中国物理学评论
Chinese Physics Review
2026 年第 04 卷第 02 期
Vol. 04, No. 02, 2026

教　学　　http://www.scifootprint.com/CPR/index.html

极端时间膨胀比率的相对论实现机制——从“天上一天，地上一年”谈起

郭家宝

（英国布里斯托大学物理学院，英国 BS8 1TL）

摘要：中国古语“天上一天，地上一年”常被用来描绘悬殊的时间流逝差异。若将这一表述转化为现代物理语言，便得到一个关于极端时间膨胀比率的定量问题：在什么条件下，一个观察者经历 1 天而另一参考系已经过去 365 天。本文在综述狭义相对论与广义相对论时间膨胀理论的基础上，系统讨论实现 365:1 时间比率的三类机制，即高速运动引起的运动学时间膨胀、强引力场中的引力时间膨胀，以及两者共同作用的混合机制。结合教材、经典文献和典型实验结果，文中对双生子问题、近视界时钟迟滞、全球定位系统时钟修正等相关物理图景作了简要梳理。进一步地，构造一个由四段恒定固有加速度组成的闭合世界线模型，在总固有时取 1 天、地面坐标时取 365 天的约束下，给出一组可解析的代表性数值方案。结果表明，如此巨大的时间比率在理论上并不矛盾，但其实现必然对应近光速运动、近视界驻留，或二者兼具的极端条件。该问题既有助于把握固有时、世界线和引力红移等核心概念，也为相对论教学和科普传播提供了一个直观而富有张力的案例。

关键词：时间膨胀；相对论；固有时；世界线；施瓦西度规

DOI：10.48014/cpr.20260508003

引用格式：郭家宝．极端时间膨胀比率的相对论实现机制——从“天上一天，地上一年”谈起[J]．中国物理学评论，2026，4(2)：14-22.

1　引言

时间膨胀是相对论最具代表性的结论之一。经典力学把时间视为各处同流、与观察者无关的绝对背景，而相对论则指出，不同观察者对同一对事件之间时间间隔的测量会依赖于其运动状态和所处引力环境。真正具有几何不变性的量不是某个参考系中的坐标时间，而是沿具体世界线累积得到的固有时。由此，时间不再只是记录过程的外在参数，而成为时空结构本身的一部分。

围绕时间膨胀所形成的理论与实验图景，已经构成现代时空物理的重要基础。狭义相对论中的双生子问题、宇宙线 μ 介子寿命延长、飞机与地面原子钟比较实验，以及全球定位系统中的频率校正，都从不同侧面说明：时间膨胀既是严格可计算的理论结果，也是可以在实验与工程中直接验证的客观效应。广义相对论进一步把这一图景扩展到曲时空，使得强引力场中的时钟迟滞、引力红移和近视界时间效应成为研究黑洞与宇宙极端环境的重要窗口。

在科学传播中，极端例子往往比抽象定义更能揭示理论结构。中国古语“天上一天，地上一年”虽然源于文化叙事，但其核心内容恰好可以抽象为一个明确的时间比率条件：设某观察者沿自身世界线经历 1 天，而地面参考系对应的时间为 365 天，问相对论允许哪些物理机制实现这种差异。这样处理

通讯作者　**Corresponding author**：郭家宝，3171779747@qq.com

收稿日期：2026-05-08；　**录用日期**：2026-05-28；　**发表日期**：2026-06-28

的意义,不在于把神话叙事本身当作物理对象,而在于借助一个高度凝练的边界条件,把时间膨胀、世界线、洛伦兹因子与引力势差等概念联结在同一个问题框架中。

关于这类极端时间比率问题,国外文献中已经形成几条较成熟的分析线索,包括双生子佯谬的严格世界线处理、恒定固有加速度运动的解析方法、相对论火箭模型以及黑洞近视界区域的时间延缓讨论;国内相关介绍则更多见于相对论教材、专题综述和面向教学的讨论文章。本文在吸收这些已有思路的基础上,首先综述时间膨胀的理论背景及其典型实现情形,随后把 365:1 的时间比率重述为一个相对论边界条件,再进一步给出一个四段恒定固有加速度的闭合世界线模型和一组具体数值方案,以期在综述性叙述与可计算实例之间取得平衡。

2 时间膨胀的理论背景与实验基础

2.1 狭义相对论中的固有时与洛伦兹因子

在平直时空中,若采用惯性系坐标(t,x,y,z),类时间世界线上的线元满足 $ds^2=c^2dt^2-dx^2-dy^2-dz^2$。对于沿该世界线运动的理想时钟,其记录的固有时 $d\tau$ 由 $ds=cd\tau$ 给出,因此

$d\tau=dt\cdot\sqrt{(1-v^2/c^2)}$,$\gamma=1/\sqrt{(1-\beta^2)}$,$\beta=v/c$.

