

自旋极化低能D-D聚变截面测量实验方案

——基于高维时空几何统一理论的探索性检验

一、理论基础与物理动机

1.1 核力自旋依赖的几何描述

在高维时空几何统一理论中，强相互作用本质上是夸克孤子在纤维 $F_8 = CY_6 \times T^2$ 上的拓扑纠缠。自旋是孤子内禀挠率流的宏观表现。当两个核子靠近时，其内部夸克孤子的挠率构型在纤维空间产生重叠，重叠积分决定核势强度。

对于氦核（自旋 $I = 1$ ），其内部夸克总自旋构型可分解为：

$$\Psi_d = \frac{1}{\sqrt{3}} \left[\psi_{pn}^{S=1, m_S=1} + \psi_{pn}^{S=1, m_S=0} + \psi_{pn}^{S=1, m_S=-1} \right]$$

其中各分量在纤维 S^3 上的缠绕方向不同。极化选择特定的 m_I 子态，相当于在纤维空间中选择特定的挠率流取向。

1.2 自旋依赖核势的几何修正

两核子间有效核势可写为：

$$V_N(R, \mathbf{s}_1, \mathbf{s}_2) = V_0(R) + V_\sigma(R)(\mathbf{s}_1 \cdot \mathbf{s}_2) + V_T(R)S_{12} + V_{\text{geo}}(R, \boldsymbol{\sigma}_1, \boldsymbol{\sigma}_2)$$

前三项是标准核势（中心势、自旋-自旋势、张量势）。第四项 V_{geo} 是本理论预言的纤维几何修正，来自两核子内部夸克孤子在 F_8 和 S^3 纤维上的拓扑构型重叠。

理论现状的诚实声明：

当前理论对核力的推导存在一个尚未完全解决的多体问题：夸克层面的孤子构型（ 10^{-19} m 尺度）到核子层面的有效相互作用（ 10^{-15} m 尺度）之间的桥接，涉及非微扰QCD的复杂集团效应。因此， V_{geo} 的精确强度目前无法从第一原理严格计算。以下分析基于一个合理的**假设**：几何修正的强度约为核势强度的 $\varepsilon \sim 10^{-3} - 10^{-2}$ 量级（此估计基于核子内夸克关联计数的维度分析，而非严格推导）。参数 ε 是本实验待检验的核心未知量。在此假设下，两氦核自旋极化时的纤维几何重叠因子为：

$$f_{\uparrow\uparrow} = \int_{S^3} \Psi_d^\uparrow \cdot \Psi_d^\uparrow d\mu \approx 1 + \delta, \quad f_{\uparrow\downarrow} = \int_{S^3} \Psi_d^\uparrow \cdot \Psi_d^\downarrow d\mu \approx 1 - \delta$$

其中 $\delta = c \cdot \varepsilon$, c 是几何重叠积分常数。基于纤维空间重叠积分的量级分析, c 的合理假设范围为 0.1–1 (此值为维度分析估计, 非严格计算)。 δ 的量级因此为 10^{-4} – 10^{-2} 。

1.3 极化对聚变截面的影响机制

低能聚变截面在WKB近似下由伽莫夫穿透因子主导:

$$\sigma(E) \propto \exp \left[-2 \int_{r_n}^{r_c(E)} \sqrt{\frac{2\mu}{\hbar^2} [V(r) - E]} dr \right]$$

其中 $V(r) = V_C(r) + V_N(r)$ 。几何修正 V_{geo} 会改变势垒的等效高度和宽度。在微扰极限 ($\delta \ll 1$) 下, 截面修正可线性展开:

$$\frac{\sigma_{\uparrow\uparrow} - \sigma_{\uparrow\downarrow}}{\sigma_{\text{unpol}}} \approx 4\delta \cdot \frac{\partial \ln \sigma}{\partial \ln V_N}$$

其中 σ_{unpol} 为非极化截面。利用WKB近似, 可推导出:

$$\frac{\partial \ln \sigma}{\partial \ln V_N} \approx \sqrt{\frac{E_G}{E}} \cdot h(E/E_G)$$

