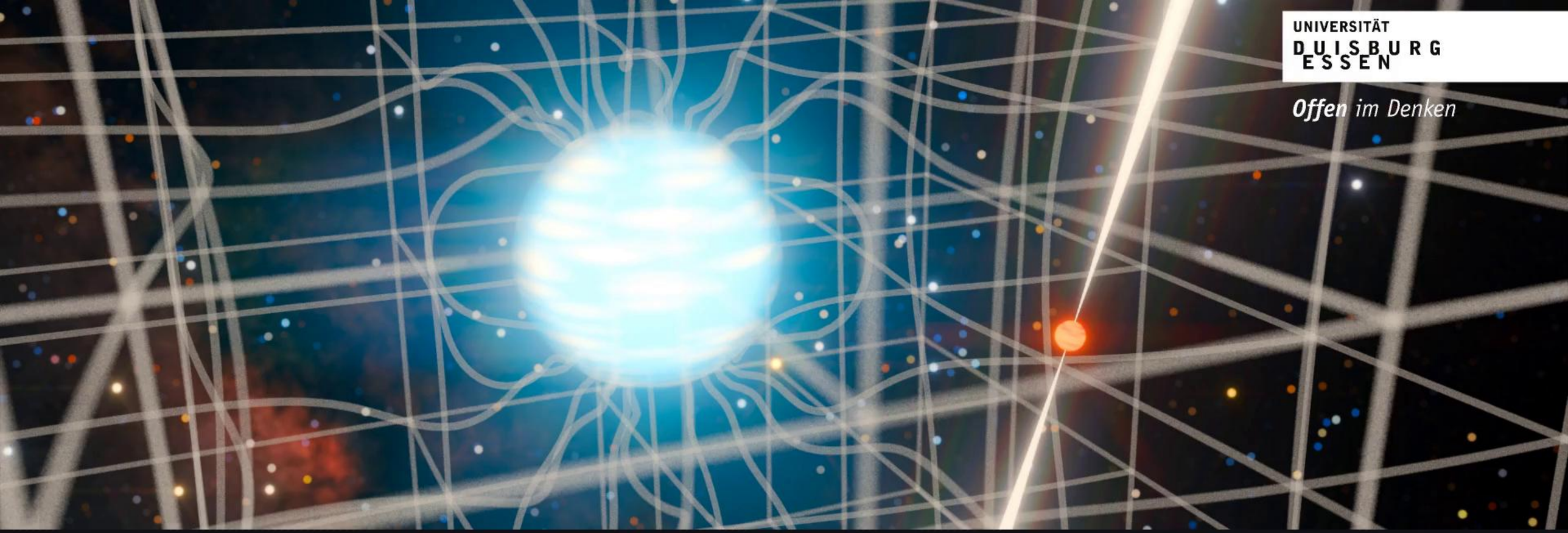


UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

*Offen im Denken*

# Lense-Thirring-Effekt

Vortrag im Hauptseminar SoSe 2025

Marvin Henke - 12. Juni 2025

Betreuer: Dr. Nikodem Szpak

# Lense-Thirring-Effekt

# Lense-Thirring-Effekt

- Allgemeine Relativitätstheorie
  - Metrik und Geodäten
  - Einsteinsche Feldgleichungen
  - Gravitoelektromagnetismus

# Lense-Thirring-Effekt

UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

*Offen im Denken*

- Allgemeine Relativitätstheorie
  - Metrik und Geodäten
  - Einsteinsche Feldgleichungen
  - Gravitoelektromagnetismus
- Rotierende Kugelmasse
  - EM-Felder
  - Trajektorien
  - Präzession

# Lense-Thirring-Effekt

UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

*Offen im Denken*

- Allgemeine Relativitätstheorie
  - Metrik und Geodäten
  - Einsteinsche Feldgleichungen
  - Gravitoelektromagnetismus
- Rotierende Kugelmasse
  - EM-Felder
  - Trajektorien
  - Präzession
- Aktuelle Forschung
  - Gravity Probe B
  - Akkretionsscheibe eines supermassiven Schwarzen Lochs
  - Binärsystem aus Pulsar und weißem Zwerg

# Lense-Thirring-Effekt

UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

*Offen im Denken*

- Allgemeine Relativitätstheorie
  - Metrik und Geodäten
  - Einsteinsche Feldgleichungen
  - Gravitoelektromagnetismus
- Rotierende Kugelmasse
  - EM-Felder
  - Trajektorien
  - Präzession
- Aktuelle Forschung
  - Gravity Probe B
  - Akkretionsscheibe eines supermassiven Schwarzen Lochs
  - Binärsystem aus Pulsar und weißem Zwerg

$$\boldsymbol{\eta} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

$c = G = 1$

$(+, -, -, -)$

UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

*Offen im Denken*

# Lense-Thirring-Effekt

- Allgemeine Relativitätstheorie
  - Metrik und Geodäten
  - Einsteinsche Feldgleichungen
  - Gravitoelektromagnetismus
- Rotierende Kugelmasse
  - EM-Felder
  - Trajektorien
  - Präzession
- Aktuelle Forschung
  - Gravity Probe B
  - Akkretionsscheibe eines supermassiven Schwarzen Lochs
  - Binärsystem aus Pulsar und weißem Zwerg

# Allgemeine Relativitätstheorie

$$c = G = 1$$

$$(+, -, -, -)$$

UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

*Offen im Denken*

# Allgemeine Relativitätstheorie

$$c = G = 1$$

$$(+, -, -, -)$$

UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

*Offen im Denken*

- entwickelt von Albert Einstein

$$c = G = 1$$

$$(+, -, -, -)$$

UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

*Offen im Denken*

# Allgemeine Relativitätstheorie

- entwickelt von Albert Einstein
- beruht auf der Differentialgeometrie

$$c = G = 1$$

$$(+, -, -, -)$$

UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

*Offen im Denken*

# Allgemeine Relativitätstheorie

- entwickelt von Albert Einstein
- beruht auf der Differentialgeometrie
- angewendet bei GPS

$c = G = 1$

$(+, -, -, -)$

UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

*Offen im Denken*

# Allgemeine Relativitätstheorie

- entwickelt von Albert Einstein
- beruht auf der Differentialgeometrie
- angewendet bei GPS
- beschreibt Gravitation nicht als Kraft $F_{\mathrm{G}}$ sondern als Effekt einer vierdimensionalen Raumzeit

$c = G = 1$

$(+, -, -, -)$

UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

*Offen im Denken*

# Allgemeine Relativitätstheorie

- entwickelt von Albert Einstein
- beruht auf der Differentialgeometrie
- angewendet bei GPS
- beschreibt Gravitation nicht als Kraft $F_{\mathrm{G}}$ sondern als Effekt einer vierdimensionalen Raumzeit
- Raumzeit ist pseudo-riemannsche Mannigfaltigkeit mit Linienelement:

$c = G = 1$

$(+, -, -, -)$

UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

*Offen im Denken*

# Allgemeine Relativitätstheorie

- entwickelt von Albert Einstein
- beruht auf der Differentialgeometrie
- angewendet bei GPS
- beschreibt Gravitation nicht als Kraft $F_\mathrm{G}$ sondern als Effekt einer vierdimensionalen Raumzeit
- Raumzeit ist pseudo-riemannsche Mannigfaltigkeit mit Linienelement:

