



Recent Progress on Nuclear Physics Theory at SYSU



中山大学核物理

- 物理学院（南校区）

第一性原理方法、核结构、奇特强子态、中微子物理



- 物理与天文学院（珠海校区）

第一性原理方法、平均场理论、无中微子双 β 衰变、核结构、夸克胶子等离子体、手征动理论、强相互作用相图、核子结构



- 中法核学院（珠海校区）

奇特核物理、超重核、重离子碰撞、中子星



- 理学院（深圳校区）

光核反应、光子科学、gamma物理、宇宙线物理





1、核结构与衰变理论研究



1.1 原子核衰变矩阵元 (Phys. Rev. Lett. 124, 232501 (2020))

物理与天文学院尧江明教授及其合作者

- 发展了适用于形变原子核结构研究的多参考态有限密度相似重整化群方法。
- 首次实现了无中微子双贝塔衰变候选原子核衰变矩阵元的第一性原理计算。
- 该从头计算方法适用于中重形变原子核研究，包括实验上更感兴趣的无中微子双贝塔衰变候选原子核（如 ^{76}Ge , ^{136}Xe ）。

PHYS.ORG

Researchers develop novel approach to modeling yet-unconfirmed rare nuclear process

6 July 2020

ScienceDaily®

Your source for the latest research news

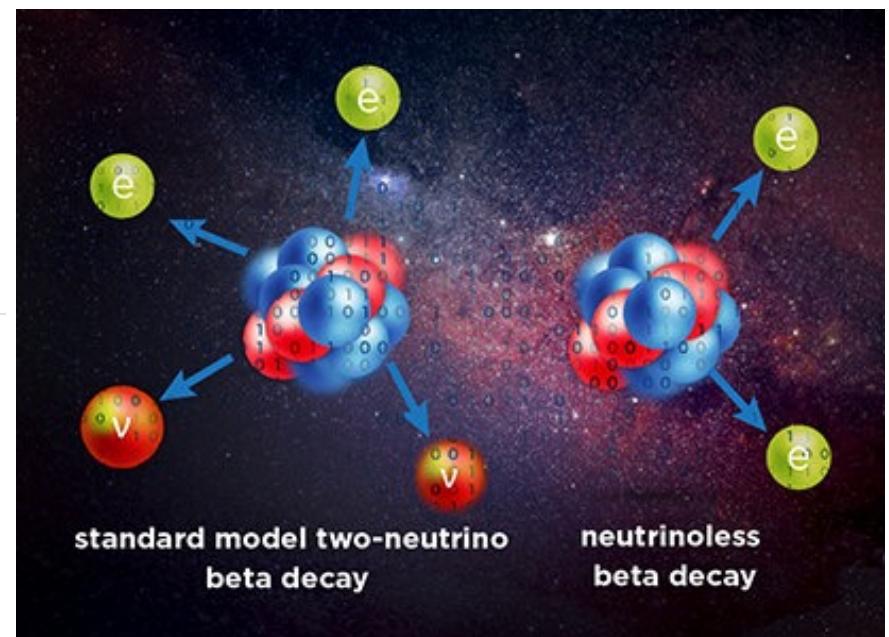
Researchers develop novel approach to modeling yet-unconfirmed rare nuclear process

Date: July 6, 2020

Source: Michigan State University Facility for Rare Isotope Beams

Summary: Researchers have taken a major step toward a theoretical first-principles description of neutrinoless double-beta decay. Observing this yet-unconfirmed rare nuclear process would have important implications for particle physics and cosmology. Theoretical simulations are essential to planning and evaluating proposed experiments.

FULL STORY

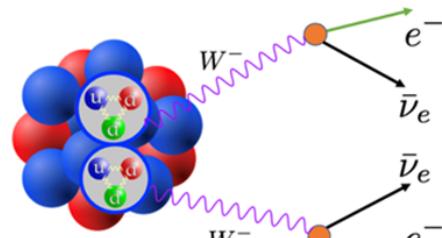




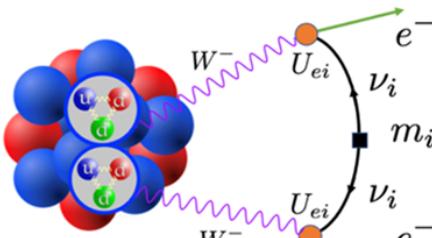
1.2 短程跃迁算符 (Phys. Rev. Lett. 127, 242502 (2021))

物理与天文学院尧江明教授及其合作者

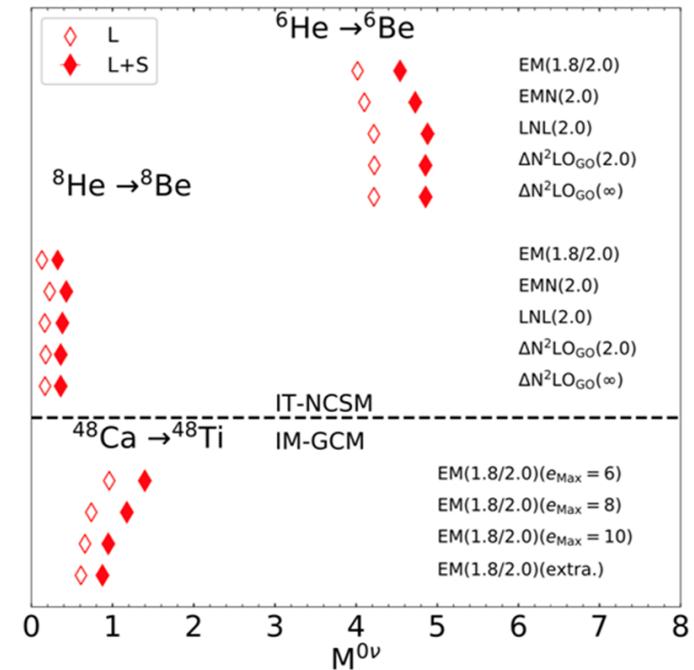
- 确定了常用手征核力对应的无中微子双贝塔衰变短程跃迁算符的耦合常数。
- 揭示了该短程跃迁算符对无中微子双贝塔衰变过程具有明显的增强作用。
- 研究结论为国内外吨量级探测装置相关实验提供理论参考。



(a)



(b)





1.3 超越平均场方法 (Prog. Part. Nucl. Phys. 126, 103965(2022))

