38) \times 10^{-4}, \\ \text{Br}(B^+ \rightarrow \tau^+ \nu) &= (1.09 \pm 0.48) \times 10^{-4}, \\ \text{Br}(B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-) &= (3.01 \pm 0.87) \times 10^{-9}. \end{aligned}$$

# Results and discussion

## Sample surviving conditions



Surviving samples in the  $A_0$  versus  $M_3$  plane (upper left), the  $\tan\beta$  versus  $M_0$  plane (upper middle), and the  $M_1$  versus  $M_2$  plane (upper right and lower three).

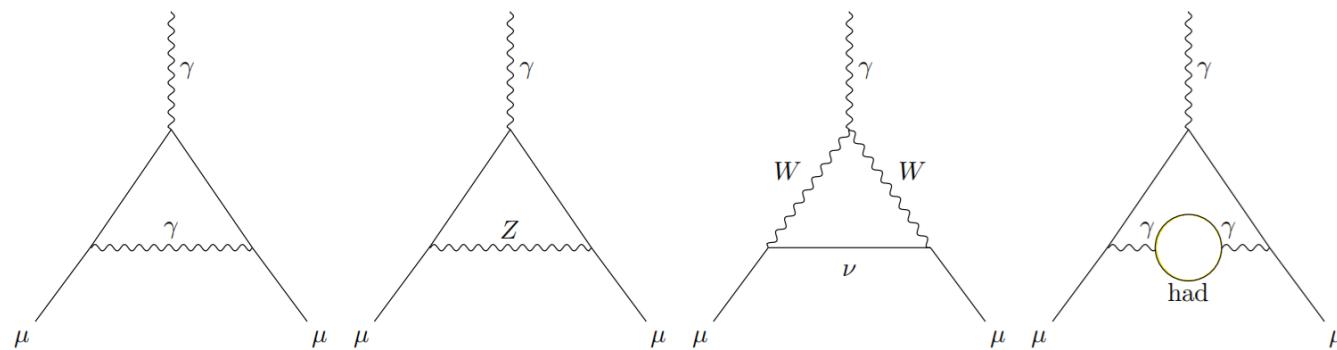
- Excluded by Higgs mass data
- Excluded by direct search Higgs data
- Excluded by dark matter relic density

1. Negative  $M_3$  tend to give lighter Higgs, positive tend to heavier one.
2. **Higgs data require  $\tan\beta \geq 5$  and  $M_0 \geq 20 \tan\beta$  GeV.**
3. Dark matter relic density has strong constraint on the samples with  $M_1 \leq 1.5M_2$ .
4. Negative  $M_3$  can only survive when  $M_1 \geq 1.5 M_2 + 200$  GeV.
5. **Negative  $M_3$  can give additional contribution to  $M_1$  or  $M_2$  at SUSY scale.**

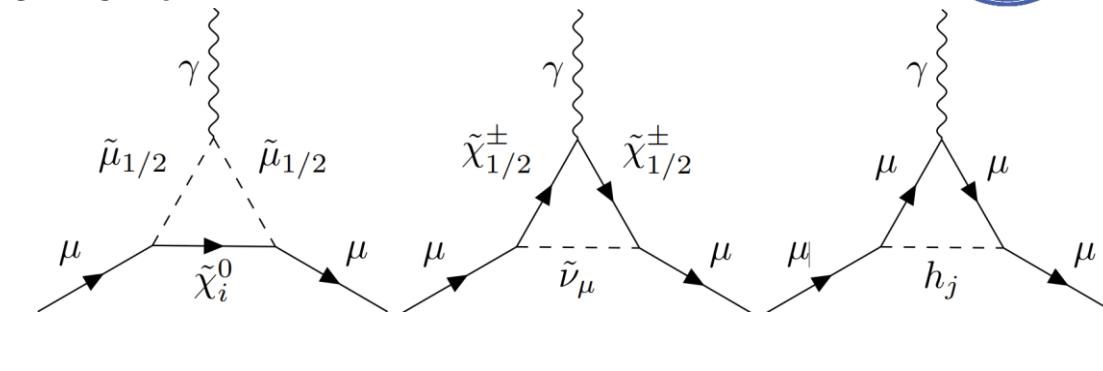
# Results and discussion



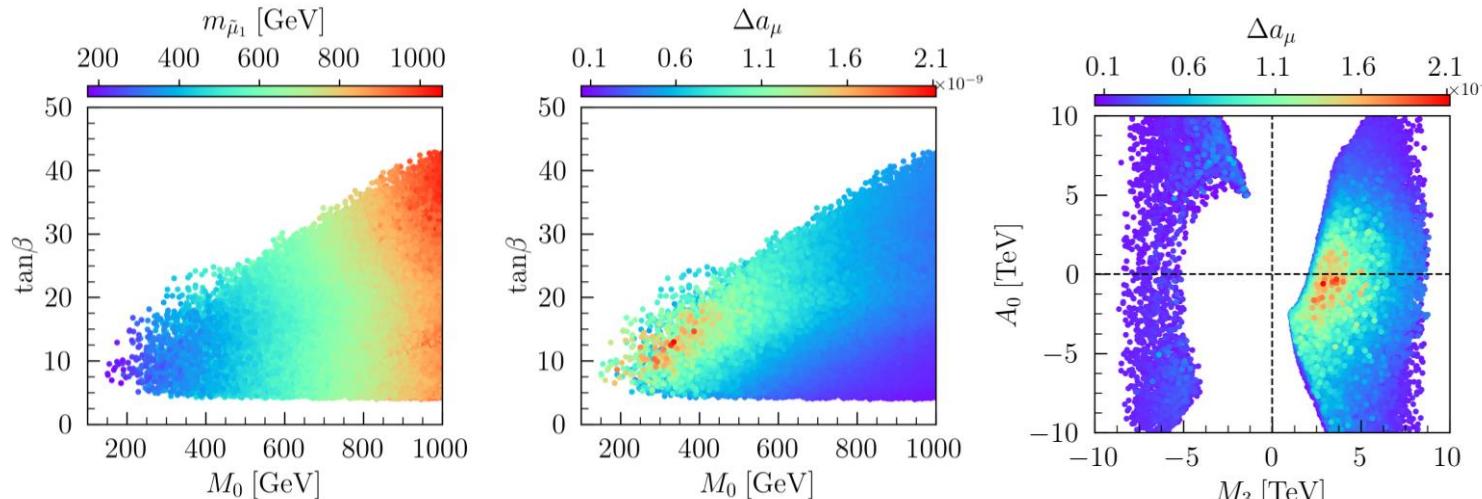
## The discussion on muon anomalous magnetic moment



The Feynman diagrams of SM contribution to  $a_\mu$ .



The Feynman diagrams of SUSY contribution to  $a_\mu$ .



Surviving samples in the  $\tan\beta$  versus  $M_0$  plane (left and middle) and the  $A_0$  versus  $M_3$  plane (right).

$$a_\mu^{\tilde{\mu}} = a_0 \frac{1 + \delta^{\text{2loop}}}{1 + \Delta_\mu} \left( \frac{\tan\beta \cdot (100 \text{ GeV})^2}{m_{\tilde{\mu}_L}^2 m_{\tilde{\mu}_R}^2 / (M_1 \mu)} \right) \left( \frac{f_N}{1/6} \right)$$

The contribution of smuon to  $a_\mu$

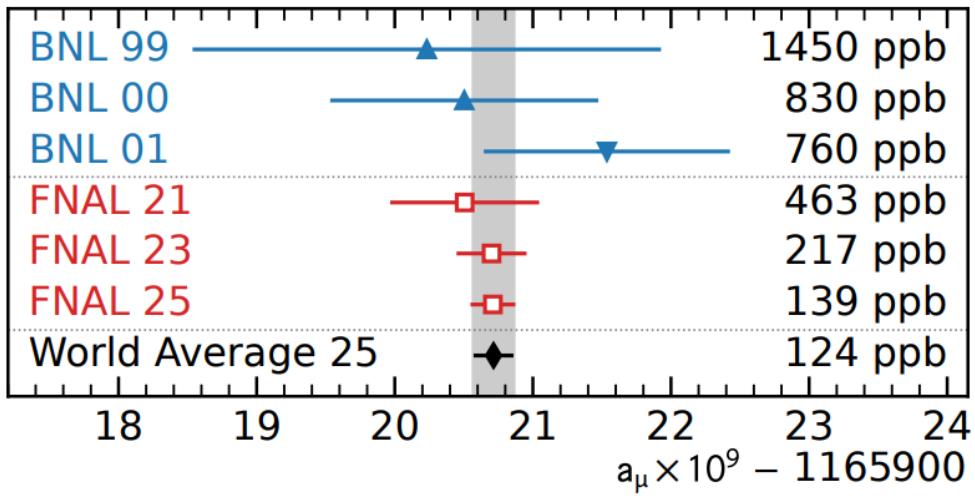
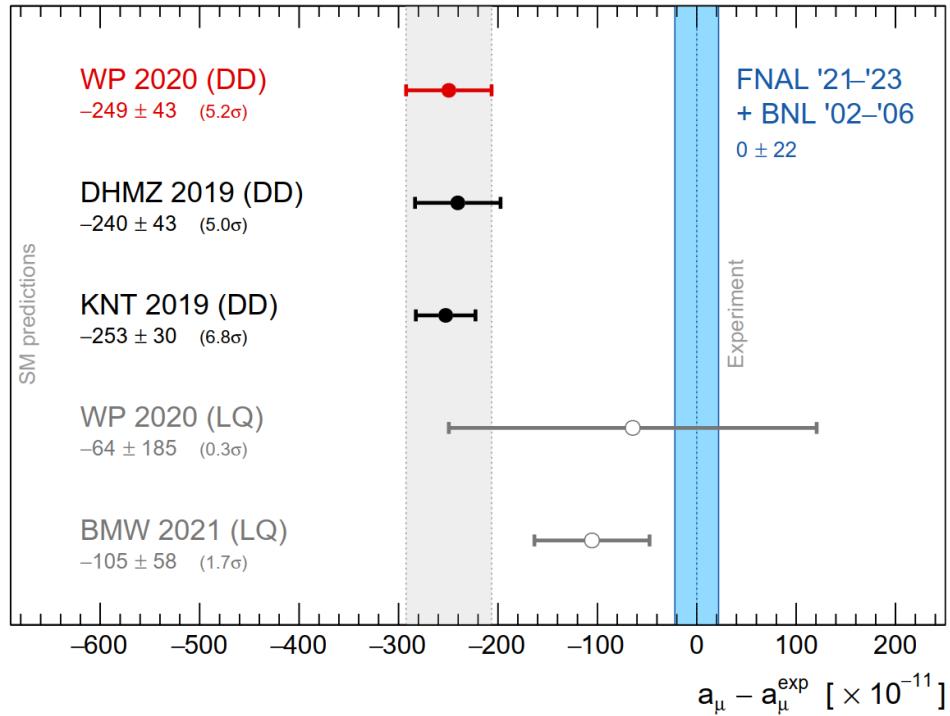
$$M_0 \sim 250 \text{ GeV}$$

$$|A_0| \leq 1 \text{ TeV}$$

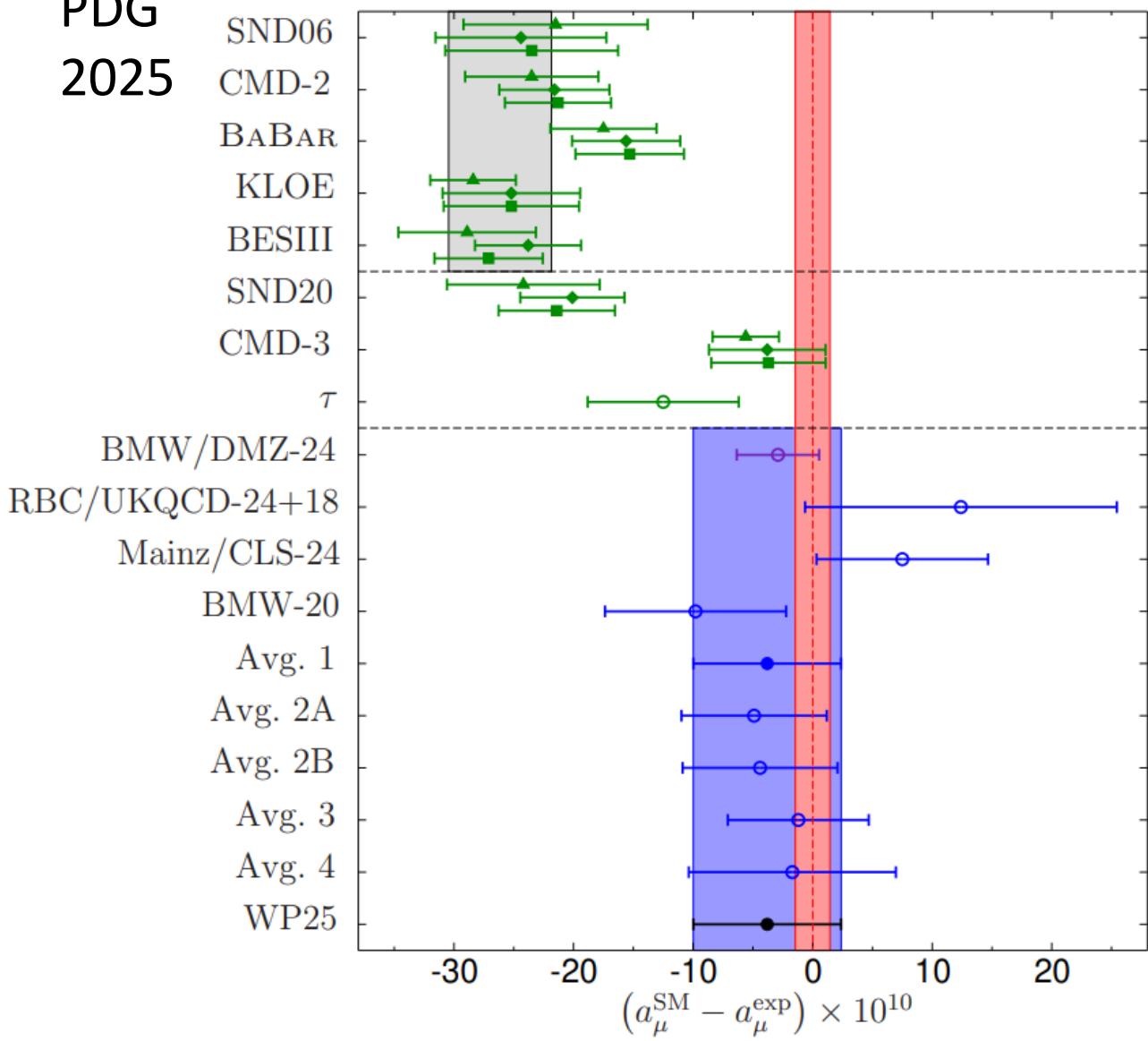
$$M_3 \sim 4 \text{ TeV}$$

$$2.1 \times 10^{-9}$$

PDG  
2024

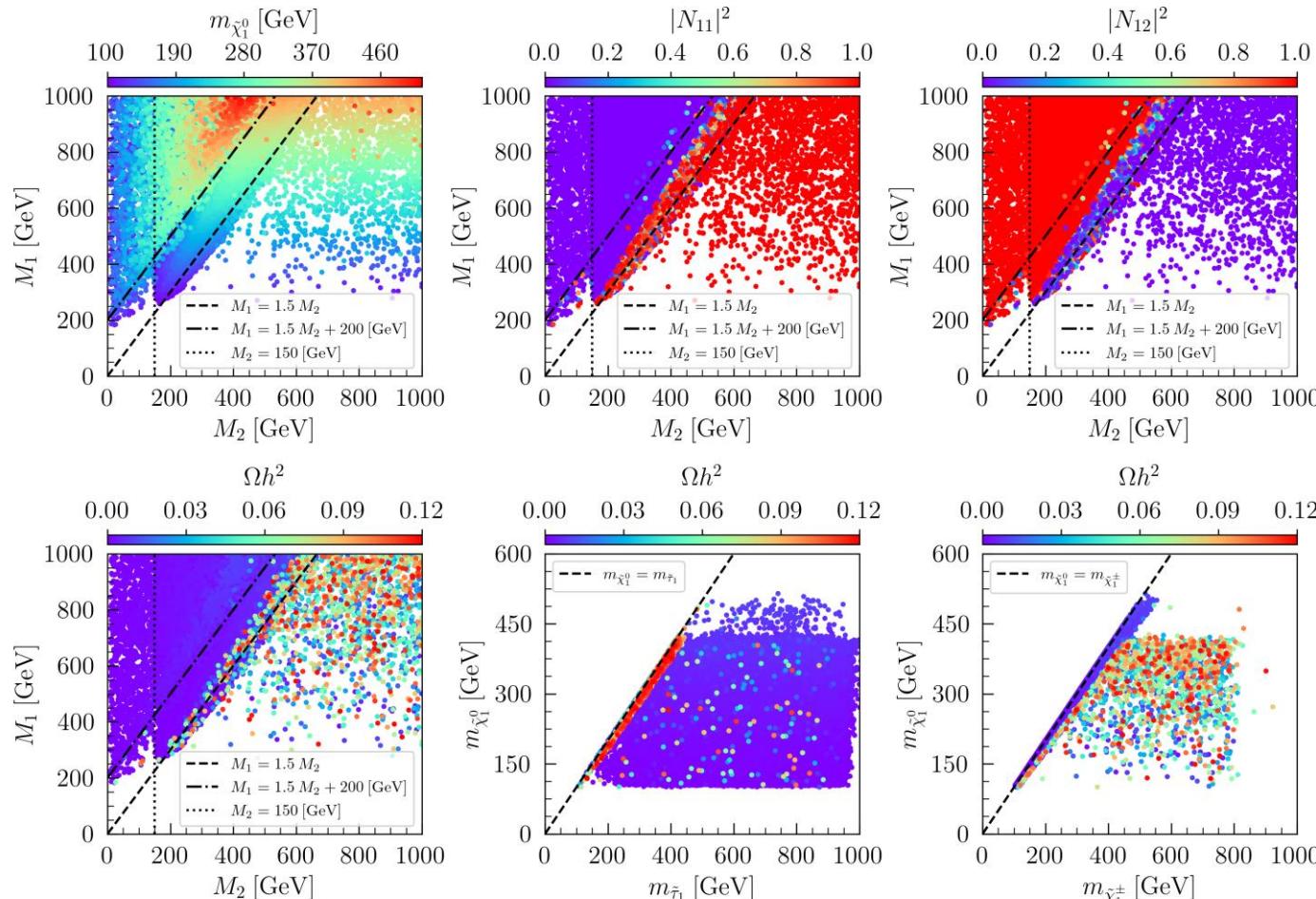


PDG  
2025



# Results and discussion

## The discussion on dark matter



Surviving samples in the  $M_1$  versus  $M_2$  planes (upper and lower left), the  $m_{\tilde{\chi}_1^0}$  versus  $m_{\tilde{\tau}_1}$  plane (lower middle), and the  $m_{\tilde{\chi}_1^0}$  versus  $m_{\tilde{\chi}_1^\pm}$  plane (lower right).

Samples can be divided into

- **Class A:**  $M_3 > 0, M_1 \geq 1.5M_2$
  - **Class B:**  $M_3 > 0, M_1 \leq 1.5M_2$
  - **Class C:**  $M_3 < 0, M_1 \geq 1.5M_2 + 200$  GeV
1. Samples are wino-like in **Class A** and **Class C**, bion-like in **Class B**, and wino-bino mixing when  $M_1/M_2 \approx 1.5$ .
  2. Only bion-like and bino-wino mixing samples can give sizeable dark matter relic density.
  3. The mass of  $\tilde{\chi}_1^0$  and  $\tilde{\tau}_1$  are degenerate for the samples in **Class B**.