$$\mathrm{d}s^2 = g_{\mu\nu}\mathrm{d}x^\mu \mathrm{d}x^\nu$$

$c = G = 1$

$(+, -, -, -)$

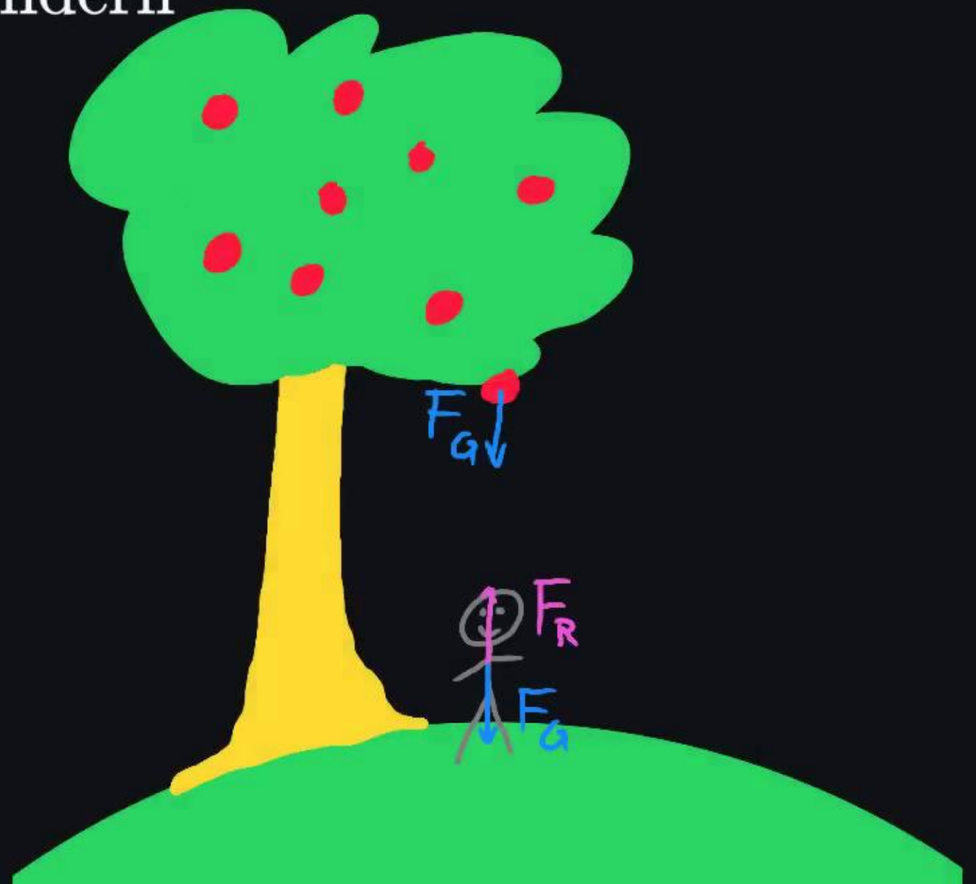
UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

*Offen im Denken*

# Allgemeine Relativitätstheorie

- entwickelt von Albert Einstein
- beruht auf der Differentialgeometrie
- angewendet bei GPS
- beschreibt Gravitation nicht als Kraft $F_\mathrm{G}$ sondern als Effekt einer vierdimensionalen Raumzeit
- Raumzeit ist pseudo-riemannsche Mannigfaltigkeit mit Linienelement:

$$\mathrm{d}s^2 = g_{\mu\nu}\mathrm{d}x^\mu \mathrm{d}x^\nu$$



$c = G = 1$

$(+, -, -, -)$

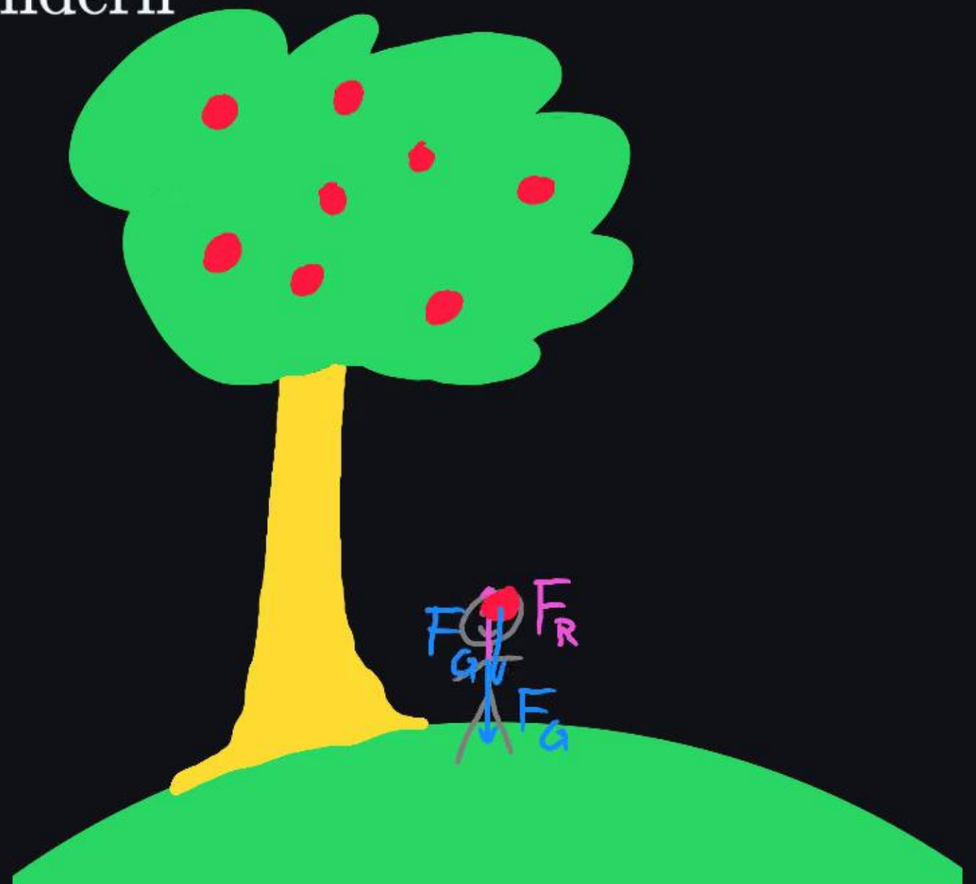
UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

*Offen im Denken*

# Allgemeine Relativitätstheorie

- entwickelt von Albert Einstein
- beruht auf der Differentialgeometrie
- angewendet bei GPS
- beschreibt Gravitation nicht als Kraft $F_\mathrm{G}$ sondern als Effekt einer vierdimensionalen Raumzeit
- Raumzeit ist pseudo-riemannsche Mannigfaltigkeit mit Linienelement:

$$\mathrm{d}s^2 = g_{\mu\nu}\mathrm{d}x^\mu \mathrm{d}x^\nu$$



$c = G = 1$

$(+, -, -, -)$

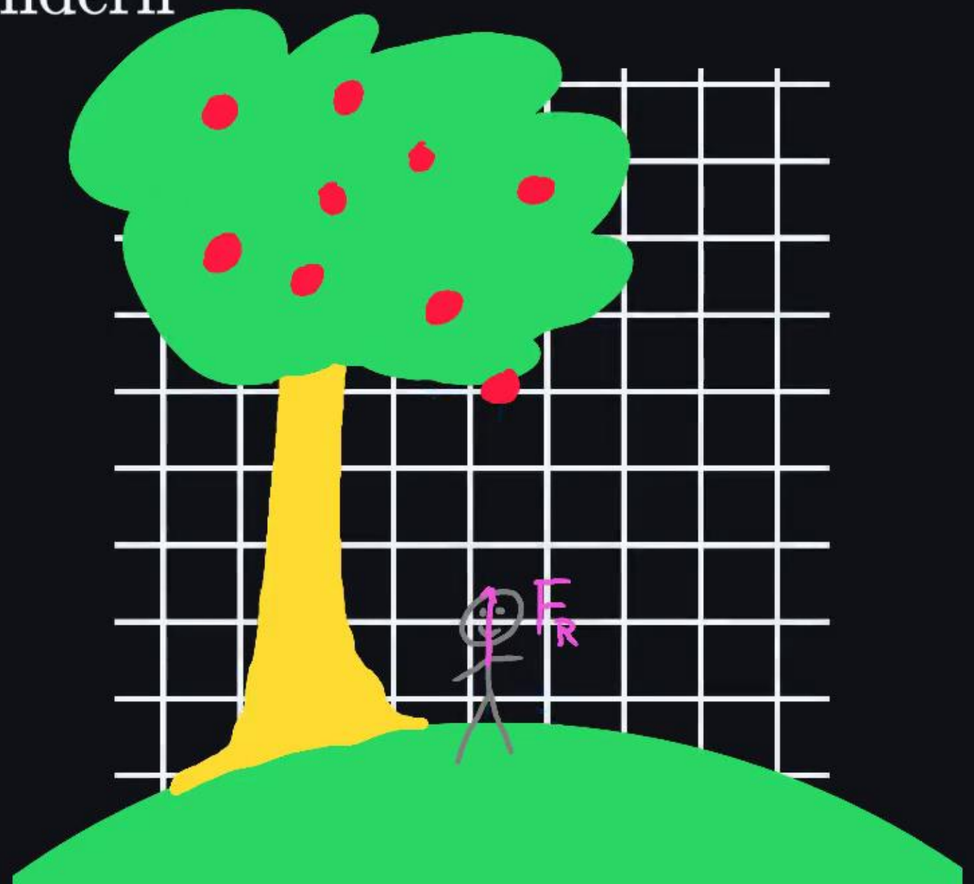
UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

