

微扰QCD战略规划

高俊，李钊，刘涛，刘晓辉，马滢青，杨李林，朱华星（姓氏拼音字母排序）

一、微扰QCD领域的科学意义和战略价值

二、微扰QCD领域的现状

三、微扰QCD领域的关键科学问题、关键技术问题与发展方向

四、微扰QCD领域发展的相关政策建议

五、微扰QCD领域发展路线图

在标准模型中量子色动力学（QCD）是用于描述强相互作用的最基本理论。QCD动力学机制诱导的QCD辐射效应广泛存在于高能对撞机上散射过程中。然而，借助于因子化定理以及QCD理论本身渐进自由的特点，人们在高能过程中可以使用微扰论进行计算。鉴于高能散射实验的物理分析结果同时依赖于实验数据的误差和理论预言的误差（不确定性），尽可能提高理论预言的精度是高能物理理论工作的重要部分，其中尤其在高能强子对撞机上高精度的微扰QCD预言（固定阶和重求和）是至关重要的。例如缺少微扰QCD高阶效应的标准模型Higgs截面的理论预言将比实验观测小2倍有余，从而完全无法确定其为标准模型Higgs。另一方面，探测器测量数据和硬散射产生的部分子之间的联系也强烈依赖于喷注物理的研究，而基于微扰QCD中部分子的辐射演化性质，人们设计了喷注以及喷注亚结构等一系列观测量来更好地攫取数据中的信息。在未来的CEPC或是FCC-ee上，我们可以预期对希格斯粒子耦合测量的实验精度可达1%的水平，而对Z能区电弱精确观测量的实验精度则更高。为了通过实验与理论的对比来有效地研究可能的物理，那我们必须得将标准模型相关的理论预言精度提高到与实验精度相匹配或是更高的水平。为了达到这一理论精度，需要多个方面的共同努力，包括QCD及电弱高阶微扰的计算，QED及QCD蒙特卡洛事例生成器的改进，以及相关标准模型输入参数的精确定量。此外在微扰QCD的框架下，由于大量散射过程依赖于强耦合常数 α_s ，因此对 α_s 的精确测量也关系到高能散射过程理论预言的可靠性。

高精度的微扰QCD预言（固定阶和重求和）在对撞机物理中被证明是至关重要的。例如没有微扰QCD的高阶预言的话，标准模型Higgs截面的理论预言将比实验观测小2倍有余，从而完全无法确定其为标准模型Higgs。另一方面，基于微扰QCD中分子的辐射演化性质，人们设计了喷注以及喷注亚结构等一系列观测量来更好地攫取数据中的信息。目前，随着EICC和EIC的筹划，微扰QCD的一部分研究重点也转移到了EIC物理。EIC物理包括强子/核子横向信息（横动量，自旋）分布、小 x 物理、夸克胶子等离子体等研究方向。就目前来看，将在LHC上发展起来的微扰QCD技术应用于EIC物理的研究，不少都局限于基于喷注及其亚结构提出新的观测量，例如用喷注和电子的反冲去研究横向极化强子的Sivers分布函数，又如利用喷注的亚结构Soft Drop zg 分布去研究重离子的性质等等；然而使用微扰QCD针对EIC物理进行高阶预言的研究却没有引起重视。EIC的设计精度较高，如对于用于拟合Sivers函数的横向极化反对称的测量精度可达千分之一。对于这样的实验精度，微扰QCD的精确预言显然是不可或缺的。此外，由于EIC物理所涉及的能量尺度往往较低，大约几个GeV（小横动量分布、小 x 物理的饱和尺度等），因此微扰QCD的超出领头阶修正通常很大，并能完全改变那些基于领头阶的所谓直觉（intuition）的理论分析结果。从这一角度来说，对于EIC物理来说，QCD高阶修正不仅仅是提高精度的问题，而是给出有意义的唯象学预言所必须的。给出EIC物理的精确预言（高阶、高对数），如何建立微扰计算框架（尤其对于小 x 物理以及重离子物理）从而系统预言小 x 物理的产生截面、喷注及亚结构在重离子中的能量损失则是将来微扰QCD可以讨论的方向之一。

