



廈門大學
Xiamen University

第十一届全国高等学校
物理实验教学研讨会

面向拔尖计划2.0的物理实验 —教学探索与实践

陈理想

厦门大学物理科学与技术学院
光场调控与量子信息实验室



汇报提纲



宏观
维度

- 教育部拔尖计划2.0出台: 时代背景
- 厦大物理拔尖人才培养: 特色模式

一流
专业

微观
维度

- “量子力学”课程: 从课堂到实验室
- “量子力学”课程: 从前沿实验到思政

一流
课程



一、教育部拔尖计划2.0·时代背景

世界在变 高等教育在变



2018年11月17日，习近平总书记出席APEC工商领导人峰会

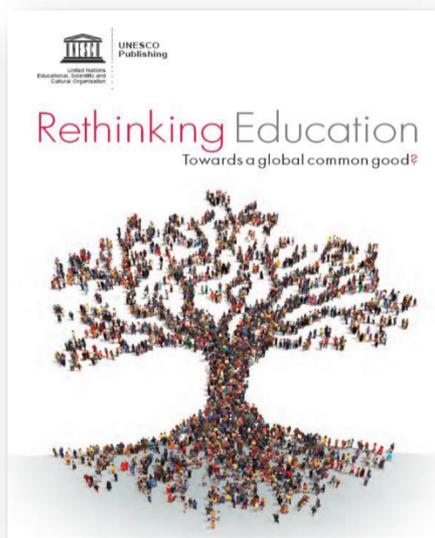
- **形势**：世界百年未有之大变局
- **挑战**：新科技革命和产业变革的时代浪潮奔腾而至，如果我们不应变、不求变，将错失发展机遇，甚至错过整个时代
- **机遇**：新科技革命和产业变革是一次全方位变革，将对人类生产模式、生活方式、价值理念产生深刻影响

超前识变 积极应对 主动求变



一、教育部拔尖计划2.0·时代背景

《反思教育》：教育正在发生深刻的转变！



UNESCO, 2015

- **创新**：高等教育与生俱来的DNA！
- **变革**：21世纪高等教育的时代特征！
- **“六卓越一拔尖”计划2.0**：
 - ✓ 新时代高等教育发展的一次 **“质量革命”**
 - ✓ 新时代建设一流本科教育的 **“中国方案”**



一、教育部拔尖计划2.0·时代背景

- **实施**：2018年10月，教育部等六部门发布《**关于实施基础学科拔尖学生培养计划2.0的意见**》。
- **目标**：经过5年努力，建设一批**260个**左右的国家青年英才培养基地，形成中国特色、世界水平的基础学科拔尖人才培养体系，具有中国标准、中国模式和中国方案。
- **拔尖计划2.0定位**：
 - 是仰望星空的计划
 - 是培养未来领导者的计划
 - 是创造“科学春天”的计划
 - 是浸、养、熏、育的计划



二、厦大拔尖人才培养·特色模式



廈門大學



陈嘉庚（右）与萨本栋（左）

- 1921年，陈嘉庚先生创办厦门大学
- 厦门大学物理学科始创于1923年
- 最早创立国家半导体学科的五校联盟之一
- ESI物理学科排名稳居全球前1%
- 厦门大学双一流建设项目：“强基固本”学科
- 2019年首批国家级一流本科专业建设点
- 2020年物理学强基计划（教育部）
- 2021年，教育部基础学科拔尖学生培养计划2.0

萨本栋物理学拔尖学生培养基地

二、厦大物理拔尖人才培养·SPECIAL模式



➤ 人才培养目标

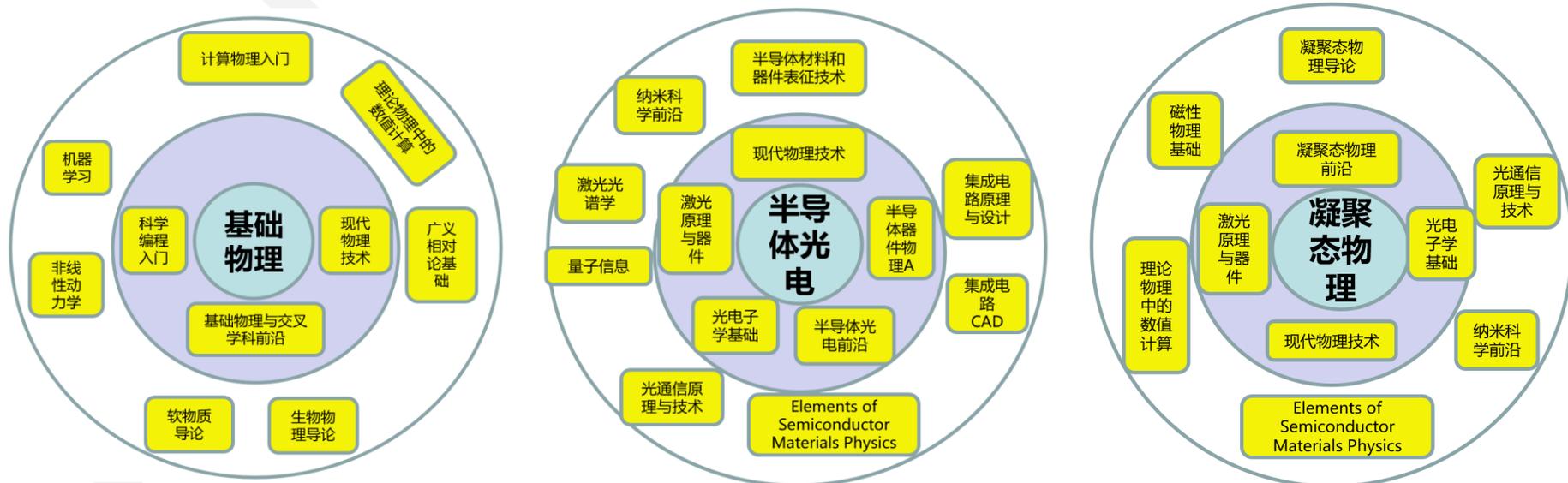
致力于培养从事物理学基础及前沿研究的专业拔尖人才及各类优秀的复合应用型人才！



二、厦大拔尖人才培养：“课程提升”

