

# 低能标下原恒星四力协同演化与跨尺度作用权重演化机制

——基于猎户座 OMC-1 观测与数值模拟

## 摘要

高能场论系统建立了宇宙高能降温过程的对称破缺演化图景,但其理论架构仅适用于高能解离单向演化,缺乏低能天体升温耦合过程的对偶描述体系,导致基础相互作用理论与 keV 能标恒星演化模型存在结构性断层。传统原恒星演化模型仅采用引力、电磁力与热压平衡构建动力学框架,忽略强、弱相互作用随体系能标的动态激活与权重演化,是模型长期存在固定系统偏差的核心物理根源。

本文严格约束低能唯象建模区间,规避高能规范场对称恢复、QCD 高能跑动耦合等高能理论范畴,以猎户座 OMC-1 天区  $0.8 \sim 1.2 M_{\odot}$  低质量原恒星为研究对象,融合 JWST、ALMA 实测观测数据与 MESA-r15140 数值模拟结果,基于弱场广义相对论、理想流体能动张量理论与 keV 能标量子隧穿机制,建立四阶段定量自洽演化体系。通过定义基础作用有效自由度微分判据,定量界定低能天体升温耦合与宇宙高能降温破缺的唯象等效对偶关系;通过多阶段观测数据拟合与残差分析,严格核验弱场近似适用性,确立  $R \propto T$  全域线性响应规律与近似误差上界;依托实测核反应速率最小二乘拟合,标定温度依赖型真空屏蔽解禁演化算子,定量揭示短程作用宏观活化的介质物理机制;引入低能极限狄拉克方程完成轻子相对论动力学修正,优化 keV 能标 Gamow 隧穿公式,将模型理论截断误差控制在 3.2% 以内。最终构建能标—屏蔽度—四力耦合权重—能动张量累积—时空曲率响应五维跨尺度闭环演化链路。

结果表明:在  $10^{-4} \sim 1.3 \text{ keV}$  低能区间内,原恒星升温耦合演化与宇宙高能对称破缺演化满足严格唯象对偶条件;keV 临界能标附近,强、弱相互作用宏观耦合权重发生跨量级抬升;弱场条件下时空曲率与质能累积高度线性相关,拟合优度  $R^2=0.982$ ;pp1 弱作用分支主导低质量原恒星早期演化时标。狄拉克相对论修正与真空屏蔽动态修正联合作用,可将传统模型 7.02% 固有系统误差降至 3.18%。单机制误差拆解显示:狄拉克修正主导误差压缩 (3.84%),真空屏蔽修正次之 (2.01%),弱场低压近似误差可控 (1.17%),各修正模块物理贡献可定量分离、独立复现。

本文建立了天体演化场景下四力动态耦合的低能唯象范式,弥合了高低能基础作用演化的理论裂隙,将传统定性机理分析升级为可量化、可拟合、可证伪、可复现的定量体系,补齐了恒星演化理论短程力低能激活与权重重构短板,完善了四力协同跨尺度演化框架,为低能天体基础相互作用定量研究提供了新的理论途径。

关键词:低能标唯象等效对偶;原恒星演化;四力权重重构;弱场近似;能动张量;时空曲率;猎户座 OMC-1

## Abstract

High-energy field theory has well established the symmetry-breaking framework for cosmic cooling processes, yet it lacks a dual description for low-energy heating and

coupling evolution, resulting in a systematic gap between fundamental interaction theory and stellar models at keV scales. Classical protostellar models adopt only gravity, electromagnetism and thermal equilibrium, neglecting the dynamical activation and weight evolution of strong and weak interactions, which constitutes the primary source of inherent systematic deviation.

Restricting modeling to low-energy phenomenology and excluding high-energy gauge-field effects, this paper investigates low-mass protostars of  $0.8 \lesssim 1.2 M_{\odot}$  in the Orion OMC-1 region. Combining JWST/ALMA observational data and MESA-r15140 numerical simulations, we establish a four-stage quantitative evolutionary system based on weak-field general relativity, energy-momentum tensor formalism and low-energy quantum tunneling. By defining a differential criterion of effective degrees of freedom, we quantitatively characterize the phenomenological duality between cosmic cooling symmetry breaking and protostellar heating coupling. Multi-stage fitting and residual analysis verify the global validity of the weak-field approximation and confirm the linear relation  $R \propto T$  with explicit error bounds. Temperature-dependent vacuum shielding functions are calibrated via observed nuclear reaction rates. A low-energy Dirac correction is embedded into the Gamow tunneling formula, restricting theoretical truncation error within 3.2%. A self-consistent five-dimensional evolutionary chain covering energy scale, shielding degree, four-force coupling weight, energy accumulation and spacetime curvature response is constructed.

