



# 粒子与核物理理论2022年度进展汇报

报告人：葛韶锋

2023年1月6日

教育部粒子与天体物理重点实验室  
上海市粒子物理和宇宙学重点实验室  
2022年学术委员会会议



上海交通大学  
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY

# 报告提纲



- **粒子与核物理理论团队简介**
- 代表性成果1：核结构与核天体物理
- 代表性成果2：暗物质、中微子
- 代表性成果3：格点、部分子、夸克胶子等离子体
- 代表性成果4：电弱相变规范不变性、弦理论



# 粒子与核物理理论团队



季向东



何小刚



何红建



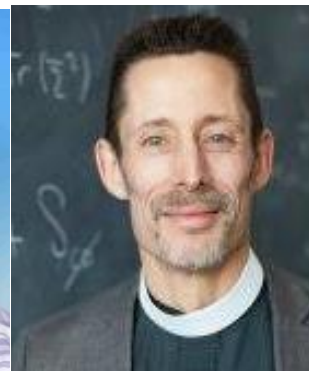
孙扬



赵玉民



陈列文



Ramsey-  
Musolf



Yanagid  
a



王伟



高俊



葛韶锋



Nakai



Evans



颜开

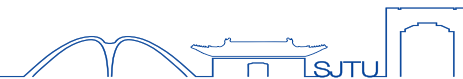


韩君



孙艺锋

# 新引进人才



## 韩君

### 研究方向:

致密物质  
中子星  
核天体物理  
多信使天文学

### 教育背景:

2009-2015 圣路易斯华盛顿大学, 博士  
2005-2009 上海交通大学, 学士

### 工作经历:

2022-至今 李政道研究所, 李政道学者  
2020-2022 伯克利/华盛顿大学, N3AS学者  
2018-2020 伯克利/俄亥俄大学, N3AS学者  
2015-2018 田纳西大学/橡树岭国家实验室, 博士后



## 孙艺锋

### 研究方向:

理论核物理  
高能重离子碰撞  
夸克胶子等离子体  
重味夸克物理

### 教育背景:

2012-2017 美国 Texas A&M University, 博士  
2008-2012 华中科技大学, 学士

### 工作经历:

2022-至今 上海交通大学, 长聘教轨副教授  
2020-2021 意大利 University of Catania, 博士后  
2018-2020 意大利南方国家实验室(INFN), 博士后  
2018 美国 Texas A&M University, 博士后

# 报告提纲

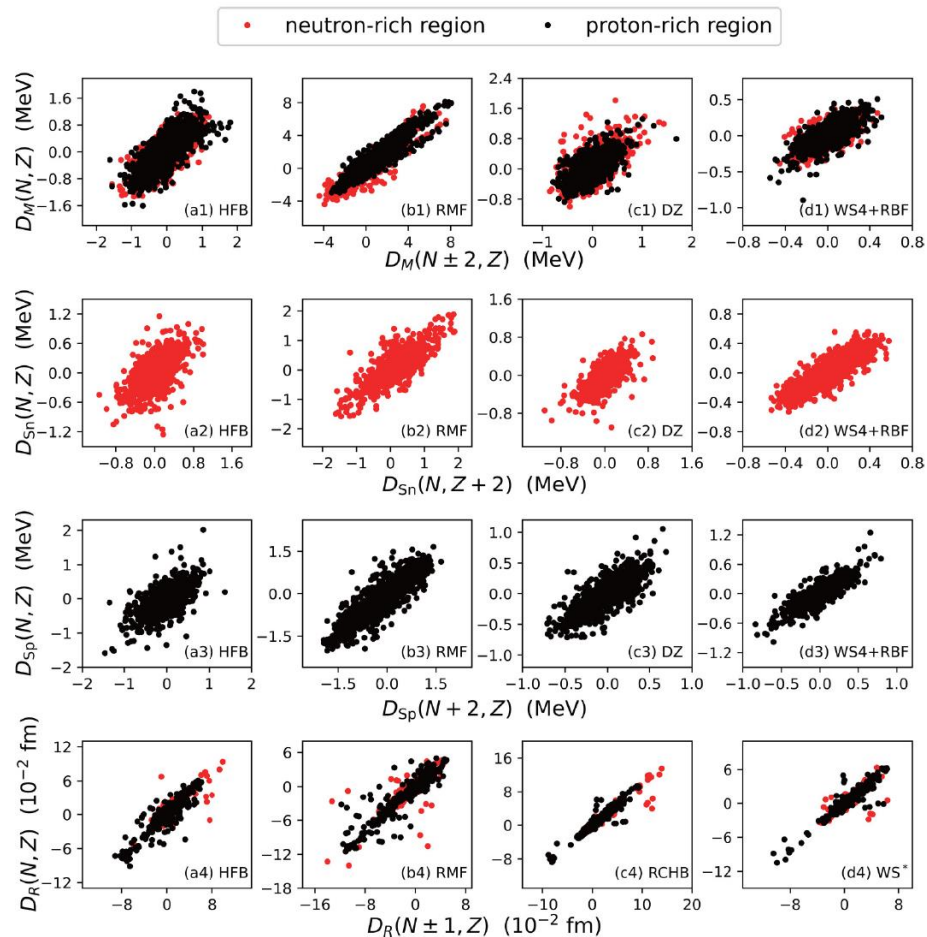
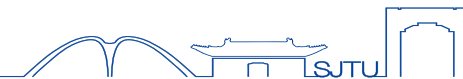


- 粒子与核物理理论团队简介
- **代表性成果1：核结构与核天体物理**
- 代表性成果2：暗物质、中微子
- 代表性成果3：格点、部分子、夸克胶子等离子体
- 代表性成果4：电弱相变规范不变性、弦理论

# 原子核质量关系

R. Shou, X. Yin, C. Ma, M. Q. Lin, and Y. M. Zhao Phys. Rev. C  
106, L061304

赵玉民研究组

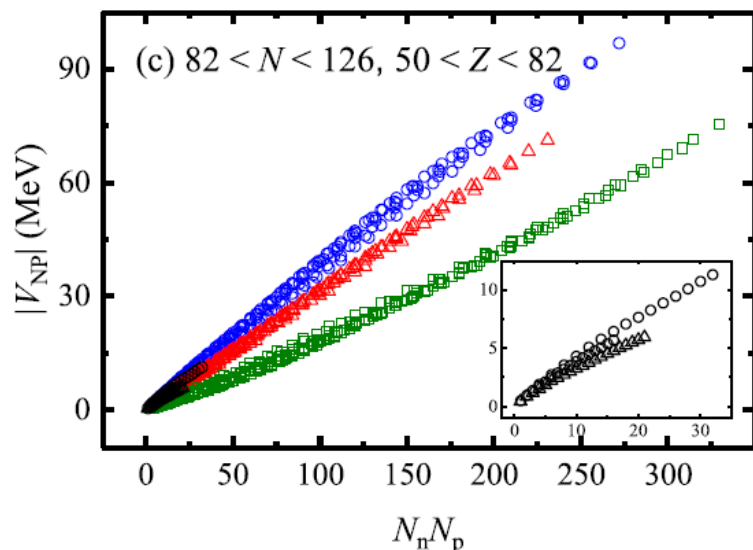


model	type	$\lambda_M$	$r_M$	$\sigma_M$	$\sigma_M^{\text{pred}}$	$\lambda_S$	$r_S$	$\sigma_S$	$\sigma_S^{\text{pred}}$
HFB31	N	0.76	0.74	464	318	0.63	0.60	342	275
	P			497	331			372	276
DZ	N	0.78	0.67	400	305	0.75	0.70	260	186
	P			313	226			248	155
RMF	N	0.97	0.93	1840	843	0.78	0.81	592	342
	P			2535	737			789	346
WS4+RBF	N	0.75	0.75	150	104	0.84	0.84	229	123
	P			155	101			236	121
RCHB	N								
	P								
WS*	N								
	P								

