arXiv:2301.11632v1 [cs.CC] 27 Jan 2023

物理宇宙中配备闭合类时曲线的图灵机

SaraBabaee K.[1*]，Farzad Didehvar[1†]数学与计算机科学系，阿米尔卡比尔理工大学，德黑兰，伊朗

*电子邮箱：sarababaei@aut.ac.ir

†电子邮箱：didehvar@aut.ac.ir

摘要

我们研究闭合类时曲线的悖论性方面及其对计算理论的影响。在介绍利用闭合类时曲线进行逆向时间旅行的经典图灵机（TM）$_{\mathrm{CTC}}$后，*Aaronson* 等人证明，P = PSPACE，且停机问题等 Δ_2 集合都可以在这一计算模型中求解。

我们关注的是该模型的物理一致性，这促使我们提出 *strong axiom*，该假设指出，沿闭合类时曲线绕行的每个粒子都会在返回其出发时间之前被摧毁；以及 *weak axiom*，它阐述了相同的概念，尤其适用于图灵机。我们认为，在包含闭合类时曲线的宇宙中，这两条公理必须成立；否则，宇宙中沿闭合类时曲线绕行的粒子数量将是无限的。

weak axiom 的一个直接结果是，图灵机无法沿闭合类时曲线完整绕行一周来传递信息，因此，为上述推论提出的 $\mathrm{TM}_{\mathrm{CTC}}$ 程序将无法运行。我们建议用 *data transferring hypothesis*来解决这个问题，即使用另一台 $\mathrm{TM}_{\mathrm{CTC}}$ 来存储数据。其前提是图灵机这一概念能够贯穿整个时间，这在我们的宇宙中似乎难以实现。随后，我们讨论了包含闭合类时曲线的宇宙可能满足的物理条件，并得出结论：如果可以通过闭合类时曲线返回一个近似等价的宇宙，那么上述推论便成立。

关键词：图灵机；闭合类时曲线；时间旅行；强公理；弱公理；数据传输ng假设；

1 引言

粗略地说，**时空**是一个四维连续坐标系，将三个空间维度（即欧几里得空间）与一维时间结合起来，使得这四个轴彼此并不独立。例如，根据狭义相对论，速度越高，时间流逝得越慢。（爱因斯坦，1905年）

因此，时空由点组成，我们将这些点称为**事件**，它们可以表示为（x，y，z，t），用于表示宇宙中粒子的坐标。此外，粒子在时空中所经过的路径称为其**世界线**。

物理现象可以在不同类型的时空中得到解释，例如平坦时空（如闵可夫斯基时空）或弯曲时空。在这些时空中，可能会出现许多性质，例如违反因果时序，即一个事件 a 先于某个事件 b 却可能发生在 b之后。具有这种性质的时空往往会出现虫洞和奇点等各种陌生且颇为奇异的特征。（Deutsch，1991年）本文要研究的一种违反因果时序的时空实例，是包含闭合类时曲线的宇宙，这意味着时空是弯曲的。

为了准确理解闭合类时曲线究竟是什么，我们应先回顾一些概念。设时空为一个三维坐标系，其中以 ct[1] 单位刻度标记的平面表示空间，而平面上以 t 单位刻度标记的正交轴表示时间。现在，假设时空原点处有一条光线，由于它以速度 c运动，因此经过下一个时间单位 t后，它将移动 ct 的距离。于是，在时间 t时，光将位于以$(0,0,t)$为圆心、以 ct为半径的圆上的任意一点。由于时间和空间是连续的，光线可能经过的路径形成一个以原点为顶点的锥体，称为**光锥**。这个锥体表示时间的**未来** 方向或正方向。同样，光到达时空原点所经过的可能路径也会形成另一个锥体，表示时间的**过去** 方向或负方向。

[1] c 是真空中光速的普适常数。

任意向量 $v = (x, y, z, t) = (\vec{d}, t)$[2] 在时空中表示两点之间的运动 A 和 B，其空间差为 $\vec{d}$，时间为 t，并根据 $\vec{d}$ 与 t 之间的关系分为三类。

$|\vec{d}| < t$ 以低于光速的速度运行，因此可以成为某个粒子的世界线。在这种情况下，该向量称为**类时**向量，位于光锥内部。

$|\vec{d}| = t$ 以光速运行，因此不可能成为任何粒子的世界线。在这种情况下，该向量称为**类光**向量，位于光锥上。

$|\vec{d}| > t$ 最快速度超过了光速，这种路径可能处于任何粒子或光的世界线之上。在这种情况下，这个向量被称为**类空**向量，位于光锥之外。

闭合类时曲线，简称**闭合类时曲线**，是按照上述定义起点和终点相同的一条类时曲线。由于它是类时的，因此可以是粒子的世界线。系统中任何具有此类世界线的粒子都可能回到其过去的某个状态，换言之，回到一个曾经存在过的时空坐标。