1、优化课程体系，探索创新教学模式：

实施了模块化课程体系改革；



将量子信息、引力波、黑洞、石墨烯、大数据、半导体芯片、人工智能等前沿知识融入课程体系！

二、厦大拔尖人才培养：“课程提升”



1、优化课程体系，探索创新教学模式：

前沿物理 研讨课程

半导体光电前沿
课程

凝聚态物理前沿
课程

基础物理与交叉
学科前沿课程

科学计算 系列课程

科学编程入门

机器学习

非线性动力学

计算物理入门

理论物理中的
数值计算

提升型 研讨课程

量子力学研讨课

统计物理研讨课

凝聚态光谱物理
研讨课

半导体材料和器件
表征技术

现代物理技术

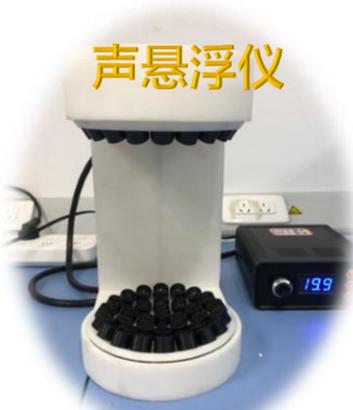
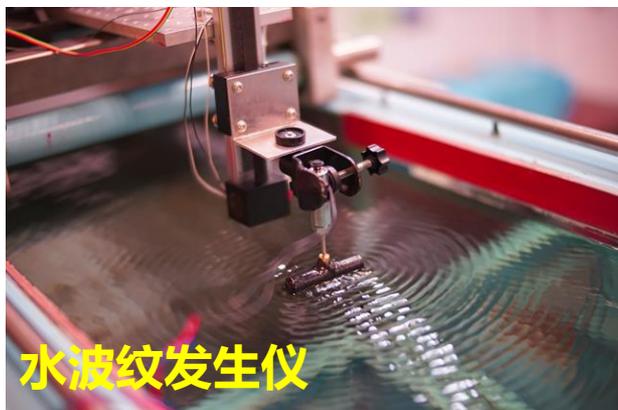
系统性建设了前沿与交叉为特色的系列课程体系，打通本硕博课程体系。

二、厦大拔尖人才培养：“以赛促学”



2、强化创新能力培养，完善实验实践教学体系：

以全国大学生物理学术竞赛(CUPT)、全国大学生物理实验竞赛(CUPEC)为依托, 推动本科生学术竞赛驱动的科研训练模式。



指导老师团队+实验支持团队+学生团队

→ 初选 → 复选 → 华东 → 全国

近一年组团研究：覆盖面>50%的本科生

2016-2018, 2020年均获CUPT全国一等奖。

2021年全国大学生物理实验竞赛总决赛，全国一等奖4项，

吴志明教授等多位老师获评优秀指导教师。



二、厦大拔尖人才培养：“研学融合”

3、开设“本科生创新实验室”：

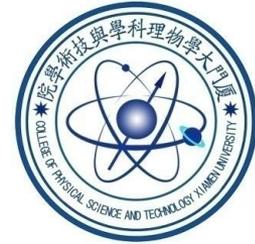
依托我校物理实验教学示范中心，依托厦门大学“校长基金”、国家级大创项目，支持本科生从事物理学前沿课题研究，提供各种仪器设备与材料，24小时向本科生开放。2020年，厦大全校本科生优秀论文奖全校18篇，我院占4篇；2021年全校23篇，我院4篇。



24小时开放的本科生创新实验室

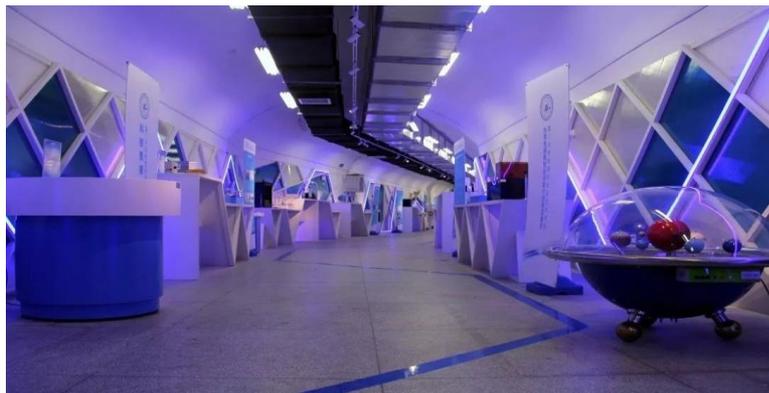


实验仪器预约系统

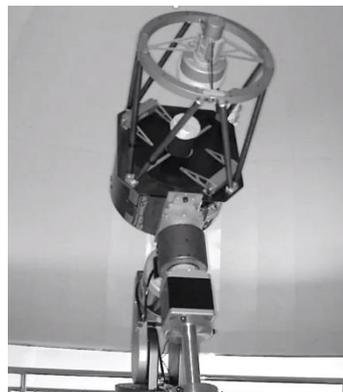


二、厦大拔尖人才培养：“研学融合”