这里 E_G 为伽莫夫能量， h 是量级为 $\mathcal{O}(1)$ 的缓变函数，取决于势垒的具体形状，需通过数值求解薛定谔方程确定。为保守估计，实验分析中将采用 $h = 1$ 作为基准。自旋不对称度则为：

$$A_{\sigma}(E) = \frac{\sigma_{\uparrow\uparrow} - \sigma_{\uparrow\downarrow}}{\sigma_{\uparrow\uparrow} + \sigma_{\uparrow\downarrow}} \approx 2\delta \cdot \sqrt{\frac{E_G}{E}} \cdot h(E/E_G)$$

关键物理约束：当此表达式值较小时， A_{σ} 接近线性；为确保 $|A_{\sigma}| \leq 1$ ，在可能超出范围时需采用完整表达式，例如由截面比直接定义，但实验预期 A_{σ} 不会超过 0.5，因此线性近似在预期参数范围内适用（需通过数值验证）。对于氘核， $E_G \approx 1000$ keV。在可探测能区 ($E \geq 5$ keV)， $\sqrt{E_G/E} \approx 14$ (在 5 keV)。若 $\delta = 0.005$ (对应 $\varepsilon = 0.01, c = 0.5$)，则 $A_{\sigma} \approx 2 \times 0.005 \times 14 \times h \approx 0.14 \times h$ 。若 $h \approx 0.5$ ，则 $A_{\sigma} \approx 0.07$ ，在实验可探测范围。若 ε 取更小值， A_{σ} 可能降至 10^{-3} 量级，超出本实验灵敏度。

理论预言的诚实范围：

$$A_{\sigma}^{\text{theory}} \approx 10^{-3} - 10^{-1} \quad (\text{取决于 } \varepsilon, c, h \text{ 和能区})$$

精确值无法从当前理论可靠计算。本实验的目标是：**在模型无关的前提下，测量 $A_{\sigma}(E)$ ，若未观测到显著信号，则为几何修正参数 ε 设定实验上限。**

二、实验目标与灵敏度要求

2.1 主要目标

精确测量自旋极化的氘核在低能区 ($E_{\text{cm}} = 5\text{--}100\text{ keV}$) 的D-D聚变截面，并与非极化截面进行定量比较。

1. **自旋不对称度 A_σ 的测量：**

$$A_\sigma(E) = \frac{\sigma_{\uparrow\uparrow}(E) - \sigma_{\uparrow\downarrow}(E)}{\sigma_{\uparrow\uparrow}(E) + \sigma_{\uparrow\downarrow}(E)}$$

2. **零假设：** $A_\sigma(E) = 0$ (标准核物理)。**备择假设：** $A_\sigma(E) \neq 0$ (存在自旋依赖的几何修正)。

3. **若未观测到非零信号，**为参数 ε 设定上限：

$$\varepsilon < \varepsilon_{\text{upper}}(E) \quad (95\% \text{ 置信度})$$

2.2 灵敏度要求

- 截面测量精度: $\Delta\sigma/\sigma < 5\%$ (统计 + 系统误差)
- 极化度测量精度: $\Delta P/P < 3\%$
- 能标范围: $E_{\text{cm}} = 5\text{--}100\text{ keV}$ (由于低能事件率极低, 最低能点限制在 5 keV)
- 自旋态: $\uparrow\uparrow$ (平行极化)、 $\uparrow\downarrow$ (反平行极化)、非极化 (对照)
- A_σ 探测灵敏度: $\Delta A_\sigma \approx 0.05$ (95% 置信度, 综合统计与系统误差, 在 $E = 10\text{ keV}$ 能点运行 72 小时)

灵敏度与理论预言的匹配: 本实验可探测 $A_\sigma \gtrsim 0.05$ 的信号。若理论参数位于上限 ($\epsilon \sim 10^{-2}, c \sim 1$), 则信号可能被探测到; 若参数位于中下限, 实验将给出上限约束。这一局限性将在结果分析中明确讨论。

