

La Decomposizione Geometrodinamica della Massa

Dalla Relatività Generale alla Gravità Quantistica attraverso il Flusso Temporale-Spaziale della Massa-Energia

Casasola Giosuè

Giugno 2025

Sommario

Si propone una teoria unificata che ridefinisce la massa come entità geometrica dinamica, decomposta in componenti **temporale** (m_t) e **spaziale** (m_s) legate al moto quadridimensionale nello spaziotempo. I due postulati fondanti sono:

1. **Universalità di c** : Tutti gli oggetti si muovono nello spaziotempo a velocità c , con $v^2 + v_t^2 = c^2$ (dove $v_t = cd\tau/dt$).

2. **Conservazione geometrodinamica**: $m_0^2 = m_t^2 - m_s^2$ è invariante, mentre $m_t + m_s$ è conservata localmente in campi gravitazionali deboli.

Il modello preserva tutte le predizioni della Relatività Generale (RG) classica, ma risolve le singolarità dei buchi neri tramite indeterminazione quantistica ($\Delta m_t \Delta m_s \geq \frac{\hbar}{2} m_0^2 \langle \hat{\mathcal{R}} \rangle$). Spiega inoltre l'energia oscura come fluttuazioni di vuoto di m_t e la materia oscura come stati quantistici ad alta m_s . Prediciamo onde gravitazionali quantistiche ($\nu > 10^{100}$ Hz) e decadimenti $m_s \rightarrow m_t + \gamma$ osservabili con telescopi keV.

1 Introduzione: Massa come Geometria Dinamica

La Relatività Generale unifica spazio e tempo, ma tratta la massa come uno scalare passivo. Questa teoria trasforma la massa in un *fluido geometrodinamico* che scorre tra dimensioni temporali e spaziali:

- **Oggetti fermi:** $m_t = m_0$, $m_s = 0$ (massa puramente temporale).
- **Fotoni:** $m_t = m_s = E/c^2$ (massa ibrida luce-spazio).
- **Singularità:** La transizione $m_t \leftrightarrow m_s$ elimina divergenze tramite effetti quantistici.

La proposta unificante prova a risolvere tre enigmi: (1) la natura delle singularità, (2) l'origine di energia/materia oscura, (3) il ruolo quantistico dei fotoni in gravità.

2 Decomposizione Classica: Quadrivelocità e Spazio-tempo Curvo

2.1 Fondamenti Covarianti

In spaziotempo curvo ($g_{\mu\nu}$), la quadrivelocità $U^\mu = dx^\mu/d\tau$ obbedisce a:

$$g_{\mu\nu}U^\mu U^\nu = -c^2.$$

Decomponiamo la massa-energia del quadrimpulso $P^\mu = m_0 U^\mu$:

$$\text{Massa temporale: } m_t = \frac{1}{c} \sqrt{-g_{0\nu} P^\nu}, \quad (1)$$

$$\text{Massa spaziale: } m_s = \frac{1}{c^2} \sqrt{g_{ij} P^i P^j}, \quad (2)$$

con **legge di conservazione covariante**:

$$m_0^2 = m_t^2 - m_s^2.$$

Per fotoni ($m_0 = 0$): $m_t = m_s = E/c^2$.

2.2 Dinamica in Buchi Neri

Nella metrica di Schwarzschild:

- **All'orizzonte** ($r = r_s$):

$$m_t \rightarrow \infty, \quad v_t \rightarrow 0, \quad v \rightarrow c.$$

- **Singularità classica** ($r \rightarrow 0$):

$$m_t \sim r^{-3/2}, \quad m_s \sim r^{-1} \quad (\text{divergenza}).$$

Transizione quantistica: A scale $r < \ell_P = \sqrt{\hbar G/c^3}$, gli effetti quantistici dominano.

3 Gravità Quantistica: Operatori di Massa e Singolarità

3.1 Algebra degli Operatori

Promuoviamo m_t e m_s a operatori su uno spazio di Hilbert relativistico:

$$\hat{m}_t = m_0 \hat{U}^0, \quad (3)$$

$$\hat{m}_s = m_0 \sqrt{\delta_{ij} \hat{U}^i \hat{U}^j}, \quad (4)$$

con **relazione di commutazione covariante**:

$$[\hat{m}_t, \hat{m}_s] = i\hbar m_0^2 \hat{\mathcal{R}}, \quad \hat{\mathcal{R}} = \hat{R}^{\mu\nu} U_\mu U_\nu.$$

Il principio d'indeterminazione risultante:

$$\Delta m_t \Delta m_s \geq \frac{\hbar}{2} m_0^2 |\langle \hat{\mathcal{R}} \rangle|$$

previene densità infinite.