若某观察者相对实验室以速度 v 匀速运动,则实验室系测得的坐标时 t 与该观察者测得的固有时 τ 之间满足 $\tau=t/\gamma$。由此可见,时间膨胀本质上并不是“钟坏了”,而是不同世界线之间几何长度的差异。对相对论教学而言,真正关键的不是把公式背下来,而是理解:同一对事件之间,哪一个时间间隔是沿哪一条世界线测得的。当时间比率达到 365∶1 时,上式要求 $\gamma=365$。由于 γ 随 β 接近 1 而迅速发散,这一比率必然对应极接近光速的运动状态。图 1 给出了 γ 随 β 变化的关系,并标出了 $\gamma=365$ 对应的位置。可以看到,在绝大多数低速区间里,时间膨胀都相当温和;只有当 β 非常逼近 1 时,时间比率才会急剧放大。这也是为什么相对论效应在日常生活中难以察觉,却在高能物理和天体物理中变得不可忽略。

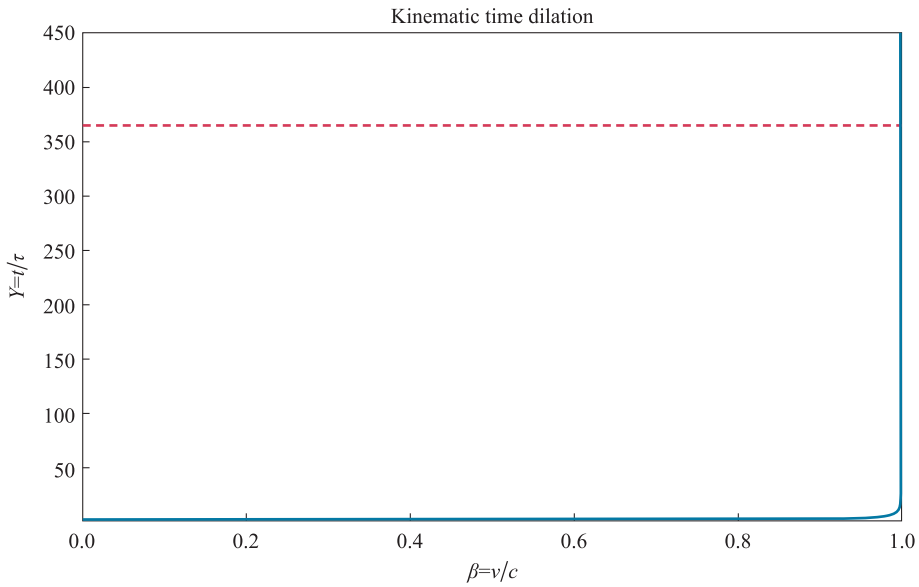

图 1 纯运动学机制下的时间膨胀因子 $\gamma=t/\tau$ 随 $\beta=v/c$ 的变化(虚线给出了 $\gamma=365$ 以及对应的 β 值;可以看到,365∶1 的时间比率要求速度极度接近光速)

Fig. 1 Variation of the time-dilation factor $\gamma=t/\tau$ with $\beta=v/c$ under the purely kinematic mechanism. The dashed line indicates $\gamma=365$ and the corresponding β value; it can be seen that the 365∶1 time ratio requires a velocity extremely close to the speed of light.