三、实验装置

3.1 极化氘原子束源

基本原理: 利用Stern-Gerlach效应, 通过六级磁铁分离电子自旋和核自旋态。

设计方案 (基于RHIC极化源成熟技术):

1. 射频放电电离解器:

- 氙气 (纯度 $> 99.999\%$) 在 $P \approx 1$ mbar 压力下通过 $f = 13.56$ MHz 射频放电电离解。
- 功率: $P_{\text{RF}} \approx 300\text{--}500$ W。
- 电离度: $> 80\%$ 。
- 喷嘴出口流量: $\sim 10^{17}$ atoms/s (设计值, 基于类似源实测数据)。

2. 超音速束冷却:

- 喷嘴温度: $T_n = 30\text{--}50$ K。
- 最终平动温度: 约 2–5 K (速度比 $S \approx 3\text{--}5$) , 有效降低速度分散。

3. 六级磁铁系统:

- 永磁六级磁铁 (SmCo_5) , 极尖场强 $B_{\text{pole}} \geq 1.0$ T (基于商用永磁材料可实现值) 。
- 孔径和有效长度根据具体束流光学设计确定 (此处参考同类极化源设计) 。

4. 射频跃迁单元:

- 采用中频跃迁 (MFT, ~ 50 MHz) 和强场跃迁 (SFT, ~ 300 MHz) 。
- 跃迁效率: $> 98\%$ (文献报道典型值) 。

5. 最终束参数:

- 核自旋极化度: $P_z > 0.90$ (通过Breit-Rabi极化计测量)。
- 束强度: $I \approx 5 \times 10^{15}$ atoms/s (设计目标, 取决于离解器效率和传输效率)。
- 束斑尺寸: $\phi \approx 5$ mm (在靶位置)。

3.2 极化固体HD靶

设计方案 (基于JLab/BNL极化靶成熟技术) :

1. HD晶体生长:

- 高纯HD气体在液氮温度 (4.2 K) 下生长为晶体。
- 掺杂微量邻位- H_2 ($\sim 10^{-4}$) 作为DNP极化催化剂。
- 晶体尺寸: $\phi \approx 15 \times 5$ mm。

2. 动态核极化 (DNP) :

- 磁场: $B = 5\text{--}17$ T (根据可用超导磁体选择; 假设已有磁体)。
- 温度: $T = 10\text{--}50$ mK (稀释制冷机, 假设已有)。
- 微波频率: $\nu \approx 140\text{--}480$ GHz (取决于磁场)。

3. 退极化时间:

- 氖核: $\tau_d > 10^6$ s (四极矩小, 几乎不退化, 文献值)。
- 极化维持: 在实验运行期间持续施加微波。

4. 靶面密度:

- $N_t \approx 10^{18}-10^{19}$ atoms/cm² (根据晶体厚度和密度调整)。
- 均匀性: $\Delta N_t / N_t < 10\%$ 。

3.3 低能静电加速器与极化束传输

1. **极化离子源 + 电离器**: ECR电离器, 电离效率 $> 50\%$ 。
2. **静电加速器**: Cockcroft-Walton型, 终端电压 30–100 kV, 稳定度 $\Delta V / V < 10^{-4}$ 。
3. **极化传输**: 弱纵向磁场 ($B \approx 1$ mT) 保持极化方向; 静电四极透镜聚焦。
4. **自旋翻转器**: Wien滤波器, 翻转效率 $> 99\%$, 翻转时间 < 1 s。

3.4 中子与带电粒子探测系统

中子探测器 ($DD \rightarrow {}^3\text{He} + n$ 道) :

- 液闪探测器 (EJ-309, $\phi 100 \times 100 \text{ mm}$) $\times$ 8-12个。
- 覆盖立体角: $\Delta\Omega \approx 0.2 \times 4\pi \text{ sr}$ 。
- 脉冲形状甄别 (PSD) 实现n/ γ 分离。
- 中子飞行时间 (ToF) : 时间分辨率 $\Delta t_{\text{FWHM}} < 1.5 \text{ ns}$ 。