物理与天文学院尧江明教授及其合作者

- 发展了多参考态协变密度泛函理论，研究了相对论效应、短程耦合效应以及原子核形变等因素对无中微子双贝塔衰变核矩阵元的影响。
- 受邀撰写无中微子双贝塔衰变相关的理论综述论文，详细阐述了不同原子核理论模型预言核矩阵元的差异性以及轴矢耦合常数的不确定性对提取中微子有效质量的影响。

Progress in Particle and Nuclear Physics 126 (2022) 103965

Contents lists available at ScienceDirect

Progress in Particle and Nuclear Physics

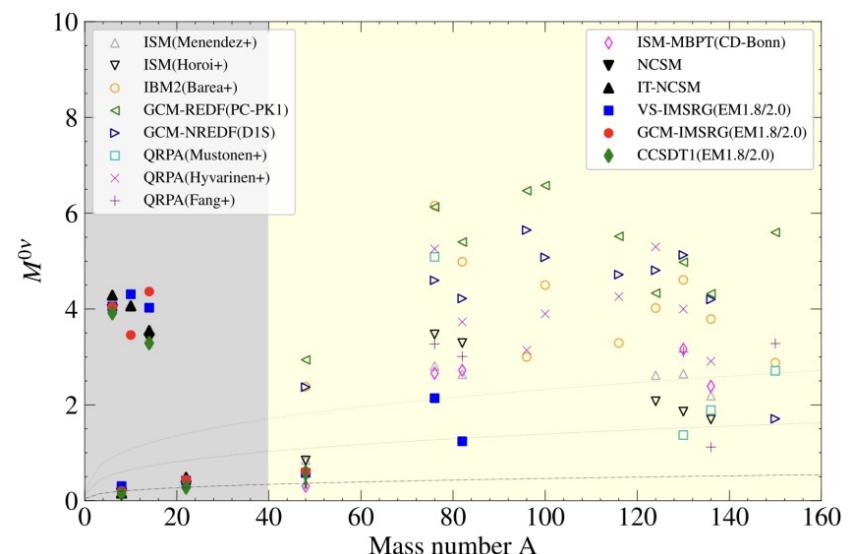
journal homepage: www.elsevier.com/locate/ppnp

Review

Beyond-mean-field approaches for nuclear neutrinoless double beta decay in the standard mechanism

J.M. Yao ^{a,b,*}, J. Meng ^{c,d}, Y.F. Niu ^e, P. Ring ^f

^a School of Physics and Astronomy, Sun Yat-sen University, Zhuhai, 519082, China
^b Facility for Rare Isotope Beams, Michigan State University, East Lansing MI, 48824-1321, USA
^c State Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China
^d Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University, Kyoto 606-8502, Japan
^e School of Nuclear Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou, 730000, China
^f Physik-Department der Technischen Universität München, D-85748 Garching, Germany

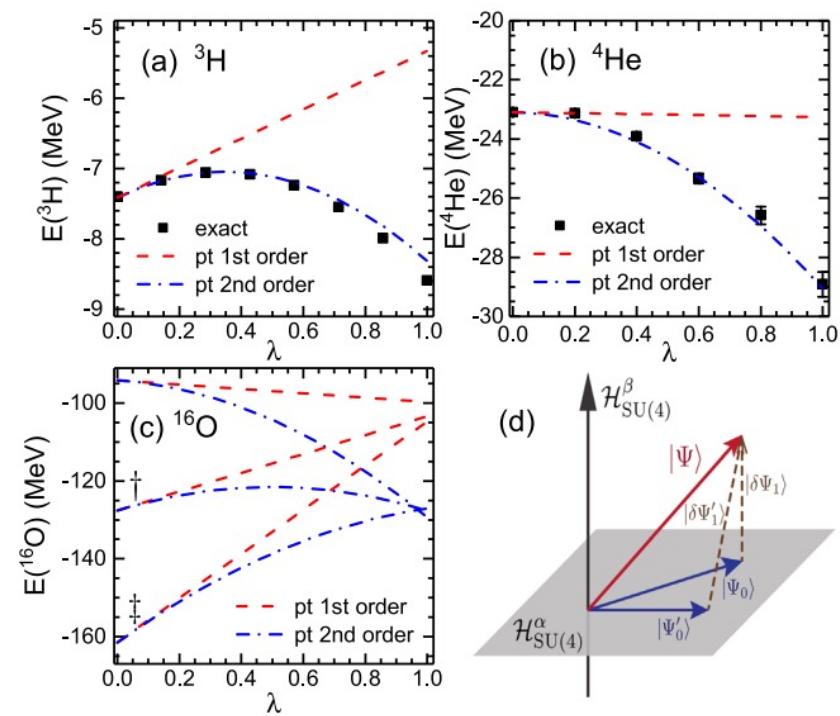
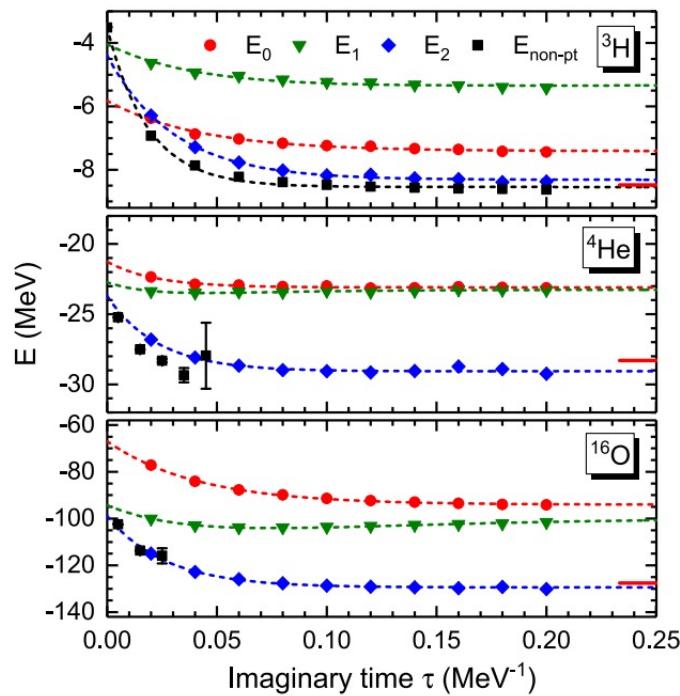