*Offen im Denken*

# Allgemeine Relativitätstheorie

- entwickelt von Albert Einstein
- beruht auf der Differentialgeometrie
- angewendet bei GPS
- beschreibt Gravitation nicht als Kraft $F_\mathrm{G}$ sondern als Effekt einer vierdimensionalen Raumzeit
- Raumzeit ist pseudo-riemannsche Mannigfaltigkeit mit Linienelement:

$$\mathrm{d}s^2 = g_{\mu\nu}\mathrm{d}x^\mu \mathrm{d}x^\nu$$



$c = G = 1$

$(+, -, -, -)$

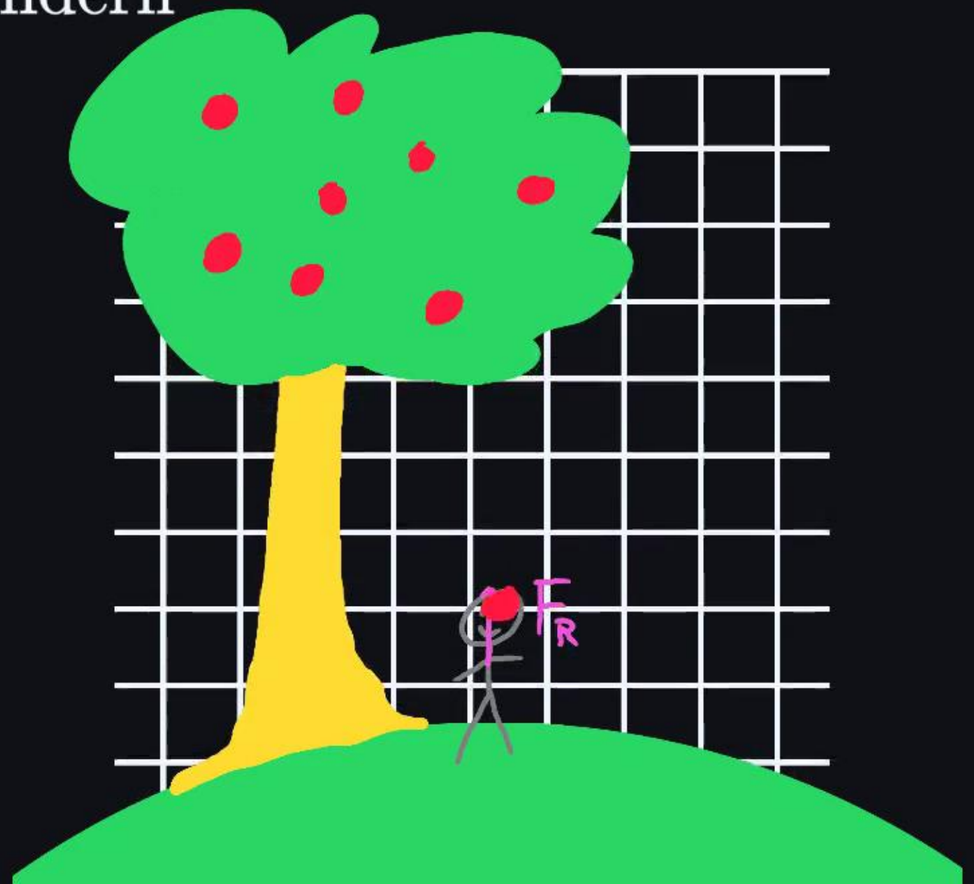
UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

*Offen im Denken*

# Allgemeine Relativitätstheorie

- entwickelt von Albert Einstein
- beruht auf der Differentialgeometrie
- angewendet bei GPS
- beschreibt Gravitation nicht als Kraft $F_\mathrm{G}$ sondern als Effekt einer vierdimensionalen Raumzeit
- Raumzeit ist pseudo-riemannsche Mannigfaltigkeit mit Linienelement:

$$\mathrm{d}s^2 = g_{\mu\nu}\mathrm{d}x^\mu \mathrm{d}x^\nu$$



# Metrik und Geodäten

$$c = G = 1$$

$$(+, -, -, -)$$

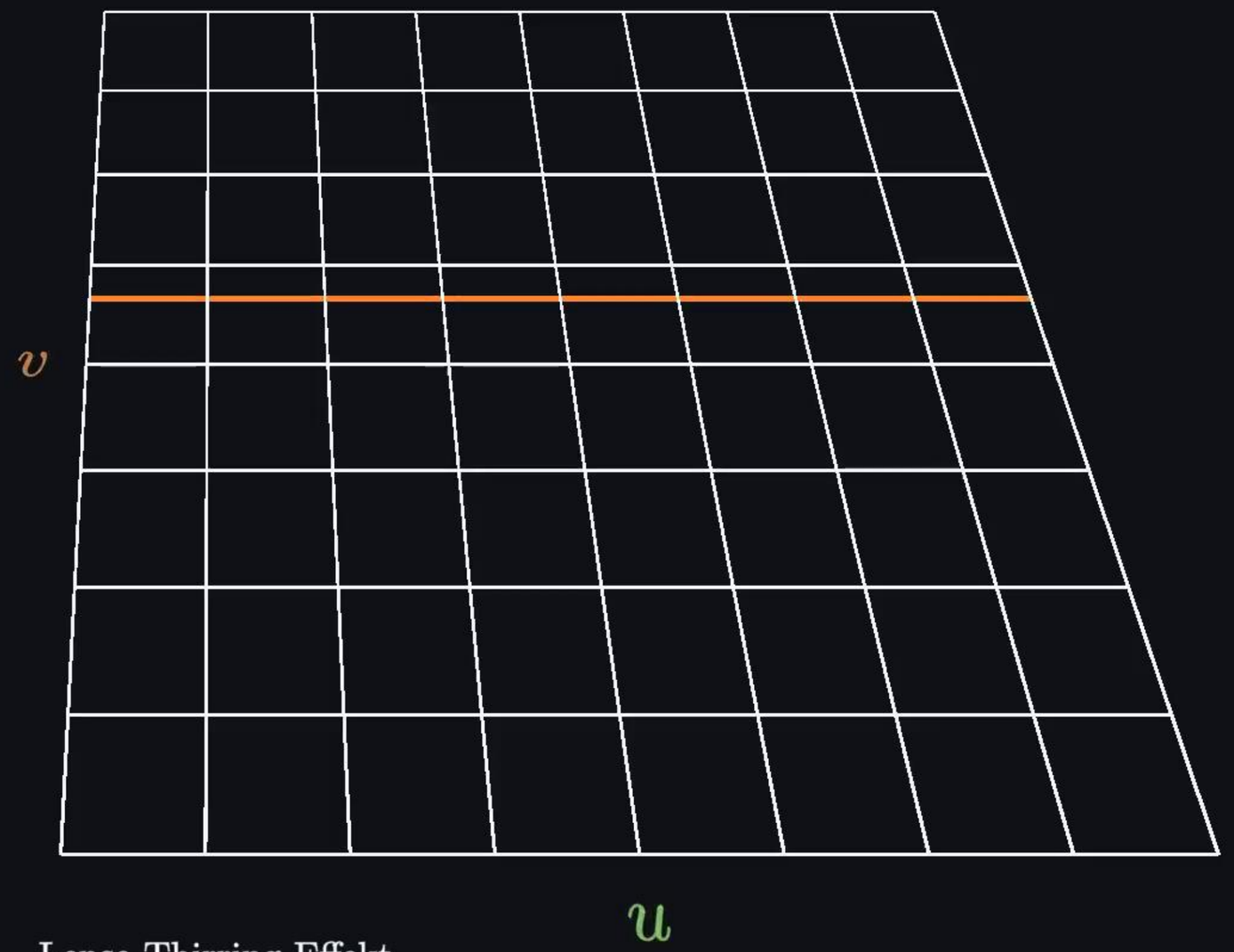
# Metrik und Geodäten

$$c = G = 1$$

$$(+, -, -, -)$$

UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

*Offen im Denken*



# Metrik und Geodäten

$$c = G = 1$$

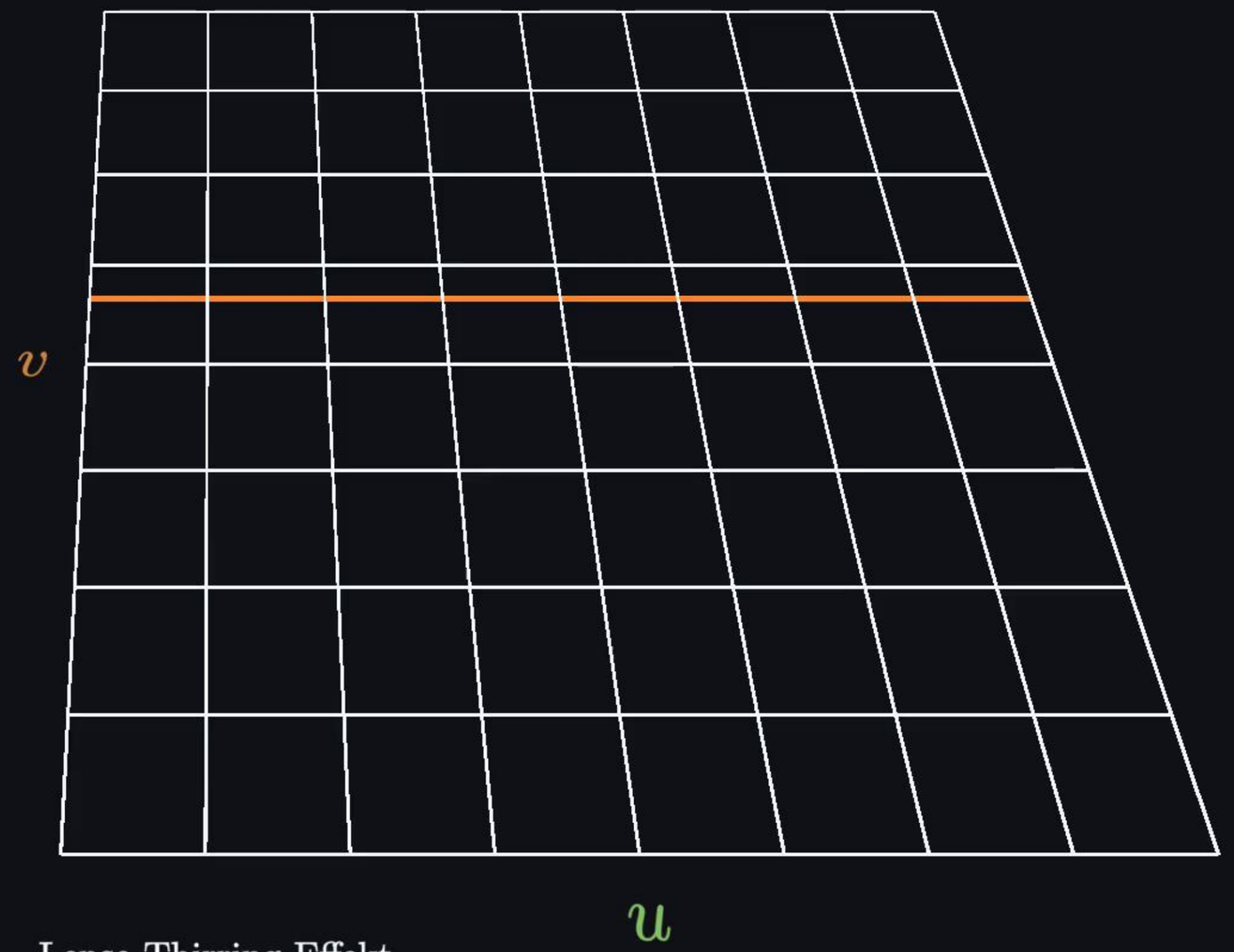
$$(+, -, -, -)$$

UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

*Offen im Denken*

## Fläche

$$\vec{x}(u, v) = (u, v, 0)$$



# Metrik und Geodäten

$$c = G = 1$$

$$(+,-,-,-)$$

UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

*Offen im Denken*

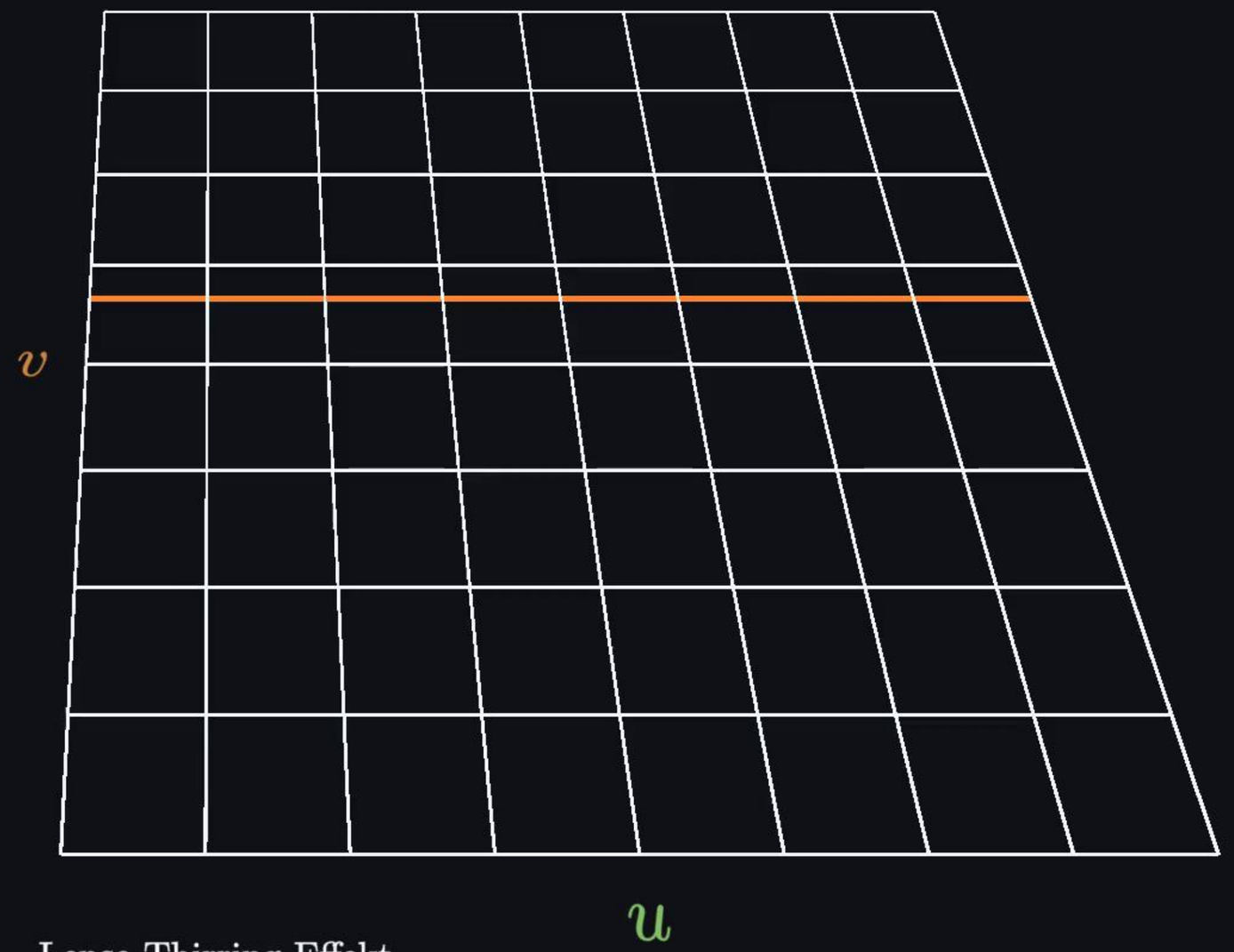
Fläche

$$\vec{x}(u,v) = (u,v,0)$$

Metrik

$$g_{\mu\nu} = \partial_\mu \vec{x} \cdot \partial_\nu \vec{x}$$