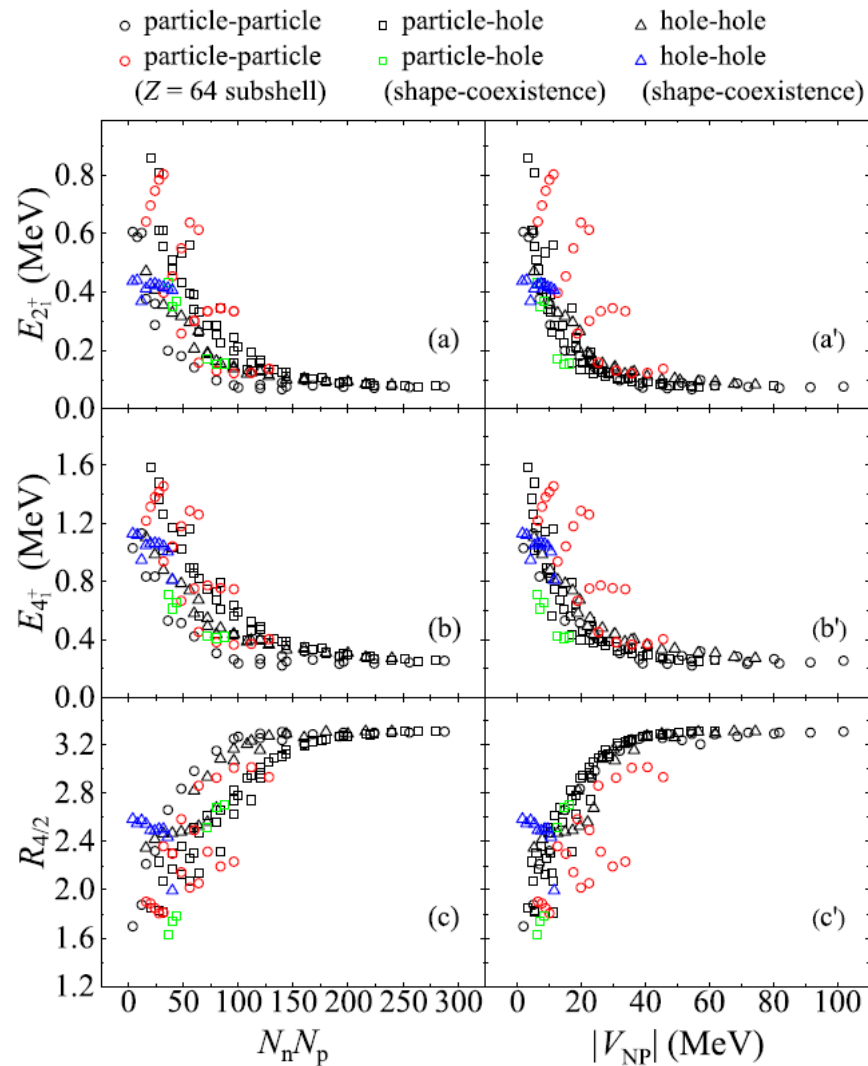
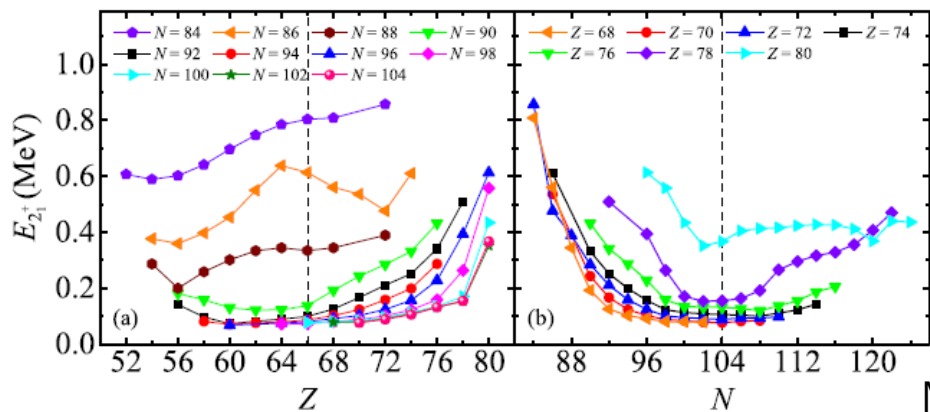
通过仅引入一个参数，以描述理论计算值和实验数据偏差之间的关联，可以显著改善两者之间的符合程度。

# 中子-质子相互作用强度

赵玉民研究组



通过重建中子-质子相互作用强度，去除核结构演化中的不对称和反常。所有的特征实际上都可以由尺寸效应解释！



M. Q. Lin, C. Ma, and Y. M. Zhao  
Phys. Rev. C 105 (2022), L021305

# 提出用超新星中微子精确确定原子核中子皮

陈列文研究组

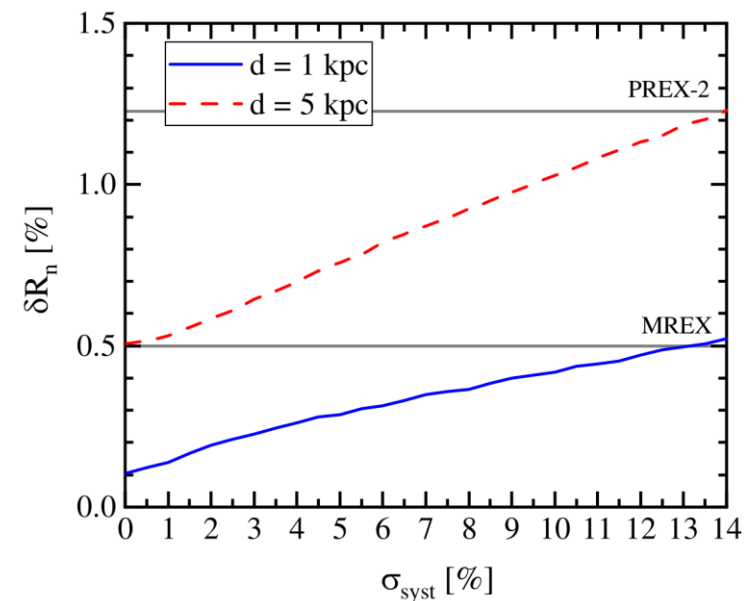
PHYSICAL REVIEW D **106**, 123034 (2022)

## Supernova neutrinos as a precise probe of nuclear neutron skin

Xu-Run Huang and Lie-Wen Chen\*

School of Physics and Astronomy, Shanghai Key Laboratory for Particle Physics and Cosmology,  
and Key Laboratory for Particle Astrophysics and Cosmology (MOE),  
Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

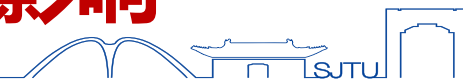
RES-NOVA是利用考古铅低温探测器阵列 (archaeological Pb based cryogenic detectors)来探测超新星中微子的一个实验项目。我们提出可以利用核塌缩型超新星中微子与铅原子核的弹性相干散射来测量铅原子核的弱荷形状因子，从而精确确定铅原子核的中子分布半径及中子皮厚度。结果表明，核塌缩型超新星如果足够近( $\sim 1\text{kpc}$ )，则测得的中子皮精度可以远高于地面实验(包括下一代实验MREX)的测量精度，理想情况下可以达到 $\sim 0.1\%$ 。



图：利用RES-NOVA探测器和理论预言的近距离(1kpc和5kpc)核塌缩型超新星中微子束流得到的铅原子核中子半径的相对误差随实验系统误差的变化关系。图中指出了PREX-2以及未来MREX实验精度。

# 揭示同位旋矢量-标量 $\delta$ 介子对 neutron 星结构的重要影响

陈列文研究组



THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 929:183 (7pp), 2022 April 20



<https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac5e2a>

© 2022. The Author(s). Published by the American Astronomical Society.

