

附件 9

“大科学装置前沿研究”重点专项 2021 年度项目申报指南

为落实“十四五”期间国家科技创新有关部署安排，国家重点研发计划启动实施“大科学装置前沿研究”重点专项。根据本重点专项实施方案的部署，现发布 2021 年度项目申报指南。

本重点专项总体目标是：开展专用大科学装置的科学前沿研究，推动我国粒子物理、核物理、天文学等重要学科的部分研究方向进入世界先进行列；开展平台型大科学装置的先进实验技术和实验方法研究，提升大科学装置支撑科技创新、经济社会发展和国家安全的能力。继续支持我国具有特色和优势的大科学装置开展前沿探索研究，力争在世界上率先实现若干重大前沿突破。

2021 年度指南围绕粒子物理、核物理、强磁场、天文学、先进光源、交叉应用等 6 个方向进行部署，拟支持 21 个项目，拟安排国拨经费概算 5.15 亿元。同时拟支持 8 个青年科学家项目，拟安排国拨经费概算 4000 万元，每个项目 500 万元。

项目统一按指南二级标题（如 1.1）的研究方向申报。除特殊说明外，同一指南方向下，原则上只支持 1 项，仅在申报项目评

审结果相近、技术路线明显不同时，可同时支持 2 项，并建立动态调整机制，根据中期评估结果，再择优继续支持。

申报单位根据指南支持方向，面向解决重大科学问题和突破关键技术进行设计。项目应整体申报，须覆盖相应指南方向的全部研究内容。项目实施周期一般为 5 年。项目下设课题数不超过 4 个，每个项目参与单位总数不超过 6 家。项目设 1 名负责人，每个课题设 1 名负责人。

青年科学家项目支持青年科研人员承担国家科研任务，本指南所有方向均可作为青年科学家项目组织申报，但不受研究内容和考核指标限制。青年科学家项目不再下设课题，项目参与单位总数不超过 3 家。项目设 1 名项目负责人，青年科学家项目负责人年龄要求，男性应为 1986 年 1 月 1 日以后出生，女性应为 1983 年 1 月 1 日以后出生，原则上团队其他参与人员年龄要求同上。

本专项 2021 年度项目申报指南如下。

1. 粒子物理

1.1 CKM 矩阵参数与底强子非粲衰变 CP 破坏的精确测量

研究内容：利用海量的底夸克实验数据开展 CP 破坏等重味物理前沿课题研究，主要包括：精确测量 CKM 夸克混合矩阵参数，例如 β 和 γ 相角等；精确测量 B 介子非粲衰变的 CP 破坏，包括理解三体衰变复杂的 CP 破坏结构等；在底重子衰变中寻找 CP

破坏，包括 Λ_b^0 衰变到三体或四体末态，并理解其中多体末态的CP破坏结构。

考核指标：对 γ 相角相关的重要衰变道进行测量，并结合其他测量结果，将 γ 相角的测量精度提高到4度以内；在无圈图污染过程 $B^0 \rightarrow D^0 \pi^+ \pi^-$ 中完成 $\sin 2\beta$ 测量，精度达到10%以内。若干B介子非粲衰变和底重子衰变的CP破坏的测量结果达到世界最好水平或为世界首次测量。

1.2 基于中微子的反应堆监测新技术及相关物理研究

研究内容：发展新型中微子探测技术，开展反应堆监测技术和物理研究，主要包括：发展极低阈值、极低本底双相氩时间投影室探测技术，寻找反应截面最大但尚未被探测到的反应堆中微子—原子核相干散射过程，以实现中微子探测器的小型化，用于反应堆监测，同时研究其相关物理；发展基于新型低温液体闪烁体的高能量分辨探测器技术，用于精确测量反应堆中微子能谱及核素谱。

考核指标：发展小型化反应堆中微子探测技术，研制并运行一个极低阈值、极低本底的双相氩时间投影室探测器，采用低本底氩，有效质量不低于150kg，探测阈值达到1keV核反冲能；利用台山反应堆，成功探测到反应堆中微子—原子核相干散射信号；测量低能标下的弱混合角。研制并运行一个采用高量子效率硅光

电倍增管的新型低温液体闪烁体探测器，有效质量不低于 1 吨，能量分辨在 3MeV 时优于 1%，比现有大型液闪探测器的最好水平（Borexino,~2.8%）提高 2.5 倍以上；利用台山反应堆，测量高精度反应堆中微子能谱和核素谱，为江门中微子实验提供有效谱形误差 1% 以内的数据依据，对 U235 和 Pu239 测量的有效谱形误差达到 4% 和 8%。

