

专题: 高能重离子碰撞过程的自旋与手征效应

夸克物质中的超子整体极化与矢量介子自旋排列*

阮丽娟¹⁾ 许长补^{1)†} 杨驰^{2)‡}

1) (美国布鲁克海文国家实验室, 物理系, 厄普顿 11973, 美国)

2) (山东大学前沿交叉科学青岛研究院, 粒子物理与粒子辐照教育部重点实验室, 青岛 266237)

(2023年3月31日收到; 2023年5月1日收到修改稿)

相对论重离子对撞机 RHIC 上超子整体极化和矢量介子自旋排列的实验发现证实了近 20 年前提出的理论. 该理论预言和实验测量开辟了一种从自旋这个新的自由度来研究高能重离子碰撞中产生的高温高密核物质特性的新途径. 本文简略回顾了整体极化理论提出和实验发现, 总结了现有大科学装置上的相关测量进展, 以及国际上现有的多种理论解释. 同时, 简要介绍了 STAR 探测器近期升级所带来的物理机遇.

关键词: 相对论重离子对撞机, 螺线管径迹谱仪, 超子整体极化, 矢量介子自旋排列**PACS:** 24.70.+s, 25.75.-q, 24.85.+p**DOI:** 10.7498/aps.72.20230496

1 引言

相对论重离子对撞机 (relativistic heavy ion collider, RHIC) 是世界上第 1 台高能重离子对撞机, 也是目前世界上唯一一台能够实现极化质子-质子对撞的装置. 作为高能核物理领域的大科学装置, RHIC 取得了一系列重大的物理发现. 2023 年是 RHIC 上的 STAR 国际合作组成立 30 周年, 也是 RHIC-STAR 探测器运行和数据采集 23 周年. STAR 国际合作组由来自 13 个国家 67 个单位的 700 多位科研人员组成. 在过去的 20 年间, STAR 采集了多种不同的实验数据, 展现了 RHIC 装置在科学研究上强大的功能性与灵活性. 图 1 是 RHIC 上从 Run-1 到 Run-22 的运行期内采集的粒子对撞数据的统计. 图中展示了丰富的对撞粒子种类、大跨度的束流能量覆盖范围以及极高的对撞亮度, 这些都说明了 20 年来 RHIC 为 QCD 物质研究提供了良好的实验环境. 可以看到, RHIC 第 1 年采

集的好的事例总数少于 100 万个, 而近期采集的每种数据大约有 10 亿个事例.

同时, STAR 探测器在过去 20 年中经历了多个阶段的重大升级, 以提升粒子识别能力和顶点重建精度. 近期, STAR 完成了前向快度区的径迹探测器和量能器升级, 将探测器的接收度扩展到了前向快度区. 如表 1 所示, 在这些升级中, STAR 中国组在飞行时间谱仪 (TOF)、高阶触发系统 (HLT)、缪子望远镜 (MTD)、事例平面探测器 (EPD)、时间投影室内扇区 (iTPC) 和前向径迹探测器 (FTS) 这些重要的子探测器升级研制中均发挥了重要的作用.

2 超子整体极化现象和矢量介子自旋排列的预言

超子整体极化于 2004 年由理论物理学家梁作堂与王新年^[1]共同提出, 他们指出, 在相对论重离子非对心碰撞中, 对撞产生的夸克物质存在一个显著的轨道角动量. 该轨道角动量将通过自旋-轨道

* 国家自然科学基金 (批准号: 11890713, 12075139)、山东省自然科学基金 (批准号: ZR2022JQ03) 和美国能源部科学办公室基金 (批准号: DE-SC0012704, DE-FG02-10ER41666, DE-AC02-98CH10886) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: xzb@bnl.gov