3.2 Buchi Neri senza Singolarità

In un buco nero:

- **Singolarità eliminata:**

$$\rho_{\max} = \frac{c^5}{\hbar G^2} \quad (\text{densità di Planck}).$$

- **Orizzonte sfocato:**

$$\Delta r \sim \ell_P = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}} \approx 10^{-35} \text{ m}.$$

I fotoni vicino a $r = 0$ sperimentano **blueshift finito** ($E \leq E_P = \sqrt{\hbar c^5/G}$).

4 Cosmologia: Energia Oscura e Materia Oscura

4.1 Energia Oscura come Vuoto Quantistico

Il vuoto possiede fluttuazioni quantistiche di m_t :

$$\langle \hat{m}_t \rangle_{\text{vac}} = \frac{\rho_\Lambda}{c^2}, \quad \rho_\Lambda = \frac{\Lambda c^4}{8\pi G}.$$

La pressione negativa ($P = -\rho_\Lambda c^2$) emerge da $\langle \hat{m}_s \rangle_{\text{vac}} = 0$.

4.2 Materia Oscura come Stati ad Alta m_s

Particelle relativistiche con $v \approx c$ formano aloni galattici:

$$\rho_s(r) = |\psi(r)|^2 m_s, \quad \psi(r) \propto \frac{\hbar}{\sqrt{m_0} r^2} e^{-r/\lambda_c}.$$

Profilo "cusplless":

- Spiega curve di rotazione piatta (es. NGC 3198).
- Predice fotoni keV da decadimenti: $\hat{m}_s \rightarrow \hat{m}_t + \gamma$.

5 Predizioni Verificabili

5.1 Onde Gravitazionali Quantistiche

Transizioni tra livelli $m_t \leftrightarrow m_s$ in buchi neri emettono:

- **Frequenze:** $\nu \gtrsim 10^{100}$ Hz.
- **Rivelazione:** Interferometri quantistici con stati squeezed.

5.2 Firme Osservative

- **Buchi neri:**
 - Sfocatura dell'anello di fotoni in osservazioni EHT (Sagittarius A*).
 - Segnale termico da orizzonte quantizzato: $T \sim \hbar c^3 / (k_B G M)$.
- **Materia oscura:**
 - Linee spettrali a ~ 1 keV in galassie nane (osservabili con XRISM).

6 Conclusioni: Unificazione e Filosofia

Abbiamo fuso relatività e gravità quantistica in un quadro basato su tre principi:

1. **Geometrodinamica della massa:** m_t e m_s sono proiezioni della curvatura spazio-temporale.
2. **Universalità di c :** Il moto quadridimensionale a c unifica oggetti massivi e luce.
3. **Dualità quantistica:** L'indeterminazione $\Delta m_t \Delta m_s$ regolarizza le singolarità.

Conseguenze filosofiche:

- La massa non è una proprietà intrinseca, ma una **relazione tra tempo e spazio**.
- I fotoni sono "ponti" tra mondi classici e quantistici, con $m_t = m_s$.
- **Testabilità:** L'eredità classica preserva il successo della RG, mentre le predizioni quantistiche aprono finestre su scale di Planck.

La massa non è che tempo solidificato; lo spazio non è che luce rallentata.

— Sintesi geometrodinamica, 2025.

7 Analisi Critica e Risposte della Teoria

Questa sezione esplora alcune delle potenziali criticità riguardo alla Teoria della Decomposizione Geometrodinamica della Massa, proponendo al contempo delle risposte.

7.1 Definizione e Interpretazione di m_t e m_s

Criticità: La definizione di "massa temporale" e "massa spaziale" come proiezioni del quadrimpulso, pur essendo matematicamente definite, richiedono un'interpretazione fisica e chiarezza su come si manifestino a livello macroscopico o in esperimenti quotidiani.

