

戈德堡。冲动。因果

一. 戈德堡机器

我曾在优酷上搜索“戈德堡机器（或机械）”，找到了许多视频；其中名为“牛顿君倒地不起……”的那个，我觉得最有趣；现简介如下（略去一多半的“机器角色”及其“表演”，并做些必要的修改，否则，叙述将过于繁琐）：

1. 角色（按出场顺序）

a=钢球。

b=电风扇，b'=b的钮子开关。

c=转杯式风速计中那个以四个半球壳形状的“杯”为主体的、可旋转的部分（托举四杯的托架的中心处固连一个大螺帽，螺帽旋套在固连于桌面上处于竖直状态的粗大的螺丝的大致中间的位置）；c'=c的托架外侧向外突出的小金属块。

d=某种机械“开关”（一竖直细杆固连于桌面，杆端铰连一“L”形钩子状金属片。此后还会遇到多种类似结构的机械开关，将不再详述它们的细节；把它们统一编号为d₁、d₂、d₃、d₄）；d'=d中金属片的后端；d''=金属片的前端。

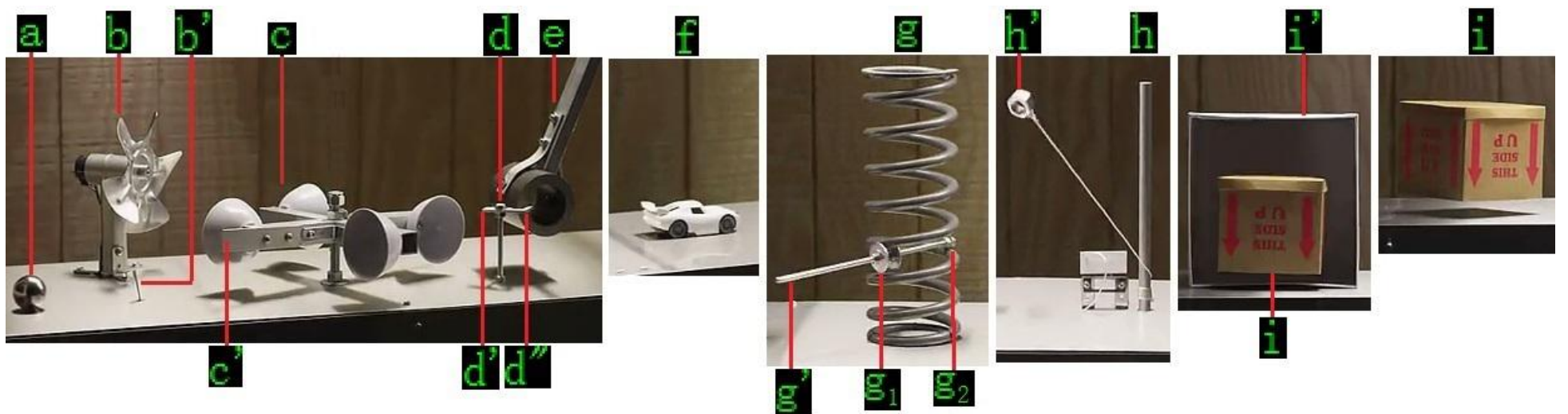
e=下端固连一厚壁无底圆筒状重物的直杆单摆（圆筒的中轴线垂直于杆状摆的摆动平面，d''钩住圆筒，使直杆摆处于向左倾斜的初始状态）。

f=玩具小跑车。

g=固连于桌面的竖直放置的疏绕的粗大的弹簧形状的导轨；g₁=大金属轮（几乎可以卡在上下相邻的两个螺旋状导轨之间）；g₂=小金属轮（只能沿一个导轨滚动）；g'=作为中轴的把g₁与g₂连为一体的细长杆（g₁在g'的大致中间的位置，g₂在g'的一端，g'的另一端悬空，远远伸出g所围成的“圆筒”之外）。

h=固连于桌面的铅直粗杆（杆的底端固连一长绳，长绳紧密缠绕粗杆若干圈）；h'=固连于h上的长绳的另一端的大螺帽（它被一细线束缚，以确保长绳紧绕杆上）。

i=处于另一桌面上的一个金色密闭的小纸盒；i'=套在i之外的、仅正对镜头一面开放的较大纸盒（初始时i处于i'内部昏暗的环境中）。



2. 过程（各角色的精彩表演）

(1) a 从左向右滚来，击中并触发 b'。

(2) b 吹出强风，推动 c 加速旋转起来；c 一边旋转一边沿大螺丝的螺纹缓缓上升。

(3) c 转若干圈后，上升至足够高以至于 c' 可以敲击到 d'；d'' 释放 e 上的圆筒。

(4) e 从左向右摆动，触发 d₁，弹出 f。

(5) f 从左向右行进，触发 d₂，释放 g₁、g₂ 及 g'。

(6) g₁、g₂、g' 沿 g 盘旋着由下至上滚动（这是一个惊奇点：难道 g₁、g₂、g' 是铁磁材料？难道至少在 g 所在的空间范围内隐藏着一个足够强大的磁场？难道 g₁、g₂、g' 是被向上的磁力吸引、克服重力而盘旋上升？）。

(7) 上升到足够高度，g' 触发 d₃，h' 被解除约束。

(8) h 上的长绳逐圈松开，h' 盘旋“飞升”，h' 越甩越高，越甩越远离 h（这是又一个惊奇点：难道也如(6)中那般，h' 也是被另一隐藏的磁场向上吸引？）。

(9) 大约是在长绳松开的第三圈，画面开始缓慢地沿逆时针方向旋转；长绳松开最后一圈时，画面也同时完成了上下颠倒的转动（这是解决了前两个惊奇点的第三个惊奇之处）。

(10) 当下已被甩得足够远且足够低的 h'，正好击中并触发 d₄……

(11) i' 被向后扯落，i 显现在光亮中；i 竟是个底面距离桌面约一厘米的悬空的小盒，它微微摇晃着，缓缓旋转着（这是第四个惊奇点）。

3. 要点

A. 纵观“2. …”中的全过程，我认为比较可能的情形应该是：只有 d₄、i、i' 三个角色所在的第二桌面才是普通平常的桌面，其它诸多角色所处的第一桌面其实是个天花板！“2.”中(1)~(8)所述，都是正常人倒立时所见之情景！

B. a 所滚过的那段“桌面”的上方应隐藏着一块磁铁，是它吸着 a 紧贴天花板而不坠落；磁力与重力的合力所引发的天花板对 a 的向下压力应不太大，于是 a 所受到的滚动摩擦力也不大——a 不至于被牢牢吸住而滚不动。

C. “2. (2)”中之 c 应是边转边缓缓下降。

D. “2. (4)”中之 e 的圆筒应是块磁铁，而 e 摆动所扫过的“桌面”也应是铁磁性材料……

E. “2. (5)”中之 f 内部应有一磁铁，f 行进所经过的“桌面”也应是块铁板。

F. “2. (6)”现在反倒平常了：那里并无磁力，g₁、g₂、g' 应是仅在重力的作用下，盘旋滚下。

G. “2. (8)”也成平常：h' 应是在重力与长绳的拉力共同作用下，盘旋飞升。

H. “2. (11)”中的小盒内应是高速旋转的磁铁陀螺，它在桌下隐藏的另一磁铁的斥力作用下而悬空（两者同性磁极相对）；同时它对小盒顶部的支持力与摩擦力导致盒体的微晃缓旋。

I. 上述多次提及的“应是”的准确含义是“比较可能是”。

J. 如果我们可以身临其境，那我们用自己的身体就能轻易探知重力场的方向；如果确认第二桌面真是普通桌面，那“比较可能是”就可以改为“非常可能是”了。

K. 如果我们还能用磁力计等仪器真的探测到 B. D. E. H. 中提到的磁场，那“非常可能是”就可进一步改为“几乎不可能不是”一类的词语了。

L. 之所以还不能绝对肯定，是因为还有些细节不能确定，比如，上述中的那几块磁铁也可能用载流线圈替代……当然，其它的未知因素总是有可能存在的。已有九成以上的把握，若还计较那一星半点的不确定，则属于钻牛角尖了吧。

二. 神经冲动的传递

生物体内纷繁复杂的生化过程大多与戈德堡机器有异曲同工之处——它们都明显展示出一条（或几条相互交织的）环环相扣的清晰而绵长的因果链条，在众多连锁反应式的生化过程中，神经冲动及其传递是相当典型的一例。（同“一. …”中之理，也略去不少“角色”……）