2.2 广义相对论中的引力时间膨胀

狭义相对论讨论的是平直时空中的运动学效应，而广义相对论进一步指出，引力并不是普通意义上的力，而是时空曲率的表现。在弱场极限下，不同引力势位置上的时钟频率存在系统差异：位于更深势阱中的时钟走得更慢。对静态、球对称引力源，施瓦西度规给出

$$d\tau = dt \cdot \sqrt{(1 - r_s/r)}, r_s = 2GM/c2.$$

这里 r_s 是史瓦西半径。若观察者静止在半径 r 处，那么他记录的固有时相对于远处坐标时按上式缩短。与狭义相对论不同，引力时间膨胀并不要求运动速度接近光速，而是要求所处区域足够接近强引力源。图 2 画出了 $d\tau / dt$ 随 r / r_s 的变化。可以看到，要想得到极小的 $d\tau / dt$，观察者必须逼近事件视界。换言之，若要仅用引力机制实现“1 天对应 365 天”，系统所需的引力环境会极其苛刻。

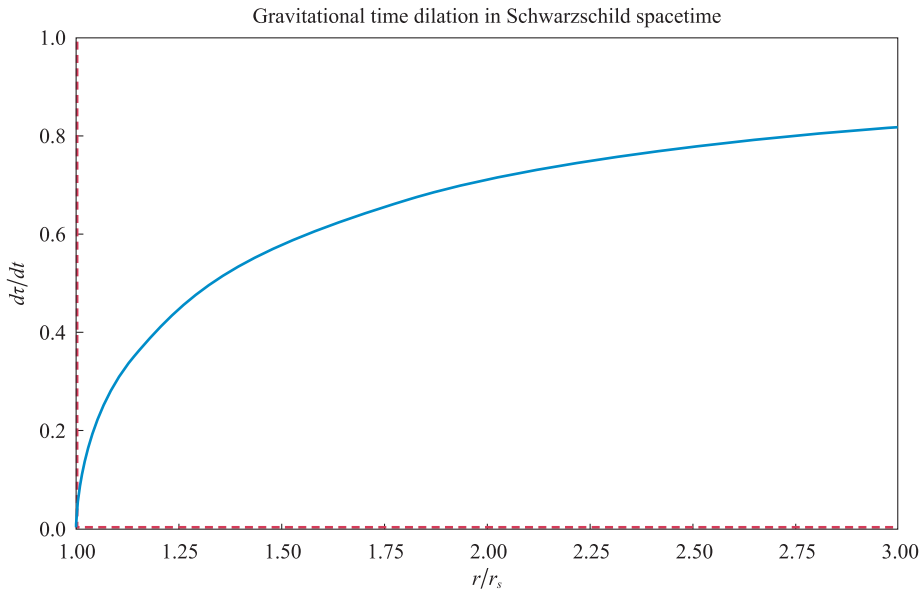

图 2 施瓦西时空中静止观察者的引力时间膨胀因子 $d\tau/dt$ 随 r/r_s 的变化

（要实现 $d\tau/dt = 1/365$，观察者必须停留在极接近事件视界的位置）

Fig. 2 Variation of the gravitational time-dilation factor $d\tau/dt$ with r/r_s for a stationary observer in Schwarzschild spacetime. Achieving $d\tau/dt = 1/365$ requires the observer to remain extremely close to the event horizon.

这一点也解释了为何地球表面的引力时间膨胀虽然真实存在，却远不足以支持如此巨大的时间比。地面与高空钟之间的频率差在工程上已经重要到必须修正，但从量级上看，它距离 365∶1 这样的极端比率仍相去甚远。因此，地球环境更适合作为时间膨胀的精密验证平台，而不是实现超大时间比的自然场所。

2.3 从实验验证到极端场景

时间膨胀并不是只存在于理论推演中的抽象结构。高能宇宙线中 μ 介子的寿命延长，是狭义相对论最著名的自然实验之一；飞机与地面原子钟比较实验，则直接展示了运动学时间膨胀与引力时间膨胀的共同存在。全球定位系统的时钟校正更是把相对论从“可验证”推进到“必须采用”的工程现实。在这些案例中，时间膨胀既表现为精密测量结果，也体现为理论框架对观测事实的统一解释。

从国内外研究脉络看，国外关于双生子问题、恒定固有加速度世界线、相对论火箭以及黑洞近视界时间延缓的讨论较为系统，相关分析贯穿于基础教材、经典专著和专题论文之中；国内则更多通过教材章节、相对论导论、黑洞物理综述和面向教学的算例分析来介绍这些主题。两类文献在侧重点上有所不同：前者更强调时空几何与解析方法，后者更强调概念澄清与教学可接受性。本文所处理的 365∶1 极端时间比率问题，正可视为连接这两种

