

使用 DNA 分子实现逻辑门操控

DNA 分子编码地球上所有形式的生命,可以论证:就数据存储和处理而言,它们是已知的最强有力的媒介.然而,迄今 DNA 几乎没有被用于计算机,其原因主要是:缺乏一种方法,能够将生命分子转换成器件,而后者可以完成逻辑操作.最近,来自韩国先进科技研究院的 Park 等在应用化学国际杂志(*Angew. Chem. Int. Edn* 49, 9757–9760 (2010))上撰文,报告了他们在 DNA 分子逻辑门操控方面的进展.

现代计算机的基础是布尔逻辑,它要求有一个被称为“门”的半导体单位,将输入信号转换成特定的输出,例如与(AND)门、或(OR)门等.因为一个门的输出可以作为下一个门的输入,通过布尔单元的分层组合,系统(即集成电路)便有可能对非常复杂的问题给出答案.Park 等使用 DNA 构成逻辑门,把 DNA 的“是否成功复制”作为输出信号.例如,对于或(OR)门操控,需要有两路输入信号:甲=1 或 0;乙=1 或 0.只要甲和乙中有一个等于 1,则输出为 1;在 Park 等的实验中,输出为 1 表现为:DNA 聚合酶可以以旧的 DNA 双链为模板成功地复制出新的 DNA 双螺旋.

DNA 聚合酶在 DNA 复制中起“复印机”的作用.新链的碱基(碱基 A, T, C 或 G)与模板链碱基互补配对,碱基 A—T 互补,碱基 C—G 互补. DNA 链实施半保留复制:模板双螺旋在复制之前必须先解开,旧链作为模板为两条新链的合成提供信息,同时旧链本身又成为新双螺旋的一部分.单股 DNA 以核苷酸为线性排列的单元,每个核苷酸包括:一个磷酸头(专业上称之为 5'端)、一个糖基尾(专业称 3'端)和一个碱基(A, T, C, G 之一).双螺旋的两股走向相反:从下往上看,双螺旋的一股(上行)是从 5'到 3',另一股(下行)则从 3'到 5'.

无论是上行股还是下行股,复制顺序总是从 3'端指向 5'端.

复制从较短的 DNA 聚合酶链(称为 primer,可译为引信)开始.如果 primer 具有碱基为 A 的头,刚好遇到模板链 3'端的碱基 T,则 A—T 互补配对,复制得以继续.我们说,输出为 1.相反,如果对 primer 施行一个“小手术”,使它具有碱基为 T 的头,此时再遇到模板链 3'端的碱基 T,则 primer 将与模板链在其 3'端形成 T—T 排斥性失配,复制不再继续.我们说,输出为 0.在 Park 等 YES 门的实验中,研究者首先对所有 primer 施行“小手术”,造成 T—T 失配.然后,通过引入 Hg^{2+} 金属离子来操控上述所谓 T—T 失配. Hg^{2+} 离子具有独特的性质,它可以将 primer 头上的碱基 T 与模板链 3'端的碱基 T 紧紧束缚在一起,形成金属离子中介的 T— Hg^{2+} —T 人工基对,以致于触发接下来的互补复制.于是, Park 等发现:当有 Hg^{2+} 离子供给时,互补复制得以继续,即输出为 1;当缺乏 Hg^{2+} 离子供给时,互补复制不能继续,即输出为 0.这样, YES 门便构建成功了.

以上关于 YES 门的构建仅仅涉及一路信号输入,即是否有 Hg^{2+} 离子供给.然而,为了构建与(AND)门、或(OR)门等,需要有两路输入信号:甲=1 或 0;乙=1 或 0.例如对于(AND)门,只有甲=1,同时乙=1,输出才为 1,否则(在其他三种情况下)输出均为 0.此时,我们需要利用双螺旋总体复制的性质.模板 DNA 双螺旋解开后,旧链(上行链和下行链)作为模板为两条新链(primer1 和 primer2)的合成提供信息.对此, Park 等分别对 primer1 和 primer2 实行了“小手术”,使得 primer1 的头与上行链在其 3'端形成 T—T 失配,同时使得 primer2 的头与下行链在其 3'端形成 C—C 失配.如上所述,只要在电泳液中引入 Hg^{2+} 金属离子就可以让 primer1 的复制得以触发并继续.另一方面,对于 C—C 失配, Park 等也找到了解决的办法.他们通过引入 Ag^+ 金属离子,使 primer2 的碱基头 C 与下行链的 3'端碱基 C,通过 C— Ag^+ —C 人工基对紧紧束缚在一起,进而触发接下来的互补复制.结果,只有在 Hg^{2+} 离子和 Ag^+ 离子同时存在的条件下(甲=1 同时乙=1),完整的双链 DNA 复制才得以完成,与(AND)门输出为 1;其余三种情况(甲=1 同时乙=0;甲=0 同时乙=1;甲=0 同时乙=0),输出均为 0.

Park 等的工作迈出了 DNA 分子计算的第一步.下面的工作包括:(1)设计出更多种的金属离子中介的人工基对;(2)找到简便的办法,读出关于 DNA 复制是否继续的输出信号;(3)建立 DNA 逻辑门系统,使得一个门的输出可以作为下一个门的输入.

(戴闻 编译自 *Nature*, 2011, 469:45)

超越费曼图

几代物理学家以他们的专业生命为代价,致力于使用费曼图计算粒子之间的相互作用.然而由于涉及的过程复杂,计算量太大,所取得的物理成果有限.最近,几乎同时有两篇文章出现在网上:(1)Alday L F,Gaiotto D,Maldacena J et al. Preprint at <http://arxiv.org/abs/1006.2788> (2010);(2)Arkani-Hamed N,Bourjaily J L,Cachazo F et al. Preprint at <http://arxiv.org/abs/1008.2958> (2010). 作者们报告了他们新近研究出来的数学工具,以此取代费曼图计算,不仅可大大简化运算,而且有助于修正相关领域的基本原理.