1. 角色（字母标识主要源于相关汉字拼音的声母）

y=神经元。

z=**y** 的轴突。

s=**y** 的树突。

q=**y** 的轴丘=**y** 的细胞主体部分与 **z** 连接的部分。

st=**s** 的突触。

zt=**z** 的突触。

m=细胞膜或细胞器的膜。

zm=围成 **z** 细管状结构的 **m**。

ztm=**zt** 上的正对着 **st** 的那一面的 **m**。

ztm'=**zt** 侧面的 **m**。

stm=**st** 上的正对着 **zt** 的 **m**。

n= Na^+ =正一价的钠离子。

j= K^+ =正一价的钾离子。

g= Ca^{2+} =正二价的钙离子。

l= Cl^- =负一价的氯离子。

d=一个蛋白质大分子或由若干个相同及不同的蛋白质分子“组装”成的“微型机器”。

dnd=电压门控钠离子通道=一种主要镶嵌于 **zm** 上的 **d**，其上有可“伸缩”的“孔”；它在钠离子翻转电位 $U_n \approx -50\text{mV}$ （以 **zm** 外侧处的电位（电势）为参考零点的 **zm** 内侧的电位）时“开启”，可让且只让 **n** 自由通过；它在“开启”约 **1ms**（毫秒）后“关闭”。

djd=电压门控钾离子通道=另一种 **zm** 上的 **d**，它在钾离子翻转电位 $U_j \approx +30\text{mV}$ 时“开启”……

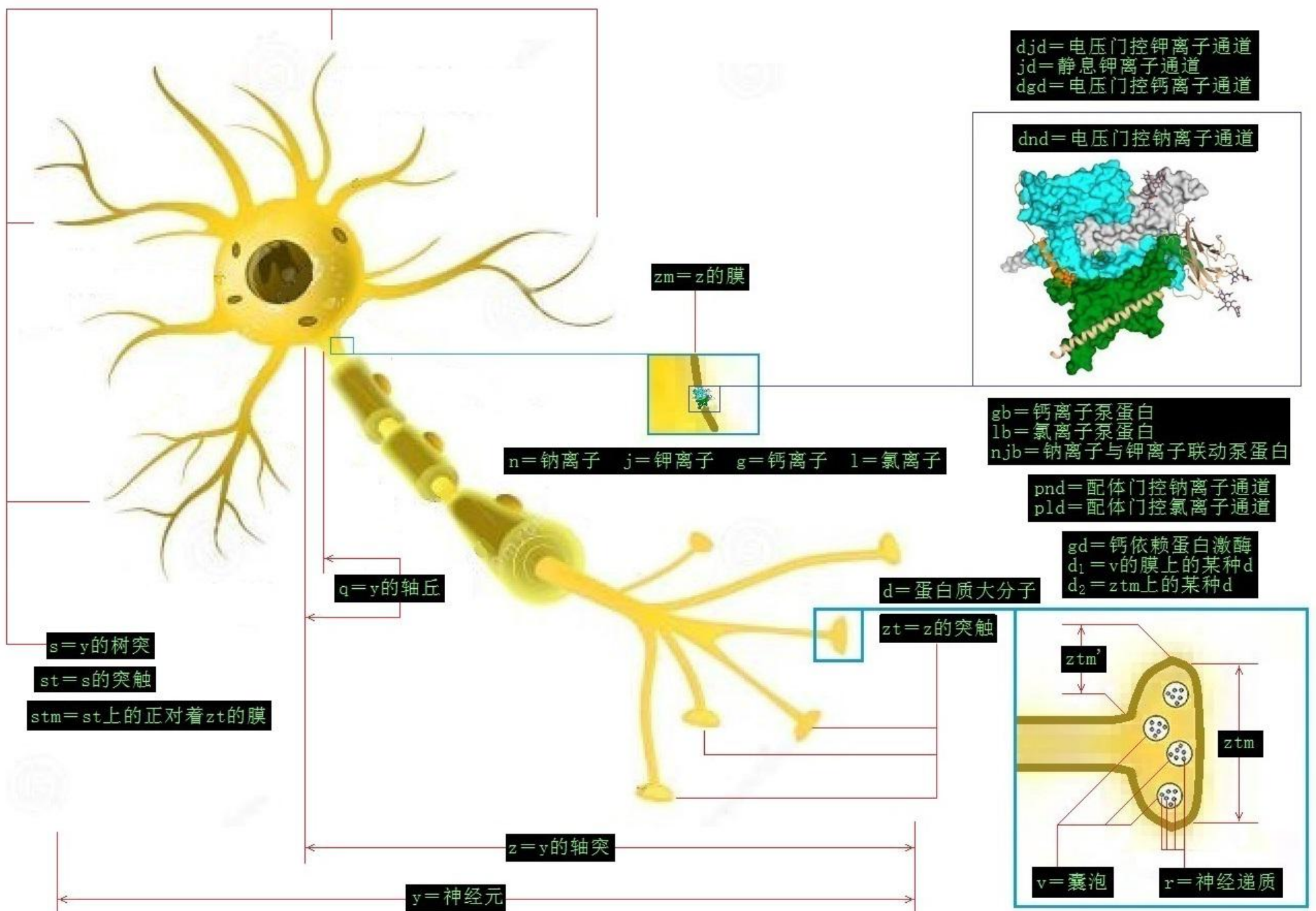
jd=静息钾离子通道=又一种 **zm** 上的 **d**，它总处于开启状态。

dgd=电压门控钙离子通道=**zm** 上的 **d**，它在正电位时开启……

gb=钙离子泵蛋白（转运蛋白）=分布于 **zm** 上的 **d**，它在消耗 **ATP** 提供的能量的前提下，把 **g** 从其低浓度的 **zm** 内侧“搬运”到其高浓度的 **zm** 的外侧（内外浓度比约为 **1:20000**）。

lb=氯离子泵蛋白=把 **l** 不断从 **z** 内向 **z** 外搬运的耗能的 **d**。

njb=钠离子与钾离子联动泵蛋白=一种搬出一个 **n** 的同时又搬入一个 **j** 的 **d**（**n** 与 **j** 的内外浓度比分别约为 **1:12** 与 **35:1**。除了 **j** 是 **z** 内浓度高于 **z** 外，其余涉及的离子都是内低外高）。



r=neuRotRansmitteR（神经递质）=部分地承担传递神经信号的任务的种类繁多的中、小分子。

pnd=配体门控钠离子通道=主要镶嵌于 **stm** 上的 **d**，它在结合某种配体（本文中的配体基本上就是 **r**）的情况下开启以令 **n** 自由通过，而当配体失活或脱落后