$$\boldsymbol{g} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$



# Metrik und Geodäten

$$c = G = 1$$

$$(+,-,-,-)$$

UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

*Offen im Denken*

Fläche

$$\vec{x}(u,v) = (u,v,0)$$

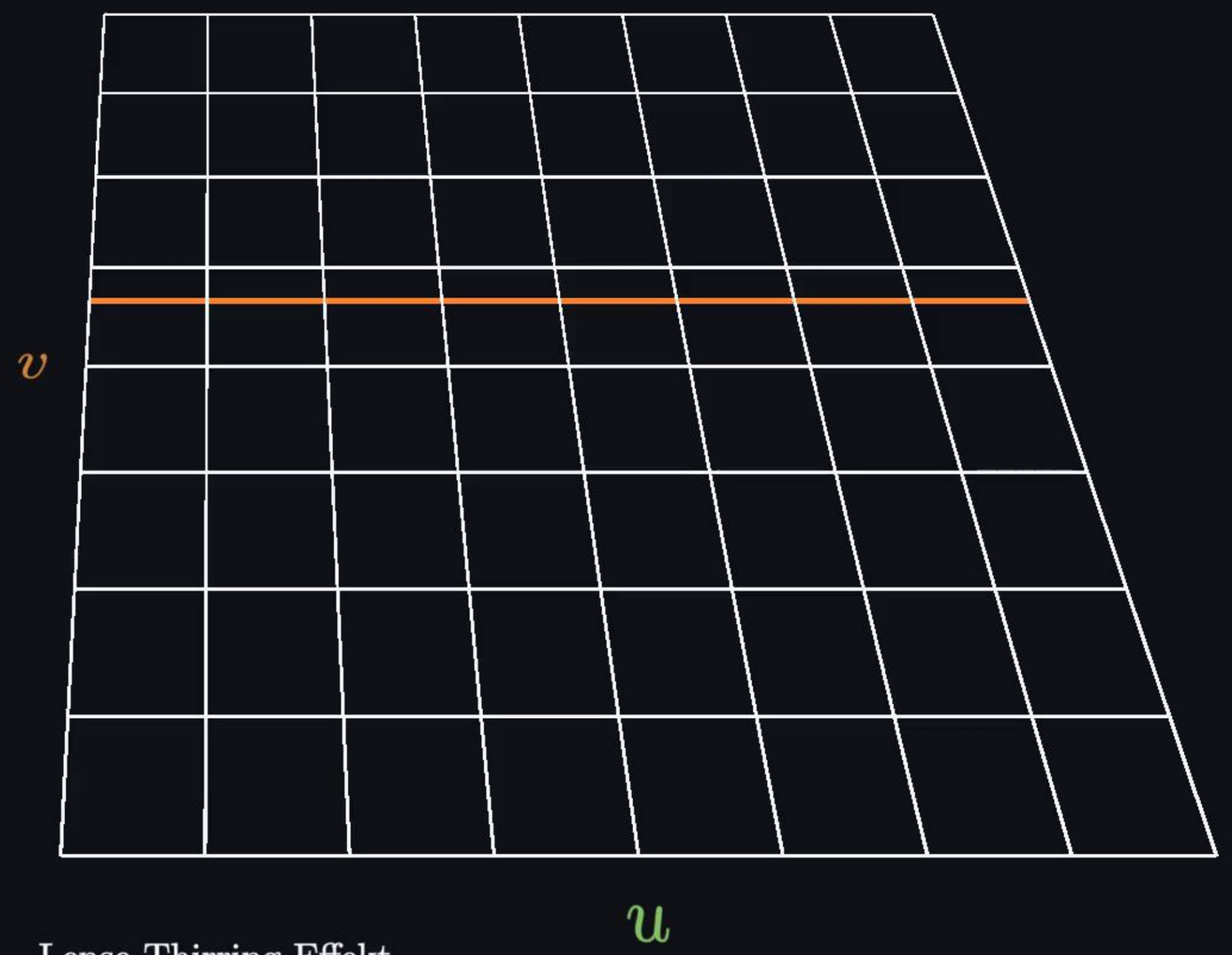
Metrik

$$g_{\mu\nu} = \partial_\mu \vec{x} \cdot \partial_\nu \vec{x}$$

$$\boldsymbol{g} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Geodätengleichung

$$\frac{\mathrm{d}^2 x^\lambda}{\mathrm{d}\tau^2} = 0$$



# Metrik und Geodäten

$c = G = 1$

$(+,-,-,-)$

UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

*Offen im Denken*

Fläche

$\vec{x}(u,v) = (u,v,0)$

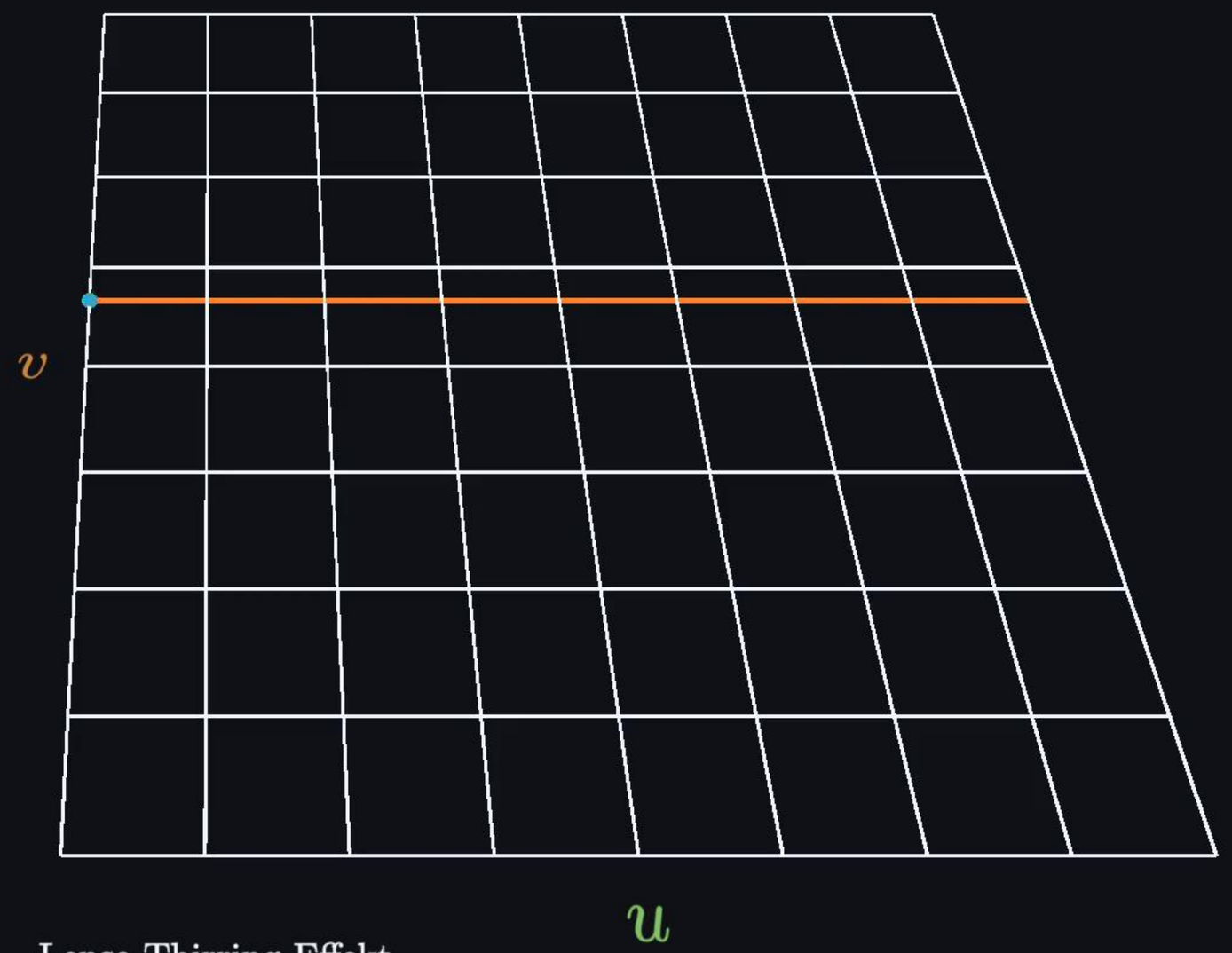
Metrik

$g_{\mu\nu} = \partial_\mu \vec{x} \cdot \partial_\nu \vec{x}$

$$\boldsymbol{g} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Geodätengleichung