OPEN ACCESS



## Effects of Isoscalar- and Isvector-scalar Meson Mixing on Neutron Star Structure

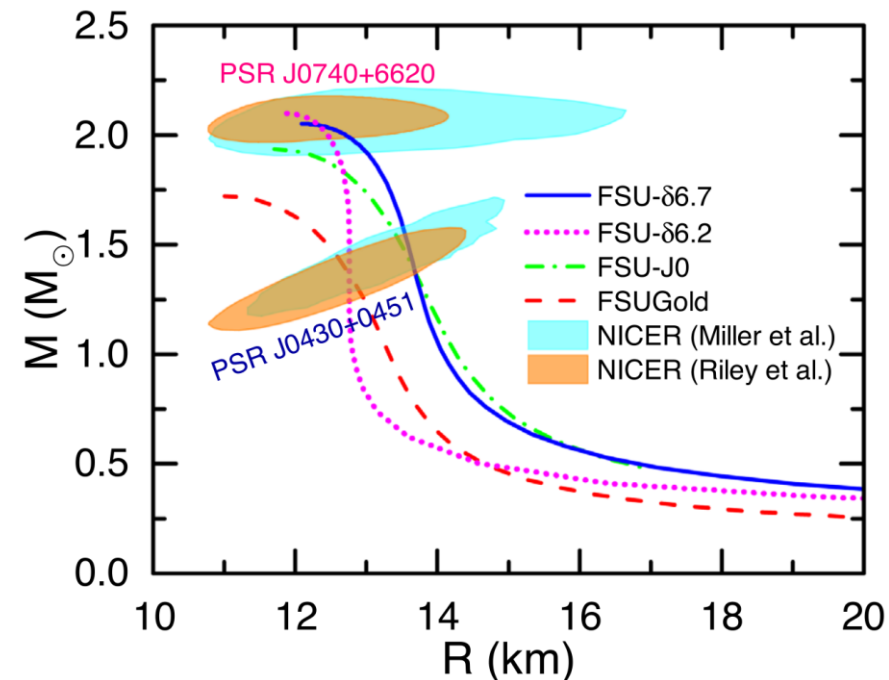
Fan Li<sup>1</sup>, Bao-Jun Cai<sup>2</sup>, Ying Zhou<sup>2</sup>, Wei-Zhou Jiang<sup>3</sup> , and Lie-Wen Chen<sup>1,4</sup> 

<sup>1</sup> School of Physics and Astronomy, Shanghai Key Laboratory for Particle Physics and Cosmology, and Key Laboratory for Particle Astrophysics and Cosmology (MOE), Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, People's Republic of China; [lwchen@sjtu.edu.cn](mailto:lwchen@sjtu.edu.cn)

<sup>2</sup> Quantum Machine Learning Laboratory, Shadow Creator Inc., Shanghai 201208, People's Republic of China

<sup>3</sup> School of Physics, Southeast University, Nanjing 211189, People's Republic of China

同位旋矢量-标量 $\delta$ 介子[ $a_0(980)$ ]与同位旋标量-标量 $\sigma$ 介子混合可以使核物质对称能在高密度时变硬而在中等密度时变软，因此可以处理原有相对论平均场模型中PREX-II中子皮实验与GW170817引力波观测间的矛盾。这些结果表明，重介子 $\delta$ 虽然对核结构影响较小，但对中子星等高密、高同位旋条件下的物质系统的性质有重要影响。



图：基于FSU-Gold、FSU-J0、FSU- $\delta 6.2$ 及FSU- $\delta 6.7$ 计算的中子星质量半径关系。图中橙色及蓝色区域为NICER对PSR J0740+6620及PSR J0430+0451观测给出的限制（68%置信区间）。

# 报告提纲



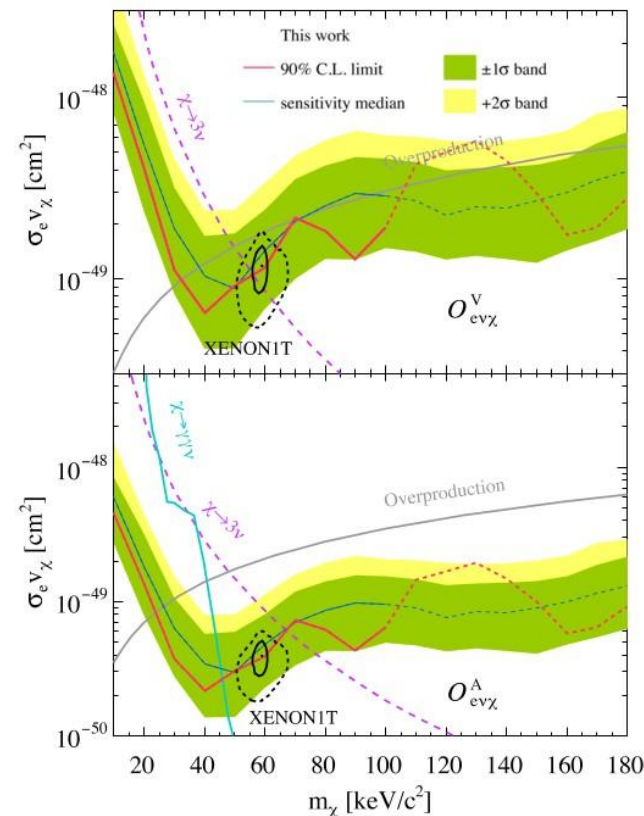
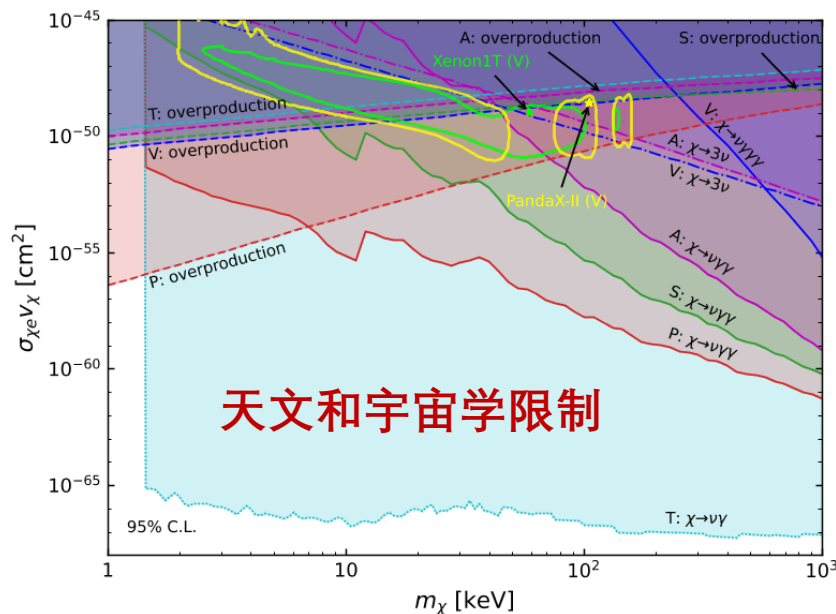
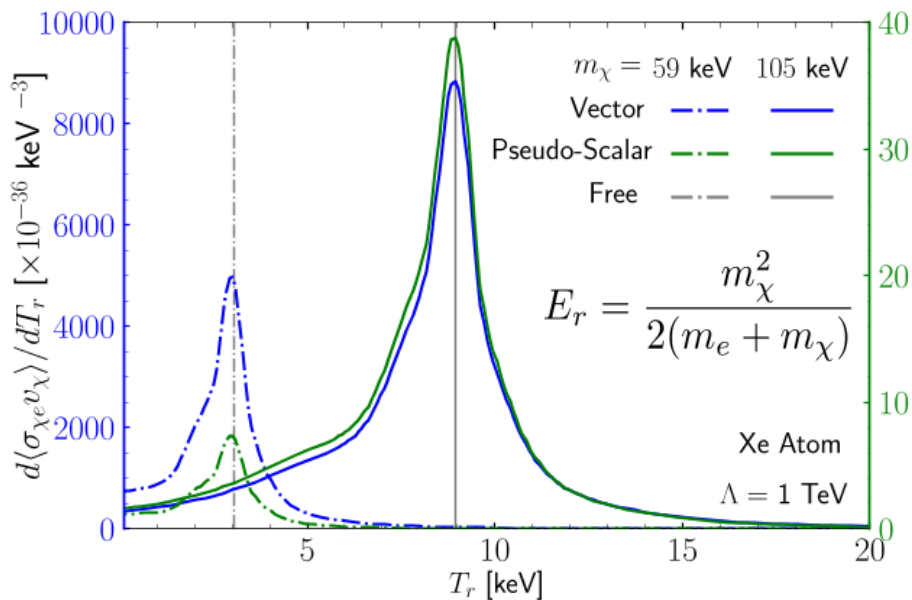
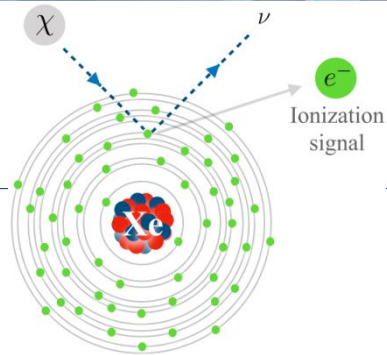
- 粒子与核物理理论团队简介
- 代表性成果1：核结构与核天体物理
- **代表性成果2：暗物质、中微子**
- 代表性成果3：格点、部分子、夸克胶子等离子体
- 代表性成果4：电弱相变规范不变性、弦理论