关闭。

pld=配体门控氯离子通道=主要分布于 **stm** 上的 **d**，某种 **r** 控制其开关以决定 **l** 是否能流过的通道。

v=Vesica（囊泡）=游离于 **zt** 内的有 **m** 的小泡，其内含有 **r**。

gd=钙依赖蛋白激酶=游离于 **zt** 内的 **d**。

d₁=**v** 的 **m** 上的某种 **d**（名为突触素）。

d₂=**ztm** 上的某种 **d**。

2. 一些要点

A. **zm** 的厚度约有 **3nm**（纳米），不论 **zm** 两侧的电场在数值上是 **U_n** 还是 **U_j**，**zm** 内部及附近都有极强的电场，其强度 $E \approx 10^7 \text{V/m}$ （**U_n** 时 **E** 由 **zm** 外侧指向 **zm** 内侧，**U_j** 时 **E** 则由内向外）。雷电时，云地间电压可达几亿伏，云地间距离约几千米，相应的电场强度 $E' \approx 10^5 \text{V/m}$ 。可见 **zm** 内的电场比激发闪电的电场还强百倍！当然，前者所及范围远远小于后者，所以后者引发的效果才能远比前者震撼。

B. **zm** 附近的强电场，特别是其骤然转向（详见后述），必然使各部分电荷分布不均匀的各种 **d** 的分子构象发生或大或小的改变；各电压门控离子通道的开或闭的定性解释正在于此；至于定量的细节，极其复杂，本文无法详解。

C. 各配体门控离子通道的开或关是其结合或摆脱各配体而发生分子构象的可逆性改变所致。各泵蛋白的“搬运”“动作”也源于其结合 **ATP** 分子及各离子后的分子构象的改变。

D. 驱动各离子定向流动的“力”主要有两个：一是电场力 **F_d**，二是渗透“压力” **F_s**。**F_s** 主要地并非一个相互作用（力）的问题，而是个几率（概率）问题：假设一给定大小的虚构界面，其左侧为高浓度的 **n**，右侧为低浓度的 **n**；由于热运动，左侧的 **n** 可穿过界面跑到右侧，原来在右侧的 **n** 也可跑到左侧；因左侧 **n** 的浓度（单位体积内 **n** 的个数）高，而每个 **n** 穿过界面的平均几率彼此相同（因为两侧的温度相同），所以单位时间内，从左到右的 **n** 的个数就多于从右到左的 **n** 的个数；于是，净效果就是 **n** 从左向右扩散，仿佛有个 **F_s** 在推动似的。

E. **njb** 竭力把 **j** 泵入 **z**，而 **zm** 上又有许多 **jd** 任 **j** 随便溜出 **z**，难道 **jd** 不会令 **njb** 徒劳无功吗？不会！假设最初并无 **jd**，而 **njb**、**gb**、**lb** 等泵共同作用使得 **z** 内外皆无净电荷——相对于 **zm** 外侧边的 **zm** 内侧的电位 **U=0**；现再假设 **jd** 突然出现，于是，**z** 内的 **j** 在 **F_s** 作用下涌出，**z** 外的正电荷随之渐增，**z** 内负电荷也同步增加，与此相伴的推动 **j** 向内流动的 **F_d** 也渐增……当 **F_s=F_d** 时，**j** 的净流动停止，**U** 则达到了所谓的静息电位 $U_x \approx -70 \text{mV}$ 。

F. 在 **zm** 两侧要达到几十毫伏的电压变化，仅需离子浓度改变大约十万分之一即可，因此，**z** 的各部分不论是处于静息状态，还是有神经电脉冲经过时，**zm** 两侧的各离子的浓度都基本保持不变。（十万分之一这个数量级的估算用高中知识即可，详见文后^{附①}。）

3. 过程

(1) 若 **q** 附近之 **U** 可以从 **U_x** 小幅上升至 **U_n**，则最靠近 **q** 的一个 **dnd** 开启；此时，对 **n** 而言的 **F_s** 与 **F_d** 都指向 **z** 内部，于是，**n** 快速涌入，**U** 急速攀升；**U>0** 后，**F_d** 反向，开始阻碍 **n** 的流入，但 **F_s** 几乎未减（因为 **n** 的内外浓度差几乎不变），且强于 **F_d**，故 **n** 继续内流，**U** 继续上升；待到 **U=钠离子第二翻转电位 U_n' ≈ +50mV** 时，数值上 **F_d=F_s**，**n** 停止流入；几乎与此同时，**dnd** 也关闭了。

(2) **U** 从 **U_n** 上升至 **U_n'** 的末段，当 **U=U_j** 时，最近的一个 **djd** 开启；此时，**F_s** 与 **F_d** 都向外，于是 **j** 快速涌出，**U** 在继续上升片刻后骤降，很快回到 **U_x**；**djd** 关闭。（从 **U_n** 到 **U_n'** 到 **U_n** 再返回 **U_x** 的、持续约 **1ms** 的电位突升急降的过程，称为动作电位，以下记为 **W**）。

(3) 在(1)(2)所述的一个 **W** 中，当 **U** 开始上升时，**zm** 内侧最靠近 **q** 的那个开启的 **dnd** 附近的负电荷开始减少（因为此处原本有负的净电荷，而今却有 **n** 涌入），离 **q** 稍远一些的负电荷就会扩散过来（其实主要是 **n** 在 **F_s** 驱动下从近处向稍远处移动）；当 **U>0** 后，最近那个 **dnd** 旁变成正的净电荷，而稍远处仍是负电荷，于是，**n** 在 **F_d** 与 **F_s** 的双重推动下更快地从近向远处移动；当远处的另一个 **dnd** 处的 **U** 从 **U_x** 上升至 **U_n** 时，这个 **dnd** 就如(1)中所述那般开启……稍远处的另一个 **djd** 如(2)开启……于是，第 2 个 **W** 在距 **q** 稍远处，在第 1 个 **W** 出现后一小段时间以后又出现……

(4) (3)中过程重复上演，时刻逐次延后的一个又一个的 **W** 在距 **q** 越来越远处形成，直到某个 **W** 抵达此 **y** 的 **zt** 处。这正是一个神经冲动以多个 **W** 的形式从 **q** 传递到 **zt** 的一连串相似模式的连锁反应的过程。

(5) **W** 抵达 **zt** 后，**ztm** 上的 **dgd** 随即开启，**g** 在 **F_s** 推动下涌入 **zt**。

(6) **g** 与 **gd** 结合后，**gd** 变成了一种有活性的催化酶（记为 **gd'**）。

(7) **gd'** 把一个磷酸根添加到 **v** 的 **d₁** 上——**gd'** 令 **d₁** 磷酸化，磷酸化后的 **d₁** 记为 **d₁'**。

(8) **d₁'** 与 **d₂** 结合，使得 **v** 的 **m** 与 **ztm** 融合成一体，并在 **ztm** 上开口，于是，**v** 内的 **r** 就释放到 **zt** 以外。

(9) **r** 游过（其实是在 **F_s** 推动下的扩散）**y** 的 **zt** 与另一个 **y** 的某个 **s** 或 **st** 之间仅有几纳米宽度的窄窄的所谓突触间隙，某种类型的 **r**（如谷氨酸，乙酰胆碱等）结合到第二个 **y** 的 **st** 上的某些 **pnd**。

(10) **pnd** 开启，**n** 涌入此 **st**，导致该 **st** 及其附近区域的 **n** 浓度上升；这一小块区域新出现的正电荷（或较平常浓度有所降低的负电荷）会对第二个 **y** 的 **q** 处的电荷分布有影响吗？当然会。新出现的电荷的电场会以光速迅急跨越该 **st** 所在之 **s** 及其第二个 **y** 的细胞主体部分而到达此 **y** 的 **q**，使得 **q** 附近的负电荷浓度或多或少也下降一些；不过，由于不同 **y** 的胞体的形状、大小、内容物等相差较大，某特定 **y** 的不同的 **s** 的形状、曲折分枝状况及粗细、长度等也相差较大，不同 **s** 在此 **y** 的伸展出去的位置到此 **y** 的 **q** 的距离也有远有近……故上述电场的影响力会有极大的不同。