‡ 通信作者. E-mail: chiyang@sdu.edu.cn

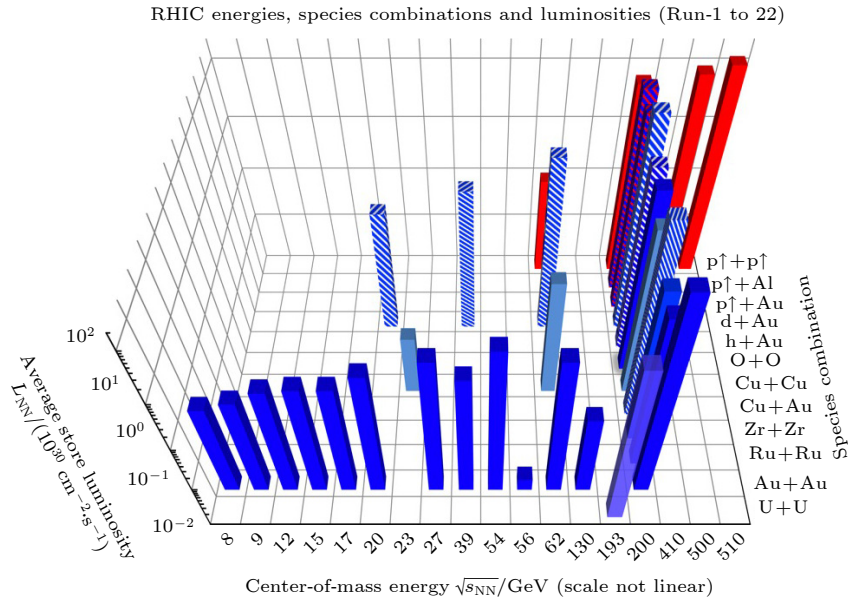


图 1 RHIC 运行的对撞粒子种类、束流能量和亮度的统计 (由 RHIC 对撞机加速器部门提供)

Fig. 1. RHIC operation collision species, beam energy and luminosity (courtesy of RHIC CAD).

表 1 1999—2020 年以后 STAR 探测器子系统以及升级的信息, 包括了除美国能源部外主要贡献的经费来源信息
Table 1. List of STAR detector subsystems and upgrades from 1999 to 2020+ with major contributions from funding sources other than DOE.

Detector	Primary functions	DOE+(in-kind)	Year
TPC+Trigger	$ \eta < 1$ tracking		1999—
Barrel EMC	$ \eta < 1$ jets $/\gamma/\pi^0/e$		2004—
FTPC	Forward tracking	(Germany)	2002—2012
L3	Online display	(Germany)	2000—2012
SVT/SSD	V0/charm	(France)	2004—2007
PMD	Forward photons	(India)	2003—2011
EEMC	$1 < \eta < 2$ jets $/\pi^0/e$	(NSF)	2005—
Roman Pots	Diffraction		2009—
TOF	PID	(China)	2009—
FMS/Preshower	$2.5 < \eta < 4.2$	(Russia)	2008—2017
DAQ1000	x10 DAQ rate		2008—
HLT	Online tracking	(China/Germany)	2012—
FGT	$1 < \eta < 2$ W^\pm		2012—2013
GMT	TPC calibration		2012—
HFT/SSD	Open charm	(France/UIC)	2014—2016
MTD	Muon ID	(China/India)	2014—
EPD	Event plane	(China)	2018—
RHICf	$\eta > 5$ π^0	(Japan)	2017
iTPC	$ \eta < 1.5$ tracking	(China)	2019—
eTOF	$-2 < \eta < -1$ PID	(Germany/China)	2019—
FCS	$2.5 < \eta < 4$ calorimeter	(NSF)	2021—
FTS	$2.5 < \eta < 4$ tracking	(NCKU/SDU)	2021—

耦合导致超子自旋极化和矢量介子自旋排列^[2]. 这个预言打开了夸克胶子等离子体 (QGP) 中自旋自由度研究的大门, 为 QGP 特性研究提供了新途径.