- 厦门大学芙蓉隧道“格物致理”科创空间：丰富多彩的演示实验，大学生优秀科创作品展示，感受物理之美与创新之力！



- 2021年翔安“天文台”投入使用，集科学、探索、科普于一体的实践教学平台，纳入教务处《大学物理实验》教学课程体系。



二、厦大拔尖人才培养：“思政浸润”



5、融合思政教育，激发爱国情怀，坚定“四个自信”：

定期组织强基班和拔尖班学生前往“古田会议”旧址等红色基地开展学习实践活动，传承红色基因，致力于培养“仰望星空、脚踏实地”的未来青年物理学家！



2020年拔尖班强基班“古田会议”旧址



学史明理, 学史增信, 学史崇德, 学史力行

二、厦大拔尖人才培养：“产教融合”



6、融入国家级科研平台，共建校外实践教育基地：

拥有集成电路国家产教融合平台、教育部微纳光电子材料与器件工程研究中心等科研教学平台，与数十家知名企业联合建立校外实践教育基地。



2019年张荣校长(现党委书记) 《大学》 栏目开讲 | 神奇的第三代半导体

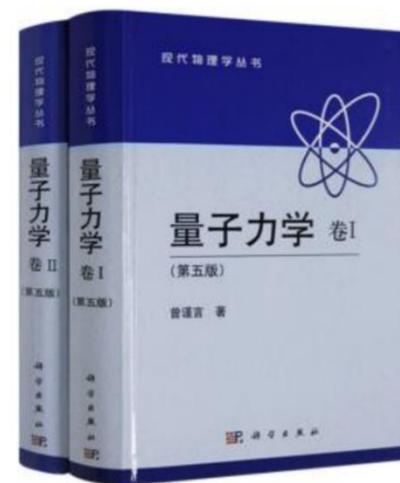
- 新时代，新知识，新本领
- 把关键核心技术掌握在自己手中，才能从根本上保障国家安全！
- 厦大物理：面向国家重大战略需求。



三、“量子力学”课程：从课堂到实验室

课程是人才培养的核心要素！

➤ 《量子力学》课程是物理学专业的一门核心基础课程，是认识和理解微观世界的**理论和工具**，涉及到对20世纪自然科学发展的客观认识以及对现代科技前沿的掌握，也深刻影响了人们的思维方式和世界观。



➤ 《量子力学》课程开设，对于物理学专业学生掌握**物理学的基础理论**，培养科学的思维方式，提高科学素养和创新意识具有重要的指导和实践意义。

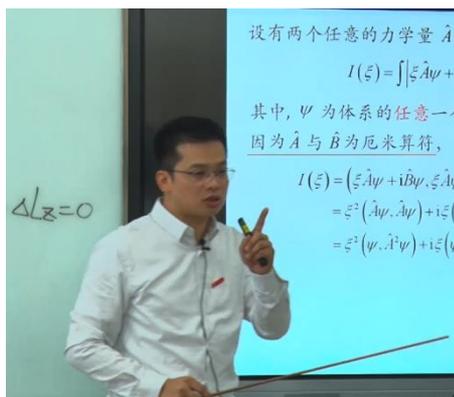
物理学是一门建立在**物理实验**基础上的学科！



三、“量子力学”课程：从课堂到实验室

► 近年来我们在《量子力学》教学模式一些举措可总结为三点：

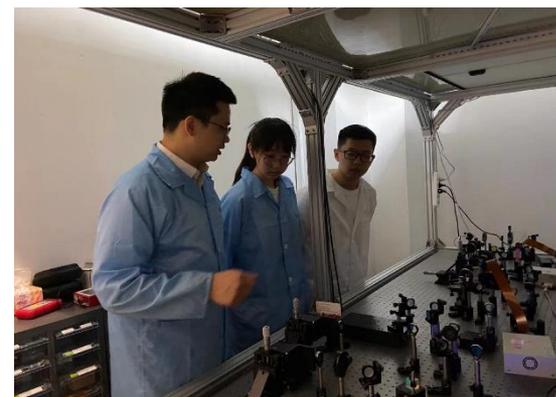
- ☆ 强化因材施教和课程资源有机结合，推行**课堂教学融入最新科技前沿进展**；
- ☆ 强化共性引导和个性培养有机结合，推行“**大班授课+小班研讨**”教学模式；
- ☆ 强化课程学习与科研训练有机结合，推行“**课堂上教学+实验室科研**”研学模式。



