



# Combinatorial geometry and Feynman integrals

---

## 组合几何与费曼积分

**Tai-Fu Feng, Hai-Bin Zhang (speaker) et al.**  
**Hebei University, Baoding**

第五届强子与重味物理理论与实验联合研讨会  
河北师范大学, 2026. 03. 29



# CONTENTS



## 研究背景 | 费曼圈图计算的困境

Background: Dilemmas in Feynman Loop Calculations



## 核心思想 | 超几何函数方法的提出

Core Thought: Proposal of the Hypergeometric Function Method



## 理论探索 | 从单双圈到多圈的解析求解

Theoretical Discovery: Analytical Solutions from one/two Loops to Multi-Loops



## 成果与展望 | 效率验证与国际认可

Achievements & Outlook: Efficiency Verification and International Recognition

# 01

## 研究背景：费曼圈图计算的困境

RESEARCH BACKGROUND: THE DILEMMA OF FEYNMAN LOOP CALCULATIONS



# 费曼圈图：理论物理的核心工具



## 核心数学工具

费曼圈图是量子场论中描述和计算基本粒子相互作用过程的关键语言。



## 实验精度驱动

随着LHC等高能物理实验测量精度的提高，对理论预言的精度要求日益严苛。



## 高精度计算需求

要获得高精度预言，必须对多圈费曼图进行精确的解析或大规模数值计算。



## 关键研究方向

发展高效、精确的费曼圈图计算方法，是当前理论物理领域的核心课题。

Quantum Field Theory

# 传统方法的瓶颈：计算复杂度的指数级增长



## 解析计算困难

传统的费曼参数化方法在处理多圈图时，会导致极其复杂的多重积分，难以获得解析解。



## 数值计算耗时耗CPU

数值计算方法虽通用，但在处理多圈、多标度问题时速度慢、效率低，对CPU与内存要求高，难以满足大规模计算需求。



## 研究进展缓慢

近四十年来，多圈费曼图量积分的解析计算方法进展缓慢，成为了该领域发展的关键瓶颈。

# 02

---

## 核心思想：超几何函数方法的提出

Core Thought: Proposal of the Hypergeometric Function Method



# 全新路径：超几何函数方法



**核心思想：** 将复杂的费曼积分，通过一系列数学变换，转化为以超几何函数表示的解析表达式。



## 解析性 (Analyticity)

在收敛区间获得精确解析解，形式简洁优雅，易于验证推导过程。



## 高效性 (Efficiency)

基于解析表达式编写的计算程序，运算速度显著优于传统数值算法。



## 普适性 (Universality)

展现强大适应性，能够处理从单圈到多圈的复杂费曼图计算。

该方法为费曼圈图解析计算提供了全新的数学框架与方法。

# 03

## 理论探索：从单双圈到多圈的解析求解

THEORETICAL DISCOVERY: ANALYTICAL SOLUTIONS FROM ONE/TWO LOOP TO MULTI-LOOP

# 第一阶段：单双圈基础级数解 (2018-2019)



## 研究对象

聚焦单圈 B0、C0 函数，以及双圈真空图与日落图等基础模型。



## 核心成果

- 成功给出了费曼积分的超几何函数表示形式。
- 推导出 0 点邻域收敛区间内的精确解析级数解。
- 建立了这些解所满足的齐次线性偏微分方程组。



## 发表期刊

成果发表于专业期刊 《Nuclear Physics B》 (2018, 2019)。

# 第二阶段：解析延拓与混合算法 (2020-2023)

## 核心挑战

如何将0点邻域的解解析延拓到其他区域？这是连接局部解与全局结构的关键障碍。

## 创新方法

提出Mellin-Barnes表示及Miller变换的混合算法，突破传统延拓限制，实现了高效计算。

## 关键成果

建立普通流形上的GKZ方程组；求解出0点与 $\infty$ 点邻域的基础解系，覆盖了核心参数空间。



以带质量四传播子双圈自能图为例，成功解出536个超几何解析解，其中30个构成基础解系，验证了算法的强大能力。



发表期刊：《Nuclear Physics B》(2020)，《European Physical Journal C》(2023)

# 第三阶段: Grassmannian流形的引入 (2022)

## 核心挑战

在复杂的费曼积分体系中，如何高效求解所有奇点邻域的基础解系是一个关键难题。

## 创新突破

突破性地将Grassmannian流形几何理论引入费曼积分表示体系，建立全新的几何求解视角。

## 关键成果

构建了流形上的GKZ超几何方程组框架，成功解析求解出所有奇点邻域的基础解系。



发表期刊: *Physical Review D* (2022)