$$\frac{\mathrm{d}^2 x^\lambda}{\mathrm{d}\tau^2} = 0$$



# Metrik und Geodäten

$c = G = 1$

$(+, -, -, -)$

UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

*Offen im Denken*

## Fläche

$\vec{x} : \mathbb{R}^2 \to \mathbb{R}^3$

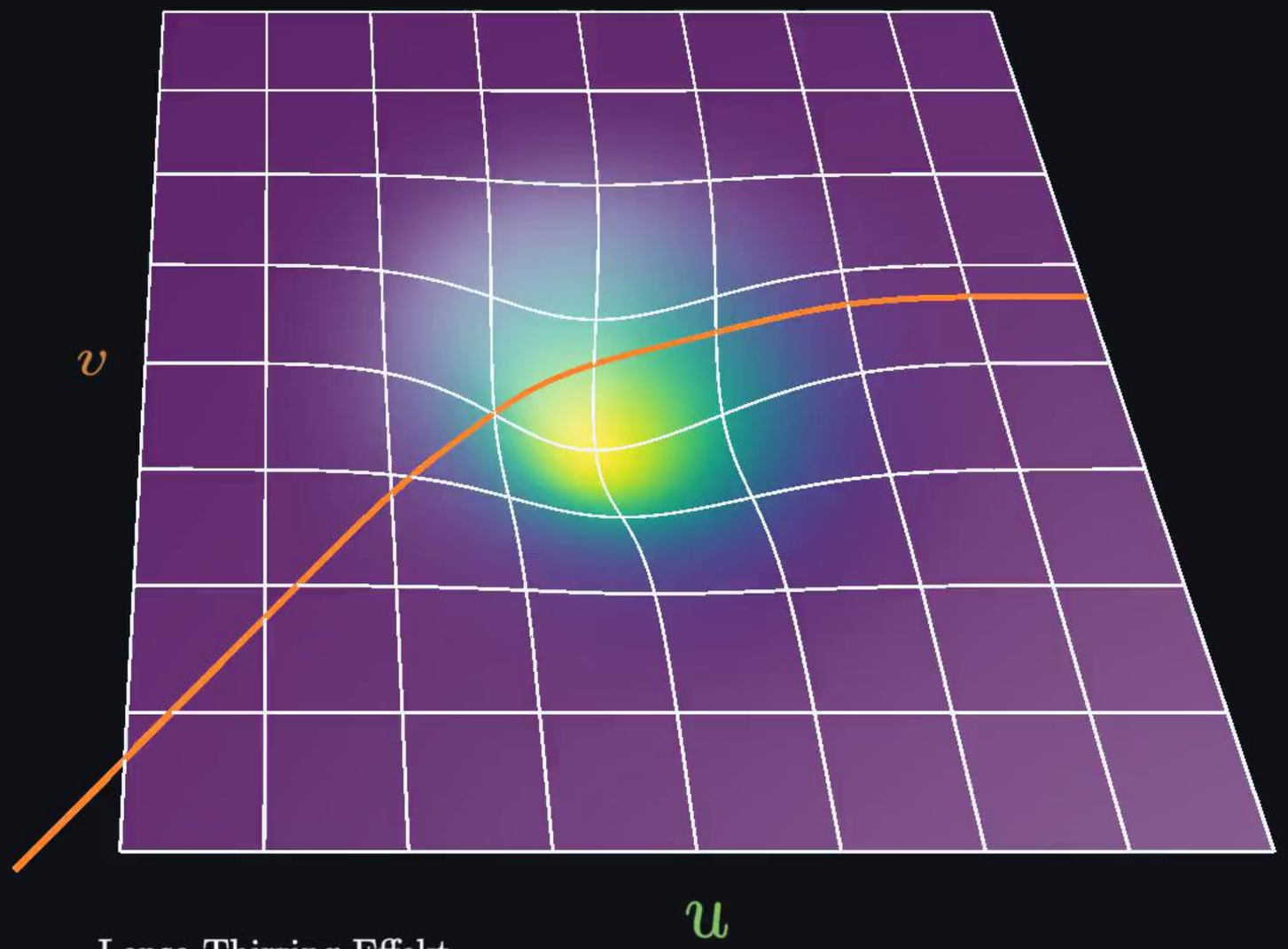
## Metrik

$g_{\mu\nu} = \partial_\mu \vec{x} \cdot \partial_\nu \vec{x}$

$$\boldsymbol{g} = \begin{bmatrix} 1.00 & 0.00 \\ 0.00 & 1.00 \end{bmatrix}$$

## Geodätengleichung

$$\frac{\mathrm{d}^2 x^\lambda}{\mathrm{d}\tau^2} = -\Gamma^\lambda_{\mu\nu}[\boldsymbol{g}(\vec{x})] \frac{\mathrm{d}x^\mu}{\mathrm{d}\tau} \frac{\mathrm{d}x^\nu}{\mathrm{d}\tau}$$



# Metrik und Geodäten

$c = G = 1$

$(+,-,-,-)$

UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

*Offen im Denken*

## Fläche

$\vec{x} : \mathbb{R}^2 \to \mathbb{R}^3$

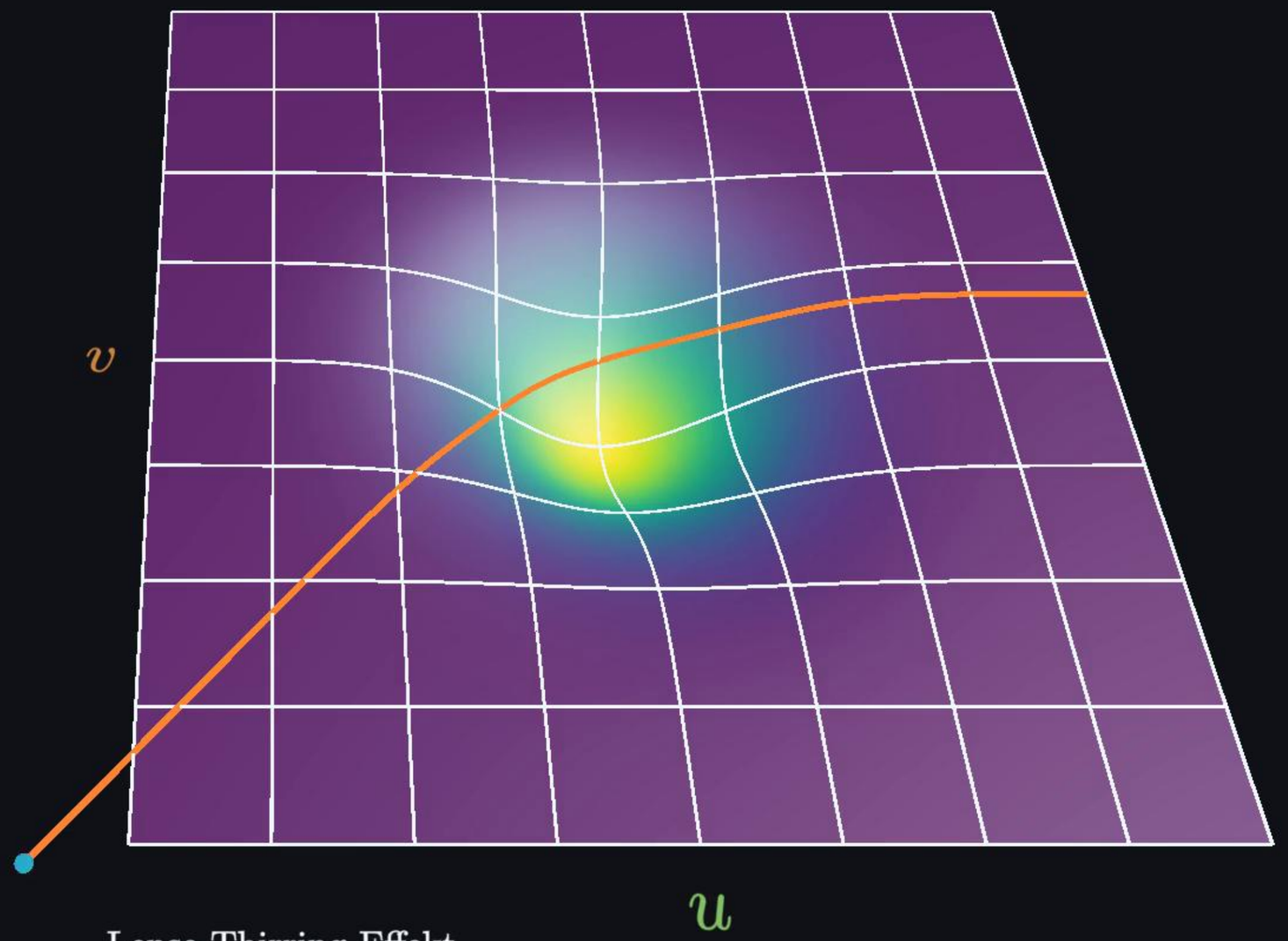
## Metrik

$g_{\mu\nu} = \partial_\mu \vec{x} \cdot \partial_\nu \vec{x}$

$$\boldsymbol{g} = \begin{bmatrix} 1.00 & 0.00 \\ 0.00 & 1.00 \end{bmatrix}$$

## Geodätengleichung

$$\frac{\mathrm{d}^2 x^\lambda}{\mathrm{d}\tau^2} = -\Gamma^\lambda_{\mu\nu}[\boldsymbol{g}(\vec{x})] \frac{\mathrm{d}x^\mu}{\mathrm{d}\tau} \frac{\mathrm{d}x^\nu}{\mathrm{d}\tau}$$



# Einsteinsche Feldgleichungen

$$c = G = 1$$

$$(+, -, -, -)$$

UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

*Offen im Denken*

# Einsteinsche Feldgleichungen

$$c = G = 1$$

$$(+, -, -, -)$$

UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

*Offen im Denken*

2D Fläche $\rightarrow$ 4D Mannigfaltigkeit

# Einsteinsche Feldgleichungen

$c = G = 1$

$(+, -, -, -)$

UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

*Offen im Denken*

2D Fläche $\rightarrow$ 4D Mannigfaltigkeit

Koordinaten $(ct, x, y, z) \Rightarrow \boldsymbol{g} \in \mathbb{R}^{4\times 4}$

# Einsteinsche Feldgleichungen

$c = G = 1$

$(+, -, -, -)$

UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

*Offen im Denken*

2D Fläche $\rightarrow$ 4D Mannigfaltigkeit

Koordinaten $(ct, x, y, z) \Rightarrow \boldsymbol{g} \in \mathbb{R}^{4\times 4}$

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = 8\pi T_{\mu\nu}$$

# Einsteinsche Feldgleichungen

$c = G = 1$

$(+, -, -, -)$

UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

*Offen im Denken*

2D Fläche $\rightarrow$ 4D Mannigfaltigkeit

Koordinaten $(ct, x, y, z) \Rightarrow \boldsymbol{g} \in \mathbb{R}^{4\times 4}$