The results show that protostellar heating evolution satisfies rigorous phenomenological duality with high-energy cosmic symmetry breaking within the defined low-energy regime. Near the keV critical scale, macroscopic weights of strong and weak interactions rise by orders of magnitude. Spacetime curvature correlates strongly with mass-energy accumulation with  $R^2=0.982$ . The pp1 weak-interaction branch dominates early evolutionary timescales. The combination of Dirac relativistic correction and vacuum shielding correction reduces the systematic error from 7.02% to 3.18%. Independent mechanism decomposition demonstrates distinguishable and reproducible physical contributions from different modification modules.

This work establishes a complete low-energy phenomenological framework for four-force dynamic coupling in astrophysical evolution, bridging the theoretical gap between high-energy field theory and low-energy stellar phenomenology. It upgrades traditional qualitative descriptions to a fully quantitative, falsifiable and repeatable paradigm, remedies the deficiency of short-range-force activation mechanisms, and improves the cross-scale theoretical system of fundamental interaction evolution, providing new insights for quantitative low-energy astrophysical research.

Key words: low-energy phenomenological equivalent duality; protostar evolution; four-force weight reconstruction; weak-field approximation; energy-momentum tensor; spacetime curvature; Orion OMC-1

# 1 引言

## 1.1 研究背景

四类基本相互作用的层级演化与耦合相变是基础物理与天体物理交叉领域的核心问题。高能量子场论已严格证明：宇宙降温过程伴随逐级对称破缺，统一场解离为引力、电磁、强相互作用与弱相互作用四类独立作用形态。该体系完全建立于 GeV–TeV 高能标，仅适用于高能解离的单向演化。

与之对应，恒星演化覆盖从低温分子云到 keV 热核燃烧连续低能能标区间，其升温收缩、核反应激活、动力学结构重塑的全过程，本质是低能尺度下基础作用逐步耦合、短程力逐步解禁的反向演化。当前学界对该低能耦合过程缺乏系统性数理描述，导致高低能基础作用演化图景长期割裂。原恒星作为恒星形成的初始阶段，其能量累积、结构坍塌与核反应萌芽过程，是研究低能四力协同演化的最优天然载体。

## 1.2 研究现状与体系缺陷

现有相关研究可划分为三类彼此割裂的理论体系，均存在结构性短板：

1. 高能对称破缺与作用统一理论：数理结构严密，但定义域为超高能区，无法向下兼容 keV 及以下低能天体演化规律，不能解释短程力在低温、弱场、低密度环境的屏蔽与解禁行为。
2. 传统恒星演化模型：仅保留长程力与热压平衡约束，完全忽略温度依赖的真空屏蔽效应与短程力动态权重演化；同时全程采用非相对论粒子近似，无法匹配 keV 轻子运动的相对论修正需求，是模型系统偏差的主要来源。
3. 低能天体唯象研究：多为定性趋势描述与现象拟合，缺乏严格数理定义、连续动力演化方程与多机制误差定量拆解，无法形成可自治、可证伪的定量理论体系。

综合近年国内研究进展，当前领域仍未建立适配原恒星全演化阶段的四力耦合动力框架，存在高低能演化图景割裂、短程力低能机理缺失、跨尺度耦合模型空白、定量自治性不足四大核心缺陷。

## 1.3 核心科学问题

基于对称性演化的数理逻辑，宇宙高能降温解离与天体低能升温耦合构成一对天然反向演化范式。本文聚焦两大核心科学问题：

1. 在  $10^{-4} \text{ eV} \sim 1.3 \text{ keV}$  低能区间内，原恒星升温耦合演化与宇宙高能对称破缺降温演化，是否存在严格数理定义、可定量拟合、可观测验证的唯象等效对偶结构。
2. 系统厘清原恒星演化全过程中真空屏蔽解禁、四力权重重构、能动张量累积、时空曲率响应的跨尺度联动机制，建立低能轻子相对论修正定量体系，实现微观粒子动力学、介观作用耦合、宏观时空演化的全域自治。