(11) 一个 **y** 可以有成百上千条 **s**，每个 **s** 的每个 **st** 都可与其它 **y** 的 **zt** 隔一个窄窄的突触间隙而单向“互联”；**st** 上不是只能有 **pnd**，还可以有别的多种离子通道，比如 **pld** 就能使 **l** 涌入，那里的 **st** 就会出现更密集的负电荷，其电场对该 **y** 的 **q** 附近的电荷浓度的影响就与(11)中的正相反（此类 **st** 称为抑制性突触，前述的上面有 **pnd** 的那类 **st** 称为兴奋性突触）。

(12) 一个 **y** 的众多 **st** 在同一个大约 **1ms** 的时段内，因各类配体门控离子通道的开启所致的各个 **st** 处正负电荷浓度的陡然变化所激发的众多类似点电荷的电场的骤变，共同影响了该 **y** 之 **q** 处的电荷分布乃至 **q** 处的 **U** 之升降。

(13) 如果在整合了各 **st** 输入电信号的影响后，**q** 处的 **U** 从 **U_x** 可以升至 **U_n**，那么此 **y** 之 **z** 就会经历如上一个 **y** 那样的从(1)至(8)的一长串连锁反应，使得神经冲动以 **r** 的形式跨越两个 **y** 之间的突触间隙后，再次以 **W** 的形式在该 **y** 之 **z** 上传递。

(14) 若各输入信号在 **q** 处的综合结果并未使 **U** 超过 **U_n**，则不会有 **W** 从此 **y** 传过。

(15) 神经冲动可以再经历(9)至(13)那样的转载于 **r**、整合于 **q** 而传递到第三个 **y**……

4. 另一些要点

A. **jd** 及开启时的 **djd** 可以让 **j** 快速通过，却几乎不让“个头”比 **j** 小的 **n** 通过，乍一看这很奇怪。其实，**j** 与 **n** 通常都处于水合状态——若干个水分子的略带负电荷的氧原子（因其争夺电子的能力往往更强）与带正电荷的 **j** 或 **n** 靠静电吸引（水分子的略带正电的氢原子则处于整个“水合体”的最外围）；当 **j** 要通过 **jd** 时，先得消耗一些能量来打破水合体的结构，然后单个 **j** 进入直径比 **j** 的直径略大一点儿的 **jd** 的“小孔”中，**j** 与构成“小孔内壁”的若干氧原子也靠静电力吸引而在稍有接近的过程中释放出一些能量，而且，此释能几乎恰好与前述耗能在数量上相等；**j** 离开小孔而与孔壁上的氧原子解除相吸时的耗能，也恰与 **j** 再度跟水分子水合时的释能相当；而当 **n** 要通过 **jd** 时，因单个 **n** 的直径较小，它与孔壁氧原子相距略远，以至于 **n** 与氧原子暂时相吸所释放的能量较小，小于 **n** 摆脱水合状态时的耗能；总之，正是 **n** 在能量上的“入不敷出”才使它基本上无法从水合结构中解放出来，而 **n** 的水合体相对小孔大不少，自然就过不去了；**j** 则“盈亏相抵”，可以以单个 **j** 的形式穿过小孔。

B. 在经典统计力学的框架下：**jd** 的小孔旁的某个 **j** 或 **n** 的水合体中的各水分子及 **j** 或 **n** 碰巧都具有足够的热运动的动能，且碰巧都大致向外侧运动，从而令水合体“自动”解体，然后释放出来的 **j** 或 **n** 又碰巧跃入小孔（而非远离小孔而去），从而穿越 **jd** 的可能性是存在的，只是极小；在通常的缺乏足够的热动能的情况下，**j** 要完成“**A.**”中所述的耗能摆脱水合态再进入小孔与最靠近的氧原子暂时结合而释能（以及出孔时的逆过程，还有穿越小孔时的若干个类似的过程）是不可能的，

因为有个无法翻越的势垒（其高度约为 j 的水合体的解离能，其宽度约为 j 从其水合体内部到孔中最近的氧原子的距离，即大约是氧原子直径的两三倍）；同理， n 要翻越对应于它的势垒（其高度为 n 水合体的解离能，与前述 j 的差不多，其宽度比小孔长度略长，约为氧原子直径的十几倍）更不可能。在量子力学的框架下：上述两种势垒皆可通过量子隧道效应而得以穿越；因隧穿概率与势垒宽度之间呈指数关系，故 n 隧穿其宽了好几倍的势垒而穿过 jd 的概率比 j 隧穿其窄许多的几个“串联”的势垒而穿过 jd 的概率要低很多。（实际情况更复杂精妙，想述也无力……）

C. pnd（或 **pld** 等其它配体门控通道）作为一种受体与相应配体的匹配性“结合”，有点儿象一把锁被一把对应的钥匙插入锁孔后的那种锁钥“结合”的状态；但与锁钥之间可以稳固长久地相互“结合”在一起不同，受体与配体间的“结合”通常是脆弱的、暂时的（否则就很可能象金环蛇毒素牢固结合乙酰胆碱受体那样的致命毒物令动物全瘫的情形了！），亦即两者“结合”一会儿，就可能又会自动地相互脱离。对于已脱离或未脱离的配体，往往又都有相应的酶来分解或改造它，从而使该配体失活（失效）。另有一些配体（如某些 r ）还可能被 **ztm'** 上的某些泵蛋白（转运蛋白）“再摄取”回 **zt** 内。总之，**pnd** 等“结合”配体后，一般不会持续保持开启状态，配体脱离或失活后，**pnd** 等就又重新关闭了。

D. 各种离子通道，特别是各种泵蛋白都有相当复杂的结构，它们都可以分拆（分解）为若干个亚基（次级结构单元），就象发动机、电动机等机器可分拆为若干个零部件那样；这些亚基不仅相对位置可以发生改变，它们的形状往往也可以有所改变，这种“柔性”与一般机器零件的“刚性”是不同的；这些亚基彼此间协同动作，环环相随的方式也恰似戈德堡机器的连贯动作。

E. 涉及神经冲动的这许多的 **d**、**r**、**n**、**j** 等物质成分以及这许多迥异多变的物质结构，需要众多繁难的观测手段，再加上艰深庞杂的借助于各种模型、计算的理论分析及综合，才能逐步认清。例如，一种被称为“膜片钳技术”的方法可以从较粗大的 **zm** 上撕下并固定住一小片含有一个或几个离子通道的膜，然后人为控制该膜两侧离子的种类、浓度、电位等参数，测量相应的通过膜的电流，再在由此获得的大量数据的基础上推断各种通道的开关条件、持续时间等。又如，使用“**x** 光衍射技术”可获得离子通道的静态结构信息，然后设想各种模型、推算各亚基变形、互动、连锁等细节，再与其它多种实验所得结论进行对比、互证，综合分析后进一步筛选、改进模型及计算……

三. 因果问题

因果是什么？因果关系是真实的吗？这些哲学性的问题，值得从科学的视角进行认真分析；而细致的剖析，往往离不开具体实例；显然，下文将提及之实例，就是上文叙述过的戈德堡机器与神经冲动。

1. 物理因果及数学因果

设想一个不受任何力作用的、做匀速直线运动的物体，我们可以说它在某时刻的位置与速度（初始条件）以及它的位移规律 $x=x_0+vt$ （运动方程），是其下一时刻到达另一位置（与此时空点相关联的“到达”可称为一个事件）的原因。推而广之，某初始条件（也相当于某个事件——某种“启动”性的事件）加上某位移规律（运动方程）的一个结果就是某时某处的另一事件。这些都是纯运动学上的因果关系，其本质大体就是类似于“因为两个三角形的二边夹一角对应相等，所以两个三角形全等”这样的数学因果（**Mathematical Causation**，以下都简称为 **MC**），这与我们常常遇到的物理因果（**Physical Causation**，以下都简称为 **PC**）相差较大。**MC** 和 **PC** 之间的关系尚有诸多争论，本文不深究之，仅略谈一二：有人说 **PC** 就是 **MC** 的一个子集，因为若要细说 **PC**，就必然得借助于 **MC**——数学是描述物理的标准语言；反之，则不必要。有人并不同意，认为 **PC** 有超出 **MC** 的部分……这些争论有待一代又一代人的持续而深入的思考。