闭合类时曲线存在的可能性最早由一位荷兰数学家提出，*Willem Jacob van Stockum* 1938 *Kurt Gödel* ¨ 。（范·斯托克姆，）此后，有人引入了哥德尔度规，作为爱因斯坦场方程的一个解，从而描述了一个包含闭合类时曲线的宇宙。（哥¨德尔，1949）事实上，*Einstein* 在广义相对论中提出了**场方程**，也称为**爱因斯坦场方程**（爱因斯坦，1916）。此后，人们发现了爱因斯坦场方程的多个解，称为**度规**。这些解往往描述具有奇异特征的宇宙，例如史瓦西度规中的黑洞、莫里斯–索恩度规中的可穿越虫洞，以及哥德尔度规中的闭合类时曲线。¨哥德尔度规。

直观而言，具有闭合类时曲线的时空提供了回到过去的可能性。就像有人在球形地球上向右出发，最终到达比出发点更靠左的坐标一样，系统中的粒子可以进入闭合类时曲线并沿其向前运动；随着时间流逝，由于闭合类时曲线是闭合的，它最终会到达早于自身旅程起点的时刻。（Smith，2021）

1.1 悖论伴随闭合类时曲线

乍看之下，时间旅行会导致若干逻辑悖论和直觉悖论。本节将探讨其中一些悖论的定义、情境以及可能已有的回应。随后，我们将在第2节讨论一个类似的问题，并尝试作出回应。

1.1.1 一致性悖论

一位知名的 是**一致性悖论**，它会因实施某些改变而产生 es 到过去。 一个便于理解的例子是 *grandfather paradox*，可以描述如下：

> 设想一个人穿越时间，回到某位祖先生活的时代，并杀死自己的祖父。结果，他们将永远不会出生，因此也就不会穿越时间并杀死自己的祖父。于是，他们出生并前往过去，如此循环往复。（Aaronson，2005）

祖父悖论还有其他几种等价的情景，例如 *Hawking*和 *Ellis* 提出的故事：

> 假设某人乘坐一艘合适的火箭飞船穿越时间，在出发前抵达。他们只有在假定自己拥有 *free will*的情况下，才能改变过去的任何事件，从而阻止自己踏上旅程。结果，他们不会进行时间旅行，因此也就不会发生任何阻止他们进行时间旅行的事。（Hawking & Ellis，1973）

或者是 *Hitler Paradox*：

> 一些人道主义者想到时间旅行能力时，首先可能会想到回到1939年之前的某个时间，杀死阿道夫·希特勒，以阻止第二次世界大战爆发。然而，除了这可能对未来造成的广泛影响之外，杀死他也抹去了[3] 导致这一事件发生的原因。也就是说，如果没有第二次世界大战这场悲剧，时间旅行者就没有动机去杀死希特勒。（Brennan，1997）

基本上，在所有这些等效情景中，过去的事件 a **会影响**未来的事件 b，例如穿越时间回到过去，从而导致事件 a 的发生。

1.1.2 费米悖论

另一种类 型的矛盾与**费米悖论**相似，可以表述为 *if traveling back in ti me was possible where would future time travelers be right now?*（Jones，1985）针对这一悖论，人们提出了各种解释，例如，时间旅行可能极其昂贵或危险（Smith，2021），或者由于我们所处时代的时空弯曲程度不足以允许闭合类时曲线存在，因此不可能通过时间旅行抵达我们的时代。（Hawking，1999）

[2]设 $\vec{d} = (x, y, z)$。[3]与前面提到的其他情形不同，在 *Hitler Paradox* 中，时间旅行并非受到物理阻止，而是其原因消失了。

1.1.3 纽康悖论

另一个与时间旅行有关的矛盾称为**纽科姆悖论**，其游戏规则如下：（Wolpert & Benford，2013）

- 两名玩家分别扮演“预测者”和“选择者”，进行一个涉及两个盒子的游戏： A中装有 1000 美元， B则是空的。
- 轮到 *chooser* 时，可以选择两个盒子 A 和 B，也可以只选盒子 B，并获得所选盒子中的全部钱款。
- 轮到 *predictor* 时，将采取以下行动之一：– 如果他们预测到另一名玩家会选择两个盒子，就会让盒子 B 保持空着。– 否则，如果他们预测到另一名玩家只会选择盒子 B，就会在里面放入 1,000,000 美元。

		Chooser	
		$A+B$	B
Predictor	$A+B$	1000	0
	B	1’000’000	1’001’000

图 1：纽康博弈收益矩阵。

在博弈论中，根据 *strategic dominance principle*，选择者应该始终选择两个盒子 A并且 B；而根据 *expected utility principle* 以及预测者“百发百中”这一事实，选择者则应该始终拿走盒子 B。（Nozick，1969）

