

1. Übungsblatt zur Allgemeinen Relativitätstheorie II

Abgabe: Freitag, den 04. Mai 2018 vor der Übung
Ausgabe: Freitag, den 20. April 2018

Gravitomagnetismus (10 Punkte)

Von April 2004 bis September 2005 hat sich ein Experiment in einer Erdumlaufbahn befunden, dass bestimmte Effekte des Gravitationsfeldes auf Gyroskope (Kreisel) bestimmt hat. Dieses Experiment hat den schlichten Namen Gravity Probe B getragen. Bei der damals getroffenen experimentellen Konfiguration treten zwei verschiedene Effekte auf, die es theoretisch zu beschreiben gilt.

- a) Betrachten Sie zunächst die Bewegung eines Gyroskops in einem gegebenen kugelsymmetrischen statischen Gravitationsfeld. Dem (Eigen-) Drehimpuls des Gyroskops sei der Vektor s^μ zugeordnet. Er folgt der Bewegungsgleichung

$$\frac{ds^\mu}{d\tau} = -\Gamma_{\kappa\nu}^\mu s^\kappa u^\nu. \quad (1)$$

Das Gravitationsfeld sei beschrieben durch die Schwarzschildmetrik

$$ds^2 = \left(1 - \frac{2a}{r}\right) dt^2 - \left(1 - \frac{2a}{r}\right)^{-1} dr^2 - r^2(d\Theta^2 + \sin^2\Theta d\phi^2) \quad (2)$$

Das Gyroskop befinde sich auf einer Kreisbahn mit $r = \text{const}$, $\Theta = \pi/2$ und $\phi = \omega_0\tau$ mit $u^0 = \text{const}$ und $\omega_0 = \text{const}$. Seine Vierergeschwindigkeit ist dann $(u^\mu) = (u^0, 0, 0, \omega_0)$.

- i) Bestimmen Sie mittels (1) die Bewegungsgleichungen für s^μ im Gravitationsfeld (2) unter den benutzten Einschränkungen.
- ii) Integrieren Sie die Bewegungsgleichungen unter den Anfangsbedingungen $s^1(0) = 1$, $s^2(0) = 0$ und $s^3(0) = 0$, $\dot{s}^1(0) = 0$.
Hinweise: Beachten Sie, dass die Christoffelsymbole als konstant anzusehen sind. Die Integration von $s^2(\tau)$ ist trivial. Die Bewegungsgleichung für $s^1(\tau)$ kann integriert werden durch nochmaliges Ableiten nach τ und Ausnutzung der Gleichung für $s^0(\tau)$. Man erhält $\frac{d^2s^1}{d\tau^2} = -k^2s^1$ hier ist k^2 eine geschickt gewählte Konstante, die noch zu bestimmen ist. (Es ist nicht notwendig die Gleichung für s^0 zu integrieren).
- iii) Bestimmen Sie k^2 explizit. Benutzen Sie dazu die Bewegungsgleichung für u^1 : $\frac{du^1}{d\tau} = -\Gamma_{\mu\nu}^1 u^\mu u^\nu$.
- iv) Betrachten Sie die Eigenzeitspanne $\tau_0 = 2\pi/\omega_0$ für einen Umlauf. Befindet sich $s^i(\tau_0)$ wieder am Punkt $s^i(0)$?

- b) Neben dem statischen Gravitationsfeld haben die meisten Himmelskörper noch die Eigenschaft der Rotation. Diese wirkt sich auch auf das äußere Gravitationsfeld aus. Wir wollen diesem Effekt in einer Schwachfeldnäherung Rechnung tragen. Betrachten Sie dazu wiederum die Bewegung eines Kreisels gemäß (1). Für einen ruhenden Kreisel $(s^\mu) = (0, s^i)$, $(u^\mu) = (c, 0, 0, 0)$ mit $\tau = t$ ergeben sich die Bewegungsgleichungen zu

$$\frac{ds^i}{dt} = -c\Gamma_{j0}^i s^j, \quad (3)$$

wobei die Christoffelsymbole in linearer Näherung aus den Potentialen

$$h_{0i} = \frac{2GI}{c^3} \frac{\epsilon_{ikn} \omega^k x^n}{r^3} \quad (4)$$

zu bilden sind. Hier sind G, c die üblichen Konstanten, I das (konstante) Trägheitsmoment ϵ_{ikn} der totalantisymmetrische Tensor und es gilt $v_i = \epsilon_{ikn} \omega^k x^n$. Dabei ist ω^i die konstante Winkelgeschwindigkeit.

Leiten Sie aus (3) die Bewegungsgleichung

$$\frac{ds_i}{dt} = \pm \frac{GI}{c^2} \left(\frac{3}{r^5} (r^j \omega_j) (\mathbf{s} \times \mathbf{r})_i - \frac{1}{r^3} (\mathbf{s} \times \boldsymbol{\omega})_i \right) \quad (5)$$

ab.

Hängt dieser Effekt von der Bahn um die rotierende Quelle ab?

Hinweis: Benutzen Sie die bac-cab Regel.

Eine Kommentierung Ihres Vorgehens wird erwartet! Dafür gibt es auch Punkte!
Die Ausarbeitung ist handschriftlich anzufertigen!

Sprechstunde: Nach Vereinbarung oder direkt nach der Übung.
Falls es Fragen gibt, bin ich auch per Mail erreichbar:
gerold.schellstede@campus.tu-berlin.de