Aufgabe: Zeigen Sie, daß Information im Universum nur lichtartig übertragen werden kann, und daß sich die lichtartige Übertragung als Superposition aus einer raumartigen und einer zeitartigen Komponente zusammensetzen läßt. Beweisen Sie damit, daß der Ereignishorizont für raumartige Informationen durchlässig ist, und daß keine Information verlorengeht.

Lösung: Mit den Ergebnissen der vorangegangenen Aufgaben soll in Abb. 1 lediglich angedeutet werden, daß die Achsen der Lichtkegel von Universum und Antiuniversum aufeinander senkrecht stehen. In Wirklichkeit bilden die Kegelachsen jeweils Kreise, so daß sich Kegelspitzen und Basisflächen im Punkt des Urknalls berühren. Da jedes Universum aus Symmetriegründen aus einem äußeren und einem inneren Lichtkegel besteht,[1] die durch den Ereignishorizont getrennt sind und nicht überlappen können, stellt jedes Universum für sich einen Torus dar, wobei zwischen den beiden Tori ein Phasenunterschied von 90 Grad für alle vier Achsen besteht.

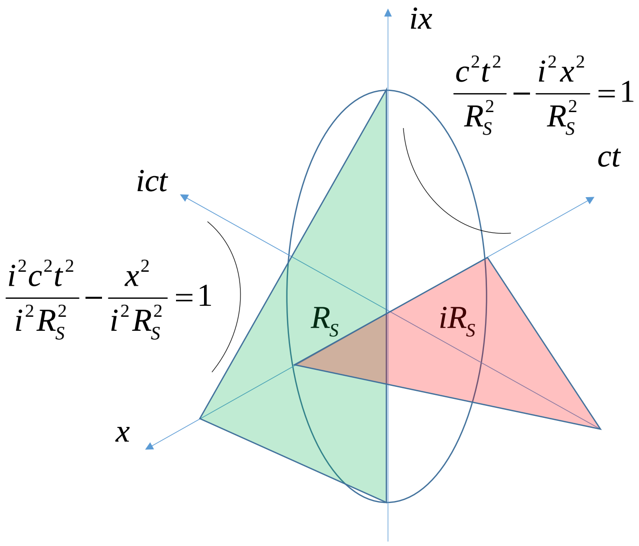

Abbildung 1. Korrekte Darstellungen des Doppeluniversums sind in drei Dimensionen kaum möglich

Seien (x_1', ct_1') und (x_2', ct_2') zwei Ereignisse der Raumzeit im bewegten System der Singularität. Wir haben dabei die Singularität, die unser Nachbarereignis ist, an den Ort x_1' auf der Gegenwartshyperfläche versetzt. Formal ist die Zeit an diesem Punkt der unseren gleich, d.h. $t_1' = t_2'$, weil der seit dem Urknall von einer gerade noch beobachtbaren Nachbargalaxie mit derselben Geschwindigkeit zurückgelegte Weg identisch dem unseren ist. Bei der Ausbreitung in x-Richtung handelt es sich um azimutale Koordinaten, so daß sich die Punkte x_1' und x_2' im Abstand des Ereignishorizonts $x_2' - x_1' = R_S$ befinden, also wegen $t_1' = t_2'$ im gleichen Abstand zur Singularität. Im Ruhesystem unserer Galaxis folgt daraus wegen

[1] Der äußere Lichtkegel ist der Komplementärkegel, der die Einhüllende beider Kegel zu einen Zylinder werden läßt. Krümmt man diesen Zylinder um 360 Grad, so daß sich Grund- und Deckfläche berühren, entsteht ein Torus.

$$t_2 - t_1 = \frac{t_2' - t_1' + \frac{v}{c^2}\left(x_2' - x_1'\right)}{\sqrt{1-\beta^2}} = \frac{\beta}{c}\frac{R_S}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

auf allen raumartigen Hyperflächen

$$x_2 - x_1 = \frac{x_2' - x_1' + v\left(t_2' - t_1'\right)}{\sqrt{1-\beta^2}} = \frac{R_S}{\sqrt{1-\beta^2}}.$$