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = 8\pi T_{\mu\nu}$$

Ricci-Tensor: $R_{\mu\nu}[\boldsymbol{g}]$

# Einsteinsche Feldgleichungen

$c = G = 1$

$(+, -, -, -)$

UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

*Offen im Denken*

2D Fläche $\rightarrow$ 4D Mannigfaltigkeit

Koordinaten $(ct, x, y, z) \Rightarrow \boldsymbol{g} \in \mathbb{R}^{4\times 4}$

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = 8\pi T_{\mu\nu}$$

Ricci-Tensor: $R_{\mu\nu}[\boldsymbol{g}]$

Krümmungsskalar: $R[\boldsymbol{g}]$

$c = G = 1$

$(+, -, -, -)$

UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

*Offen im Denken*

# Einsteinsche Feldgleichungen

2D Fläche $\rightarrow$ 4D Mannigfaltigkeit

Koordinaten $(ct, x, y, z) \Rightarrow \boldsymbol{g} \in \mathbb{R}^{4\times 4}$

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = 8\pi T_{\mu\nu}$$

Ricci-Tensor: $R_{\mu\nu}[\boldsymbol{g}]$

Krümmungsskalar: $R[\boldsymbol{g}]$

Energie-Impuls-Tensor: $T_{\mu\nu}$

# Linearisierung

$$c = G = 1$$

$$(+, -, -, -)$$

$c = G = 1$

$(+, -, -, -)$

UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

*Offen im Denken*

# Linearisierung

Annahmen: $g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}$, $\boldsymbol{h} \ll \boldsymbol{\eta}$, $\tau \approx t$

$$c = G = 1$$
$$(+,-,-,-)$$

UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

*Offen im Denken*

# Linearisierung

Annahmen: $g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}$, $\boldsymbol{h} \ll \boldsymbol{\eta}$, $\tau \approx t$

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = 8\pi T_{\mu\nu}$$

$$\frac{\mathrm{d}^2 x^\lambda}{\mathrm{d}\tau^2} = -\Gamma^\lambda_{\mu\nu}[\boldsymbol{g}(\vec{x})] \frac{\mathrm{d}x^\mu}{\mathrm{d}\tau} \frac{\mathrm{d}x^\nu}{\mathrm{d}\tau}$$

$c = G = 1$

$(+, -, -, -)$

UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

*Offen im Denken*

# Linearisierung

Annahmen: $g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}$, $\boldsymbol{h} \ll \boldsymbol{\eta}$, $\tau \approx t$

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = 8\pi T_{\mu\nu}$$

$$-\Delta h_{00} = 8\pi\rho, \; -\Delta h_{0i} = 16\pi j_i$$

$$\frac{\mathrm{d}^2 x^\lambda}{\mathrm{d}\tau^2} = -\Gamma^\lambda_{\mu\nu}[\boldsymbol{g}(\vec{x})] \frac{\mathrm{d}x^\mu}{\mathrm{d}\tau} \frac{\mathrm{d}x^\nu}{\mathrm{d}\tau}$$

# Gravitoelektromagnetismus

$c = G = 1$

$(+,-,-,-)$

UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

*Offen im Denken*

Annahmen: $g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}$, $\boldsymbol{h} \ll \boldsymbol{\eta}$, $\tau \approx t$

Substitutionen: $\vec{E} = \frac{1}{2}\vec{\nabla} h_{00}$, $B_j = -\varepsilon_{jlm}\frac{\partial h_{0m}}{\partial x^l}$

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = 8\pi T_{\mu\nu}$$

$$\frac{\mathrm{d}^2 x^\lambda}{\mathrm{d}\tau^2} = -\Gamma^\lambda_{\mu\nu}[\boldsymbol{g}(\vec{x})]\frac{\mathrm{d}x^\mu}{\mathrm{d}\tau}\frac{\mathrm{d}x^\nu}{\mathrm{d}\tau}$$

$$-\Delta h_{00} = 8\pi\rho, \; -\Delta h_{0i} = 16\pi j_i$$

$$\vec{\nabla}\cdot\vec{E} = -4\pi\rho$$

$$\vec{\nabla}\cdot\vec{B} = 0$$

$$\vec{\nabla}\times\vec{E} = 0$$

$$\vec{\nabla}\times\vec{B} = -16\pi\vec{j}$$

# Gravitoelektromagnetismus

$c = G = 1$

$(+,-,-,-)$

UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

*Offen im Denken*

Annahmen: $g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}$, $\boldsymbol{h} \ll \boldsymbol{\eta}$, $\tau \approx t$

Substitutionen: $\vec{E} = \frac{1}{2}\vec{\nabla} h_{00}$, $B_j = -\varepsilon_{jlm}\frac{\partial h_{0m}}{\partial x^l}$

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = 8\pi T_{\mu\nu}$$

$$-\Delta h_{00} = 8\pi\rho, \; -\Delta h_{0i} = 16\pi j_i$$

$$\vec{\nabla}\cdot\vec{E} = -4\pi\rho$$

$$\vec{\nabla}\cdot\vec{B} = 0$$

$$\vec{\nabla}\times\vec{E} = 0$$

$$\vec{\nabla}\times\vec{B} = -16\pi\vec{j}$$

$$\frac{\mathrm{d}^2 x^\lambda}{\mathrm{d}\tau^2} = -\Gamma^\lambda_{\mu\nu}[\boldsymbol{g}(\vec{x})]\frac{\mathrm{d}x^\mu}{\mathrm{d}\tau}\frac{\mathrm{d}x^\nu}{\mathrm{d}\tau}$$

$$\frac{d^2 x^i}{dt^2} = -\frac{1}{2}\frac{\partial h_{00}}{\partial x^i} + \varepsilon_{ijk}\varepsilon_{jlm}\frac{\partial h_{0m}}{\partial x^l}\frac{dx^k}{dt}$$

# Gravitoelektromagnetismus

$$c = G = 1$$
$$(+,-,-,-)$$

UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

*Offen im Denken*

Annahmen: $g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}$, $\boldsymbol{h} \ll \boldsymbol{\eta}$, $\tau \approx t$

Substitutionen: $\vec{E} = \frac{1}{2}\vec{\nabla} h_{00}$, $B_j = -\varepsilon_{jlm}\frac{\partial h_{0m}}{\partial x^l}$

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = 8\pi T_{\mu\nu}$$

$$-\Delta h_{00} = 8\pi\rho, \; -\Delta h_{0i} = 16\pi j_i$$

$$\frac{\mathrm{d}^2 x^\lambda}{\mathrm{d}\tau^2} = -\Gamma^\lambda_{\mu\nu}[\boldsymbol{g}(\vec{x})]\frac{\mathrm{d}x^\mu}{\mathrm{d}\tau}\frac{\mathrm{d}x^\nu}{\mathrm{d}\tau}$$

$$\frac{d^2 x^i}{dt^2} = -\frac{1}{2}\frac{\partial h_{00}}{\partial x^i} + \varepsilon_{ijk}\varepsilon_{jlm}\frac{\partial h_{0m}}{\partial x^l}\frac{dx^k}{dt}$$