这一发现, 使实验上不需要复杂的初态核子极化, 就可以直接通过测量末态强子极化, 研究自旋自由度下 QGP 性质和 QCD 相变特性^[2]. 因此, 无

论对理论还是实验,都具有极强的启示性、开拓性和吸引力. 梁作堂与王新年^[1]的论文提交仅3天后,国际同行就把他们的思想推广到了强子-强子碰撞过程中.

3 整体极化现象和矢量介子自旋排列现象在重离子对撞实验的测量

与其他高能物理实验不同,因为在单次对撞中有更多的末态粒子产生,相对论重离子对撞实验可以通过前向快速区的探测器确定对撞事例的反应面. 该特点使得在相对论重离子对撞实验中探索超子整体极化成为可能. 梁作堂与王新年的“整体极化”理论一经提出,立刻直接推动了STAR国际合作组从RHIC的早期数据中寻找这种超子整体极化现象.

理论预言的论文发表仅1年后,STAR合作组就于2006年在上海举办的夸克物质大会上报告了实验测量结果,并随后发表^[3-5]. 如图2所示,在RHIC 200 GeV和62 GeV的金核-金核对撞中,在较大的测量误差下,没有找到 $\bar{\Lambda}$ 超子整体极化现象存在. 同时,如图3所示,在RHIC 200 GeV金核-金核对撞数据中,也没有发现矢量介子 K^{*0} (892)和 ϕ (1020)存在自旋排列的现象. 值得一提的是,STAR合作组在论文中指出,实验观测到的超子整体极化效应的上限小于梁作堂与王新年^[1]的最初理论预期,但是落在了梁作堂在2006年夸克物质大会上展示的更精确的理论预期范围之内.

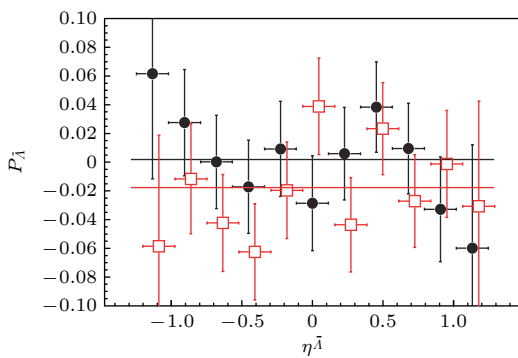


图2 RHIC-STAR通过早期实验数据测量的超子整体极化的结果^[3]. 实心点和空心点分别来自200 GeV和62.4 GeV金核-金核对撞数据的测量结果

Fig. 2. Global polarization measurements from RHIC-STAR based on the data collected in early period of RHIC operation^[3]. The filled and open markers represent the measurements from 200 GeV and 62.4 GeV Au+Au collisions, respectively.

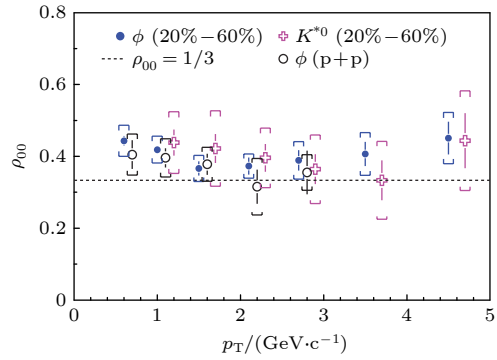


图3 RHIC-STAR通过早期实验数据测量的矢量介子自旋排列的结果^[5]

Fig. 3. Spin alignment measurements of vector mesons from RHIC-STAR based on the data collected in early period of RHIC operation^[5].

由于超子整体极化和矢量介子自旋排列测量对夸克物质特性研究的重要意义,在此后的10年中,实验物理学家们一直在继续进行这项探索. 但是,由于统计量以及测量精度的制约,实验上没有观察到确切的信号.