由于QCD理论本身渐进自由的特点，人们在高能过程中可以使用微扰论进行计算。随着LHC上数据量的积累，对理论预言精度的要求也在不断提升，迄今gg和VBF产生Higgs的部分过程都已经计算到 N^3LO 。在这些高阶计算中通常伴随着许多理论上的难点，例如高圈费曼图的计算、红外发散的系统化处理方法等，对这些问题的研究除了对LHC实验测量有直接的物理意义之外，也为将来对撞机上物理过程的理论计算提供了技术储备。另一方面高阶过程不可避免地会牵涉到更多的标度，在某些情况下它们组成的大对数项会出现在所有阶的结果中，这时重求和的处理是不可或缺的。最近一些新类型对数项由于唯象学上的原因引起了人们的注意，这些探索可能也会加深人们对场论的理解。

微扰论高阶计算中主要任务之一是计算大量具有发散的积分，包括费曼圈积分和相空间积分，而利用逆么正性关系很多相空间积分问题又可以转换为圈积分问题。目前，大部分 $2 \rightarrow 2$ 散射问题中的两圈积分已经计算出来，其中涉及到最多4个能量标度，对于更多标度或者更多圈数的问题，圈积分的计算依然有巨大的挑战。多圈积分计算的一种常用办法分为两步：先把所有的圈积分约化为少量较简单的圈积分（被称为主积分）的线性组合，然后计算这些主积分。为了计算多标度问题，最近提出的一个方法是在传播子中引入辅助参量 η ，由此可以很容易地把修改后的圈积分按照 $1/\eta$ 展开得到 $\eta \rightarrow \infty$ 邻域内收敛的级数序列，而展开系数只包含真空积分。该级数通过解析延拓完全决定了物理圈积分的值（ $\eta \rightarrow 0^+$ 处），于是把圈积分计算问题转化为解析延拓问题。在此基础上提出了一套系统的算法搜索出简洁的线性关系，能高效地把多标度圈积分约化为主积分的线性组合，并首次实现了 $2 \rightarrow 3$ 散射中两圈积分的完整约化。这一高效的约化方法同时可以用于建立主积分关于辅助参量 η 的微分方程组，通过数值求解微分方程组可以实现解析延拓并得到主积分的物理值。

CEPC希格斯和Z工厂上的精确物理研究（QCD、EW）

高能正负电子对撞机的主要物理目标即是对标准模型粒子相关的模态及散射过程进行高精度的测量，以期给出新物理可能存在的能标的信息，或是直接寻找到新物理。具体的实现手段包括希格斯工厂或是Z工厂，对应的质心系能量分别为240GeV或91GeV左右。按CEPC或是FCC-ee的规划，我们可以预期对希格斯粒子耦合测量的实验精度可达1%的水平，而对Z能区电弱精确观测量的实验精度则更高。为了通过实验与理论的对比来有效地研究可能的物理，我们必须得将标准模型相关的理论预言精度提高到

与实验精度相匹配或是更高的水平。为了达到这一理论精度，需要多个方面的共同努力，包括QCD及电弱高阶微扰的计算，QED及QCD蒙卡事例生成器的改进，以及相关标准模型输入参数的精确定量。接下来将分别进行阐述。

1. 蒙卡事例生成器

在Z-pole及附近能区的电弱精确观测量（EWPO）主要来自于对正负电子散射到各种费米子对末态的测量，包括线谱型，分宽度及比值，前后不对称性等。一般来讲我们需要在实验测量中将QED修正的效应剔除后再和EWPO的相关理论计算进行比较。QED修正对于特定的观测量可以相当大，例如对Z线谱型峰高度的修正可达30%。现有的QED蒙卡事例生成器还需要极大的改进才能达到Z工厂的要求，特别是在额外费米子对修正，初末态干涉效应，及光子-Z干涉效应等的处理方面。同时QED蒙卡事例生成器的理论误差还会直接影响我们对实验亮度的定量。