Für einen im bewegten System ruhenden Beobachter $u' = 0$ ist

$$u = \frac{u' + v}{1 + \frac{v}{c^2}u'} = v,$$

und damit

$$x_2' - x_1' = \frac{x_2 - x_1 - v\left(t_2 - t_1\right)}{\sqrt{1-\beta^2}} = \frac{1 - \frac{v}{u}}{\sqrt{1-\beta^2}}\left(x_2 - x_1\right) = \left(1 - \frac{v}{u}\right)\frac{R_S}{1-\beta^2} = 0,$$

egal, wie schnell sich das All ausdehnt. Im Ruhesystem kann die Differenz $x_2 - x_1$ niemals null werden, der Zeitunterschied $t_2 - t_1$ jedoch sehr wohl, nämlich für $\beta = 0,$ wie man an dem Ausdruck

$$t_2 - t_1 = \frac{t_2' - t_1' + \frac{v}{c^2}\left(x_2' - x_1'\right)}{\sqrt{1-\beta^2}} = \frac{\beta}{c}\frac{R_S}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

erkennt. Ein in der Singularität ruhender Beobachter, der kein Licht aussendet, sieht also die Größe des Weltalls gar nicht, auch wenn er sich selbst noch so schnell bewegt.

Geht vom Urknall hingegen ein Lichtsignal aus, ist $u' = c,$ so daß wir nach dem Additionstheorem der Geschwindigkeiten auch in unserem ruhenden Bezugssystem den gleichen Wert für die Lichtgeschwindigkeit messen:

$$u = \frac{u' + v}{1 + \frac{v}{c^2}u'} = \frac{c + v}{1 + \frac{v}{c}} = c.$$

Wir sehen dann den Urknall im Abstand

$$x_2' - x_1' = \left(1 - \frac{v}{c}\right)\frac{R_S}{1-\beta^2} = \left(1-\beta\right)\frac{R_S}{\left(1+\beta\right)\left(1-\beta\right)} = \frac{1}{1+\beta}R_S$$

zur Zeit

$$t_2' - t_1' = \frac{1 - \frac{vu}{c^2}}{\sqrt{1-\beta^2}}\left(t_2 - t_1\right) = \frac{1 - \frac{v}{c}}{\sqrt{1-\beta^2}} \frac{\beta}{c} \frac{R_S}{\sqrt{1-\beta^2}} = \frac{\beta}{1+\beta} \frac{R_S}{c},$$

abhängig davon, wie schnell sich das All ausdehnt. Nur für $\beta = 0$ gilt $x_2' - x_1' = R_S$ und $t_2' = t_1'$, für $\beta = 1$ erscheinen sowohl der Schwarzschildradius als auch die Schwarzschildzeit auf die Hälfte geschrumpft. Setzen wir die im bewegten System gemessenen Größen ein, ergibt sich im Ruhesystem unserer Galaxis wieder der korrekte Abstand

$$x_2 - x_1 = \frac{x_2' - x_1' + v\left(t_2' - t_1'\right)}{\sqrt{1-\beta^2}} = \frac{1 + \frac{v}{u'}}{\sqrt{1-\beta^2}}\left(x_2' - x_1'\right) = \frac{1 + \frac{v}{c}}{\sqrt{1-\beta^2}} \frac{R_S}{1+\beta} = \frac{R_S}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

bzw. die korrekte Zeitdifferenz

$$t_2 - t_1 = \frac{t_2' - t_1' + \frac{v}{c^2}\left(x_2' - x_1'\right)}{\sqrt{1-\beta^2}} = \frac{1 + \frac{vu'}{c^2}}{\sqrt{1-\beta^2}}\left(t_2' - t_1'\right) = \frac{1 + \frac{v}{c}}{\sqrt{1-\beta^2}} \frac{\beta}{1+\beta} \frac{R_S}{c} = \frac{\beta}{c} \frac{R_S}{\sqrt{1-\beta^2}}.$$

Im System der Singularität folgt daraus die etwas merkwürdig anmutende Relation

$$c\left(t_2' - t_1'\right) + x_2' - x_1' = \frac{\beta}{1+\beta} R_S + \frac{1}{1+\beta} R_S = R_S.$$

Diese Bestimmungsgleichung können wir sowohl nach der Zeit als auch nach dem Ort auflösen:

$$c\left(t_2' - t_1'\right) = \frac{R_S}{1 + \frac{u'}{c}}, \quad x_2' - x_1' = \frac{R_S}{1 + \frac{c}{u'}}.$$