再后来的10年中,这种困难的实验测量得到了改善. 得益于更高的计数率以及TOF探测器研制升级完成,随着RHIC束流能量扫描一期计划(Beam Energy Scan Phase I)的数据采集完成,STAR合作组于2017年在实验上发现了超子整体极化(如图4所示). 实验结果作为封面文章发表在《自然》杂志上^[6]. 结果显示,在更低的对撞能量下超子整体极化的信号更显著.

近期,STAR合作组最激动人心的成果是2023年1月发表在《自然》杂志的矢量介子自旋排列测量^[9]. 从图5可以看出,在 ϕ 介子中观测到了大于1/3的正信号. STAR中国组在该发现中做出了重要贡献. 作为矢量介子自旋排列现象最早的提出者之一,王新年^[10]对这项发现的意义进行了详细的解读. 同时,2018年STAR中国组参与完成的事例平面探测器(EPD)升级覆盖了 $2.1 < |\eta| < 5.1$ 的赝快度范围,在27 GeV金核-金核对撞数据的高精度测量中发挥了重要作用.

测量到超子整体极化后,研究的重点集中在理解极化的起源,并研究其中心度、速度和束流能量的依赖性上. 高统计量的27, 54.4和200 GeV金核-金核对撞数据结果显示,超子整体极化随着束流能量的提高呈现下降的趋势. 同时,RHIC和

LHC 实验均发现了沿着束流方向的极化^[7,8], 称为局域极化. 这种局域极化被认为与整体极化有着类

似的产生机制. 不同的是, 它来自于更小坐标尺度下的局域角动量与剪切黏滯.

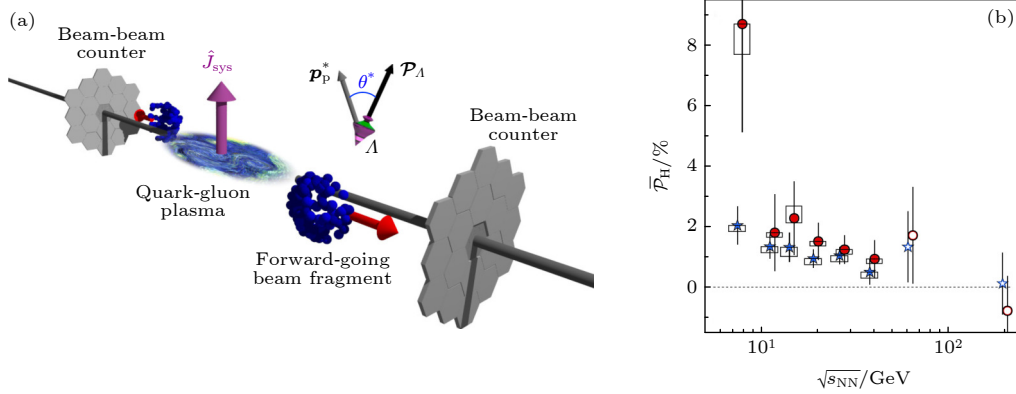


图 4 RHIC-STAR 上发现超子整体极化的测量结果^[6]. 右边红色与蓝色的实心点分别代表 $\bar{\Lambda}$ 与 Λ , 空心点是 STAR 早期的测量结果
Fig. 4. Discovery of global polarization of hyperons from RHIC-STAR^[6]. The red and blue filled markers in right panel represent the results from $\bar{\Lambda}$ and Λ , respectively. The open circles are from the early measurements.