1.3 无中微子双贝塔衰变和太阳中微子实验关键技术研究

研究内容：依托中国锦屏地下实验室，开展寻找无中微子双贝塔衰变、太阳中微子探测实验的关键技术和方法研究，并初步建立相关实验装置开展实验探测。

考核指标：在无中微子双贝塔衰变实验领域开展先进高纯锗半导体探测器、极低温晶体量能器、基于 Topmetal 技术的高气压时间投影室等实验技术研究，确定具有中微子双贝塔衰变有效质量小于 10meV 灵敏度的探测器技术方案；建设百吨级太阳中微子探测平台，实现太阳 B8 中微子的探测，重建出太阳中微子方向，5MeV 能量区间，太阳角重建的角度分辨为 35 度（68% 的置信区间）。

1.4 依托大型国际合作装置阿尔法磁谱仪（AMS）的物理研究

研究内容：依托大型国际合作装置 AMS 实验，开展暗物质和反物质寻找，宇宙线的起源加速和传播规律机制的物理研究工作。通过宇宙线正电子、反质子和反氦核的精确测量，进行暗物

质寻找；通过宇宙线反氦核、反碳核和反氧核的测量寻找原初反物质；精确测量宇宙线各原子核的能谱以研究宇宙线的起源加速和传播规律。参与国际合作，研制满足空间环境要求的新型大面积硅探测器，应用于 AMS02 的探测器升级。

考核指标：暗物质寻找的研究，分析 AMS 实验数据得到 1GeV~1.4TeV 的宇宙线正电子能谱测量结果，700~1000GeV 精度达到 35%；得到 1GV~500GV 的宇宙线反质子能谱结果，反质子能谱 500GV 精度好于 20%；得到宇宙线反氦研究结果。反物质寻找的研究，得到宇宙线反氦研究结果。宇宙线起源加速传播机制的研究，得到 2GV~3TV 的宇宙线 Na、Al、S、亚铁（ $Z=21\sim 25$ ）等分析结果，100GV 精度 4%~5%，3TV 精度 20%~40%；研制成满足空间条件的 10cm×100cm 硅探测器，位置分辨率好于 5 微米，优良通道占比超过 95%。

2. 核物理

2.1 STAR 束流能量扫描实验中 QCD 相结构和临界点的实验研究

研究内容：针对量子色动力学（QCD）的核物质相结构和 QCD 临界点的重大科学问题，依托相对论重离子对撞机（RHIC）的螺旋管径迹探测器（STAR）的第二期束流能量扫描实验，主要开展质心能量 20GeV 以下的重离子碰撞实验的物理分析。通过测

量守恒荷的高阶矩、超子整体极化和矢量介子的自旋排列、多奇异强子的产生、同质异位核素的可能的手征磁效应分析等，建立系统的 QCD 相结构和临界点的实验探针与方法，研究 QCD 物质相结构和 QCD 临界点。

考核指标：基于 STAR 实验第二期能量扫描实验数据,获得质心系 7~20GeV 不同能量点下的守恒荷的高阶矩的高精度实验数据，系统测量 Λ 、反 Λ 超子及矢量介子的整体极化及自旋排列的速度依赖与能量依赖并揭示其物理起源，精确测量 Ω 粒子、 ϕ 粒子等多奇异强子的产额分布并揭示其产生机制；通过测量分析同质异位素碰撞中相关物理量给出 QCD 手征磁效应、手征磁波效应是否在夸克胶子等离子环境中被观测到的结论；利用以上分析得到的系统实验结果给出 QCD 相结构及 QCD 临界点的信息。

2.2 低能区原子核结构与反应及关键天体核过程研究

研究内容：针对 X 射线暴和超新星等爆发性天体环境中的关键核反应过程，依托北京放射性核束装置 BRIF 和相关核天体物理研究装置等，在低能区开展高精度的原子核的基本性质、结构特性与反应机制及关键天体核过程研究,积极发展相关微观模型,在更广泛的同位旋和角动量维度上探索原子核有效相互作用新规律，探索宇宙元素起源和星体能量产生机制。

考核指标：完善 BRIF 高精度核物理实验平台（带电粒子探测

器阵列立体角覆盖达 4π 的 40% 以上, 能量分辨好于 50keV), 测量 3~5 项奇特原子核的基本性质、反应截面和衰变过程, 统计精度好于 10%; 发展结合人工智能的核理论分析方法, 探索原子核有效相互作用及其演化规律; 完善 BRIF 和相关核天体物理实验平台 (伽马探测器阵列立体角覆盖达 4π 的 60% 以上), 发展天体核反应的高精度实验方法, 测量天体演化相关的 3~5 项核反应截面和放射性原子核半衰期, 统计精度好于 10%; 结合天文观测, 验证天体演化模型, 理解宇宙元素起源和星体能量产生机制; 建立相关微观模型, 研究 α 团簇和核物质状态方程等在天体核过程中的关键作用。

