LNG La Nuova Giuridica

FIRENZE UNIVERSITY PRESS

RELATIVITÀ RISTRETTA E RECETTIZIETÀ DELLA REVOCA DI PROPOSTA CONTRATTUALE

Federico Fidanza*

Il contributo, richiamando alcuni risultati classici della teoria della relatività ristretta, propone una via interdisciplinare per decidere la questione della recettizietà della revoca di proposta contrattuale nel senso della non recettizietà. Tale conclusione è raggiunta con l'utilizzo del concetto relativistico di intervallo spazio-temporale, che consente di individuare un'interpretazione preferibile rispetto all'altra dal punto di vista della realtà fisica, in quanto capace di evitare contraddizioni tra osservatori che si trovino in sistemi di riferimento diversi.

The paper, drawing on some classical results of the theory of special relativity, proposes an interdisciplinary approach to address the issue of the receptivity of the withdrawal of a contractual offer, favouring the interpretation of non-receptivity. This conclusion is reached using the relativistic concept of spacetime interval, which allows to identify a preferable interpretation from the perspective of physical reality, as it avoids contradictions between observers in different reference frames.

1. *Introduzione.* — Questo breve articolo indaga la possibilità di utilizzare alcuni risultati fondamentali della teoria della relatività ristretta per giungere a delle conclusioni riguardo a una specifica questione giuridica, quella della recettizietà della revoca della proposta contrattuale. Prima di tutto, però, esso dev'essere inteso come un gioco: un tentativo di partire dalla concezione einsteiniana dello spazio-tempo — utilizzando in particolare le trasformazioni di Lorentz e il concetto di intervallo spazio-temporale di Minkowski — per affrontare un problema giuridico che trova incerta soluzione in dottrina e giurisprudenza.

A scanso di equivoci: non si vuole qui sostenere che questa via consenta di risolvere la questione, né tantomeno di offrire un contributo particolarmente illuminante; semplicemente, è parso interessante offrire una prospettiva diversa e interdisciplinare, anche per mettere in luce alcune caratteristiche della relatività che rendono questa teoria così affascinante e controintuitiva. Si tratta,

* Dottorando in Diritto commerciale presso l'Università degli Studi di Padova.

https://riviste.fupress.net/index.php/nuovagiuridica

sostanzialmente, di un esperimento; e per stemperare il naturale scetticismo del lettore è utile tracciare sin da subito l'ordine espositivo.

Innanzitutto, dopo questa introduzione, si descriverà la questione giuridica da affrontare, che concerne la recettizietà della revoca della proposta contrattuale. Come si vedrà, le interpretazioni tradizionalmente proposte in dottrina e giurisprudenza sono due; esse saranno rilette attraverso il concetto di evento nello spazio-tempo, prerequisito per discutere la questione dal punto di vista della fisica. Nel terzo paragrafo si descriveranno alcuni degli approdi della teoria della relatività ristretta, limitandosi dal punto di vista matematico al minimo indispensabile. Successivamente, i risultati della relatività saranno utilizzati per valutare con lenti nuove le caratteristiche delle interpretazioni sopra ricordate. Come si noterà, infine, l'applicazione di un principio presupposto dall'ordinamento ma generalmente irrilevante consentirà di affermare che un'interpretazione è preferibile rispetto all'altra, corroborando peraltro la tesi oggi dominante.

Prima di iniziare, un ultimo appunto. Per consentire una lettura fluida si è scelto di ridurre davvero al minimo le equazioni e i calcoli inseriti nel corpo del testo. Per completezza è stata predisposta, in calce, un'Appendice, contenente calcoli, esempi ed approfondimenti opportuni per controbilanciare le necessarie semplificazioni; nell'economia generale del discorso, comunque, sarà possibile saltare a piè pari ogni equazione. Sarà utile, in tal caso, una buona dose di fiducia.

2. *Il problema giuridico: la recettizietà della revoca della proposta.* — Come noto, un contratto può concludersi con modalità diverse. Oggetto di questo contributo è lo schema di conclusione del contratto c.d. dialogico, che trova più spazio nel Codice civile e che può essere descritto come una «sequenza formativa connotata dai canoni della *tempestività*, della *conformità*, della *recettizietà* e della *revocabilità*»[1]. In particolare, tale schema è definibile dialogico poiché si concretizza in uno scambio di atti prenegoziali tra persone determinate, «finalizzati alla nascita e alla conclusione di un dialogo»[2].

Tali atti prenegoziali sono la proposta e l'accettazione, che, producendo effetti solo con la ricezione, hanno carattere indubbiamente recettizio[3]. È fondamentale, ai nostri fini, che sia la proposta sia l'accettazione possano essere revocati, con un atto (appunto di "revoca") che può far cadere nel nulla l'atto precedente. Dal punto di vista della produzione degli effetti, la recettizietà della revoca dell'accettazione è dato normativo che risulta dall'art. 1328, secondo comma, c.c.[4], mentre più complesso è comprendere se la revoca della proposta (di

[1] G. Vettori, *Contratto e rimedi. Verso una società sostenibile*, Milano, 2021, IV ed., p. 309 (corsivi dell'Autore).

[2] *Ibidem*.

[3] Ivi, p. 311.

[4] «L'accettazione può essere revocata, purché la revoca giunga a conoscenza del proponente prima dell'accettazione»

seguito, anche solo "revoca") abbia natura recettizia o meno, considerata l'ambiguità dell'art. 1328, primo comma, c.c.[5]. Sul punto sono state proposte ambedue le interpretazioni.

Se la revoca della proposta sia o meno recettizia: questa costituisce la questione giuridica controversa la cui soluzione, si ritiene, può in astratto — almeno per gioco — giovarsi delle categorie della relatività ristretta. Senza ricapitolare le molte argomentazioni spese in dottrina e giurisprudenza a supporto dell'una o dell'altra tesi, è utile osservare che entrambe le interpretazioni sono rispettose della formulazione codicistica dal punto di vista letterale[6] e dunque la soluzione ha carattere extratestuale. Di qui la storica oscillazione che caratterizza sul punto la giurisprudenza della Corte di cassazione[7].

Per rendere più trattabile la questione dal punto di vista della fisica è utile descrivere le due interpretazioni in maniera diversa. A tal fine, indichiamo proponente e accettante con le lettere π e α, e ipotizziamo che contestualmente all'invio dell'accettazione α avvii un cronometro. Prendendo il cronometro come riferimento, l'invio dell'accettazione avrà tempo 0 e ogni evento successivo sarà contrassegnato da un tempo specifico, come nell'esempio della seguente tabella:

Evento	Tempo	Luogo
Invio dell'accettazione	0	Presso α
Invio della revoca della proposta	12 ore	Presso π
Ricezione dell'accettazione	24 ore	Presso π
Ricezione della revoca	36 ore	Presso α

Si noti che nell'esempio la revoca è spedita prima che sia ricevuta l'accettazione, ma perviene dopo quest'ultima; cosicché il contratto è concluso qualora si consideri la revoca recettizia, mentre non lo è altrimenti.

Prima di proseguire, una rapida nota terminologica: di seguito, si utilizzerà l'espressione "evento nello spazio-tempo" (o anche più concisamente "evento") per indicare non tanto un evento materiale, un accadimento — ad esempio, l'azione del proponente di inviare la revoca —, quanto un punto nello spazio-tempo, individuato mediante le sue coordinate spaziali e temporali[8]. Così, parlando di "evento invio della revoca" non ci si riferirà all'azione materiale di invio della revoca, comunque essa avvenga, ma al punto dello spazio-tempo in cui avviene tale azione materiale; nell'esempio che precede, l'evento è individuato dalle

[5] «La proposta può essere revocata finché il contratto non sia concluso. [...]».
[6] Vettori, *Contratto e rimedi*, cit., p. 313.
[7] Ivi, p. 316 s.: prevalendo prima la tesi della non recettizietà, poi quella della recettizietà, poi quella della non recettizietà.
[8] Il legame tra eventi e coordinate è ovviamente strettissimo, ma «[a] fundamental idea to grasp is that events in space-time exist irrespective of their coordinates, just as points in space don't depend on the map we use» (L. Susskind, A. Cabannes, *General relativity. The Theoretical Minimum*, London, 2023, p. 12).

coordinate "12 ore" e "presso π". La parola "evento" indicherà, in altre parole, un certo luogo in un certo momento (ad esempio, l'evento *hic et nunc* potrebbe essere individuato dalla coordinata spaziale "43°47'37.2"N 11°13'53.7"E" e dalla coordinata temporale "ore 13:25:36 del 14 gennaio 2025").