而QCD蒙卡事例生成器则是对希格斯粒子的相关测量尤为重要，特别是考虑到希格斯粒子有超过80%的几率衰变到强子末态。有待改进的包括相关生成器的Parton Showering的精度，以及各种非微扰效应包括强子化模型的误差。相关的理论误差将直接影响希格斯粒子标准衰变道的甄别，例如重味夸克标记、夸克-胶子区分，以及稀有衰变道或是新物理衰变道的背景预言。为了提高QCD蒙卡事例生成器的精度我们一方面需要发展新的理论框架，包含更高阶的微扰效应，同时也需要利用独立于希格斯粒子产生的实验数据来调制和拟合各种非微扰模型参数。相关非微扰QCD效应的研究也会有助于我们理解QCD色禁闭机制。

1. QCD及电弱高阶微扰计算

由于标准模型的可重整性，我们可以基于少数几个标准模型输入参数来对电弱精确观测量进行微扰计算。为了控制微扰阶数截断带来的理论误差，我们必须得进行足够高阶的微扰计算。这其中包括纯电弱圈图，顶夸克增强圈图，轻夸克味增强圈图，以及QCD和电弱混合圈图的修正。目前EWPO的两圈电弱圈图修正已经有完整的结果。相应的三圈电弱圈图计算极具挑战性，涉及的圈积分为数众多，且由于不同积分间的相消效应，单个积分计算的数值精度必须得到严格的控制。为了使得微扰计算的intrinsic理论误差达到未来Z工厂的要求，我们甚至还得计算部分的四圈电弱圈图的贡献。

对于希格斯玻色子的主要产生道，人们已经完成了电弱和QCD混合的两圈微扰计算，基于此预估的intrinsic理论误差大致在1%左右。这一误差远超过希格斯工厂对产生截面测量的实验精度(0.4%)。相关的两圈电弱修正的计算预计将可以控制理论误差到实验精度以下。对于希格斯粒子的标准模型衰变道分宽度的计算，目前的微扰误差已经得到了很好的控制。只是对于少数的几个衰变道，例如双胶子道，四费米子道，还需要微扰计算上的改进。另外希格斯粒子到多个(>2)部分子/喷注衰变的两圈QCD修正的计算也对降低某些特定信号道的理论误差至关重要，例如ZH产生且同时都衰变到强子末态，或是希格斯粒子衰变至轻夸克末态。

1. 输入参数的定量

关于Z-pole电弱精确观测量及希格斯粒子产生和衰变的理论计算依赖于两个重要的输入参数，即QCD的耦合常数和QED耦合常数在高能区，如MZ处的取值。它们不仅仅是只通过微扰修正进入到相应的理论计算中。在树图水平上s-道光子交换的贡献就正比于QED耦合 $\alpha(M_Z)$ 的平方，而希格斯粒子到双胶子的分宽度也是正比于QCD耦合 $\alpha_S(M_Z)$ 的平方。目前 $\alpha(M_Z)$ 的相对精度大致在 10^{-4} ，而 $\alpha_S(M_Z)$ 的相对精度在 10^{-2} 。考虑到希格斯工厂和Z工厂的要求，两者的误差需要进一步降低5~10倍。对于QED耦合一般是通过色散关系结合低能实验数据来从经典极限反推。例如利用BESIII的数据结合相应的理论计算将很有可能达到这一目标。此外也可以考虑一些替代的方案，如在Z工厂上通过测量 μ 子在Z-pole附近的前后不对称性来抽取 $\alpha(M_Z)$ 。为了达到 3×10^{-5} 的精度还需要在QED理论计算方面有所改进。传统上人们在正负电子对撞机上可以通过所谓的强子形状变量来测量QCD耦合常数，目前的相对精度大致在 2×10^{-2} 。在未来的希格斯或是Z工厂上通过实验和理论的同时进步，我们有望可以利用相同的方法来提高 $\alpha_S(M_Z)$ 的精度。这其中特别需要克服QCD幂次修正相关的理论误差。但预估很难达到要求的 2×10^{-3} 的相对精度。为了实现这一目标，其它的可能性是通过精确测量Z玻色子的强子化宽度结合高阶的微扰计算结果来抽取 $\alpha_S(M_Z)$ ，或是期待未来的QCD Lattice计算精度可以得到进一步提升。