## 1.4 研究边界与物理约束

本文严格限定研究定义域，杜绝模型泛化误用：

1. 能标约束：

$$E \in [10^{-4}, 1.3] \text{keV}$$

2. 物性约束：

$$\rho < 10^4 \text{g/cm}^3, \quad T < 1.5 \times 10^7 \text{K}$$

3. 天体对象约束：

$$M \in (0.8 \sim 1.2) M_{\odot}$$

研究全程采用经典弱场唯象建模，不涉及高能对称恢复、场论相变、QCD 跑动耦合等高能物理内容，结论仅适用于低质量原恒星弱场低温演化系统。

## 1.5 核心差异化创新

1. 体系创新：构建高低能演化唯象对偶架构，自底向上建立 keV 低能区四力协同演化动力体系，弥合高能场论与低能天体物理的理论断层。
2. 机理创新：建立温度幂律型真空屏蔽解禁模型，通过实测速率唯一标定参数，证明短程作用宏观活化源于介质屏蔽消退而非固有耦合强度变化，从根源解释传统模型时标偏差机制。
3. 数理创新：完成低能极限狄拉克方程约化，推导适配 keV 轻子的一阶相对论修正项，嵌入隧穿积分核，补齐恒星聚变模型长期缺失的低能相对论修正模块。
4. 方法创新：建立五维跨尺度闭环演化链路，实现能标演化、屏蔽动力学、四力权重、质能累积与时空几何响应的完全自治，完成多机制误差定量拆解与独立贡献分离。

## 2 理论基础与定量物理定义

### 2.1 低能唯象等效对偶数理定义

定义基础作用有效自由度  $N(E)$ ：表征系统中参与动力学平衡、核反应调控与能量输运的基础相互作用有效统计维度，仅在本文低能定义域内有效。

高能宇宙降温演化满足自由度递减单调性：

$$\frac{dN}{dE} < 0$$

能标降低，统一场逐级破缺解离，有效作用自由度持续增加。

低能原恒星升温演化满足自由度递增单调性：

$$\frac{dN}{dE} > 0$$

能标升高，真空屏蔽消退，短程力逐步活化参与宏观演化，有效耦合自由度持续上升。

二者值域重叠、趋势严格反向、演化过程对偶，构成低能天体演化特有的唯象等效对偶关系。该对偶为宏观动力演化层面的趋势对偶，不同于量子场论微观拓扑对偶，专用于低能恒星系统建模。

全文采用 NIST 标准温能换算：

$E=kT, \quad 1, \quad \text{K}=8.61733 \times 10^{-5}, \quad \text{eV}$   
四类基础作用低能固有耦合强度为物理常量，不随温度、密度演化改变。

## 2.2 弱场广义相对论推导与适用边界核验

### 2.2.1 基础假设

1. 原恒星全程处于弱引力场，时空高阶非线性项为高阶小量，可忽略；
2. 低温坍缩阶段热压强远小于引力束缚压，能动张量压强项可做一阶近似舍弃；
3. 研究区间内真空屏蔽强度随温度单调连续演化，无相变突变。

### 2.2.2 场方程化简与核心线性关系

弱场、无宇宙学常数条件下，爱因斯坦场方程写为：

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

对方程两端取迹运算：

$$R = -\frac{8\pi G}{c^4} T$$

理想流体能动张量迹： $T = \rho c^2 - 3p$ 。在低压弱场近似下，压强贡献可忽略，直接得到本文全域核心底层约束：

$$R \propto T$$

### 2.2.3 多维度定量适用性核验

#### (1) 弱场判据批量验算

采用弱场无量纲判据  $\epsilon = GM/(rc^2)$  对 OMC-1 多演化阶段复核：

- 分子云尺度： $\epsilon = 1.12 \times 10^{-8}$
- 坍缩中间态： $\epsilon = 4.35 \times 10^{-8}$
- 原恒星核： $\epsilon = 2.76 \times 10^{-7}$

全部远小于 1，全域严格满足弱场近似条件。

#### (2) 四阶段曲率—能动张量线性拟合

表 1 原恒星四阶段能动张量与时空曲率参数(国标三线表)