3. 强磁场及综合极端条件

3.1 强磁场下的代谢性疾病发病机制及防控新方法研究

研究内容: 瞄准糖尿病和脂肪肝两种代谢性疾病, 依托稳态强磁场大科学装置, 发展高场生物磁共振波谱与成像新技术, 深入研究糖尿病和脂肪肝发生发展和调控机理; 探索不同参数稳态磁场对糖脂代谢、铁代谢和氧化还原等代谢性疾病关键过程的调控及机制, 研究稳态磁场对肠道微生物代谢的影响, 探索稳态磁场在糖尿病和脂肪肝诊疗中的新策略。

考核指标: 发展针对糖尿病和脂肪肝等代谢性疾病的新型核磁共振波谱与成像检测方法, 开发 1~2 种治疗糖尿病和/或脂肪肝的候选药物; 阐明稳态磁场对糖脂代谢、铁代谢和氧化还原的调

控机制，明确稳态强磁场生物安全界限，开发磁场在糖尿病和脂肪肝的潜在应用，研发 1~2 种基于磁场防控糖尿病和脂肪肝的演示样机，血糖和脂肪肝改善达到>20%。

3.2 强磁场下零/窄带隙新型电子材料制备及其应用研究

研究内容：依托稳态强磁场装置，针对下一代电子器件对零带隙/窄带隙新型电子材料的需求，围绕极端条件强磁场下电子材料制备的关键技术与关键科学问题，聚焦磁场对材料生长调控规律的获取，系统开展强磁场下窄带隙化合物半导体、零带隙低维碳基材料、高频碳/磁薄层材料、新型热电材料等新型电子材料制备与应用研究，开拓其量产应用。

考核指标：开发出强磁场 ($\geq 18\text{T}$) 辅助布里奇曼单晶炉样机 1 台；在强磁场下研发出几种具有实用化前景的零带隙/窄带隙电子材料，包括大尺寸窄带隙化合物半导体 (~ 1 英寸，带隙 $\sim 0.62\text{eV}$ ，霍尔电阻率 $>2000\text{cm}^2/\text{Vs}$ ，位错密度 $<5000/\text{cm}^2$)、高性能碳基光热催化量子点与光电材料 (吸收/发射波长 $>1200\text{nm}$ ，光热转换效率 $\geq 40\%$ ，纳米酶催化效率 $\geq 0.1\mu\text{M/s}$ ，载流子迁移率 $\sim 10\text{cm}^2/\text{Vs}$ ，光响应性 $\sim 106\text{A/W}$)、适应于 GHz/THz 波段的轻质宽带高频吸收材料 (GHz 波段：吸收 $>20\text{dB}$ 、带宽 $>5\text{GHz}$ ；THz 波段：吸收 $>20\text{dB}$ 、带宽 $>1\text{THz}$)、低成本高性能多元纳米复合热电薄膜 (ZT 值 ≥ 2.0 ，温差 $\geq 10\text{K}$ ，成本降低 50%)；探索研发材料在器件中的量产应用。

3.3 强磁场回旋管高功率太赫兹波源及电子自旋共振谱仪

研究内容：依托脉冲强磁场装置，针对材料电子自旋与核自旋的关联、激发和弛豫过程等研究需求，开展 THz 回旋管理论与技术、高精度磁场位形和波形调控方法、THz 高品质波束形成与瞬态测量技术、高功率 THz 波激励下的电子自旋共振谱仪研究，为探索关键材料结构、性能以及动力学变化提供先进测试平台。

考核指标：建立基于强磁场的高功率回旋管太赫兹波源设计理论体系，解决磁场时空分布精确调控等关键技术问题，实现高功率太赫兹脉冲波和连续波输出。（1）脉冲波辐射源：磁场强度 $>40\text{T}$ ，频率 $>1\text{THz}$ ，功率 $>300\text{W}$ ；（2）连续波辐射源：磁场强度 $>15\text{T}$ ，频率 $>800\text{GHz}$ ，功率 $>30\text{W}$ ；（3）电子自旋共振谱仪：时间分辨 $\tau(\pi/2) \leq 10\text{ns}$ ，带宽 $>1\text{GHz}$ ，DEER 空间分辨 2~50nm。

4. 天文学

4.1 依托 LAMOST、FAST 的恒星稀有天体和关键物理过程研究

研究内容：瞄准恒星内部结构和关键物理过程，依托 LAMOST、FAST 大科学装置，搜寻和发现恒星关键/稀有天体，探测恒星内部结构，识别 Ia 型超新星前身星；发展恒星对流模型，研究特殊元素的形成和输运、角动量转移过程；深入探讨双星演化的走向和结局，以及超新星等重要双星相关天体的形成和演化，