1.4 微扰量子蒙卡方法 (Phys. Rev. Lett. 128, 242501 (2022))

物理学院李宁副教授及其合作者

- 利用现实手征相互作用将核基态能量计算到二阶，发现二阶贡献较大
- 该方法可用于核物理、凝聚态物理、冷原子和量子化学中多体问题的量子蒙卡计算
- 计算 ^3H 到 ^{16}O 的若干核束缚能，与实验符合很好

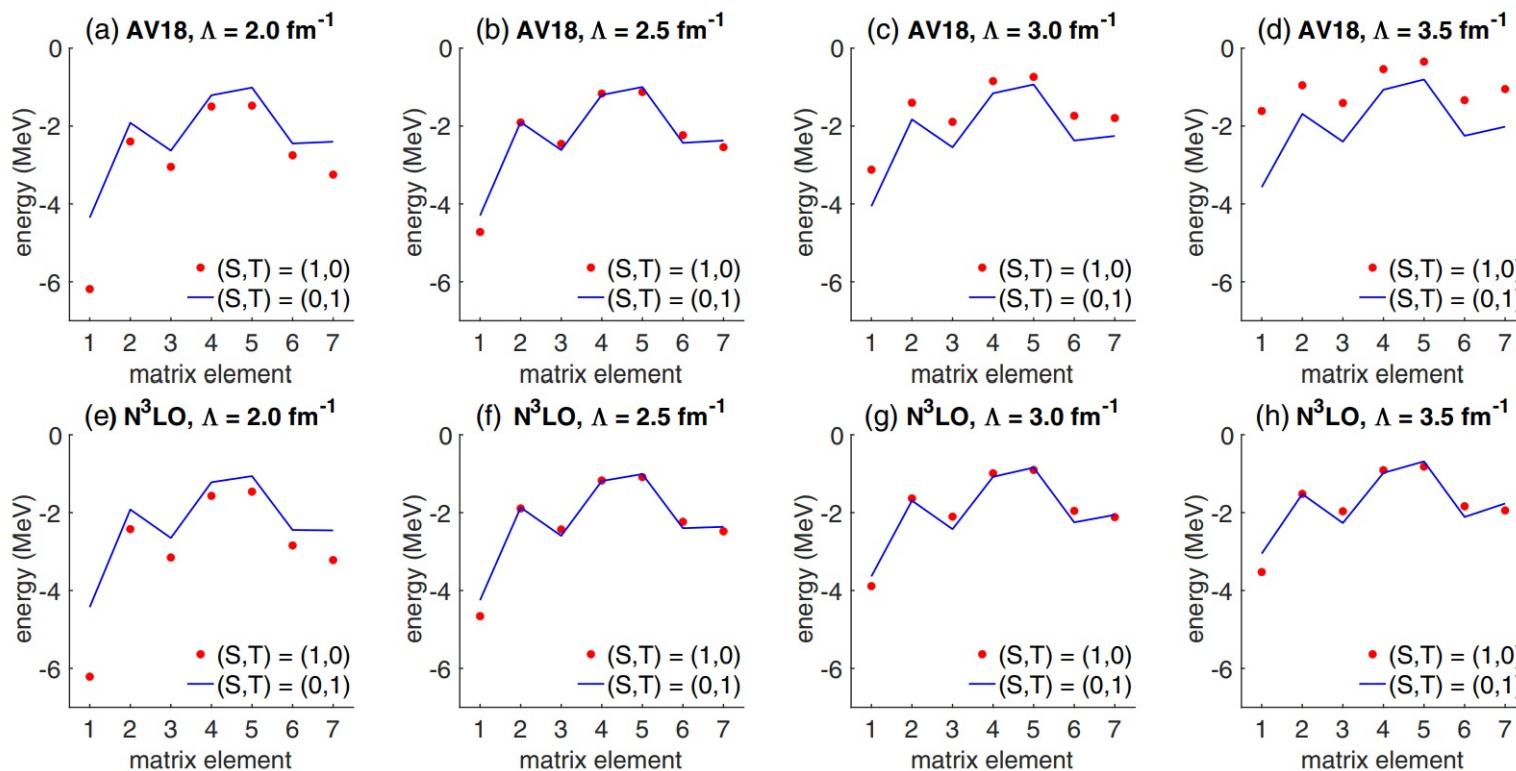




1.5 自旋-同位旋交换对称性 (Phys. Rev. Lett. 127, 062501 (2021))

物理学院李宁副教授及其合作者

- 发现能量标度 500 MeV附近强相互作用才具有明显自旋-同位旋交换对称性，得到了一组自旋-同位旋交换的求和规则，并用于 ^{30}P 的谱研究。
- 该方法可用于核力、核结构和三体力研究。

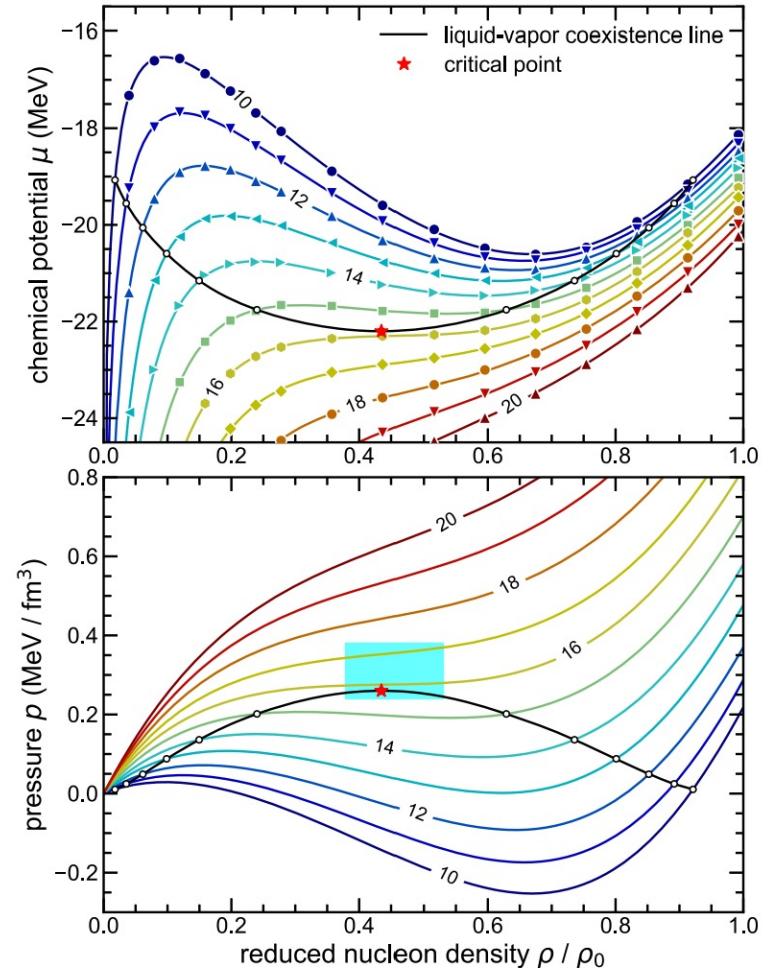




1.6 原子核热力学 (Phys. Rev. Lett. 125, 192502 (2020))