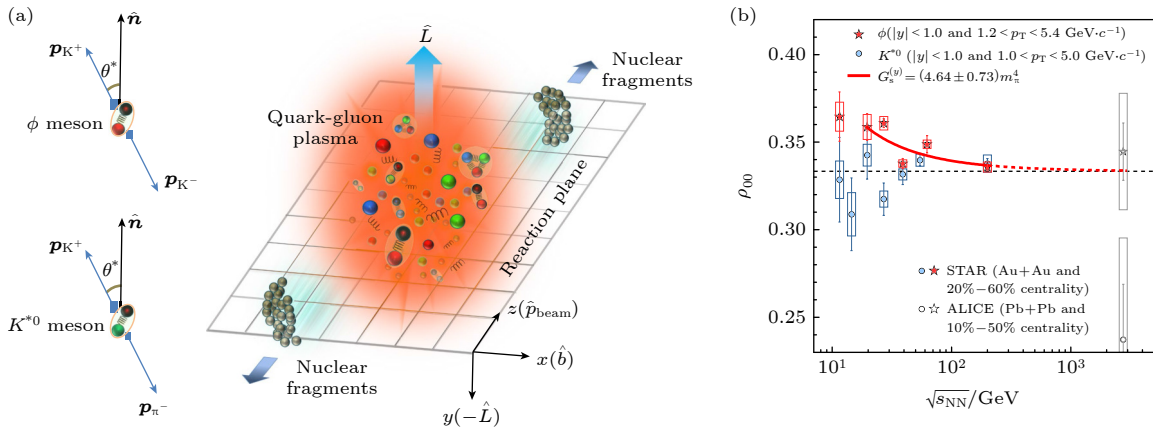


图 5 RHIC-STAR 上发现矢量介子自旋排列的测量结果^[9]

Fig. 5. Discovery of spin alignment of vector mesons from RHIC-STAR^[9].

表 2 现有实验装置的相关测量结果以及除了 2004 年最初提出的理论外更多的理论解释

Table 2. Summary of the measurements at the existing facilities and what the theory explanations additional to the original proposal in 2004.

现象	实验	特点	理论解释	解释实验
超子整体极化(GHP)的能量依赖性	RHIC ^[6] SIS ^[11]	信号强度~1% 随能量减弱	自旋与角动量耦合 ^[1,2,17] , 涡旋 ^[15,16]	理论和实验 符合较好
GHP的对撞中心度依赖性	RHIC LHC	信号向偏心碰撞增强	没有很好的理论解释	
GHP的横动量依赖性	RHIC	似乎随动量上升趋势		
超子局域极化	RHIC ^[7] LHC ^[8]	正的正弦振荡信号	切向涡旋性 ^[18,19]	解释信号 的正负值
GHP的二三阶椭圆流向依赖性	RHIC ^[13]	信号向偏心碰撞增强		
矢量介子自旋排列	RHIC ^[9]	K^* 介子零信号 φ 介子正信号	强作用场 ^[20]	理论与实验 定性符合
矢量介子自旋排列	LHC ^[12]	K^* 介子负信号 φ 介子零信号		
J/ψ 矢量介子自旋排列	LHC ^[14]	~5%		
GHP的快度依赖性	没有实验结果		角动量的几何形状依赖性 ^[21]	

4 国际上的相关理论与实验研究

表 2 尝试总结了现有实验装置的相关测量结果以及除了 2004 年最初提出的理论外更多的理论与解释. 对于该现象的基本理解以及梁作堂和王新年^[1]最初的理论预言是有效且基础的, 即对撞系统的角动量可以转化为实验上可观测的自旋效应. 然而, 越来越多的实验测量和理论研究表明, 似乎需要一个新模型来解释各种新的实验观察结果. 要统一解释所有这些与自旋有关的现象, 需要一个更基本和更基础的理论.

5 未来展望

在过去的 5 年里, STAR 成功的安装了 3 个新的子探测器^[22,23]. 这些新拓展的粒子探测能力正在被运用到物理分析中, 获得更多的物理结果. 依赖系列成功的探测器升级, 不断增加的新的科学研究计划使得 STAR 探测器在运行 20 多年后仍然可以获取丰富的物理成果. 下一步的重要工作将依托前向快度区的探测器升级^[23], 包括径迹探测系统 (3 层硅径迹探测器 FST 和 4 层微条窄隙室径迹探测器 FTT) 和量能器系统 (电磁量能器和强子量能器). 除了对 RHIC 上使用极化质子束流研究质子的自旋结构作用, 这些升级也为在金核-金核对撞

中研究超子整体极化的快度依赖以及快度 (退) 关联的起源提供了独有的能力和独特的机遇.

