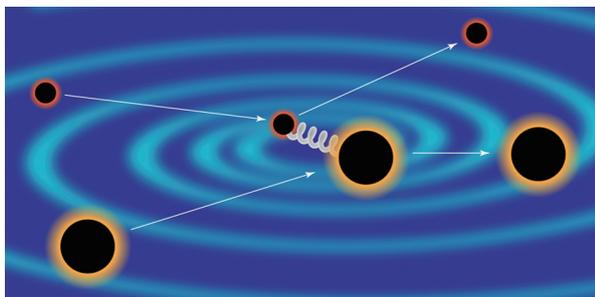


粒子物理描述黑洞相撞

(中国原子能科学研究院 周书华 编译自 Jan Steinhoff, Justin Vines. *Physics*, July 20, 2020)

两个巨大的黑洞以接近光速的速度相撞，以引力波的形式喷发出超过太阳的能量。科学家利用在具有几公里长臂的激光干涉仪中所产生的微小变形，观测几百万光年以外时空几何中的涟漪。为解释引力波信号需要对所观测到的波形有精确的理论预言，这种预言是通过解爱因斯坦场方程得到的。进一步的进展依赖于理论计算的重大改进，目前的理论预言对于2022年运行的升级探测器来说，可能不够精确。受到粒子物理的启发，即所有过程都约化为点粒子之间的散射。某些理论家开始通过研究两个黑洞相互接近，并被引力相互作用偏转的问题来研究双黑洞问题。在这样的框架上，法国高等科学研究所(IHES)的Thibault Damour及其同事在引力波理论预言方面取得重要进展。他们最新的工作表明，在一个黑洞比另一个黑洞质量小很多的空间极限情况下，散射问题的计算有捷径。



黑洞散射可以视为粒子相互作用处理。计算量子散射振幅，可获得关于发射引力波的并合双黑洞的重要信息。新的计算捷径可以改进计算精度

引力波的探测、波源信息的提取和基本物理的检验，有赖于数据分析中所用模板的理论模型。为此，需要数值模拟和微扰解析计算，两者都需要提高精度，以便分析来自增强的天文台(LIGO, Virgo, KAGRA)以及未来的仪器(LISA, 宇宙探险者, 爱因斯坦望远镜)的数据。

在微扰理论中，运动方程写为一系列含有某个小量 ϵ 的幂的1级、2级、3级等的项。微扰解析方法可以按照小量来描述：一个弱的引力场(后闵可夫斯基展开)，一个弱场和缓慢移动黑洞(后牛顿展开)，或黑洞之间的小的质量比(如引力自力近似)。在过去，后闵可夫斯基近似受到了关注，因为它对于黑洞散射是最有用的。这种散射一般产生很难观测的极弱引力辐射。然而，理论家们最近意识到，对(非束缚的)黑洞散射的计算可以揭示并合(束缚的)系统的重要信息，如引力势。

散射方法的基本思想是，用处理交换光子相互作用的电子的方式，

处理交换引力子相互作用的作为量子粒子的黑洞。结合所有粒子相互作用的不同方式，研究人员可以做出极精确的预言。基本的量子思想是散射振幅受普遍性原理(对称性、局域性、概率守恒)严格

限制。几个研究组目前在应用这些及其他量子场论的技术确定“黑洞粒子”之间的引力散射振幅。可给出粒子散射过程概率的振幅是量子观测量。但是研究者可从中提取出经典部分，用于建立引力波分析的模板。

Damour发现了简单而广泛的计算经典黑洞散射的不同微扰方法之间的关联。他指出，在后闵可夫斯基近似中，较高级项上确定的经典质量相关的散射角函数，可以由自力(小的质量比)近似中的低级项完全确定。这一发现是非常有用的，因为后一近似充分使用了爱因斯坦经典引力中严格的(非线性)黑洞解。例如，按照Damour的发现，后闵可夫斯基近似中的第4级可以仅由第1级自力计算确定。这一捷径能够加快达到更高级(更精确)的预言工作。Damour等使用第1级自力计算确定了第5到第6级后牛顿保守动力学中的大部分，这是确定束缚系统引力势所需要的。Damour在量子引力散射研究方面，提出了几个挑战性问题：散射振幅通常是概率性的量子观测量，没有直接的经典类似，鉴别散射振幅的经典部分有意义吗？引力子的交换如何精确地合成大的经典偏转角？高能极限下经典黑洞散射如何与无质量粒子散射的量子结果相联系？解决这些问题可以帮助研究人员找到未来通向更精确的理论预言的途径。