

Die Kerr-Trisector-Closure

Ein Selbstkonsistenz-Test der Allgemeinen Relativitätstheorie

Handouts: Einfach erklärt – Aronno Mirdha, Malte Mühlenfeld

Ist Raumzeit mit sich selbst konsistent?

Die Allgemeine Relativitätstheorie beschreibt Gravitation als Geometrie der Raumzeit.

Wenn das stimmt, muss eine einzige Kerr-Raumzeit gleichzeitig erklären:

- **Bewegung** (Inspiral / Dynamik)
- **Schwingungen** (Ringdown / Quasinormalmoden)
- **Lichtbahnen** (Imaging / Schatten & Photonring)

Alle drei Beobachtungsarten müssen auf dieselbe Masse M und denselben **Spin** a führen.

Was ist neu?

Viele Tests prüfen die Relativitätstheorie nur in *einem* Bereich. KTC fordert, dass **drei voneinander unabhängige Messbereiche** dieselbe Kerr-Raumzeit bestätigen.

Die drei Sektoren

Grundidee: Jede Beobachtungsart liefert unabhängig eine Schätzung von (M, a) . Wenn ART stimmt, müssen sich die Bereiche in einem gemeinsamen Parameterpunkt treffen.

1) Inspiral (Dynamik)

Was man misst: Gravitationswellen-Phase / Bahnbewegung

Was man bekommt: $(\hat{M}_{\text{insp}}, \hat{a}_{\text{insp}})$

2) Ringdown (Schwingung)

Was man misst: Frequenzen & Dämpfungszeiten (QNM)

Was man bekommt: $(\hat{M}_{\text{ring}}, \hat{a}_{\text{ring}})$

3) Imaging (Licht)

Was man misst: Schatten / Photonring / Geometrie von Nullgeodäten

Was man bekommt: $(\hat{M}_{\text{img}}, \hat{a}_{\text{img}})$

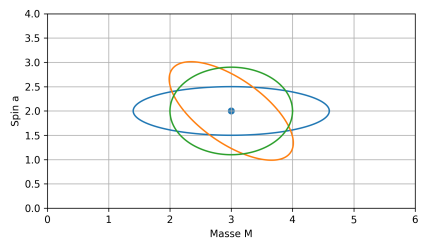
Interpretation des Ellipsen-Plots

Jeder Beobachtungssektor liefert eine unabhängige Schätzung der Parameter (M, a) .

Die Ellipsen stellen die jeweiligen Unsicherheitsbereiche dar.

Closure-Bedingung:

Wenn sich alle drei Ellipsen in einem gemeinsamen Bereich schneiden, ist die Kerr-Raumzeit selbstkonsistent.



Die Testgröße T^2

Worum geht es hier?

Wir brauchen eine einzige Zahl, die misst, wie stark sich die drei Bereiche (Inspiral, Ringdown, Imaging) voneinander unterscheiden.

Diese Zahl heißt T^2 .

Schritt 1: Drei Messungen

Jeder Bereich liefert eine Schätzung von Masse und Spin:

$$\hat{\theta}_k = (\hat{M}_k, \hat{a}_k)$$

Wenn die Relativitätstheorie stimmt, müssen diese Werte im Rahmen ihrer Messunsicherheiten übereinstimmen.

Schritt 2: Wie stark weichen sie ab?

Wir vergleichen jede Schätzung mit einer gemeinsamen Best-Fit-Lösung.

Die mathematische Form lautet:

$$T^2 = r^T C^{-1} r$$

Dabei bedeutet:

- r = Wie groß ist die Abweichung?
- C = Wie groß sind die Unsicherheiten?

Große Unsicherheiten zählen weniger stark, kleine Unsicherheiten stärker.

Das heißt?

- **Kleines T^2 :** Alle drei Bereiche passen zusammen. Die Raumzeit ist selbstkonsistent.
- **Großes T^2 :** Die Unterschiede sind zu groß, um durch Zufall erklärbar zu sein. Mindestens ein Bereich widerspricht der Kerr-Geometrie.

— — — — —

Warum ist das wichtig?

KTC testet nicht nur einen Effekt.

Es prüft, ob eine einzige Raumzeitgeometrie alle Beobachtungsbereiche gleichzeitig erklären kann.

Wenn es nicht passt: Diagnose

Inspiral: Hinweis auf Dynamik oder Abstrahlungsmechanismen.

Ringdown: Hinweis auf Horizontphysik oder Störungsdynamik.

Imaging: Hinweis auf Nullgeodäten, Lichtausbreitung oder Umgebungseffekte.

Concept Check

Verstehen statt nur zuhören

Die folgenden QR-Codes führen zu interaktiven Erklärungen und Simulationen. Scanne sie und überprüfe dein Verständnis!



Gravitationswellen

Wie entstehen sie?
Warum verändern sie
Raum und Zeit?



Echte Datensimulation

Simulation realer LIGO-
und Virgo-Daten.



Schwarzes-Loch-Bild

Warum entsteht ein
Schatten?
Wie beeinflusst Spin die
Geometrie?