Sowie mit $u' = c$ Information übertragen wird, verschwindet auch das quadratische Wegelement des bewegten Bezugssystems,

$$\begin{aligned}\Delta s'^2 &= c^2\left(t_2' - t_1'\right)^2 - \left(x_2' - x_1'\right)^2 = \frac{c^2 R_S^2}{\left(c+u'\right)^2} - \frac{u'^2 R_S^2}{\left(c+u'\right)^2} = \frac{c^2 - u'^2}{\left(c+u'\right)^2} R_S^2 \\ &= \frac{\left(c+u'\right)\left(c-u'\right)}{\left(c+u'\right)^2} R_S^2 = \frac{c-u'}{c+u'} R_S^2.\end{aligned}$$

Dieses Wegelement ist nach Aufgabe [178] eine Superposition aus einer raumartigen Lateral- und einer zeitartigen Longitudinalbewegung,

$$\Delta s'^2 = \Delta s_\perp'^2 + \Delta s_\parallel'^2 = c^2\left(t_2' - t_1'\right)^2 - \left(x_2' - x_1'\right)^2 + c^2\left(t_3' - t_1'\right)^2 - \left(x_3' - x_1'\right)^2.$$

Betrachten wir zunächst die raumartige Lateralbewegung $\Delta s_\perp'^2$. Mit den relativistischen Differenzen

$$t_2' - t_1' = \frac{t_2 - t_1 - \frac{v}{c^2}(x_2 - x_1)}{\sqrt{1-\beta^2}} = \frac{1 - \frac{vu}{c^2}}{\sqrt{1-\beta^2}}(t_2 - t_1),$$

$$x_2' - x_1' = \frac{x_2 - x_1 - v(t_2 - t_1)}{\sqrt{1-\beta^2}} = \frac{1 - \frac{v}{u}}{\sqrt{1-\beta^2}}(x_2 - x_1)$$

lautet das laterale Wegelement im System der Singularität

$$\begin{aligned}
\Delta s_\perp'^2 &= c^2 (t_2' - t_1')^2 - (x_2' - x_1')^2 = \frac{1}{1-\beta^2}\left[c^2\left(1 - \frac{vu}{c^2}\right)^2 (t_2 - t_1)^2 - \left(1 - \frac{v}{u}\right)^2 (x_2 - x_1)^2\right] \\
&= \frac{1}{1-\beta^2}\left[\left(c^2 - 2vu + \frac{v^2u^2}{c^2}\right)(t_2 - t_1)^2 - \left(1 - 2\frac{v}{u} + \frac{v^2}{u^2}\right)(x_2 - x_1)^2\right] \\
&= \frac{1}{1-\beta^2}\left[c^2 (t_2 - t_1)^2 - (x_2 - x_1)^2\right] - \frac{2\beta c u}{1-\beta^2}\left[(t_2 - t_1)^2 - \frac{(x_2 - x_1)^2}{u^2}\right] \\
&\quad - \frac{\beta^2}{1-\beta^2}\left[c^2 \frac{(x_2 - x_1)^2}{u^2} - u^2 (t_2 - t_1)^2\right].
\end{aligned}$$

Da der gemischte Term wegen

$$(t_2 - t_1)^2 = \frac{(x_2 - x_1)^2}{u^2}$$

wegfällt, folgt nach Substitution von Raum und Zeit die Invarianz

$$\begin{aligned}
\Delta s_\perp'^2 &= \frac{1}{1-\beta^2}\left[c^2 (t_2 - t_1)^2 - (x_2 - x_1)^2\right] - \frac{\beta^2}{1-\beta^2}\left[c^2 \frac{(x_2 - x_1)^2}{u^2} - u^2 (t_2 - t_1)^2\right] \\
&= \frac{1}{1-\beta^2}\left[c^2 (t_2 - t_1)^2 - (x_2 - x_1)^2\right] - \frac{\beta^2}{1-\beta^2}\left[c^2 (t_2 - t_1)^2 - (x_2 - x_1)^2\right] \\
&= c^2 (t_2 - t_1)^2 - (x_2 - x_1)^2 = \Delta s_\perp^2.
\end{aligned}$$