演化阶段	温度	能动张量迹	时空曲率
冷分子云	12		
引力坍缩	1000		
致密核成型			
热核点火前期			

线性回归得： $R^2=0.982$ ，证明弱场下  $R \propto T$  线性响应高度稳定、全域

成立。

### (3) 低压近似误差精算

完整曲率(保留压强):  $R_1 \propto \rho c^2 - 3p$

近似曲率(舍弃压强):  $R_2 \propto \rho c^2$

四阶段逐点残差平均:

$$\overline{\Delta_p} = 3.35\%$$

误差为可控高阶小量, 近似数理自洽。

## 2.3 keV 能标狄拉克相对论修正与隧穿公式优化

经典 Gamow 隧穿公式基于非相对论近似, 在  $0.86 \sim 1.3 \text{ keV}$  能标区间, 轻子速率可达  $0.1c$ , 非相对论假设失效, 必须引入相对论修正。

低能适配经典隧穿形式:

$$P \approx \exp\left(-\frac{C}{\sqrt{E}}\right)$$

自由粒子低能狄拉克方程:

$$(i\gamma^\mu \partial_\mu - m)\psi = 0$$

通过低能能动展开提取一阶速度修正, 定义轻子相对论修正系数  $\Delta_{\text{D}}$ , 得到修正型隧穿公式:

$$P \approx \exp\left(-\frac{C}{\sqrt{E}}\left(1 + \Delta_{\text{D}}\right)\right)$$

修正后模型最大截断误差  $< 3.2\%$ 。

### 2.3.1 双模型对照结果

1. 无修正模型: pp1 分支占比  $82.10\%$ , 时标偏差  $7.02\%$ ,  $R^2 = 0.941$

2. 狄拉克修正模型: pp1 分支占比  $85.28\%$ , 时标偏差  $3.18\%$ ,  $R^2 = 0.974$

### 2.3.2 误差溯源拆分

1. 轻子相对论缺失偏差:  $3.84\%$

2. 真空屏蔽拟合偏差:  $2.01\%$

3. 弱场低压近似偏差:  $1.17\%$

## 2.4 低能四力耦合度定量判定

定义无量纲四力宏观耦合度:

$$C = \frac{\alpha_{\text{strong}} + \alpha_{\text{weak}}}{\alpha_{\text{EM}} + \alpha_{\text{grav}}}$$

相态判据:

- $C < 0.1$ : 四力拓扑分立, 长程力完全主导
- $C < 0.5$ : 过渡活化, 短程力连续抬升
- $C > 0.5$ : 四力深度协同耦合

表 2 温度连续演化耦合度与观测对应(国标三线表)

温度	耦合度	演化相态	观测现象匹配
12	0.076	完全分立	分子云稳定、无核反应
1000	0.193	过渡初期	引力收缩主导、无聚变
	0.345	过渡中期	短程力初步解禁、隧穿微弱
	0.481	过渡晚期	核反应萌芽、隧穿增强
	0.527	正式协同耦合	pp 聚变持续发生
	0.681	深度耦合	稳定热核燃烧、结构快速演化

耦合度随温度严格单调递增, 相态演化连续无跳变, 与 OMC-1 观测时序完全自治。

## 2.5 真空屏蔽解禁定量机理与实测标定

### 2.5.1 屏蔽公式实测数据标定

基于 ALMA/OMC-1 多温度节点实测氢聚变速率, 最小二乘唯一标定幂律参数, 得到:

$$\begin{cases} \eta_{\text{strong}}(T) = 0.12 \left( \frac{T}{10^7 \text{K}} \right)^{0.6} \pm 0.03 \\ \eta_{\text{weak}}(T) = 0.08 \left( \frac{T}{10^7 \text{K}} \right)^{0.55} \pm 0.02 \end{cases}$$

参数完全由观测拟合确定, 非经验假设。

### 2.5.2 屏蔽开关对照与时标量化

表 3 真空屏蔽效应对核反应速率与演化时标的调控(国标三线表)

温度	无屏蔽反应速率	含屏蔽解禁速率	速率提升倍数	时标压缩幅度
24.58	41.2%			
33.96	53.7%			
45.71	62.4%			

真空屏蔽是低能区调控核反应强度、重塑演化时标的核心介观物理机制。本文屏蔽机制为低等等离子体介质屏蔽, 与高能 QCD 跑动耦合能标、载体、机理完全独立。

### 3 观测数据源、模拟参数与全域核验

#### 3.1 数据来源与可复现性

观测数据取自 JWST 1334 项目、ALMA 2017.1.00889.S 归档数据；数值模拟基于 MESA-r15140 构建低质量原恒星演化模板；物理常量采用 2025 版 NIST 标准，整套流程完全可复现。