参考文献

- [1] Liang Z T, Wang X N 2005 *Phys. Rev. Lett.* **94** 102301
- [2] Liang Z T, Wang X N 2005 *Phys. Lett. B* **629** 20
- [3] STAR Collaboration 2007 *Phys. Rev. C* **76** 024915
- [4] Chen J H (STAR Collaboration) 2007 *J. Phys. G* **34** S331
- [5] STAR Collaboration 2008 *Phys. Rev. C* **77** 061902 (R)
- [6] STAR Collaboration 2017 *Nature* **548** 62
- [7] STAR Collaboration 2019 *Phys. Rev. Lett.* **123** 132301
- [8] ALICE Collaboration 2022 *Phys. Rev. Lett.* **128** 172005
- [9] STAR Collaboration 2023 *Nature* **614** 244
- [10] Wang X N 2023 *Nucl. Sci. Tech.* **34** 15
- [11] HADES Collaboration 2022 *Phys. Lett. B* **835** 137506
- [12] ALICE Collaboration 2020 *Phys. Rev. Lett.* **125** 012301
- [13] STAR Collaboration 2023 arXiv: 2303.09074 [nucl-ex]
- [14] ALICE Collaboration 2022 arXiv: 2204.10171 [nucl-ex]
- [15] Becattini F, Piccinini F, Rizzo J 2008 *Phys. Rev. C* **77** 024906
- [16] Becattini F, Karpenko I, Lisa M A, Uppal I, Voloshin S A 2017 *Phys. Rev. C* **95** 054902
- [17] Pang L G, Petersen H, Wang Q, Wang X N 2016 *Phys. Rev. Lett.* **117** 192301
- [18] Fu B C, Liu S Y F, Pang L G, Song H C, Yin Y 2021 *Phys. Rev. Lett.* **127** 142301
- [19] Becattini F, Buzzegoli M, Palermo A, Inghirami G, Karpenko I 2021 *Phys. Rev. Lett.* **127** 272302
- [20] Sheng X L, Wang Q, Wang X N 2020 *Phys. Rev. D* **102** 056013
- [21] Liang Z T, Song J, Uppal I, Wang Q, Xu Z B 2021 *Chin. Phys. C* **45** 014102
- [22] Yang C, Chen J H, Ma Y G, Xu Q H 2019 *Sci. Sin. Phys. Mech. & As.* **49** 102008 (in Chinese) [杨驰, 陈金辉, 马余刚, 徐庆华 2019 *中国科学: 物理学 力学 天文学* **49** 102008]
- [23] Yang C, Yang Q (STAR Collaboration) 2020 *JINST* **15** C07040

SPECIAL TOPIC—Spin and chiral effects in high energy heavy ion collisions

Global polarization of hyperons and spin alignment of vector mesons in quark matters*

Ruan Li-Juan¹⁾ Xu Zhang-Bu^{1)†} Yang Chi^{2)‡}

1) (*Department of Physics, Brookhaven National Laboratory, Upton 11973, USA*)

2) (*Key Laboratory of Particle Physics and Particle Irradiation (MOE), Institute of Frontier and Interdisciplinary Science, Shandong University, Qingdao 266237, China*)

(Received 31 March 2023; revised manuscript received 1 May 2023)

Abstract

Relativistic heavy ion collider (RHIC) as a dedicated nuclear facility has made a few major discoveries in physics. This year marks the 30th year STAR Collaboration formation and the 23th year of STAR detector operation and data collection at RHIC. In the last two decades, STAR has collected many datasets, exhibiting scientific versatility and flexibility of the RHIC facility. The total dataset in the first year is less than 1 million good events, and currently there are about 1 billion events per dataset.