# Results and discussion

## The discussion on dark matter

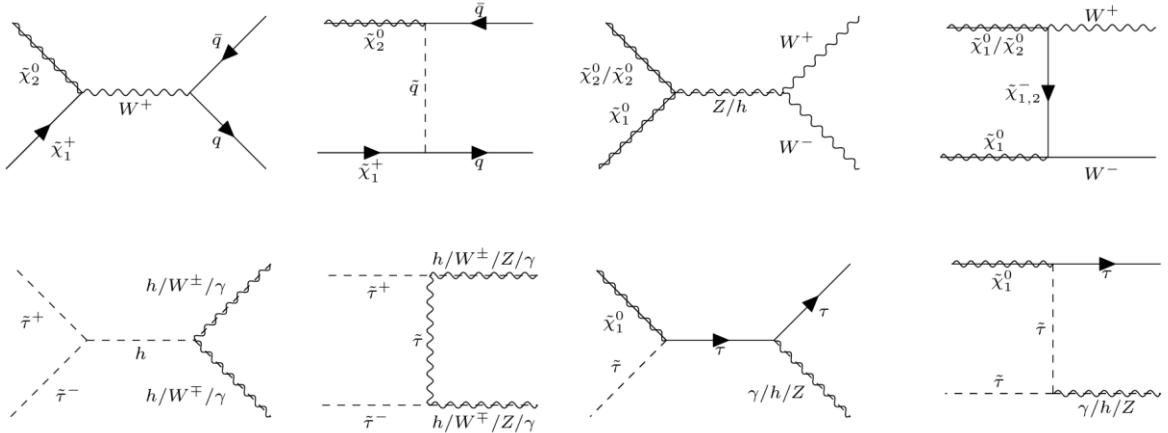
$\tilde{\tau}\tilde{\chi}_1^0$  coannihilation:  $\frac{m_{\tilde{\tau}_1}}{m_{\tilde{\chi}_1^0}} < 1.1$

$\tilde{\chi}_1^0\tilde{\chi}_1^\pm$  coannihilation:  $\frac{m_{\tilde{\tau}_1}}{m_{\tilde{\chi}_1^0}} \geq 1.1, \quad 1 < \frac{m_{\tilde{\chi}_1^\pm}}{m_{\tilde{\chi}_1^0}} \leq 1.05$

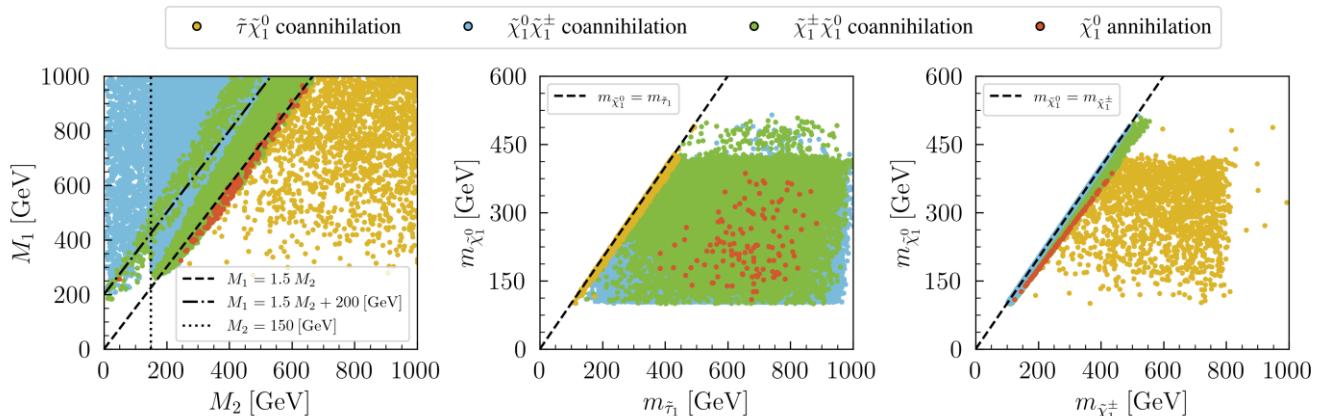
$\tilde{\chi}_1^\pm\tilde{\chi}_1^0$  coannihilation:  $\frac{m_{\tilde{\tau}_1}}{m_{\tilde{\chi}_1^0}} \geq 1.1, \quad 1.05 < \frac{m_{\tilde{\chi}_1^\pm}}{m_{\tilde{\chi}_1^0}} \leq 1.1$

$\tilde{\chi}_1^0$  annihilation:  $\frac{m_{\tilde{\tau}_1}}{m_{\tilde{\chi}_1^0}} \geq 1.1, \quad \frac{m_{\tilde{\chi}_1^\pm}}{m_{\tilde{\chi}_1^0}} \approx 1.1$

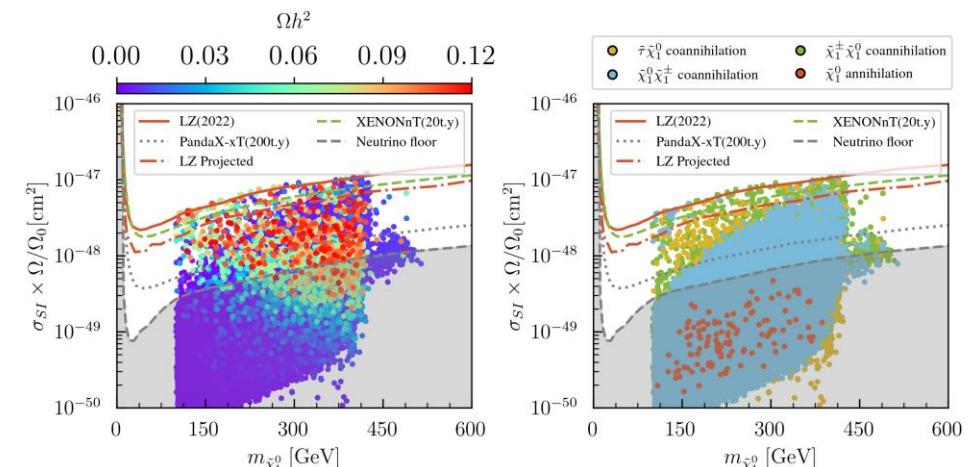
Main Feynman diagrams illustrating  $\tilde{\chi}_1^\pm$  coannihilation (upper) and  $\tilde{\tau}, \tilde{\chi}_1^0$  hybrid annihilation (lower).



### Main annihilation mechanism



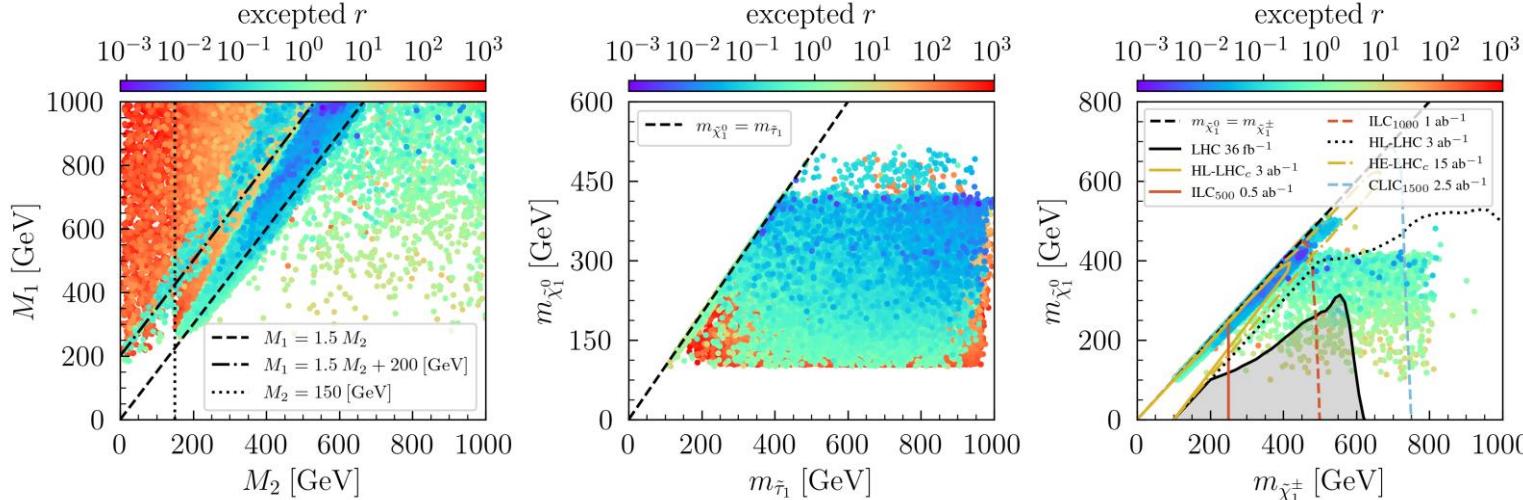
Surviving samples in the  $M_1$  versus  $M_2$  planes (left), the  $m_{\tilde{\chi}_1^0}$  versus  $m_{\tilde{\tau}_1}$  plane (middle), and the  $m_{\tilde{\chi}_1^0}$  versus  $m_{\tilde{\chi}_1^\pm}$  plane (right).



Surviving samples in the rescaled spin independence (SI) DM-nucleon cross-section  $\sigma_{SI}$  (rescaled by  $\Omega/\Omega_0$ ) versus  $m_{\tilde{\chi}_1^0}$  planes.

# Results and discussion

## The discussion on collider physics



Surviving samples in the  $M_1$  versus  $M_2$  planes (left), the  $m_{\tilde{\chi}_1^0}$  versus  $m_{\tilde{\tau}_1}$  plane (middle), and the  $m_{\tilde{\chi}_1^0}$  versus  $m_{\tilde{\chi}_1^\pm}$  plane (right).

$$r = \frac{\sum_{\text{elements}} (\sigma \times \text{Br} \times \varepsilon)}{\text{upper limit}}$$

$r > 1(1.2)$  is considered excluded by experimental results without (with) consider 20% calculation error.

1. Direct search SUSY particles experimental results have **strong constraint on the samples with  $M_1 \geq 1.5M_2$**  expect  $M_1 \approx 1.5M_2$  or  $M_1 \approx 1.5M_2 + 200$  GeV.
2. Direct search SUSY particles experimental results have **strong constraint on lighter  $m_{\tilde{\chi}_1^0}$  and  $m_{\tilde{\tau}_1}$** .
3. When the integral luminosity of the **HL-LHC** reaches  $3 \text{ ab}^{-1}$  and **CLIC}\_{1500} achieves  $2.5 \text{ ab}^{-1}$ , all samples can be fully covered by collider experiments.**



## 4. 相关教学研究

### 立德树人：教育的根本任务

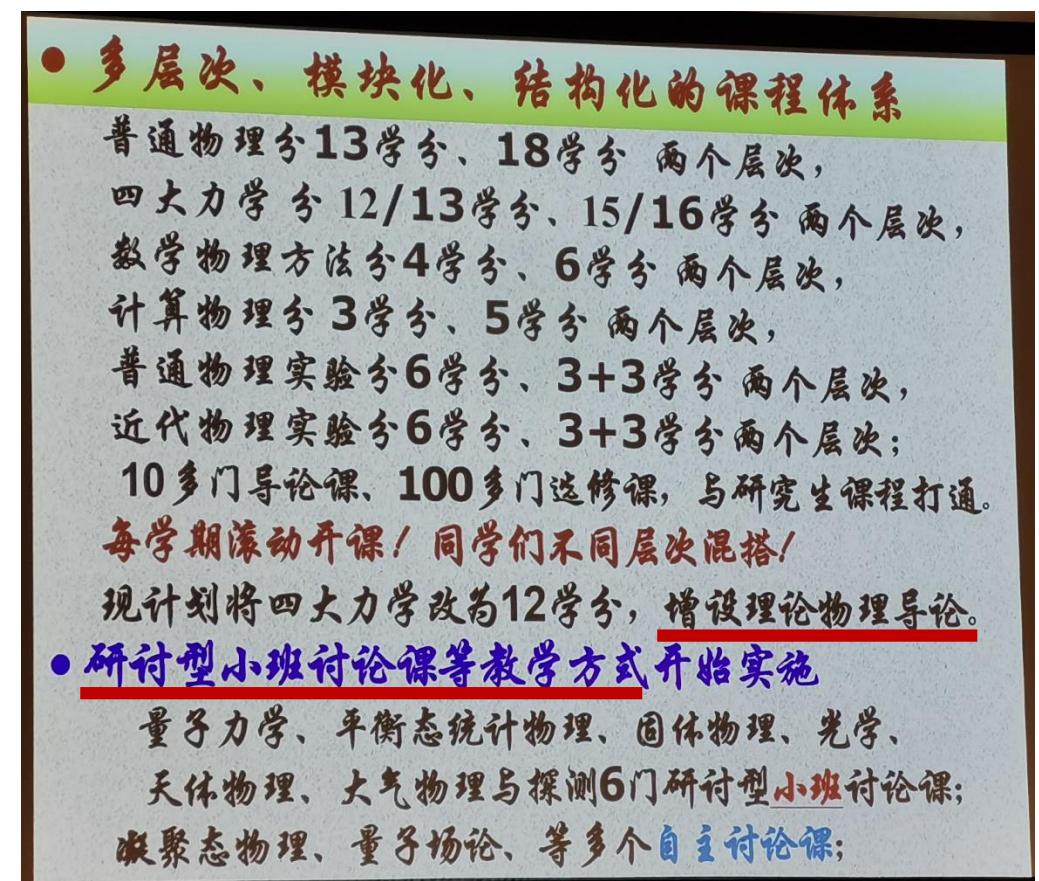
- ◆ 基础研究人才：名校直博/硕博连读→.....
- ◆ 基础教育人才：
  - 优秀科学教师
  - 物理竞赛教练
  - 国际物理教师
  - 国优计划（国家优秀中小学教师培养计划）
- ◆ 应用研究人才：高端仪器国产化、.....
- ◆ .....

# 4.1 培养基础研究人才

- 教研项目: 以理论力学课程为基础的理论物理拔尖创新人才培养研究
- 相关课程: 《物理学专题讲座(现代物理导论)》、《宇宙学》、《高等量子力学导论(“量子/相对论+X”)现代物理研讨班》



From 刘玉斌教授: 理论力学课程群建设的思考



From 刘玉鑫教授: 北京大学研教融汇, 培育引领未来的人



教育部物理学类专业教学指导委员会

2024 年理论力学研究会课题立项通知

# 高等学校理论力学课程 教学研究项目立项申请书

项目名称 以理论力学课程为基础的理论物理  
拔尖创新人才培养研究

项目负责人 朱经亚

项目承担学校 河南大学

联系地址 河南省开封市河南大学金明校区

申报日期 2024 年 7 月 31 日

预计验收日期 2026 年 8 月 20 日

朱经亚老师，您好：

您于 2024 年申报的理论力学课程教学研究项目“以理论力学课程为基础的理论物理拔尖创新人才培养研究”经过答辩、专家讨论后已经立项，课题编号是 JZW-24-LLLX-07。请按照课题申报书和高等学校理论力学研究会要求认真执行课题，并及时提交中期报告和课题结题报告。

研究会感谢您的支持！

理事长：朱经亚

教育部高等学校物理学类专业教学指导委员会

高等学校理论力学研究会

南开大学物理学院(代章)  
物理科学学院

2024 年 8 月

教育部高等学校物理学类专业教学指导委员会

二〇二四 年制



## ■ 项目研究内容与研究方法：

- ① **深化理论力学与电动力学课程的关联：**探索在电动力学教学中引入分析力学方法，如利用拉格朗日量或哈密顿量来阐述电磁场的动力学特性，从最小作用量原理推导出麦克斯韦方程组的基本形式等，使学生能从更深刻的角度理解电磁场与力学之间的内在联系。
- ② **深化理论力学与热力学与统计物理课程的关联：**建立分析力学与统计物理之间的桥梁，例如探讨如何从理论力学的哈密顿体系出发，推导统计力学中的刘维尔定理等，进一步理解热力学中的宏观物理量与微观粒子运动之间的关系。
- ③ **深化理论力学与量子力学课程的关联：**深化理论力学与量子力学的交叉融合，探索以分析力学为基础，引入量子力学的核心概念，如从经典路径积分到量子路径积分的过渡，甚至从最小作用量原理出发，以经典类比的方式引入薛定谔方程，帮助学生逐步建立起从经典到量子的思维转换。
- ④ **理论力学课程的优化和提升：**结合上述三点的研究成果，深化课内和课间关联，并融入非线性力学、混沌等现代物理元素，丰富课程内容。采用多元化教学方法，如翻转课堂、项目式学习，提升学生参与度。引入程序计算与模拟，辅助解决复杂问题，直观展示力学现象，增强教学效果。
- ⑤ **现代物理导论和现代物理研讨班课程的建设：**结合上述四点研究内容，以理论力学为基础融合四大力学等中高级理论物理课程的重点内容，综述与量子论、相对论等相关的前沿领域，邀请全国理论物理专家开展科学前沿讲座，并每年举办河南大学物理理论与计算竞赛，引导学生夯实理论物理基础，拓展现现代物理视野，逐步完善现代物理导论课程。定期组织现代物理研讨班，建立朋辈导学研讨机制，围绕最新科研成果，组织专题讨论，培养学生科研思维和批判性思维能力。
- ⑥ **中学物理拔尖学生四大力学课程提前教学的研究与实践：**针对中学物理竞赛优异者，提前开设四大力学课程，采用小班化、个性化教学。设计符合其认知水平的课程体系，强化理论物理基础，培养其科研潜力和创新思维。通过实践项目，培养其科研能力。



## ■ 研究目标：

- 以理论力学为基础，有机融合四大力学等中高级理论物理课程，优化教学内容和方法，提升学生的理论物理基础。
- 在理论力学等理论物理课程基础上，结合理论物理科学前沿和相关学术交流活动，培养学生在理论物理科学研究中的原始创新能力。
- 培养一批理论物理功底扎实，有志于基础科学研究或中学物理竞赛教育的拔尖创新人才。

## ■ 研究重点：

- 探索理论力学与其他中高级理论物理课程的有机联系，更好地服务于全国理论物理拔尖人才培养工作。
- 提高河南大学理论物理教学水平，培养理论物理拔尖创新人才，提升河南省在全国中学物理竞赛中的成绩。

# 《物理学专题讲座（现代物理导论）》

每组6-7人，课下分组学习讨论，学习资料见QQ群文件。G1-G10每组课上负责讲3节课，尽可能每位同学都能上台；G0组每名同学课下帮助其他组10名左右或以上的同学安装Ubuntu系统。根据表现给予课堂表现分数，占总成绩2%。

组名	计划汇报日期	任务	组长	成员1	成员2	成员3	成员4	成员5	成员6
G0	10.01-11.02	课外指导，Linux操作系统安装与使用，确保每位同学有Ubuntu系统可用	常奕斐G2	王秋霞G3	何冠磊G4	贺可可G5	杜彤彤G6	张英豪G7	赵凡皓G8
G1	10.26	基础讲解+上机演示，LaTeX高级文本编辑与inspirehep文献检索	王泽涵	黄泓博					
G2	11.02	基础讲解+上机演示，Mathematica 物理计算与绘图	张鑫	王长峰	朱涵月	董孟冉	卢静雯	闻健祺	王银玲
G3	11.09	基础讲解+上机演示，Python 物理计算与绘图 (Ubuntu操作系统下)	夏淑贞	徐佳璐	苏畅雨	乔欣悦	王淑琪	周琳	李雅雯
G4	11.16	基础讲解+上机演示，Fortran 物理计算 (Ubuntu操作系统下)	张中耀	李涛	董恩星	颜佳杰	冯星宙	刘展源	白润杰
G5	11.23	基础讲解+上机演示，C/C++ 物理计算 (Ubuntu操作系统下)	高炳新	汪谦鑫	王仕森	孙宇卓然	任诗雨	王晗	唐文昕
G6	11.30	板书，分析力学与电动力学的关联、电动力学在高能对撞机物理中的应用	王雨迎	王梦格	王鑫	窦晨心	刘义婷	李书灿	曹宇蕊
G7	12.07	板书，分析力学与量子力学的关联、量子力学在强子物理与核物理中的应用	赵豪杰	徐励为	刘曦泽	李民鑫	杨瑞鑫	麻焱翔	杨靖晓
G8	12.14	板书，分析力学与统计力学的关联、统计力学在天体物理中的应用	赵璐瑶	胡豫嘉	齐海丽	袁蕾	刘奕慧	魏安琪	祁生孝
G9	12.21	板书为主，分析力学与量子场论的关联、粒子物理标准模型	林志铭	赵佳乐	刘人豪	王铎	陈晖	孟范箐	张苏铭
G10	12.28	板书为主，分析力学与广义相对论的关联、宇宙学标准模型	程有鑫		冯李闫	杜雨轩	韩得宽	韩凯龙	曹锦奇

# 《物理学专题讲座（现代物理导论）》120人



课程考核方式: 理论基础随堂测试 30%+计算基础随堂测试 30%+结课论文 30%+课堂表现 10%。

## 1. 理论基础随堂测试。

考试时间: 2024.01.07 周日晚上 19:10-21:10。

考试地点: 金明校区综合楼 2-306。

考查内容: 包括理论讲义和老师课堂讲述等相关内容。

计分方式: 成绩最高者计 90+(卷面分数/10), 其他同学按名次递减。

## 2. 计算基础随堂测试。

时间: 2024.01.07 周日晚上 19:10-21:10。

考试地点: 金明校区综合楼 2-306。

考查内容: 包括 Linux 命令、C/C++、Python、Fortran、Mathematica、Matlab、LaTeX 文本编辑、inspirehep 文献检索等计算机语言。考查内容 QQ 群文件中均有相关资料。

计分方式: 成绩最高者计 90+(卷面分数/10), 其他同学按名次递减。

## 3. 结课论文, 考查科学前沿。

从《从夸克到宇宙—理论物理的世界》、《从夸克到宇宙—永无止境的科学探索》、《原子与宇宙》等书刊章节, 以及课堂前沿讲座等内容中任选一主题, 用自己的话写一篇综述性论文, 题目自拟, 不少于 2000 字, 论文模板见 QQ 群文件。2024.01.07 前交电子版和纸质版, 电子版通过 QQ 群作业链接提交 (文件命名方式学号+姓名), 纸质版课堂提交。不允许抄袭及人工智能等代写, 一经查出可以一票否决且不小于 30%。

## 4. 课堂表现。

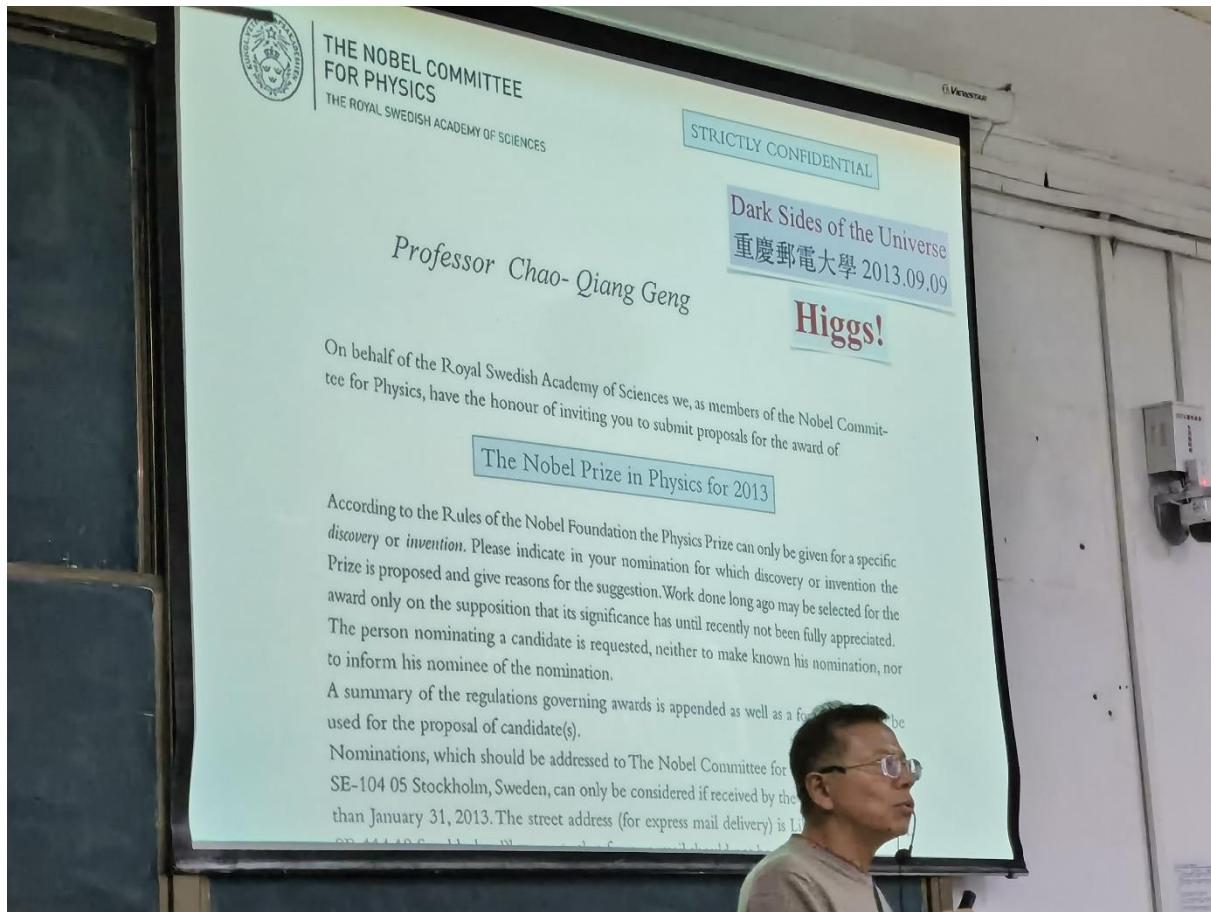
结合喜鹊儿签到、签到定位距离、教务系统照片和课堂拍照, 利用人工智能确定旷课同学姓名, 签到作弊后果比单纯旷课更严重, 可以一票否决且不小于 10%。