Analog erhalten wir das longitudinale Wegelement $\Delta s_\parallel'^2$ aus den Differenzen

$$t_3' - t_1' = \frac{t_3 - t_1 - \frac{v}{c^2}(x_3 - x_1)}{\sqrt{1-\beta^2}} = \frac{1 - \frac{vu}{c^2}}{\sqrt{1-\beta^2}}(t_3 - t_1),$$

$$x_3' - x_1' = \frac{x_3 - x_1 - v(t_3 - t_1)}{\sqrt{1-\beta^2}} = \frac{1 - \frac{v}{u}}{\sqrt{1-\beta^2}}(x_3 - x_1)$$

zu

$$\Delta s_{\|}'^2 = c^2\left(t_3'-t_1'\right)^2-\left(x_3'-x_1'\right)^2 = \frac{1}{1-\beta^2}\left[c^2\left(1-\frac{vu}{c^2}\right)^2\left(t_3-t_1\right)^2-\left(1-\frac{v}{u}\right)^2\left(x_3-x_1\right)^2\right]$$
$$= \frac{1}{1-\beta^2}\left[\left(c^2-2vu+\frac{v^2u^2}{c^2}\right)\left(t_3-t_1\right)^2-\left(1-2\frac{v}{u}+\frac{v^2}{u^2}\right)\left(x_3-x_1\right)^2\right]$$
$$= \frac{1}{1-\beta^2}\left[c^2\left(t_3-t_1\right)^2-\left(x_3-x_1\right)^2\right]-\frac{2\beta cu}{1-\beta^2}\left[\left(t_3-t_1\right)^2-\frac{\left(x_3-x_1\right)^2}{u^2}\right]$$
$$-\frac{\beta^2}{1-\beta^2}\left[c^2\frac{\left(x_3-x_1\right)^2}{u^2}-u^2\left(t_3-t_1\right)^2\right].$$

Wegen

$$\left(t_3-t_1\right)^2 = \frac{\left(x_3-x_1\right)^2}{u^2}$$

folgt nach erneuter Substitution von Raum und Zeit die Invarianz

$$\Delta s_{\|}'^2 = \frac{1}{1-\beta^2}\left[c^2\left(t_3-t_1\right)^2-\left(x_3-x_1\right)^2\right]-\frac{\beta^2}{1-\beta^2}\left[c^2\frac{\left(x_3-x_1\right)^2}{u^2}-u^2\left(t_3-t_1\right)^2\right]$$
$$= \frac{1}{1-\beta^2}\left[c^2\left(t_3-t_1\right)^2-\left(x_3-x_1\right)^2\right]-\frac{\beta^2}{1-\beta^2}\left[c^2\left(t_3-t_1\right)^2-\left(x_3-x_1\right)^2\right]$$
$$= c^2\left(t_3-t_1\right)^2-\left(x_3-x_1\right)^2 = \Delta s_{\|}^2,$$

und zwar unabhängig von der Größe von β. Insgesamt ist das totale Wegelement gegeben durch

$$\Delta s'^2 = \Delta s_{\perp}'^2+\Delta s_{\|}'^2 = \Delta s_{\perp}^2+\Delta s_{\|}^2.$$

Im Ruhesystem unserer Galaxis hingegen ergeben sich für die relativistischen Differenzen folgende Werte

$$t_2-t_1 = \frac{t_2'-t_1'+\frac{v}{c^2}\left(x_2'-x_1'\right)}{\sqrt{1-\beta^2}} = \frac{1+\frac{vu'}{c^2}}{\sqrt{1-\beta^2}}\left(t_2'-t_1'\right),$$
$$x_2-x_1 = \frac{x_2'-x_1'+v\left(t_2'-t_1'\right)}{\sqrt{1-\beta^2}} = \frac{1+\frac{v}{u'}}{\sqrt{1-\beta^2}}\left(x_2'-x_1'\right).$$

Bei raumartiger Bewegung folgt für das laterale Wegelement die Beziehung

$$\Delta s_\perp^2 = c^2\left(t_2-t_1\right)^2-\left(x_2-x_1\right)^2 = \frac{1}{1-\beta^2}\left[c^2\left(1+\frac{vu'}{c^2}\right)^2\left(t_2'-t_1'\right)^2-\left(1+\frac{v}{u'}\right)^2\left(x_2'-x_1'\right)^2\right]$$

$$=\frac{1}{1-\beta^2}\left[\left(c^2+2vu'+\frac{v^2u'^2}{c^2}\right)\left(t_2'-t_1'\right)^2-\left(1+2\frac{v}{u'}+\frac{v^2}{u'^2}\right)^2\left(x_2'-x_1'\right)^2\right]$$

$$=\frac{1}{1-\beta^2}\left[c^2\left(t_2'-t_1'\right)^2-\left(x_2'-x_1'\right)^2\right]+\frac{2\beta cu'}{1-\beta^2}\left[\left(t_2'-t_1'\right)^2-\frac{\left(x_2'-x_1'\right)^2}{u'^2}\right]$$

$$-\frac{\beta^2}{1-\beta^2}\left[c^2\frac{\left(x_2'-x_1'\right)^2}{u'^2}-u'^2\left(t_2'-t_1'\right)^2\right].$$