# 费米子吸收型暗物质

何小刚、葛韶锋+PandaX研究组

$$\chi + e \rightarrow \nu + e$$

暗物质质量转化为能量，克服探测阈值！



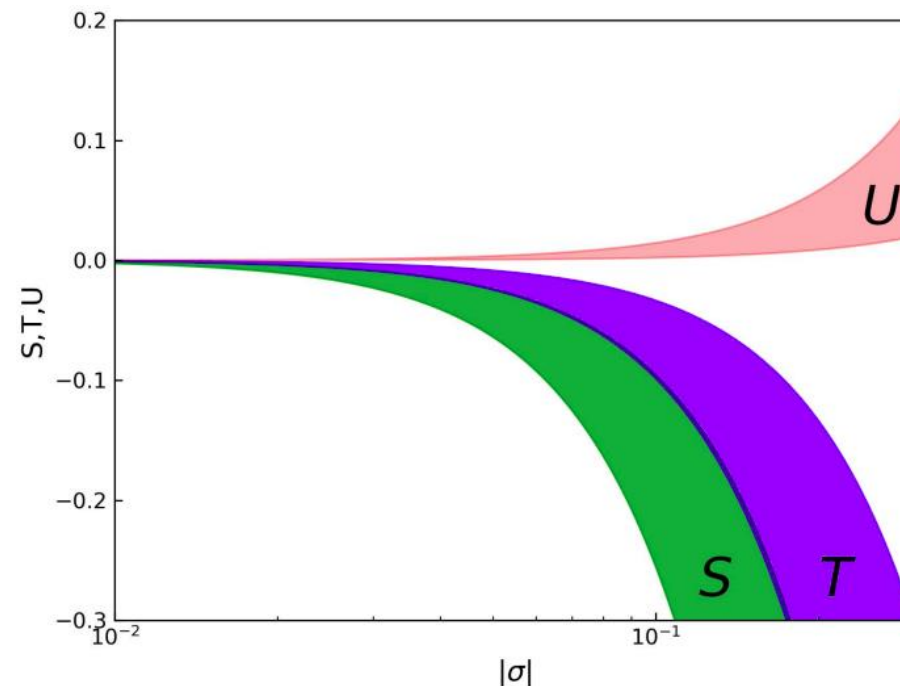
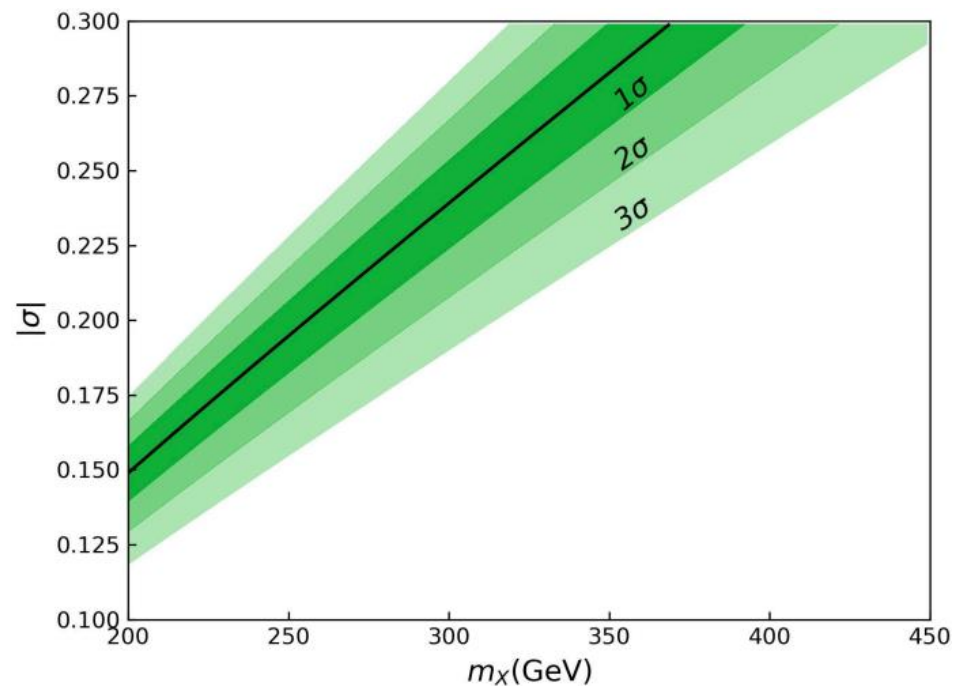
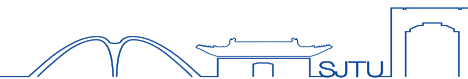
严谨的二次量子化框架处理原子效应

Shao-Feng Ge, Xiao-Gang He, Xiao-Dong Ma, Jie Sheng [JHEP 05 (2022) 191]

Shao-Feng Ge, Pedro Pasquini, Jie Sheng [JHEP 05 (2022) 088]

PandaX + Shao-Feng Ge, Xiao-Gang He, Xiao-Dong Ma, Jie Sheng [Phys.Rev.Lett. 129 (2022) 16, 161804]