随堂测试120人无人缺席，4人监考，保证了公平性、难度和及格率。未来将扩展为“物理理论与计算竞赛”的形式，感兴趣的学生每年都可以参加一次，引导学生逐步夯实理论与计算基础。

2023.11.19 前沿报告：

耿朝强教授，探寻科学之美——从微观极小到宏观极大世界  
 余洪伟教授，黑洞—宇宙之光





中国工程物理研究院研究生院  
GRADUATE SCHOOL OF CAEP

Building 8, East Zone, No. 10 Xibeiwang East Road, Haidian District, Beijing, 100193, China  
北京市海淀区西北旺东路 10 号中关村软件园二期 8 号楼 中物院研究生院软件园北校区  
Tel: 86-10-56989381 Fax: 86-10-56989380 Url: <http://gscaep.ac.cn>

人才培养举例：  
指导本科生科研训练  
大三暑假拿到直博资格

## 推荐免试研究生预录取协议书

根据申请材料和夏令营选拔考核结果,中国工程物理研究院研究生院北京本部(甲方)拟预录取 河南大学 (学校) 史青阳 同学(乙方)为 2025 年推荐免试直博研究生。经双方协商,就此达成以下协议:

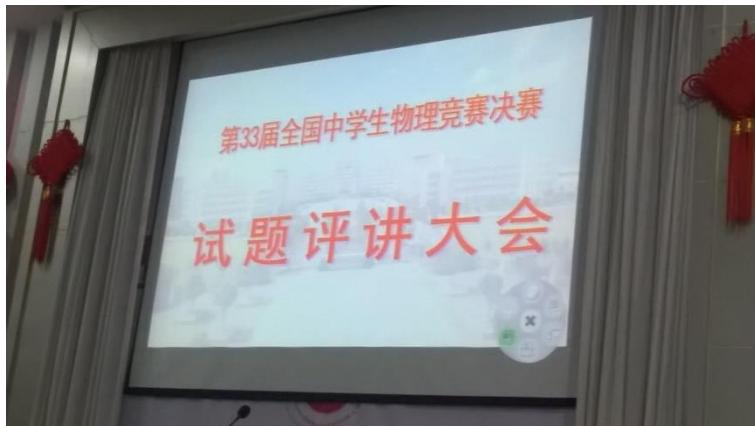
- 一、经甲方招生工作领导小组审核通过,甲方愿意向乙方发放推荐免试研究生预录取协议书。
- 二、乙方需获得所在高校的推免名额,同时保证提交甲方的申请材料真实、准确,若有任何弄虚作假行为,愿意被取消预录取资格并承担相应责任。
- 三、乙方承诺被甲方预录取后,不主动放弃甲方给予的预录取资格。预录取后,继续努力学习,圆满完成本科学业。
- 四、本协议经甲、乙双方签字盖章后生效。



人才培养举例：指导2021级明德班本科生史青阳科研训练，  
大三暑假通过高端竞争拿到直博资格，本科毕业直接博士生



# 4.2 培养中学物理竞赛教练



2016年第33届全国中学生物理竞赛由武汉大学和黄冈中学承办，当年1-11月本人作为命题2组成员参加复赛、决赛命题和改卷工作，命题3道并多次参加专家讨论。



搜索

网站首页 认识黄高 新闻动态 治理现代化 教师园地 学生天地 分校风采 招生信息 基金会 校庆专栏



新闻动态

校园新闻 >

亲切关怀 >

各地交流 >

媒体报道 >

校园新闻

◎ 您的位置: 首页 > 新闻动态 > 校园新闻

第三十三届全国中学生物理竞赛决赛颁奖大会在我市隆重举行

2016-11-02 00:00:00 1786

返回列表

11月2日晚，由中国物理学会、全国中学生物理竞赛委员会主办，湖北省物理学会、武汉物理学会，武汉大学和黄冈中学共同承办的第33届全国中学生物理竞赛决赛顺利闭幕，颁奖大会礼暨闭幕式在黄梅戏大剧院举行。

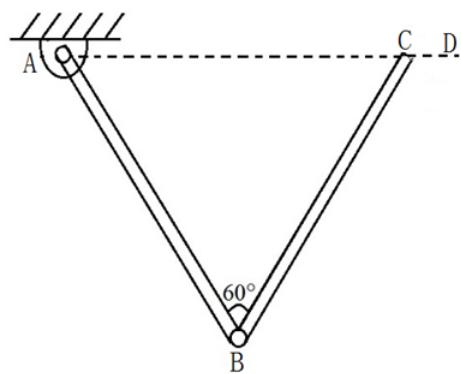
七、两根质量均匀分布的杆 AB 和 BC，质量均为  $m$ ，长均为  $l$ ，A 端被光滑铰接到一固定点（即 AB 杆可在竖直平面内绕 A 点无摩擦转动）。开始时 C 点有外力保持两杆静止，A、C 在同一水平线 AD 上，A、B、C 三点都在同一竖直平面内， $\angle ABC = 60^\circ$ 。某时刻撤去外力后两杆始终在竖直平面内运动。↵

(1) 若两杆在 B 点固结在一起，求↵

(i) 初始时两杆的角加速度；↵

(ii) 当 AB 杆运动到与水平线 AD 的夹角为  $\theta$  时，AB 杆绕 A 点转动的角速度。↵

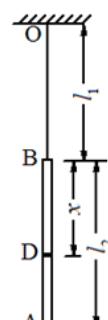
(2) 若两杆在 B 点光滑铰接在一起（即 BC 杆可在竖直平面内绕 B 点无摩擦转动），求初始时两杆的角加速度以及两杆间的相互作用力。↵



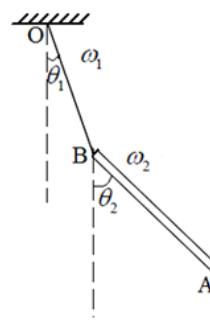
二、如图 a，AB 为一根匀质细杆，质量为  $m$ ，长度为  $l_2$ ；杆上端 B 通过一不可伸长的软轻绳悬挂到固定点 O，绳长为  $l_1$ 。开始时绳和杆均静止下垂。此后所有运动均在同一竖直面内。↵

(1) 现对杆上的 D 点沿水平方向施加一瞬时冲量  $I$ ，若在施加冲量后的瞬间，B 点绕悬点 O 转动的角速度和杆绕其质心转动的角速度相同，求 D 点到 B 点的距离  $x$  和 B 点绕悬点 O 转动的初始角速度  $\omega_0$ 。↵

(2) 设在某时刻，绳和杆与竖直方向的夹角分别为  $\theta_1$  和  $\theta_2$ （如图 b 所示），绳绕固定点 O 和杆绕其质心转动的角速度分别为  $\omega_1$  和  $\omega_2$ ，求绳绕固定点 O 和杆绕其质心转动的角加速度  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$ 。↵



图a



图b

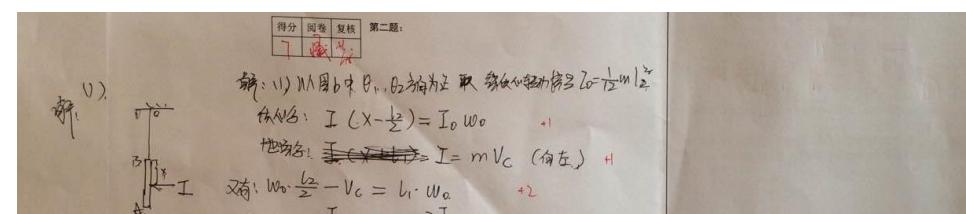
八、质子是由更小的所谓“部分子”构成的。欧洲大型强子对撞机（LHC）是高能质子-质子对撞机，质子束内单个质子能量为  $E = 7.0 \text{ TeV}$  ( $1 \text{ TeV} = 10^3 \text{ GeV} = 10^{12} \text{ eV}$ )，两束能量相同的质子相向而行对撞碎裂，其中相撞的两个部分子 a、b 相互作用湮灭产生一个新粒子。设部分子 a、b 的动能在质子能量中所占的比值分别为  $x_a$ 、 $x_b$ ，且远大于其静能。↵

(1) 假设两个部分子 a、b 对撞湮灭产生了一个静质量为  $m_s = 1.0 \text{ TeV}/c^2$  的新粒子 S，求  $x_a$  和  $x_b$  的乘积  $x_a x_b$ ；↵

(2) 假设新粒子 S 产生后衰变到两个光子，在新粒子 S 静止的参考系中，求两光子的频率；↵

(3) 假设新粒子 S 产生后在其静止坐标系中衰变到两个质量为  $m_A = 1.0 \text{ GeV}/c^2$  的轻粒子 A，每个轻粒子 A 再衰变到两个同频率的光子，求在这个坐标系中这两个光子动量之间的夹角。↵

已知： $\sin \alpha \approx \alpha$ ，当  $\alpha \ll 1$ ；普朗克常量  $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ ，电子电荷量绝对值  $e = 1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$ 。↵



$$\alpha_1 = \frac{-g \sin \theta_1 + \sin(\theta_2 - \theta_1) [3g \cos \theta_2 + 3l_1 \omega_1^2 \cos(\theta_2 - \theta_1) + 2l_2 \omega_2^2]}{l_1 [1 + 3 \sin^2(\theta_2 - \theta_1)]},$$

$$\alpha_2 = -\frac{3 \sin(\theta_2 - \theta_1) [2g \cos \theta_1 + 2l_1 \omega_1^2 + l_2 \omega_2^2 \cos(\theta_2 - \theta_1)]}{l_2 [1 + 3 \sin^2(\theta_2 - \theta_1)]} \quad (9)$$

物理竞赛决赛答卷纸 第3页 (共16页)

物理竞赛决赛答卷纸 第4页 (共16页)



在命题基础上撰写  
教学研究论文1篇，  
发表于物理与工程。  
指导相关课题本科  
生毕业论文，尝试  
培养中学物理竞赛  
教练。

- 四大力学理论基础
- 现代物理科学前沿
- 自动化计算能力

## 一个绳杆复合摆问题的简单研究

朱经亚

(武汉大学物理科学与技术学院, 湖北 武汉 430072)

**摘要** 把单摆中的质点换成匀质刚体杆, 即构成了一个绳杆复合摆。文章从全国中学生物理奥林匹克竞赛中的一道题目出发, 研究了绳杆复合摆问题, 简要阐述了从牛顿定律、守恒定律、拉格朗日力学、哈密顿力学等不同途径解决该问题的多种方法, 重点是对绳和杆近似共线情况的分析, 并用 Mathematica 做了数值模拟。当绳和杆满足初始角速度相同、偏转角幅度较小、杆长小于绳长 3 个条件时, 绳和杆近似共线, 可以用很简单的实验定性验证。通过数值模拟发现, 满足这 3 个条件时, 绳和杆的偏转角、角速度近似相等, 并且假设绳杆严格共线在短时间内是一个非常好的近似。但随着时间积累, 几十个摆动周期后, 与假设严格共线的近似结果会出现较大偏差, 尤其对于杆相对于绳较长的情况。

**关键词** 绳杆复合摆; 微振动; 经典力学; 近似法; 物理竞赛

## A BRIEF STUDY ON A ROPE-POLE COMPLEX PENDULUM

ZHU Jingya

(School of Physics and Technology, Wuhan University, Wuhan Hubei 430072)



## 中学物理竞赛教练培养基本训练

- 四大力学等理论基础
- 现代物理科学前沿
- Mathematica等计算编程能力
- 多种方法交叉验证
- 贯通科学前沿研究
- 弥补计算能力不足
- 大中衔接物理考题剖析 本科毕业设计
- 大中衔接物理考题剖析 参与论文写作

选题管理

工作台

师生双选课题

我的课题

师生双选课题

过程文档管理

论文管理

答辩管理

成绩与归档

统计报表

系统管理

课题名称	审批部门	申报人	模式	指导教师	选题学生	课题相似	论文类型
N2HDM模型中的三Higgs耦合 Tri-Higgs coupling in N2HDM	物理与电子学院 物理学(明德计划)	朱经亚(导师) 10110197	导师申报不指派学生	朱经亚(10110197)	王瑞阳 2115060165	否	论文
“轻暗物质”动画设计与制作 Design and production of the animation “light dark matter”	物理与电子学院 物理学	朱经亚(导师) 10110197	导师申报不指派学生	朱经亚(10110197)	孟伟 2111070286	否	毕业设计
“引力波探测”动画设计与制作 Design and production of the animation “Gravitational wave detection”	物理与电子学院 物理学	朱经亚(导师) 10110197	导师申报不指派学生	朱经亚(10110197)	胡雯娟 2111070237	否	毕业设计
椭球形胶囊反弹问题的研究	物理与电子学院 物理学	朱经亚(导师) 10110197	导师申报不指派学生	朱经亚(10110197) 王俊	王怀志 2111070020	否	论文
相框悬挂问题的剖析	物理与电子学院 物理学	朱经亚(导师) 10110197	导师申报不指派学生	朱经亚(10110197) 王俊	莫哲 2011010070	否	论文
高能粒子对撞机中的量子力学 Quantum mechanics in high-energy particle colliders	物理与电子学院 物理学	朱经亚(导师) 10110197	导师申报不指派学生	朱经亚(10110197)	赵正阳 2111070159	否	论文
费曼积分的解析与半解析计算 限高能所大学生科创计划《费曼积分的解析与半解析计算》	物理与电子学院 物理学	朱经亚(导师) 10110197	导师申报不指派学生	朱经亚(10110197)	郭阳华 2113060052	否	论文
基于Hilbert级数的有效场论的算符基研究 Study of the Operator Basis in Effective Field Theories Using Hilbert Series	物理与电子学院 物理学(明德计划)	朱经亚(导师) 10110197	导师申报指派学生	朱经亚(10110197)	史青阳 2111070091	否	论文
超导直线加速器束晕匹配仿真研究	物理与电子学院 物理学(明德计划)	朱经亚(导师) 10110197	导师申报指派学生	朱经亚(10110197) 刘淑会	张晓 2139030070	否	毕业论文



# 大中衔接考题剖析——以相框悬挂问题为例

《大学物理》已接收

## 相框悬挂问题的剖析

莫哲<sup>1</sup>, 马士全<sup>2</sup>, 王俊<sup>3</sup>, 朱经亚<sup>1</sup>

(1. 河南大学物理与电子学院, 河南开封 475004)

(2. 柳州铁一中学, 广西柳州 545007)

(3. 郑州外国语学校, 河南郑州 450001)

**摘要:** 本文以悬挂相框系统为研究对象, 分别运用牛顿力学与拉格朗日分析力学方法, 导出了系统的平衡条件和二自由度微振动的微分方程, 讨论了简正频率的存在条件, 并运用 Mathematica 数值求解微分方程, 验证了相关讨论结果的正确性。

**关键词:** 平衡态; 微振动; 牛顿力学; 分析力学; 数值计算

## Analysis of the Picture Frame Hanging Problem

MO Zhe<sup>1</sup>, MA Shi-Quan<sup>2</sup>, WANG Jun<sup>3</sup>, ZHU Jing-Ya<sup>1</sup>

(1. School of Physics and Electronics, Henan University, Kaifeng 475004, China)

(2. Liuzhou Tieyi Middle School, Liuzhou 545007, China)

(3. Zhengzhou Foreign Language School, Zhengzhou 450001, China)



## 第八届贯通教育背景下的大中物理教育衔接与创新教育研讨培训会

中国 哈尔滨 8月11日-14日

# 报告证书

报告人:朱经亚(河南大学)

报告题目:大中衔接考题剖析——以相框悬挂问题为例

指导单位:教育部高等学校大学物理课程教学指导委员会

教育部高等学校物理学类专业教学指导委员会

中国物理学会教学工作委员会

主办单位:教育部高等学校大学物理课程教学指导委员会师范  
类专业工作委员会、大中物理教育衔接工作委员会

承办单位:《大学物理》编辑部(代章)、哈尔滨工业大学物理学院  
哈尔滨工业大学附属中学校、黑龙江省物理学会  
科学出版社

协办单位:《物理与工程》《物理教学》《物理通报》编辑部



# 聘书

兹聘请 朱经亚 同志为全国物理贯通教育与创新人才培养  
联盟 委员，聘期五年。

此聘

教育部高等学校物理课程教学指导委员会  
教育部高等学校物理学类专业教学指导委员会  
中国物理学会物理教育委员会  
（《大学物理》编辑部代章）

二〇二五年八月十二日

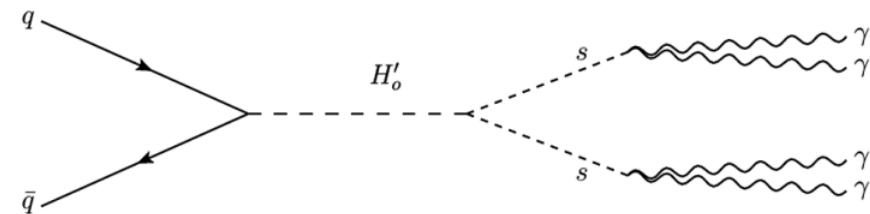
# 高能物理科研究论文改编为中学物理竞赛考题



PHYSICAL REVIEW D 94, 015012 (2016)

## Promising interpretation of diphoton resonance at 750 GeV

Xiao-Jun Bi,<sup>1</sup> Ran Ding,<sup>2</sup> Yizhou Fan,<sup>3</sup> Li Huang,<sup>3</sup> Chuang Li,<sup>3</sup> Tianjun Li,<sup>3,4</sup> Shabbar Raza,<sup>3</sup> Xiao-Chuan Wang,<sup>5</sup> and Bin Zhu<sup>6</sup>



## 第33届全国中学生物理竞赛 复赛第8题 (2016年9月)

八、质子是由更小的所谓“部分子”构成的。欧洲大型强子对撞机 (LHC) 是高能质子-质子对撞机，质子束内单个质子能量为  $E = 7.0 \text{ TeV}$  ( $1 \text{ TeV} = 10^3 \text{ GeV} = 10^{12} \text{ eV}$ )，两束能量相同的质子相向而行对撞碎裂，其中相撞的两个部分子 a、b 相互作用湮灭产生一个新粒子。设部分子 a、b 的动能在质子能量中所占的比值分别为  $x_a$ 、 $x_b$ ，且远大于其静能。

(1) 假设两个部分子 a、b 对撞湮灭产生了一个静质量为  $m_s = 1.0 \text{ TeV}/c^2$  的新粒子 S，求  $x_a$  和  $x_b$  的乘积  $x_a x_b$ ；

(2) 假设新粒子 S 产生后衰变到两个光子，在新粒子 S 静止的参考系中，求两光子的频率；

(3) 假设新粒子 S 产生后在其静止坐标系中衰变到两个质量为  $m_A = 1.0 \text{ GeV}/c^2$  的轻粒子 A，每个轻粒子 A 再衰变到两个同频率的光子，求在这个坐标系中这两个光子动量之间的夹角。

已知:  $\sin \alpha \approx \alpha$ , 当  $\alpha \ll 1$ ; 普朗克常量  $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ , 电子电荷量绝对值  $e = 1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$ 。 52

# 4.3 培养优秀科学教师



我国中小学教育长期以来以应试教育为主，科学教育普遍不被重视，近年来国家连续发布相关政策文件支持科学教育发展。

■ 2023年2月21日习近平总书记在中央政治局集体学习时提出：  
**要在教育‘双减’行动中做好科学教育加法，激发青少年好奇心、想象力、探求欲，培养具备科学家潜质，愿意献身科学的研究事业的青少年群体。**

当前位置：首页 > 新闻

科学教育新课标发布一年多来，多地积极探索——  
做好科学教育加法 提升科学育人水平

2023-07-14 来源：《人民日报》 收藏

核心阅读

习近平总书记指出，要在教育“双减”中做好科学教育加法，激发青少年好奇心、想象力、探求欲，培育具备科学家潜质、愿意献身科学的研究事业的青少年群体。

“天宫课堂”“科技馆里的科学课”，在孩子们心中播撒科学的种子；一批批中小学骨干教师走进科研院所参加研修班，提升科学教育教学水平……现如今，科学教育纳入基础教育各阶段，成为助力学生全面健康发展的“基础性课程”。

如何厚植创新人才早期培养的沃土、缩小城乡科学教育差距？科学教育新课标发布一年多来，有哪些积极探索？本报记者进行了采访。

注重思维培养——

科学安排进阶课程

贯通科学教育体系



## 教育部 中央宣传部 中央网信办 中央精神文明建设办公室 国家发展改革委 科技部 工业和信息化部 财政部 自然资源部 生态环境部 农业农村部 中国科学院 中国工程院 自然科学基金委 共青团中央 全国妇联 中国科协 全国少工委关于加强 新时代中小学科学教育工作的意见

教监管〔2023〕2号

各省、自治区、直辖市教育厅（教委）、党委宣传部、网信办、文明办、发展改革委、科技厅（委、局）、工业和信息化主管部门、通信管理局、财政厅（局）、自然资源主管部门、生态环境厅（局）、农业农村（农牧）厅（局、委）、团委、妇联、科协、少工委，新疆生产建设兵团教育局、党委宣传部、网信办、文明办、发展改革委、科技局、工业和信息化局、财政局、自然资源局、生态环境局、农业农村局、团委、妇联、科协、少工委，中国科学院院属各单位，有关部门（单位）教育司（局），部属各高等学校、部省合建各高等学校：

为深入贯彻习近平总书记在二十届中共中央政治局第三次集体学习时的重要讲话精神，全面落实党中央、国务院《关于进一步减轻义务教育阶段学生作业负担和校外培训负担的意见》、《关于新时代进一步加强科学技术普及工作的意见》、《全民科学素质行动规划纲要（2021—2035年）》部署要求，着力在教育“双减”中做好科学教育加法，一体化推进教育、科技、人才高质量发展，现提出以下意见。