Schematizzando, tornando alle due interpretazioni, ciò che in entrambe le letture viene preso a riferimento è allora l'ordine temporale tra due eventi, valutato sulla base delle loro coordinate temporali, e la differenza tra le due soluzioni ermeneutiche risiede nella coppia di eventi scelta per effettuare la comparazione. Un evento, la ricezione dell'accettazione, è comune a entrambe le coppie; l'altro, alternativamente l'invio della revoca o la sua ricezione, costituisce il punto di divergenza.

3. *Cenni indispensabili di relatività ristretta*. — L'obiettivo di questo paragrafo non è, evidentemente, riassumere un argomento tanto lontano dalla sensibilità giuridica[9] quanto quello della relatività ristretta; e ciò per molti e ovvi motivi. Più umilmente si descriveranno alcuni risultati notevoli della teoria di Einstein, utili per discutere la questione giuridica appena descritta. A tal fine sarà fondamentale tenere a mente la definizione di "evento" data poc'anzi, cui dovrà accostarsi quella di "sistema di riferimento".

Un sistema di riferimento, anche qui semplificando, è un sistema di coordinate che consente di descrivere gli eventi nello spazio-tempo: «nient'altro che un insieme completo di 'etichette', che assegna un'etichetta a ogni punto, cioè a ogni evento»[10]. Ad esempio, un sistema di riferimento potrebbe descrivere lo spazio con latitudine e longitudine (coordinate spaziali) e il tempo con l'ora di Roma (coordinata temporale), mentre un altro sistema potrebbe descrivere i tempi con un altro fuso orario; tali due sistemi sarebbero tra loro diversi, poiché indicherebbero i medesimi eventi con diverse coordinate temporali. Ancora, un sistema di riferimento potrebbe avere come "origine" (cioè punto di riferimento iniziale) α al momento dell'accettazione, descrivendo ogni evento in base alla sua distanza da α e al valore che α legge nel suo cronometro (avviato al momento dell'invio dell'accettazione). Un altro sistema di riferimento potrebbe invece avere

[9] Lontananza sintomo di una generale e reciproca separazione, dipinta polemicamente già in C.P. Snow, *The Two Cultures*, Cambridge, 1998 (ed. originale 1959), p. 60: «[i]n our society [...] we have lost even the pretence of a common culture. Persons educated with the greatest intensity we know can no longer communicate with each other on the plane of their major intellectual concern. This is serious for our creative, intellectual and, above all, our normal life. It is leading us to interpret the past wrongly, to misjudge the present, and to deny our hopes of the future»; più specificamente con riguardo alla fisica, p. 14: «the scientific edifice of the physical world [is], in its intellectual depth, complexity and articulation, the most beautiful and wonderful collective work of the mind of man. Yet most non-scientists have no conception of that edifice at all. It is rather as though, over an immense range of intellectual experience, a whole group was tone-deaf. Except that this tone-deafness doesn't come by nature, but by training, or rather the absence of training. [...] So the great edifice of modern physics goes up, and the majority of the cleverest people in the western world have about as much insight into it as their neolithic ancestors would have had».

[10] «[N]othing more than a complete set of 'labels', if you will, attaching one label [...] to each point, i.e., to each event» (Susskind, Cabannes, *General relativity*, cit., p. 14).

come origine π, un giorno prima dell'invio dell'accettazione; in tal caso cambierebbero sia la coordinata spaziale sia quella temporale. Esistono infiniti sistemi di riferimento e ciascuno di essi può descrivere il medesimo evento con coordinate diverse.

Conclusa questa premessa, è utile partire dal concetto di tempo così come utilizzato in fisica fino al ventesimo secolo, da Galileo a Maxwell passando per Newton, e che ancora guida ogni essere umano nella sua esperienza di vita[11]. Il tempo è assoluto, cioè uguale per tutti. Se fra due eventi un soggetto misura un certo lasso temporale, esso sarà misurato, identico, da qualsiasi altro soggetto che voglia misurare il tempo tra i due stessi eventi[12]. Se, per esempio, due soggetti osservano la traiettoria di un proiettile, essi concorderanno sul tempo che il proiettile ha impiegato per percorrere tale traiettoria. Inoltre, è assoluto anche l'ordine cronologico degli eventi: se per un soggetto un evento avviene prima di un altro l'ordine sarà il medesimo per tutti.

Formalizzando, si considerino due sistemi di riferimento, ζ e ζ', e due eventi, E_1 ed E_2. A ciascun evento saranno associate due coordinate temporali, una rispetto a ζ e una rispetto a ζ'. Dire che il tempo è assoluto significa affermare che la differenza tra le coordinate temporali di E_1 ed E_2 è fissa a prescindere da come venga eseguito il calcolo, se rispetto a ζ o rispetto a ζ'; una grandezza con tale caratteristica viene definita, intuitivamente, "invariante". Indicando con Δt il lasso temporale tra E_1 ed E_2 nel sistema ζ e con $\Delta t'$ il lasso temporale tra E_1 ed E_2 nel sistema ζ', vale per qualsiasi coppia di eventi l'identità:

$$\Delta t' = \Delta t \tag{I}$$

Le due quantità sono identiche per chiunque: se in ζ E_1 ed E_2 sono separati da un'ora, anche in ζ' la differenza sarà di esattamente un'ora. Così, ad esempio, la durata di una rotazione del pianeta Terra su se stessa è di 24 ore, non mutando a seconda del fuso orario (e dunque del sistema di riferimento) in cui viene effettuata la misurazione.

[11] «The structure of space and time which had been defined by Newton as the basis of his mathematical description of nature was simple and consistent and corresponded very closely to the use of the concepts space and time in daily life», con una corrispondenza così stretta che «Newton's definitions could be considered as the precise mathematical formulation of these common concepts» (W. HEISENBERG, *Physics and Philosophy*, New York, 1962, pp. 126-127). Pur esistendo, però, alcune differenze tra la concezione del «*vulgus*» e quella galileiana-newtoniana, come rivendicato proprio in I. NEWTON, *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, London, 1687, *Definitiones*, *Scholium*: «Tempus, spatium, locus & motus, sunt omnibus notissima. Notandum tamen, quod vulgus quantitates hasce non aliter quam ex relatione ad sensibilia concipia. Et inde oriuntur praejudicia quaedam, quibus tollendis convenis easdem in absolutas & relativas, veras & apparentes, mathematicas & vulgares distingui» («Tempo, spazio, luogo e movimento sono concetti notissimi a tutti. È da notare, tuttavia, che la gente comune concepisce queste quantità solo in relazione a cose percettibili. E da ciò derivano alcuni pregiudizi, per superare i quali è conveniente distinguere queste quantità in assolute e relative, vere e apparenti, matematiche e popolari»).

[12] Per approfondimenti v. il § 1 dell'Appendice.

La sorprendente e controintuitiva conclusione della teoria della relatività è che questa concezione è inadatta a spiegare adeguatamente la realtà. Solo per completezza si riporta di seguito la versione relativistica dell'equazione (I) (una delle c.d. trasformazioni di Lorentz), che non verrà ripresa nel prosieguo (basti, qui, notare quanto essa appaia *ictu oculi* profondamente diversa dalla precedente)[13]:

$$\Delta t' = \frac{\Delta t - \frac{v}{c^2}\Delta x}{\sqrt{1-(\frac{v}{c})^2}} \tag{II}$$

Come si diceva, però, non si vuol qui certo svolgere una trattazione approfondita della teoria della relatività, ed è sufficiente osservare che tale nuova concezione implica la necessità di ridiscutere l'invarianza delle differenze temporali, con la perdita di tre capisaldi fondamentali del pensiero newtoniano.