在哲学中，人们认为，完美预测或可用作完美预测工具的时间旅行，与 *free will*相冲突；因为人们无法辨认预测究竟是选择的结果，还是选择是预测的结果。（Craig，1988）

1.1.4 因果循环

一种**因果循环**是另一种可能由时间旅行引发的悖论。它指的是过去的某个事件 a 导致了**另一个事件**[4]，而后者 b 发生在未来，并且实际上又是 a的原因。于是，这两个事件都存在于时空之中，却无法确定它们的起源。（Lobo& Crawford，2003）

1.1.5 知识创造悖论

通过时间旅行可能发生、且由于根本不被视为逻辑矛盾而不会被一致性方法消解的悖论，就是**知识创造悖论**。为了理解这一悖论，假设某人回到过去，前往 G¨odel 所处的时代，在 1931 年之前——也就是他发表不完备定理论文的年份之前——与他相遇，并口述论文内容给 G¨odel。结果，他对他们钦佩不已，并如预期般发表了这篇论文。因此，据说无论是否发生他们的时间旅行，世界上的每一件事都完全相同，没有任何悖论发生；唯一例外的是，G¨odel 和时间旅行者都没有真正思考并创作出论文的内容。换句话说，不完备定理没有最初的创作起点，知识就这样在无人付出努力的情况下产生了。

这种违反直觉的时间旅行特性被认为会在闭合类时曲线中保留下来，也是（Aaronson，2005年）和（Aaronson、Bavarian 和 Gueltrini，2016年）相关研究结果的基础。他们试图在不为难题分配所需时间或记忆的情况下解决该问题。

然而，我们认为，如果对这一情景作更精确的表述，那么从外部观察者的角度来看，宇宙在两次拜访时并非完全相同：第一次，G¨odel思考不完备定理；第二次，他则与一位时间旅行者交流。因此，这一情景在逻辑上也可能构成悖论。

此外，上述情景也可视为因果循环的一个例子，因为无法辨明究竟是时间旅行者让G¨odel得知了不完备定理，还是反过来；他们是从G¨odel那里学到这一点的。

在此，我们应当声明，在包含闭合类时曲线的宇宙中，整个宇宙，包括所有生物，都会不由自主地返回到某个时间坐标，从而使宇宙在每次到访时都保持完全相同。相比之下，通过时间旅行，只有个体会前往某个特定时刻。为了进一步说明这一点，考虑故事

[4]值得注意的是，在分别定义一致性悖论和因果循环时，所用术语**影响**与**原因**之间存在差异。

的 *grandfather paradox*，让我们从一位处于时空之外、不会沿闭合类时曲线运动的观察者的视角来审视这个问题。对他们而言，在孙子进行时间旅行之后，世界并不完全如初，因为在第一次查看时空坐标时，孙子并不存在；然而，在第二次查看时，他却与祖父并肩而立。因此，通过闭合类时曲线抵达一个已经经历过的时刻，并不等同于个体的时间旅行。

据我们所知，这两个概念之间的差异尚未得到充分讨论，这ch促使我们思考闭合类时曲线可能引发的潜在问题。

1.2 闭合类时曲线的一致性

迄今为止，许多采用不同方法的人尝试建立条件，使闭合类时曲线保持一致，并消除与之相关的悖论。例如，**诺维科夫自洽性原理**指出，改变过去的事件发生的概率为零。因此，排除所有自相矛盾的事件后，时间旅行悖论便会消失。（Friedman 等人，1990年）在此，我们阐述 *Deutsch* 在（Deutsch，1991年）中提出的方法，以及基于该方法开展的研究。

在（Deutsch，1991年）中，他采用量子计算方法研究了闭合类时曲线存在所产生的物理效应，并对利用闭合类时曲线进行的计算建模。此外，假设经典物理学在闭合类时曲线附近具有最低限度的近似一致性，他指出，因果顺序违反可能会对输入施加相互冲突的约束，从而在经典情形下导致悖论。尽管如此，在量子情形下，这些悖论都可以避免。

首先， *Deutsch* 通常认为，任何信息在时空中存在闭合路径的计算网络，都可以转换为一个简化的标准计算网络；对于每一组输入，该网络所产生的输出都与原网络相同。此外，在这个等价网络中，比特只在门中相互作用，运算也在门中执行。闭合类时曲线路径上的 n 比特会先到达所有门的一个不确定未来，然后以负延迟返回所有门的过去，最后重新沿其原有路径前行。如果计算网络中通过所有门所需的时间为 T，那么比特的延迟时间，或等价地说每个比特向过去传输所经过的时间，就是 $-T$。与此同时，来自确定过去的 m 比特作为输入进入网络，通过与 n 闭合类时曲线比特通信产生输出，并前往一个确定无疑的未来。