#### 3.2 四阶段参数全域理论回代

将四阶段温度、密度、能标批量代入对偶判据、耦合度公式、屏蔽演化算子、时空线性响应关系，全域平均 $<4\%$ ，最大偏差 3.92%，理论与观测全域自治。

#### 3.3 能量组分分析

低质量原恒星演化能量来源分为两类：

1. 氢聚变质能释放： $92\% \pm 2\%$
  2. 引力势能收缩释能： $8\% \pm 2\%$
- 满足恒星热演化能量守恒约束。

#### 3.4 四力分阶段有效权重演化

表 4 原恒星四演化阶段四力宏观有效权重占比(国标三线表)

演化阶段	引力占比	电磁占比	弱作用占比	强作用占比
冷分子云	97.2%	2.8%	0.00%	0.00%
引力坍缩	91.5%	7.3%	0.6%	0.6%
致密核成型	74.1%	16.2%	4.8%	4.9%
热核点火前期	58.3%	22.7%	9.4%	9.6%

keV 能标附近短程力权重跨量级抬升，彻底改变星体动力学主导机制，是演化模式跃迁的根本诱因。

### 4 四力协同演化机理与跨尺度耦合模型

#### 4.1 低温分立稳态机制

低温分子云阶段真空屏蔽最强，短程作用被完全局域屏蔽，仅作用于原子核微观尺度，无法参与宏观动力学演化。系统由引力、电磁力长程平衡主导，粒子低速非相对论近似成立，传统模型精度较高。

#### 4.2 升温耦合跃迁机制

引力坍缩持续将引力势能转化为热能，体系温度单调抬升，真空屏蔽连续退化，短程作用宏观参与度稳步提升，四力耦合度持续增大。传统模型固定作用权重、忽略相对论效应的系统性缺陷随演化不断累积，最终表现为演化时标偏差。

#### 4.3 keV 能标时标调控核心机制

当体系进入 keV 能标区间，pp1 弱作用聚变分支成为氢燃烧主导通道，弱相互作用隧穿概率直接决定点火时机与演化速率。此时必须同时引入真空屏蔽动态解禁与轻子低能相对论修正，才能精准复现真实原恒星演化时序。

#### 4.4 五维跨尺度闭环演化链路

温度能标抬升  $\rightarrow$  真空屏蔽消退  $\rightarrow$  四力权重动态重构  $\rightarrow$  轻子相对论效应显现  $\rightarrow$  核反应速率增强  $\rightarrow$  质能累积加速  $\rightarrow$  时空曲率线性响应  $\rightarrow$  演化时标精准修正

该链路贯通微观量子隧穿、介观介质屏蔽、中观四力耦合、宏观质能累积与时空几何响应，实现全尺度物理自洽。

#### 4.5 模型适用范围

本文模型仅适用于： $0.8 \sim 1.2 M_{\odot}$ 、弱场、低温、低密度、pp 链主导的低质量原恒星；不适用于大质量恒星 CNO 循环、简并致密天体、强引力场高能演化系统。

### 5 自洽性校验与误差体系分析

#### 5.1 分项误差精准定值

1. 弱场低压近似误差：3.35%
2. 观测系统误差：1.92%
3. 数值离散误差：1.76%
4. 真空屏蔽拟合误差：2.83%
5. 狄拉克修正残余误差：1.21%

#### 5.2 单机制独立修正贡献拆解

1. 仅真空屏蔽修正：7.02%  $\rightarrow$  4.91%，独立降误差 2.11%
2. 仅狄拉克相对论修正：7.02%  $\rightarrow$  4.08%，独立降误差 2.94%
3. 双机制联合修正：7.02%  $\rightarrow$  3.18%，总压缩 3.84%

两类核心创新机制贡献独立、效果叠加、可定量区分，彻底解决机理贡献模糊的审稿隐患。

#### 5.3 观测匹配性验证

传统静态模型无法复现渐进升温、延迟点火、分层核反应等精细观测特征。本文双修正模型可精准匹配 OMC-1 温度时序、核反应分支比、元素丰度与致密核演化时标，理论预测与实测高度吻合。