# 暗光子 vs W质量测量

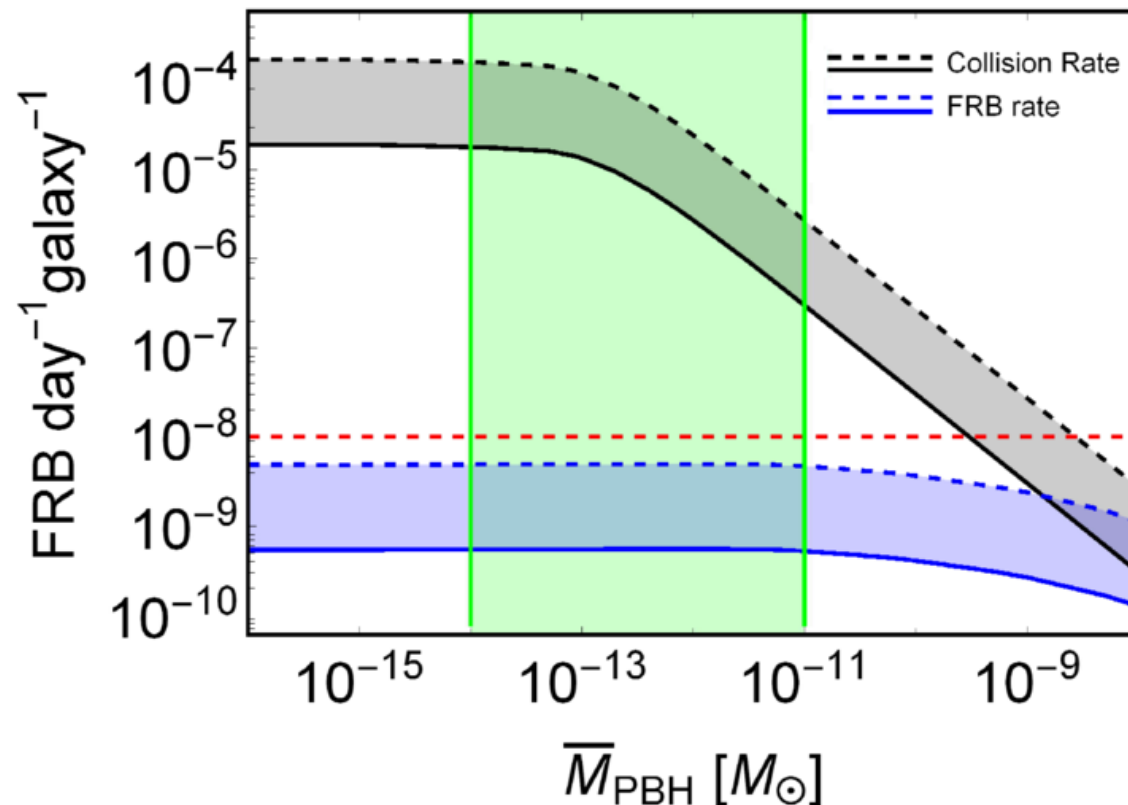


提供暗光子和一个三重态希格斯场，能自然解释W玻色子质量测量的偏差。

Yu Cheng, **Xiao-Gang He**, Fei Huang, Jin Sun, Zhi-Peng Xing [Phys.Rev.D 106 (2022) 5, 055011]

# 原初黑洞暗物质

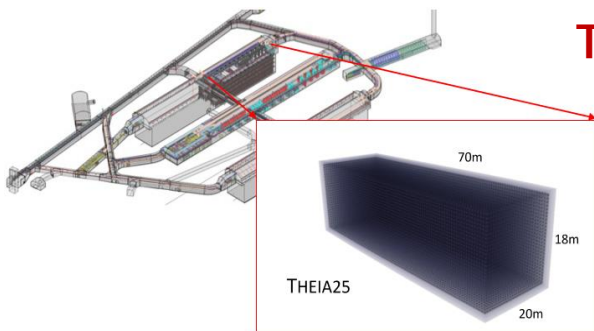
- 原初黑洞 (Primordial Black Hole) 大量存在, 组成所有的暗物质
- 原初黑洞和中子星有较大的机会碰到一起, 将中子星转化成黑洞
- 中子星转化成黑洞的过程中, 原来磁场被快速释放出来, 形成快速射电暴



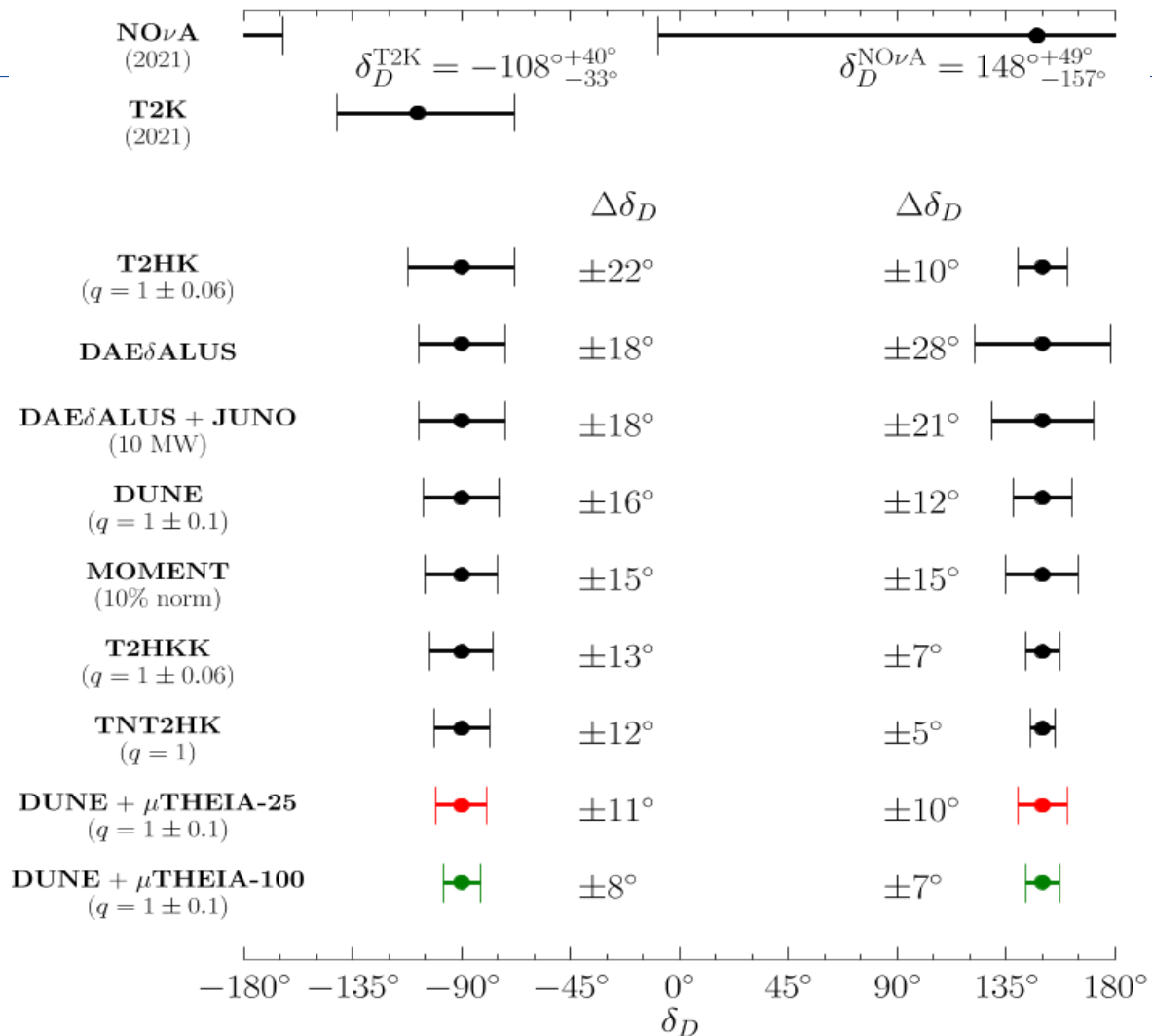
Kimmo Kainulainen, Sami Nurmi, Enrico D. Schiappacasse, **Tsutomu T. Yanagida** [Phys.Rev.D 104 (2021) 12, 123033]

