

现代科学理论丛书



山西科学技术出版社

# 相对论与时空

郑庆璋 崔世治 编著



策 划 焦团平  
谢一兵  
责任编辑 段立新  
封面设计 王春声

·现代科学理论丛书·

## 相对论与时空

郑庆璋 崔世治 编著

\*

山西科学技术出版社出版 (太原并州北路 69 号)

山西省新华书店发行 山西人民印刷厂印刷

\*

开本:850×1168 1/32 印张:9.75 字数:234 千字

1998 年 8 月第 1 版 2000 年 1 月山西第 3 次印刷

印数:2 501—4 000 册

\*

ISBN 7-5377-1530-0

0·62 定价:12.80 元

## 前 言

如果

你想忘记

忧闷和懒惰

自己就要知道

地球上在做些什么

天空中发生些什么

.....

前苏联诗人马雅可夫斯基在影响了几代人的著名的科普期刊《知识就是力量》的创刊号中写下了以上几句诗。是的，作为一个有教养的现代人，我们实在应该知道发生在地球上和天空中许许多多的事情，尤其是与我们生活息息相关的时间和空间。时间和空间历来是哲学家和自然科学家，特别是物理学家所关心和研究的对象。从自然科学的角度来说，当今在揭露时间和空间本质和特征以及它们与物质运动及物质分布关系方面最为深刻的是近代物理学中的“相对论”（包括“狭义相对论”和“广义相对论”）。

本书正是通过介绍狭义和广义相对论的历史背景和科学内容，从中逐步揭示时间和空间（时空）不可分离的性质，揭示时空与物质运动及物质分布的相互影响，希望对于读者建立正确的近代时空观有所帮助。

阐述相对论的书籍已经汗牛充栋。除了标准的大学教材之外，科普读物也确实不少。这些科普读物中不乏优秀之作，它们以生动流畅的笔调，向读者述说相对论中种种引人入胜的事物，诸如时钟

变慢、量杆收缩以及时空“弯曲”等等。几十年来,正是这些著作使得相对论及其时空观得到了广泛的传播,可谓功不可没。不过,就大多数这类读物而言,对相对论的介绍往往主要是描述性的。读者在兴致盎然地读完以后可以大概地知道相对论及其时空观念“是什么”。但我们相信也存在人数不少的这样一个读者群:他们不满足于对相对论及其时空观的一知半解(或者在接触过某些科普读物之后仍存有不少疑问或误解),希望有一个尽管是初步的、然而却是较为准确和完整的认识。就是说,想知道或解答更多的“为什么”。但另一方面,他们又很可能没有系统地学习过理论物理学,也不习惯于标准的大学教材中比较枯燥和数学化的叙述方式。我们现在奉献的这本书,也许会满足他们的需要。

我们力图透彻地阐明相对论(“狭义”的和“广义”的)及其时空观,并且详细地介绍相对论的创立和时空观变革的历史。我们希望这样会有助于澄清关于相对论的一些模糊认识,破除神秘感。在叙述上,则力求用浅近的语言、具体的例子和简化的论证去说明问题,避免让冗长的数学推导和繁琐的实验细节掩盖了明晰的物理思想;与此同时,也注意尽量不失科学性,求得活泼与严谨的平衡。为了突出主要内容并兼顾不同的要求,在正文当中穿插有相当数量的“选读材料”(它们用不同的字体排印,并且在起始和结束处用“◆”表示),内容是对某些问题的进一步阐述,或者是一些实验或数学推导的细节等等。它们是正文的重要而有趣的补充,可以同正文结合起来读;如果略去不读或暂时略去其中某些不读,也无损于对本书论题的正确而完整的了解。

当然,为了比单纯描述性的方式更深入和准确地介绍相对论及其时空观,少不了要用一些逻辑推理。如果读者在阅读有关段落时有一定的耐心的话,我们相信这些推理不但不会难于理解,而且还会是饶有趣味的。本书也不刻意回避数学公式和定量计算,不过所用的数学工具多数是初等数学中的知识,顶多是最简单的微积

分知识。

作者从事相对论教学与研究多年,深感相对论不愧是人类文明中一颗璀璨的明珠,我们希望通过这本书,为它的普及做一点微薄的工作。限于水平,不当之处在所难免,敬希同行及读者们批评指正。