物理学院李宁副教授及其合作者

- 基于第一性原理的原子核系统热力学
Ab Initio Nuclear Thermodynamics
- 得到了对称核物质的临界点位置和气液共存线
- 计算了核结团的密度和温度依赖性





2、奇特核、超重核 及重离子碰撞



- 袁岑溪 , Nuclear shell model for exotic nuclei
- 祝龙 , Production of the neutron-rich isotopes around $N = 126$
- 苏军 , Non-equilibrium phase transition in heavy ion collisions



3、高能核物理 与重离子碰撞



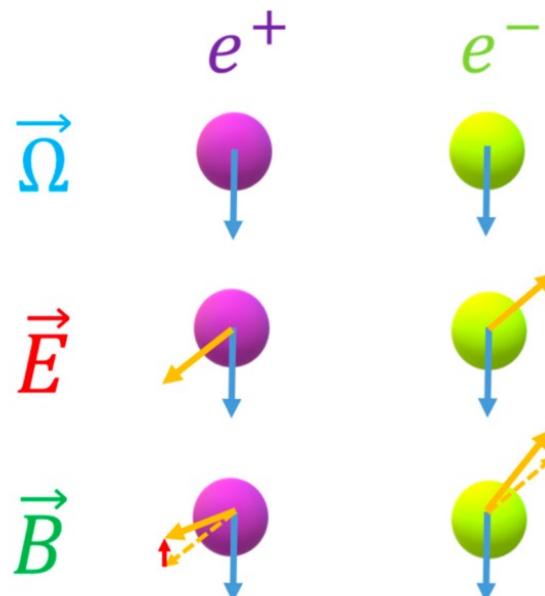
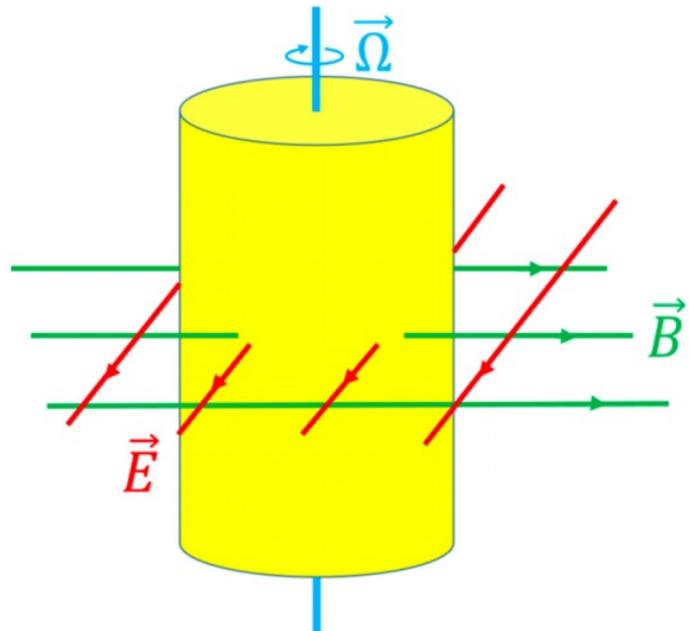
3.1 转动系统在垂直电磁场下的输运现象

- 曹高清副教授发现了一个磁场、电场、转动效应同时存在且相互垂直的情形下全新的手征反常效应

$$\mathbf{J} = \frac{q\mathbf{E} \times \boldsymbol{\Omega}}{4\pi^2},$$

- 同时发现了两个新的宏观输运现象：手征电荷密度和沿转动方向的手征电流

Phy. Rev. D 104, L031901 (2021)



$$\left. \begin{aligned} n_5 &= \frac{|q|(\mathbf{E} \times \boldsymbol{\Omega}) \cdot \mathbf{B}}{4\pi^2 I_1}, \\ \mathbf{J}_5 &= -\frac{|q|\mathbf{E}^2}{4\pi^2 I_1} \boldsymbol{\Omega}, \end{aligned} \right\}$$