MC 的主体是数形、集合、拓扑等等这类高级抽象的概念（日常语言中的词汇绝大多数都可归为低级抽象的概念。凡是概念皆抽象，所谓“低级”只是“抽象度不很高”之意），**PC** 的主体是至少含有“质量”这一基本属性的物理实体（上段中提到的物体的质量无关紧要，其实质只是一个数学点）。鉴于还原论的辉煌胜利，我们有极大的把握断言：现实世界中的一切因果关系都大致可按社会、经济、政治、心理、医学、生物学、化学的层次最终还原到 **PC** 以及 **MC**。

对于两个粒子之间的互动，牛顿第二、第三定律的描述是：甲粒子对乙粒子施加的作用力的结果是乙粒子的运动状态发生改变，同时，甲粒子也改变其运动状态的原因是它承受了乙粒子对甲粒子的反作用力。量子场论对此有更细致的描述：甲（或乙）粒子不断地“喷”出若干个虚的场量子（常称为“虚粒子”，也不妨进一步简称为“虚子”。就其通常转瞬即逝和不能被仪器直接探测到这两个特征来说，虚子是“虚”的；就其拥有能量、动量等基本属性来说，虚子在本质上又是“实”的），又不断“吸”入几个虚子；喷出的虚子可被自身再吸入，也可被别的粒子吸入；甲（乙）粒子自喷自吸的那部分虚子的集群（简称“虚子群”）对相互作用几乎毫无贡献（高阶部分通常极小而可略）；“乙粒子喷出其不再吸入的虚子群，加上它吸入来自甲粒子的虚子群”等价于牛顿力学中的“甲粒子对乙粒子施加作用力”；“甲粒子喷出不再回收的虚子群，加上它吸入来自乙粒子的虚子群”相当于“乙对甲的反作用力”；“甲（乙）粒子因喷出不再吸回的虚子群而失去部分动量（以及能量角动量等），加上它因吸入来自对方的虚子群而获得一些动量等”一般而言就相当于“甲（乙）粒子改变其运动状态”。

相比于牛顿描述，量子场论的描述取消了前者的“施加”、“承受”，尤其是“力”的概念，替换上了“喷出”、“吸入”尤其是“虚子”的概念。“喷出”、“吸入”（两者时常又被称为“发射”、“吸收”，且两者常统称为“交换”，另外“交换”往往是更正规的提法）及“虚子”直接源于量子力学的核心原理——测不准（或不确定）原理……虚（粒）子虽与实粒子有若干重要区别，但其本质仍是粒子，于是，从牛顿的“粒子”加“力”的双要素描述，进化到量子论的仅有“粒子”的单要素的描述（注意：施加、承受与喷出、吸入，仅是辅助性概念；力与粒子才是核心概念）。这不能不说是 **PC**（理论）迈向更加统一更加精简的重大一步。

尽管量子图景更统一、更细致、更形象，但牛顿图景在语言表述上有时却更简便。下文表述 **PC** 时将穿插使用量子语言和牛顿语言，读者可借助上文中的“等价于”“相当于”互译这两种语言。不过，要记得，量子图景是更本质、更真实、更精准的描述，之所以偶尔用牛顿图景，仅是因其叙述上的方便。

就目前而言，必须承认量子力学的描述是最真实的描述（尽管它时常显得很奇异），因为它经受了最广泛又最精密的实验验证。原则上能还原至量子语言的因果关系都应该是真实的关系，正如可还原到粒子物理标准模型（它也基于量子场论）中的基本粒子的所有实体物质那样真实。

牛顿式的因果——因为“甲乙之间存在作用力与反作用力”，所以“甲乙都改变其运动状态”——经“翻译”并“简化”后，相应的量子式描述是：因为“甲乙交换虚子”，所以“甲乙交换了一部分动量及其他物理量”。虚子与其携带的动量等物理属性，是彼此密不可分、二位一体的关系，因此，“交换虚子”与“交换动量等”根本就是一回事，牛顿式因果本质上是不存在的！

PC 不是牛顿因果，它应该被定义为：“以前某段时间里的某些实体的某些状态”与“以后某段时间里的某些实体的某些状态”之间若能够通过量子意义上的“力”——虚子群交换——相互关联，则两者间为 **PC** 的关系（与量子纠缠相关的非定域的因果问题尚有诸多争议，本文暂不考虑）。通常来说前段与后段时间以及这两者之间的时间间隔选取得越长，相应的 **PC** 就越粗糙模糊；反之，三段时间取得越短，**PC** 就越精细清晰。类似地，“某些实体”中的相关实体选取的越广泛、越关键（或说越典型），相应的 **PC** 就越准确、也越复杂；反之，所选实体越稀少、越平庸，**PC** 就越粗略（甚至错误）、也越简单……

2. 因果链条与因果黑箱

回顾“一. 戈德堡机器”里“2. 过程”中“(1)…(2)…”内的因“球右滚”而致“风扇吹风”那个部分。上句中表述的因果关系是直觉式的粗略模糊的 **PC**。因为所取的某些时间段较长且又略去某些时间段（具言之：球的整个右滚期间以及吹风开始至其后任一时刻，这两个时间长；两时间段之间的碰撞、通电等过程因持续时间相对很短，而被忽略不计），又因为所涉及的实体也很少（仅球与风扇），所以，“因球右滚而致风扇吹风”这个“准”**PC** 的表述显得既简略又粗陋。仅当把那个忽视了的关键的时段分割得足够细，并引入足够多的实体之后（这也正是一个“还原”的过程），我们才能看清其间所包含的诸多“量子力”，从而确认这正是由一连串的 **PC** 及 **MC** 所构成的真真切切的因果链条——

A. 从相撞到吹风

(1) 因球右滚，而钮子开关处于球之来路上，所以两者相遇。显然，这是关于几何学与运动学的 **MC**。

(2) 单凭 **MC**，两者相遇后可以相互重叠乃至穿越，但现实明显并非如此。从微观角度看：两者最先碰头的是各自表面最凸出部位里的某些电子，这些电子之间通过交换虚光子群而产生具有“量子”意义的电磁斥力；再通过这些电子与各自内部的原子核及其它电子之间的类似的“量子”意义的电磁引力及斥力等的“耦合”作用，两者在宏观上就表现为先相互挤压再相互推开——碰撞。

(3) 因球与钮子相撞，所以开关闭合。（钮子开关内部还有起阻碍开启及固定位置等作用的弹性机械，其作用细节在本质上仍是“量子”电磁力）。因为前一小段

时间内两个实体（球、钮子）的状态（相撞）与后一小段时间内一个实体（钮子开关）的状态（闭合）之间起关联作用的“量子力”已相当明确，所以，按定义，这正是一个十分清晰的 **PC**。注意：① 上句关于因果的表述本身，其实质是 **MC**——严格的**概念**之间的关联。② 前句中对于 **PC** 的定语是“十分清晰”而非“绝对清晰”，因为后者需要无限细致地深入分析，那既不可能，也无必要。

(4) 尽管电源这个重要实体在画面上完全隐匿不见，但其存在几乎是必然的（不能完全排除其他动力源的可能性）。闭合的开关使连接于电源与电风扇之间的电线导通，于是，电源内有着相当稳定的电压的交变电场（此处说的是交流电动机，直流电动机形式上有较大差异，而本质上则完全类似）以光速贯穿整条电线直达风扇的电动机的内部线圈。电源电场驱动已在电线各处的自由电子，一方面使它们重新分布从而引导电场沿电线蜿蜒前行，另一方面又使它们按交变电场的步调振动起来——形成交变电流（交流电）。交变电场与交变电流共同在电动机线圈周围产生交变磁场，经电容等器件的移相作用，载流线圈又进而形成旋转磁场，它带动转子跟随着旋转起来（有同步与异步之分）……于是，电扇就吹出风了。