郑庆璋 崔世治  
于中山大学



|                                      |       |
|--------------------------------------|-------|
| <b>第三章 统一的时空和物理定律的协变性</b> .....      | (116) |
| 第一节 平直时空动力学初步.....                   | (117) |
| 第二节 质能关系及其意义.....                    | (127) |
| 第三节 时间和空间的统一, 闵可夫斯基空间 .....          | (140) |
| 第四节 具有协变性质的量——张量浅说.....              | (149) |
| 第五节 四维时空的洛伦兹变换, 时空协变量与<br>四维矢量.....  | (153) |
| 第六节 四维动量和动力学定律.....                  | (156) |
| 第七节 电磁定律的协变性.....                    | (160) |
| <br><b>第四章 广义相对论的时空观</b> .....       | (171) |
| 第一节 万有引力和惯性.....                     | (171) |
| 第二节 惯性质量和引力质量.....                   | (176) |
| 第三节 等效原理.....                        | (180) |
| 第四节 引力起潮作用和局部惯性系.....                | (188) |
| 第五节 曲面上的几何学.....                     | (193) |
| 第六节 广义相对论的引力观和时空观.....               | (201) |
| 第七节 曲线坐标和度规.....                     | (207) |
| 第八节 时空坐标和时空度规.....                   | (213) |
| 第九节 时空告诉物质如何运动.....                  | (218) |
| 第十节 物质告诉时空如何弯曲.....                  | (223) |
| <br><b>第五章 广义相对论的理论预言和实际观测</b> ..... | (229) |
| 第一节 球对称时空.....                       | (229) |
| 第二节 弯曲时空理论——广义相对论的实验检验.....          | (236) |
| 第三节 黑洞——高度弯曲的时空.....                 | (246) |
| 第四节 弯曲时空的涟漪——引力波和引力波的                |       |

---

|                       |              |
|-----------------------|--------------|
| 探测.....               | (257)        |
| <b>第六章 宇宙纵横谈.....</b> | <b>(275)</b> |
| 第一节 宇宙学原理.....        | (276)        |
| 第二节 宇宙是有限的还是无限的.....  | (280)        |
| 第三节 宇宙的演化.....        | (294)        |

# 引 子

## 一、时间和时间的计量

### 时间的本质

斗转星移，日月盈仄，寒来暑往，潮涨潮落。自然界总是在永无停息地运动变化着的，一件事接一件事，一个过程跟着另一个过程，绵延不断。从原始人的“日出而作，日入而息”，到现代人生活的“不夜天”轮转；从最基本、最初级的机械运动，即物体间的相互位置变动，直至人类大脑的最高级的思维活动，都无不反映出物质运动变化的序列和持续的性质，这也就是时间的本质。

### 时间的计量

为了反映物质运动变化的次序，可以引入“时刻”的概念，并约定事件的“先”、“后”序列与定义的“时刻数值”成单向一一对应的关系。例如规定“先”发生的某一事件的时刻为“1点钟”，随“后”发生的另一事件的时刻为“2点钟”，再随后发生的事件的时刻为“3点钟”，如此等等。

显然，发生在时刻“3点钟”的事件是在时刻“1点钟”的事件之“后”发生的。接着出现一个物质运动持续性的量度问题，即某过程发生和结束的两个时刻的间隔（即通常所谓的“时间”）的大小以及多个过程时刻间隔的比较问题。为了量度和比较两个过程持续的长短，可以引入时标进行计量。时标为时间的某一种计量单位和计量方法。常用的时标单位为“秒（s）”，计量方法是线性叠加。

## ◆ 选读

## “秒”的现代定义

秒的原始定义为： $1s = 1/86\,400$  平均太阳日。通常说一个地方的太阳日就是太阳连续两次经过该处子午面的时间间隔。由于地球公转的轨道是一椭圆，公转的速率常在变化，所以一年之中太阳日有长有短，平均太阳日就是全年太阳日的平均值。