# 教育部有关负责人就《教育部等十八部门关于加强新时代中小学科学教育工作的意见》答记者问

2023-05-29 20:38 来源：教育部网站

字号：默认 大 超大 | 打印 |

## 教育部校外教育培训监管司负责人就《教育部等十八部门关于加强新时代中小学科学教育工作的意见》答记者问

近日，教育部等十八部门联合印发了《关于加强新时代中小学科学教育工作的意见》（以下简称《意见》），教育部校外教育培训监管司负责人就《意见》有关问题回答了记者提问。

### 1. 为什么要出台《意见》？

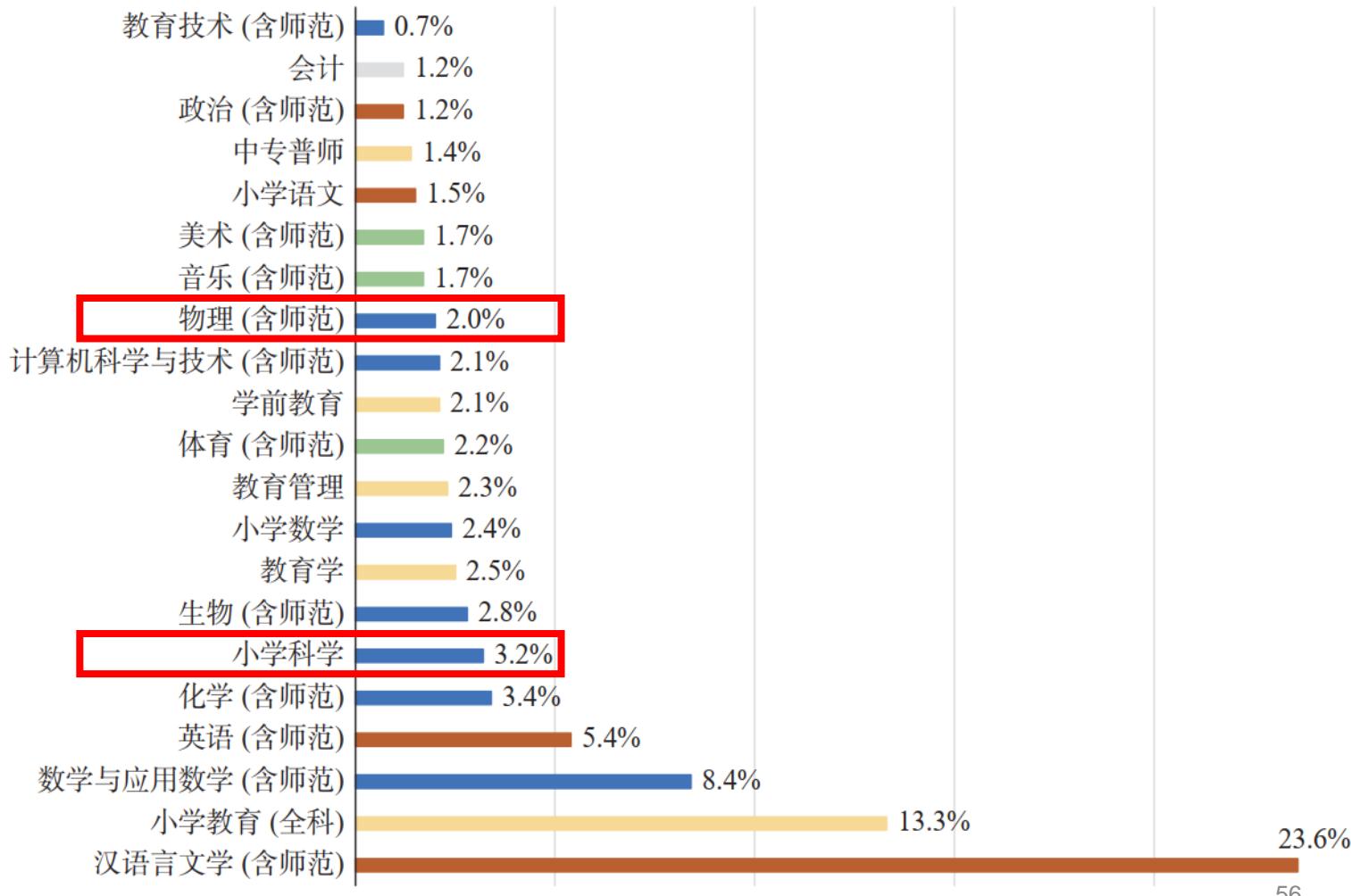
答：科学教育是提升国家科技竞争力、培养创新人才、提高全民科学素质的重要基础。习近平总书记非常关心中小学科学教育工作，多次发表重要讲话、作出重要指示，党的二十大又把教育、科技、人才进行“三位一体”统筹安排。特别是今年2月21日，习近平总书记在二十届中共中央政治局第三次集体学习时作出“要在教育‘双减’中做好科学教育加法”的明确指示，4月4日，又在参加植树活动时，特意关心中小学生的生物课的安排情况，并叮嘱孩子们要从小热爱科学、热爱劳动，做到德智体美劳全面发展。党的十八大以来，借力创新驱动发展战略，科学教育迈入新的发展阶段。经过不懈努力，中小学生科学教育水平及科学素质持续提升，青少年科学教育取得了明显成效。但是，我们也清醒地认识到，面对全球新一轮科技革命加速演进浪潮，面对加快建设教育强国、科技强国、人才强国的目标要求，我国科学教育还存在着基础总体薄弱、区域发展不均衡、科学教育资源尚未有效整合、师资力量薄弱、实践教学实施程度较低、拔尖创新人才早期发现和培养机制仍需突破等问题和不足，亟待加强和改进，需出台相关意见进行部署推进。

科学教育是提升国家科技竞争力、培养创新人才、提高全民科学素质的重要基础。

# 科学教师队伍现状

- 在科学教育中，科学教师素质至关重要。
- 我国小学科学教育专业招生规模小、课程设置不合理、培养模式封闭等，这影响了科学教师的培养质量。
- 中学理科教师培养过于专业化，物理科学素养和跨学科能力培养比较欠缺。
- 当前小学科学教师以单科专业背景的高校毕业生为主，科学教育和物理学专业的比例仅为3.2%和2%。
- **单科专业职前科学教师跨学科培养十分必要！**

## 我国小学科学教师队伍现状、影响与建议： 基于 31 个省份的大规模调研 中国小学科学教师专业背景占比



# 《粒子宇宙与生命起源》物理通识课教学



## 河南大学本科生通识课程开设计划审定表

课程名称	粒子宇宙与生命起源			课程编号			
课程英文名称	Particles, Universe and the Origin of Life						
课程所属模块	<input type="checkbox"/> 模块一 <input type="checkbox"/> 模块二 <input checked="" type="checkbox"/> 模块三 <input type="checkbox"/> 模块四 <input type="checkbox"/> 模块五						
开课学期	<input checked="" type="checkbox"/> 第一学期 <input type="checkbox"/> 第二学期 <input type="checkbox"/> 全学年（两个学期均开设）						
总学时	36	理论学时	36	实践学时	0	课程学分	2
开课教师姓名	朱经亚			教师所在学院（部）	物理与电子学院		
职称	教授	学历	博士	性别	男	出生年月	1985.05
手机号码	17796711646			Email	zhujy@henu.edu.cn		

- 2022-2023学年第二学期, 54/55
- 2024-2025学年第二学期, 60/60
- 2025-2026学年第一学期, 39/60

# 《粒子宇宙与生命起源》课程简介



课程代码：TSK03186

课程中文名称：粒子宇宙与生命起源

课程英文名称：Particle, Universe, and the origin of Life

主讲教师：朱经亚（物理学院）

课程类别：通识课

课程学分：2学分

课程学时：36学时

授课对象：全校本科生、研究生

本课程的前导课程：高中数学、物理、化学、生物，学过大学物理更好

**小学科学→中学分科教学→大学科学（本课程）**

教学目的：

- ◆ 提高学生的科学素养，加强科学世界观，增加对现代自然科学的整体了解；
- ◆ 开拓学生的知识面，促进思考深层次问题，促进学科交叉和科研创新。
- ◆ 培养优秀科学教师，包括中小学科学课教师、科技辅导员、科技场馆教师等。

参考课程：中国科学院大学通识课《宇宙与生命》，章德海老师主讲

# 课程简介

自古以来，人类就对宇宙、物质、生命充满好奇。宇宙有多大？宇宙是什么样子的？物质能否无限分割？物质之间能否不受时间空间限制发生相互作用？生命如何起源？恐龙如何灭绝？极大宇宙、极小粒子、鲜活生命之间有何关联？如何检验我们的相关猜想？当今科学对这些根本问题了解到什么程度？相关科学探索对我们的科技发展有什么作用？

本课程试图对这些有趣的问题做深入浅出的介绍和探讨，使学生对物质粒子、宇宙空间、生命起源等相关科学前沿和工程技术有个一般性的了解，提高学生的科学素养；本课程突出学科交叉，使学生对天体物理、天体化学、天体生物学、核技术、核医学、天文地理学、遥感科学与技术、数学物理、科学计算软件、量子计算、脑科学、心理学、科学教育、科幻文学、科学史、科技考古、科技哲学、科技翻译、产业经济、科技管理、知识产权等交叉学科有一定的了解，开阔学生眼界，打开学科交叉思路，为将来从事蓬勃发展的相关交叉学科研究、中小学科学教育等工作起到一定的启蒙作用。

当然，本课程不可能解答所有科学难题，但是却提供了师生之间、各学科同学之间的交流平台，供大家相互启发和争辩。好奇，一直是科学进步的强大动力。欢迎参加到我们的大讨论中来吧！

# 《粒子宇宙与生命起源》课程内容

1. 万物之图——张图囊括宇宙万物
2. 物质结构之层次——从宇宙到生命到基本粒子
3. 相互作用之类别——从宇宙万物到四种基本相互作用
4. 粒子之小——粒子物理标准模型简介
5. 宇宙之大——宇宙学标准模型简介
6. 极小与极大——粒子物理与早期宇宙学的关联
7. 时间之初——宇宙大爆炸与超弦、大统一理论简介
8. 时间与空间——相对论简介及其在时空大数据技术中的应用
9. 新物理——基本粒子与新物理
10. 新物质——强子物理与新强子态
11. 化学元素起源——大爆炸核合成、恒星核合成
12. 对撞机检验——高能粒子对撞机模拟宇宙早期物理过程
13. 生命起源——原初生命物质合成
14. 物种灭绝——暗物质诱导地质、气候变化与恐龙灭绝
15. 非对撞机检验1——利用卫星等探测原初生命物质与地外生命
16. 非对撞机检验2——利用卫星等探测高能宇宙线与暗物质
17. 大科学之用——相关大科学工程对现代科技的推动

1- 6: 解剖宇宙  
7-16: 重建宇宙  
17: 大科学之用

遥感科学与技术（时空大数据）

天体核物理

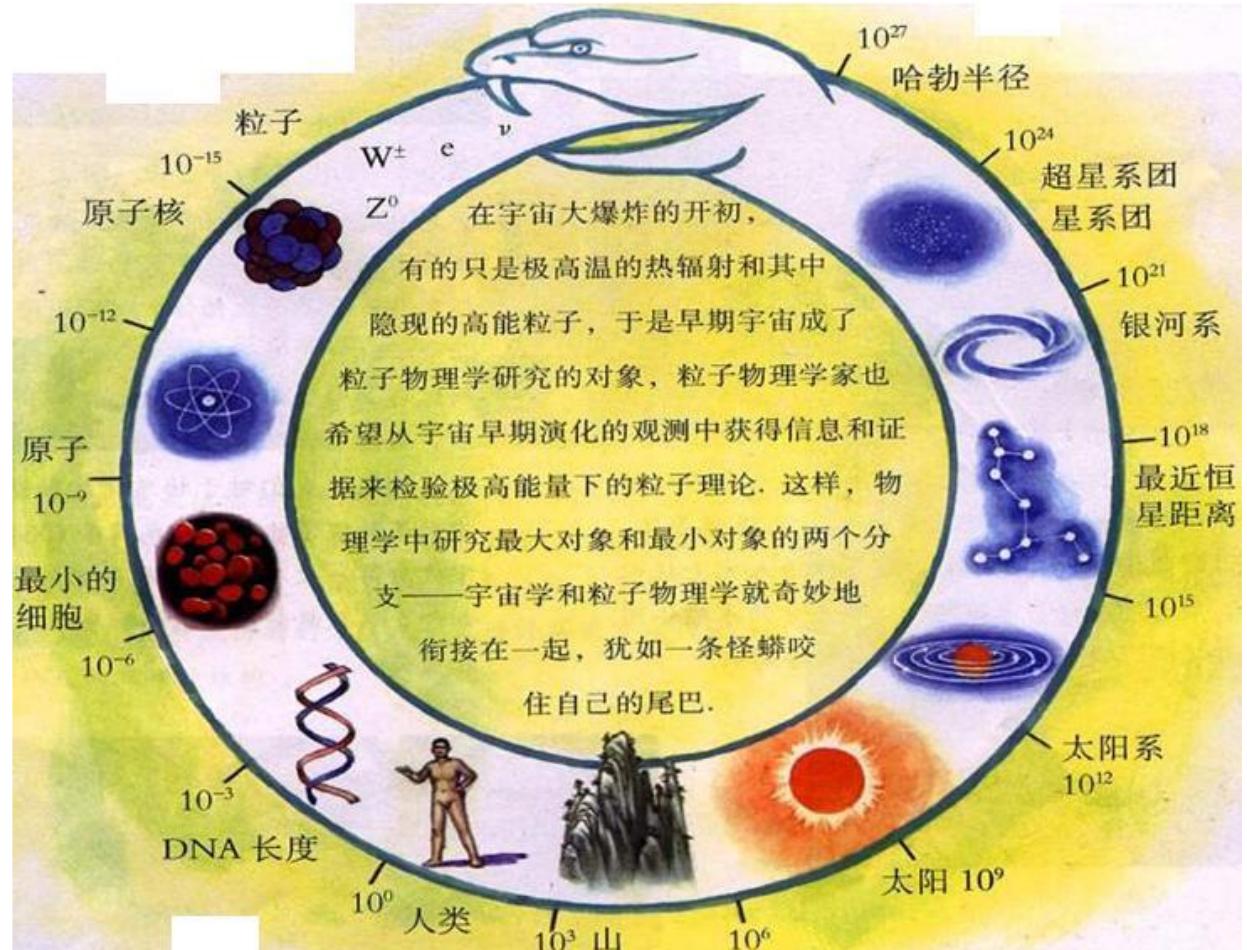
天体化学、天体生物学

《河南省卫星产业发展规划》  
2022

软件、电子、通讯、材料、生物、  
医学、……

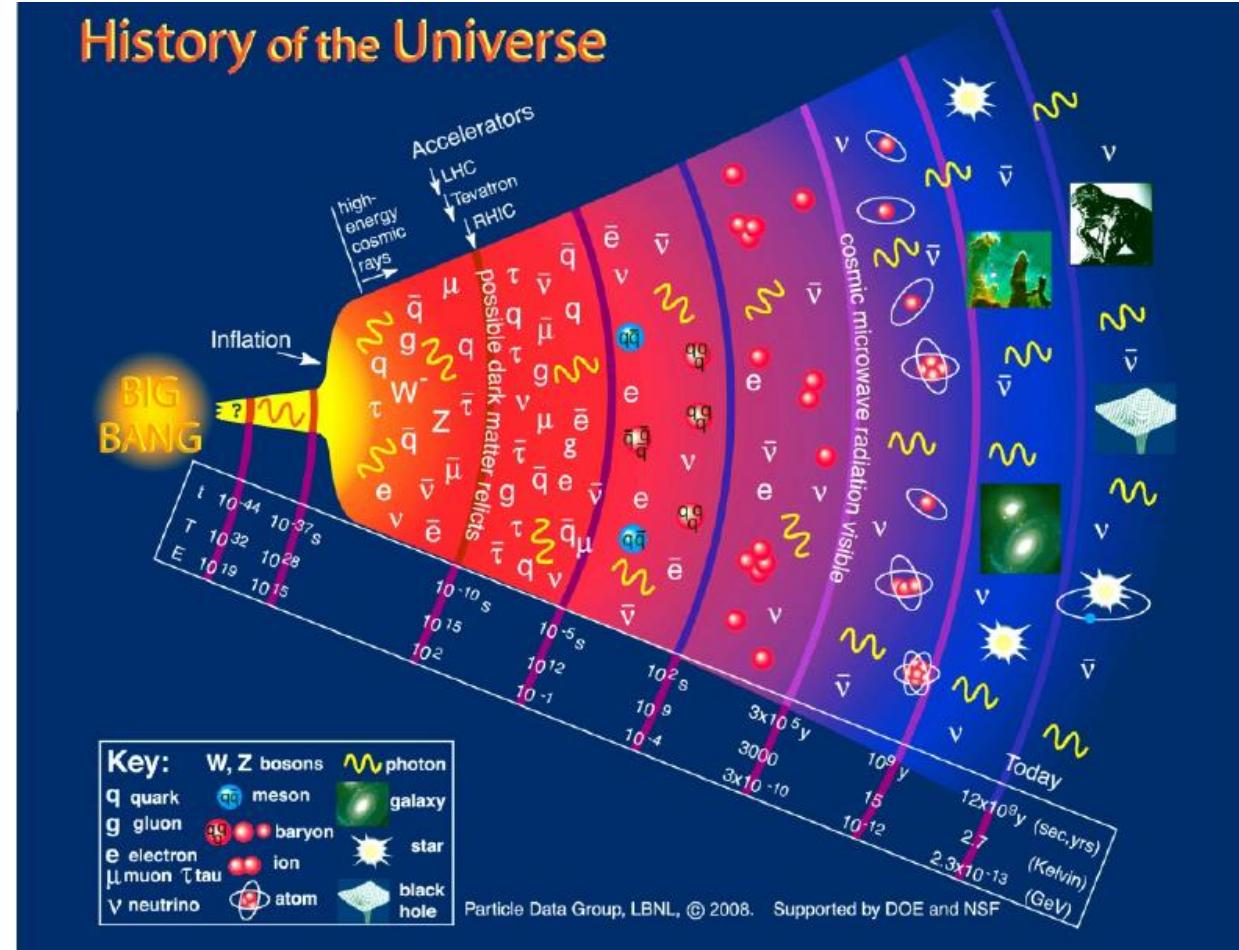
# 空间尺度

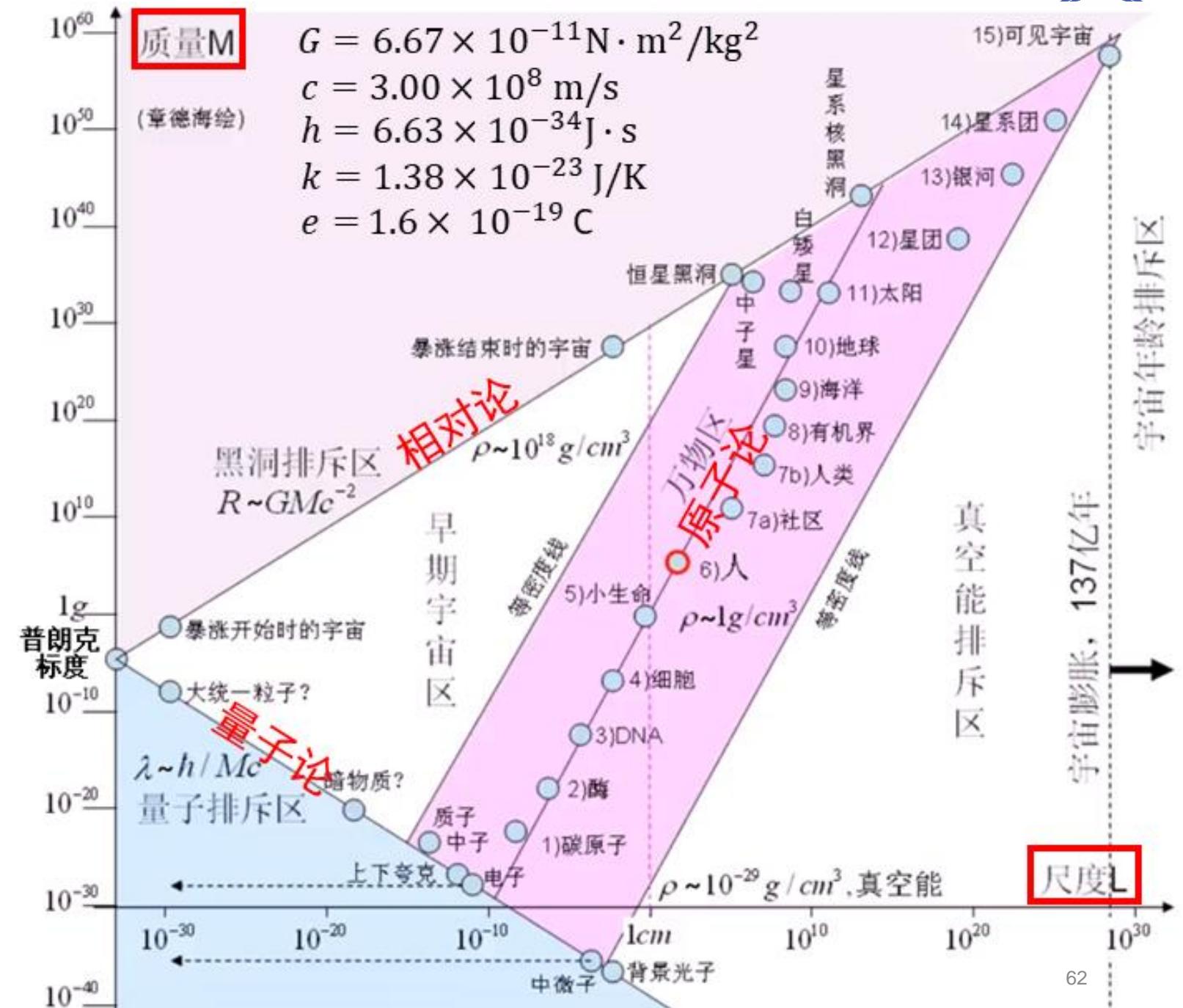
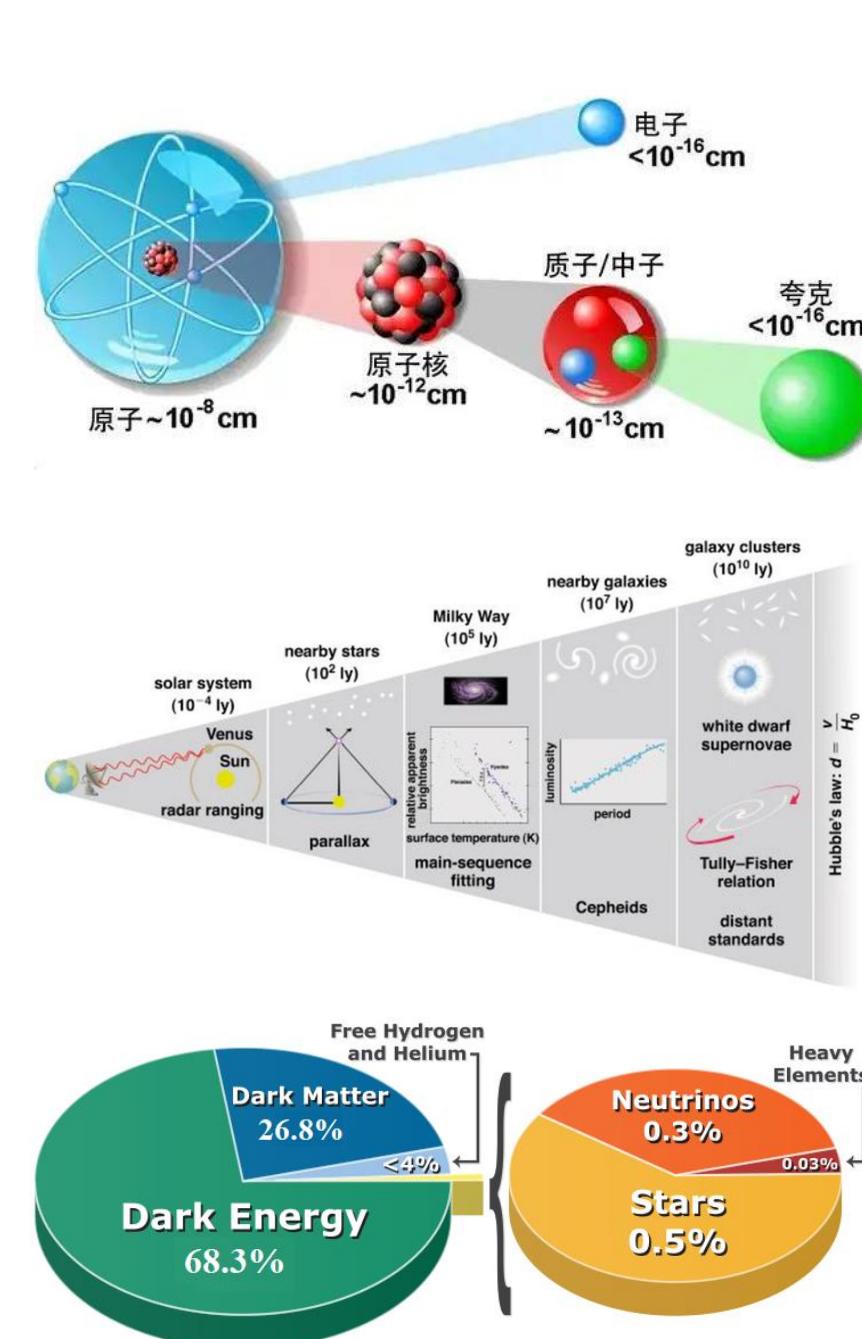
普朗克尺度  $10^{-35}$  米 → 可见宇宙 930 亿光年