大班授课



小班研讨



实验室科研

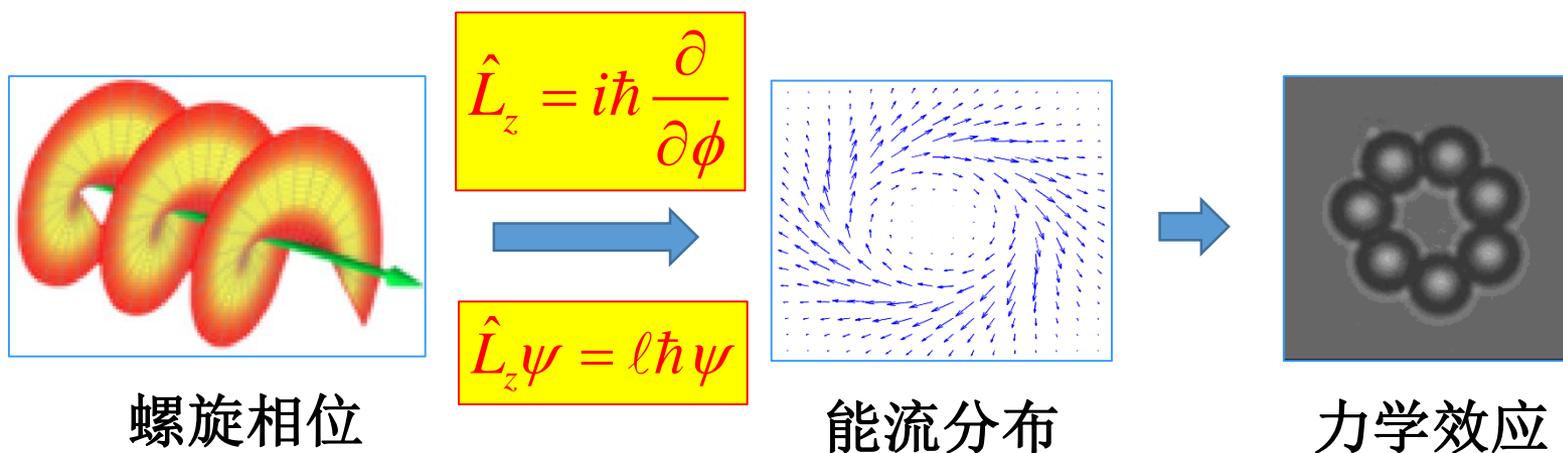


三、“量子力学”课程：从课堂到实验室

➤ 作为厦门大学“光场调控与量子信息”团队负责人，结合《量子力学》教学进度，为课程班同学设置三个实验课题：

☆ 搭建一套单缝衍射的实验装置：从实验角度出发，让本科生直观形象地理解海森堡不确定关系的物理内涵及图像；

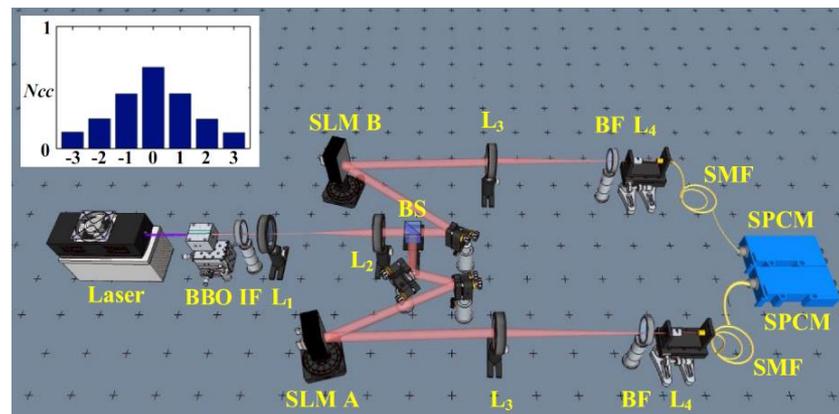
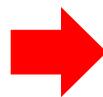
☆ 搭建一套光场调控及光力装置：让本科生掌握力学量与厄米算符、本征态的对应关系及物理内涵和图像，如：具有螺旋相位 $\psi(\phi) = \exp(il\phi)$ 光束携带轨道角动量 $l\hbar$ 。



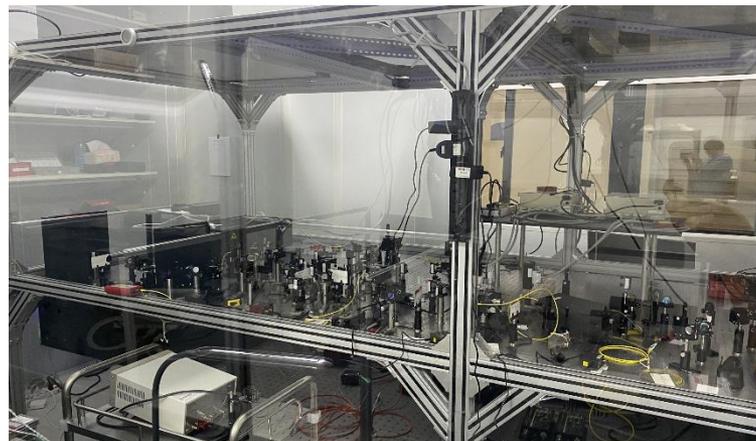


三、“量子力学”课程：从课堂到实验室

☆ 搭建一套双光子轨道角动量纠缠装置：验证Bell不等式违背，为本科生理解量子力学基本概念如非定域性与隐变量理论提供一个观测自由度。



➤ 主持大创项目：主持3项校长基金、近20项国家级、校院级大创项目，近10项获评厦门大学年度最佳大创项目，**2021年入选教育部第十四届全国大学生创新创业年会项目**。这些本科生不仅学业成绩优秀，在科学思维、科学视野、实验技能、科研能力等方面显著进步。





三、“量子力学”课程：从课堂到实验室

- **本科生发表学术论文：**2012级苏铭、吴自文，2013级方一奇，2014级贾启鲲，2015级王济国，2017级许蝶飞、张之禾，2018级李源在《Photonics Research》，《Physical Review A》，《Applied Physics Letters》，《Optics Express》等分别以**第一作者**发表超过10篇SCI论文，厦门大学新闻网、厦大青年、新浪科技等新闻媒体的关注和报道。

sina 新闻中心 综合

新闻 罗晋



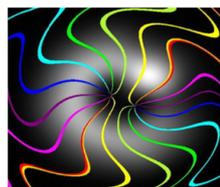
物理学院本科生在美国物理学会期刊《Physical Review A》发表学术论文

微博 微信 QQ空间 + 0 评论



方一奇，2013级本科生，从事轨道角动量调控实验研究，以第一作者在Physical Review A发表1篇学术论文，并被选为Editors Suggestion 亮点推荐！

(现北京大学物理学院直博生)



EDITORS' SUGGESTION

Fractional-topological-charge-induced vortex birth and splitting of light fields on the submicron scale

The formation and dynamics of fractional vortex charge in orbital-angular-momentum states is experimentally investigated. The holographic lithography method developed in this work may be effectively applied to study other structured matter waves.