在太阳系中，能准确观测并足以用作时钟的有：地球的自转和公转，月球绕地球的公转，木星和金星绕太阳的公转，木星的四个卫星绕木星的公转等。根据上述 9 种运动所作的时钟中，有 8 种是相互一致的，不一致的只是根据地球自转所作的时钟，并且发现地球自转的速度有变化趋势，每 100 年 1 天增加  $0.001s$ ；在 20 个世纪中，时间的计量误差多达几个小时，这就说明了为什么历史上记载的历次日食发生差异这一事实。现在我们知道地球自转长期变化的原因是潮汐摩擦。而季节性有规律的变化，则可用信风来说明，其它变化的原因还不能确定，可能与两极冰山的融化或地球上其它很大质量的物质迁移有关。这一切都表明，地球的自转不是一个理想的时钟。

由于人们对微观世界认识的深入发展，以及对微波技术的进一步掌握，这就有可能利用某些分子或原子的固有振动频率作为时间的计量基准。事实上，近年来已制成了大量的氨分子钟和铯原子钟，它们的精度分别达到  $10^{-9}$  和  $10^{-10}$  以上，这比基于地球自转的时钟准确几十倍或几百倍以上。因此，1967 年第十三届国际计量大会决定采用铯原子钟作为新的时间计量基准，定义  $1s$  的长度等于与铯 133 原子基态两个超精细能级之间跃迁相对应的辐射周期的  $9\,192\,631\,700$  倍。这个跃迁频率测量的准确率为  $10^{-12}$  至  $10^{-13}$ 。

## ◆ 时间与时标

应该指出是，时间与时间的计量是两个不同的概念。时间反映的是物质运动的持续性，是物质存在的基本属性之一。它是完

全客观的，不因采用不同的时标（时间单位和计量方法）而改变。然而，时间的计量却是与采用何种时标密切相关的。凡是物理规律已确切知道的物理过程都可以用作计时的时标。如太阳系中行星的自转或公转、行星中卫星的公转以及钟摆、晶体振动直至分子和原子能态跃迁辐射等周期准确、重复性好的周期运动都可以选作计时的基准，并采用周期（或其倍数）线性叠加的方法计时。这就是我们目前通用的时标。当然，已知规律的放射性同位素的半衰期也可用来计时，但都是折合为若干个振动周期并采用线性叠加的方法计时的，因此实质上是属于同一类时标。然而以后将会看到，广义相对论指出，处于引力场中不同的地方观测时可以有各自不同的时标，有时它们之间的差别甚至是非常“奇异”的。不过这是后话，留待以后讨论吧。

### ◆ 选读

### 芝诺时标

古希腊哲学家芝诺(Zenon)曾提出过许多佯谬。其中著名的一个命题是“飞毛腿阿喀琉斯(Achilleus, 又译为‘阿基里斯’)永远也追不上爬行缓慢的乌龟”。芝诺的论证是这样的：假定开始时阿喀琉斯离开乌龟的距离为  $OA=L$  (图 0.1)，他的速度为  $v_1$ ，乌龟的速度为  $v_2$ ，且  $v_1 > v_2$ 。当阿喀琉斯第一次跑到乌龟最初的位置  $A$  时，乌龟在此期间爬到了另一位置  $B$ ，显然  $AB = v_2(L/v_1) =$

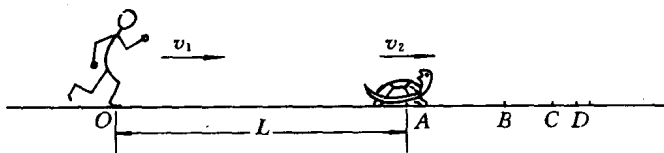


图 0.1 阿喀琉斯追赶乌龟

$L(v_2/v_1)$ ；当阿喀琉斯第二次追到  $B$  时，乌龟爬到第三个位置  $C$ ，且  $BC = v_2(AB/v_1) = L(v_2/v_1)^2$ ；阿喀琉斯第三次追到  $C$  时，乌龟又爬到第四个位置  $D$ ，且  $CD = v_2(BC/v_1) = L(v_2/v_1)^3 \dots$  如此等

等,尽管它们之间的距离会愈来愈近,但始终仍有一段距离。于是芝诺得到“结论”:既然阿喀琉斯每次跑到乌龟的上一个位置时,不管乌龟爬得多慢,但还是前进了一点点,因而阿喀琉斯也就永远追不上乌龟。

从我们的日常经验知道,芝诺的结论是不对的。因为事实上只须经过  $t=L/(v_1-v_2)$ , 阿喀琉斯就可以追上乌龟了。可是,芝诺的上述“结论”似乎也有些道理,究竟芝诺佯谬的实质是什么呢?下面我们从近代的时标概念做些分析。