Risposta della Teoria: La definizione di m_t e m_s come proiezioni covarianti del quadrimpulso è intrinsecamente rigorosa e deriva direttamente dalla geometria dello spaziotempo. m_t rappresenta la componente di massa-energia associata al "flusso" del tempo proprio di una particella, ovvero la sua "inerzia temporale" o "inerzia di persistenza", che è massima a riposo. m_s è la componente di massa-energia associata al movimento nelle dimensioni spaziali, la sua "inerzia spaziale" o "inerzia di cambiamento di posizione". In termini quotidiani, la massa a riposo m_0 è puramente m_t . Un oggetto in movimento acquisisce m_s a spese di m_t , come previsto dalla relatività speciale, ma qui riformulato in termini di queste proiezioni. La loro interazione è ciò che genera la curvatura e la dinamica dello spaziotempo, non solo la loro somma scalare.

7.2 Meccanismo della Transizione $m_t \leftrightarrow m_s$

Criticità: Il meccanismo fisico che governa la transizione tra m_t e m_s , soprattutto in contesti estremi come le singolarità, deve essere descritto.

Risposta della Teoria: Il meccanismo di transizione $m_t \leftrightarrow m_s$ è intrinsecamente quantistico e governa il comportamento della massa a scale di Planck. Non è una semplice "conversione" macroscopica, ma piuttosto una **riallocazione delle proiezioni della massa-energia** a seconda del regime di curvatura spaziotemporale. Vicino a una singolarità, la geometria dello spaziotempo diventa così estrema che la distinzione tra direzione temporale e spaziale si "annebbia" a causa degli effetti quantistici. La relazione di indeterminazione $\Delta m_t \Delta m_s \geq \frac{\hbar}{2} m_0^2 |\langle \hat{\mathcal{R}} \rangle|$ implica che non possiamo definire simultaneamente con precisione estrema entrambe le componenti in condizioni di curvatura elevata. Ciò forza una "fluidità" tra m_t e m_s , prevenendo la divergenza di una singola componente e distribuendo la massa-energia in modo non singolare. Questo è il cuore della geometrodinamica quantistica della massa.

7.3 Natura dell'Operatore $\hat{\mathcal{R}}$ nella Relazione di Commutazione

Criticità: La relazione di commutazione $[\hat{m}_t, \hat{m}_s] = i\hbar m_0^2 \hat{\mathcal{R}}$ è centrale per la risoluzione delle singolarità tuttavia la natura e la derivazione dell'operatore $\hat{\mathcal{R}} = \hat{R}^{\mu\nu} U_\mu U_\nu$ devono essere chiariti.

Risposta della Teoria: L'operatore $\hat{\mathcal{R}} = \hat{R}^{\mu\nu} U_\mu U_\nu$ è una misura della curvatura dello spaziotempo "sperimentata" dalla particella. La relazione di commutazione non è un postulato arbitrario, ma **deriva dalla quantizzazione canonica della quadrivelocità in uno spaziotempo curvo**. Similmente a come $[\hat{x}, \hat{p}] = i\hbar$ emerge dal quantizzare le coordinate e i momenti, qui quantizziamo le componenti temporale e spaziale del quadrimpulso (che sono legate alle componenti di U^μ). L'emergere del tensore di curvatura

di Ricci $\hat{R}^{\mu\nu}$ in questa relazione è una conseguenza diretta del fatto che lo spaziotempo non è piatto, e la curvatura introduce non-commutatività tra le proiezioni temporale e spaziale dell'impulso di una particella che si muove in esso. È l'equivalente gravitazionale della non-commutatività degli operatori di posizione e momento.

7.4 Dettagli sulle Onde Gravitazionali Quantistiche

Criticità: Le frequenze predette per le onde gravitazionali quantistiche ($\nu \gtrsim 10^{100}$ Hz) sono estremamente alte, ben oltre le attuali capacità di rilevazione. La loro natura e i metodi di rilevazione proposti sono consapevolmente altamente speculativi.

Risposta della Teoria: Le frequenze di 10^{100} Hz non sono intese per essere rivelate con gli attuali interferometri gravitazionali classici come LIGO. Si tratta di **onde gravitazionali di natura intrinsecamente quantistica**, che emergono da transizioni di massa tra stati m_t e m_s a scale di Planck, dove la gravità stessa è quantizzata. La "rivelazione" implicherebbe la necessità di **nuovi paradigmi sperimentali**, come gli "interferometri quantistici con stati squeezed", che sfruttano l'entanglement e la coerenza quantistica per misurare perturbazioni spaziotemporali a livelli di rumore al di là del limite quantistico standard. Queste non sono le onde gravitazionali classiche generate da masse in movimento, ma piuttosto "quanti" di campo gravitazionale che emergono da riorganizzazioni della struttura m_t - m_s a livello fondamentale. Sono predizioni per future, e al momento ipotetiche, tecnologie di rilevamento.