四、“量子力学”课程：从前沿实验到思政教育



习近平：思政课是落实立德树人根本任务的关键课程！

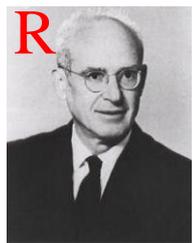
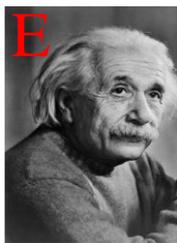
➤ **1932年诺贝尔物理学奖：**海森堡不确定性原理

科学家不可能同时精准地测量一个微观粒子的位置与动量，

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar / 2$$

量子力学中的“鱼和熊掌不可兼得”！

➤ **1935年EPR佯谬：**爱因斯坦(Einstein)、波多尔斯基(Podolsky)、罗森(Rosen)联名发表一篇论文，对量子力学完备性提出了质疑！



$$\Delta x_{12} \cdot \Delta p_{12} = 0 < \hbar / 2$$

量子纠缠能实现“鱼和熊掌可以兼得”！什么是量子纠缠？

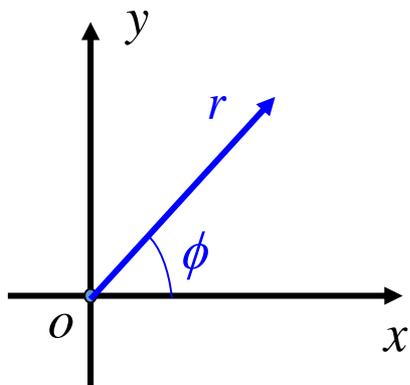
四、“量子力学”课程：从前沿实验到思政教育



思政元素：科学精神

- 2004年, 美国Rochester大学Boyd研究组在PRL报道了基于线位置和线动量的EPR量子关联: $\Delta x_{12} \cdot \Delta p_{12} \rightarrow 0$
- 2010年, 英国Glasgow大学Padgett研究组在Science报道了基于角位置和角动量的EPR量子关联: $\Delta \phi_{12} \cdot \Delta \ell_{12} \rightarrow 0$

研究动机: 如何基于径向自由度构建新的量子EPR关联?



数学坐标系
完整性和对称性

线动量: $[x, \hat{p}_x] = i\hbar \rightarrow \Delta x \Delta p_x \geq \hbar / 2$

角动量: $[\phi, \hat{L}_z] = i\hbar \rightarrow \Delta \phi \Delta L_z \geq \hbar / 2$

径动量: $[r, \hat{p}_r] = i\hbar? \rightarrow$



科学难题: 如何定义径动量算符 \hat{p}_r ?

四、“量子力学”课程：从前沿实验到思政教育



思政元素：科学精神

历史上关于径向动量定义的争议！

$$\hat{p}_x = -i\hbar \frac{\partial}{\partial x} \Rightarrow \psi(x) \propto \exp(ip_x x / \hbar) \quad (\checkmark)$$

$$\hat{L}_z = -i\hbar \frac{\partial}{\partial \phi} \Rightarrow \psi(\phi) \propto \exp(il\phi) \quad (\checkmark)$$

在柱坐标系中，径向动量算符的表达式：

$$\hat{P}_r = \vec{e}_r \cdot \hat{P} = \vec{e}_r \cdot (-i\hbar \nabla) = -i\hbar \frac{\partial}{\partial r} \Rightarrow \psi(r) \propto \exp(iP_r r / \hbar) \quad (\times)$$



$$\hat{P}_r^+ = -i\hbar \left(\frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r} \right) \quad (\text{非厄米算符!})$$

Dirac对称算符： $\hat{p}_r = \frac{1}{2}(\hat{P}_r + \hat{P}_r^+) = -i\hbar \left(\frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{2r} \right)$

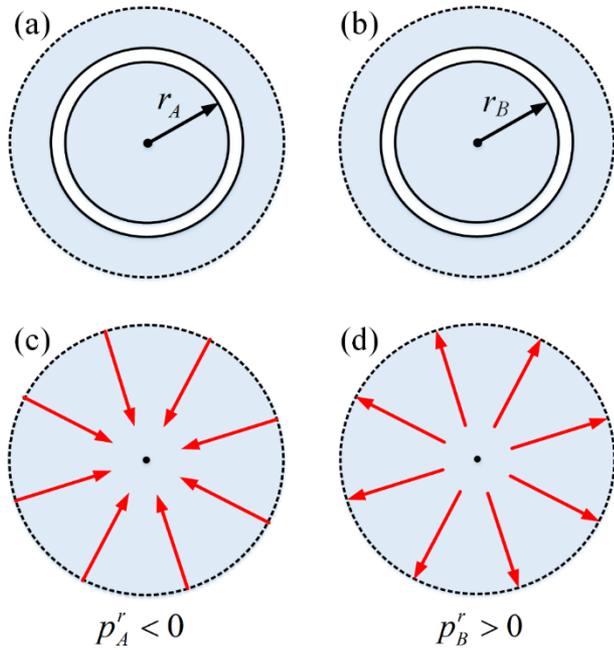
$$\Rightarrow \psi(r) \propto \frac{1}{\sqrt{r}} \exp(ip_r r / \hbar) \quad (\checkmark)$$