Innanzitutto, è possibile che in ζ e ζ' siano misurati lassi temporali diversi tra due stessi eventi, poiché niente assicura il contrario. Anzi, all'opposto: partendo dall'equazione (II), si può verificare che in ζ e ζ' si misureranno lassi temporali (spesso solo infinitesimamente) diversi in casi tutt'altro che rari[14]. Così, ad esempio, può accadere che un'ora in ζ corrisponda a sette anni in ζ'[15]. Si noti, peraltro, che questo fenomeno non dipende dalla presenza di un osservatore persona fisica, ma dalla struttura dell'universo; a prescindere dall'effettiva osservazione e misurazione degli eventi, essi possono *essere* — e non semplicemente *apparire* — a distanze temporali diverse a seconda del sistema di riferimento scelto. Per un esempio classico di tale fenomeno, si pensi al celebre paradosso dei gemelli: se un gemello viaggia a velocità elevat(issim)e rispetto all'altro e torna indietro, esso incontrerà un gemello più anziano di lui, poiché il tempo scorre diversamente per i due soggetti (non meramente a livello di percezione)[16].

In secondo luogo, dall'equazione (II) discende una conseguenza ancor più paradossale, nel senso etimologico del termine: da abbandonare non è solo l'assolutezza delle distanze temporali, ma anche l'assolutezza del concetto di simultaneità. È possibile, infatti, che alcuni eventi che rispetto a ζ sono simultanei non lo siano rispetto a ζ'. Utilizzando le parole (in traduzione) di Hermann

[13] Per approfondimenti v. il § 2 dell'Appendice. Nell'equazione (II), Δt e $\Delta t'$ hanno lo stesso significato dell'equazione (I); v è la velocità relativa di un sistema rispetto all'altro, cioè dell'origine di ζ' rispetto all'origine di ζ; c è la velocità della luce, pari a circa 299.792.453 m/s. Quando v è molto piccola rispetto a c l'equazione (II) si riduce alla (I), dato che i termini v/c^2 e $(v/c)^2$ sono trascurabili, e questo è il motivo per cui gli effetti relativistici non vengono percepiti nell'esperienza quotidiana; per dettagli v. ancora il § 2 dell'Appendice, e in particolare il calcolo del limite delle equazioni (2A).

[14] Si veda l'equazione (II): quando v è diverso da zero, e cioè ζ' si muove rispetto a ζ, i tempi misurati sono generalmente diversi.

[15] I due valori sono tratti dalla vivida e recente illustrazione del film Interstellar, del 2014 (in cui, però, la dilatazione dei tempi si giustifica con la teoria della relatività generale, non speciale, dato che essa è causata dalla gravità e non da velocità particolarmente elevate; cfr. K. THORNE, *The Science of Interstellar*, New York, 2014).

[16] Sul paradosso dei gemelli v., per una panoramica (anche storica), R.L. SHULER JR., *The Twins Clock Paradox History and Perspectives*, in *Journal of Modern Physics*, 2014, vol. V, XII, pp. 1062 ss.

Minkowski, il primo, nel 1908, a valorizzare queste considerazioni, «non è più ammissibile parlare di *simultaneità* assoluta tra due eventi»[17].

Infine, la perdita dell'invarianza dei lassi temporali comporta un'altra conseguenza fondamentale: anche l'ordine temporale tra due eventi, a certe condizioni, può non essere assoluto e dipendere dal sistema di riferimento. In altre parole, se in ζ E_1 precede E_2, in ζ' è ben possibile che E_2 accada prima di E_1. È questo l'aspetto della relatività che risulta fondamentale per affrontare la questione giuridica della recettizietà della revoca, poiché come si è accennato le due interpretazioni ruotano entrambe intorno all'ordine temporale tra due eventi. Il punto merita allora approfondimento.

Evidentemente, l'oggettività dell'ordine tra eventi è un assunto fondamentale dell'esperienza umana, tanto evidente da risultare ovvio[18]: «partium Temporis ordo est immutabilis», scriveva Newton[19]. E l'ordine tra gli eventi è strettissimamente legato al concetto di causalità, poiché, se A causa B, A non può

[17] «Infolgedessen ist es nicht mehr statthaft, von der *Gleichzeitigkeit* zweier Ereignisse an sich zu sprechen» (H. MINKOWSKI, *Die Grundgleichungen für die elektromagnetischen Vorgänge in bewegten Körpern*, in *Nachrichten von der Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften und der Georg-Augusts-Universität zu Göttingen*, 1908, pp. 53–111, p. 68; corsivo aggiunto). Interessante il tentativo di H. BERGSON, *Durée et simultanéité. À propos de la théorie d'Einstein*, Paris, 1923, II ed., p. 125 s., ove l'Autore tentò di fornire un'interpretazione che, nelle intenzioni in armonia con la relatività, facesse salva l'assolutezza della simultaneità «reale»: «Il faut donc distinguer deux espèces de simultanéité, deux espèces de succession. La première est intérieure aux événements, elle fait partie de leur matérialité, elle vient d'eux. L'autre est simplement plaquée sur eux par un observateur extérieur au système. La première exprime quelque chose du système lui-même ; elle est absolue. La seconde est changeante, relative, fictive ; elle tient à la distance, variable dans l'échelle des vitesses, entre l'immobilité que ce système a pour lui-même et la mobilité qu'il présente par rapport à un autre: il y a incurvation apparente de la simultanéité en succession. La première simultanéité, la première succession, appartient à un ensemble de choses, la seconde à une image que s'en donne l'observateur dans des miroirs d'autant plus déformants que la vitesse attribuée au système est plus grande» («Bisogna dunque distinguere due tipi di simultaneità, due tipi di successione. La prima è interna agli eventi, fa parte della loro materialità, proviene da loro. L'altra è semplicemente applicata su di essi da un osservatore esterno al sistema. La prima esprime qualcosa del sistema stesso; è assoluta. La seconda è mutevole, relativa, fittizia; dipende dalla distanza, variabile nella scala delle velocità, tra l'immobilità del sistema rispetto a se stesso e la mobilità che presenta rispetto a un altro: c'è un'apparente incurvatura della simultaneità in successione. La prima simultaneità, la prima successione, appartiene a un insieme di cose, la seconda a un'immagine che ne fa l'osservatore in specchi tanto più deformanti quanto maggiore è la velocità attribuita al sistema»). La proposta non ebbe, però, particolare successo, e fu criticata dallo stesso Einstein (v. J. CANALES, *Einstein, Bergson, and the Experiment that Failed: Intellectual Cooperation at the League of Nations*, in *Modern Language Notes*, 2005, Vol. CXX, V, 2005, pp. 1168 ss.). Per approfondire la questione della simultaneità v. il § 3 dell'Appendice (con un esempio di eventi simultanei in un sistema e non simultanei in un altro).

[18] E non è forse un caso che, per BERGSON, *Durée et simultanéité*, cit., *ix*, «[a]ucune question n'a été plus négligée par les philosophes que celle du temps» («nessuna questione è stata più trascurata dai filosofi di quella del tempo»).

[19] «L'ordine degli attimi è immutabile» (NEWTON, *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, cit., *Definitiones*, *Scholium*). E il modo della successione è, assieme ai modi della permanenza e della simultaneità, uno dei modi che contraddistingue il tempo nel pensiero kantiano, differenziando tale forma pura dell'intuizione sensibile da quella dello spazio: «diversi tempi non sono insieme, ma successivi (come diversi spazi non sono successivi, ma insieme)» (in originale «verschiedene Zeiten sind nicht zugleich, sondern nacheinander (so wie verschiedene Räume nicht nacheinander, sondern zugleich sind)»; I. KANT, *Critica della ragion pura*, Riga, 1781, § 4 (*Esposizione metafisica del concetto del tempo*).

che verificarsi prima di B. Qual è, dunque, la portata di quanto appena discusso, e come può questa concezione conciliarsi con la causalità?

Occorre, innanzitutto, precisare e ridimensionare le conseguenze della concezione relativistica, poiché, malgrado quanto potrebbe sembrare, essa non rende l'ordine tra eventi totalmente arbitrario, né — per salvezza del diritto — implica la perdita del concetto di causalità[20]. Il fatto che l'ordine tra coppie di eventi non sia sempre assoluto non implica che tale assolutezza sia del tutto perduta: solo qualora le coppie abbiano certe caratteristiche l'ordine tra gli eventi potrà dipendere dal sistema di riferimento scelto. Di seguito ci si soffermerà brevemente su tali caratteristiche, poiché sarà tale differenziazione a consentire di ritenere preferibile una delle due interpretazioni sulla recettizietà.