# 时间尺度

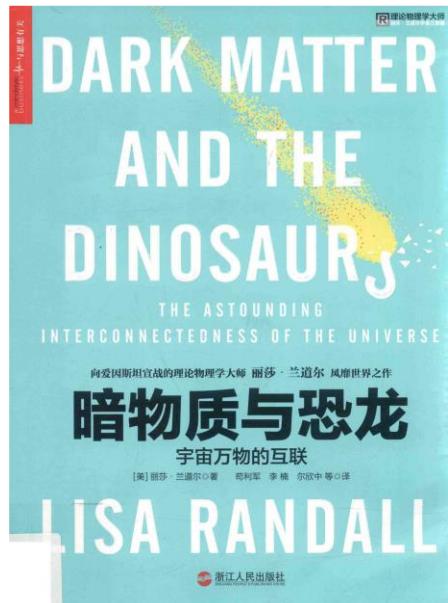
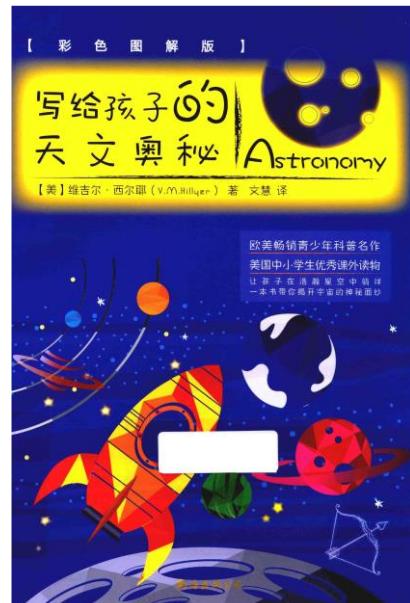
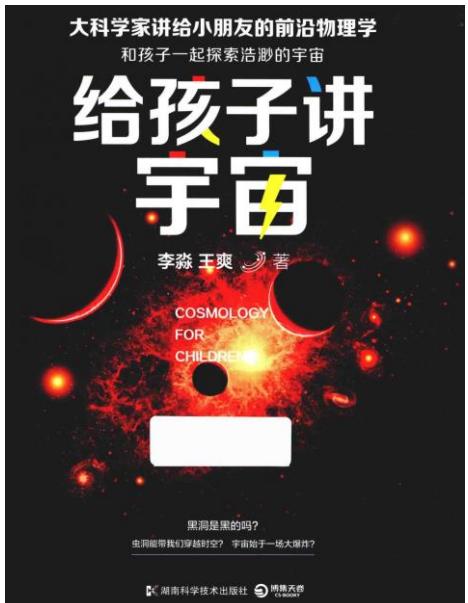
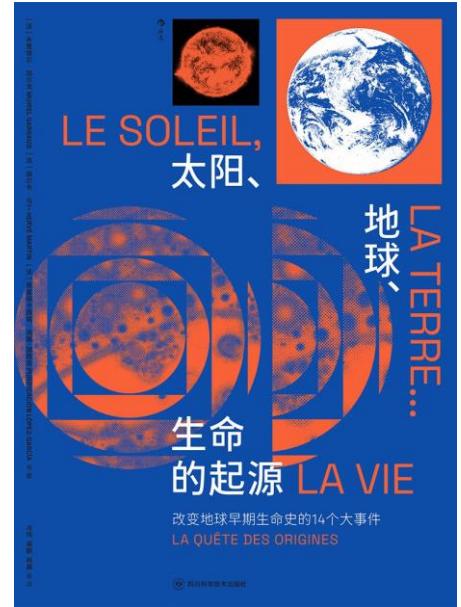
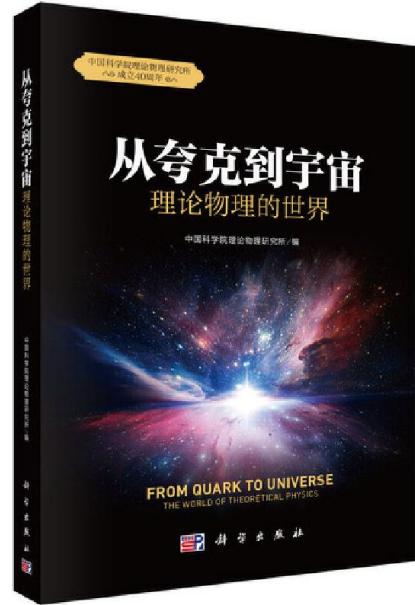
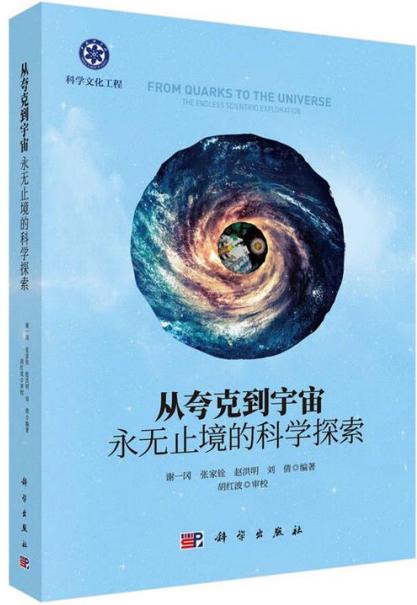
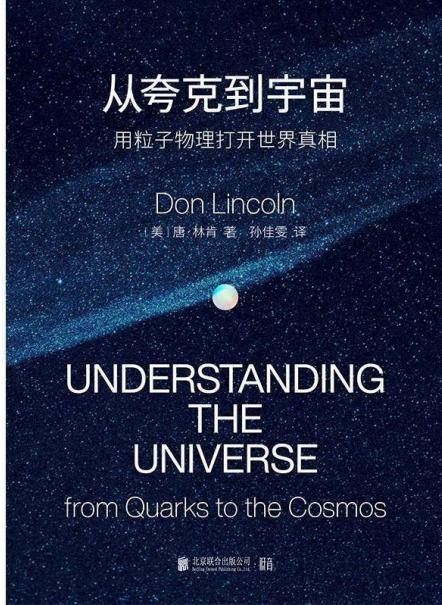
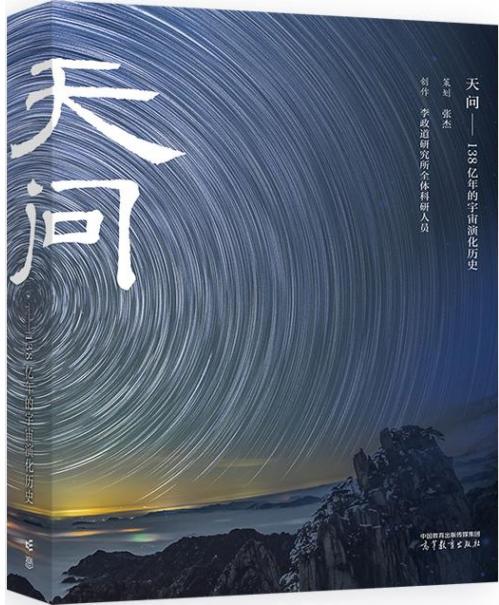
普朗克时间  $10^{-44}$  秒 → 宇宙年龄 138 亿年





# 推荐参考书

1. 《“宇宙与生命”系列讲座之1-8》，章德海，《现代物理知识》连载，2008-2009
2. 《时间简史》，Stephen Hawking著，许明贤、吴忠超译，湖南科学技术出版社，2018；
3. 《大爆炸简史》，Simon Singh著，王文浩译，湖南科技出版社，2018；
4. 《原子与宇宙》，Science News杂志社编著，杨兵、丁一译，电子工业出版社，2016；
5. 《从夸克到宇宙》，中国科学院理论物理研究所编，科学出版社，2018；
6. 《从夸克到宇宙》，谢一冈、张家铨、赵洪明、刘倩编著，科学出版社，2018；
7. 《1小时粒子物理简史》，Pauline Gagnon著，钱思进译，浙江教育出版社，2020；
8. 《生命是什么》，Erwin Schrodinger著，周程、胡万恒译，北京大学出版社，2018；
9. 《太阳、地球、生命的起源》，Muriel Gargaud等著，冷伟等译，四川科学技术出版社，2025；
10. 《最初三分钟》，Steven Weinberg著，王丽译，重庆大学出版社，2013；
11. 《对称与不对称》，李政道著，朱允伦、刘怀祖编译，中信出版集团，2021；
12. 《宇宙新概念》，赵江南编著，武汉大学出版社，2018；
13. 《物理宇宙学讲义》，俞允强编著，北京大学出版社，2002；
14. 《基础天文学》，刘学富主编，高等教育出版社，2004；
15. 《暗物质与恐龙》，Lisa Randall著，苟利军、李楠、尔欣中译，浙江人民出版社，2016；  
Dark Matter as a Trigger for Periodic Comet Impacts, L. Randall and M. Reece, *Phys. Rev. Lett.* 112, 161301 (2014);
16. 《相对论在现代导航中的应用》，费保俊著，国防工业出版社，2015。



2024 年度教育部高等学校大学物理课程教学指导委员会大中物理教育衔接工作委员会教学研究课题的立项通知

大中物理教育衔接研究课题  
申请书

课题名称: 面向职前科学教师的物理通识课的研究与实践  
课题负责人: 朱经亚  
申请学校: 河南大学  
通讯地址: 河南省开封市河南大学金明校区物理学院  
联系电话: 17764081676  
电子邮箱: zhujy@henu.edu.cn

教育部高等学校大学物理课程教学指导  
委员会大中物理教育衔接工作委员会  
2022 年制

大中物衔委字[2024]04 号

各学校:

按照《2024 年度教育部高等学校大学物理课程教学指导委员会大中物理教育衔接工作委员会教学研究课题的申报通知》, 经各高校和中学的物理教师自由申报和学校推荐, 教育部高等学校大学物理课程教学指导委员会大中物理教育衔接工作委员会组织了专家组进行评审, 经大中物理教育衔接工作委员会主任会议研究决定, 批准“大中衔接与创新人才培养: 数智赋能大学物理教学改革与实践”等 55 个研究课题进行立项建设。按照研究课题申报时立项通知要求, 对这些研究课题将在 2025 年组织中期检查, 在 2026 年组织结题验收, 请研究课题负责人带领课题组成员抓紧做好课题的各项研究工作。

具体项目如下:

立项编号	课题负责人	学校	项目名称
WX202401	蔡萍根	浙江工业大学	大中衔接与创新人才培养: 数智赋能大学物理教学改革与实践
WX202402	朱经亚	河南大学	面向职前科学教师的物理通识课的研究与实践
WX202403	宋洪晓	山东大学	以“科学摄影”为切入点的物理科普研究
WX202404	陈明东	华南理工大学	面向大湾区青少年的体验式物理科普教学研究

# 人才培养举例： 指导本科生毕业设计创作科学教育 动画视频、发表教研论文

物理与工程 Vol. 35 No. 1 2025

157

## 以跨学科项目实践培养师范生的科学教育能力 ——以“暗物质与恐龙”动画设计与制作本科毕业设计为例

王乐佳 朱经亚  
(河南大学物理与电子学院,河南 开封 475004)

**摘要** 在当前中小学科学教育日益重要的情况下,创新科学教师培养方式成为高等师范教育面临的重要课题,本文通讯作者近年来积极致力于理工科师范类本科生等职前科学教师跨学科培养问题的理论与实践研究。本文以 Lisa Randall 女士的科普畅销书《暗物质与恐龙》为基础,将其改编为一部时长十几分钟的同名动画片,简述了该科学教育动画的设计和制作过程,并以此本科毕业设计课题为案例,提出了通过科学教育动画设计与制作项目实践提高职前科学教师跨学科能力的新方法,希望为我国科学教师跨学科培养乃至科学教育事业的发展带来积极的影响。

**关键词** 师范生本科毕业设计;科学教育;科学教师跨学科培养;暗物质;天体物理;动画设计与制作

**CULTIVATE THE SCIENCE EDUCATION ABILITY OF NORMAL MAJOR STUDENTS THROUGH INTERDISCIPLINARY PROJECT PRACTICE: TAKING ANIMATION DESIGN AND PRODUCTION OF “DARK MATTER AND DINOSAURS” AS AN EXAMPLE**

WANG Lejia ZHU Jingya  
(School of Physics and Electronics, Henan University, Kaifeng, Henan 475004)

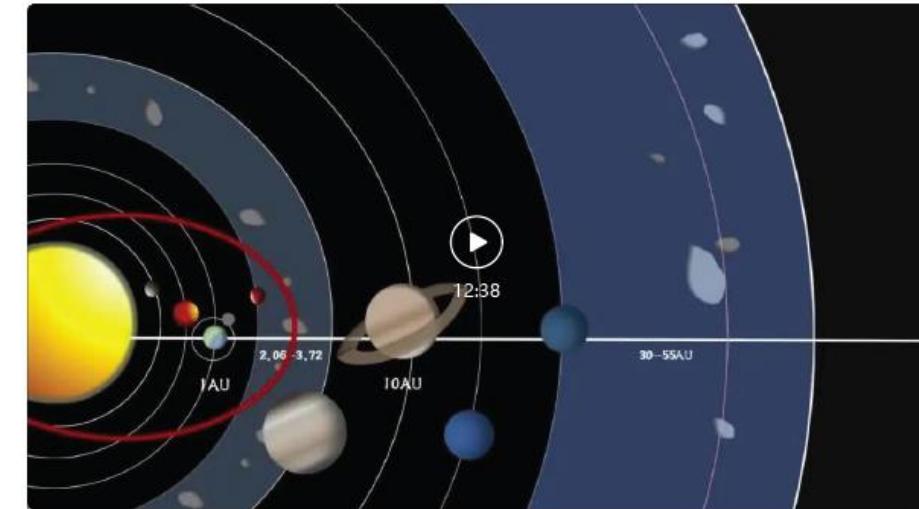
科普 | 《暗物质与恐龙》科普动画

王乐佳 朱经亚 物理与工程 2024年08月11日 10:00 北京



《物理与工程》量子世纪年  
International Year of Quantum Science and Technology

[https://mp.weixin.qq.com/s/h0Mr5\\_1C0UBSaQGmPZgn4Q](https://mp.weixin.qq.com/s/h0Mr5_1C0UBSaQGmPZgn4Q)



本视频是由科普畅销书《暗物质与恐龙》(作者为著名理论物理学家Lisa Randall女士)改编而成的科普动画,是河南大学物理学(师范类)专业2020级本科生王乐佳同学在朱经亚教授指导下进行本科毕业设计的设计成果。

随着科技和教育事业的发展,中小学科学教育的重要性日益凸显,而优秀科学教师培养是推动中小学科学教育发展的关键,也成为高等师范教育的重要课题。朱经亚教授近年来在进行粒子物理与相关宇宙学等科学前沿研究的同时,也积极致力于职前科学教师的跨学科培养研究与实践,本视频选题亦来源于此。



# 科研论文到科普视频的转化<sup>1</sup>

——以“光子-类轴子传播模式”为例

孟伟<sup>1</sup>, 李为超<sup>2</sup>, 朱经亚<sup>1</sup>

(1. 河南大学物理与电子学院, 河南开封 475004; 2. 荆楚理工学院数理学院, 湖北荆门 448000)

**摘要:** 高能物理等前沿科学领域的科研成果往往因概念抽象、理论复杂而难以被公众理解, 科学传播的“最后一公里”问题突出。本文以“光子-类轴子传播模式”科普视频制作为例, 探讨科研论文到科普视频的转化路径与实践策略。研究基于《*Distinct photon-ALP propagation modes*》论文的核心理论, 结合PPT动画技术, 从理论提炼、内容结构化、视觉符号设计、叙事逻辑构建四个维度解析转化过程, 论证了科普视频在降低科学认知门槛、提升公众科学兴趣中的作用, 并总结了转化过程中科学性与通俗性平衡、技术工具适配等关键问题, 为科研成果科普转化提供了实践参考。

**关键词:** 科学传播; 科学教育; 科普视频; 暗物质; 类轴子粒子

## From Research Papers to Popular Science Videos: Taking “Photon-ALP Propagation Modes” as an example

MENG Wei<sup>1</sup>, LI Weichao<sup>2</sup>, ZHU Jingya<sup>1</sup>

(1 School of Physics and Electronics, Henan University, Kaifeng, Henan 475004

2 School of Mathematics and Physics, Jingchu University of Technology, Jingmen, Hubei 448000)

**Abstract:** Research achievements in frontier scientific fields such as high-energy physics are often difficult for the public to understand due to their abstract concepts and complex theories, leading to a prominent “last mile” problem in science communication. Taking the production of the popular science video on “photon-axion-like particle (ALP) propagation modes” as a case, this paper explores the transformation path and practical strategies from scientific research papers to popular science videos. Based on the core theory of the paper “*Distinct photon-ALP propagation modes*” and combined with PPT animation technology, this study analyzes the transformation process from four dimensions: theoretical refinement, content structuring, visual symbol design, and narrative logic construction. It demonstrates the role of popular science videos in lowering the cognitive threshold of science and enhancing public interest in science. Furthermore, it summarizes key issues such as balancing scientific rigor with accessibility and adapting technical tools, providing practical references for the transformation of research achievements into popular science communication.

**Key words:** science communication; science education; popular science video; dark matter; axion-like particles

<sup>1</sup>收稿日期: 2025-08-25 (2025年9月西安“物理与工程前沿教育教学创新研讨会”投稿, 视频链接 <https://pan.baidu.com/s/5SnGIFvIX0rR3TvkJHeQL7PQ>)

基金项目: 教育部大学物理教指委大中物理教育衔接工作委员会教学研究课题 (WZC202402), 国家自然科学基金 (12275065), 河南大学资助

作者简介: 孟伟, 男, 河南大学物理与电子学院 2021 级本科生。李为超, 男, 武汉大学物理学博士, 荆楚理工学院科学教育专业教师。朱经亚, 男, 河南省物理学会理事、博导、黄河学者。

通信作者: 李为超、朱经亚, E-mail: zhuyj@henu.edu.cn

引文格式: 孟伟, 李为超, 朱经亚. 科研论文到科普视频的转化——以“光子-类轴子传播模式”为例[J]. 物理与工程, 2025, XX(XX): XX-XX.