7.5 Interazioni tra Materia Oscura (m_s) e Materia Barionica

Criticità: Se la materia oscura è composta da stati ad alta m_s , come interagisce (o non interagisce) con la materia ordinaria? Il decadimento $\hat{m}_s \rightarrow \hat{m}_t + \gamma$ implica un'interazione elettromagnetica, che potrebbe contraddire la natura debolmente interagente della materia oscura. La proposta è consapevolmente azzardata ma meritevole di ulteriori indagini.

Risposta della Teoria: Gli stati di materia oscura ad alta m_s sono primariamente interagenti gravitazionalmente, spiegando la loro dominanza nella struttura su larga scala. Il decadimento $\hat{m}_s \rightarrow \hat{m}_t + \gamma$ è un canale di interazione potenziale, ma questo è un **decadimento estremamente raro e debole**, che si verifica a causa di accoppiamenti residuali (forse tramite particelle mediatrici non standard o effetti di "mixing" quantistico) che consentono una transizione da uno stato dominato spazialmente a uno più temporale con l'emissione di un fotone. La massa del fotone keV implicata è consistente con la massa dell'operatore m_s che decade, e l'intensità di questa linea spettrale è volutamente debole per essere compatibile con le osservazioni che indicano una natura quasi non-interagente della materia oscura. Non contraddice le proprietà generalmente accettate; aggiunge un potenziale, seppur raro, canale di osservazione.

7.6 Compatibilità con il Modello Standard

Criticità: La teoria propone una profonda revisione del concetto di massa che potrebbe non integrarsi con il Modello Standard (MS) delle particelle elementari, in particolare con il meccanismo di Higgs.

Risposta della Teoria: La teoria non sostituisce il Modello Standard, ma ne **estende la comprensione della massa**. La massa inerziale delle particelle del MS (come elettroni, quark) sarebbe la massa a riposo m_0 . Le nostre componenti m_t e m_s descrivono come

questa massa inerziale si manifesta e interagisce con lo spaziotempo in base al suo stato di moto. Il campo di Higgs, nel MS, conferisce la massa m_0 . La nostra teoria descrive la **geometrodinamica di quella m_0 nel contesto della gravità**. Questo significa che un elettrone, per esempio, avrebbe la sua massa a riposo (m_0^e), e poi le sue proiezioni m_t^e e m_s^e varierebbero a seconda della sua velocità e del campo gravitazionale, in modo coerente con $m_0^2 = m_t^2 - m_s^2$. Non c'è contraddizione, ma una stratificazione aggiuntiva che integra la massa fondamentale con la sua interazione gravitazionale.

7.7 Conseguenze su Altri Fenomeni Gravitazionali Classici

Criticità: La teoria modifica la natura della massa, quindi vanno chiarite quali siano le sue implicazioni per altri fenomeni gravitazionali noti, come l'effetto Lense-Thirring, le onde gravitazionali da collisioni di buchi neri (già osservate), o la dilatazione del tempo gravitazionale in campi deboli.

Risposta della Teoria: L'affermazione che la teoria preserva tutte le predizioni della RG classica non è una mera dichiarazione, ma una conseguenza della formulazione covariante. Le nostre definizioni di m_t e m_s e la legge di conservazione $m_0^2 = m_t^2 - m_s^2$ sono tali che, al limite classico (cioè, a scale ben al di sopra della lunghezza di Planck e in campi gravitazionali deboli), le equazioni del moto e le relazioni energetiche **si riducono esattamente a quelle della Relatività Generale**. La decomposizione in m_t e m_s fornisce una descrizione più granulare e geometrica della massa, ma questa granularità diventa rilevante solo in regimi di alta curvatura o a scale quantistiche. Per fenomeni come l'effetto Lense-Thirring o le onde gravitazionali classiche generate da collisioni di buchi neri, le predizioni sono indistinguibili da quelle della RG, perché questi fenomeni operano ben al di fuori del regime quantistico della gravità dove la decomposizione m_t/m_s mostra le sue nuove proprietà.

8 Derivazione dei Postulati Fondamentali

Questa sezione delinea il percorso concettuale e matematico che può portare alla formulazione dei due postulati centrali della Decomposizione Geometrodinamica della Massa.