Nella teoria della relatività l'invariante classico, il tempo, è sostituito con un altro, il c.d. intervallo spazio-temporale. Nello specifico, a partire dalle trasformazioni di Lorentz è possibile dimostrare che esiste una quantità che non cambia tra diversi sistemi di riferimento, indicata con il simbolo $(\Delta s)^2$ (e detta appunto "intervallo spazio-temporale" tra due eventi[21]). Indicando con $(\Delta s)^2$ l'intervallo spazio-temporale tra E_1 ed E_2 nel sistema ζ e con $(\Delta s')^2$ lo stesso intervallo nel sistema ζ', affermare che $(\Delta s)^2$ è invariante significa affermare che (si noti la somiglianza con l'equazione (I), dove in luogo di $(\Delta s)^2$ era presente Δt)[22]

$$(\Delta s')^2 = (\Delta s)^2 \qquad \text{(III)}$$

$(\Delta s)^2$ è importante non solo in quanto invariante, ma anche perché consente di tracciare quel discrimine tra eventi il cui ordine è assoluto ed eventi il cui ordine è relativo cui si è accennato poc'anzi. Nello specifico, infatti, si può utilizzare il suo segno (positivo o negativo, a seconda che $(\Delta s)^2$ sia maggiore o minore di zero) per catalogare gli intervalli tra eventi in tre categorie: intervalli di tipo spazio, intervalli di tipo tempo e intervalli di tipo luce[23].

Gli intervalli di tipo spazio sono quelli in cui $(\Delta s)^2$ è positivo, tra eventi che sono (semplificando) lontani nello spazio ma vicini nel tempo, cosicché è impossibile per uno stesso raggio di luce passare da entrambi; ciò, posto che la velocità della luce non può essere superata, significa che enti transitanti in uno dei

---

[20] Al contrario: «the Lorentz transformations imply that we live in a *causal* universe» (M. DAVIDSSON, in *Cantor's Paradise*, 2021, consultabile all'indirizzo https://www.cantorsparadise.com/tensors-time-travel-tenet-and-twelve-monkeys-40a43f653d9d, data ultima consultazione 14.1.2025; corsivo dell'Autore).

[21] Sin da H. MINKOWSKI, *Raum und Zeit*, in *Physikalische Zeitschrift*, 1909, X, pp. 104 ss. (oggi, in trad. inglese, in *Space and Time: Minkowski's Papers on Relativity*, a cura di V. Petkov, Minkowski Institute Press, 2012, pp. 39 ss.

[22] Per la formula completa di $(\Delta s)^2$ v. il § 4 dell'Appendice.

[23] Sulle tre tipologie di intervalli v., ad esempio, R.P. FEYNMAN, R.B. LEIGHTON, M. SANDS, *The Feynman Lectures on Physics. The New Millenium Edition*, New York, 2010, I, p. 17-6; L. SUSSKIND, A. FRIEDMAN, *Special Relativity and Classical Field Theory: The Theoretical Minimum*, London, 2018, § 3.1.

due eventi non possono interagire con enti transitanti nell'altro, e che non esistono catene causali che li colleghino.

Gli intervalli di tipo tempo, con $(\Delta s)^2$ negativo, separano invece coppie di eventi che sono sufficientemente vicini nello spazio e sufficientemente lontani nel tempo da permettere a corpi che si muovono a velocità inferiori a quella della luce di passare per entrambi; tra di essi sono possibili interazioni e rapporti di causalità.

Infine, gli intervalli di tipo luce, con $(\Delta s)^2$ nullo, si misurano tra eventi che sono separati esattamente da un raggio di luce, nel senso che la loro distanza temporale è precisamente quella che permette a una particella che viaggi alla velocità della luce di colmare la loro distanza spaziale. L'insieme degli eventi separati dall'origine del sistema di riferimento da intervalli di tipo luce è detto, a causa della sua forma, "cono di luce", e separa gli eventi di tipo spazio da quelli di tipo tempo[24].

Si può dimostrare (sul punto si rimanda al § 4 dell'Appendice) che se due eventi sono separati da un intervallo di tipo tempo allora il loro ordine è assoluto ed essi non potranno mai risultare simultanei, né il loro ordine temporale potrà essere invertito in altri sistemi. Questa osservazione fa salva la causalità, poiché l'esistenza stessa di una catena causale è di per sé sufficiente a escludere dubbi sull'ordine tra gli eventi coinvolti[25]. Al contrario ciò non vale per gli intervalli di tipo spazio, ove l'ordine tra gli eventi può invertirsi a seconda del sistema di riferimento scelto.

Raccogliendo le considerazioni svolte finora, prima di calarle finalmente nel terreno giuridico, gli eventi sono contraddistinti da coordinate spaziali e temporali che variano tra sistemi di riferimento diversi; ogni coppia di eventi è separata da un certo intervallo spazio-temporale, che non dipende dal sistema di riferimento, è calcolabile in maniera univoca e può essere di tre tipi (tempo, spazio o luce); se di tipo tempo, allora l'ordine tra i due eventi è assoluto; se di tipo spazio, allora l'ordine è relativo.

4. *Relatività dei tempi e recettizietà degli effetti.* — L'obiettivo del presente paragrafo è mostrare come le considerazioni appena svolte possano avere una rilevanza nella scelta dell'interpretazione da prediligere per la risoluzione della questione giuridica descritta nel secondo paragrafo.

Ciò che si tenterà di mostrare, innanzitutto, è che le due coppie di eventi prese a riferimento nelle due interpretazioni sono connotate da intervalli di tipo diverso: mentre l'una è separata da un intervallo di tipo tempo, con la conseguenza che l'ordine tra i due eventi è assoluto, l'altra è separata da un intervallo che può essere (alle volte) di tipo spazio, con la conseguenza che i due

[24] *Rectius*: separa gli eventi separati dall'origine da intervalli di tipo spazio da quelli separati dall'origine da intervalli di tipo tempo.

[25] Nell'Appendice, al § 5, un'applicazione di questo concetto alla causalità "penalistica" tra il colpo di pistola e l'impatto del proiettile sul bersaglio, che costituiscono eventi sempre separati da un intervallo di tipo tempo e dunque aventi sempre lo stesso ordine in ogni sistema di riferimento.

eventi della coppia possono avere un ordine diverso a seconda del sistema di riferimento. Come si vedrà, ciò farà propendere per un'interpretazione piuttosto che per l'altra.

Per iniziare, è necessario esaminare gli intervalli tra le coppie di eventi rilevanti, ossia invio revoca – ricezione accettazione (nella tesi della non recettizietà) e ricezione revoca – ricezione accettazione (nella tesi della recettizietà). Volendo qui limitare al massimo l'impiego di formule si utilizzeranno piuttosto le definizioni di intervallo di tipo spazio e intervallo di tipo tempo, date poc'anzi; rimandando all'Appendice per una trattazione matematica[26].

Si consideri, per prima, la tesi della non recettizietà, e dunque la coppia invio revoca – ricezione accettazione. Si osserva immediatamente che entrambi gli eventi avvengono in presenza di π, il proponente. Più precisamente: in qualsiasi sistema di riferimento, il proponente π, che compie entrambe le azioni (invio e ricezione), transita sia per l'evento "invio della revoca", sia per l'evento "ricezione dell'accettazione". Ciò significa che l'intervallo di questa coppia di eventi è indubbiamente di tipo tempo: infatti, riprendendo la definizione precedente, si tratta di eventi sufficientemente vicini nello spazio e sufficientemente lontani nel tempo da permettere a π, che si muove (se si muove) a velocità inferiori a quella della luce, di transitare per entrambi. E dunque tale coppia ha un ordine assoluto: se per un soggetto avviene prima l'uno e poi l'altro, tutti concorderanno su quest'ordine — e quindi sull'avvenuta o non avvenuta conclusione del contratto.