叙述传统的一个具体案例。

3 极端时间比率的实现机制:问题重述与物理图景

把“天上一天,地上一年”翻译成相对论语言,可以写成一个非常明确的约束:设地面参考系经历的坐标时为 T,某观察者沿自身世界线记录的固有时为 τ,要求 $T/\tau=365$。这个写法的意义在于,它把原本带有修辞色彩的叙述转化为世界线几何问题。不同实现机制虽然形式不同,但本质上都在回答同一个问题:怎样的运动状态或引力环境,能够使固有时相对于参考系时间显著缩短。

第一类方案是纯运动学方案。若把观察者近似为在某一阶段相对地面匀速运动,则 $T/\tau=\gamma$,因而

$$\gamma=365,\beta=\sqrt{(1-1/3652)}\approx 0.9999962469.$$

这说明若仅靠高速运动实现目标比率,观察者的速度必须达到 0.9999962469c 左右,与光速只差约 1.1×10^3 m/s。这样的结果在定性上并不意外:γ 的巨大增长只会出现在 β 极端接近 1 的区域。

第二类方案是纯引力方案。若地面近似位于远处,而观察者静止在施瓦西半径之外,则要求

$$\sqrt{(1-r_s/r)}=1/365,r/r_s=1/(1-1/3652)\approx 1.0000075.$$

这表明观察者必须停留在极靠近视界的位置,离 r_s 只有百万分之几的相对偏离。这个条件在理论上可以写出,在现实中却会受到轨道稳定性、潮汐力、辐射环境和推进控制等多重限制。

第三类方案是混合方案。若在弱场、低速近似下把运动学因子与引力因子相乘,则可写成

$$\tau/T\approx\sqrt{(1-\beta2)}\cdot\sqrt{(1-r_s/r)}.$$

此时达到 $\tau/T=1/365$ 不再要求某一单一机制承担全部代价,而是允许高速运动和深引力势共同分担。图 3 给出了在(β,r/r_s)参数平面上满足 $\tau/T=1/365$ 的等值线。它清楚展示了一个普遍规律:当速度不足够高时,需要更靠近视界;当引力势不足够深时,则必须通过更接近光速来补偿。这种参数互补关系,是理解极端时间比率的最直观方式之一。

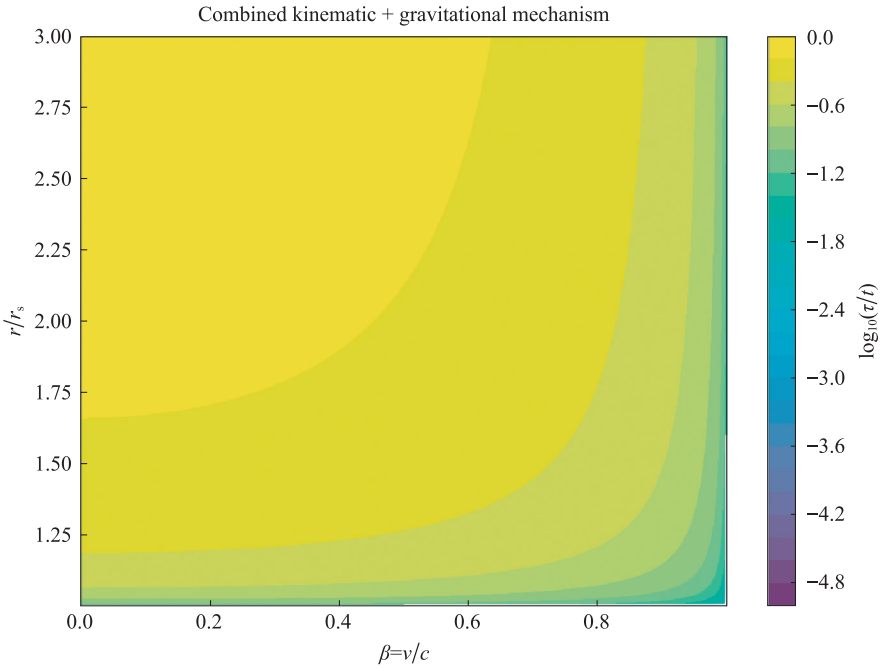

图 3 运动学效应与引力效应共同作用时的参数平面

(白色等值线对应 $\tau/T=1/365$,显示出近光速与近视界之间的互补关系)

Fig. 3 Parameter plane for combined kinematic and gravitational effects. The white contour corresponds to $\tau/T=1/365$ and illustrates the complementarity between near-light-speed motion and near-horizon residence.