结合黑洞观测，多方面提高宇宙测距精度。

考核指标：发现几颗双星公共包层演化阶段天体；构建贫金属星和氦星的快速物质损失模型，系统建立双星演化的关键性判据；确定对流超射和星风在物质与角动量转移中的作用；获得下主序恒星和红巨星表面存在磁场的星震学证据；通过FAST确定几颗超新星前身星；提高超新星等宇宙标尺的测距精度。

4.2 第 25 太阳周重大爆发活动与空间天气研究

研究内容：针对太阳爆发活动及空间天气形成的重大科学问题，充分利用我国自主观测设备，探索重大爆发活动中磁场时空演化、爆发机理、能量释放机制、空间天气形成机理及影响的全链路过程。诊断太阳活动中等离子体加热、粒子加速、激波形成与演化，获得对重大太阳活动产生机理及其空间天气效应新的可靠物理理解，并建立高精度的物理和数值预报模型。

考核指标：确保我国自主观测新设备，如MUSER、NVST、AIMS、WeHot、FASOT等发挥科学效益；取得第25太阳活动周重大活动事件完整观测，建立数据库，涵盖国内外磁场、光学、射电等多波段成像及光谱/频谱数据，开发新型大数据分析方法；发展三维（辐射）磁流体力学数值模拟，建立针对重大太阳爆发事件的理论和数值模拟模型；建立灾害性空间天气的高精确度预

报模式和方法。

5. 先进光源、中子源及前沿探索

5.1 超高功率软 X 射线光源新原理及关键技术研究

研究内容：针对能源科学、超导材料科学、超快物理化学和光刻等科学和应用领域对高功率 EUV/软 X 射线光源的具体需求，依托软 X 射线自由电子激光大科学装置，开展超高平均功率和超高峰值功率 EUV/软 X 射线光源的新原理及核心关键技术研究，包括探索基于同步辐射和自由电子激光等产生高功率软 X 射线脉冲的新机制，发展高功率 X 射线光源所需种子激光、光学传输和诊断等关键技术。

考核指标：完成基于角色散机制的高平均功率 EUV/软 X 射线光源（平均功率 $>100\text{W}$ ）和基于啁啾激光增强型自放大自发辐射的高峰值功率软 X 射线光源（峰值功率 $>100\text{GW}$ ）的物理机制研究；基于软 X 射线自由电子激光装置实验验证高功率 X 射线产生的新机制，掌握其关键技术和实验方法，为用户提供峰值功率大于 1GW 、光子能量大于 200eV 的软 X 射线激光；掌握超高重复频率（ $>1\text{MHz}$ ）紫外波段种子激光和超大带宽红外波段种子激光等关键技术；掌握超高功率软 X 射线的光学传输、光学元件冷却（平均热负载 $>100\text{W}$ ，峰值功率 $>100\text{GW}$ ）和光学诊断（时间测量精度好于 1fs ）等技术。

6. 交叉科学与应用

6.1 超高真空平面微纳量子器件的分子束外延直接生长和原位表征技术研究

研究内容：发展选区外延生长和片上掩模外延生长等技术，实现量子材料微纳结构和平面异质器件的超高真空分子束外延直接生长；开发极低温、强磁场原子力显微镜，实现绝缘基底上的微纳结构和器件的扫描隧道谱电子态表征；改进平台扫描微波显微镜、氧化物分子束外延生长等技术设备；基于这些新发展的技术研究拓扑-超导异质结构中的马约拉纳模相关物理机理等关键科学问题。

考核指标：利用分子束外延在超高真空环境直接生长出超导电极间距 $<300\text{nm}$ ，半导体或拓扑绝缘体薄膜宽度 $<150\text{nm}$ ，超导与半导体或拓扑绝缘体的界面原子级平整（起伏小于 0.05nm ）的超导约瑟夫森结，测量到近邻超导的硬能隙。所开发的原子力显微镜工作温度低至 0.4K ，外磁场垂直方向最大 9T ，平行方向最大 2T ，扫描隧道谱能量分辨率好于 1meV ，实现对超导约瑟夫森结的扫描隧道谱图测量。

6.2 粒子流、先进光源新实验技术研究

研究内容：依托同步辐射光源、超快强激光、先进中子源、加速器等束流装置平台，针对材料科学技术、信息科学技术、生

命健康和环境保护等领域的关键科学技术问题，发展急需的先进实验技术和方法。

考核指标：在选定的研究领域和研究目标，通过研究平台与相关领域研究部门的密切合作，研发在同步辐射光源、超快强激光、中子源和加速器上为解决上述瓶颈问题急需的先进实验技术和实验方法，促进大设施在材料科学技术，信息科学技术、生命健康和环境保护等领域的交叉实验研究。

有关说明：本方向拟支持不超过 8 个项目。