Si consideri ora, invece, la tesi della recettizietà, con la coppia ricezione revoca – ricezione accettazione. Tali eventi si verificheranno generalmente in punti diversi dello spazio e del tempo; in particolare, le loro coordinate spaziali saranno quelle del proponente π (per la ricezione dell'accettazione) e dell'accettante α (per la ricezione della revoca). Può certamente accadere che l'intervallo sia di tipo tempo, come nel caso precedente: ciò accadrà se α e π non sono molto distanti, e se intercorre un lasso di tempo sufficiente. Ma può anche accadere il contrario: non possono escludersi casi in cui l'evento ricezione revoca e l'evento ricezione accettazione siano così lontani nello spazio e così vicini nel tempo da essere separati da un intervallo di tipo spazio, con la conseguenza gravissima che il loro ordine può dipendere dal sistema di riferimento utilizzato.

Ciò ha un risvolto fondamentale. Mentre in alcuni sistemi di riferimento il contratto potrà dirsi concluso, in altri avverrà il contrario; alcuni osservatori potranno ritenere esistenti effetti giuridici che sono inesistenti per altri; e ciò non per contrasti di opinioni o percezioni, che già sovrappopolano la pratica giuridica, ma in conseguenza di un'interpretazione che non consente di ottenere risultati coerenti in ogni sistema di riferimento. Il rinvio che il mondo giuridico fa al mondo fisico, appoggiandosi al concetto di tempo, si sgretola lasciando il primo privo di sostegno, impossibilitato a trovare una soluzione univoca.

---

[26] V. il § 6 dell'Appendice.

Ad onor del vero, va riconosciuto che la relatività dell'ordine degli eventi non è nella pratica un problema, verificandosi le inversioni soltanto in condizioni che sono ben al di là dell'esperienza comune. Nel pianeta Terra[27] esistono una data e un'ora precise, che consentono, senza alcuna ambiguità (quantomeno per gli scopi dei traffici giuridici), di stabilire sempre un ordine assoluto tra eventi. In astratto, però, il problema esiste.

5. *Effetti giuridici e sistemi di riferimento.* — Dunque, propendere per la recettizietà o per la non recettizietà della revoca ha conseguenze importanti (dal punto di vista teoretico), poiché mentre la seconda soluzione consente una coerenza tra sistemi di riferimento diversi, la prima condanna la conclusione del contratto a una sorte incerta. Ricapitolando, infatti: propendere per la recettizietà della revoca significa accettare l'esistenza di possibili contrasti tra sistemi di riferimento, nel senso che il contratto sarà concluso in alcuni sistemi di riferimento e non concluso in altri; al contrario, la non recettizietà elimina ogni dubbio sull'esistenza (o inesistenza) degli effetti giuridici.

Fin qui, la parte – per così dire – meramente descrittiva dell'esperimento. È indubbio che in un caso la coppia sia sempre separata da intervalli di tipo tempo, ed è indubbio che nell'altro caso la coppia possa, talvolta, essere separata da intervalli di tipo spazio; così come è indubbio che, in conseguenza di ciò, un'interpretazione consenta di ottenere risultati univoci in tutti i sistemi, al contrario dell'altra.

Il passo successivo, decisamente meno solido, consiste nell'operare un giudizio di valore che consenta di scegliere tra le due interpretazioni sulla base di tale differenza, che, di per sé, potrebbe legittimamente essere ritenuta priva di significato. Del resto, il problema neanche si pone se si utilizza, come generalmente nel diritto, la concezione newtoniana per cui «tempus est absolutum» e «spatium est absolutum»[28]. Volendo, però, adottare fino in fondo la prospettiva della relatività – più in accordo con i dati sperimentali –, considerando non lo *spatium* e il *tempus* ma il «continuum spatii et temporis»[29], la questione non può essere ignorata.

A tal fine può essere utile ancora una volta trarre spunto dalla fisica, questa volta, però, meramente in via analogica – e quindi del tutto opinabile. Si potrebbe, in particolare, considerare uno dei principi fondamentali di tale disciplina, quello di relatività, per il quale le leggi della fisica sono le stesse in ogni sistema di riferimento[30]. Sembra, infatti, ragionevole affermare che "gli effetti giuridici

[27] La questione diverrebbe più rilevante in caso di esplorazione spaziale. V., per un esempio numerico, il § 7 dell'Appendice.

[28] Così ci si riferisce alla concezione pre-relativistica in A. EINSTEIN, *The meaning of relativity*, Princeton, 2014 (ed. originale 1922), p. 55; e, del resto, in NEWTON, *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, cit., *Definitiones*, *Scholium* si utilizzavano le espressioni «[t]empus absolutum» e «[s]patium absolutum».

[29] EINSTEIN, *The meaning of relativity*, cit., p. 55.

[30] La prima formulazione del principio di relatività viene attribuita a Galileo Galilei, che vi si soffermò nel suo *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo*, del 1632, utilizzando il celebre ed

devono essere gli stessi in ogni sistema di riferimento", e anzi riconoscere in tale enunciato un vero e proprio assioma fondamentale dell'ordinamento, sempre implicito poiché generalmente soddisfatto. Al di là delle incertezze interpretative e delle ambiguità, infatti, pare inammissibile per un ordinamento accettare che un effetto possa *essere* — e non semplicemente possa *essere ritenuto* — al contempo sussistente e non sussistente a seconda del sistema di riferimento dell'osservatore, in mancanza di alcun reale disaccordo di fatto; poiché ciò significherebbe adottare una regola non applicabile in quanto intrinsecamente contraddittoria.

Questo principio generalissimo, la cui utilità e coerenza con il resto dell'ordinamento è tutta da dimostrare, varrebbe insomma da giustificazione per scartare le interpretazioni che creano contraddizioni insanabili tra sistemi di riferimento diversi, inserendo esse nel diritto un germe ineliminabile — seppur, è bene ammetterlo, ad oggi insignificante a livello pratico — di incertezza, derivante non dalla diversità di opinioni o percezioni ma dalla struttura dell'universo fisico. Portando, così, a ritenere preferibile la tesi della non recettizietà della revoca.

efficace esempio del navi(g)lio: «[r]inserratevi con qualche amico nella maggiore stanza che sia sotto coverta di alcun gran navilio, e quivi fate d'aver mosche, farfalle e simili animaletti volanti: siavi anco un gran vaso d'acqua, e dentrovi de' pescetti; sospendasi anco in alto qualche secchiello, che a goccia a goccia vada versando dell'acqua in un altro vaso di angusta bocca che sia posto a basso; e stando ferma la nave, osservate diligentemente come quelli animaletti volanti con pari velocità vanno verso tutte le parti della stanza. [...] Osservate che avrete diligentemente tutte queste cose, benché niun dubbio ci sia mentre il vascello sta fermo non debbano succedere così: fate muovere la nave con quanta si voglia velocità; ché (pur di moto uniforme e non fluttuante in qua e in là) voi non riconoscerete una minima mutazione in tutti li nominati effetti; né da alcuno di quelli potrete comprendere se la nave cammina, o pure sta ferma». In HEISENBERG, *Physics and Philosophy*, cit., p. 117, si individua nel principio «a quite general law of nature pertaining not only to electrodynamics or mechanics but to any group of laws: The laws take the same form in all systems of reference, which are different from each other only by a uniform translational motion; they are invariant against the Lorentz transformation».

APPENDICE

SOMMARIO: 1. Concezione classica dello spazio e del tempo e trasformazioni di Galileo. — 2. Concezione relativistica dello spazio-tempo e trasformazioni di Lorentz. — 3. Simultaneità. Esempio di eventi che sono simultanei in un sistema di riferimento e non lo sono in un altro. — 4. Concetto di intervallo spazio-temporale e ordine tra eventi. — 5. Ordine tra eventi e salvezza della causalità. Esempio di catena causale. — 6. Calcolo dell'intervallo spazio-temporale per la recettizietà della revoca. — 7. Un esempio numerico di inversione dell'ordine temporale.

Quest'Appendice è pensata come supporto alla lettura, assolutamente non necessario, per il lettore interessato ad approfondire la questione con maggior rigore. Non si tratta di una trattazione parallela o autonoma dello stesso tema, ma semplicemente di un insieme di paragrafi slegati, ciascuno dei quali è dedicato a uno dei temi toccati nel testo. È opportuno, ad ogni modo, ricordare che quanto discusso nel presente contributo non ha, dal punto di vista fisico, carattere o pretesa di innovatività, trattandosi semplicemente di un utilizzo dei concetti chiave della relatività ristretta.