四、“量子力学”课程：从前沿实验到思政教育



思政元素：科学精神

- **创新性思路：**受Dirac对称性思想启发，在实验上结合光场调控手段我们实验室解决了如何定义径向动量本征态及如何测量的科学问题！



Radial Position Correlation

$$|\Psi\rangle_{AB} = \int |r\rangle_A |r\rangle_B dr$$



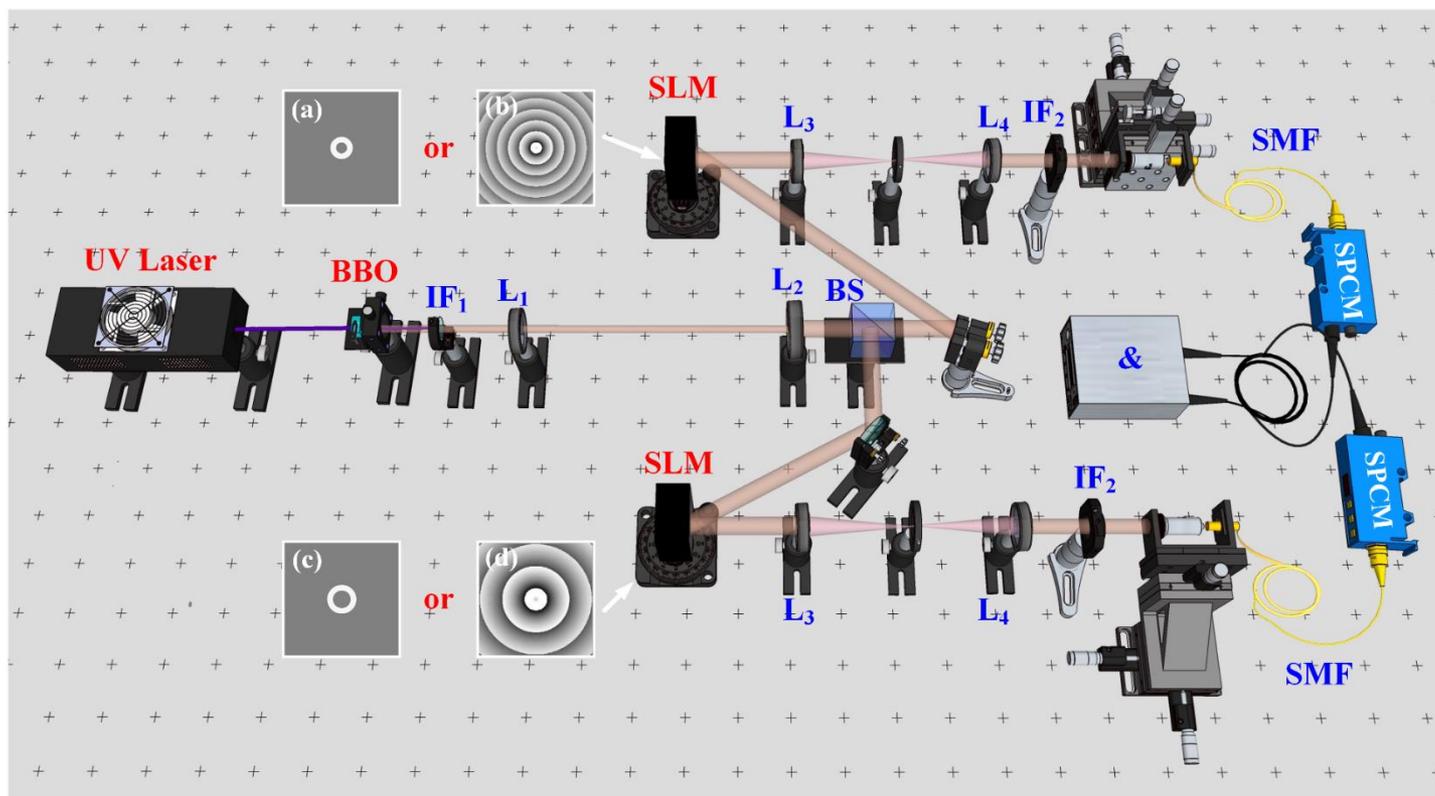
Radial Momentum Correlation

$$|\Psi\rangle_{AB} = \int |p_r\rangle_A | -p_r\rangle_B dr$$

四、“量子力学”课程：从前沿实验到思政教育



思政元素：科学精神

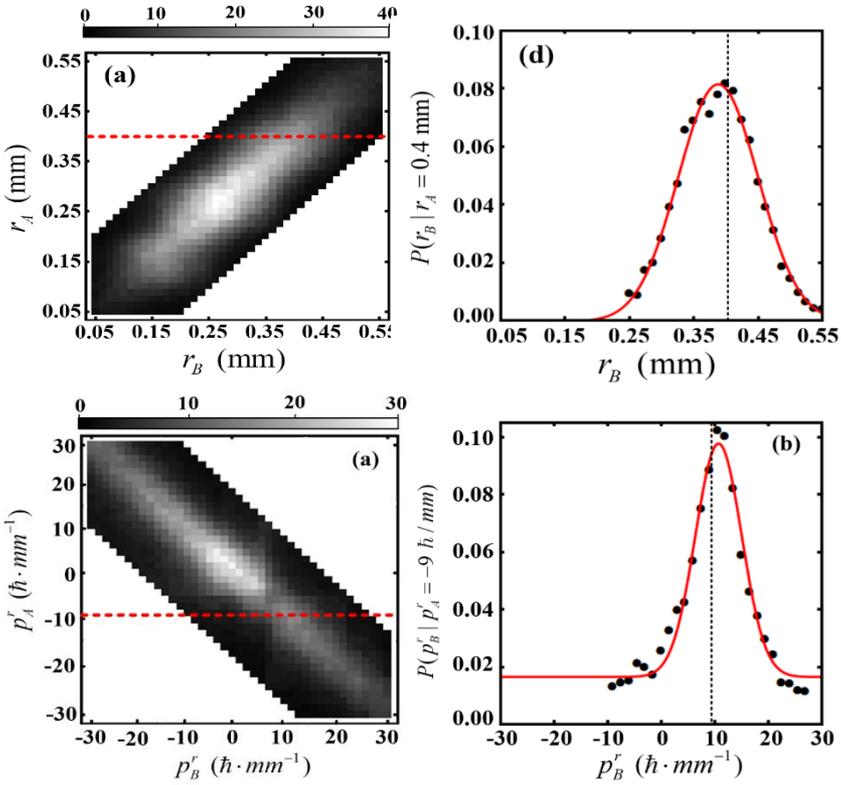


厦门大学光场调控及量子信息实验平台

四、“量子力学”课程：从前沿实验到思政教育



思政元素：科学精神



径位置关联的不确定度：



$$(\Delta(r_B | r_A))^2 = (0.0034 \pm 0.00011) \text{mm}^2$$



径动量关联的不确定度：

$$(\Delta(p_B^r | p_A^r))^2 = (53.287 \pm 3.832) \hbar^2 \cdot \text{mm}^{-2}$$



$$(\Delta(r_B | r_A))^2 (\Delta(p_B^r | p_A^r))^2 = (0.1814 \pm 0.0124) \hbar^2 < 0.25 \hbar^2$$

Synopsis: Entangling the Radial Parts of Photons

August 8, 2019

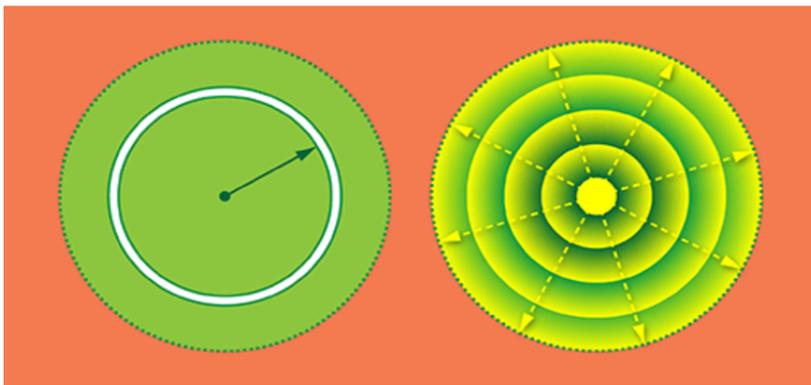
Correlations between the radial position and radial momentum of entangled photons demonstrate the suitability of these properties for quantum information applications.

Print

光子的径向自由度在量子信息领域展现出了适合的应用！

Boyd
 Phys. Rev. Lett. 123, 060403 (2019)
 Published August 8, 2019



L. Chen/Xiamen University

来自厦门大学陈理想等人通过光场调控展示了基于光子两个新径向自由度的一种新型量子纠缠！

Photons have been entangled through most of their obvious physical properties, such as polarization, position and momentum, and even angular momentum. Now, Lixiang Chen, at Xiamen University, China, and colleagues demonstrate entanglement via two new properties of photons with