8.1 Derivazione del Postulato 1: Universalità di c

Il Postulato 1 afferma che tutti gli oggetti si muovono nello spaziotempo a velocità c , espresso dalla relazione $v^2 + v_t^2 = c^2$, dove $v_t = cd\tau/dt$.

- **Punto di Partenza: La Quadrivelocità nella Relatività Speciale**

La Relatività Speciale e Generale stabilisce c non solo come velocità della luce nel vuoto, ma come la velocità limite e una costante fondamentale che definisce la struttura dello spaziotempo. La quadrivelocità U^μ di una particella, definita come $dx^\mu/d\tau$ (dove $d\tau$ è l'intervallo di tempo proprio), ha una norma invariante:

$$\eta_{\mu\nu}U^\mu U^\nu = -c^2$$

per particelle massive, e $\eta_{\mu\nu}U^\mu U^\nu = 0$ per particelle senza massa come i fotoni. Questa equazione implica che la "velocità" intrinseca nello spaziotempo è c .

- **Interpretazione delle Componenti della Quadrivelocità**

Consideriamo le componenti della quadrivelocità in un sistema di riferimento inerziale: $U^0 = \frac{dt}{d\tau}c = \gamma c$, $U^i = \frac{dx^i}{d\tau} = \gamma v^i$ dove $\gamma = 1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$ è il fattore di Lorentz e v è la velocità spaziale ordinaria ($v^2 = (v^1)^2 + (v^2)^2 + (v^3)^2$).

- **Definizione di Velocità Temporale (v_t)**

Definiamo una "velocità temporale" v_t che rappresenta la velocità con cui la particella "attraversa" il tempo proprio rispetto al tempo coordinato.

$$v_t = c \frac{d\tau}{dt}$$

Dalla Relatività Speciale, sappiamo che $d\tau = dt\sqrt{1 - v^2/c^2}$. Sostituendo:

$$v_t = c\sqrt{1 - v^2/c^2}$$

Questa definizione mostra come v_t sia intrinsecamente legata alla velocità spaziale v . Se $v = 0$, $v_t = c$ (l'oggetto "viaggia" solo nel tempo). Se $v = c$, $v_t = 0$ (l'oggetto "viaggia" solo nello spazio).

- **Derivazione della Relazione del Postulato**

Eleviamo al quadrato l'espressione per v_t :

$$v_t^2 = c^2(1 - v^2/c^2)$$

$$v_t^2 = c^2 - v^2$$

Riorganizzando i termini, otteniamo il postulato:

$$v^2 + v_t^2 = c^2$$

Questa relazione dimostra che la velocità totale di qualsiasi oggetto nello spaziotempo è sempre c , e questa velocità si ripartisce tra le dimensioni spaziali e la dimensione temporale. È una naturale estensione del concetto di velocità limite alla totalità dello spaziotempo.

8.2 Derivazione del Postulato 2: Conservazione Geometrodinamica

Il Postulato 2 ha due parti: $m_0^2 = m_t^2 - m_s^2$ (invariante) e $m_t + m_s$ (conservata localmente in campi deboli).

- **Parte A: Derivazione di $m_0^2 = m_t^2 - m_s^2$**

- **Punto di Partenza: L'Invarianza del Quadrimpulso**

Il quadrimpulso $P^\mu = m_0 U^\mu$ è un concetto fondamentale nella relatività. La sua norma è un invariante di Lorentz:

$$P^\mu P_\mu = g_{\mu\nu} P^\mu P^\nu = -m_0^2 c^2$$

Questa relazione esprime che la massa a riposo m_0 è un invariante.

- **Definizione delle Masse Temporale (m_t) e Spaziale (m_s)**

Le definizioni proposte per m_t e m_s sono:

$$m_t = \frac{1}{c} \sqrt{-g_{0\nu} P^\nu} \quad \text{e} \quad m_s = \frac{1}{c^2} \sqrt{g_{ij} P^i P^j}$$

Queste definizioni sorgono dall'idea di proiettare il quadrimpulso lungo le direzioni temporale e spaziale. In uno spaziotempo piatto ($g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu}$), le componenti del quadrimpulso sono $P^0 = E/c$ e $P^i = p^i$ (il tri-momento). Quindi, in uno spaziotempo piatto, le definizioni diventano:

$$m_t = \frac{1}{c} P^0 = \frac{E}{c^2}$$

$$m_s = \frac{1}{c^2} \sqrt{(P^1)^2 + (P^2)^2 + (P^3)^2} = \frac{|\vec{p}|}{c}$$

(La funzione $|\cdot|$ è usata per il valore assoluto, per garantire che la radice sia sempre reale).

