
理论物理所等在色-动量对偶研究方面获进展

作者：writer 来源：中国科学院

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/16375.html>

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

有效计算量子场论中的高圈费曼图，是高能物理的核心问题之一。而量子场论的圈图计算随着外线数和圈数增加，会变得极其复杂。2008年，美国加州大学洛杉矶分校的三位研究者Zvi Bern、John Joseph Carrasco、Henrik Johansson发现规范场的振幅存在一种新的隐藏结构，这也为计算高圈振幅提供了一种有效途径。这种新结构表明，规范理论中，振幅的色因子(源于规范对称性)和动量因子(源于时空对称性)满足相同的代数关系，其通常被称为“色-动量对偶”(Color-Kinematics duality)关系(如图1)。

色-动量对偶关系暗示着规范和时空两种对称性存在紧密的联系。在规范理论中，物理量满足规范对称性和时空对称性；而在引力理论中，物理量满足的对称性只有时空对称性。那么规范理论和引力理论中的物理量是否也有紧密的关系？事实上，借助色-动量对偶，可以从“满足对偶的”规范振幅来直接构造引力振幅：只需要把色因子进一步替换为动量因子，这样得到的包含动量因子平方的振幅就是引力振幅(如图2)。这一联系一般称为“double copy”，暂且称为“平方关系”，取“引力=规范场的平方”的意思。

借助平方关系构造引力的一个前提条件是，规范振幅必须满足色-动量对偶。那是否一定能构造这样的规范振幅呢？遗憾的是，目前除了对于树图振幅有证明外，对于包含量子修正的一般圈图情形还只是一个猜想，其成立性没有任何一般性证明。虽然人们已经发现了很多圈图的例子，但随着圈数和外线数的增加，找到这样的例子就变得破具有挑战性。比如最大超对称场论中的四胶子振幅，至今也没有实现其五圈的对偶。如果能证明色-动量对偶在一般量子水平存在，借助平方关系将无疑会对理解量子引力提供极大的促进，甚至有可能最终解决量子引力问题。

近日，中国科学院理论物理研究所研究员杨刚等在研究色-动量对偶方面取得新进展，首次发现了一类三圈形状因子的满足对偶关系的解；特别的是，他们发现这个解空间格外的大，比如对于能动量守恒流算符的情形，其解空间包含多达24个自由参数。这一成果发表于Physical Review Letters。

研究人员考虑了一类超对称场论中的三圈三点形状因子，这类物理量可以类比于Higgs到三个胶子过程的散射振幅。两圈水平的研究表明这些超对称形状因子可以给出QCD结果中函数最复杂的最大超越函数部分，所以和唯象学也有紧密的联系(如图3)。

研究结果的一个重要特征是带有色-动量对偶结构。在规范理论的振幅中，选取不同的“规范”，可能会给出看起来差别很大的不同形式，进而从不同的侧面反映出振幅的性质。色-动量对偶的结构指的是：存在一类特殊的“规范”选择，使得振幅或形状因子表现出色-动量对偶这一特别的性质，此时色因子和动量因子会满足一一对应的关系。研究人员的三圈结果，不仅给出了圈

图水平上色-动量对偶的新证据，而且表明即使是上述特殊的“规范”选择也还可能有很大的解空间。这些带有新特征的解可以成为帮助更好理解色-动量对偶的有用素材，进而也会有助于更好地理解上述平方关系甚至量子引力问题。