综上，现有相对论理论并不排斥 365∶1 的时间比率；真正困难的是实现这种比率所对应的极端物理条件。也正因为如此，这一问题非常适合作为相对论教学中的“极限案例”：它既足够夸张，能够迅速呈现参数发散、非线性增长和强场极限等特征；又足够标准，几乎所有关键物理量都能用教材中的基本公式清楚地写出并进行数量级比较。

4 闭合世界线模型与一组具体数值方案

前述三类机制说明了 365∶1 可以怎样实现，但若要更接近“出发—远行—返回”的物理叙述，仅有匀速阶段还不够，因为真正闭合的过程必须包含转向和减速。因此，这里引入一个由四段恒定固有加速度组成的闭合世界线模型，并把它视为本文在综述基础上的一个具体化算例。该模型并不试图模拟真实航天工程，而是旨在用最少的参数展示闭合世界线、固有时积分与总时间比之间的关系。

设观察者从地面出发，在一维上经历四段对称运动：第一段以固有加速度 $+a$ 加速，第二段以 $-a$ 减速至最远点静止，第三段以 $-a$ 向回程方向加速，第四段以 $+a$ 减速并最终回到原点。若每一段的固有时都取 τ_a，则总固有时为 $4\tau_a$。引入快速度 η (rapidity)，使 $\beta=\tanh\eta$，$\gamma=\cosh\eta$，则恒定固有加速度满足 $d\eta/d\tau=a/c$，于是单段末端的快速度可写成 $\alpha=a\tau_a/c$。该模型下的固有时积分与坐标时间积分都可以显式完成。

$$\tau_{total}=4\tau_a,\ T_{total}=4(c/a)\sinh\alpha,\ \alpha=a\tau_a/c.$$

因此，总时间比可以写成

$$T_{totalt}/\tau_{total}=\sinh\alpha/\alpha.$$

要求 $T_{totat}/\tau_{total}=365$，即需求解 $\sinh\alpha/\alpha=365$。数值求解给出 $\alpha\approx 8.76366$。若进一步规定总固有时为 1 天，即 $\tau_{total}=86400\text{s}$，则每一段固有时 $\tau_a=21600\text{s}$。代入上式可得所需固有加速度

$$a=\alpha c/\tau_a\approx 1.216\times 10^5\,\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$$
$$\approx 1.24\times 10^4\,\text{g}.$$

模型对应的峰值速度出现在第一段末端和第三段中部，其大小为

$$\beta_{\max}=\tanh\alpha\approx 0.999999951,$$
$$\gamma_{\max}=\cosh\alpha\approx 3.20\times 10^3.$$

这里应特别指出，$\gamma_{\max}$ 远大于 365 并不矛盾。365 是整个闭合过程的总时间比，而不是某一时刻的瞬时洛伦兹因子。由于运动中包含从低速到超高 γ 的连续加速与减速阶段，平均效应与峰值效应本来就不应相等。这一点恰恰是闭合世界线模型相对于单纯匀速近似的优势：它提醒读者，时间膨胀并不是单个公式代入后的静态结论，而是整条世界线的积分结果。

对应的地面总历时为 365 天，最远点距离约为 0.50 光年，说明即使只讨论理论模型，这个旅程的尺度也已经进入星际级别。表 1 总结了这一组具体数值方案的核心参数；图 4 给出了四段加速的闭合世界线示意，图 5 则展示了在固定 $T/\tau=365$ 条件下，若改变单段固有时，所需固有加速度如何变化。图 5 显示，延长单段固有时虽然可以降低所需加速度，但代价是旅程在固有时上变得更长，因此若总固有时被固定为 1 天，系统仍然必须承受极高的加速度水平。