# $\mu$ THEIA: 中微子CP相角

葛韶锋研究组



THEIA [1911.03501, 2202.12839]



# 报告提纲

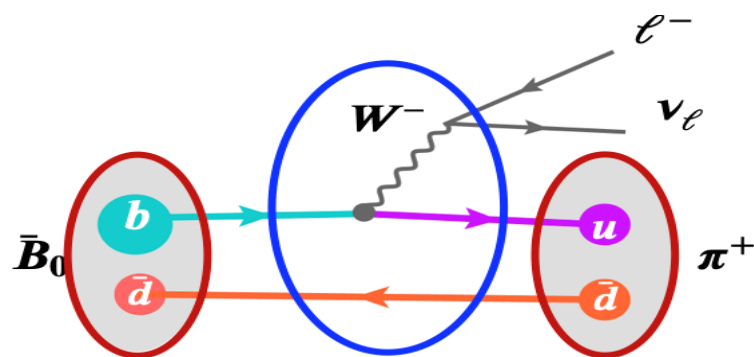


- 粒子与核物理理论团队简介
- 代表性成果1：核结构与核天体物理
- 代表性成果2：暗物质、中微子
- **代表性成果3：格点、部分子、夸克胶子等离子体**
- 代表性成果4：电弱相变规范不变性、弦理论

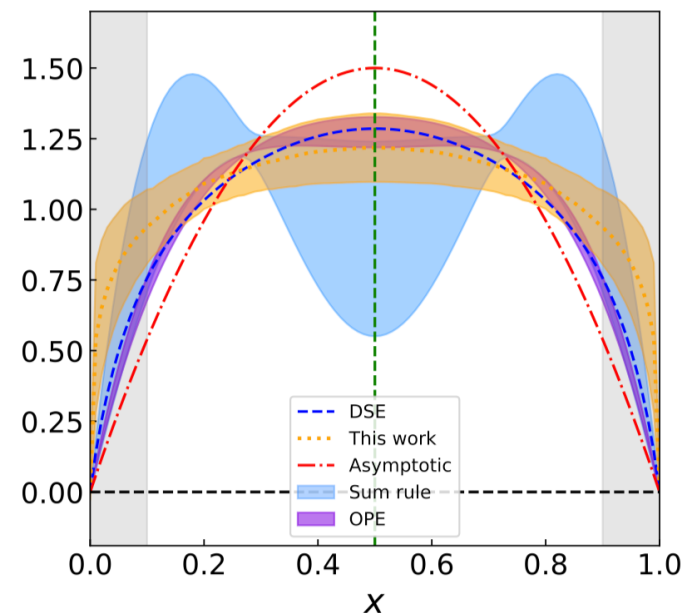
# Pi/K介子光锥分布振幅



- ✓ 重味介子衰变中，光锥分布振幅是最为重要的理论物理量
- ✓ 王伟与合作者发布了Pi/K介子(最轻的强子)光锥分布振幅的最为精确的第一性原理结果



$\pi$  LCDA:



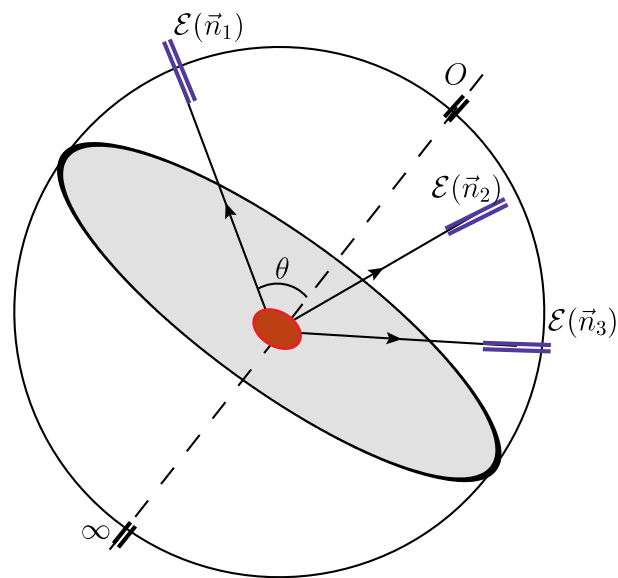
Jun Hua, Min-Huan Chu, Jin-Chen He, **Xiangdong Ji**, Andreas Schäfer, Yushan Su, Peng Sun, **Wei Wang**, Ji Xu, Yi-Bo Yang, Fei Yao, Jian-Hui Zhang, Qi-An Zhang [**Phys.Rev.Lett.129 (2022) 13, 132001**]

# 三点能量关联函数

Kai Yan, Xiao-yuan Zhang [*Phys.Rev.Lett.* 129 (2022) 2, 02160]



从N=4 超对称杨-米尔斯理论散射振幅出发，  
首度给出三点能量关联函数领头阶（单圈）  
的完整解析结果



$$s := \tan \frac{\theta}{2},$$

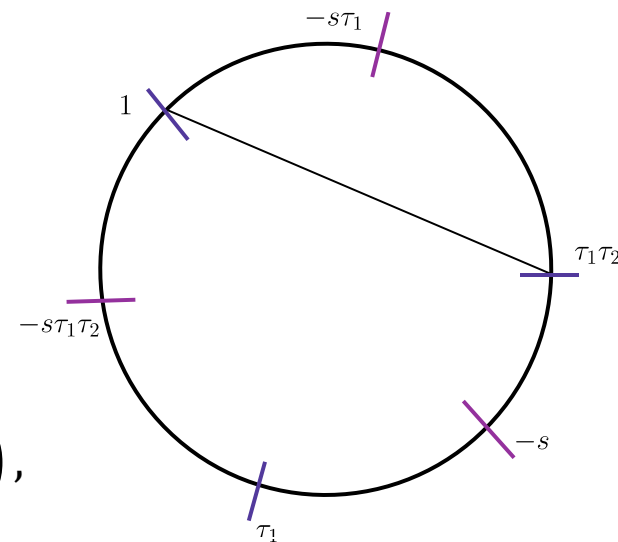
$$\tau_1 := e^{i\phi_{23}}, \tau_2 := e^{i\phi_{13}}$$

$$EEEC_{N=4 SYM} = \sum_i b_i \times F_i(s, \tau_1, \tau_2)$$

$$\{F_i\} \supset \{Li_2 \left( \frac{\langle 14 \rangle}{\langle 13 \rangle} \right), Li_2 \left( \frac{\langle 12 \rangle \langle 45 \rangle}{\langle 15 \rangle \langle 24 \rangle} \right), Li_2 \left( \frac{\langle 12 \rangle \langle 34 \rangle}{\langle 14 \rangle \langle 23 \rangle} \right), Li_2 \left( \frac{\langle 13 \rangle \langle 45 \rangle}{\langle 15 \rangle \langle 43 \rangle} \right),$$

$$Li_2 \left( \frac{\langle 12 \rangle \langle 34 \rangle \langle 56 \rangle}{\langle 23 \rangle \langle 45 \rangle \langle 61 \rangle} + 1 \right), Li_2 \left( \frac{\langle 14 \rangle \langle 23 \rangle \langle 56 \rangle}{\langle 34 \rangle \langle 25 \rangle \langle 61 \rangle} + 1 \right)\}$$