a specific cross-sectional structure. The researchers produced pairs of entangled photons with well-defined “radial position” and “radial momentum,” meaning each photon’s wave function is localized at a certain radius and moves radially inwards or outwards with certain momentum. Measurements made at a pair of detectors showed that the positions and momenta of the photons were correlated. The observations indicate that a photon’s radial components may be useful for various applications, such as quantum cryptography and optical micromanipulation.

Physics from the Moon
 50 years after the Apollo mission, a new crop of lunar exploration projects could extend the physics-related research we can do from the

这表明光子的径向自由度可用于各类新应用，如量子保密及光学微操控等。

explaining this perfectly conducting state.

QUANTUM OPTICS | RESEARCH UPDATE
Photons entangled in terms of radial quantum states
20 Aug 2019



来自中国等物理学家首次(for the first time)测量了纠缠光子径位置和径动量之间的量子关联！



Entangled rings: radial correlations between photons have been measured. (Courtesy: iStock/Traffic_Analyzer)

Correlations between the radial positions and radial momenta of entangled pairs of photons have been measured for the first time by physicists in China, Canada and the US.

The work was done Lixiang Chen and colleagues at Xiamen University, the University of Ottawa and University of Rochester – who say that radial entanglement could be used to create better optical tweezers and new quantum technologies.