Per semplicità – qui come nel testo – si è considerata una sola coordinata spaziale, indicata con x.

1. *Concezione classica dello spazio e del tempo e trasformazioni di Galileo.* — Le equazioni (c.d. di Galileo) che nella fisica classica legano il tempo e lo spazio in diversi sistemi di riferimento (con origini inizialmente coincidenti) sono le seguenti:

$$t' = t;\ x' = x - vt \qquad (1A)$$

(dove v è la velocità dell'origine di ζ' rispetto a ζ)

Riguardo agli intervalli, si ottiene:

$$\Delta t' = \Delta t;\ \Delta x' = \Delta x - v\Delta t \qquad (1B)$$

Da un lato, dunque, il tempo è assoluto e identico in ogni sistema di riferimento; dall'altro, le distanze spaziali possono mutare a seconda del sistema di riferimento, ma mai tra eventi fra loro simultanei (in cui Δt è uguale a 0). Si noti, in particolare, che il mutamento di Δx è interamente riconducibile alla distanza percorsa dall'origine di ζ' rispetto a ζ, e non implica in alcun modo una variazione delle lunghezze.

2. *Concezione relativistica dello spazio-tempo e trasformazioni di Lorentz.* — Constatata l'impossibilità di leggere la realtà (in particolare i fenomeni

elettromagnetici[31]) utilizzando le equazioni galileiane, fu necessario individuare altre equazioni in grado di descrivere la realtà fisica. In particolare, costituiscono la base della relatività ristretta le c.d. trasformazioni di Lorentz:

$$t' = \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1-(\frac{v}{c})^2}};\ x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1-(\frac{v}{c})^2}} \tag{2A}$$

Dalle quali, riguardo agli intervalli, trattandosi di trasformazioni lineari, si ottiene:

$$\Delta t' = \frac{\Delta t - \frac{v}{c^2}\Delta x}{\sqrt{1-(\frac{v}{c})^2}};\ \Delta x' = \frac{\Delta x - v\Delta t}{\sqrt{1-(\frac{v}{c})^2}} \tag{2B}$$

Come accennato nel testo, le equazioni (2A) e (2B) si riducono alle equazioni (1A) e (1B) nel caso in cui si considerino velocità *v* trascurabili rispetto alla velocità della luce. Si può dimostrare quanto affermato calcolando il limite delle equazioni (2A) per *c* che tende a + ∞:

$$\lim_{c\to+\infty} t' = \lim_{c\to+\infty} \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1-(\frac{v}{c})^2}} = \frac{t - 0x}{\sqrt{1-0}} = t$$

$$\lim_{c\to+\infty} x' = \lim_{c\to+\infty} \frac{x - vt}{\sqrt{1-(\frac{v}{c})^2}} = \frac{x - 0t}{\sqrt{1-0}} = x$$

Come si vede, in entrambi i casi le equazioni (2A) si riducono alle equazioni (1A), ed è per questo motivo che per secoli le equazioni della fisica classica sono risultate pienamente idonee ad assolvere il loro scopo. Quando *v* è piccola, la differenza tra le due coppie di equazioni è infinitesimale.

3. *Simultaneità. Esempio di eventi che sono simultanei in un sistema di riferimento e non lo sono in un altro.* — Nel testo si è osservato che la simultaneità degli eventi non è un aspetto su cui tutti gli osservatori possono sempre concordare. Per dimostrare questa affermazione si considerino, ad esempio, i punti le cui coordinate nel sistema ζ soddisfano un'equazione del tipo $t = \frac{V}{c^2}x$ (dove *V* è una costante che rappresenta una velocità).

Nel sistema ζ, chiaramente, tali punti costituiscono eventi che si susseguono nel tempo e avvengono in punti distinti dello spazio: al variare di x varia

[31] Si veda l'*incipit* di A. Einstein, *Zur Elektrodynamik bewegter Körper*, in *Annalen der Physik*, 1905, IV, 17, pp. 891 ss., p. 891, l'articolo in cui la teoria della relatività ristretta fu formalizzata pubblicamente per la prima volta: «Daß die Elektrodynamik Maxwells – wie dieselbe gegenwärtig aufgefaßt zu werden pflegt – in ihrer Anwendung auf bewegte Korper zu Asymmetrien fuhrt, welche den Phänomenen nicht anzuhaften scheinen, ist bekannt» («È noto che l'elettrodinamica di Maxwell – come la si interpreta attualmente – nella sua applicazione ai corpi in movimento porta a delle asimmetrie, che non paiono essere inerenti ai fenomeni»). Cfr. anche Heisenberg, *Physics and Philosophy*, cit., pp. 110 ss.

(proporzionalmente) anche *t*. Si immagini, ad esempio, una serie di fari che, separati da una certa distanza, si illuminino uno alla volta in sequenza.

Per comprendere quale sia la coordinata temporale di tali eventi nel sistema di riferimento ζ' occorre utilizzare la prima delle equazioni (2A), sostituendo *t* con la formula che definisce la serie di eventi:

$$t' = \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1-(\frac{v}{c})^2}} = \frac{\frac{V}{c^2}x - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1-(\frac{v}{c})^2}} = \frac{x}{c^2}\frac{V-v}{\sqrt{1-(\frac{v}{c})^2}}$$

Evidentemente, da ciò consegue che se $V = v$ allora $t' = 0$, ed è dunque possibile che gli eventi in serie abbiano tutti coordinata temporale pari a 0 e siano cioè fra loro simultanei nel sistema di riferimento ζ'. Riprendendo l'esempio dei fari, ciò significa che nel sistema ζ' essi si illumineranno non in sequenza ma simultaneamente.

4. *Concetto di intervallo spazio-temporale e ordine tra eventi.* — Nel testo si è evidenziata l'importanza del concetto di intervallo spazio-temporale, invariante e dunque non influenzato dai cambiamenti di sistema di riferimento. Esso è definito come segue[32]:

$$\Delta s^2 = -c^2\Delta t^2 + \Delta x^2 \tag{4A}$$

Il fatto che Δs^2 sia un invariante è espresso dalla seguente identità, valida per qualsiasi coppia di eventi:

$$(\Delta s')^2 = (\Delta s)^2;\ \text{cioè}\ -c^2(\Delta t')^2 + (\Delta x')^2 = -c^2\Delta t^2 + \Delta x^2$$

Tale identità può essere dimostrata, con un po' di pazienza, semplicemente applicando le trasformazioni di Lorentz a $\Delta t'$ e $\Delta x'$:

$$(\Delta s')^2 = -c^2(\Delta t')^2 + (\Delta x')^2 = -c^2(\frac{\Delta t - \frac{v}{c^2}\Delta x}{\sqrt{1-(\frac{v}{c})^2}})^2 + (\frac{\Delta x - v\Delta t}{\sqrt{1-(\frac{v}{c})^2}})^2$$

$$= \frac{-c^2\Delta t^2 + 2v\Delta x\Delta t - c^2(\frac{v}{c^2}\Delta x)^2 + \Delta x^2 - 2v\Delta x\Delta t + (v\Delta t)^2}{1-(\frac{v}{c})^2}$$

$$= \frac{-c^2\Delta t^2(1-(\frac{v}{c})^2) + \Delta x^2(1-(\frac{v}{c}))^2}{1-(\frac{v}{c})^2} = \frac{(1-(\frac{v}{c})^2)(-c^2\Delta t^2 + \Delta x^2)}{1-(\frac{v}{c})^2}$$

---

[32] Ovviamente, la formula completa tiene conto di tutte e tre le dimensioni spaziali: $\Delta s^2 = -c^2\Delta t^2 + \Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2$. Più concisamente ed elegantemente, in relatività generale la formula è usualmente scritta come $ds^2 = g_{\mu\nu}dx^\mu dx^\nu$ (utilizzando la convenzione di sommatoria di Einstein).

$$= -c^2\Delta t^2 + \Delta x^2 = \Delta s^2$$

Tornando alla definizione di intervallo spazio-temporale (equazione (4A)), si può notare come il segno di Δs^2 (e dunque il tipo di intervallo) dipenda sostanzialmente dalla proporzione tra Δt e Δx: qualora il primo sia molto maggiore del secondo, si avranno intervalli di tipo tempo; in caso contrario, intervalli di tipo spazio. Il confine tra i due casi è costituito dagli intervalli in cui $\Delta s^2 = 0$, cioè $c^2\Delta t^2 = \Delta x^2$ e dunque $\left|\frac{\Delta x}{\Delta t}\right| = c$: l'insieme degli eventi tracciato dalle particelle che viaggiano alla velocità della luce (di qui l'espressione "intervalli di tipo luce").