此外， *Deutsch* 指出，要使闭合类时曲线保持一致，每个门的演化算子都必须有一个不动点。因此，该点将是闭合类时路径上信息的稳定态。他还证明，量子情形下这样的不动点总是存在，尽管经典情形下可能不存在。

1.3 $\mathrm{TM_{CTC}}$ 计算模型

2016年， *Scott Aaronson*基于Deutsch式闭合类时曲线，提出了配备闭合类时曲线的图灵机，在经典情形下称为$\mathrm{TM_{CTC}}$，在量子情形下称为$\mathrm{QTM_{CTC}}$。接下来，我们将讨论经典计算模型。

$\mathrm{TM_{CTC}}$ 有两种不同类型的存储寄存器（图灵机的纸带）：

> $\mathbf{R_{CR}}$：遵循时间顺序的寄存器，其时间线从已知的过去延伸至明确无歧义的未来。请注意，模型的输入将位于这些寄存器上。$\mathbf{R_{CTC}}$：在闭合类时曲线上循环的寄存器。



（a）纸带　　（b）一个通用方案（Aaronson& Watrous，2009）

图 2：$\mathrm{TM_{CTC}}$ 计算模型

与经典图灵机类似，我们假设两条纸带都包含无限多个单元，尽管每个图灵程序中我们只能使用有限个单元。因此，我们可以用一对二进制字符串（x， y）表示图灵机的信息，其中 x 是 $\mathrm{R_{CR}}$ 的内容，而 y 是 $\mathrm{R_{CTC}}$的内容。

此外，对于机器的每个输入 x，都存在一个无限维随机矩阵 S_x，它以确定的概率将每个二进制字符串 $y \in \{0,1\}^*$ 映射为一个二进制字符串 $S_x(y) \in \{0,1\}^*$。事实上，这个随机矩阵是一个**马尔可夫链**，而每台机器的算子的不动点等价于其对应马尔可夫链的**平稳分布**。

1.4 停机问题的 $\mathrm{TM}_{\mathrm{CTC}}$-可计算性证明

Aaronson 等人提出了一种图灵机$_{\mathrm{CTC}}$ 程序，用于解决（Aaronson 等人，2016年）中的停机问题。该程序将 $\langle P\rangle$图灵机 P的描述作为输入，在 R_{CR} 上判断 P 在没有任何输入的情况下是否最终会停机。

为此，我们将 σ_t 视为图灵机 P在 t 步内的配置。因此， $P()$ 的状态 σ_0 显而易见。此外，对于每个 t，通过让 P再运行一步，即可轻松从 σ_t 得到 σ_{t+1}。另外，对于每个任意字符串 y，只要知道 $\langle P\rangle$，就很容易确定是否存在某个 t 使得 $y=\sigma_t$。

此外 ，如果 P 在运行的第 t^{th} 步停机，我们就称 σ_t 为**停机历史**；否则 se, 我们称之为 非**停机历史**。
此时，$\mathrm{TM}_{\mathrm{CTC}}$通过在 R_{CR} 上采用 $\langle P\rangle$ ，在 $\mathrm{R}_{\mathrm{CTC}}$ 上写入任意字符串 y ，并将函数 $S_{\langle P\rangle}(y)$ 定义如下：

1. 如果存在一个 t 使得 $y=\sigma_t$:

   1.1. 如果 σ_t 是一个停机历史，那么 $S_{\langle P\rangle}(y)=y$，并在 R_{CR} 上输出 1。1.2. 否则， $S_{\langle P\rangle}(y)$ 的概率为 $\frac{1}{2}$，而 $S_{\langle P\rangle}(y)$ 的概率为 $\frac{1}{2}$。

2. 否则， $S_{\langle P\rangle}(y)=\sigma_0$。

现在，如果 $P()$ 停机，则存在一个 t，使得 σ_t 是一个停机历史，并且 $y=\sigma_t$ 是不动点算子 $S_{\langle P\rangle}(y)$ 的唯一不动点。因此，$\mathrm{TM}_{\mathrm{CTC}}$ 将输出 1，这意味着 $P()$ 将停机。相反，如果 $P()$ 永不停机，那么步骤上的几何分布是不动点算子 $S_{\langle P\rangle}$ 的唯一不动点。换言之， $P(\sigma_i)=(\frac{1}{2})^{i+1}$，因此 $\mathrm{TM}_{\mathrm{CTC}}$ 将永不停机。