此外，研究团队还对所得结果实现了具有挑战性的三圈积分计算，并进一步研究了其他有趣的性质，如研究了三圈的物理量首次表现出非平面的非偶极红外结构。

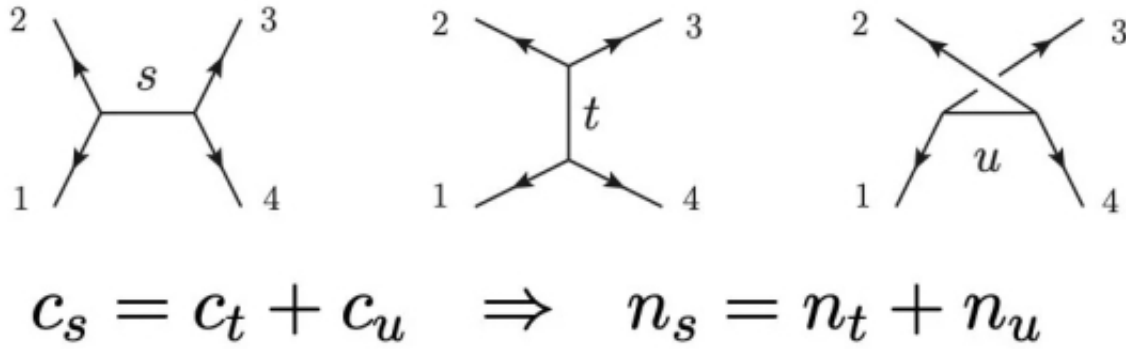


图1 四胶子振幅可以用s、t、u三个图表示，其动量因子n满足和色因子c相同的代数关系

$$A_4(1,2,3,4) = \frac{c_s n_s}{s} + \frac{c_t n_t}{t} + \frac{c_u n_u}{u}$$

↓ double-copy

$$M_4(1,2,3,4) = \frac{n_s n_s}{s} + \frac{n_t n_t}{t} + \frac{n_u n_u}{u}$$

图2 四胶子振幅的动量因子平方可以直接给出四引力子振幅

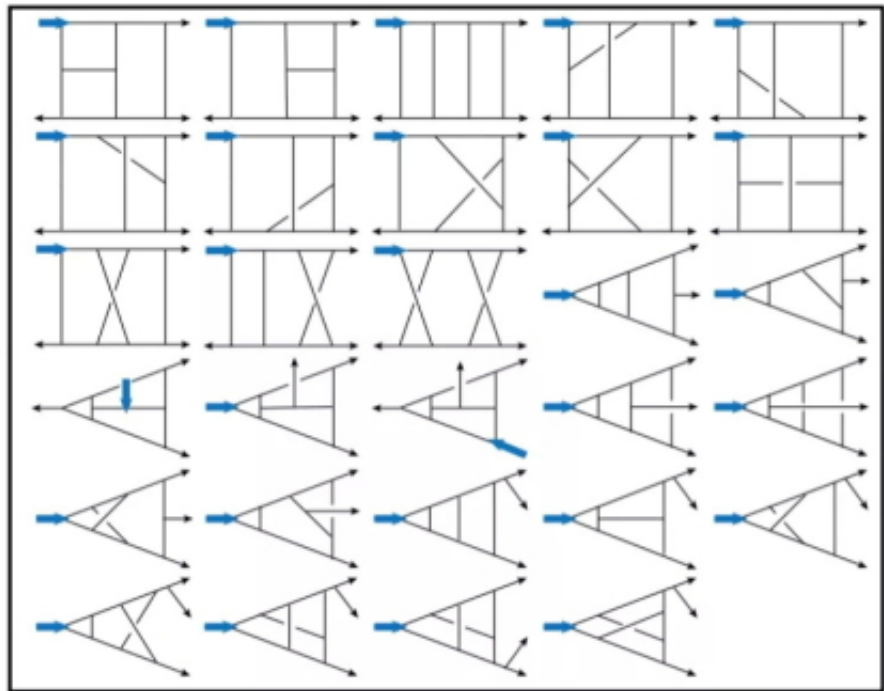
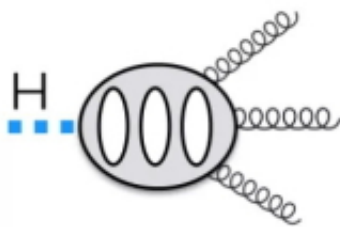


图3 三圈的费曼图

研究团队单位：理论物理研究所

更多 科学进展 请访问 <https://www.iikx.com/news/progress/>

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，[爱科学iikx.com](http://www.iikx.com)转发