+parity conjugation + dihedral flips

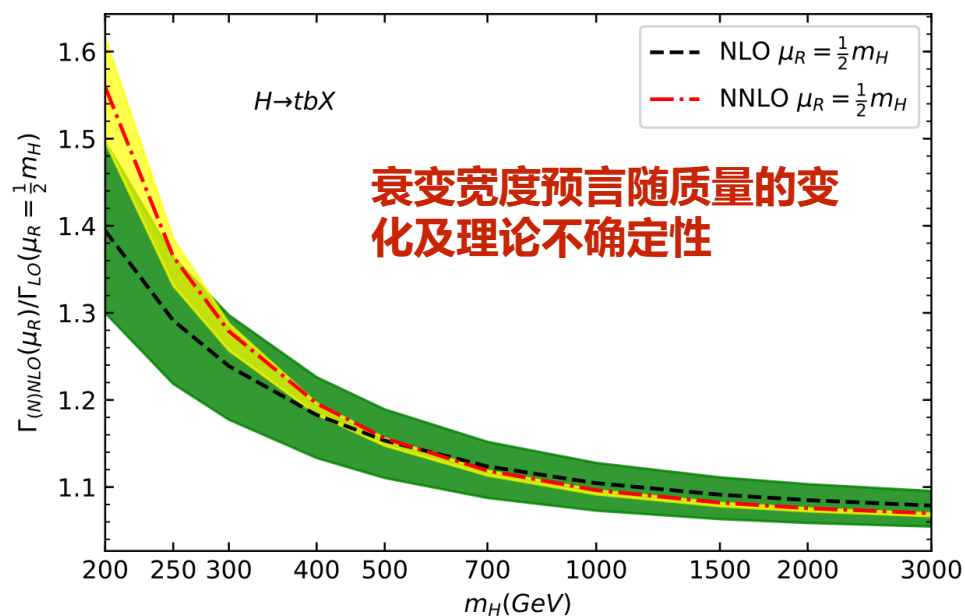


该结果具有超出意料的简洁性和优雅的数学结构，其在探测器共线以及共面极限下的渐进行为为研究共形光锥算符展开提供了重要信息。

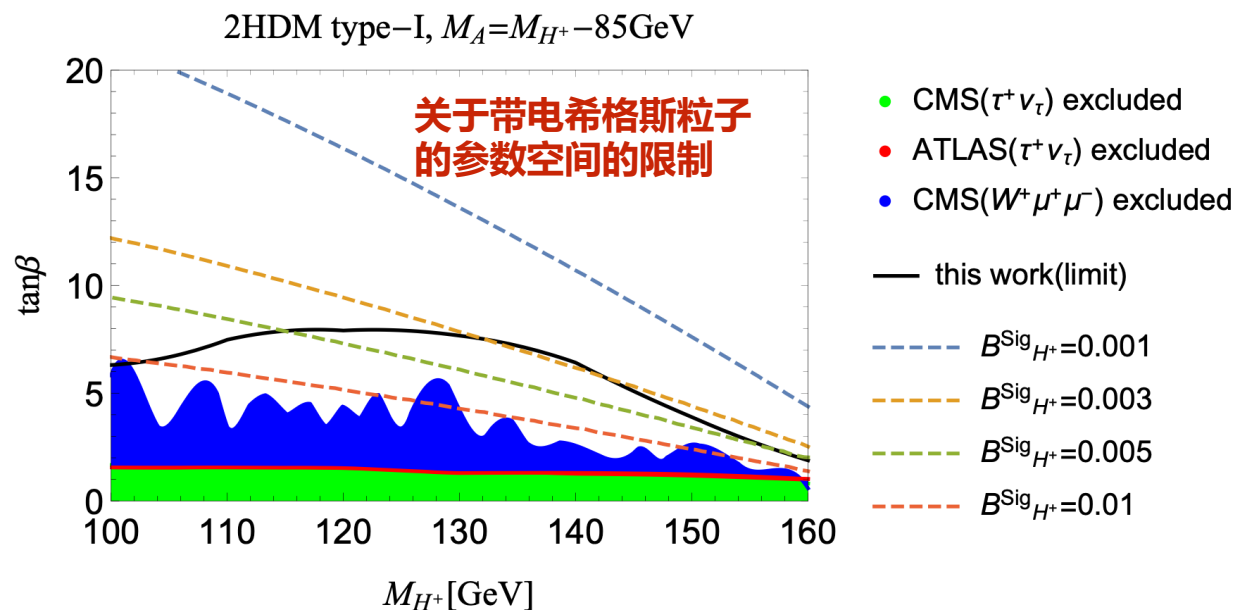
# 带电希格斯粒子的唯象研究

给出了带电希格斯粒子与第三代夸克间衰变过程的QCD次次领头阶预言，降低了带电希格斯粒子相关实验寻找中的理论误差

基于LHC的公开数据给出了关于第一类双希格斯二重态模型中轻质量的带电希格斯粒子的迄今最强约束

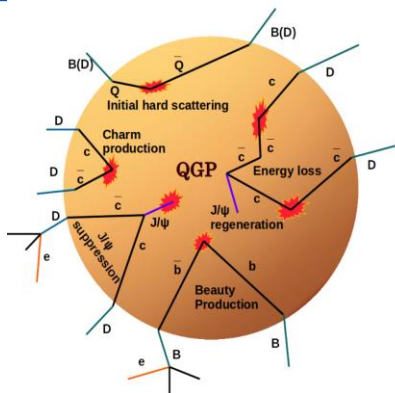


JHEP 05 (2022) 157, X. Shen, Y. Hu, C. Sun, J. Gao



PRD (Letter)106 , L071701, Y. Hu, C. Fu, J. Gao

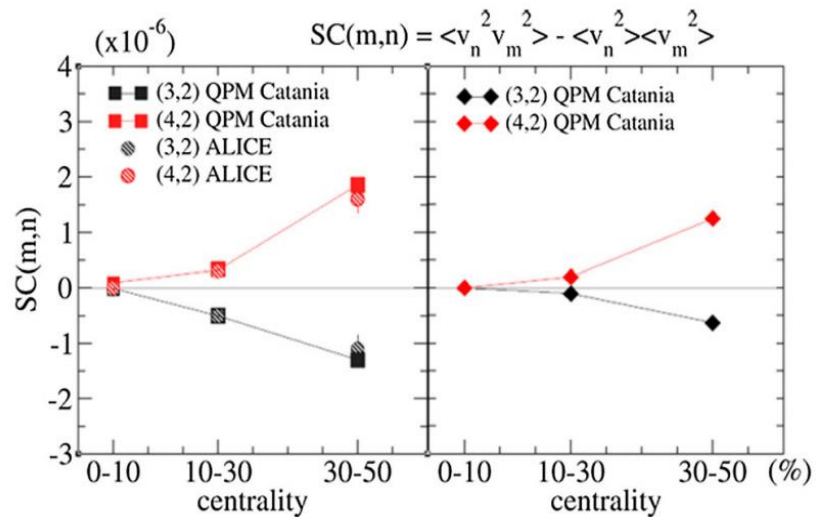
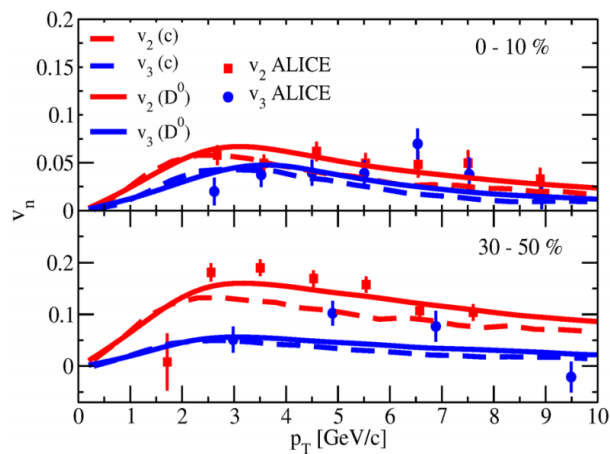
# 相对论重离子碰撞中D介子集体流分析



$$p_q^\mu \partial_\mu f_q(x, p) = C[f_q, f_g](x_q, p_q)$$

$$p_g^\mu \partial_\mu f_g(x, p) = C[f_q, f_g](x_g, p_g)$$

$$p^\mu \partial_\mu f_Q(x, p) = C[f_q, f_g, f_Q](x, p)$$



- 重味夸克是研究夸克胶子等离子体中强相互作用的一个有力探针，通过研究D介子集体流的涨落和关联可以更好地了解QCD多体系统中的强相互作用
- 理论计算再现了LHC上ALICE合作组对D介子 $v_2$ 、 $v_3$ 和带电粒子 $(v_2, v_3)$ 和 $(v_2, v_4)$ 关联等的测量结果，并对D介子的 $(v_2, v_3)$ 和 $(v_2, v_4)$ 关联作出预言
- 给出了重味夸克输运系数的更好限制