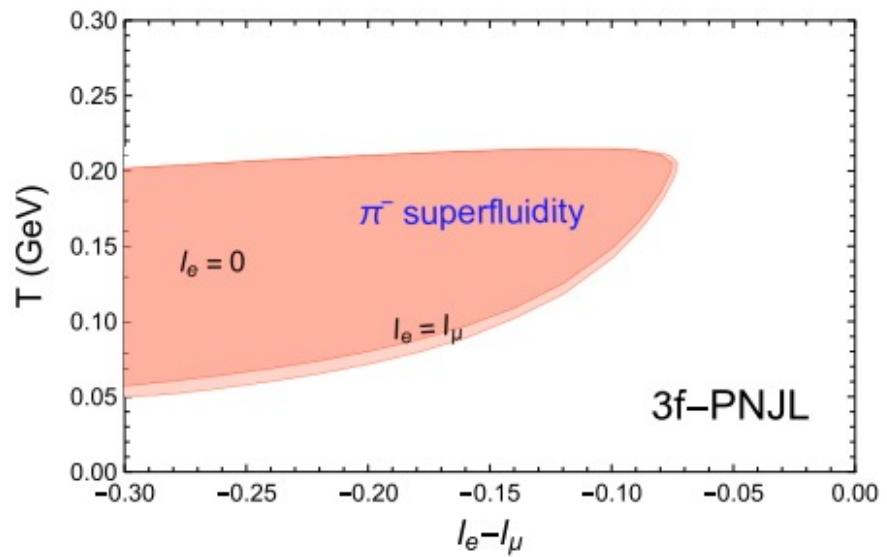
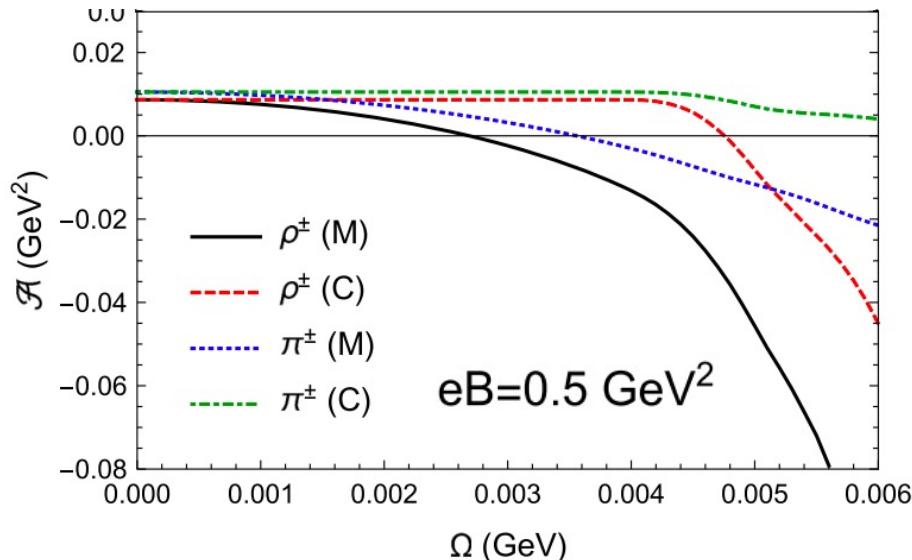
3.2 QCD相变

- 利用NJL模型研究了平行强磁场和转动下rho介子凝聚的可能性

没有磁场时，边界条件不允许转动效应诱导出rho介子凝聚；而在有磁场时，转动可以导致rho介子超导

- 利用PNJL模型讨论早期宇宙中的pi介子超流问题以及磁场效应

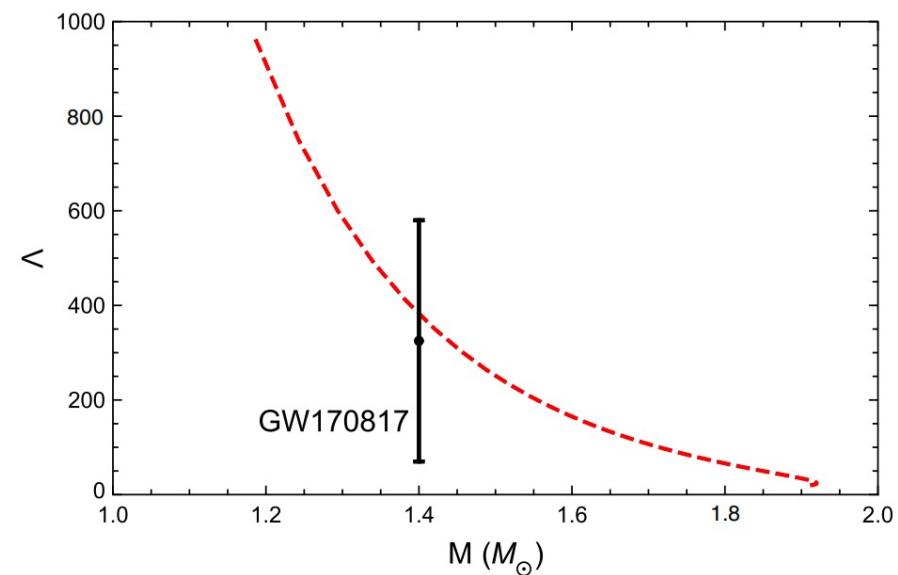
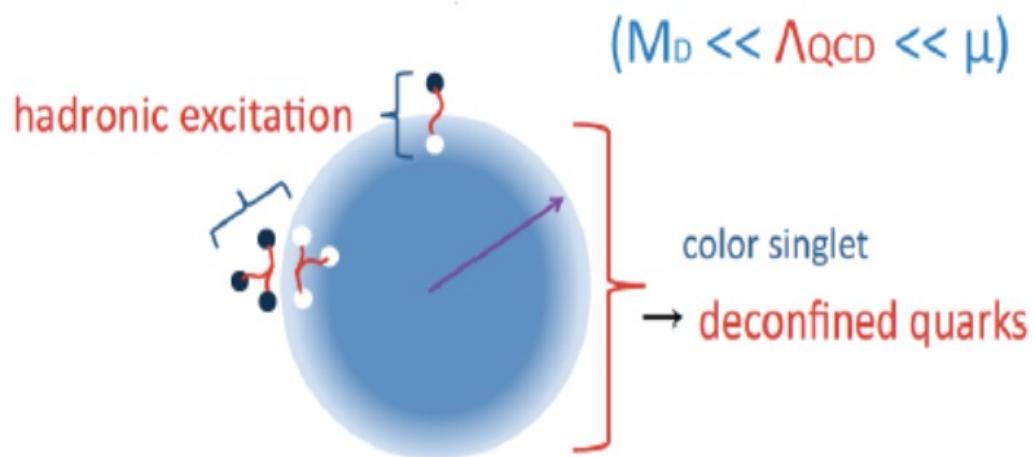
Phys. Rev. D 104 (2021) 054007; Eur. Phys. J. C 81 , 148 (2021)





3.3 夸克素 (quarkyonic) 物质

- 夸克素是重子与夸克共存的一个态：自由夸克存在于费米球内、重子存在于费米面附近
- 构建一个满足手征对称性的有效场论，这个理论通过拟合对称与非对称核物质的饱和性质确定模型参数，预言的中子星潮汐形变与观测吻合
- JHEP 10 (2020) 168; Phys. Rev. D 105 (2022) 14020