芝诺所使用的时标是有点奇怪的。他把阿喀琉斯每次追到上一次乌龟所达到的位置作为一个“周期”,用来作时间的计量单位,我们把由此计量出来的时间叫做芝诺时间,即阿喀琉斯在第  $n$  次到达乌龟的第  $n$  个起点时,芝诺时间为  $t'=n$ ,在此期间,阿喀琉斯总共走过的路程为:

$$\begin{aligned} l &= OA + AB + BC + CD + \cdots \\ &= L + L(v_2/v_1) + L(v_2/v_1)^2 + L(v_2/v_1)^3 + \cdots \\ &= \sum_{i=1}^{\infty} L(v_2/v_1)^{i-1} \\ &= L[1 - (v_2/v_1)^n] / [1 - (v_2/v_1)] \end{aligned}$$

在这期间,假定日常钟所经过的时间为  $t$ ,则显然有:

$$t = l/v_1 = (L/v_1) \cdot [1 - (v_2/v_1)^n] / [1 - (v_2/v_1)]$$

从而可以解得芝诺时间为:

$$t' = n = \ln[1 - (v_1 - v_2)t/L] / \ln(v_2/v_1)$$

这就是日常时间和芝诺时间的变换关系。由此可见,当阿喀琉斯追上乌龟时,日常时间为  $t=L/(v_1-v_2)$ , 这时芝诺时间的表达式出现奇点(即  $t'=\infty$ )。换句话说,  $t'$  在  $0 \rightarrow \infty$  区间只覆盖日常时间  $t$  上的一个有限区域,用芝诺时标来计量描述阿喀琉斯追赶乌龟的过程,确实是“永远”追不上的(除非  $t'=\infty$ )。由此可见,芝诺所使用的时标只能用来描述阿喀琉斯追上乌龟之前的一段过程,而不能

描述在这过程以外的现象,因而在这里不是一个“好”时标。此外,由这个例子可以看到,“时间”和“时间的计量”不同,用某种时标作时间计量达到无穷之后还可以有时间。

### 时间的 42 级台阶

人类与之打交道的时间,从通常的“一眨眼”( $\sim 10^0 = 1\text{s}$ )<sup>①</sup>到长至宇宙的年龄 ( $\sim 10^{10}$  年、 $\sim 10^{17}\text{s}$ ), 以及短至共振子的寿命 ( $\sim 10^{-25}\text{s}$ ), 其范围是相当广的, 其间大约有 42 个数量级 (10 的一次方称为一个数量级, 42 个数量级即为  $10^{42}$ ), 有人把这称为时间的 42 级台阶 (参见图 0.2)<sup>②</sup>。

## 二、空间和空间的计量

### 空间的本质

人们认识空间,最初是从一些具体的实物占有一定的容积开始的,如静止的物体有一定大小的体积,我们就说它占有一定的空间。空间就像是一个由长度、高度和宽度构成的容器,这个容器不但可以容纳各式各样的事物,而且也容许物体在其中运动。正是物体的运动才进一步揭示了空间的特质,正如一只被关闭在玻璃瓶中的蜜蜂,只有当它不断地飞行和碰壁,才能知道玻璃瓶的存在和它的大小。因此,空间是物质运动的广延性的反映,是物质的存在形式之一。