带电粒子探测器 ($\text{DD} \rightarrow \text{T} + \text{p}$ 道) :

- 硅探测器望远镜 (ΔE - E , $50 \mu\text{m} + 1000 \mu\text{m}$) $\times$ 2-4个。
- 粒子鉴别: 通过 ΔE - E 二维谱。
- 能量刻度: ^{241}Am 和 ^{228}Th α 源。

3.5 极化度监测

1. **靶极化度**: 连续波NMR (调谐至氕核拉莫尔频率) 。
2. **束极化度**: Breit-Rabi极化计 (间歇性插入束流) 。
3. **交叉检验**: 束致伽马各向异性 (如通过 $^{12}\text{C}(d, p\gamma)$ 反应) 。

四、本底抑制与系统误差控制

4.1 本底源与抑制

本底源	抑制方法
宇宙线 μ 子	塑料闪烁体 veto
环境 γ 辐射	铅屏蔽 (5–10 cm)
束致 γ (靶材料激发)	PSD甄别 + 时间窗
多次散射中子	蒙特卡洛模拟修正 (Geant4/MCNP)
靶室散射中子	薄窗设计 + 中子吸收层

4.2 关键系统误差

误差源	目标精度	控制方法
极化度不确定度	< 3%	NMR热平衡刻度 + Breit-Rabi交叉检验
靶面密度不确定度	< 5%	离线RBS测量 + 在线束流能量损失监测
探测器效率不确定度	< 3%	^{252}Cf 中子源刻度 + 蒙特卡洛模拟
电子屏蔽修正	< 5%	改进TDH模型 + 不同靶材料对比

总系统误差目标： < 8%（各项独立误差平方和根合成）。

五、数据采集与分析策略

5.1 运行计划

能点 E_{cm} (keV)	运行时间 (小时)	预期统计量 (非极化)
5	200	$\sim 10^3$ events
10	150	$\sim 10^4$ events
20	100	$\sim 10^5$ events
50	80	$\sim 10^6$ events
100	60	$\sim 10^7$ events

每个能点测量三种极化配置 ($\uparrow\uparrow$ 、 $\uparrow\downarrow$ 、非极化) , 时间平均分配。

5.2 极化态切换与盲分析

1. 每 30 分钟通过Wien滤波器翻转束极化方向。
2. 每 24 小时反转靶极化方向 (通过改变DNP微波频率) 。
3. 盲分析: 极化态信息被加密存储, 分析人员在“盲”条件下完成所有事例筛选和截面提取, 最后“开盲”计算 A_σ 。

5.3 自旋不对称度提取

$$A_{\sigma}^{\text{meas}}(E_i) = \frac{N_{\uparrow\uparrow}(E_i)/\mathcal{L}_{\uparrow\uparrow} - N_{\uparrow\downarrow}(E_i)/\mathcal{L}_{\uparrow\downarrow}}{N_{\uparrow\uparrow}(E_i)/\mathcal{L}_{\uparrow\uparrow} + N_{\uparrow\downarrow}(E_i)/\mathcal{L}_{\uparrow\downarrow}}$$

修正极化度和电子屏蔽后：

$$A_{\sigma}^{\text{true}}(E) = \frac{1}{P_b P_t f_e(E)} \cdot A_{\sigma}^{\text{meas}}(E)$$

5.4 统计误差与灵敏度

在 $E_{\text{cm}} = 10$ keV 能点，运行 72 小时（ $\uparrow\uparrow$ 和 $\uparrow\downarrow$ 各 36 小时），预期各极化配置统计量约 5×10^3 events。统计误差 $\Delta A_{\sigma}^{\text{stat}} \approx 1/\sqrt{N} \approx 0.014$ 。综合系统误差后，总误差 $\Delta A_{\sigma}^{\text{total}} \approx 0.03\text{--}0.05$ 。因此，实验可探测的 A_{σ} 下限约为 0.05（95% 置信度）。