# 第四阶段：全区域解析延拓 (2025)



## 核心目标

探索如何高效地将局部解析解延拓到整个数学定义域，实现理论的完整性。



## 创新方法

提出通用延拓框架，通过拓展超几何函数的三类高斯关系（逆高斯、库默、比邻）完成拼接。



## 关键成果

实现了解析解的全区域无缝连接；成功推导D=4邻域洛朗级数，为物理应用提供关键支撑。



## 发表期刊

*Physical Review D*  
(2025)

通过超几何函数关系的巧妙运用，实现了从局部解到全区域理论的跨越

# 第五阶段：多圈问题的突破 (2023-2025)



## 核心验证

验证超几何函数方法是否适用于复杂的多圈费曼图计算。



## 研究对象

聚焦于三圈及四圈真空图解析计算。



## 关键成果

应用于多圈真空图，给出了普通流形上的GKZ超几何偏微分方程组及基础解系。



## 发表期刊

*Journal of High Energy Physics*  
(2023, 2025)

标志着超几何函数方法在多圈计算领域的适用性。

# 04

---

## 成果与展望：效率验证与国际认可

ACHIEVEMENTS AND PROSPECTS: EFFICIENCY VERIFICATION & INTERNATIONAL RECOGNITION



# 计算效率的飞跃：解析 vs 数值

## 对比对象

将基于超几何函数方法的解析程序与国际广泛使用的传统数值程序FIESTA进行性能实测对比。

## 核心结论

解析方法展现出压倒性效率优势，显著降低计算耗时，为大规模、高精度的物理计算提供了关键工具。

计算速度提升倍数 (Speedup)



# 系列代表性成果：8篇专业期刊论文

## Evaluating Feynman integrals by the hypergeometry

Nuclear Physics B 927 (2018)

## The system of partial differential equations for the $C_0$ function

Nuclear Physics B 940 (2019)

## GKZ-hypergeometric systems for Feynman integrals

Nuclear Physics B 953 (2020)

## Feynman integrals of Grassmannians

Physical Review D 106 (2022)

## GKZ-system of the 2-loop self energy with 4 propagators

European Physical Journal C 83 (2023)

## GKZ hypergeometric systems of the three-loop vacuum Feynman integrals

Journal of High Energy Physics 05 (2023)

## Gauss Relations in Feynman Integrals

Physical Review D 111 (2025)

## GKZ hypergeometric systems of the four-loop vacuum Feynman integrals

Journal of High Energy Physics 03 (2025)



成果影响力：系列论文涵盖从方法提出到多圈应用，发表于 JHEP, PRD, EPJC, NP B 等本领域专业期刊。

# 国际权威专家评价

## 1) G. Heinrich 教授

这是计算费曼积分的一种创新方法，指出这可以把费曼积分结果简洁地表示为一个规范的级数形式，为该领域的研究提供了全新的视角和方法。

— *Physics Reports*, 2021

## 1. Dubovyk, J. Gluza, G. Somogyi 等专家

在专著中对我们的方法给予了充分的肯定和高度的评价，认为我们的研究成果为相关领域的研究提供了重要的参考和借鉴。

— *"Mellin-Barnes Integrals: A Primer on Particle Physics Applications"* (Springer, 2022)

# 研究总结



## 提出新方法

提出了超几何函数方法，为多圈费曼图解析计算开辟了全新路径。



## 实现效率飞跃

计算效率远超传统数值方法，为高精度物理计算提供了强大且高效的工具。



## 构建理论框架

建立了从基础解系到全区域解析延拓的完整理论体系，夯实了计算基础。



## 获得国际认可

系列成果发表于专业期刊，获国际权威专家高度评价。

# 未来展望



## 深入多圈多标度

继续深入研究更复杂的多圈多标度真空图等费曼图的解析计算，突破现有计算瓶颈。



## 拓展应用场景

将超几何函数方法拓展应用于更广泛的物理过程和模型，如QCD、电弱等领域。



## 开发高效程序

基于现有成果，开发更完善、更高效的计算程序包，服务于全球高能物理理论研究。



河北省量子场论精细计算与应用重点实验室

河北省计算物理基础学科研究中心

河北大学物理科学与技术学院

张海斌

**THANKS**

---