Da der gemischte Term wegen

$$\left(t_2'-t_1'\right)^2=\frac{\left(x_2'-x_1'\right)^2}{u'^2}$$

wieder entfällt, folgt nach Substitution der Raum- und Zeitdifferenzen

$$\Delta s_\perp^2=\frac{1}{1-\beta^2}\left[c^2\left(t_2'-t_1'\right)^2-\left(x_2'-x_1'\right)^2\right]-\frac{\beta^2}{1-\beta^2}\left[c^2\frac{\left(x_2'-x_1'\right)^2}{u'^2}-u'^2\left(t_2'-t_1'\right)^2\right]$$

$$=\frac{1}{1-\beta^2}\left[c^2\left(t_2'-t_1'\right)^2-\left(x_2'-x_1'\right)^2\right]-\frac{\beta^2}{1-\beta^2}\left[c^2\left(t_2'-t_1'\right)^2-\left(x_2'-x_1'\right)^2\right]$$

$$=c^2\left(t_2'-t_1'\right)^2-\left(x_2'-x_1'\right)^2=\Delta s_\perp'^2.$$

Entsprechend ergeben sich im Ruhesystem unserer Galaxis bei longitudinaler, d.h. zeitartiger Bewegung folgende Abstände:

$$t_3-t_1=\frac{t_3'-t_1'+\frac{v}{c^2}\left(x_3'-x_1'\right)}{\sqrt{1-\beta^2}}=\frac{1+\frac{vu'}{c^2}}{\sqrt{1-\beta^2}}\left(t_3'-t_1'\right),$$

$$x_3-x_1=\frac{x_3'-x_1'+v\left(t_3'-t_1'\right)}{\sqrt{1-\beta^2}}=\frac{1+\frac{v}{u'}}{\sqrt{1-\beta^2}}\left(x_3'-x_1'\right).$$

Damit lautet das quadratische Wegelement längs der Zeitachse

$$\begin{aligned}\Delta s_{\|}^2 &= c^2\left(t_3-t_1\right)^2-\left(x_3-x_1\right)^2=\frac{1}{1-\beta^2}\left[c^2\left(1+\frac{vu'}{c^2}\right)^2\left(t_3'-t_1'\right)^2-\left(1+\frac{v}{u'}\right)^2\left(x_3'-x_1'\right)^2\right]\\
&=\frac{1}{1-\beta^2}\left[\left(c^2+2vu'+\frac{v^2u'^2}{c^2}\right)\left(t_3'-t_1'\right)^2-\left(1+2\frac{v}{u'}+\frac{v^2}{u'^2}\right)^2\left(x_3'-x_1'\right)^2\right]\\
&=\frac{1}{1-\beta^2}\left[c^2\left(t_3'-t_1'\right)^2-\left(x_3'-x_1'\right)^2\right]+\frac{2\beta cu'}{1-\beta^2}\left[\left(t_3'-t_1'\right)^2-\frac{\left(x_3'-x_1'\right)^2}{u'^2}\right]\\
&\quad-\frac{\beta^2}{1-\beta^2}\left[c^2\frac{\left(x_3'-x_1'\right)^2}{u'^2}-u'^2\left(t_3'-t_1'\right)^2\right].\end{aligned}$$