### ◆ 选读

### 空间是三维的

我们从日常的经验知道,一个局部的矩形空间可用其长度、宽度和高度来量度,而要确定空间中的一个点则须用三个独立的坐

① 本书用符号“ $\sim$ ”表示数量级关系。

② 转载自赵凯华、罗蔚茵编著的《新概念物理教程——力学》,高等教育出版社,1995年,第17页。

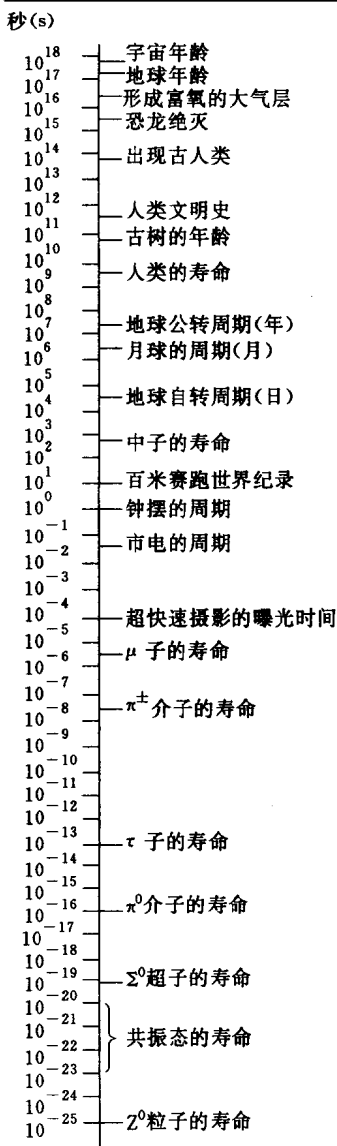


图0. 2 物质世界的时标

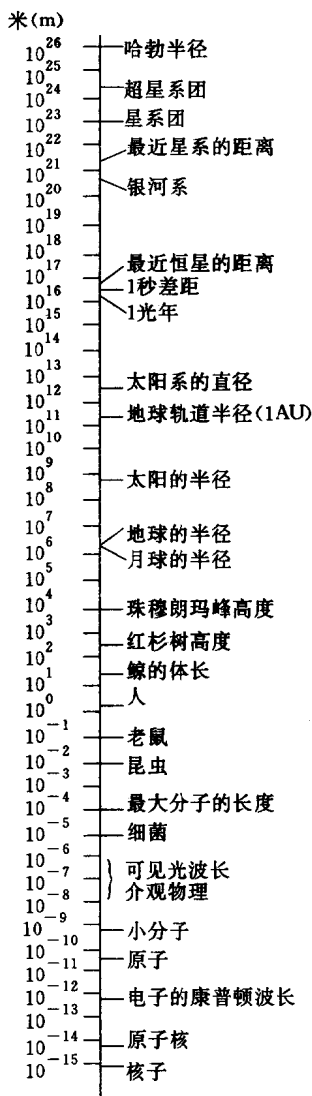


图0. 4 物质世界的空间尺度

标(例如笛卡儿坐标  $x, y, z$ )。这就是说,寻常的空间是三维的。然而为什么空间是三维的呢?生物拓扑学指出,在任何较高级的有机体中,大量细胞必须通过神经纤维相互联络。如果空间只有两维,则一个有机体仅能有两维的构型,那么它的神经通常就像城市中的街道那样相互交截。在交截点上,不同神经将会彼此穿透,因此,若不存在第三维将不允许一条神经纤维处在另一条的上面或下面。结果神经兴奋将会相互干扰。因此,存在许多不相交截的神经通道的高度发展的有机体,只有在至少具有三维的空间中才有可能。但是另一方面,物理学又可以证明,当空间的维数  $n > 3$  时,不可能存在稳定的行星轨道,同时也不可能存在稳定的原子状态。这也就是说,我们现实的空间只能是三维的<sup>①</sup>。 ◆

### 空间的计量

反映物质运动广延性的空间是三维空间,三维空间的局部计量,归根到底可化为一维线段的量度。这可以通过选定长度的计量基准和计量方法进行。长度计量的基准是“米(m)”,方法是把“米尺”与待测线段进行比较<sup>②</sup>。这里还必须指出的是,空间和空间的计量也是两个不同的概念。空间是物质运动广延性的表现形式,是物质存在的另一基本属性,与是否或如何计量没有关系;而空间的计量则是在选定长度基准和计量方法的基础上对物质运动广延性所作的定量量度,显然与所选的计量基准和计量方法有关。

### ◆ 选读

#### “米”的定义及其发展

历史上,米是由于寻求通过巴黎的子午线从北极到赤道的某一适当分数而产生的,这长度的千万分之一定义为米。根据这一

① 本小段的内容转载自罗蔚茵翻译的“为什么空间是三维的?”(物理通报,1984年,第3期,第8页),有兴趣的读者可以参阅原文。

② 对于静止线段的量度比较简单,但对于运动线段的量度则必须有一定的计量约定(见后文狭义相对论中的讨论)。

定义,用铂铱合金制成一把米尺以便于实用。1889年第一届国际计量大会通过决议,将保存在法国计量局中的铂铱合金棒(米尺)在 $0^{\circ}\text{C}$ 时两条刻线间的距离定义为 $1\text{m}$ ,这是长度的实物基准。后经过精确的测量,发现这个实物基准与它原先要表达的值略有差异(约差 $0.023\%$ )。