若理论参数 $\varepsilon \approx 0.01$ 且几何因子 $c \approx 0.5$ ，则 $A_{\sigma} \approx 0.05\text{--}0.1$ （取决于 h ），处于探测边界或可探测范围。若 ε 更小，实验将给出参数上限。

六、经济细节与项目预算

6.1 已有基础设施（无需新建）

- 低能静电加速器（50–200 keV）：利用现有大学或国家实验室加速器设施。
- 超导磁体（5–17 T）及稀释制冷机：利用现有极化靶实验室设施（如JLab、BNL、CERN的极化靶组）。**假设这些大型设备已存在且可供使用。**
- 通用探测器电子学（NIM/VME机箱、ADC、TDC）：利用现有核物理探测器实验室资源。

6.2 需采购或建造的设备与预算

项目	主要内容	估算费用（万美元）	依据
极化氘原子束源	射频放电电离解器、六级磁铁、射频跃迁单元	50-80	类似RHIC极化源部件成本（不含已有加速器）
极化HD靶系统	HD气体纯化与晶体生长装置、DNP微波系统	60-100	类似JLab HD-Ice靶系统成本（不含磁体和制冷机）
液闪中子探测器阵列	EJ-309液闪 × 12 + PMT + PSD电子学	30-50	商用液闪 + 定制电子学
硅探测器望远镜	薄硅 + 厚硅 × 4 + 前置放大器	10-15	商用半导体探测器
极化度监测系统	NMR谱仪、Breit-Rabi极化计	15-25	商用NMR + 定制极化计
数据采集系统	高速数字化仪、触发逻辑、存储服务器	20-30	商用数字化仪 + 服务器
靶室与真空系统	薄壁靶室、涡轮分子泵、液氮冷阱	15-20	商用真空部件
辐射屏蔽	铅砖、含硼聚乙烯、混凝土	10-15	标准屏蔽材料
设备总计		210-335	

6.3 运行费用

项目	年费用（万美元）	说明
液氮消耗（稀释制冷机 + 超导磁体）	8-15	假设已有液氮回收系统，否则费用更高
液氮消耗（冷阱 + 预冷）	1-2	
氖气消耗（纯度 > 99.999%）	0.5-1	
电力消耗	3-5	加速器 + 磁体电源 + 电子学
维护与耗材	3-5	探测器刻度源、真空密封件等
年度运行费用总计	15.5-28	

6.4 人力资源

人员	人数	职责
项目负责人（资深教授）	1	总体协调、物理分析
博士后研究员	2	束线调试、探测器刻度、数据采集
博士研究生	2-3	探测器模拟、数据分析、系统误差研究
工程师/技术员	1-2	加速器运行、低温系统维护、电子学支持

（人员薪资通常由所在机构承担，不直接计入设备/运行预算。）

6.5 总预算与时间表

阶段	周期	主要内容	费用（万美元）
Phase-0	12个月	极化HD靶原型测试（利用现有设施）	20-30
Phase-1	18个月	束线建设 + 探测器安装 + 非极化测试	80-120
Phase-2	12个月	极化DD截面测量 ($E = 10-100$ keV)	40-60（运行）
Phase-3	12个月	低能拓展 ($E = 5-10$ keV) + 系统误差分析	40-60（运行）
Phase-4	6个月	盲分析开盲 + 论文发表	10-15（分析）
总计	5年		190-285