Wie gehabt verschwindet der gemischte Term wegen

$$\left(t_3'-t_1'\right)^2=\frac{\left(x_3'-x_1'\right)^2}{u'^2},$$

und es folgt nach Substitution von Raum und Zeit der Ausdruck

$$\begin{aligned}\Delta s_{\|}^2 &= \frac{1}{1-\beta^2}\left[c^2\left(t_3'-t_1'\right)^2-\left(x_3'-x_1'\right)^2\right]-\frac{\beta^2}{1-\beta^2}\left[c^2\frac{\left(x_3'-x_1'\right)^2}{u'^2}-u'^2\left(t_3'-t_1'\right)^2\right]\\
&=\frac{1}{1-\beta^2}\left[c^2\left(t_3'-t_1'\right)^2-\left(x_3'-x_1'\right)^2\right]-\frac{\beta^2}{1-\beta^2}\left[c^2\left(t_3'-t_1'\right)^2-\left(x_3'-x_1'\right)^2\right]\\
&=c^2\left(t_3'-t_1'\right)^2-\left(x_3'-x_1'\right)^2=\Delta s_{\|}'^2.\end{aligned}$$

Die Rückrechnung bestätigt also nochmals die Invarianz

$$\Delta s^2=\Delta s_\perp^2+\Delta s_{\|}^2=\Delta s_\perp'^2+\Delta s_{\|}'^2=\Delta s'^2.$$

Setzen wir nun die für das bewegte System der Singularität geltenden Beziehungen

$$\begin{aligned}&c\left(t_2'-t_1'\right)=0, \quad x_2'-x_1'=r,\\ &u'\left(t_3'-t_1'\right)=r, \quad x_3'-x_1'=0\end{aligned}$$

in die relativistischen Terme

$$\begin{aligned}t_2-t_1&=\frac{t_2'-t_1'+\frac{v}{c^2}\left(x_2'-x_1'\right)}{\sqrt{1-\beta^2}}, \quad x_2-x_1=\frac{x_2'-x_1'+v\left(t_2'-t_1'\right)}{\sqrt{1-\beta^2}},\\
t_3-t_1&=\frac{t_3'-t_1'+\frac{v}{c^2}\left(x_3'-x_1'\right)}{\sqrt{1-\beta^2}}, \quad x_3-x_1=\frac{x_3'-x_1'+v\left(t_3'-t_1'\right)}{\sqrt{1-\beta^2}}\end{aligned}$$

des Ruhesystems ein, vereinfachen sich diese Gleichungen zu

$$t_2 - t_1 = \frac{\beta}{c}\frac{x_2' - x_1'}{\sqrt{1-\beta^2}}, \qquad x_2 - x_1 = \frac{x_2' - x_1'}{\sqrt{1-\beta^2}},$$
$$t_3 - t_1 = \frac{t_3' - t_1'}{\sqrt{1-\beta^2}} = \frac{x_2' - x_1'}{u'\sqrt{1-\beta^2}}, \quad x_3 - x_1 = \frac{\beta c\left(t_3' - t_1'\right)}{\sqrt{1-\beta^2}} = \frac{\beta c\left(x_2' - x_1'\right)}{u'\sqrt{1-\beta^2}}.$$

Nach dem Satz des Pythagoras gilt

$$\begin{aligned}
\Delta s^2 &= c^2\left(t_2 - t_1\right)^2 - \left(x_2 - x_1\right)^2 + c^2\left(t_3 - t_1\right)^2 - \left(x_3 - x_1\right)^2 \\
&= \beta^2\frac{\left(x_2' - x_1'\right)^2}{1-\beta^2} - \frac{\left(x_2' - x_1'\right)^2}{1-\beta^2} + \frac{c^2}{u'^2}\frac{\left(x_2' - x_1'\right)^2}{1-\beta^2} - \beta^2\frac{c^2}{u'^2}\frac{\left(x_2' - x_1'\right)^2}{1-\beta^2} \\
&= \left[-\left(1-\beta^2\right) + \frac{c^2}{u'^2}\left(1-\beta^2\right)\right]\frac{\left(x_2' - x_1'\right)^2}{1-\beta^2} = \left(\frac{c^2}{u'^2} - 1\right)\left(x_2' - x_1'\right)^2,
\end{aligned}$$

und für $u' = c$ ist $\Delta s^2 = \Delta s_\perp^2 + \Delta s_\parallel^2 = 0.$ Analog läßt sich zeigen, daß sich die relativistischen Terme

$$t_2' - t_1' = \frac{t_2 - t_1 - \frac{v}{c^2}\left(x_2 - x_1\right)}{\sqrt{1-\beta^2}}, \quad x_2' - x_1' = \frac{x_2 - x_1 - v\left(t_2 - t_1\right)}{\sqrt{1-\beta^2}},$$
$$t_3' - t_1' = \frac{t_3 - t_1 - \frac{v}{c^2}\left(x_3 - x_1\right)}{\sqrt{1-\beta^2}}, \quad x_3' - x_1' = \frac{x_3 - x_1 - v\left(t_3 - t_1\right)}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