长度的实物基准很难保证不随时间变化,也很难防止意外(如被战争、地震或其它灾害所毁坏)。物理学家很早就想利用自然基准代替实物基准。自从发明了可调光程的干涉仪器(例如迈克尔逊干涉仪)后,便可以将实物长度和光的波长进行比较了。1960年第十一届国际计量大会上决定用氪86原子的橙黄色光波来定义“米”,规定米为这种光的波长的 $1\,650\,763.73$ 倍,实现了长度的自然基准,其精度为 $4\times 10^{-9}$ 。

按照经过许多事实验证了的相对论,在任何惯性系中,真空中的光速都是一样的。此外,由于稳频激光器的进展,使激光频率的复现性远优于氪86灯定义米的精度,导致测得的光速值的准确度受到原来米的定义的限制。考虑到铯原子钟等计时的高精度,1983年10月第十七届国际计量大会通过决定:米是光在真空中 $1/299\,792\,458\text{s}$ 的时间间隔内传播过的长度。换句话说,使用了新的米定义后,真空中的光速就精确地等于( $c=$ ) $299\,792\,458\text{m/s}$ 。

### 天文单位、光年和秒差距

计量长度的国际基准——米,对天文学来说显得太小了,使用起来不大方便,因此天文学中常用以下几个单位。

1. 天文单位 AU:地球和太阳的平均距离称为天文单位,简称为 AU,这是太阳系内表示天体距离常用的单位,其精确值为:

$$1\text{AU}=1.495\,978\,92\times 10^{11}\text{m}$$

太阳系的直径大约是80个天文单位,即 $10^{13}\text{m}$ 的数量级。

2. 光年 ly:太阳系外的天体距离,AU这个单位仍嫌太小,因而常用“光年”或“秒差距”作计量单位。

光年 (light year, 缩写为 ly) 是光在 1 年中所走过的距离。已知光速  $c=299\,792\,458\text{m/s}$ , 1 回归年 (春分点到春分点) =  $3.155\,693\times 10^7\text{s}$ , 因此:

$$\begin{aligned} 1\text{ ly} &= 2.997\,924\,58\times 10^8\times 3.155\,693\times 10^7 \\ &= 9.460\,530\times 10^{15}\approx 10^{16}\text{ (m)} \end{aligned}$$

3. 秒差距 pc: 要谈“秒差距”, 先得讲讲天文学上一种重要的测距方法——视差法。观测者在两个不同位置看到同一天体的方

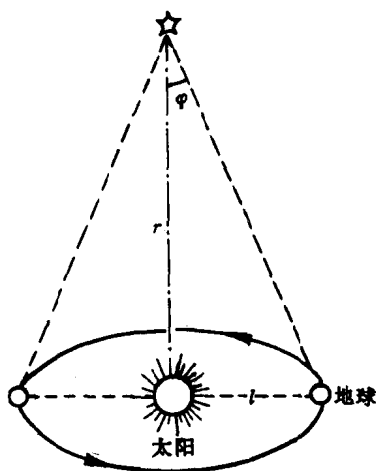


图 0.3 视差法与秒差距的定义

向之差, 叫做视差。两个不同位置之间的连线, 叫做基线。若视线与基线垂直, 则天体的距离  $r$ 、基线的长度  $l$  和视差角  $\phi$  (用弧度表示) 的关系为  $r=l/\phi$ 。因视差角的测量受到仪器精度的限制, 基线愈长, 能测到的距离愈远。

以地球半径作基线, 可以测得地月距离和地日距离。超出太阳系, 地球半径作基线就嫌太短了。好在地球上的观测者还有一条更长的基线可以利用, 这就是地球公转轨道的半径(图 0.3)。天文学上规定, 选此基线时, 视差角  $\phi=1''$  的距离叫做秒差距 (parsec, 缩写为 pc), 即:

$$\begin{aligned} 1\text{ pc} &= 1\text{ AU}/1'' = 2.062\,648\times 10^5\text{ AU} \\ &= 3.261\,633\text{ ly} = 3.085\,68\times 10^{16}\text{ m} \end{aligned}$$