Cite this article: MENG W, LI W C, ZHU J Y. From Research Papers to Popular Science Videos: Taking “Photon-ALP Propagation Modes” as an example [J]. Physics and Engineering, 2025, XX(XX): XX-XX. (in Chinese)



# 4.4 培养国际物理教师

A-Level (General Certificate of Education Advanced Level) , 英国高中课程，是英国全民课程体系，是英国普通中等教育证书考试高级水平课程，也是英国学生的大学入学考试课程。

A-Level课程证书被几乎所有英语授课的大学作为招收新生的入学标准。在中国开设A-Level课程旨在为中国学生提供进入国外大学的有效途径，具体目标为：培养在国内初高中成绩优秀的学生进入世界顶尖大学；培养在国内初高中成绩中等的学生进入世界一流大学；培养在国内初高中成绩一般的学生考取适合自己的大学。

- 美国大学先修课程AP (Advanced Placement)
- 美国高考SAT (Scholastic Assessment Test)
- 国际文凭大学预科IBDP (International Baccalaureate Diploma Programme)
- 香港中学文凭考试DSE (Hong Kong Diploma of Secondary Education Examination)
- **中国大陆的国际教育品牌？**

急聘物理老师职位

 苏州一学校 ● 【苏州】双语物理教师 (职位编号m884…)  
育人才资源共享招  
IB教育者 4天前

急聘物理老师职位

 1. 本科及以上学历，物理相关专业毕业，可双语/全英文…  
育人才资源共享招  
IB教育者 16天前

急聘物理老师职位

 1. 本科及以上学历，物理相关专业毕业，可双语/全英文…  
育人才资源共享招  
IB教育者 30天前

特缺岗位：物理老师急聘

 ● 【上海】alevel物理老师 (职位编号m4868910000…)  
育人才资源共享招  
IB教育者 2个月前

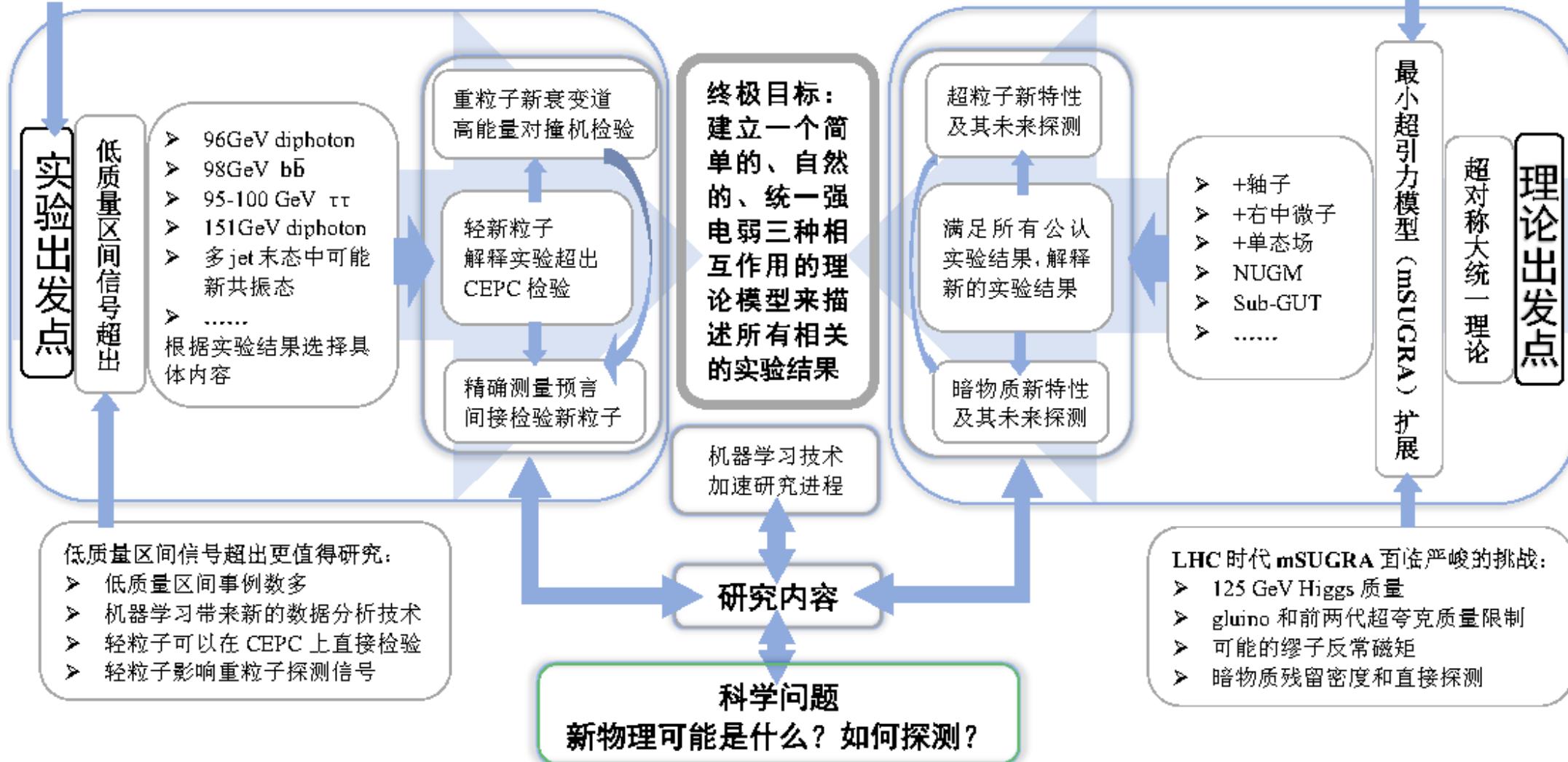
急聘物理老师职位

 2、国际课程物理教学经验，授课思路清晰，善于调动学…  
育人才资源共享招  
IB教育者 2个月前

# 5. 结论与展望



LHC 目前小信号超出众多，不能确定哪个是真的，哪个能引起重大理论突破



# 科研论文到科普视频的转化<sup>1</sup>

## ——以“光子-类轴子传播模式”为例

孟伟<sup>1</sup>, 赵良<sup>1</sup>, 李为超<sup>2</sup>, 朱经亚<sup>1</sup>

(1. 河南大学物理与电子学院, 河南开封 475004; 2. 荆楚理工学院数理学院, 湖北荆门 448000)

**摘要:**高能物理等前沿科学领域的科研成果往往因概念抽象、理论复杂而难以被公众理解,科学传播的“最后一公里”问题突出。本文以“光子-类轴子传播模式”科普视频制作为例,探讨科研论文到科普视频的转化路径与实践策略。研究基于《*Distinct photon-ALP propagation modes*》论文的核心理论,结合PPT动画技术,从理论提炼、内容结构化、视觉符号设计、叙事逻辑构建四个维度解析转化过程,论证了科普视频在降低科学认知门槛、提升公众科学兴趣中的作用,并总结了转化过程中科学性与通俗性平衡、技术工具适配等关键问题,为科研成果科普转化提供了实践参考。

**关键词:**科学传播;科学教育;科普视频;暗物质;类轴子粒子

## From Research Papers to Popular Science Videos: Taking “Photon-ALP Propagation Modes” as an example

MENG Wei<sup>1</sup>, ZHAO Liang<sup>1</sup>, LI Weichao<sup>2</sup>, ZHU Jingya<sup>1</sup>

(1 School of Physics and Electronics, Henan University, Kaifeng, Henan 475004

2 School of Mathematics and Physics, Jingchu University of Technology, Jingmen, Hubei 448000)

**Abstract:** Research achievements in frontier scientific fields such as high-energy physics are often difficult for the public to understand due to their abstract concepts and complex theories, leading to a prominent “last mile” problem in science communication. Taking the production of the popular science video on “photon-axion-like particle (ALP) propagation modes” as a case, this paper explores the transformation path and practical strategies from scientific research papers to popular science videos. Based on the core theory of the paper “*Distinct photon-ALP propagation modes*” and combined with PPT animation technology, this study analyzes the transformation process from four dimensions: theoretical refinement, content structuring, visual symbol design, and narrative logic construction. It demonstrates the role of popular science videos in lowering the cognitive threshold of science and enhancing public interest in science. Furthermore, it summarizes key issues such as balancing scientific rigor with accessibility and adapting technical tools, providing practical references for the transformation of research achievements into popular science communication.

**Key words:** science communication; science education; popular science video; dark matter; axion-like particles

<sup>1</sup>收稿日期: 2025-08-25 (2025年9月西安“物理与工程前沿教育教学创新研讨会”投稿, 视频链接 <https://pan.baidu.com/s/58nGfFvIX0rR3TwkHgQJ7PQ>)  
基金项目: 教育部大学物理教指委大中物理教育衔接工作委员会教学研究课题 (WX202402)、国家自然科学基金 (12275066)、河南大学资助  
作者简介: 孟伟, 男, 河南大学物理与电子学院 2021 级本科生。赵良, 男, 河南大学物理与电子学院 2023 级本科生。李为超, 男, 武汉大学物理学博士, 荆楚理工学院科学教育专业教师。朱经亚, 男, 河南大学物理学教授、博导。黄河学者。

通信作者: 李为超, 朱经亚, E-mail: [zhujy@henu.edu.cn](mailto:zhujy@henu.edu.cn)

引文格式: 孟伟, 李为超, 朱经亚. 科研论文到科普视频的转化——以“光子-类轴子传播模式”为例[J]. 物理与工程, 202X, XX(XX): XX-XX.  
Cite this article: MENG W, LI W C, ZHU J Y. From Research Papers to Popular Science Videos: Taking “Photon-ALP Propagation Modes” as an example [J]. Physics and Engineering, 202X, XX(XX): XX-XX. (in Chinese)

近年来我国基础研究科研群体迅速扩大, 科研论文数量已经跃居世界第一, 但是科学普及方面与发达国家还存在较大差距。希望本文能激发更多科研人员兼顾科普工作, 把更多科研论文进行科普转化, 扩大科研成果传播范围, 共同促进我国科普事业的发展。

*Thanks!*

# *Backup slides*

# 暗物质与恐龙：宇宙万物的互联



## DARK MATTER AND THE DINOSAURS

THE ASTOUNDING  
INTERCONNECTEDNESS OF THE UNIVERSE

### 暗物质与恐龙

宇宙万物的互联

[美]丽莎·兰道尔 著

LISA RANDALL

- 两暗一黑三起源：暗物质、暗能量、黑洞、宇宙起源、天体起源、生命起源
- 著名理论物理学家丽莎·兰道尔女士结合地球上大量陨石坑等观测数据，提出暗物质导致了太阳系外围奥尔特云中小天体周期性撞向地球，从而导致包括恐龙灭绝在内的周期性物种大灭绝的假说。相关成果发表于物理学著名期刊PRL，以及科普畅销书《暗物质与恐龙》。
- 与普通物理知识不同，粒子物理、宇宙学和天体物理学、天体生物学等科学前沿知识难以通过简单实验探究的方式为中小学生所接受，毕业设计《“暗物质与恐龙”动画设计与制作》通过动画的形式，将这一前沿科学理论以生动、直观的方式呈现给公众。

# 科学教育动画设计与制作本科毕业设计要求



物理学院没有动画类毕业设计先例，参考了美术学院本科毕业论文（设计、创作）工作实施细则。

- 动画制作毕业设计包括动画作品和毕业论文两个部分。
- 毕业论文的结构原则上应遵循《河南大学本科生毕业论文（设计、创作）格式规范》，原则上字数不少于4000字，并应插入多个原创图片以展现创新性和充实论文内容。
- 动画作品内容应保证物理正确，有一定的深度和教育意义。

《暗物质与恐龙》动画设计与制作

论文作者姓名 王乐佳

作·者·学·号 2011010034

所·在·学·院 物理与电子学院

所·学·专·业 物理学

导·师·姓·名 朱经亚

导·师·职·称 教授

.....

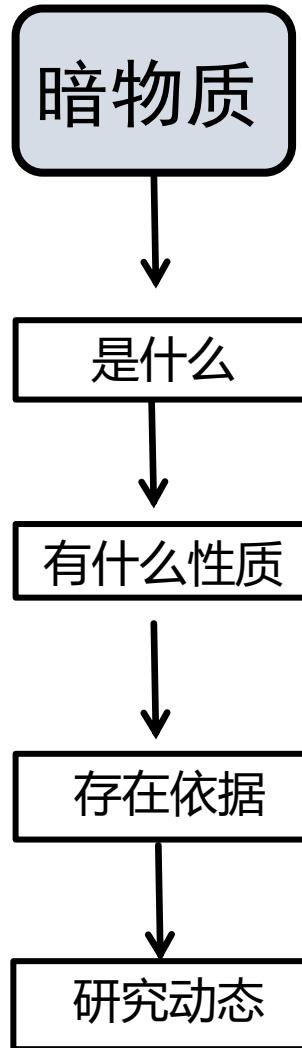
字数统计

统计信息:	
页数	28
字数	12,962
字符数(不计空格)	15,750
字符数(计空格)	16,356
段落数	238
行	565
非中文单词	792
中文字符和朝鲜语单词	12,170

包括文本框、脚注和尾注(F)

关闭

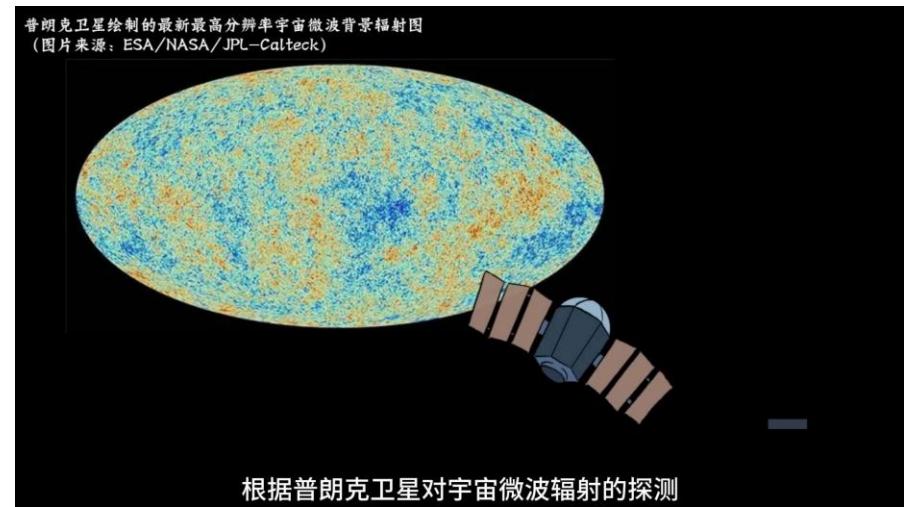
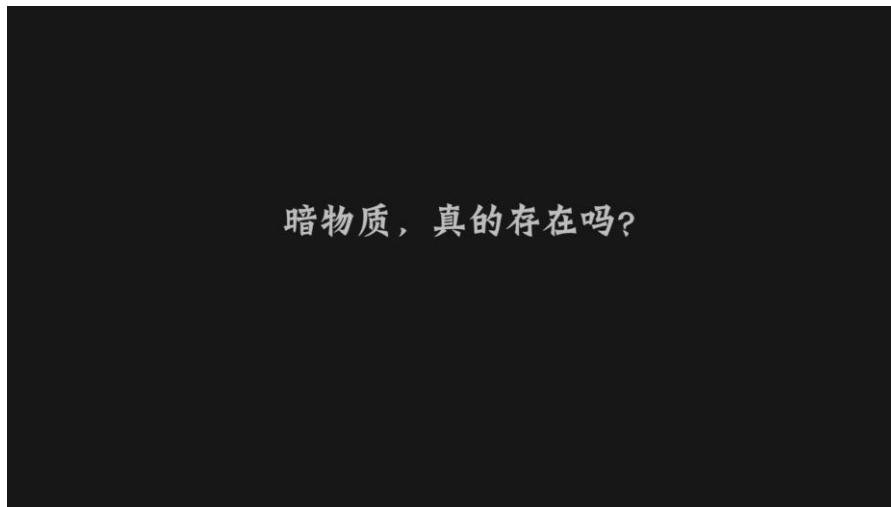
2024年5月16日