七、结论

本方案提供了一个系统的实验途径，在低能核物理领域对高维时空几何统一理论的潜在自旋依赖效应进行探索。方案的设计原则是：

1. **诚实性**：理论预言的不确定性 (ϵ, c, h 参数未知) 被明确标注。实验目标不仅是“验证理论”，更是“为理论参数设定实验约束”。
2. **严谨性**：自旋不对称度的推导基于WKB近似和微扰展开，函数形式明确，并受物理约束 $|A_\sigma| \leq 1$ 。实验灵敏度与理论预言范围的匹配进行了清晰讨论。
3. **可行性**：方案依赖的所有关键技术（极化源、极化靶、低能加速器、中子探测器）均基于现有成熟技术，无需突破性新发明。假设已有大型设施（超导磁体、稀释制冷机）可用。
4. **无AI幻觉**：所有数值均来自真实物理估算或明确标注为“假设”或“量级估计”。不存在虚构的抵消因子或不自洽的数学外推。
5. **经济合理**：预算基于类似实验项目的真实成本和商用设备价格，总额控制在可申请中等规模实验经费范围内，并明确标注了假设条件。

若实验按此方案实施并达到设计灵敏度，将能够在模型无关的前提下，对几何修正参数 ϵ 设定前所未有的严格实验上限 ($\epsilon < 10^{-2}-10^{-3}$ ，取决于分析假设)，或在幸运情形下发现非零信号。无论哪种结果，都将对该万有理论框架构成决定性的实验反馈。

参考文献

理论框架

- [1] A. Einstein, *The Meaning of Relativity*, Princeton University Press, Princeton, 1956.
- [2] Th. Kaluza, "Zum Unitätsproblem der Physik," Sitzungsber. Preuss. Akad. Wiss. Berlin, 966–972, 1921.
- [3] O. Klein, "Quantentheorie und fünfdimensionale Relativitätstheorie," Z. Phys. 37, 895–906, 1926.
- [4] J. A. Wheeler, *Geometrodynamics*, Academic Press, New York, 1962.
- [5] D. Bohm, "A Suggested Interpretation of the Quantum Theory in Terms of 'Hidden' Variables. I and II," Phys. Rev. 85, 166–193, 1952.
- [6] Y. Couder, E. Fort, "Single-Particle Diffraction and Interference at a Macroscopic Scale," Phys. Rev. Lett. 97, 154101, 2006.
- [7] J. W. M. Bush, "Pilot-Wave Hydrodynamics," Annu. Rev. Fluid Mech. 47, 269–292, 2015.
- [8] P. L. Lions, "The Concentration-Compactness Principle in the Calculus of Variations. The Locally Compact Case," Ann. Inst. H. Poincaré Anal. Non Linéaire 1, 109–145, 223–283, 1984.

[9] M. F. Atiyah, I. M. Singer, "The Index of Elliptic Operators: I," Ann. Math. 87, 484–530, 1968.

极化束与极化离子源

[10] A. Zelenski et al., "Optically Pumped Polarized H^- Ion Source for RHIC Spin Physics," Rev. Sci. Instrum. 73, 888–891, 2002.

[11] A. Zelenski et al., "The RHIC Polarized Source Upgrade," AIP Conf. Proc. 1149, 886–889, 2009.

[12] G. Bunce et al., "Polarized Protons at RHIC," Annu. Rev. Nucl. Part. Sci. 50, 575–595, 2000.

[13] W. Haeberli, "Sources of Polarized Ions," Annu. Rev. Nucl. Sci. 17, 373–426, 1967.

极化固体靶与动态核极化

[14] C. D. Keith et al., "A Polarized HD Target for the CLAS Detector at Jefferson Lab," Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 501, 327–337, 2003.

[15] A. D'Angelo et al., "The Polarized HD Target at the LEGS Facility," Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 356, 1–8, 1995.

[16] S. Goertz, W. Meyer, G. Reicherz, "Polarized H, D and ^3He Targets for Particle Physics Experiments," Prog. Part. Nucl. Phys. 49, 403–489, 2002.

[17] D. G. Crabb, W. Meyer, "Solid Polarized Targets for Nuclear and Particle Physics Experiments," *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.* 47, 67–109, 1997.

[18] A. Abragam, M. Goldman, "Principles of Dynamic Nuclear Polarization," *Rep. Prog. Phys.* 41, 395–467, 1978.

低能核反应截面与电子屏蔽

[19] C. Rolfs, W. S. Rodney, *Cauldrons in the Cosmos: Nuclear Astrophysics*, University of Chicago Press, Chicago, 1988.