Dimostriamo ora che gli intervalli di tipo tempo hanno ordine assoluto. Si considerino due eventi, E_1 ed E_2, che nel sistema ζ sono in successione (E_1 precede E_2); possiamo definire Δt come la differenza tra le coordinate temporali di E_2 ed E_1 nel sistema ζ, e $\Delta t'$ come la differenza tra le coordinate temporali di E_2 ed E_1 nel sistema ζ' (definendo analogamente Δx e $\Delta x'$). Dato che E_2 segue E_1, $\Delta t > 0$ e per dimostrare l'assolutezza dell'ordine è necessario dimostrare che si ha necessariamente $\Delta t' > 0$.

Essendo quello tra E_1 ed E_2 un intervallo di tipo tempo, $\Delta s^2 < 0$ e dunque

$$-c^2\Delta t^2 + \Delta x^2 < 0 \Rightarrow \frac{1}{c} < \left|\frac{\Delta t}{\Delta x}\right| \qquad (4B)$$

Tenendo a mente questa condizione, si consideri ora la trasformazione di Lorentz per il tempo (cioè la prima delle equazioni (2B)):

$$\Delta t' = \frac{\Delta t - \frac{v}{c^2}\Delta x}{\sqrt{1 - (\frac{v}{c})^2}}$$

Assumiamo, per assurdo, che $\Delta t'$ sia minore o uguale a zero (ricordando invece che Δt è maggiore di zero). Allora:

$$\Delta t - \frac{v}{c^2}\Delta x \leq 0 \Rightarrow \Delta t \leq \frac{v}{c^2}\Delta x \Rightarrow \Delta t \leq \frac{|v|}{c^2}|\Delta x| \Rightarrow \left|\frac{\Delta t}{\Delta x}\right| \leq \frac{|v|}{c^2}$$

Ma, come si vede sfruttando il vincolo (4B), ciò conduce a un assurdo:

$$\frac{1}{c} < \left|\frac{\Delta t}{\Delta x}\right| \leq \frac{|v|}{c^2} \Rightarrow 1 < \frac{|v|}{c} \Rightarrow |v| > c$$

Dunque, come volevasi dimostrare, $\Delta t'$ non potrà che essere positivo.

5. *Ordine tra eventi e salvezza della causalità. Esempio di catena causale.* — Come accennato nel testo, la perdita dell'assolutezza dell'ordine tra eventi non implica la necessità di abbandonare il concetto di causalità. A tal proposito sarà utile un esempio.

Si consideri il caso, penalistico, dell'omicida che spari un proiettile verso la vittima, immobile, colpendo quest'ultima dopo un tempo Δt. Denotiamo con E_1 l'evento "il proiettile lascia la pistola" e con E_2 l'evento "il proiettile raggiunge il bersaglio"; per comodità, adottiamo un primo sistema di riferimento ζ in cui l'evento E_1 ha coordinata spaziale 0 e coordinata temporale 0 (ciò equivale a misurare le distanze e i tempi dal punto e dal momento in cui il proiettile lascia la pistola). Se denotiamo con V la velocità del proiettile, in questo sistema di riferimento E_2 (l'evento "il proiettile raggiunge il bersaglio") ha coordinata temporale Δt e coordinata spaziale $V\Delta t$.

Calcoliamo ora l'intervallo spazio-temporale tra l'evento E_1 e l'evento E_2 con l'equazione (4A):

$$\Delta s^2 = -c^2\Delta t^2 + \Delta x^2 = -c^2\Delta t^2 + V^2\Delta t^2 = c^2\Delta t^2((\frac{V}{c})^2 - 1)$$

Il segno di tale quantità è negativo: se, infatti, la velocità V è inferiore alla velocità della luce c — e questa condizione è soddisfatta per definizione — il rapporto tra V e c è inferiore a 1, e dunque:

$$\frac{V}{c} < 1 \Rightarrow (\frac{V}{c})^2 - 1 < 0 \Rightarrow c^2\Delta t^2((\frac{V}{c})^2 - 1) < 0$$

Come si vede, Δs^2 è sempre minore di zero: ciò significa che l'intervallo tra E_1 ed E_2 è di tipo tempo, l'ordine dei due eventi è intatto e il nesso di causalità che lega lo sparo alla morte del soggetto non è a rischio.

6. *Calcolo dell'intervallo spazio-temporale per la recettizietà della revoca.* — Si consideri un sistema di riferimento ζ con origine nel luogo e nel tempo in cui α invia la sua accettazione a π; per semplicità, si ipotizzi che π e α mantengano tra di essi una distanza costante, indicata con d. Riprendiamo la situazione esaminata nel testo, indicando le coordinate spazio-temporali di ciascun evento:

Evento	Coordinata temporale	Coordinata spaziale
Invio dell'accettazione	$t_{ia} = 0$	0
Invio della revoca della proposta	t_{ir}	d
Ricezione dell'accettazione	t_{ra}	d
Ricezione della revoca	t_{rr}	0

Ipotizziamo ora che le comunicazioni tra π e α abbiano velocità *V*[33]; da ciò si ricava che

$$t_{ra} = \frac{d}{V}, \text{ e } t_{rr} = t_{ir} + \frac{d}{V}$$

Utilizzando questo risultato, di seguito la tabella aggiornata:

Evento	Coordinata temporale	Coordinata spaziale
Invio dell'accettazione	$t_{ia} = 0$	0
Invio della revoca della proposta	t_{ir}	d
Ricezione dell'accettazione	$\frac{d}{V}$	d
Ricezione della revoca	$t_{ir} + \frac{d}{V}$	0

Calcoliamo ora gli intervalli spazio-temporali delle due coppie di eventi che sono prese a riferimento nelle due interpretazioni.

Innanzitutto, la tesi della non recettizietà della revoca prende in esame gli eventi "ricezione dell'accettazione" e "invio della revoca". Quantomeno nel sistema di riferimento di π e α, cioè ζ, se la revoca viene inviata dopo l'accettazione allora il contratto non si perfeziona. Per comprendere se questo ordine sia il medesimo in ogni sistema di riferimento, occorre calcolare l'intervallo spazio-temporale tra i due eventi:

$$\Delta s^2 = -c^2 \Delta t^2 + \Delta x^2 = -c^2 (t_{ir} - t_{ra})^2 + 0^2$$

$$= -c^2 (t_{ir} - \frac{d}{V})^2 + 0 = -(c(t_{ir} - \frac{d}{V}))^2$$

Trattandosi dell'opposto di una quantità elevata al quadrato, il valore di Δs^2 è necessariamente minore o uguale a zero, mai positivo. Ciò implica che ogni osservatore sarà d'accordo sull'ordine tra i due eventi, non potranno esservi difformità a seconda del sistema di riferimento e vi sarà concordia sull'avvenuto perfezionamento del contratto.