暗物质不是黑色的物质



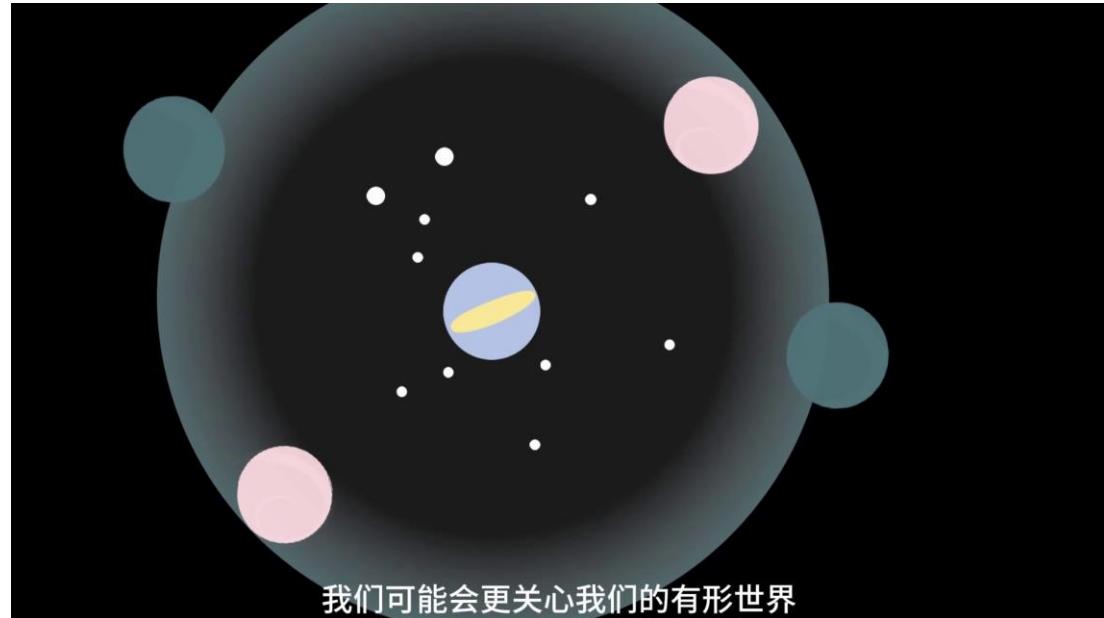
暗物质的存在最初是通过观测星系旋转曲线和星系团的光谱分析推断出来的



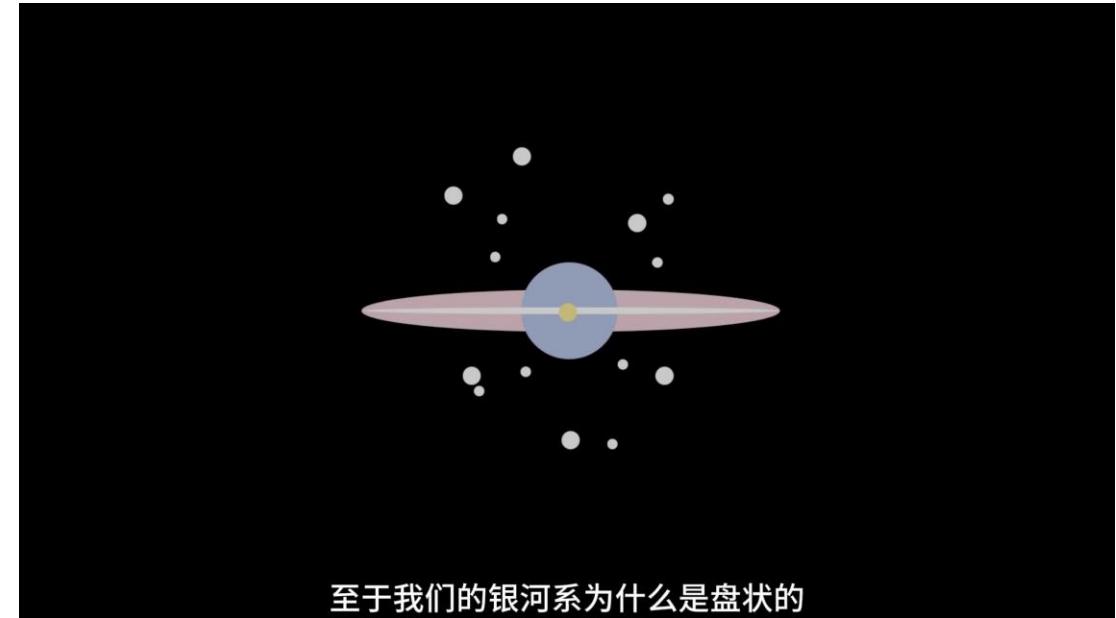
根据普朗克卫星对宇宙微波辐射的探测

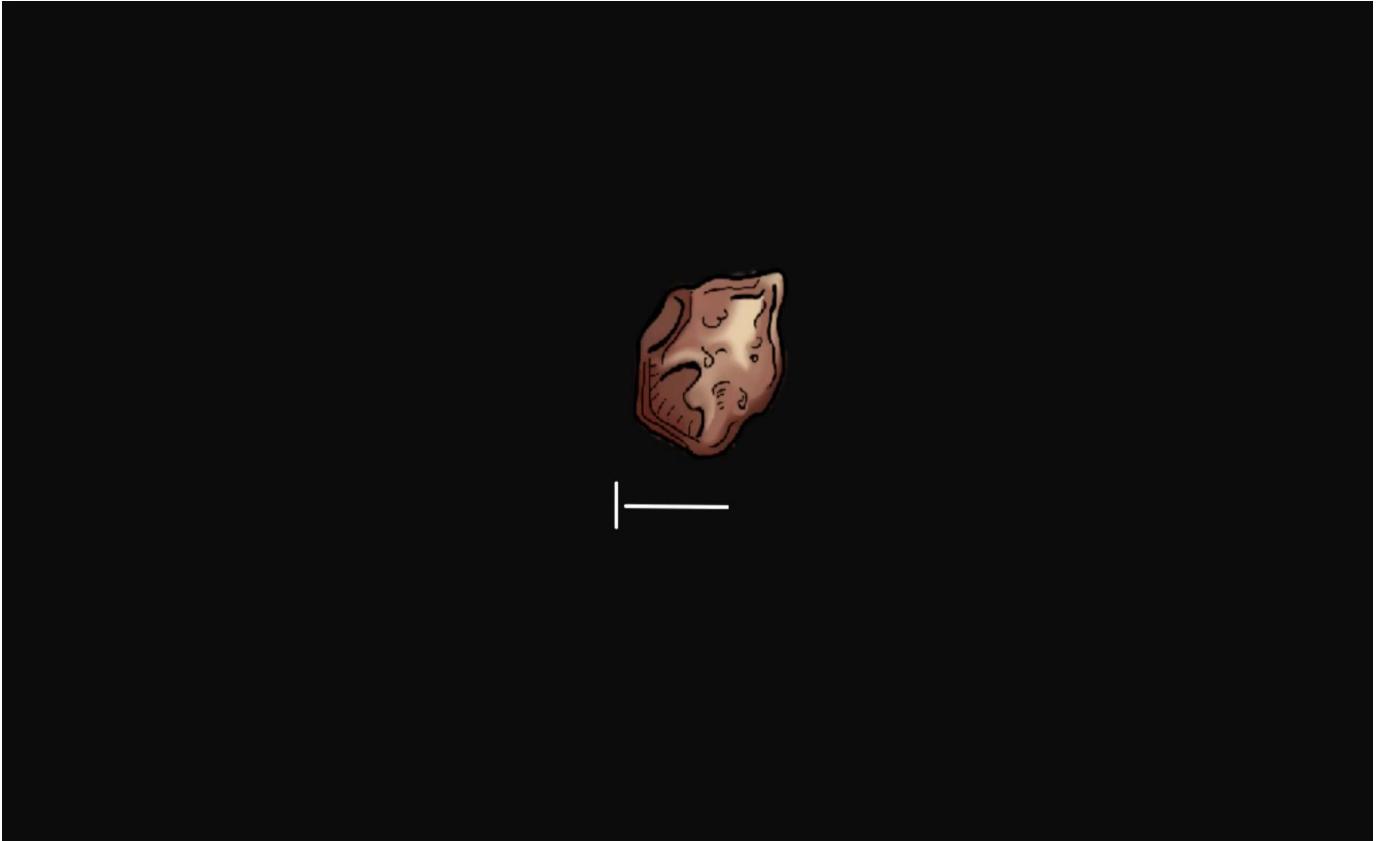
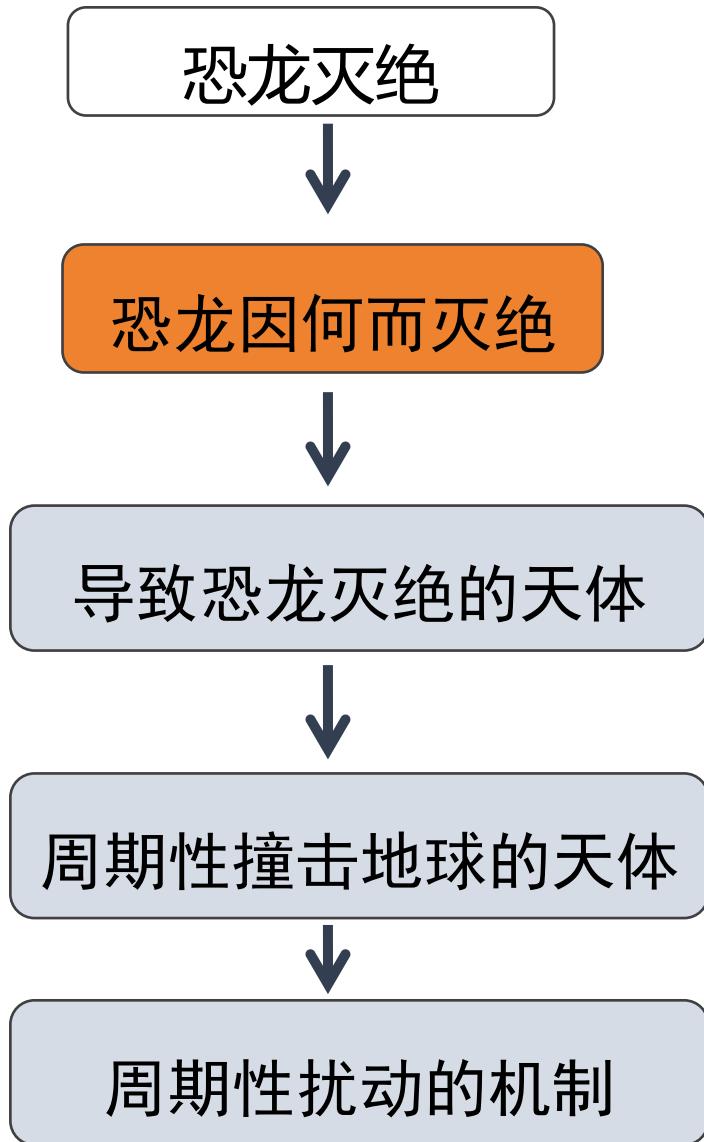


银河系结构



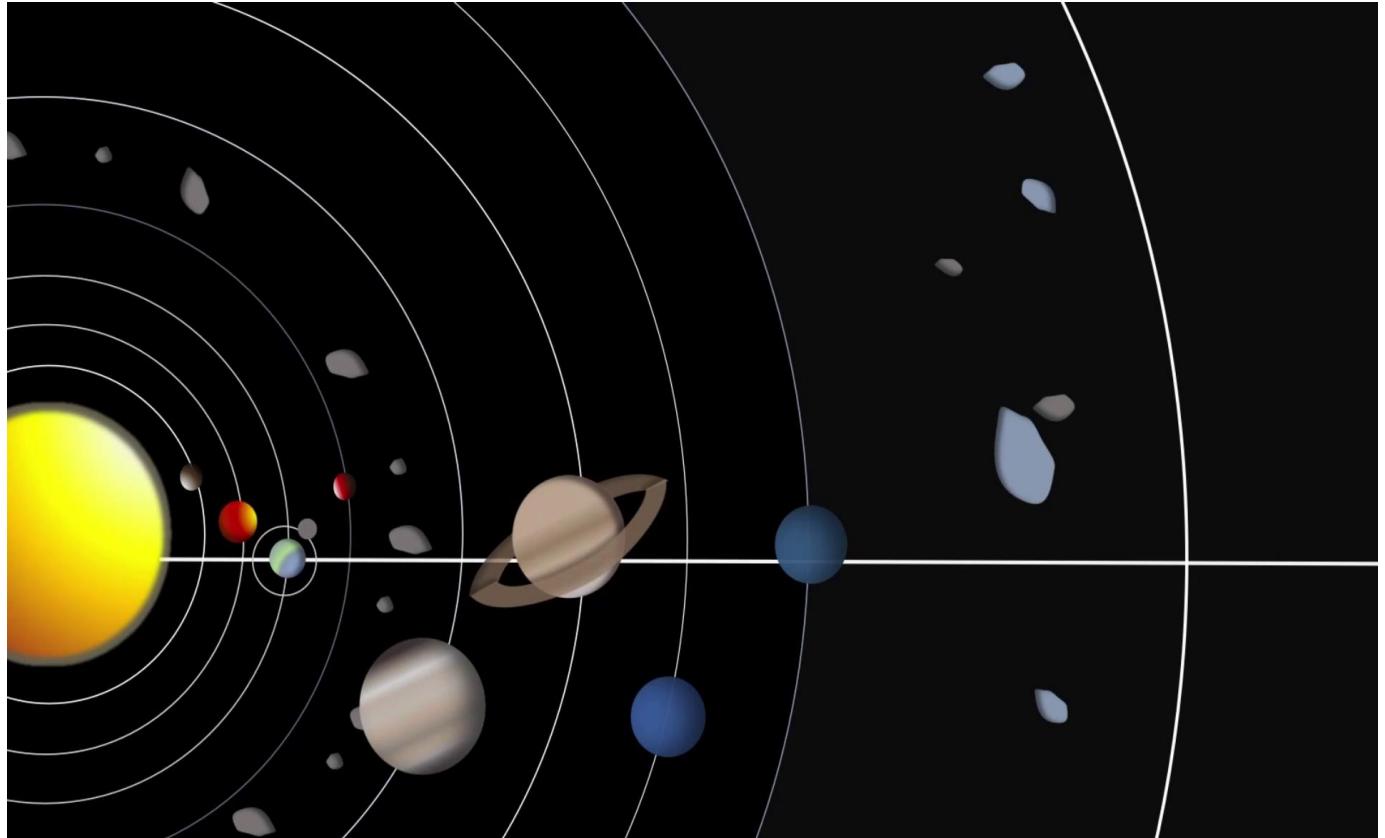
银河系盘状结构成因







撞击地球的  
天体类型



恐龙灭绝



恐龙因何而灭绝



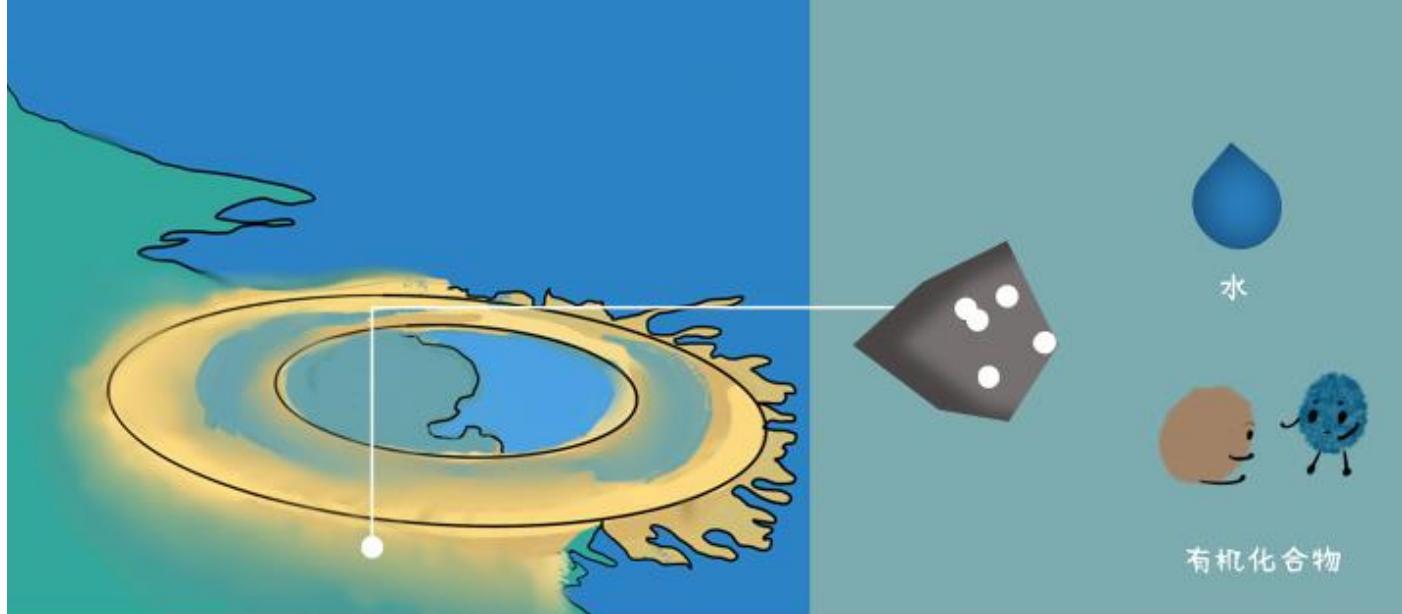
导致恐龙灭绝的天体

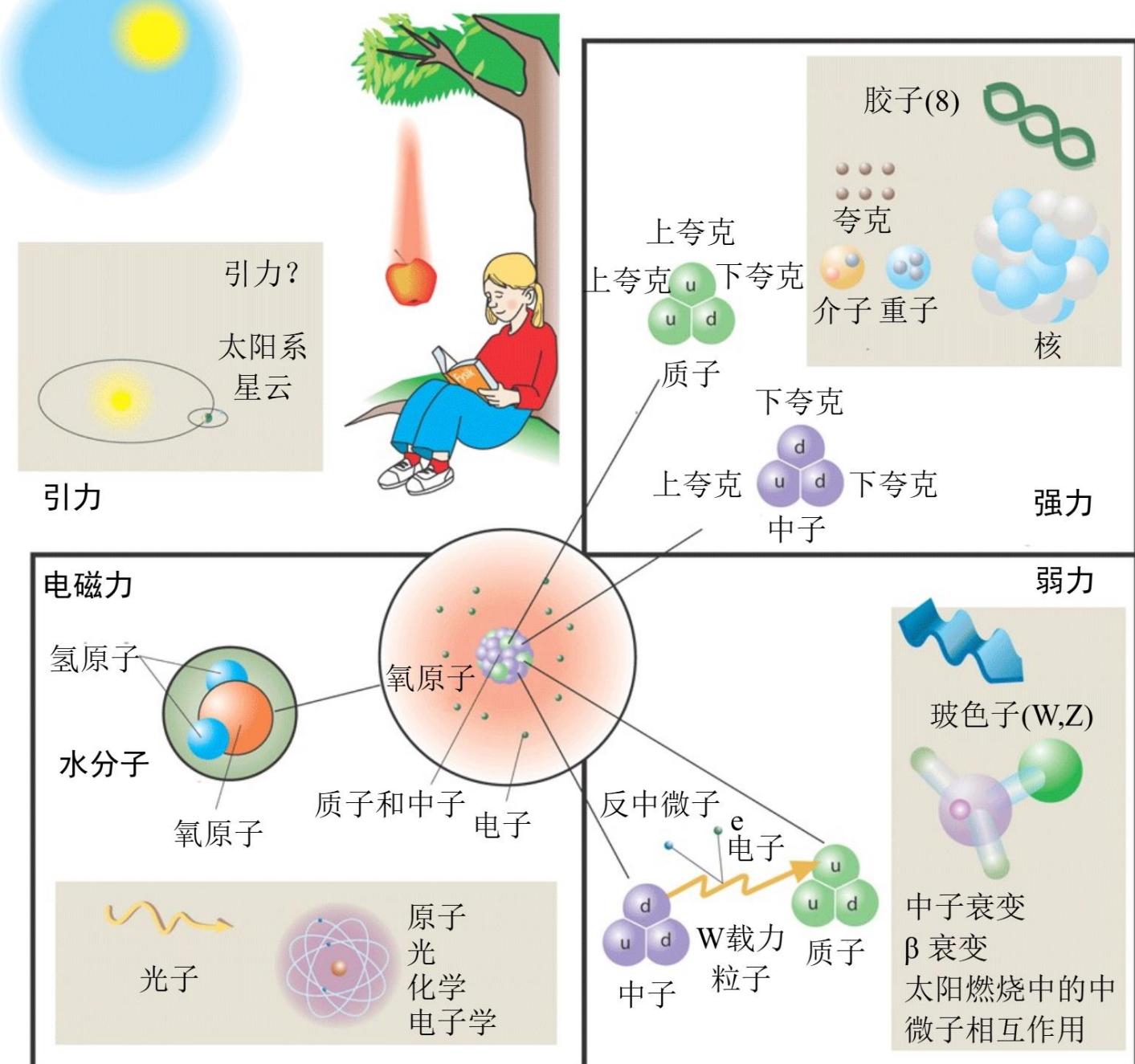


周期性撞击地球的天体



周期性扰动的机制







国家和地方  
科学教育管理与政策

撰写研究论文、政策建议书  
总结和推广培养和管理经验

## 单科专业职前科学教师的跨学科培养 研究

### 跨学科需求分析

中小学生需求  
科学教师需求  
职前教师需求

### 跨学科资源建设

拓展通识课程资源  
制作科学教育视频  
推荐科学阅读材料

### 跨学科培养实践

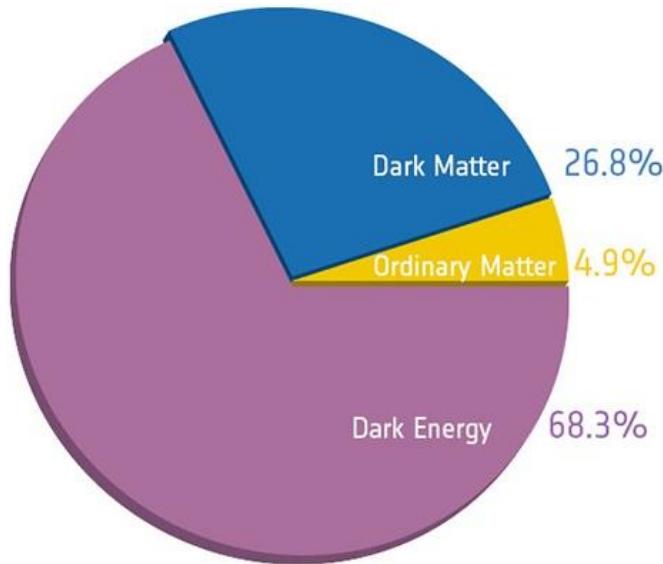
开展课程教学. 知识  
指导项目实践. 能力  
引导阅读探究. 方法

### 培养效果评估

随堂测试&竞赛  
科普短视频大赛  
研讨&教学实习

# The puzzles of SM

## Dark matter



The composition of the universe

other problems

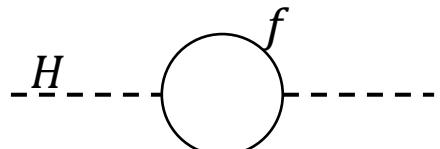
## Hierarchy problem

$$M_P = 2.4 \times 10^{18} \text{ GeV} \quad M_{EW} \approx 10^2 \text{ GeV}$$

$$V = m_H^2 |H|^2 + \lambda |H|^4$$

125 GeV Higgs  
246 GeV VEV

$$m_H^2 = -(92.9 \text{ GeV})^2 \quad \lambda = 0.126$$



$$\Delta m_H^2 = -\frac{|\lambda_f|^2}{8\pi^2} \Lambda_{UV}^2 \quad \Lambda_{UV} \sim M_{Pl}$$

Asymmetry between matter and antimatter,  
the origin of neutrino mass, Great Unification .....

## Muon g-2

SM predict:

$$a_\mu^{\text{SM}} = 116591810(43) \times 10^{-11}$$

Experimental measurement:

$$a_\mu^{\text{exp}} = 116592059(22) \times 10^{-11}$$

Deviation:

$$\Delta a_\mu \equiv a_\mu^{\text{exp}} - a_\mu^{\text{SM}} = (24.9 \pm 4.8) \times 10^{-10}$$

# The SM and SUSY

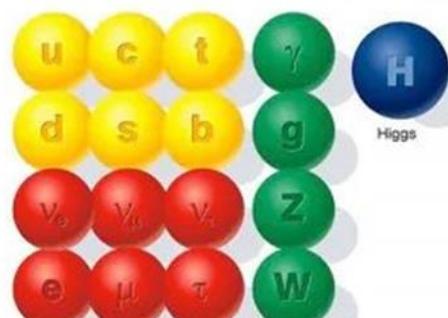


## The supersymmetry

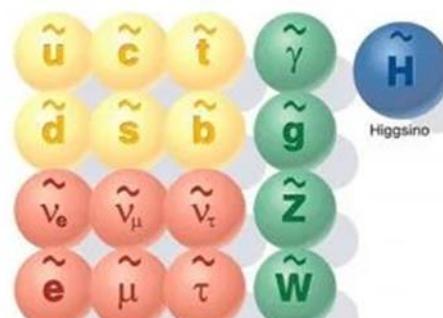
supersymmetry transformation

$$Q|f\rangle = |V\rangle$$

$$Q|V\rangle = |f\rangle$$



● quarks  
● leptons  
● force carriers

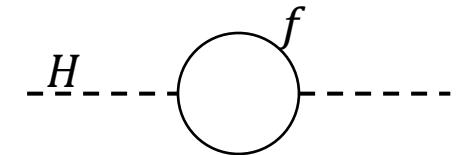


● squarks  
● sleptons  
● SUSY force carriers

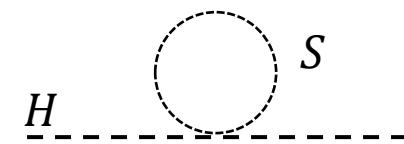
The particles in MSSM

## Chiral supermultiples in MSSM

	Names	spin 0	spin 1/2	
quark squarks	$Q$	$(\tilde{u}_L \tilde{d}_L)$	$(u_L d_L)$	SM
	$\bar{u}$	$\tilde{u}_R^*$	$u_R^\dagger$	
	$\bar{d}$	$\tilde{d}_R^*$	$d_R^\dagger$	
lepton slepton	$L$	$(\tilde{\nu} \tilde{e}_L)$	$(\nu e_L)$	SUSY
	$\bar{e}$	$\tilde{e}_R^*$	$e_R^\dagger$	
higgs higgsinos	$H_u$	$(H_u^+ H_u^0)$	$(\tilde{H}_u^+ \tilde{H}_u^0)$	$\Delta m_H^2 = \frac{1}{8\pi^2} (\lambda_S -  \lambda_f ^2) \Lambda_{UV}^2 + \dots$
	$H_d$	$(H_d^0 H_d^-)$	$(\tilde{H}_d^0 \tilde{H}_d^-)$	



$$-\frac{|\lambda_f|^2}{8\pi^2} \Lambda_{UV}^2$$



$$\frac{\lambda_S}{8\pi^2} \Lambda_{UV}^2$$

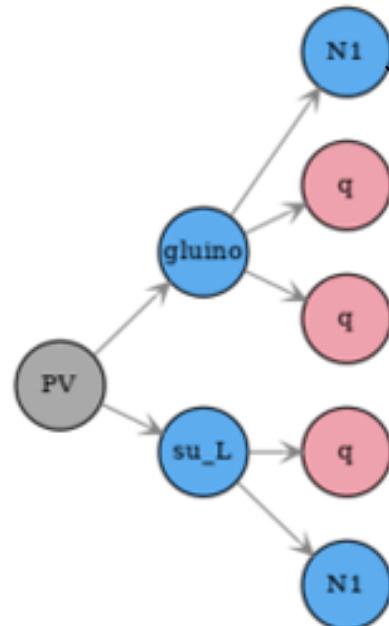
# The SM and SUSY

## The supersymmetry

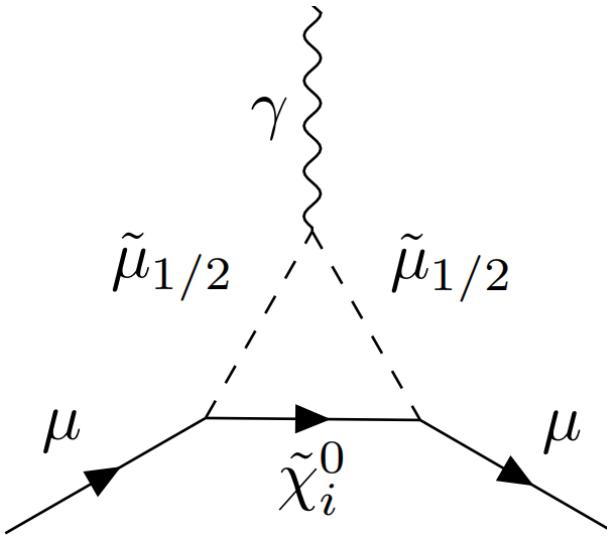
R Parity

SM  $P_R = 1$

SUSY  $P_R = -1$



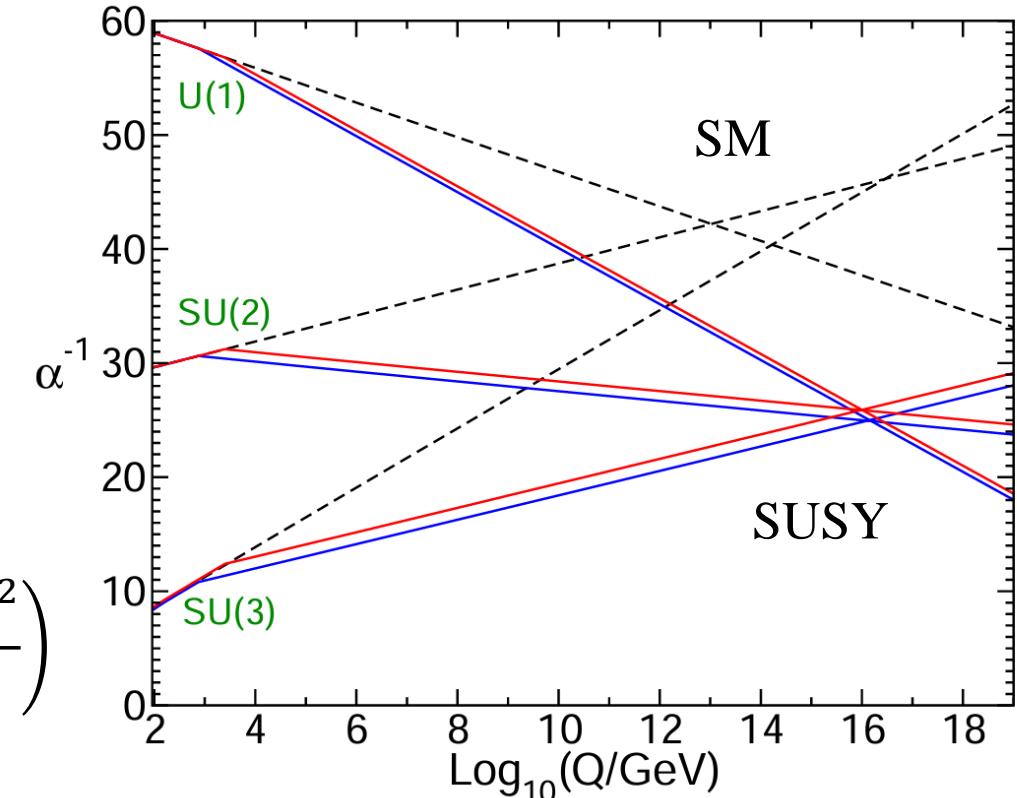
Additional contribution to g-2



$$a_{\mu}^{\tilde{\mu}} = k_0 \left( \frac{\tan\beta \cdot (100 \text{ GeV})^2}{m_{\tilde{\mu}_L}^2 m_{\tilde{\mu}_R}^2 / (M_1 \mu)} \right)$$