- 林树，重离子碰撞中的自旋极化现象

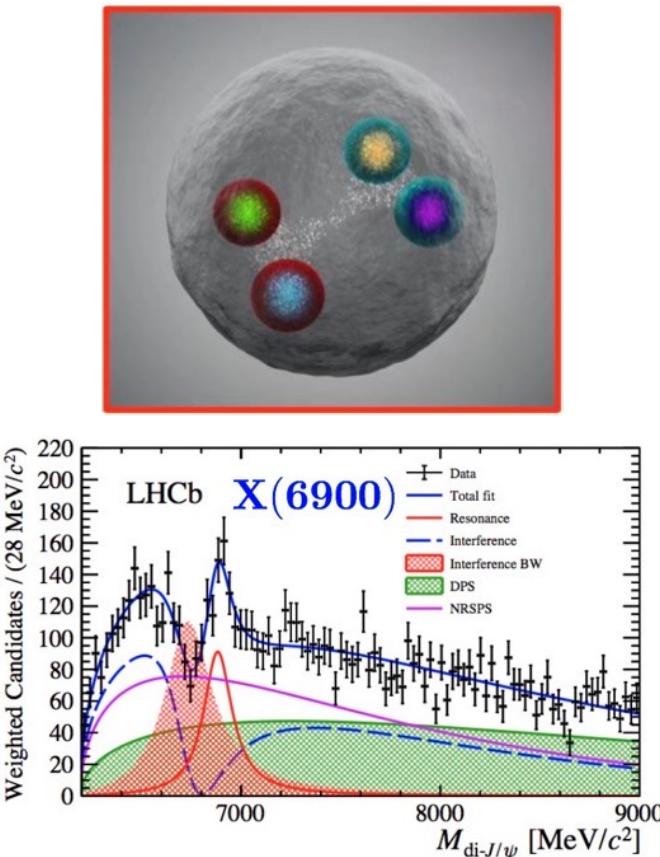


4、奇特强子态



4.1 全重四夸克态研究

- 2020年LHCb合作组在 $J/\psi J/\psi$ 不变质量谱中发现全粲四夸克态X(6900)。
- 陈伟教授（物理学院）及其合作者成功预言了X(6900)及其它可能的全粲四夸克态的质量和衰变行为。



Sci.Bull. 65 (2020) 23, 1983-1993

PLB773(2017), 247-251

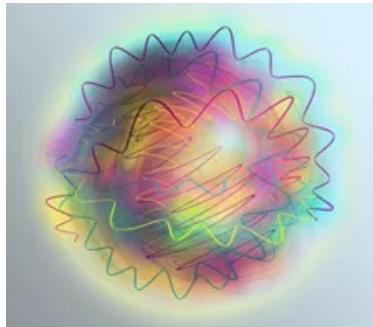
J^{PC}	Currents	$m_{X_c}(\text{GeV})$	$m_{X_b}(\text{GeV})$
0^{++}	J_1	6.44 ± 0.15	18.45 ± 0.15
	J_2	6.59 ± 0.17	18.59 ± 0.17
	J_3	6.47 ± 0.16	18.49 ± 0.16
	J_4	6.46 ± 0.16	18.46 ± 0.14
	J_5	6.82 ± 0.18	19.64 ± 0.14
1^{++}	$J_{1\mu}^+$	6.40 ± 0.19	18.33 ± 0.17
	$J_{2\mu}^+$	6.34 ± 0.19	18.32 ± 0.18
1^{+-}	$J_{1\mu}^-$	6.37 ± 0.18	18.32 ± 0.17
	$J_{2\mu}^-$	6.51 ± 0.15	18.54 ± 0.15
2^{++}	$J_{1\mu\nu}$	6.51 ± 0.15	18.53 ± 0.15
	$J_{2\mu\nu}$	6.37 ± 0.19	18.32 ± 0.17
0^{-+}	J_1^+	6.84 ± 0.18	18.77 ± 0.18
	J_2^+	6.85 ± 0.18	18.79 ± 0.18
0^{--}	J_1^-	6.84 ± 0.18	18.77 ± 0.18
1^{-+}	$J_{1\mu}^+$	6.84 ± 0.18	18.80 ± 0.18
	$J_{2\mu}^+$	6.88 ± 0.18	18.83 ± 0.18
1^{--}	$J_{1\mu}^-$	6.84 ± 0.18	18.77 ± 0.18
	$J_{2\mu}^-$	6.83 ± 0.18	18.77 ± 0.16



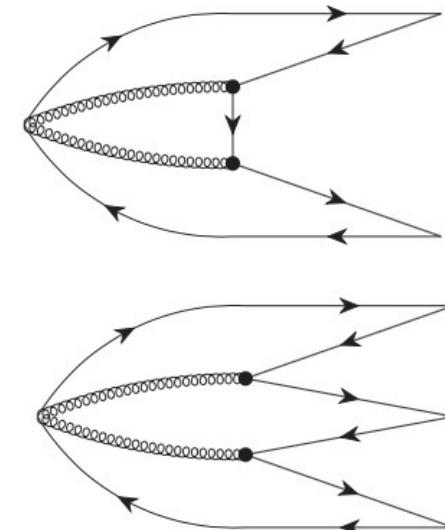
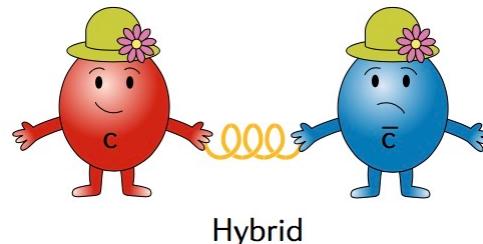
4.2 寻找胶子自由度：混杂态介子介子和胶球研究

- 计算了奇异偶素混杂态介子的质量谱，发现 $\phi(2170)$ 粒子不能解释成 $\bar{s}gs$ 混杂态结构；PRD98,096020(2018)
- 研究了一种全新的新强子结构：双胶子混杂态介子($\bar{q}ggq$)。计算了其质量谱和可能的衰变行为；PRD105,L051501(2022)
- 奇异子(C-odd)和坡密子(C-even)研究：两胶子和三胶子胶球。
PRD103,L091503(2021); PRD104,094050(2021)

寻找胶子自由度



Glueball





参与完成几篇奇特态相关综述论文：

The hidden-charm pentaquark and tetraquark states #36

Hua-Xing Chen (Peking U. and Peking U., SKLNPT and BeiHang U.), Wei Chen (Saskatchewan U.), Xiang Liu (Lanzhou U. and Lanzhou, Inst. Modern Phys.), Shi-Lin Zhu (CICQM, Beijing and Peking U. and Peking U., SKLNPT and Peking U., CHEP) (Jan 9, 2016)