(5) 因为钮子开关安装在两根电线之间，所以，开关闭合等于令电线合二为一——整根电线导通。这相当于“两线段 **AB** 与 **CD**，令 **B**、**C** 两点接近并重合，从而得一线段 **AD**”，这是 **MC**。

(6) 取电线上任一小段，因为别处（特别是电源内）的电子及正电荷（如金属阳离子）的不均匀分布及电子的有规律的运动，所以，本地（即本小段电线内）的自由电子也随之运动并重新分布。时间间隔约为从别处到本地的间距除以光速所得的时间的、前后两段对应时间（此处的时间也可任取一小段）内的两组实体（别处的众多的正负电荷与本地的众多电子）的状态（分布与运动）之间通过电场（虚光子群）这一“量子力”而紧密关联，按定义，这是 **PC**。

(7) 电机线圈及移相电容中的自由电子（实体）的有规律的集体运动（状态），通过旋转磁场（另一类虚光子群，也是“量子力”），与转子中的自由电子（异步电机时）或磁性原子内引起磁性的非配对的束缚电子（同步电机时）的定向运动相关联。这是 **PC**。

(8) 转子内电子的定向运动，通过静电力，与转子中的金属阳离子的定向运动相关联——电子带动离子，从而使整个转子转动起来。这是 **PC**。

(9) 因为风扇叶片转动，以及叶片扭曲的特殊形状，所以，从垂直于叶片旋转面的方向上的某个固定的假想的“小孔”观察，只要有叶片经过眼前，通过“小孔”看得见的叶片上的那个部分就是不断向前方推进的。这是 **MC**。

(10) 叶片（实体）向前推进（状态），通过分子间斥力（本质上还是电磁“量子力”），与叶片前方若干空气分子（实体）向前定向运动（状态）而形成风之间相关联。这是 **PC**。

（对应于静电场、静磁场、交变电场、旋转磁场以及分子力的几种或虚或实的光子群涉及量子电动力学的较深内容，本文无法细说，不过，只要记得它们都是“量子力”，就足以理解 **PC** 了。）

再简要回顾“一. …”中的“1. …**g**=…”、“2. …(6)…”及“3. …**F**. …”。

B. 下坠与约束

(1) 任一小段时间内 **g₁g₂g'**（实体）下坠（状态），通过万有引力（虚引力子群，又一种“量子力”），与稍前的某一小段时间内地球（实体）存在于它的下方（状态）相关联——换言之，即：因为地球的持续存在，所以，**g₁g₂g'**可在地球的引力拉拽下持续下坠。这是 **PC**。

(2) 若仅有万有引力的话，下坠将是加速的；但还有可归结为“电磁量子力”的滚动摩擦力，它与引力共同作用下使得此处的下坠基本上是匀速的。这是 **PC**。结合(1)，可以说这里的下坠是两因一果，一个动力因，一个阻力因；阻力的施者是 **g**。

(3) 因为实体 **g** 处于几乎刚性（即不变形）的存在状态中，而 **g₁g₂** 与其途经的 **g** 的某个部分之间存在挤压力（即分子力、电磁力、量子力），所以，实体 **g₁g₂g'** 被约束在 **g** 的螺旋结构中——只能沿 **g** 的螺旋轨道运动。这主要是 **PC**。

(4) 因为 **g₁g₂g'** 既要下坠又被 **g** 约束，所以，它边盘旋边滑落。这是 **MC**。

（“量子力”——虚子群，在本节 **B**. (1) 中的特例是虚引力子群，而在 **B**. (2)(3) 以及 **A**. 之全部相关小节中的特例都是虚光子群，两者相应的万有引力与电磁力主宰着宏观乃至宇观世界中的几乎一切事物，它俩是四大基本相互作用中的两种长程力。）

还应该回顾“二. …”，但其中涉及的实体与过程更加纷繁复杂，不妨挑选其中的两个代表，细看其间之因果——

C. 驱动离子（参见“二. 2. D. …”及“二. 3. (1)(2)(3)…”）

(1) 各离子被 **F_s** 驱动时，主要涉及概率问题，相关的前后关联——浓度差异导致离子定向移动，显然主要是 **MC**。

(2) **F_s** 也不完全只是数学问题，它还涉及的另一个关键点是热运动，而热运动又必然根植于某两个微粒之间的相遇、碰撞、弹开这一基本过程，其间起主导作用的是如同“三. 2. A. (2)…”中细说过的“量子”电磁力，因此 **F_s** 中也包含着 **PC** 的成分。试想：若无此物理因素，两粒子相遇时，互无作用力，彼此穿越而过就似对方不存在那样，那么，热运动乃至热平衡与浓度等都将不复存在，如此，何来 **F_s**？

(3) **F_d** 已是老朋友——“量子”电磁力，与之相关的前后关联——净电荷引起离子定向移动，显然是 **PC**。

D. 配体门控通道（参见“二. 1. 中之 **pnd**、**pld**…”及“二. 3. (9)(10)(11)…”）

这种微观通道也是一种受体。受体与配体之间相互匹配式的结合，有点像钥匙与锁孔之间的咬合，又有点像航天飞船与空间站在对接口处的对接，但与这两类宏观事物的区别也不少——

(1) 受体与配体之间的“咬合”往往并不像宏观物体那般貌似相当的严丝合缝，原因主要有以下三点：

① 分子固有的热运动使得受体与配体这两种分子都如同颤动着的果冻那样每时每刻都在微微地改变着形状，因此，两者即便在绝对静止时可以保持严密匹配，那在现实的永不停息的微颤时也几乎不可能时刻都紧密地彼此咬合。这是 **MC**。（至于热运动之起源及维持，那才涉及 **PC**）。

② 作为微观世界的基本特征的波粒二象性使得分子、原子、电子的运动轨道乃至其形状与大小等空间属性都带有一定程度的模糊性，这意味着世界的真相是根本不存在所谓的“清晰边界”以及“严丝合缝”！人类头脑中产生的这两个实际上是虚幻的观念，只是在宏观物体包含的微观粒子本身极小、且其数量又极大这一前提条件下的一种“错觉”。这里直接涉及的不是 **MC**，也不是 **PC**，而是关于人的认知问题，而这认知中倒是必然会囊括许多 **MC** 与 **PC**，但对此本文却不能不按下表。至于为何有“波粒二象性”，如今的物理学并未给出解释，只是将其作为一个根本性的物理事实来接纳。

③ 就像可以有戒指箍在手指上那样的严丝合缝的“结合”，也可以有两块磁铁吸在一起的那种几乎与严丝合缝无关的“结合”，配体与受体之间的结合往往介于上述两种情况形之间——既有关乎 **MC** 的形状大体匹配的相互“齿合”，又有关乎 **PC** 的靠电磁引力的相互“吸合”，亦即形状完全匹配的严丝合缝不是必须的，而且实际上那也是极难达到的。

(2) 关于配体与受体之间的“吸合”，不妨设想如下模型：某个配体表面有两个带电区域——**X** 区带正电、**Y** 区带负电，某受体上也有两区域——**X'** 区负电、**Y'** 区正电，**X** 区与 **X'** 区、**Y** 区与 **Y'** 区分别基本等大且同形状，**XY** 的间距也大体等于 **X'Y'**。显而易见，只要相对位置与距离都在某个范围内，这样的两个大分子（或一小一大两个分子）就会在静电力 **F_d** 的吸引下，**X** 区与 **X'** 区、**Y** 区与 **Y'** 区分别吸在一起。至于分子表面正负电荷区域的起源也不难理解：组成大分子的各个原子的原子核的核电荷数（即其所含质子的个数）不同，各原子的位置不同，因而电子云几乎不可能是处处均等的——电子云较稠密的区域就带负电，而电子云较稀疏处，内部原子核的正电就有所“外泄”，从而使此处为正电区。