DM candidate

arXiv: 9709356



Three coupling versus energy scale

# The SM and SUSY



## MSSM and pMSSM

### The Lagrangian of MSSM

$$\begin{aligned}\mathcal{L}_{\text{SUSY}} = & -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}^a F_a^{\mu\nu} + i\lambda^{\dagger a}\bar{\sigma}^\mu\nabla_\mu\lambda_a + \frac{1}{2}D^a D^a \\ & - \partial^\mu\phi^{*i}\partial_\mu\phi_i + i\psi^{\dagger i}\bar{\sigma}^\mu\partial_\mu\psi_i \\ & - \frac{1}{2}y^{ijk}\phi_i\psi_j\psi_k - \frac{1}{2}y_{ijk}^*\phi^{*i}\psi^{\dagger j}\psi^{\dagger k} \\ & - \frac{1}{2}M^{ij}\psi_i\psi_j - \frac{1}{2}M_{ij}^*\psi^{\dagger i}\psi^{\dagger j} - V(\phi, \phi^*) \\ & - \sqrt{2}g(\phi^*T^a\psi)\lambda^a - \sqrt{2}g\lambda^{\dagger a}(\psi^{\dagger}T^a\phi) + g(\phi^*T^a\phi)D^a.\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\mathcal{L}_{\text{soft}} = & -\frac{1}{2}\left(M_3\tilde{g}\tilde{g} + M_2\tilde{W}\tilde{W} + M_1\tilde{B}\tilde{B} + \text{c.c.}\right) \\ & - \left(\tilde{\tilde{u}}\mathbf{a}_u\tilde{Q}H_u - \tilde{\tilde{d}}\mathbf{a}_d\tilde{Q}H_d - \tilde{\tilde{e}}\mathbf{a}_e\tilde{L}H_d + \text{c.c.}\right) \\ & - \tilde{Q}^\dagger\mathbf{M}_Q^2\tilde{Q} - \tilde{L}^\dagger\mathbf{M}_L^2\tilde{L} - \tilde{\tilde{u}}\mathbf{M}_{\tilde{u}}^2\tilde{\tilde{u}}^\dagger - \tilde{\tilde{d}}\mathbf{M}_{\tilde{d}}^2\tilde{\tilde{d}}^\dagger - \tilde{\tilde{e}}\mathbf{M}_{\tilde{e}}^2\tilde{\tilde{e}}^\dagger \\ & - m_{H_u}^2H_u^*H_u - m_{H_d}^2H_d^*H_d - (bH_uH_d + \text{c.c.}).\end{aligned}$$

more than 100

Mass terms  
Trilinear couplings

New parameters

The parameter of pMSSM

$\tan\beta$   
 $m_{H_u}^2, m_{H_d}^2$   
 $M_1, M_2, M_3$   
 $m_{\tilde{q}}, m_{\tilde{u}_R}, m_{\tilde{d}_R}, m_{\tilde{l}}, m_{\tilde{e}_R}$   
 $m_{\tilde{Q}}, m_{\tilde{t}_R}, m_{\tilde{b}_R}, m_{\tilde{L}}, m_{\tilde{\tau}_R}$   
 $A_u, A_d, A_e$   
 $A_t, A_b, A_\tau$

The assuming of pMSSM

1. All the soft SUSY-breaking parameters are real.
2. The matrices for the sfermion masses and the trilinear couplings are all diagonal.
3. First and second sfermion generation universality at low energy.

# The mSUGRA/CMSSM and its extension



## CMSSM and its extension

The assuming of CMSSM

$$M_1 = M_2 = M_3 = m_{1/2}$$

bino  $\downarrow$  wino  $\downarrow$  gluino

$$m_{\tilde{Q}_i} = m_{\tilde{L}_i} = m_{\tilde{H}_i} = M_0$$

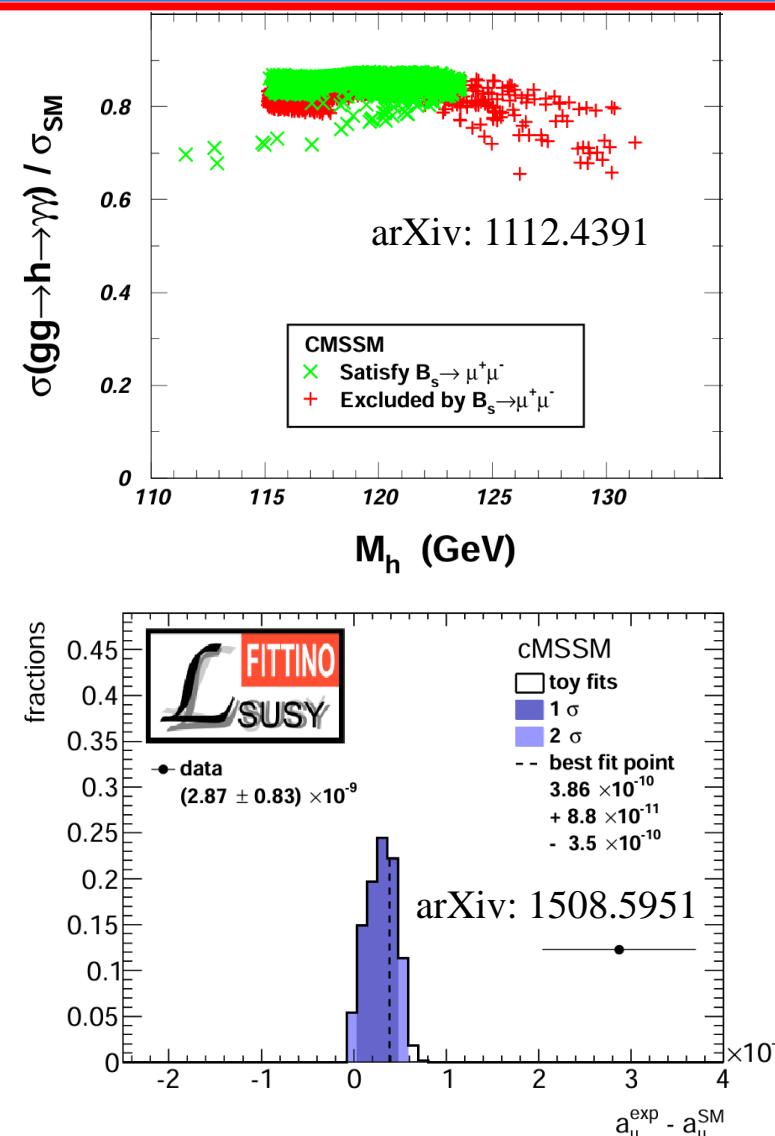
squark  $\downarrow$  slepton  $\downarrow$  Higgsino

$$A_{ij}^u = A_{ij}^d = A_{ij}^l = A_0$$

$\downarrow$   $\downarrow$   $\downarrow$   
trilinear couplings

$m_{1/2}, m_0, A_0, \tan\beta, \text{sign}(\mu)$

The five free parameters in CMSSM



The extension

Non-universal gaugino masses

$$M_1 \neq M_2 \neq M_3 \neq m_{1/2}$$

Non-universal slepton masses

$$m_{\tilde{L}_i} \neq m_{\tilde{L}_{R_i}} \neq M_0$$

Non-universal squark masses

$$m_{\tilde{u}_{R_i}} \neq m_{\tilde{d}_{R_i}} \neq M_0$$

Non-universal Higgsino masses

$$m_{H_u} \neq m_{H_d} \neq M_0$$

- Higgs data restricts the parameter space by requiring  $\tan\beta \geq 5$  and  $M_0 \geq 20\tan\beta$  GeV. Moreover, negative  $M_3$  typically favors a lighter Higgs boson, whereas positive  $M_3$  tends to yield a heavier one.
- Small values of  $|A_0|$ ,  $M_3$ , and  $M_0$  tend to provide a larger contribution to  $\Delta a_\mu$ . In particular, a sample with  $M_0 \sim 250$  GeV,  $|A_0| \leq 1$  TeV,  $M_3 \sim 4$  TeV, and  $\tan\beta \sim 10$  yields a sizable contribution to  $\Delta a_\mu$  ( $\sim 2.1 \times 10^{-9}$ ).
- The lightest neutralino  $\tilde{\chi}_1^0$  is predominantly wino-like when  $M_1/M_2 \geq 1.5$ , bino-like when  $M_1/M_2 \leq 1.5$ , and wino-bino mixing when  $M_1/M_2 \approx 1.5$ .
- The main dominant annihilation mechanisms are  $\tilde{\tau}\tilde{\chi}_1^0$ ,  $\tilde{\chi}_1^0\tilde{\chi}_1^\pm$ ,  $\tilde{\chi}_1^\pm\tilde{\chi}_1^0$ ,  $\tilde{\chi}_1^0$  annihilation.  $\tilde{\chi}_1^0\tilde{\chi}_1^\pm$  coannihilation can hardly generate a large dark matter relic density.
- Direct searches for SUSY particles impose strong constraints on wino-like samples. When the integral luminosity of the HL-LHC reaches  $3 \text{ ab}^{-1}$  and CLIC<sub>1500</sub> achieves  $2.5 \text{ ab}^{-1}$ , all samples can be fully covered by collider experiments.

# Conclusions



## Trilinear couplings

$$\frac{dA_u^i}{dt} = -\frac{1}{32\pi^2} \left[ 6A_u^i(Y_u^i)^2 + 2A_d^i(Y_d^i)^2 + 6 \sum_k A_u^k(Y_u^k)^2 - \left( \frac{26}{15}g_1^2M_1 + 6g_2^2M_2 + \frac{32}{3}g_3^2M_3 \right) \right]$$

$$\frac{dA_d^i}{dt} = -\frac{1}{32\pi^2} \left[ 6A_d^i(Y_d^i)^2 + 2A_u^i(Y_u^i)^2 + 2 \sum_k \{A_l^k(Y_l^k)^2 + 3A_d^k(Y_d^k)^2\} - \left( \frac{14}{15}g_1^2M_1 + 6g_2^2M_2 + \frac{32}{3}g_3^2M_3 \right) \right]$$

$$\frac{dA_l^i}{dt} = -\frac{1}{32\pi^2} \left[ 6A_l^i(Y_l^i)^2 + 2 \sum_k \{A_l^k(Y_l^k)^2 + 3A_d^k(Y_d^k)^2\} - 6(g_1^2M_1 + g_2^2M_2) \right]$$

## Slepton masses

$$\begin{aligned} \frac{dm_{\tilde{l}_{R_i}}^2}{dt} &= -\frac{1}{16\pi^2} \left[ 2(Y_l^i)^2 P_l^i + g_1^2 \text{Tr}(Ym^2) - 4g_1^2 M_1^2 \right] \\ \frac{dm_{\tilde{l}_i}^2}{dt} &= -\frac{1}{16\pi^2} \left[ (Y_l^i)^2 P_l^i - \frac{1}{2}g_1^2 \text{Tr}(Ym^2) - (g_1^2 M_1^2 + 3g_2^2 M_2^2) \right] \\ \frac{dm_{\tilde{d}_{R_i}}^2}{dt} &= -\frac{1}{16\pi^2} \left[ 2(Y_d^i)^2 P_d^i + \frac{1}{3}g_1^2 \text{Tr}(Ym^2) - \left( \frac{4}{15}g_1^2 M_1^2 + \frac{16}{3}g_3^2 M_3^2 \right) \right] \\ \frac{dm_{\tilde{u}_{R_i}}^2}{dt} &= -\frac{1}{16\pi^2} \left[ 2(Y_u^i)^2 P_u^i - \frac{2}{3}g_1^2 \text{Tr}(Ym^2) - \left( \frac{16}{15}g_1^2 M_1^2 + \frac{16}{3}g_3^2 M_3^2 \right) \right] \\ \frac{dm_{\tilde{Q}_i}^2}{dt} &= -\frac{1}{16\pi^2} \left[ (Y_u^i)^2 P_u^i + (Y_d^i)^2 P_d^i + \frac{1}{6}g_1^2 \text{Tr}(Ym^2) - \left( \frac{1}{15}g_1^2 M_1^2 + 3g_2^2 M_2^2 + \frac{16}{3}g_3^2 M_3^2 \right) \right] \end{aligned}$$

arXiv: 9308335

# Conclusions



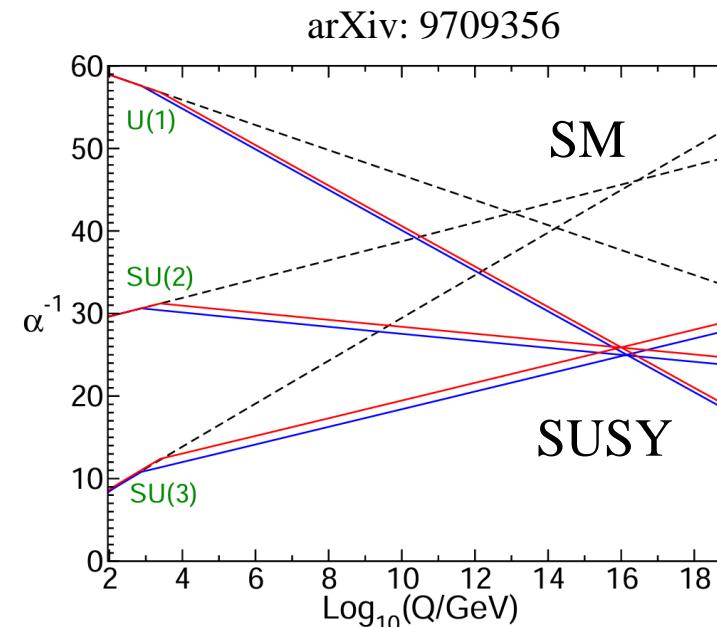
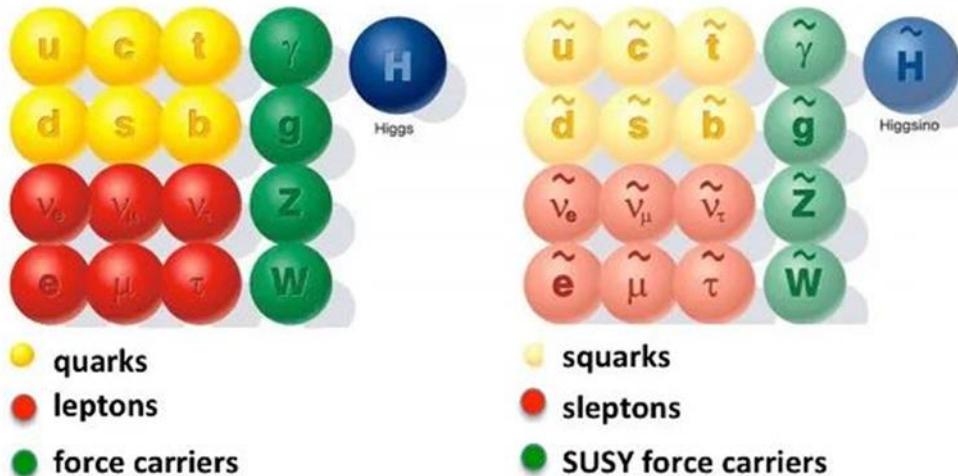
- Stau annihilation :  $\tilde{\tau}_1^+ \tilde{\tau}_1^- \rightarrow hh, W^+W^-, t\bar{t}, \tilde{\tau}_1^+ \tilde{\tau}_1^- \rightarrow \tau^+ \tau^-$ .
  - Neutralino-stau coannihilation :  $\tilde{\chi}_1^0 \tilde{\tau}_1^\pm \rightarrow \tau^\pm h/A$ .
  - Neutralino annihilation :  $\tilde{\chi}_1^0 \tilde{\chi}_{1,2}^0 \rightarrow W^+W^-$ .
  - Neutralino-chargino coannihilation :  $\tilde{\chi}_{1,2}^0 \tilde{\chi}_1^\pm \rightarrow u\bar{d}, c\bar{s}, t\bar{b}$ .
  - Chargino annihilation :  $\tilde{\chi}_1^+ \tilde{\chi}_1^- \rightarrow W^+W^-$ .
- 
- $\tilde{\tau} \tilde{\chi}_1^0$  coannihilation: the primary channels are stau annihilation and neutralino-stau coannihilation.
  - $\tilde{\chi}_1^0 \tilde{\chi}_1^\pm$  coannihilation: the major channels are neutralino-chargino coannihilation and neutralino annihilation.
  - $\tilde{\chi}_1^\pm \tilde{\chi}_1^0$  coannihilation: the main channels are chargino annihilation and neutralino-chargino coannihilation.
  - $\tilde{\chi}_1^0$  annihilation: the dominant channel is neutralino annihilation.

# The SM and SUSY



## MSSM and CMSSM

### The particles in MSSM



Soft breaking parameters

Mass terms  
Trilinear couplings  
Phase angle

New parameters

Over 100

Three coupling strength versus energy scale

The five free parameters in CMSSM

$m_{1/2}, m_0, A_0, \tan\beta, \text{sign}(\mu)$

$$\begin{array}{c}
 M_1 = M_2 = M_3 = m_{1/2} \\
 \text{bino} \quad \downarrow \quad \text{wino} \quad \downarrow \quad \text{gluino} \\
 m_{\tilde{Q}_i} = m_{\tilde{L}_i} = m_{\tilde{H}_i} = M_0 \\
 \text{squark} \quad \downarrow \quad \text{slepton} \quad \downarrow \quad \text{Higgsino}
 \end{array}$$

$$A_{ij}^u = A_{ij}^d = A_{ij}^l = A_0$$

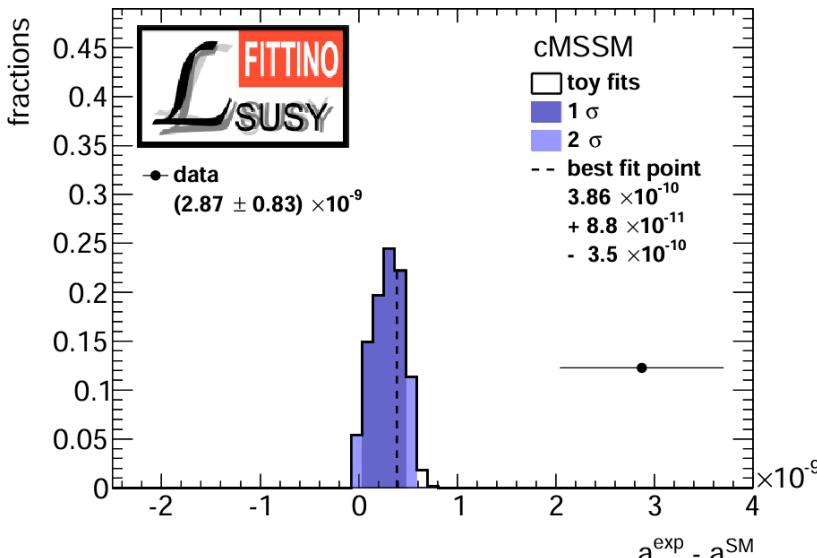
# The CMSSM and its extension



## CMSSM and its extension

### The puzzle of CMSSM

arXiv: 1508.5951



Muon anomalous magnetic moment

### Non-universal gaugino masses

$$M_1 \neq M_2 \neq M_3 \neq m_{1/2}$$

### Non-universal slepton masses

$$m_{\tilde{L}_i} \neq m_{\tilde{l}_{R_i}} \neq M_0$$

### Non-universal squark masses

$$m_{\tilde{u}_{R_i}} \neq m_{\tilde{d}_{R_i}} \neq M_0$$

### Non-universal Higgs masses

$$m_{H_u} \neq m_{H_d} \neq M_0$$

free parameters

$$M_1, M_2, M_3, M_0, A_0, \tan\beta, \text{sign}(\mu)$$

$\tilde{g}$ -SUGRA

$$M_3 \gg M_1, M_2$$

Predict heavy gluino and squark to escape constraints

Give light wino bino to satisfy other observed results