Published in: *Phys.Rept.* 639 (2016) 1-121 • e-Print: [1601.02092 \[hep-ph\]](#)

pdf

DOI

cite

818 citations

Pentaquark and Tetraquark states #17

Yan-Rui Liu (Shandong U.), Hua-Xing Chen (Beihang U.), Wei Chen (Zhongshan U.), Xiang Liu (Lanzhou U. and Lanzhou, Inst. Modern Phys.), Shi-Lin Zhu (Peking U. and Peking U., SKLNPT and CICQM, Beijing and Peking U., CHEP) (Mar 28, 2019)

Published in: *Prog.Part.Nucl.Phys.* 107 (2019) 237-320 • e-Print: [1903.11976 \[hep-ph\]](#)

pdf

DOI

cite

363 citations

An updated review of the new hadron states #2

Hua-Xing Chen (Southeast U., Nanjing), Wei Chen (SYSU, Guangzhou), Xiang Liu (Lanzhou U. and Lanzhou, Inst. Modern Phys.), Yan-Rui Liu (Shandong U.), Shi-Lin Zhu (Peking U. and Peking U., CHEP) (Apr 6, 2022)

e-Print: [2204.02649 \[hep-ph\]](#)

invited by *Rept. Prog. Phys.*

pdf

cite

29 citations



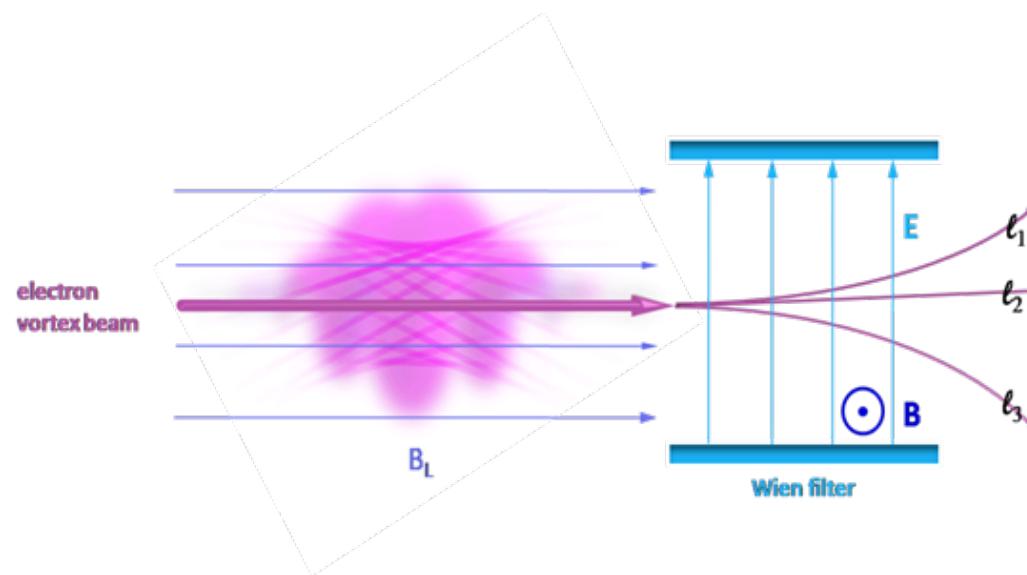
5、核子结构和涡旋粒子



5.1 涡旋粒子的奇特性质

- 提出了操纵涡旋电子及其内禀轨道角动量(OAM)的方法
- 涡旋电子的相对论性量子力学描述
- 提出了涡旋电子的自极化现象、电四极矩等性质

PRL 122, 063201 (2019); 122, 159302 (2019); 121, 043202 (2018); 119, 243903 (2017)





5.2 涡旋粒子superkick

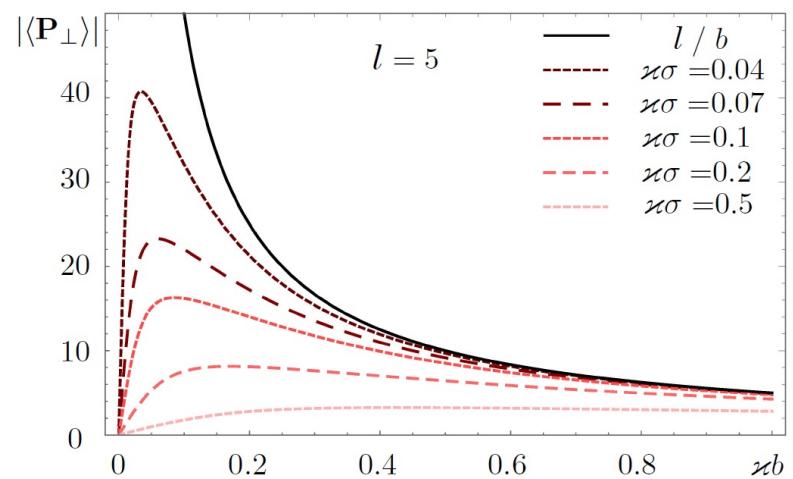
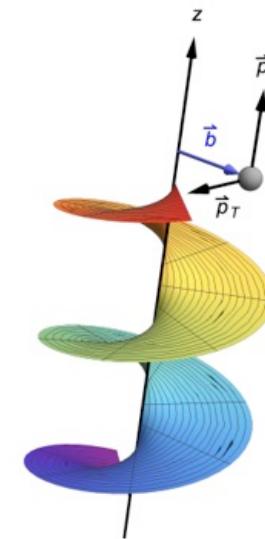
- 涡旋态粒子可能提供很大的横向动量

$$\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p} \implies P_{\perp} = \frac{l}{b} \hat{e}_y$$

- 可能改变粒子产生阈能？

- 确实可以产生大横向动量，不改变阈能

Phys. Rev. A 105, 013522 (2022)



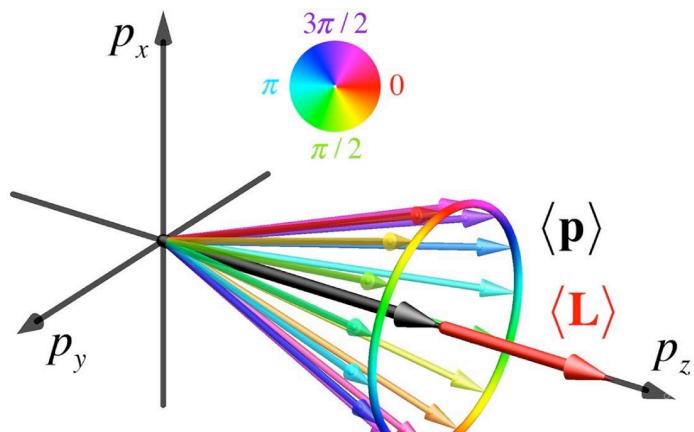


5.3 涡旋粒子探测核子内禀自旋

- 涡旋粒子提供了一种研究质子自旋的新工具

PRL 124, 192001 (2020); PRD 101, 096010 (2020); PRD 101, 016007 (2020)

SYNOPSIS



A Twist on Particle Collisions

May 13, 2020 • Physics 13, s66

Theorists show that collisions between particles with orbital angular momentum could offer a new way to study intrinsic spin properties.

