

广义相对论中可能丧失决定论

(北京大学 徐仁新 编译自 Harvey Reall. *Physics*, January 17, 2018)

带电黑洞的微扰分析表明,通常物理定律的可预测性在广义相对论中会失效。

如果已知系统准确的初态,那么物理定律能否决定它任意时刻的未来?我们一般给出肯定的回答。不过,葡萄牙里斯本大学的 Vitor Cardoso 等的研究表明,在广义相对论中,这种物理定律的可预测性或不复存在。他们发现,一颗恒星经引力坍缩而形成黑洞后,该黑洞可能包含某个无法由恒星初态预测的时空区域。

在广义相对论中,时空动力学由爱因斯坦场方程(简称“场方程”)决定。正如位置和速度刻画粒

子的初态,某个时刻空间的几何及其变化率确定时空的初态。给定这样的初值,广义相对论认为存在所谓的最大柯西演化(Cauchy development),它是初值能给定的最大时空区域。若最大柯西演化不是整个时空而是其中的真子集,则真子集以外的时空不能由初值确定。这将导致决定论的失败:人们无法仅凭初值预测未来。不过,如果彭罗斯强宇宙监督假设(认为最大柯西演化不可能是时空的真子集)成立,那么这种情况就不会发生。

强宇宙监督假设矛盾。

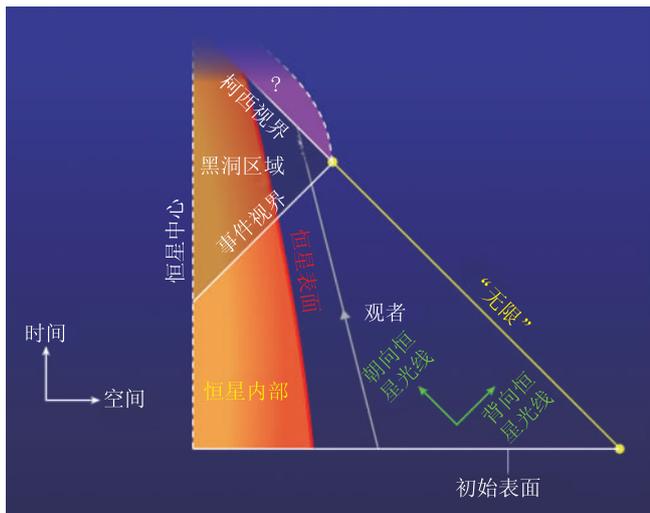
实际上,因为这里的柯西视界不稳定,其实并未违背强宇宙监督假设。若对初值稍加扰动以破坏时空的球对称性,那么一般来说微扰后时空就不会出现柯西视界(代之以奇点)。可见,强宇宙监督假设只是认为不存在稳定的柯西视界。

看来能够预测未来!然而,为解释宇宙加速膨胀,场方程要包含宇宙学常数 Λ 。对于 $\Lambda>0$,黑洞外的扰动比不考虑 Λ 时更快地衰减;可见 Λ 对柯西视界起致稳的作用。

带电黑洞看似提供一个强宇宙监督假设的反例。一颗荷电的球对称恒星因引力坍缩而形成的这种黑洞(见图),由场方程来斯纳-诺斯特朗(简称RN)解所描述。对于RN黑洞来说,最大柯西演化并非整个时空,而以图中柯西视界为边界。这里的最大柯西演化只是更大时空的一部分,跟

可通过研究所谓黑洞的准正模(即阻尼振荡)得到衰减速率。Cardoso等利用数值方法研究了 $\Lambda>0$ 时RN黑洞的准正模,得出如下若干结论。微扰时空的曲率在柯西视界处发散。对于绝大多数RN黑洞而言,这意味着强宇宙监督假设成立。但若黑洞荷电接近极限,那么曲率发散要温和得多,以致于场方程在柯西视界处仍有意义,从而违背强宇宙监督假设。柯西视界处曲率发散情形类似于流体激波:奇点处看起来很弱,足够强硬的物体可无碍地穿越柯西视界。想象一个观者跳进黑洞并穿过柯西视界;但不幸的是:我们无法预测其命运。

当然,以上讨论都基于经典广义相对论,而曲率发散可能导致柯西视界附近丰富的量子效应。这些效应能否强化柯西视界的不稳定性从而挽救决定论,尚待进一步研究。



一颗荷电的球对称恒星受引力坍缩形成带电黑洞。图中只描绘了时间和空间径向这两个维度,径直朝向或背向恒星传播的光线跟横坐标夹 45° 。图中“无限”表示在空间或时间上离恒星无穷远。事件视界以内的区域属于黑洞。坍缩之前恒星的初始表面也在图中标记。可以依靠初值预测的时空区域由柯西视界限定。带问号的时空区域不能靠初值预测。图中还显示了一个穿越柯西视界的观者的时空轨迹。强宇宙监督假设认为柯西视界总是不稳定的,但Cardoso及其同事的研究表明:若宇宙学常数为正,情况并非如此