2 证明的问题

本节将基于我们宇宙的物理限制，对上述证明提出一些疑问。

首先，让我们在物理情境下考察闭合类时曲线。考虑到这一点，设想一个包含闭合类时曲线、因而能够违反因果顺序的宇宙。假设其中一个粒子，即 x，在时刻 t_0诞生，随后朝未来[5] 前进，直到到达时刻 t_{-1}，也就是早于 x 诞生的时刻。接着，若 x继续沿闭合类时曲线运动，并毫发无损地到达时刻 t_0，并假设在 t_0 首次被 x 访问时其中所有其他粒子都与第二次访问时完全相同，那么 x 将再次诞生。这样一来，宇宙中就会有两个 x。于是，这两个 x都会朝未来运动；因此，当它们到达时刻 t_0，而 x 再次诞生时，世界上就会有三个它的副本。同理，这会导致世界上出现无限多个 x，这在我们的宇宙中似乎是不可能的。因此，我们认为， x 必定会在 t_{-1} 与 t_0之间的某个时刻被摧毁；这一点将在第 3.1 节中以 *strong axiom* 的形式重新阐述。

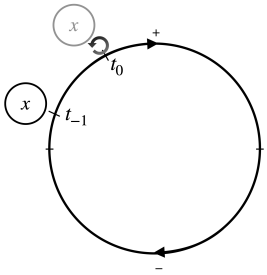


图 3：粒子 x 在闭合类时曲线上的运动。

对于配备闭合类时曲线、运行上一节程序的图灵机，也可以讨论同样的问题。假设在我们的物理世界中，图灵机$_{\mathrm{CTC}}$ 在时刻 t_0 被创建并开始计算，其 R_{CR}上有一个 $\langle P\rangle$ ，$\mathrm{R}_{\mathrm{CTC}}$上有一个任意 y。随着时间推移，如果机器回到时刻 t_0，它就会被重新创建，因此根据我们上面的论证，世界中将有无限多个这样的机器。于是，当到达时刻 $t_{-1}<t_0$时，图灵机$_{\mathrm{CTC}}$ 应该在 t_0之前被摧毁；这将在第 3.1 节中重述为 *weak axiom*。因此，它无法利用从未来获得的任何信息。也就是说， y 始终是任意字符串，不会更接近停机历史。更准确地说，如果我们追踪 $S_{\langle P\rangle}(y)$，则有：

1. 如果存在一个 t 使得 $y=\sigma_t$:

[5]实际上， x 并不会在时间中移动；相反，时间会自然地流逝于 x，而且由于类时线在时空中彼此接近，沿着未来光锥的同一方向移动到某个位置时， x在时空中的坐标的 t 分量会减小。

1.1. 如果 σ_t 是停机历史，那么 y 将留在 $\mathrm{R_{CTC}}$上，而 $\mathrm{R_{CR}}$ 将输出 1。基本上，这是程序在完全不使用闭合类时曲线的情况下作出正确响应的唯一情形。然而，无法保证这种情况总会发生。1.2. 如果 σ_t 是非停机历史，那么要么应该将图灵机的下一步追加到 y中，要么应该将其改为平凡配置 σ_0，直到即将到来的 t_0访问。不过，由于图灵机在 t_0之前被摧毁，这一进展将会丢失，$\mathrm{TM_{CTC}}$ 将始终从 $\mathrm{R_{CTC}}$上的 y 开始计算。

2. 否则，后续访问 t_0 之前，$\mathrm{R_{CTC}}$ 上应该写有平凡配置；与前一种情况类似，这一配置将无法访问。

此外，关于物理宇宙中的闭合类时曲线，还有一些证明过程中未曾解决的歧义。例如，所有定义都针对微观粒子；如何将其扩展到图灵机等宏观粒子？此外，时间被视为与空间相同，这似乎并不合理。

3 我们提出的解决方案

我们旨在从两个不同的角度研究上一节提出的问题。首先，我们尝试通过考察经典物理学在宇宙中的规律来提出一种解决方案，随后再探讨当前世界之外的问题。

3.1 在我们当前的宇宙中解决问题

在第 2 节中，我们提出了一个问题：粒子在闭合类时曲线上持续绕行一整圈，会导致宇宙中每种粒子的数量都变为无限。这似乎与我们的物理直觉不符，尽管从数学上看它是一致的。换言之，我们假设这个问题只存在于物理世界中，而数学世界则是图灵机$_{\mathrm{CTC}}$的一个可能且无碍的平台。根据上一节中的论证，我们可以为包含闭合类时曲线的经典宇宙提出以下两条公理：

强公理：没有粒子能在闭合类时曲线上完成一整圈运动；它会在 re
回到其在时空中的起点之前被摧毁。
弱公理：沿闭合类时曲线运动的每台图灵机，都会在回到其在时空中的起点之前被摧毁。