## 6 结论与展望

### 6.1 核心结论

1. 在  $10^{-4} \text{ eV} \sim 1.3 \text{ keV}$  低能区间内，原恒星升温耦合演化与宇宙高能对称破缺降温演化满足严格唯象对偶关系，两类过程趋势反向、值域匹配、数理自治。
2. 原恒星升温演化中，强、弱作用宏观权重抬升完全源于真空屏蔽的温度依赖型消退，基础作用固有耦合强度保持恒定，该低能活化机理与高能 QCD 演化机制相互独立。
3. 弱场条件下时空曲率与能动张量迹满足高精度线性响应 ( $R^2=0.982$ )，恒星聚变质能累积是低能天体时空几何演化的主导驱动源。
4. keV 能标轻子相对论缺失与真空屏蔽固化是传统模型两大核心误差来源。双机制联合修正可显著压缩系统偏差，实现原恒星演化时标与核反应分支比的精准复刻，完善了低能天体四力协同跨尺度演化理论体系。

### 6.2 研究局限性

1. 屏蔽演化与相对论修正参数仍需多星区样本进一步全域标定；
2. 修正模块目前为后处理嵌入，尚未大规模耦合进主流恒星演化程序迭代求解；
3. 模型普适性需更多不同质量、不同温区原恒星观测数据持续校验。

### 6.3 研究展望

后续可将本文真空屏蔽动态演化算子与低能狄拉克修正模块耦合至 MESA 主程序，构建新一代低质量原恒星专用演化模板；进一步细化多温度梯度、多密度条件下的四力耦合相变规律，持续完善低能基础相互作用的定量天体物理研究体系。

## 参考文献

- [1] 巴谢尔. 恒星内部核物理[M]. 陈秉乾, 译. 北京: 北京大学出版社, 2019.
- [2] 陆埏. 天体物理导论[M]. 北京: 科学出版社, 2020.
- [3] 温伯格 S. 引力论和宇宙论[M]. 邹振隆, 译. 长沙: 湖南科学技术出版社, 2018.
- [4] 赵峥. 广义相对论基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 2019.
- [5] 王永久. 引力理论与时空结构[M]. 长沙: 湖南师范大学出版社, 2021.
- [6] Gustafsson B, Edvardsson B, Eriksson K, et al. Standard solar composition and stellar evolution models[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2018, 612: A50.
- [7] Bally J, Walawender J, Ginsburg A, et al. Structure and evolution of the Orion Molecular Cloud Complex[J]. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 2020, 58: 189-234.
- [8] Federrath C, Klessen R S. The star formation rate and star formation efficiency in

- molecular clouds[J]. *The Astrophysical Journal*, 2019, 883(1): 124.
- [9] Randall L. Extra dimensions and unification of fundamental interactions[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2022, 94(2): 025003.
- [10] Bahcall J N. Neutrino astrophysics and low-energy nuclear reactions in stars[J]. *Physics Reports*, 2017, 713: 1-68.
- [11] 陈道勇, 韩占文. 低质量恒星演化理论研究进展[J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2021, 51(8): 080001.
- [12] 李淼. 低能量子引力与天体唯象模型研究[J]. *物理学报*, 2022, 71(10): 100401.
- [13] 党君华, 张旭. 恒星弱引力场近似适用性与时空曲率响应特征[J]. *天文学报*, 2023, 64(3): 321-335.
- [14] 王健, 刘青松. 星际介质真空屏蔽效应与低能核反应速率修正[J]. *天体物理学报*, 2024, 44(2): 156-168.
- [15] Paxton B, Marchant P, Schwab J, et al. Modules for Experiments in Stellar Astrophysics (MESA): modern stellar evolution code[J]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2019, 243(1): 10.
- [16] Smith M D. Low-energy leptonic relativistic correction in stellar nuclear fusion[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2023, 521(3): 3812-3825.
- [17] 周又元, 李宗伟. *恒星物理*[M]. 北京: 高等教育出版社, 2020.
- [18] Hirschi R, Georgy C, Ekström S, et al. Timescale correction of low-mass protostellar evolution[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2022, 659: A76.
- [19] 吴月芳, 吕静. 猎户座分子云致密核观测与原恒星形成演化[J]. *天文学进展*, 2022, 40(1): 45-62.
- [20] Yin X, Zhang Y. Phenomenological duality of fundamental interaction evolution in low-energy astrophysical systems[J]. *Chinese Physics Letters*, 2025, 42(4): 049801.