The Global Hyperon Polarization was proposed in 2004. This immediately prompted the STAR Collaboration to search for this phenomenon from the early datasets. The null results were presented at Quark Matter Conference in Shanghai in 2006 and subsequently published. Although there were peripheral and continuous efforts in the following decade, no positive result has been observed experimentally. This situation changed in the following decade with the upgrade of high data rate and time-of-flight (TOF) detector and the progress of the Beam Energy Scan Phase I (BES-I). The experimental discoveries of the global polarization of hyperons in 2017 and the spin alignment of vector mesons in 2023 at RHIC-STAR confirm the theory which was established nearly twenty years ago. The theory and these measurements open the way to studying the properties of the hot and dense nuclear matter created in high-energy heavy ion collisions from a new degree of freedom, spin.

We briefly review these discoveries from the proposals of theory to the experimental measurements, and summarize the related measurements at the existing facilities and the theoretical explanations to the original proposal. The basic understanding and the original proposal are still valid and fundamental, that is, the angular momentum of system can transform into a spin effect observable in experiment. However, it appears that in each case a new model is needed to explain the new experimental observation. We need a more basic theory to help us unify all these spin related phenomena.

Over the past five years, STAR has successfully installed 3 new detectors and we have begun to see the physical analysis results from datasets with those new functions. What makes the STAR detector viable after 20 years of operation is its continuous evolution through successful upgrades, with new scientific programs added year by year. The next big thing is to forward upgrade a tracking system (3 layers of silicon strips and 4 layers of sTGC chambers) and a calorimetry system (electromagnetic and hadronic calorimeters). In addition to studying the spin structure of protons by using the polarized proton beams at RHIC, the upgrades also provide a unique ability to investigate the origin of Λ Global Polarization as a function of rapidity and rapidity (de-)correlations in Au+Au collisions.

Keywords: relativistic heavy ion collider, STAR, global hyperon polarization, spin alignment of vector mesons

PACS: 24.70.+s, 25.75.-q, 24.85.+p

DOI: 10.7498/aps.72.20230496

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11890713, 12075139), the Natural Science Foundation of Shandong Province, China (Grant No. ZR2022JQ03), and the U.S. DOE Office of Science (Grant Nos. DE-SC0012704, DE-FG02-10ER41666, DE-AC02-98CH10886).

† Corresponding author. E-mail: xzb@bnl.gov

‡ Corresponding author. E-mail: chiyang@sdu.edu.cn



夸克物质中的超子整体极化与矢量介子自旋排列

阮丽娟 许长补 杨驰

Global polarization of hyperons and spin alignment of vector mesons in quark matters

Ruan Li-Juan Xu Zhang-Bu Yang Chi

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 112401 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20230496

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230496>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

磁性硅烯超晶格中电场调制的谷极化和自旋极化

Valley and spin polarization manipulated by electric field in magnetic silicene superlattice

物理学报. 2018, 67(8): 086801 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180080>

坐标空间中构造的Breit夸克势与介子和夸克偶素的质量劈裂

Construction of Breit quark potential in coordinate space and mass splits of meson and quarkonium

物理学报. 2018, 67(9): 091201 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172155>

中子星对自旋相关轴矢量新相互作用的约束

Constraints of neutron star on new interaction of spin-dependent axial-vector coupling

物理学报. 2019, 68(18): 181102 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190477>

夸克介子模型的相图和表面张力

Phase structure and surface tension in quark meson model

物理学报. 2019, 68(18): 181101 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190798>

共振线极化光实现原子矢量磁力仪的理论研究

Theory of atomic vector magnetometer using linearly polarized resonant light

物理学报. 2018, 67(6): 060701 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172108>

锶原子光晶格钟自旋极化谱线的探测

Interrogation of spin polarized clock transition in strontium optical lattice clock

物理学报. 2018, 67(7): 070601 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172759>