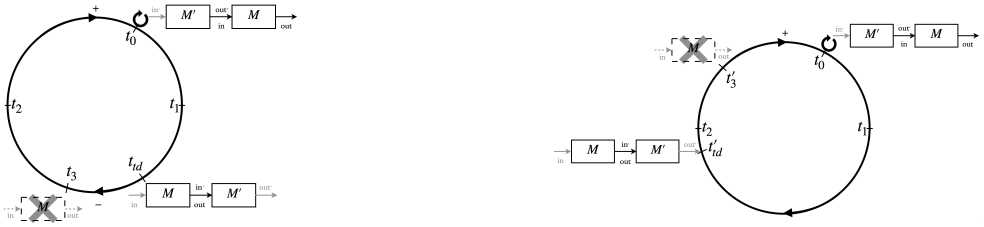
现在，假设至少满足 *weak axiom*，我们将通过在图灵机之间传输数据来解决这个问题。

需要指出的是，根据第一节中的定义，沿时间正方向或负方向运动，分别意味着朝未来或过去运动。

假设一台图灵机$_{\mathrm{CTC}}$，即 M，在时间 t_0开始计算，沿时间正方向运动至时间 t_1，此后沿时间负方向继续运动，到达 $t_2 \leq t_0$ ，并再次沿时间正方向运动，又到达 t_1 。在这种情况下，根据 *weak axiom*，当 $t_2 \leq t_3 \leq t_1$ 且 M 沿时间负方向运动时， M 会在时间 t_3 被摧毁；或者当 $t_2 \leq t_3' \leq t_0$ 且 M 沿时间正方向运动时， t_3' 会在时间 t_3 被摧毁。

现在，为了解决这个问题，假设另一台图灵机$_{\mathrm{CTC}}$，即 M'，可以被放置在 M到达 t_3 或 t_3'之前所经过的路径上，我们称之为**数据传输假说**。因此，截至那一刻， M 计算出的输出可以用作 M'的输入。然后， M' 将从 t_3 或 t_3' 移动到 t_0，并将其数据作为 M的输入，不经过任何处理或改动。

在这种方法中，粒子和图灵机在闭合类时曲线上的整个循环运动过程中都会被摧毁；然而，数据可以穿越时间并保持稳定。因此， M 可以利用沿闭合类时曲线运动时收集到的信息，因此，图灵机$_{\mathrm{CTC}}$ 的给定主张和证明将是有效的。



(a) (b)

图 4：图灵机 M 与 M'之间的数据传输。

因此，在一个 *data transferring* 可能实现的宇宙中，正如 *Aaronson* 所声称的那样，不仅 $\mathrm{P_{CTC}} = \mathrm{PSAPCE_{CTC}}$，连停机问题也都可以计算。

3.1.1 数据传输假说的前提条件

我们通过以下对话展示了 *data transferring hypothesis* 的必要条件：

A： *data transferring hypothesis* 的一个前提条件是图灵机在整个时间范围内都存在；否则，在闭合类时曲线的第一轮循环中，直到1936年图灵机被发明之前，时空中都不存在图灵机。然而，在随后的循环中，每一时刻都应该至少存在一台图灵机，包括 1936，*data transferring* 之前，*hypothesis* 以建立该项。这将导致在闭合类时曲线的不同周期中访问不同的宇宙。

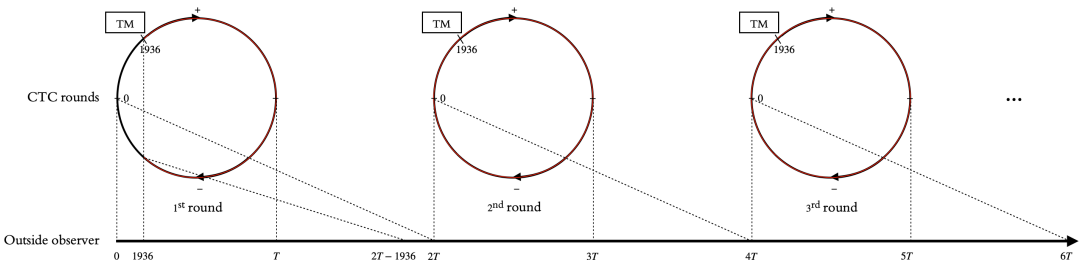


图5：数据传输假说 所要求的不同周期。红线表示图灵机存在的时间，这在第一轮和第二轮中并不相同。

B:由于闭合类时曲线是一条类时线，它是否必须是唯一的、从时间起点开始，并延续到遥远的未来？

例如，我们能否假设每个粒子都可以拥有自己的闭合类时曲线，并让对应于图灵机的闭合类时曲线成为一个小环，只经过2022年？换句话说，当世界上最早的那台图灵机沿闭合类时曲线循环，并根据 *weak axiom*在到达1936年之前被摧毁时，另一台图灵机则沿着一条只经过2022年的闭合类时曲线循环，在其整个路径上始终都有图灵机存在。此外，有些粒子可能不会沿闭合类时曲线循环。