量子场论描述基本粒子间的相互作用,它起源于量子力学与麦克斯韦经典电磁场论的结合.与经典场的连续激发不同,量子场的激发只能是量子化的能量包,它的能量确定,其单位又被称为粒子.例如,在量子场论中,量子化的电磁场其基本粒子是光子.粒子间的相互作用包括:碰撞、散射以及发射(或吸收)各种其他的粒子.

诺贝尔奖得主费曼(Richard Feynman)在50多年前发明了一种简易的图形速记法,以一个个示意图代表上述所有的相互作用过程.来自不同方向的若干粒子,相互接近,发生相互作用,最终再一次分开.为了计算特定粒子经相互作用后某种终态的几率,需要针对不同数量级以及不同强弱的相互作用,画出所有可能做出贡献的费曼图.然后,按照费曼所定义的转换原则,将上述图形一一转换成数学表达式.最后,对所有数学表达式的计算结果求和,即得到关于研究对象终态的结果.使用费曼图进行计算,原则上属于接近自动化的步骤.不幸,随着更加全面地考虑不同数量级的相互作用,有效费曼图的数量急剧增加,以致于相应的计算无法完成(即使使用现代计算机).这种情形严重影响了理论和实验间的相互检验.

在涉及强核力过程中,胶子将夸克结合成为质子和中子.在欧洲强子对撞机(LHC)上每秒中要发生100,000次的两胶子对撞(进而产生4个胶子)的过程.上述过程在对撞机中产生大量的背景噪声信号.要从背景中检测出蕴涵着新物理的重要信号,必须依靠理论计算扣除背景.而费曼图方法就曾被用于这一方面.为了考虑上述6胶子过程的主要贡献,至少要涉及220个费曼图,进而要完成数万个数学积分.然而,1985年有研究者发现:上述数万个数学积分表达式,在求和的过程中绝大部分都相互抵消了,最终只剩下了3项.这结果第一次表明:费曼图在某种程度上将问题复杂化了,对于我们所面临的问题,可能存在更为简单而有效的办法.

事实上,费曼图的使用强调了粒子相互作用的时空定域性以及关于几率求和的么正性.然而,这样做的代价是:在中间步骤中引入了大量的“蛇足”(注:画蛇添足),技术上称为规范自由(gauge freedom).在最终的物理结果中,“蛇足”被消除.相反,Alday等和Arkani-Hamed等的全新方法,考虑的是非定域的量与量之间的关系,从而排除了冗余的“蛇足”.作者们对这些做法的充分性进行了有力的论证:他们所引入的关系的确存在,用于表达这些关系的非定域量的确弥散于时空.

两组作者已经完成的工作,分别适用于两个相对的极端条件——相互作用耦合或弱或强,下面的努力目标将是创建一个完全的、普适的量子场论方法.对物理学而言,量子场论的数学表达是最强有力的标志性成果,例如:它成功地预言了电子磁矩,其数值精度达到了一万亿分之一.最近两组作者在量子场论数学结构方面做出的发现,具有重要意义:它不仅允许我们计算实验室中所发生的复杂物理过程(从而排除噪声,发现新的物理),而且能帮助我们处理某些基本问题,如时空本身的量子结构.

(戴闻 编译自 *Nature*, 2011,469:165—166)

旋转的黑洞使光线扭曲

一个由意大利、瑞典、澳大利亚和西班牙的物理学家组成的国际合作组得出结论说,光线通过位于许多星系中心的旋转的黑洞时,会发生扭曲,这有可能提供一种检验爱因斯坦的广义相对论的新途径.用现有的望远镜可以观察到这种现象.

爱因斯坦于90多年前提出的广义相对论预言了一些容易检验的新现象.其中的一个例子就是引力透镜,即恒星和黑洞的引力可以使时空发生足够的弯曲,使得通过它附近的光线的路径变弯.另一个例子是时间膨胀,这种效应使得在较低的重力区域(如高纬度区)的时钟走得更快.科学家们还在试图直接探测另一种称作引力波的广义相对论现象.认为这些引力波是由于大质量物体加速时所产生的时空的波动.

2003年,Cornell大学的Martin Harwit提出,可能存在另一种可检验广义相对论的效应.他讨论的是光子的轨道角动量,这是与通常所说的光子的本征自旋角动量完全不同的.在2002年,发现了在实验室直接探测光子轨道角动量的方法. Harwit认为,这种方法可应用于天体物理研究,包括对旋转的黑洞的研究.而在Uppsala的瑞典空间物理研究所,Bo Thide所领导的国际合作组最近完成了这项研究工作.

该小组对光线通过旋转的黑洞进行了数字计算.在这种超密度的物体附近,由于构架拖拽(frame dragging)效应,时空发生扭曲.研究人员认为,在进入这一区域时,光线正常情况下平坦的波阵面会发生扭曲,变成螺旋形,轨道角动量也会改变.而黑洞旋转得越快,光子轨道角动量改变得就越大.为检验这个理论预言,天体物理学家需要用射电望远镜观察光子的位相.如果测量证实了这一预言,作为一种理论的广义相对论将得到进一步巩固.如果未能证实,则有一种微小但是诱人的可能性:广义相对论或许没有告诉我们关于时空的全部故事.有关论文发表在*Nature Physics* (2011,doi:10.1038/nphys1907)上.

(树华 编译自 *Physics World News*, 15 Feb 2011)