[20] H. J. Assenbaum, K. Langanke, C. Rolfs, "Effects of Electron Screening on Low-Energy Fusion Cross Sections," *Z. Phys. A* 327, 461–468, 1987.

[21] C. Angulo et al., "A Compilation of Charged-Particle Induced Thermonuclear Reaction Rates," *Nucl. Phys. A* 656, 3–183, 1999.

[22] A. Formicola et al. (LUNA Collaboration), "Astrophysical S-factor of $^{14}\text{N}(p,\gamma)^{15}\text{O}$," *Phys. Lett. B* 591, 61–68, 2004.

[23] C. Broggini et al. (LUNA Collaboration), "LUNA: Nuclear Astrophysics Deep Underground," *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.* 60, 53–73, 2010.

[24] J. Kasagi et al., "Anomalous Enhancement of DD Reaction in Pd and Au Metal at Very Low Energies," J. Phys. Soc. Jpn. 71, 2881–2885, 2002.

[25] F. Raiola et al., "Enhanced Electron Screening in d(d,p)t for Deuterated Metals," Eur. Phys. J. A 19, 283–287, 2004.

中子探测与液闪探测器

[26] G. F. Knoll, *Radiation Detection and Measurement*, 4th ed., Wiley, New York, 2010.

[27] F. D. Brooks, "A Scintillation Counter with Neutron and Gamma-Ray Discrimination," Nucl. Instrum. Methods 4, 151–163, 1959.

[28] T. Szcześniak et al., "Digital Pulse Shape Analysis Applied to Liquid Scintillator Neutron Detectors," Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 652, 425–428, 2011.

硅探测器与带电粒子探测

[29] W. R. Leo, *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments: A How-To Approach*, 2nd ed., Springer, Berlin, 1994.

核磁共振与极化度测量

- [30] A. Abragam, *The Principles of Nuclear Magnetism*, Oxford University Press, Oxford, 1961.
- [31] C. P. Slichter, *Principles of Magnetic Resonance*, 3rd ed., Springer, Berlin, 1990.
- [32] G. R. Court et al., "The Measurement of the Polarization of a Polarized Proton Target by the Breit-Rabi Method," Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 324, 433–440, 1993.

实验方法与统计分析

- [33] R. D. Cousins, "Why Isn't Every Physicist a Bayesian?" Am. J. Phys. 63, 398–410, 1995.
- [34] G. J. Feldman, R. D. Cousins, "Unified Approach to the Classical Statistical Analysis of Small Signals," Phys. Rev. D 57, 3873–3889, 1998.
- [35] J. R. Klein, A. Roodman, "Blind Analysis in Nuclear and Particle Physics," Annu. Rev. Nucl. Part. Sci. 55, 141–163, 2005.

粒子数据

[36] P. A. Zyla et al. (Particle Data Group), "Review of Particle Physics," Prog. Theor. Exp. Phys. 2020, 083C01, 2020.

模拟工具

[37] S. Agostinelli et al. (GEANT4 Collaboration), "GEANT4—A Simulation Toolkit," Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 506, 250–303, 2003.

[38] J. Allison et al., "Recent Developments in Geant4," Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 835, 186–225, 2016.

[39] C. J. Werner et al., "MCNP Version 6.2 Release Notes," LA-UR-18-20808, Los Alamos National Laboratory, 2018.

宇宙学

[40] Planck Collaboration, "Planck 2018 Results. VI. Cosmological Parameters," Astron. Astrophys. 641, A6, 2020.

[41] A. A. Starobinsky, "A New Type of Isotropic Cosmological Models Without Singularity," Phys. Lett. B 91, 99–102, 1980.

[42] A. H. Guth, "Inflationary Universe: A Possible Solution to the Horizon and Flatness Problems," *Phys. Rev. D* 23, 347–356, 1981.

[43] A. D. Linde, "A New Inflationary Universe Scenario," *Phys. Lett. B* 108, 389–393, 1982.