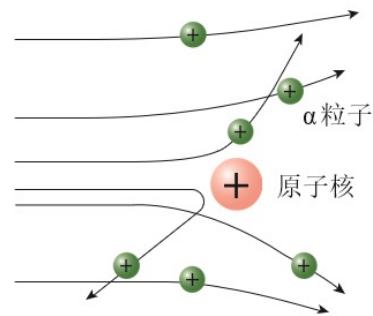


StudioM1/iStock/Getty Images

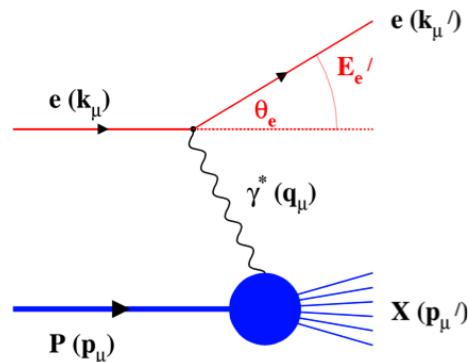


核子结构

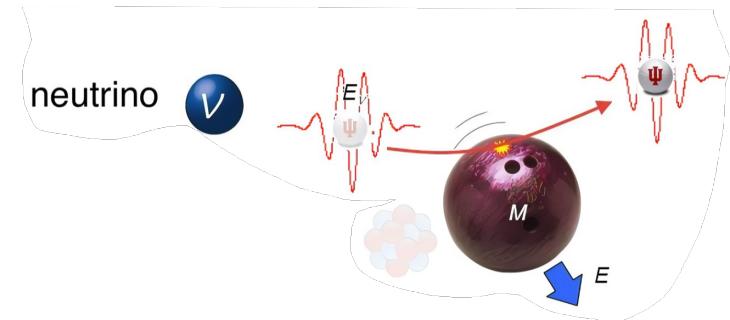
- 卢瑟福散射



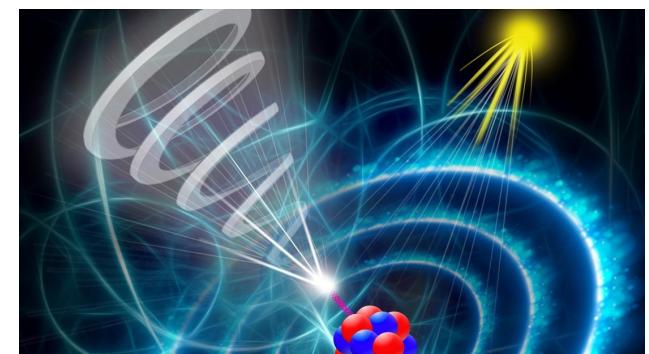
- 电子-核子散射 (DIS)



- 中微子-核子散射



- 涡旋电子-核子散射

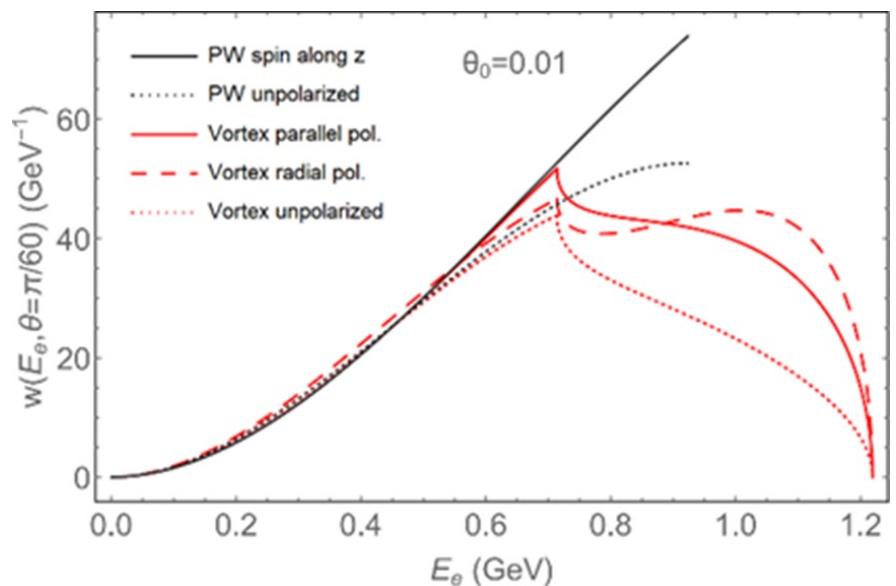
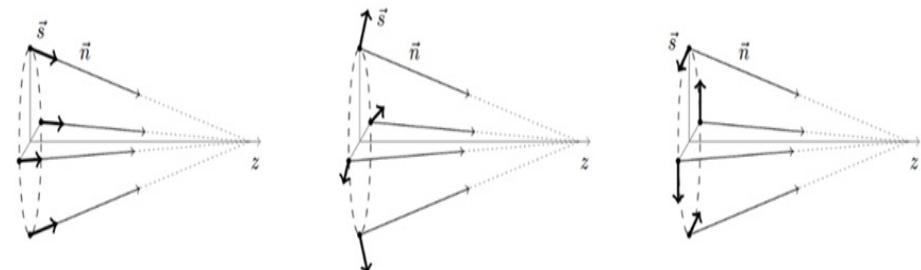




5.4 高能涡旋缪子

- 涡旋态的缪子可以有多种极化方式
- 固定观测角的电子能谱区分不同涡旋缪子的极化

Phys. Rev. D 104 (2021) 036003





谢 谢 !