表 1　四段恒定固有加速度闭合世界线方案的代表性参数

Table 1　Representative parameters of the four-segment constant proper acceleration closed worldline model

参数	数值
总固有时 τ_{total}	1d=86400s
地面坐标时 T_{totat}	365d=3.1536×10^7 s
无量纲参数 α	8.76366
单段固有时 τ_a	21600s=6h
固有加速度 a	$1.216\times 10^5\,\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$
峰值速度 β_{max}	0.999999951
峰值洛伦兹因子 γ_{max}	3.20×10^3
最远点距离	约 0.50 光年

5 观测效应、物理含义与教学价值

如此巨大的时间比率不会仅体现在时钟读数上，还会伴随一系列明显的观测后果。若观察者在远离或接近地面时发射电磁信号，相对论多普勒效应会使接收频率出现强烈红移或蓝移；若再叠加强引力场环境，通信链路的频率标定将变得更为复杂。对于接近光速的纯运动学方案，这种频移几乎会把可见光通信推离原有频段；而对于近视界方

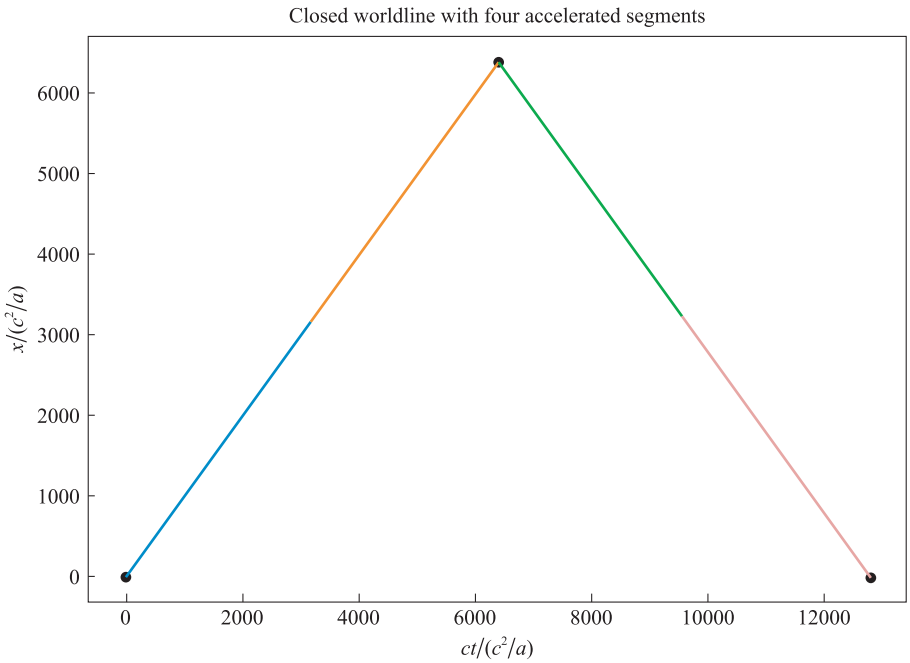

图 4　四段恒定固有加速度构成的闭合世界线示意

(观察者从原点出发,经加速、减速、反向加速和回程减速四个阶段重新回到原点)

Fig. 4　Schematic diagram of a closed worldline composed of four segments of constant proper acceleration. The observer starts from the origin and returns to it after four stages: acceleration, deceleration, reverse acceleration, and final deceleration.