F_d——“量子”电磁力，前后关联的两状态——配体与受体从相互独立到彼此吸合，这是典型的 **PC**。至于上段中对正负电荷区起源的解释，则主要是 **MC**——各明确概念之间的相互关系。倘要更详尽细致的解释，必须加入“力”：此力不仅包括交换虚子的通常的“量子”电磁力，还包括源于“物质波干涉”的涉及实物粒子（如电子）本身直接的互相交换的“纯量子力”（如所谓的“交换力”，它起作用而导致的一个著名的特例是“泡利不相容原理”）；在这两种“力”的交织作用下，各原子核与各电子协调互动终达平衡而形成电荷区。在此，可以粗略地说：力+**MC**=**PC**。

(3) 钥匙插入锁孔，需要以大脑为中枢的手眼互动来完成；飞船对接空间站，需要宇航员或（和）计算机及各种探测仪器、调整设备的精密操控……而配体与受体的结合却没有任何外在的、有意识的控制，它依赖的是：

① 两者各自的数量都不少；

② 众多配体碰撞着、翻滚着、跳跃着，其中的某个配体就有一定的几率达到离某个受体较近且相对位置较合适的状态；

③ 形状大体匹配的“嵌合”及源于电磁力的“吸合”。

其中既有 **MC**，也有 **PC**，读者不难依前面的葫芦画现在的瓢。

(4) 一旦插入或对接，若无人之再次干预，钥匙不会自行钻出锁孔，飞船也不会自己摆脱对接状态……而配体与受体结合后往往会在一段时间后自动分离，原因至少有以下四点：

① 彼此形状并非特别匹配，就像一把小钥匙松松地插进一个大锁孔，略有晃动就会脱落。

② 电荷区的电荷密度较低，或彼此电荷区的相对位置不甚匹配，于是吸力较小，正如梳头后的梳子吸起的若干小纸片，稍有风吹草动便会纷纷坠落。

③ 有些配体自身不稳定，会自行分解；分成几个碎片后，很可能就再难与受体相结合了。这好比断成数段的戒指，当然没法再套在手指上了。

④ 有些酶会分解或重塑某些配体，从而使破碎或变形了的配体不再适合与受体结合。

(5) 配体与受体结合后如何导致通道的开启呢？实际情况往往相当繁杂，要涉及许多原子集团构成的各类“分子零件”及它们多样的组装或说构型，还涉及许多由步骤、旁支、反馈等组合成的过程……不过，我们不妨拓展一下前三小节——(2)中的模型来简述其中的部分原理。

设想受体由以下的三个单元构成：① 外壳，② 管状通道，③ 耦联机构。①的外表面有前述的负电 **X'**区和正电 **Y'**区，这两区在①的内表面上有对应的带负电的 **X''**区和带正电的 **Y''**区。③的一端象一根有弹性的金属片，该端的头部（记为 **Z**区）带正电；**Z**区就在 **X''**区、**Y''**区的近旁。③的另一端控制着②的开或关。

当受体未与配体结合时，**Z**区在 **X''**区的吸引与 **Y''**区的排斥下，靠近 **X''**区，**Z**区的这个位置对应着②关闭的状态。当受体与配体结合后，**X**区的正电使 **X'**区、进而 **X''**区的负电被中和了一部分或全部，于是，**X''**区对 **Z**区吸力（同理，**Y''**区对 **Z**区的斥力）就减弱甚至消失了；**Z**区现在便在③的端部自身弹力的作用下移动到靠近 **Y''**区的位置，而这一位移通过③之耦联传动导致②开启。当受体与配体再度分离后，**Z**区又被吸推回 **X''**区近旁，于是②又关闭了。

以上 **A. B. C. D.** 四个“小专题”的每一个中都包含了不少的 **MC** 和 **PC**，它们中的大多数都可以前后衔接构成四条比较清晰的因果链条，尤其是 **A.** 中(1)~(10)的那一条。类似地，再往上的两个“大专题”中的“一. **2.**”里的(1)~(11)以及“二. **3.**”里的(1)~(15)也分别构成了两条十分明显的因果链条。

如果将一条较“小”较底层的因果链条“封装”起来而“只露头尾”，那么它就“缩编”成了一个因果黑箱，并可作为一个节点而“镶入”到一条更“大”更高层的因果链条中。最典型的例子就是“三. **2. A.**”中的(1)~(10)缩成“一. **2.**”中的(1)(2)里的“球滚而致风吹”的那个部分了。也可将“一. **2.**”里的(1)~(11)“封装”为“球滚而使小盒悬空且旋晃”这样一个因果黑箱。还可将“二. **3.**”里的(1)~(15)“缩编”成“一个神经上传递的冲动引起下一个神经元产生冲动”这一个因果节点，而这一功能性节点又可以嵌入由上百亿神经元互联而成的神经网络中。（通常，神经网络中的节点是实体性的单个神经元，因此，这样的两个实体性节点加这两者间的单一连线，大致就相当于一个功能性节点，于是，两个相邻的功能性节点是有部分重叠的。）

构建因果黑箱是一种简化思路的重要方法。象上文中那样详细分解还原出那么多的 **MC** 与 **PC**，主要是为了强调因果关系与实体本身有着同等的真实性以及相似的结构。然而，在实际的具体问题中，那些还原，既往往不具备充分的条件（比如某个研究阶段对离子通道的认识仅限于从实测中得知它在哪些情形下会让哪些离子通过，还没有更精密的实验给出其内部结构的细节，于是也就无从分解至各 **MC** 及 **PC** 了），也时常没有那个必要（特别是在应用领域），因为分解还原（尤其是深度的分解还原）经常无助于解决实际问题，还可能分散甚至浪费时间和精力。

3. 因果网络和因果假设

上文中比较详尽描述过的几条因果链条看似已颇为纷繁复杂，但与真实世界之繁杂相比，那就是小巫见大巫了。

现实世界中的复杂事物比比皆是，其中涉及的因果往往表现为一因多果、多因一果、多因多果、因果互动、因果环路（开或闭的、正或负的反饋回路）等多种复杂的形式。换言之，在繁复的世界里，若干条彼此独立的因果链条较为罕见，更常见的是诸多一维的因果链条在各自的若干节点处相互交叠链接，从而构成一个多维的因果网络。

因果网络中的某一个部分也可以“封装”成一个因果黑箱，只是此时的它往往会有多个输入端和多个输出端。“封装”是有技巧的：如果你界定用来构成一个黑箱的网络局部内含有较多的因果闭环，而其输入输出端又较少的话，那它作为高一级别的因果网络的新节点的价值就可能更高。当然，依据网络内自然存在的实体群或功能群的边界来划定黑箱是更常见的方法。比如，人的神经网络中大脑与小脑这两个实体“黑箱”就有各自相当清晰的物理边界；再如，利用多种仪器的“摸索”式探测又可以在大脑皮层上区分出诸如语言区、视觉区等功能区域的边界。