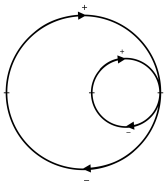


图6：不同粒子的各种闭合类时曲线。

A： 在这种情况下，不同粒子之间可能如何进行通信？**B：** 我们可以说，如果闭合类时曲线上的两个粒子在某一圈相互作用，那么它们也会在其他所有圈中相互作用。正如 *Novikov's self-consistency principle* 所述，只有那些不会改变过去的粒子才能回到过去。**A：** 设想一块石头，其中一半沿着长度为两千万年的闭合类时曲线循环，另一半沿着长度为两百万年的闭合类时曲线循环。那么这块石头会发生什么？同样地，如果我们将这两条闭合类时曲线分别用于两块独立的石头，又会怎样？**B：** 因此，让宇宙中的所有粒子共用一条闭合类时曲线似乎是合理的。然而，这条闭合类时曲线是否必须返回到1936年之前的某个时刻，也就是图灵机诞生之前？**A：** 假设闭合类时曲线不会返回到某个特定时刻，这是一个强假设。因此，讨论其他模型是合理的；在这些模型中，起点和终点不一定相同。



(a) 环　　(b) 环$^{\infty}$

图 7：违反因果律模型，而非闭合类时曲线。

根据上述讨论， *data transferring hypothesis* 在我们的宇宙中似乎也不可能存在。因此，在下一节中，我们将讨论一个包含闭合类时曲线的宇宙可能具有的情形。

3.1.2 可能的情形

本节将讨论一个具有闭合类时曲线的宇宙中几乎所有可能的情形。对于每种情形，我们都会探讨可能出现的问题，并尝试提出解决方案。需要指出的是，我们可能还遗漏了其他情形；如果你发现了我们未曾想到的情形，欢迎告知我们。

没有附加条件的弱公理 假设闭合类时曲线所绕行的循环上没有任何集中，也没有对强公理施加任何特定条件，那么我们只知道，时空中的每个粒子都会在返回其诞生时刻之前被毁灭。因此，正如我们在上一节讨论的那样，*data transferring hypothesis* 需要图灵机在整个时间内都存在，而我们知道这在当前宇宙中并不成立。因此，尽管 *data transferring hypothesis* 在可能的宇宙中会是一个有帮助的论断，但它在我们的世界中并不适用。

回到一个近似等价的宇宙 在这种情况下，假设沿闭合类时曲线运动的粒子返回的并非与上一个周期完全相同的宇宙，而是一个近似等价的宇宙，这意味着在闭合类时曲线上的两轮中，宇宙的某些事物可能有所不同，例如图灵机是否存在。换句话说，在时空首次运行时，图灵机于1936年被发明，在此之前，世界上还没有图灵机。然而，在闭合类时曲线产生的所有后续周期中，图灵机始终存在。

需要指出的是，根据我们从第 2 节讨论的问题中推导出的 *strong axiom*，整个闭合类时曲线循环中没有图灵机$_{\mathrm{CTC}}$能够存活。相反，图灵机这一概念及其必然不同的实例，在任何时刻都是众所周知的。

因此，　　图灵机的前提条件将得到满足，因此，根据　　we
上文所述，关于图灵机$_{\mathrm{CTC}}$ 复杂度和可计算性类的推导结果是成立的。

最后一个可能时刻的弱公理 假设闭合类时曲线上的每个粒子都能沿正向和反向时间方向安全、自由地移动，直到它返回到诞生时刻之前、被摧毁并立即重新创造。因此，不仅 *strong axiom* 成立，且宇宙中任何粒子都不会有多个版本；而且从一个处于时空之外的第三人称视角来看，所有生物始终都活着。

然而，对于图灵机而言，问题仍然存在，因为图灵机一旦被销毁，其所有信息都会丢失，并且在重新创建后也无法访问。因此，图灵机获取的数据似乎已被抹去，无法在闭合类时曲线上的下一个循环中使用。

在不同图灵机之间传输数据 为了找到解决问题的办法，一个可能想到的情形是，在两台以上的图灵机之间实现 *data transferring hypothesis*。然而，在循环的每一时刻，仍然至少需要有一台图灵机存在，以承载信息。因此，这并未解决该问题，问题依然存在。

在不同时间方向之间传输数据 我们已经定义，粒子沿闭合类时曲线的正向或负向时间方向运动，取决于它们是朝向未来还是过去。假设正向运动的图灵机与负向运动的图灵机之间可以进行 *data transferring hypothesis*，也就是说，一台图灵机 M_1在时刻t_0 朝过去运动时，可以将其信息传输给另一台图灵机 M_2，后者在时刻
t_0　　*data transferring hypothesis*
朝未来运动。因此，不再需要在所有时刻都存在图灵机。然而，仍需讨论不同时间方向运动的粒子之间能否进行这种通信。例如，由于运动方向不同，两台图灵机可能只在一瞬间相互接触，之后便无法再接触对方；因此，必须能够在一瞬间传输任意数量的信息，但这似乎不可能。这种情况确实可以解决这个问题；不过，这种情形不太可能发生。