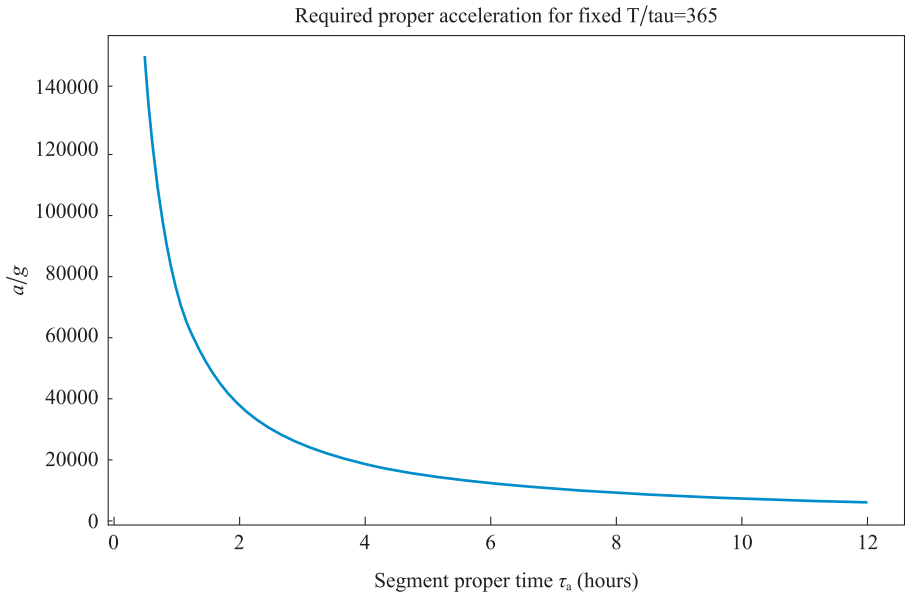

图 5　在固定总时间比 $T/\tau=365$ 的条件下,所需固有加速度随单段固有时 τ_a 的变化

(若希望在更短的单段时间内完成同样的时间比,所需加速度将迅速增大)

Fig. 5　Variation of the required proper acceleration with the segment proper time τ_a under a fixed total time ratio $T/\tau=365$. If the same time ratio is to be achieved within a shorter segment duration, the required acceleration will increase rapidly.

案,频率变化还会与引力红移耦合,从而给远距离同步与信息回传带来额外困难。

其次,闭合世界线模型强调了同时性并非绝对概念。对分离事件而言,不同参考系对“同一时刻”的切片方式不同,因此“天上一天,地上一年”只有在明确规定起止事件和比较规则后才有确定含义。

本文选择的是地面系坐标时与旅行者沿自身世界线累积的固有时之间的比较，这一定义之所以重要，是因为它对应于相对论中最基本、也最不易误解的时间比较方式。

从教学角度看，这一问题至少具有三层价值。第一，它提供了一个极易激发兴趣的入口，能把相对论从抽象概念迅速转化为具体数字与图像。第二，它迫使读者区分匀速模型、引力模型和闭合世界线模型，从而理解相同“时间变慢”表述背后可能对应完全不同的物理语境。第三，它把固有时、快速度、引力红移和世界线积分等概念集中到一个可计算案例中，有助于研究生和初学者建立较完整的概念框架。

更广泛地说，类似案例的意义并不在于它是否具有现实工程可实现性，而在于它能否帮助人们把物理理论内部的逻辑结构看得更清楚。在这个意义上，365∶1 并不是一个神秘数字，而是一个经过恰当抽象之后、兼具思想张力与计算可操作性的相对论阈值。

6 总结

本文围绕“天上一天，地上一年”这一极端时间比率，系统讨论了其在相对论中的物理实现机制。文章首先回顾了狭义相对论与广义相对论中的时间膨胀概念，以及相关实验与典型极端场景；随后把 365∶1 的时间比率重述为 $T/\tau=365\mathrm{T}/$的边界条件，分别分析纯运动学、纯引力与混合方案的理论要求；最后构造了一个四段恒定固有加速度闭合世界线模型，给出了一组具有代表性的解析数值结果。

分析表明，若完全依赖运动学机制，则观察者速度必须极端接近光速；若完全依赖引力机制，则观察者必须处于极接近史瓦西半径的位置；若采用混合机制，则两种代价可以在一定程度上互相分担。对闭合世界线方案而言，总时间比是整条世界线的积分效应，而不是某一瞬时洛伦兹因子的简单替代，这一点对于理解双生子问题及其推广形式尤为关键。

因此，把文化叙述转化为可计算的物理问题，并不会削弱其思想张力，反而能展示相对论作为现代时空理论的解释力：在它的语言中，“一天与一年”的差异不再是修辞性说法，而是由世界线、速度、引力势和因果结构共同决定的结果。

致谢：感谢经典教材、相关综述和前人关于相对论时间膨胀问题的讨论，为本文的重写与整理提供了启发。

利益冲突：作者声明无利益冲突。

参考文献(References)

[1] Einstein A. Zur Elektrodynamik bewegter Körper[J]. Annalen der Physik，1905，17：891-921.