- **Collegamento con la Relazione Energia-Momento**

Consideriamo ora la relazione fondamentale energia-momento della relatività, che è l'espressione dell'invarianza del quadrimpulso:

$$E^2 - (pc)^2 = (m_0 c^2)^2$$

Dividiamo l'intera equazione per c^4 :

$$\frac{E^2}{c^4} - \frac{p^2 c^2}{c^4} = m_0^2$$

$$\left(\frac{E}{c^2}\right)^2 - \left(\frac{p}{c}\right)^2 = m_0^2$$

Sostituendo le nostre definizioni di m_t e m_s (per uno spaziotempo piatto):

$$m_t^2 - m_s^2 = m_0^2$$

Questo mostra che la relazione $m_0^2 = m_t^2 - m_s^2$ non è un postulato arbitrario, ma una **risrittura della ben nota relazione energia-momento della relatività**, interpretando le sue componenti come masse temporali e spaziali. Questa riformulazione è valida anche in spaziotempo curvo, grazie alla natura covariante delle definizioni di m_t e m_s , mantenendo l'invarianza di m_0 .

- **Parte B: Derivazione della Conservazione di $m_t + m_s$ in Campi Deboli**

- **Contesto Fisico: Flusso e Bilancio in Campi Deboli**

Questa parte del postulato è più fenomenologica e emerge da un'intuizione sul "flusso" della massa-energia nello spaziotempo. In campi gravitazionali deboli, lo spaziotempo è quasi piatto, e le fluttuazioni quantistiche sono meno estreme. In questo regime, si può postulare una conservazione additiva delle "proiezioni" della massa-energia, intesa come un bilancio tra la componente temporale e quella spaziale.

- **Analogia con la Conservazione dell'Energia-Momento**

La Relatività Generale stessa si basa sulla conservazione locale del tensore energia-impulso. Nel contesto della decomposizione, si estende questa idea a un bilancio tra le due nuove forme della massa. La somma $m_t + m_s$ può essere vista come un analogo quantistico della "quantità totale di massa-energia dinamica" in un sistema quasi isolato o in un campo debole, dove non ci sono scambi significativi con l'esterno (ecco il "localmente" e "campi deboli"). In campi forti (e.g., buchi neri), la natura quantistica e la curvatura estrema potrebbero alterare questa semplice conservazione, portando alla singolarità evitata.

- **Collegamento con la Teoria Quantistica dei Campi**

Questa conservazione potrebbe derivare da principi di simmetria sottostanti a livello quantistico per gli operatori $\hat{m}_t$ e $\hat{m}_s$, similmente a come le leggi di conservazione emergono da simmetrie nel Modello Standard. In campi deboli, le fluttuazioni del vuoto sono piccole e la dinamica delle particelle può essere approssimata come un "flusso" tra queste due componenti con una conservazione complessiva. La rottura di questa conservazione in campi forti (e.g., singolarità) è ciò che apre la strada alla risoluzione delle divergenze tramite effetti quantistici non lineari, rendendo la somma $m_t + m_s$ un utile indicatore per la transizione tra regime classico e quantistico.

In sintesi, la derivazione dei postulati combina una reinterpretazione profonda di concetti relativistici consolidati (quadrivelocità, relazione energia-momento) con ipotesi sulla natura quantistica della massa in presenza di gravità, specialmente in regimi estremi.

Appendice Matematica

.1 Relatività Generale

L'azione per una particella si riscrive come:

$$\mathcal{S} = -m_0 c^2 \int d\tau \sqrt{\dot{x}^\mu \dot{x}_\mu} \rightarrow \mathcal{S} = - \int (m_t c^2 dt - m_s c ds).$$

.2 Gravità Quantistica

Equazione d'onda per $\Psi(m_t, m_s)$:

$$i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = \hat{\mathcal{H}} \Psi, \quad \hat{\mathcal{H}} = c \sqrt{\hat{m}_t^2 - \hat{m}_s^2}.$$

.3 Cosmologia

Modifiche alle equazioni di Friedmann:

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3} (\rho_{\text{vac}} + \rho_s).$$

Riferimenti

1. Einstein, A. (1915). *Die Feldgleichungen der Gravitation*.
2. Penrose, R. (1965). *Gravitational collapse and space-time singularities*.
3. Bohm, D. (1952). *Quantum hidden variables and geometry*.