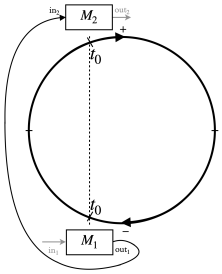


图8：在闭合类时曲线中，数据在图灵机 M_1（向过去移动）与图灵机 M_2（向未来移动）之间传输。

讨论完所有想到的情况后，如果读者发现了其他合理的情形，请告知作者。

4 结论

本文研究了闭合类时曲线的定义，以及在其中回到过去与时间旅行最初概念之间的根本差异；随后，我们考察了由 $\mathrm{TM}_{\mathrm{CTC}}$ 在（Aaronson 等人，2016年）中给出的 TM 可解决停机问题的证明。该证明引发了第 2 节讨论的物理学上的质疑，即 *weak* 和 *strong axioms*，这解释了为什么宇宙中的粒子都无法在闭合类时曲线上完整循环一周，导致 $\mathrm{TM}_{\mathrm{CTC}}$ 无法解决停机问题。

接着，我们尝试使用 *data transferring hypothesis*来解决这一问题；它基本上利用另一台 $\mathrm{TM}_{\mathrm{CTC}}$ 作为媒介，在闭合类时曲线的一个循环中存储信息。 *data transferring hypothesis* 还要求满足其他一些看似无法实现的条件，例如图灵机必须在整个时间中始终存在。

最后，在上一节中，我们尽可能回顾了含有闭合类时曲线的宇宙中所有可能的物理情形，不过或许还存在其他情形，我们也欢迎读者告知。

参考文献

Aaronson, S.（2005）。客座专栏：NP 完全问题与物理现实。ACM Sigact News，36（1），30-52。Aaronson, S., Bavarian, M., & Gueltrini, G.（2016）。闭合类时曲线的可计算性理论。arXiv 预印本 arXiv:1609.05507。Aaronson, S., & Watrous, J.（2009）。闭合类时曲线使量子计算与经典计算等价。英国皇家学会会刊 A 辑：数学、物理与工程科学，465（2102），631-647。Brennan, J. H.（1997）。时间旅行：一种新视角。Llewellyn Publications。Craig, W. L.（1988）。快子、时间旅行与神的全知。《哲学杂志》，85（3），135-150。Deutsch, D.（1991）。闭合类时线附近的量子力学。《物理评论 D》，44（10），3197–3218。爱因斯坦, A.（1905）。论运动物体的电动力学。《物理学年鉴》，17（10），891-921。爱因斯坦, A.（1916）。广义相对论的基础。《物理学年鉴》，49，769-822。Friedman, J., Morris, M. S., Novikov, I. D., Echeverria, F., Klinkhammer, G., Thorne, K. S., & Yurtsever, U.（1990）。含闭合类时曲线时空中的柯西问题。《物理评论 D》，42（6），1915。G¨ odel, K.（1949）。爱因斯坦引力场方程的一种新型宇宙学解的示例。《现代物理评论》，21（3），447–450。Hawking, S. W.（1999）。时空扭曲（公开讲座）。https://www .hawking .org .uk/in-words/lectures/space-and-time-warps：斯蒂芬·霍金遗产管理机构。Hawking, S. W., & Ellis, G. F.（1973）。时空的大尺度结构。英国剑桥：剑桥大学出版社。Jones, E. M.（1985）。“大家都在哪里？”——关于费米问题的论述。洛斯阿拉莫斯国家实验室，新墨西哥州（美国）。Lobo, F., & Crawford, P.（2003）。时间、闭合类时曲线与因果关系。载于《时间的本质：几何、物理与感知》（第289-296页）。施普林格。Nozick, R.（1969）。纽科姆问题与两项选择原则。载于 N. Rescher（编），《卡尔·G·亨佩尔纪念文集：纪念其六十五岁生日》（第24卷，第114–146页）。多德雷赫特：施普林格荷兰。Smith, N. J.（2021）。时间旅行。载于 E. N. Zalta（编），《斯坦福哲学百科全书》（2021年秋季版）。形而上学研究实验室，斯坦福大学。https://plato.stanford.edu/archives/fall2021/entries/time-travel/。van Stockum, W. J.（1938）。IX.—绕对称轴旋转的粒子分布的引力场。《爱丁堡皇家学会会刊》，57，135-154。Wolpert, D. H., & Benford, G.（2013）。纽科姆悖论的启示。《综合》，190（9），1637–1646。