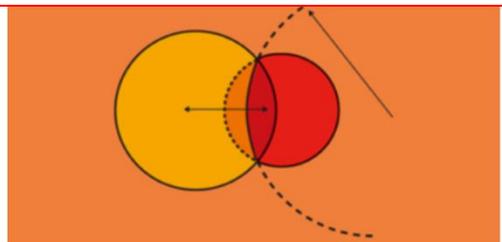


Advertisement

GOLD SUPPLIERS



该径向自由度可用于构建更为优越的光镊技术及新型量子编码！



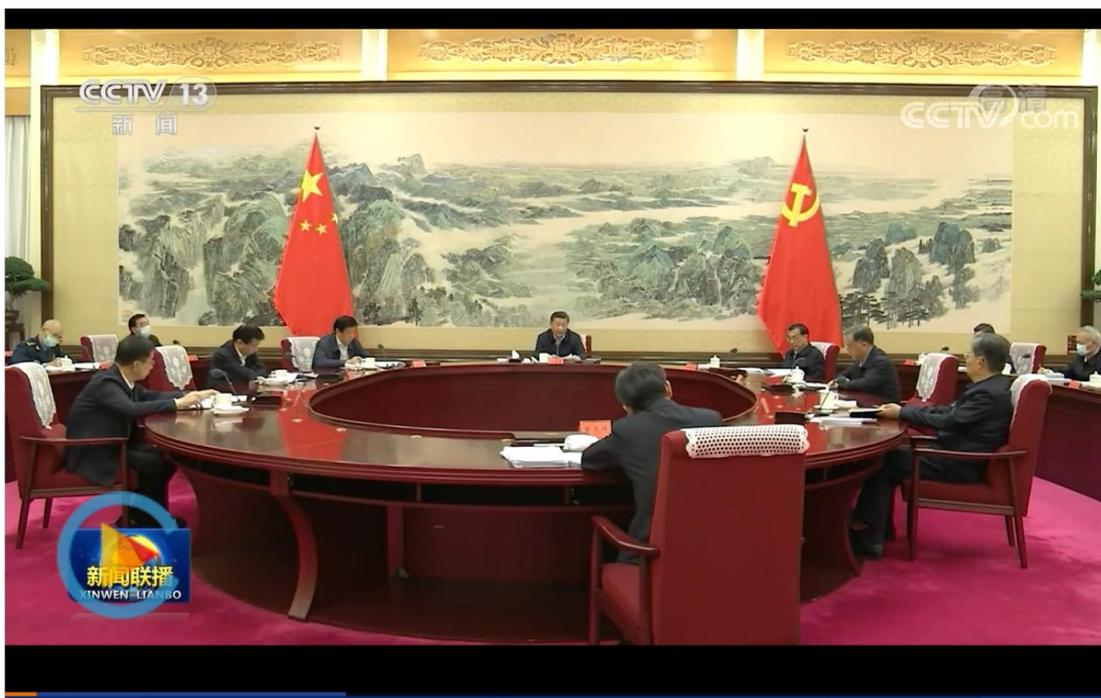
EPL
Fast and fair publication of cutting-edge physics Letters



四、“量子力学”课程：从前沿实验到思政教育



思政元素：家国情怀

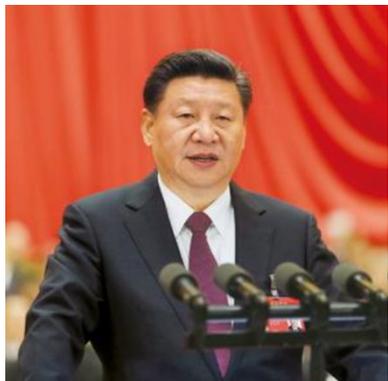


- 中共中央政治局2020年10月16日下午就量子科技研究和应用前景举行第二十四次集体学习。

四、“量子力学”课程：从前沿实验到思政教育



思政元素：家国情怀



- 习近平总书记主持学习时强调：“量子力学是人类探究微观世界的重大成果。”
- “要充分认识到推动量子科技发展的重要性和紧迫性，加强量子科技发展战略谋划和系统布局，把握大趋势，下好先手棋。”

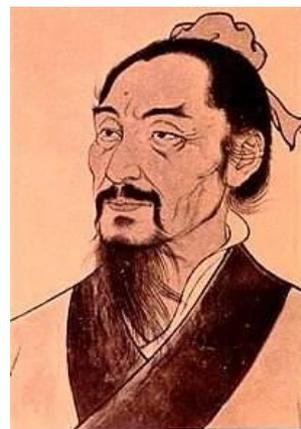
- 量子力学解释了化学。元素周期表、化学反应、化学键等都是量子力学规律所导致。
- 量子力学帮助我们理解宇宙。我们的宇宙跨越各种尺度，从光到基本粒子，到原子核，到原子、分子以及大量原子构成的凝聚态物质。
- 在微观尺度上，各种基本力的统一是理论物理的重大问题，其他未解之谜（如暗物质和暗能量）解决也依赖于量子力学。
- 很多天文现象，例如恒星发光、太阳中微子的振荡、宇宙背景辐射，乃至宇宙结构的起源等，都是因为量子力学规律。
- 很多材料性质，比如导体、绝缘体、超导等，源于电子的量子行为。
- **第二次量子革命**，比如，通过用量子态作为信息的载体，量子力学不仅像以前那样为信息技术提供硬件基础，而且还提供了软件基础，比如**量子计算**！

四、“量子力学”课程：从前沿实验到思政教育



思政元素：家国情怀

量子卫星“墨子号”



墨子

2016年8月16日，我国在酒泉卫星发射中心成功将世界首颗量子科学实验卫星“墨子号”发射升空；2017年6月15日，《科学》杂志封面报道：“墨子号”在国际上首次实现千公里量级的量子纠缠。

潘建伟院士：量子卫星取名“墨子号”体现文化自信！

四、“量子力学”课程：从前沿实验到思政教育



思政元素：家国情怀

- ▶ 2018年7月：美国众议院科学、太空和技术委员会日前一致通过《**国家量子计划法案**》，提出2019到2023财年授权美国国家标准与技术研究院、美国国家科学基金会和美国能源部获得12.75亿美元预算，用于开展量子信息科技研究。
- ▶ 2018年9月：美国白宫发布《**量子信息科学国家战略概述**》。白宫认为，量子信息科技将引领下一场技术革命，给**基础科研、经济发展、军事国防、国家安全**等带来重大变革。
- ▶ 2020年4月：美国特朗普政府申请一项投资2.37亿美元用于支持量子信息研究的预算，如果获得国会批准，将为推动**量子互联网**发展提供重要资金基础，瞄准“墨子号”。

因此，中美量子信息领域的竞争很可能成为中美贸易大战的一个延伸战场！

四、“量子力学”课程：从前沿实验到思政教育



思政元素：家国情怀

- ▶ **“墨子号”量子卫星**：课堂教学融入最新最前沿的实验成果，专业教学中融入思政元素，培养激发学生的科学精神与家国情怀，坚定“四个自信”，投入到国家最亟需科研领域，服务国家战略需求！



**“脚踏实地、仰望星空，
富有家国情怀”！**

争当未来世界的领跑者！

致 谢！



Thanks for your attention!

2022 8 · 12