unter der Annahme, daß das Universum ein Schwarzes Loch ist, mit den Bedingungen

$$\begin{aligned}
&c\left(t_2 - t_1\right) = 0, \quad x_2 - x_1 = r, \\
&u\left(t_3 - t_1\right) = r, \quad x_3 - x_1 = 0
\end{aligned}$$

wie folgt vereinfachen lassen:

$$t_2' - t_1' = -\frac{\beta}{c}\frac{x_2 - x_1}{\sqrt{1-\beta^2}}, \qquad x_2' - x_1' = \frac{x_2 - x_1}{\sqrt{1-\beta^2}},$$
$$t_3' - t_1' = \frac{t_3 - t_1}{\sqrt{1-\beta^2}} = \frac{x_2 - x_1}{u\sqrt{1-\beta^2}}, \quad x_3' - x_1' = -\frac{\beta c\left(t_3 - t_1\right)}{\sqrt{1-\beta^2}} = -\frac{\beta c\left(x_2 - x_1\right)}{u\sqrt{1-\beta^2}}.$$

Damit erhalten wir für das totale Wegelement im bewegten Bezugssystem die Relation

$$\begin{aligned}
\Delta s'^2 &= c^2\left(t_2' - t_1'\right)^2 - \left(x_2' - x_1'\right)^2 + c^2\left(t_3' - t_1'\right)^2 - \left(x_3' - x_1'\right)^2 \\
&= -\left(1-\beta^2\right)\frac{\left(x_2 - x_1\right)^2}{1-\beta^2} + \left(1-\beta^2\right)\frac{c^2}{u^2}\frac{\left(x_2 - x_1\right)^2}{1-\beta^2},
\end{aligned}$$

die im Falle von $u = c$ unabhängig von der Wahl von β identisch verschwindet. Information legt also im vierdimensionalen Raum keinen Weg zurück. Die Übertragung erfolgt instantan, ähnlich der Ausbreitung der Wellenfunktion. Zwei Messungen können sich daher über beliebige Entfernungen gegenseitig beeinflussen. In diesem Sinne ist das Doppeluniversum nichtlokal. Lokalität ist in der Physik eine Eigenschaft, wonach Vorgänge nur unmittelbare Auswirkungen auf ihre direkte räumliche Umgebung haben. Nichtlokalität hingegen läßt auch Effekte mit Fernwirkungen zu. Das wiederum heißt, daß sich das sichtbare All wegen seiner Lichtartigkeit in einer Entfernung des Schwarzschildradius von der Singularität befindet und die räumliche Ausdehnung sich bis zum Urknall zurückverfolgen läßt. In der Quantentheorie kann sich daher auch bei scheinbar weit voneinander entfernten Teilchen die Messung des einen unmittelbar auf das andere auswirken, da sich beide in bezug auf die Singularität zur gleichen Zeit am gleichen Ort befinden. Das heißt auch, daß wir vom Urknall kein stehendes Bild empfangen können, sondern nur ein bewegtes. Und dennoch sind Objekte vorstellbar, die sich an zwei voneinander entfernten Punkten befinden, von denen wir ohne Signalübertragung mittels Photonen keine Kenntnis haben, weil sie auf der Kugeloberfläche außerhalb unseres lateralen Ereignishorizonts liegen. Da sie sich jedoch in bezug auf die Singularität immer noch auf dem Ereignishorizont befinden, können sie auch miteinander verschränkt sein, so daß die Lichtgeschwindigkeit kein begrenzendes Element mehr für Lokalität ist. Auch wenn sich nichts schneller bewegen kann als das Licht, ist die Wellenfunktion trotzdem in Bereichen faßbar, die sich außerhalb unserer optischen Reichweite befinden.

Damit haben wir gezeigt, daß das gesamte Universum bei Übertragung der Daten mit Lichtgeschwindigkeit lichtartig ist. In dem Moment, wo wir eine Galaxie sehen, ist sie genauso alt wie unsere eigene Galaxis, ohne daß es dazu eines überlichtschnellen Informationsaustauschs bedarf. Verschränkte Zustände können wir folglich zur selben Zeit an zwei unterschiedlichen Orten messen.