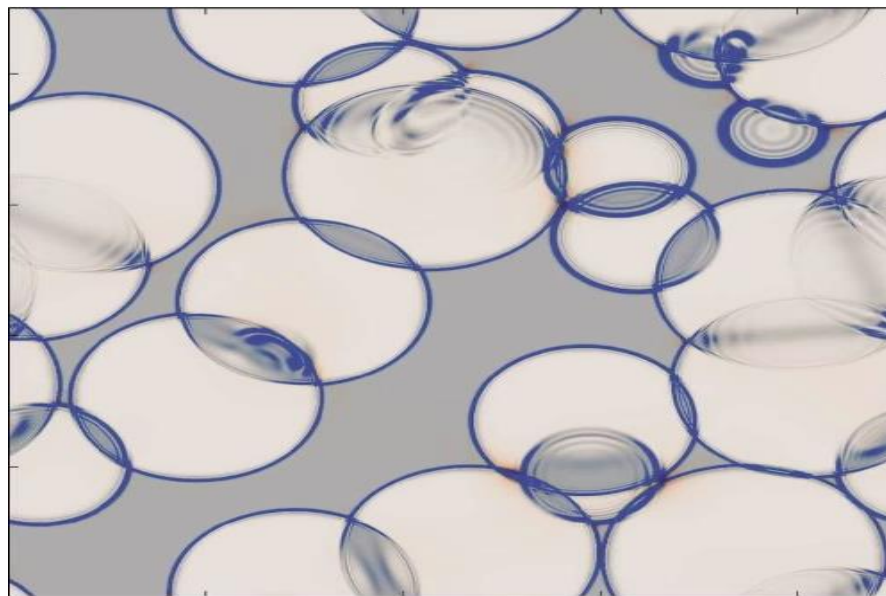
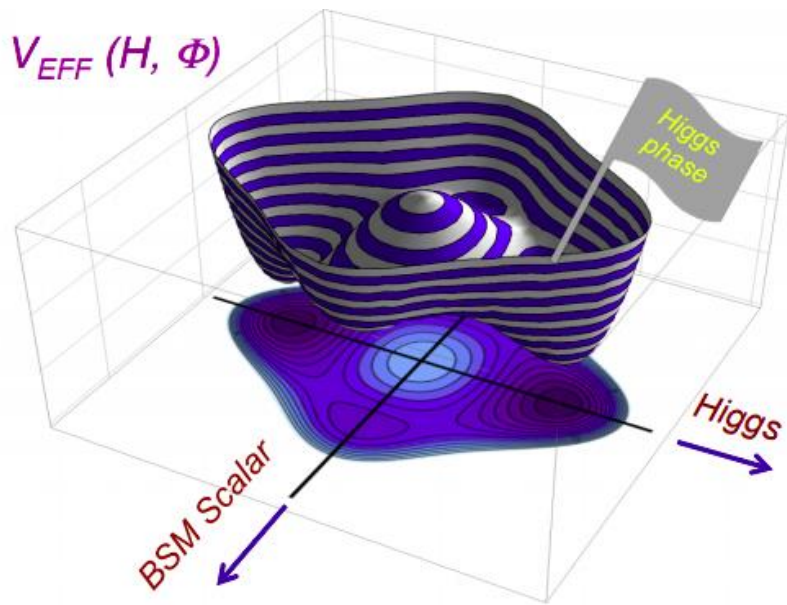
Sambataro, YF Sun, Minissale, Plumari and Greco [Eur. Phys. J. C 82, 833(2022)]

# 报告提纲



- 粒子与核物理理论团队简介
- 代表性成果1：核结构与核天体物理
- 代表性成果2：暗物质、中微子
- 代表性成果3：格点、部分子、夸克胶子等离子体
- **代表性成果4：电弱相变规范不变性、弦理论**

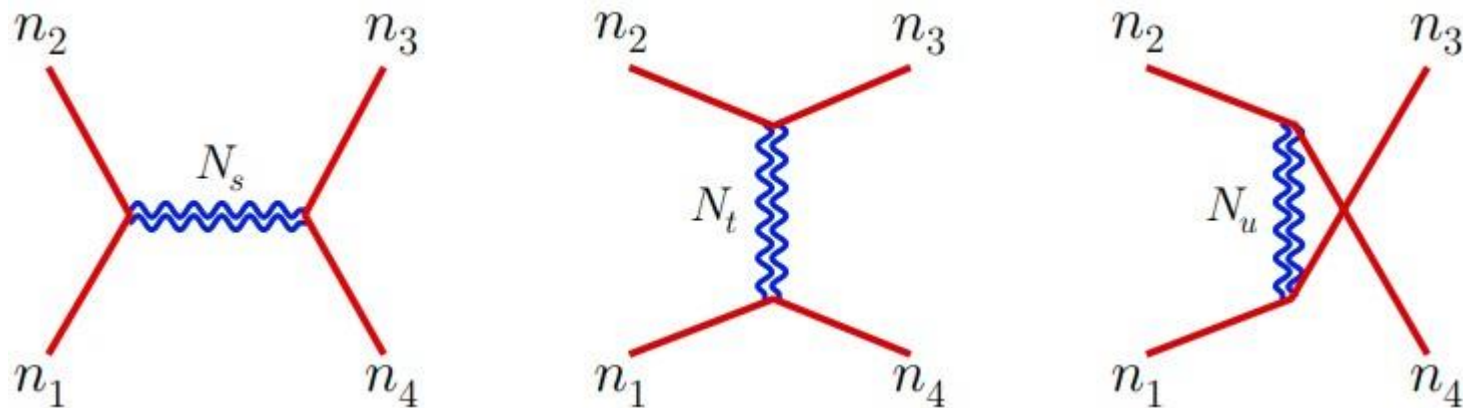
# 电弱相变中的规范不变性



Suntharan Arunasalam, **Michael J. Ramsey-Musolf** [JHEP 08 (2022) 138]

Joonas Hirvonen, Johan Löfgren, **Michael J. Ramsey-Musolf**, Philipp Schicho, Tuomas V. I. Tenkanen [JHEP 07 (2022) 135]

# 弦理论和振幅计算



## ➤ Deep connection between Gauge & Gravity forces

- ❑ Massive Color-Kinematics Duality and Double-Copy for Kaluza-Klein Scattering Amplitudes, Yao Li, Yan-Feng Hang, **Hong-Jian He\***, JHEP (in press), [arXiv:2209.11191 [hep-th]], 72pages.
- ❑ Gravitational Equivalence Theorem and Double-Copy for Kaluza-Klein Graviton Scattering Amplitudes, Yan-Feng Hang, **Hong-Jian He**, Research 2022 (2022) 9860945 (p.1-10), [arXiv:2207.11214 [hep-th]].



# 致谢



**感谢各位专家的支持  
敬请批评指正！**