Diverso il risultato nel secondo caso. La tesi della recettizietà della revoca prende in esame gli eventi "ricezione dell'accettazione" e "ricezione della revoca", e il test per comprendere se il contratto sia stato concluso è $t_{ra} < t_{rr}$. Nel sistema di π e α, cioè ζ, tale condizione è soddisfatta se

[33] L'ipotesi che tutte le comunicazioni abbiano la stessa velocità semplifica i calcoli ma non mina le conclusioni della dimostrazione, dato che lo scopo è mostrare l'esistenza anche di un solo caso in cui l'ordine non è assoluto.

$$\frac{d}{V} < t_{ir} + \frac{d}{V}, \text{ cioè } t_{ir} > 0$$

Affinché il contratto sia concluso è, insomma, sufficiente che la revoca sia inviata dopo l'accettazione; il che è ovvio, dato che nel modello sia la revoca sia l'accettazione si muovono alla stessa velocità V nel tragitto tra π e α. Così, nel sistema ζ la revoca è ricevuta dopo l'accettazione a condizione che essa sia stata inviata dopo di essa. Per verificare la tenuta di questa conclusione in altri sistemi di riferimento, occorre calcolare l'intervallo spazio-temporale Δs^2 della coppia di eventi:

$$\Delta s^2 = -c^2 \Delta t^2 + \Delta x^2 = -c^2 (t_{rr} - t_{ra})^2 + d^2$$

$$-c^2 (t_{ir} + \frac{d}{V} - \frac{d}{V})^2 + d^2 = -c^2 t_{ir}^2 + d^2$$

Si nota qui una differenza fondamentale con il caso precedente: il segno dell'intervallo spazio-temporale non è sempre negativo. In particolare, qualora si verifichi la condizione $-\frac{d}{c} < t_{ir} < \frac{d}{c}$, l'intervallo spazio-temporale sarà positivo, con la conseguenza che i due eventi saranno di tipo spazio e non di tipo tempo. Ciò comporta nella pratica che l'ordine tra i due eventi non è assoluto, e che esistono sistemi di riferimento in cui l'ordine degli eventi "ricezione dell'accettazione" e "invio della revoca" è opposto a quello tra gli stessi eventi misurato nel sistema di riferimento ζ.

Per trovare la velocità minima v di tali sistemi con ordine invertito, posto un intervallo spazio-temporale positivo (e dunque $-\frac{d}{c} < t_{ir} < \frac{d}{c}$), è sufficiente utilizzare la prima delle equazioni (2A). Si consideri, in particolare, il caso in cui per π e α il contratto non si sia concluso; in altre parole, il caso in cui $t_{ir} < 0$ (e dunque, condensando, $-\frac{d}{c} < t_{ir} < 0$). Allora,

$$t'_{ra} = \frac{t_{ra} - \frac{v}{c^2} x_{ra}}{\sqrt{1 - (\frac{v}{c})^2}} = \frac{\frac{d}{V} - \frac{v}{c^2} d}{\sqrt{1 - (\frac{v}{c})^2}} = \frac{\frac{d}{V}(1 - \frac{Vv}{c^2})}{\sqrt{1 - (\frac{v}{c})^2}} = t_{ra} \frac{(1 - \frac{Vv}{c^2})}{\sqrt{1 - (\frac{v}{c})^2}} \tag{6A}$$

$$t'_{rr} = \frac{t_{rr} - \frac{v}{c^2} x_{rr}}{\sqrt{1 - (\frac{v}{c})^2}} = \frac{t_{rr} - \frac{v}{c^2} 0}{\sqrt{1 - (\frac{v}{c})^2}} = \frac{t_{rr}}{\sqrt{1 - (\frac{v}{c})^2}} \tag{6B}$$

Tali valori rappresentano le coordinate temporali delle due ricezioni nel sistema ζ'. L'obiettivo, ora, è verificare a quali velocità v il contratto potrà ritenersi concluso nel sistema ζ' (a differenza che in ζ). È necessario, insomma, calcolare la velocità v minima tale che $t_{ra}' < t_{rr}'$:

$$\frac{t_{ra}(1-\frac{Vv}{c^2})}{\sqrt{1-(\frac{v}{c})^2}} < \frac{t_{rr}}{\sqrt{1-(\frac{v}{c})^2}} \Rightarrow t_{ra}(1-\frac{Vv}{c^2}) < t_{rr} \Rightarrow t_{ra}-t_{rr} < \frac{Vv}{c^2}t_{ra}$$

$$\Rightarrow \frac{d}{V}-\frac{d}{V}-t_{ir} < \frac{Vv}{c^2}\frac{d}{V} \Rightarrow -t_{ir} < \frac{dv}{c^2} \Rightarrow v > -t_{ir}\frac{c^2}{d}$$

Da cui, ricordando che $t_{ir} < 0$ (e che v deve essere inferiore alla velocità della luce), si ottiene la condizione finale[34]:

$$|t_{ir}|\frac{c^2}{d} < v < c \qquad \text{(6C)}$$

7. *Un esempio numerico di inversione dell'ordine temporale.* — Per concludere, si discuterà un esempio numerico di situazione concreta – ma futuristica, date le distanze interstellari – in cui si verificherebbe l'inversione.

Si consideri un soggetto, π, che trovandosi nei pressi di Alpha Centauri (distante circa 4 anni luce dal pianeta Terra) invii una proposta contrattuale ad α, che si trova sul pianeta Terra. Indichiamo con ζ il sistema di riferimento di π e α (che assumiamo in quiete tra loro). A $t = 0$ α invia l'accettazione a π; per caso, però, solo 12 ore prima (misurate in ζ) π aveva spedito la revoca della proposta. Si supponga che le comunicazioni avvengano con onde elettromagnetiche, alla velocità della luce c (pari a 3×10^8 m/s). La seguente tabella riepiloga la situazione nel sistema ζ:

EVENTO	COORDINATA SPAZIALE	COORDINATA TEMPORALE
Invio dell'accettazione	0	0
Invio della revoca della proposta	4×10^{16} m	-12 ore $= -43.200$ s
Ricezione dell'accettazione	4×10^{16} m	$\frac{4 \times 10^{16}\text{ m}}{3 \times 10^8\text{ m/s}} \approx 133.333.333$ s
Ricezione della revoca	0	-43.200 s $+ 133.333.333.$ s $= 133.290.1$

Adottando la tesi della recettizietà, nel sistema di riferimento ζ il contratto non è stato concluso: infatti, la revoca perviene ad α dodici ore prima che l'accettazione venga ricevuta da π. Come già discusso, però, in alcuni sistemi di riferimento l'ordine tra tali eventi è invertito. Si può mostrare che ciò avviene, ad esempio, in un sistema di riferimento ζ' che si muova alla velocità della sonda

[34] Non a caso, come si può verificare dall'equazione, più t_{ir} si avvicina a *-d/c* più v si avvicina a c. Con t_{ir} minore di *-d/c*, solo v superiori a c consentirebbero un'inversione (e non a caso l'intervallo spazio-temporale in tal caso sarebbe negativo).

Parker[35], pari a circa 2×10⁵ m/s (e dunque sufficiente in base all'equazione (6C)). Infatti, utilizzando direttamente le equazioni (6A) e (6B), può ricavarsi che:

$$t'_{ra} = t_{ra}\frac{(1-\frac{Vv}{c^2})}{\sqrt{1-(\frac{v}{c})^2}} = \frac{133.333.333\,\mathrm{s}\,(1-\frac{2\times10^5\ \mathrm{m/s}\times3\times10^8\ \mathrm{m/s}}{3\times10^8\ \mathrm{m/s}})}{\sqrt{1-(\frac{2\times10^5\ \mathrm{m/s}}{3\times10^8\ \mathrm{m/s}})^2}}$$
$$\approx 133.244.474\,\mathrm{s}$$

$$t'_{rr} = \frac{t_{rr}}{\sqrt{1-(\frac{v}{c})^2}} = \frac{133.290.133\,\mathrm{s}}{\sqrt{1-(\frac{2\times10^5\ \mathrm{m/s}}{3\times10^8\ \mathrm{m/s}})^2}} \approx 133.290.163\,\mathrm{s}$$

Accade quanto si voleva dimostrare: nel sistema di riferimento ζ', $t_{ra}' < t_{rr}'$ e dunque il contratto è concluso poiché l'accettazione è ricevuta da π prima che la revoca sia ricevuta da α, con uno scarto di poco più di 55.000 s – circa quindici ore. Esattamente il contrario di quanto accade nel sistema di riferimento ζ, ove il contratto non è concluso perché l'accettazione è ricevuta da π dopo che la revoca sia ricevuta da α, con uno scarto di 43.200 s – pari a dodici ore.

[35] La sonda Parker, ufficialmente Solar Probe Plus, è conosciuta per essere (ad oggi) l'oggetto più veloce mai costruito dall'umanità. Per dettagli sulla missione, N.J. FOX *et al.*, *The Solar Probe Plus Mission: Humanity's First Visit to Our Star*, in *Space Science Review*, 2016, 204, pp. 7 ss.