显然，因果黑箱是可以嵌套封装的——下一级的若干个因果黑箱所构成的因果网络可以封装成一个高一级的因果黑箱，它又与另外几个本层级的因果黑箱互联成因果网络而又可再次封装成一个更高一级的更大的因果黑箱……一方面，尚缺乏足够证据表明这种嵌套的层数是有止境的，另一方面，我们其实就生活在靠近这种嵌套的某个中间层级的现实世界里，因此，在处理实际问题中，我们几乎不可能从最低层次的 **MC** 和 **PC** 起步来一级级向上封装因果黑箱，而往往总是开始于某个中间层次的因果网络。在此层级上，面对某个因果黑箱，我们一般总是先要尽可能细致地弄清它的各种外在表现——给它某些“刺激”（输入），它会做出哪些响应（输出）？时常也还要尽量清晰地划定其边界（尤其是功能性的因果黑箱更有必要划清）；接下来经常会做的事情是：根据上述的已知事实及过往经验还有灵感直觉等，猜想假设该因果黑箱内部的具体的因果网络，此即因果假设。成功的因果假设不仅能令已知的输入输出信息全部纳入其解释框架之中，而且对于可能出现的新的输入还可以给出日后经验验证可能符合事实的新的输出（预言）。

成功的因果假设就是那个因果黑箱中的真实的因果网络了吗？不见得。比如某个可以进行人脸识别的黑箱，其内既可以是人的大脑，也可以是某个运行着某人工智能程序的计算机；这两者的因果网络显然大不相同，因此，你即便对此黑箱做出了某个成功的因果假设，它可能只是这两者中的某一个，或这两者哪个都不是，而绝不可能同时是这两者。由此可见，成功的因果假设并不必然就一定是真实的因果网络。

不真实但成功的因果假设有用吗？当然有用！实际上大多数时候人们恰恰就只是满足于获得这种成功的假设（它常被称为理论或模型）而不关心其是否真实。倘若只在意那个黑箱能达到准确而快速地识别人脸这一功能性目标，那又何必管它里面是人脑还是智能机器或者其它什么东西呢？这里的关键是要出结果，至于谁出的成果经常是被略而不顾的。在此情形下，因果假设就必然带有相当份量的主观色彩——就其输入输出符合事实这一点来说，它无疑是客观的；就其内核并不确保真实、其实质只是某种成功的、人的思想上的创造发明这一点来说，它又是主观的。象万有引力定律、广义相对论等诸多理论（成功的因果假设）都具有这种既客观又主观的特征。爱因斯坦曾说过大意如下的话：没有从现实到达理论的逻辑之路，理论是人脑的自由发明，好的理论符合现实。

有人关心成功假设的真实性问题吗？有！其实也正是象爱因斯坦那样的对于宇宙奥秘怀有不可遏制的好奇心的人，才会去不断地刨根究底地追问因果黑箱内部的真实的因果网络。他们大致采用以下两种方法（或这两法的组合）：

(1) 间接法——不断地扩大输入输出的范围，直至原来看似成功的理论也渐露败象，于是就必须构想更好的理论。比如，越接近光速以及引力场越强的地方，万有引力定律的预言就越失实，或者它根本就无言以对（比如，由它就得出引力波的预测，当初，爱因斯坦不满意万有引力定律的一点就是它其实并未对引力的传播速度做出合理的推断），这时就必须让位给更好的引力理论——广义相对论了。更成功更有效的理论难道不正意味着它更真实吗？否则，岂非要反推出“胡思乱想也很真实”的荒谬结论了？

(2) 直接法——利用更多更先进更精确灵敏的实验工具以及更高妙的实验技巧去探索越来越微观的世界，这也正是在将因果黑箱一层层地打开来细细观察，对照因果假设，看看假设中的那些实体以及它们之间的因果链条是否真的发生在现实世界中。当初，“原子”是个天才的假设；后来，用多种仪器从不同侧面都证实了原子是真实的存在。眼下尚未完全建成、但已比广义相对论更切合事实、因而也将更成功的量子引力理论（可能它也就是超弦理论的一个部分）的一个基本的设想是存在引力子，而一旦将来有仪器真能直接探测到引力子，那它就将使得以引力子为场量子的引力场与以光子为场量子的电磁场同等真实了（类似于我们曾用实测使得光子与原子同等真实那样），同时也就将证明新理论更好更真实（因为广义相对论中没有引力子）。

所有的因果假设终将查明其真实性吗？所有的因果黑箱终将彻底打开以至于其内部由诸多 **MC** 与 **PC** 构建的因果链条及因果网络都能展现在世人面前吗？起码以目前的经验来看，这两问给出肯定答案的可能性都极小，原因至少有以下三点：

(1) 在大多数领域，新的因果假设的产生速度要快于旧的因果假设的证实速度；类似地，发现新的因果黑箱（新现象、新事物）的速度要快于打开旧的因果黑箱的速度（更不要说层层打开了）；何况新领域还层出不穷。

(2) “三. **1. …**”中定义的 **PC** 究其实是基于量子力学的，而量子力学作为一种理论也不可避免地隐含主观成分，况且其基础性乃至完备性仍遭受过如爱因斯坦、薛定谔等等大科学家的质疑，而其诠释更是五花八门、莫衷一是；就算终能还原归结于这样的 **PC**，我们仍难言那便是绝对的客观真实了。将来突破量子力学的框架不是不可能的，届时修正 **PC** 的定义也将顺理成章。

(3) **MC** 的困境与 **PC** 有几许相似处——没有充分的理由认为所有现存的数学基础理论都牢不可破，但涉及 **MC** 的更棘手的问题是：面对世间满眼皆是超级复杂的网络，人类往往找不到合适的数学工具或模型去应对它；而找到了一些数学工具的又往往要面对极难求解的窘境，即便将来有了成熟的量子计算机和人工智能，貌似仍有一大批数学问题无法计算……既然缺乏数学工具又加上极难计算，那又何谈确切而真实的 **MC** 呢？

总之，能够“查明真相，看清内核”成了一种科学信仰，而非一个既定事实；当然，这种信仰的基础是最为殷实可靠的，因为它有着巨量的数理推演与实践成果为其背书。话又说回来，尽管我们已取得了好多辉煌的成就，但人类上下求索之路还真是望不到尽头。

附①：“二. 2. F.”中提到的估算（各物理量的单位都采用国际单位，略去单位的标注）——

已知（应知）：

平板电容公式 $C \approx \epsilon S/D$ ，真空介电常数 $\epsilon \approx 9 \times 10^{-12}$ ；

轴突（z）的半径 $R \approx 10^{-6}$ ，取 z 上一小段长度 $L \approx 10^{-5}$ ，相关“圆柱”的侧表面积 $S = (2\pi R)L$ ，体积 $V = (\pi R^2)L$ ， $\pi \approx 3$ ；

轴突膜（zm）的厚度 $D \approx 3 \times 10^{-9}$ ；

zm 内外电压的最大变化幅度 $U \approx 0.1$ ，相应的流过 zm 的电荷总量设为 Q，相应的离子总数设为 M，相应的离子浓度的最大改变量设为 N；

基本电荷量 $e \approx 2 \times 10^{-19}$ ；

生理盐水浓度 $N' \approx 1\%$ ；

水的摩尔质量（相关于水的分子量） $Z \approx 0.02$ ，水的密度 $P \approx 10^3$ ；

阿佛加德罗常数 $A \approx 6 \times 10^{23}$ 。

求：

比例 $B = N/N'$ 。

解：

$C \approx \epsilon S/D \approx \epsilon (6R)L/D \approx (9 \times 10^{-12})(6 \times 10^{-11})/(3 \times 10^{-9}) \approx 2 \times 10^{-13}$ ， $Q = CU \approx 2 \times 10^{-14}$ ， $M \approx Q/e \approx 10^5$ ；

$V \approx (3R^2)L \approx 3 \times 10^{-17}$ ，与此 V 相对应的水分子数 $M' = (PV/Z)A \approx (3 \times 10^{-14}/2 \times 10^{-2})(6 \times 10^{23}) = 9 \times 10^{11} \approx 10^{12}$ ，故 $N = M/M' = 10^{-7}$ ；

$B = N/N' \approx 10^{-7}/10^{-2} = 10^{-5}$ （十万分之一）。