[2] Einstein A. Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie [J]. Annalen der Physik，1916，49：769-822. https://doi.org/10.1002/andp.19163540702

[3] Taylor E F，Wheeler J A. Spacetime Physics[M]. 2nd ed. New York：W. H. Freeman，1992.

[4] Rindler W. Introduction to Special Relativity[M]. 2nd ed. Oxford：Oxford University Press，1991.

[5] Misner C W，Thorne K S，Wheeler J A. Gravitation[M]. San Francisco：W. H. Freeman，1973.

[6] Carroll S M. Spacetime and Geometry：An Introduction to General Relativity[M]. San Francisco：Addison Wesley，2004.

[7] Hartle J B. Gravity：An Introduction to Einstein's General Relativity[M]. San Francisco：Addison Wesley，2003.

[8] Hafele J C，Keating R E. Around-the-world atomic clocks：observed relativistic time gains[J]. Science，1972，177：166-168. https://doi.org/10.1126/science.177.4044.168

[9] Hafele J C，Keating R E. Around-the-world atomic clocks：predicted relativistic time gains [J]. Science，1972，177：168-170. https://doi.org/10.1126/science.177.4044.166

[10] Ashby N. Relativity in the Global Positioning System [J]. Living Reviews in Relativity，2003，6：1-42. https://doi.org/10.12942/lrr-2003-1

[11] Bailey J，Borer K，Combley F，et al. Measurements of relativistic time dilation for positive and negative muons in a circular orbit[J]. Nature，1977，268：301-305.

[12] Thorne K S. Black Holes and Time Warps：Einstein's Outrageous Legacy[M]. New York：W. W. Norton，1994.

[13] Møller C. The Theory of Relativity[M]. 2nd ed. Oxford:Clarendon Press,1972.

[14] Grøn Ø. The twin paradox in the theory of relativity [J]. European Journal of Physics,1975,10:1-7. https://doi.org/10.1088/0143-0807/27/4/019

[15] Rindler W. Hyperbolic motion in curved spacetime[J]. Physical Review,1960,119:2082-2089.

Relativistic Mechanisms for Achieving an Extreme Time-Dilation Ratio: Starting from the Saying "One Day in Heaven, One Year on Earth"

GUO Jiabao

(School of Physics, University of Bristol, BS8 1TL, UK)

Abstract: The ancient Chinese saying "one day in heaven, one year on earth" is often used to describe a vast disparity in the passage of time. Translating this expression into the language of modern physics yields a quantitative problem concerning the extreme time-dilation ratio: under what conditions does one observer experience one day while another reference frame experiences 365 days? Based on a review of time dilation theories in both special and general relativity, this article systematically discusses three mechanisms for achieving a 365:1 time ratio: kinematic time dilation due to high-speed motion, gravitational time dilation in a strong gravitational field, and a hybrid mechanism combining both effects. Drawing on textbooks, classic literature, and typical experimental results, this article briefly reviews related physical scenarios such as the twin paradox, clock retardation near the horizon, and GPS clock corrections. Furthermore, a closed world-line model consisting four segments of constant proper acceleration is constructed. Under the constraints of a total proper time of one day and a ground coordinate time of 365 days, a set of analytically representative numerical solutions is provided. The results show that such a huge time ratio is not theoretically contradictory, but its realization inevitably corresponds to extreme conditions: near-light-speed motion, near-horizon residence, or a combination of both. This problem not only helps in grasping core concepts such as proper time, worldlines, and gravitational redshift, but also provides an intuitive and compelling case for relativity teaching and science popularization.

Keywords: Time dilation; relativity; proper time; worldline; schwarzschild spacetime

DOI: 10.48014/cpr.20260508003

Citation: GUO Jiabao. Relativistic Mechanisms for Achieving an Extreme Time-Dilation Ratio: Starting from the Saying "One Day in Heaven, One Year on Earth" [J]. Chinese Physics Review, 2026, 4(2): 14-22.

Copyright © 2026 by author(s) and Science Footprint Press Co., Limited. This article is open accessed under the CC-BY License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).