$$\vec{\nabla}\cdot\vec{E} = -4\pi\rho$$

$$\vec{\nabla}\cdot\vec{B} = 0$$

$$\vec{\nabla}\times\vec{E} = 0$$

$$\vec{\nabla}\times\vec{B} = -16\pi\vec{j}$$

$$\vec{F} = m\left(\vec{E} + \vec{v}\times\vec{B}\right)$$

# Rotierende Kugelmasse

$$c = G = 1$$

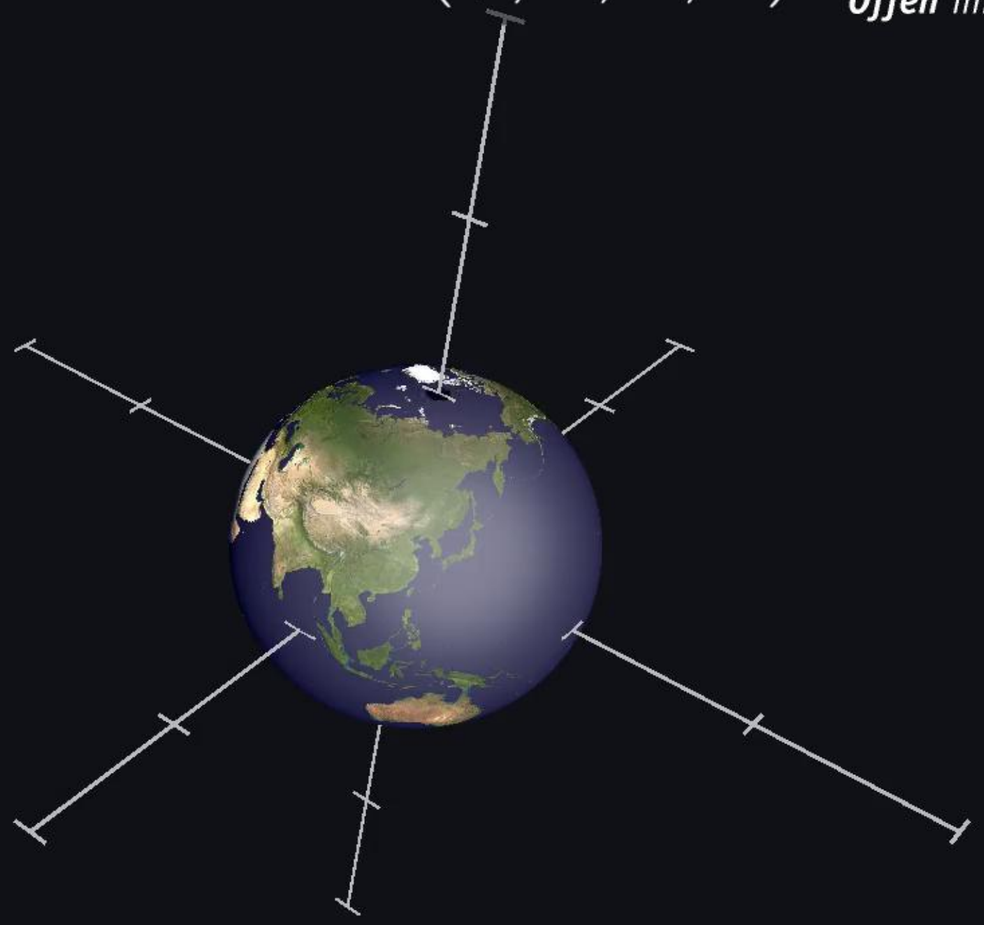
$$(+, -, -, -)$$

# Rotierende Kugelmasse

$$c = G = 1$$

$$(+, -, -, -)$$

$$\rho(|\vec{x}|) = \rho_0 \Theta(R - |\vec{x}|)$$

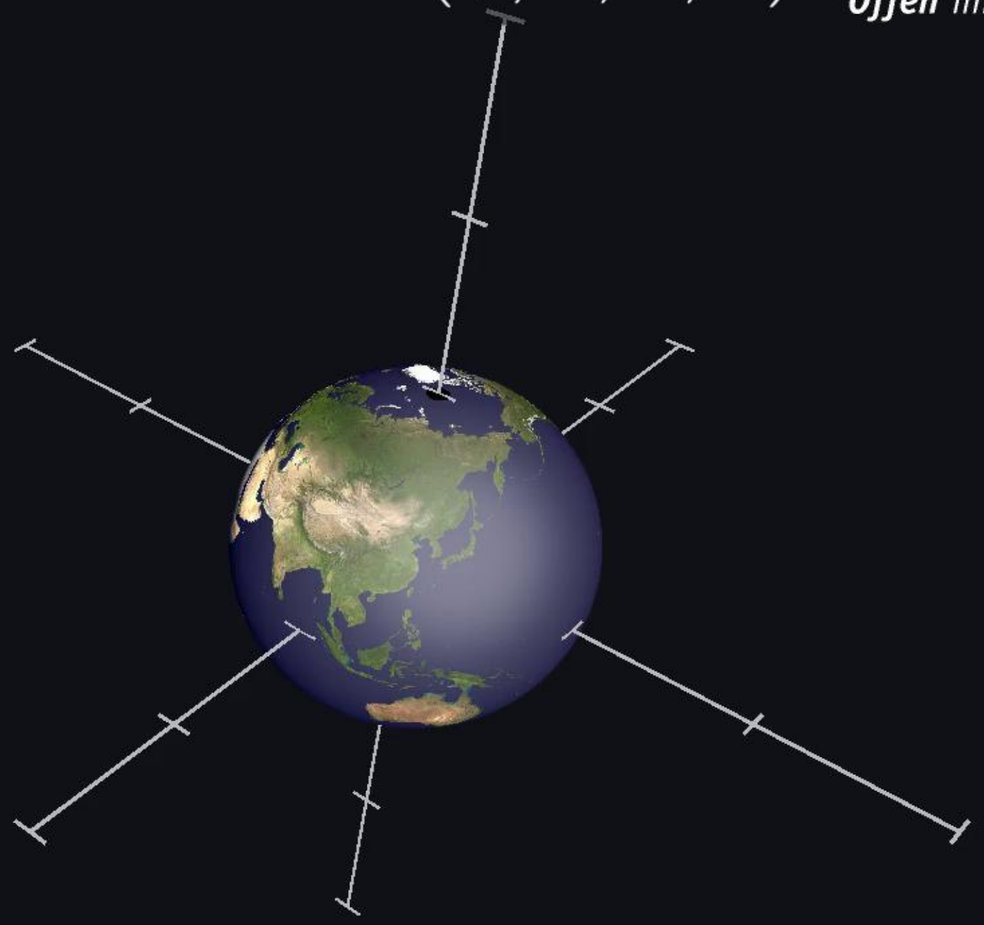


# Rotierende Kugelmasse

$$c = G = R = 1$$

$$(+, -, -, -)$$

$$\rho(|\vec{x}|) = \rho_0 \Theta(R - |\vec{x}|)$$



# Rotierende Kugelmasse

$$c = G = R = 1$$

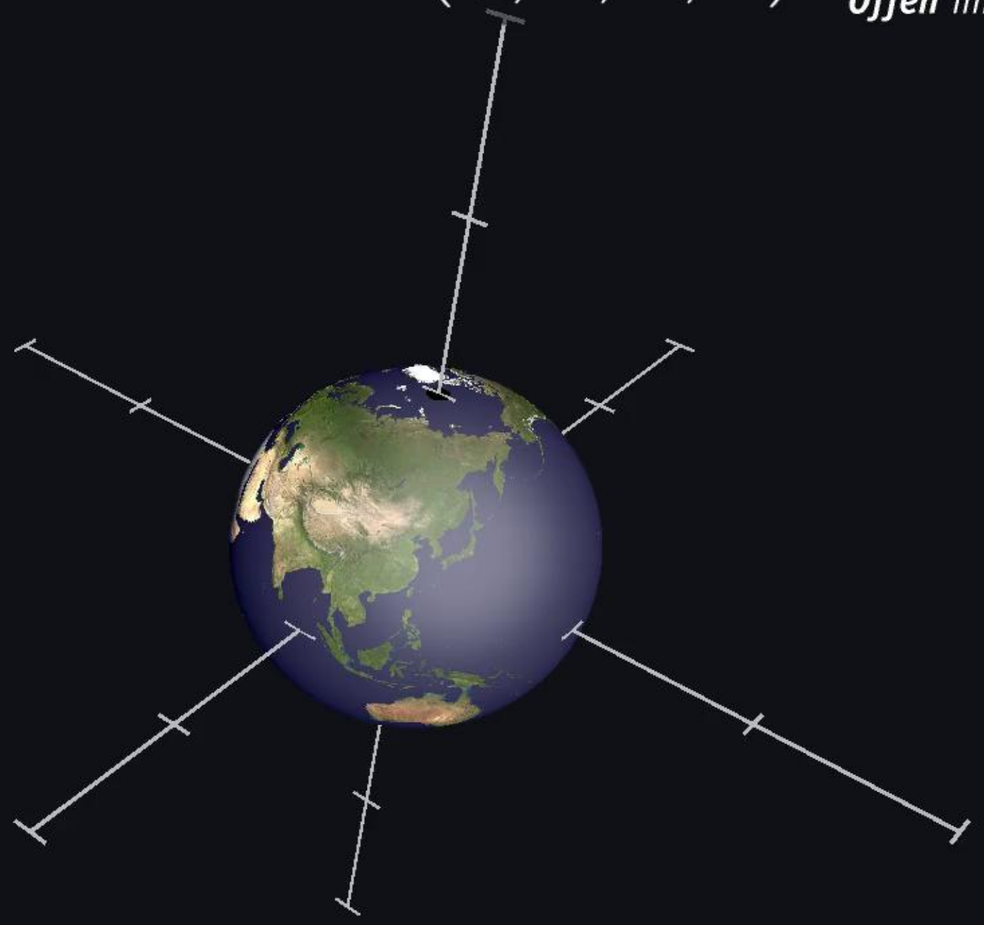
$$(+, -, -, -)$$

UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

*Offen im Denken*

$$\rho(|\vec{x}|) = \rho_0 \Theta(R - |\vec{x}|)$$

$$\vec{j} = \rho_0 \vec{\omega} \times \vec{x} \Theta(R - |\vec{x}|)$$



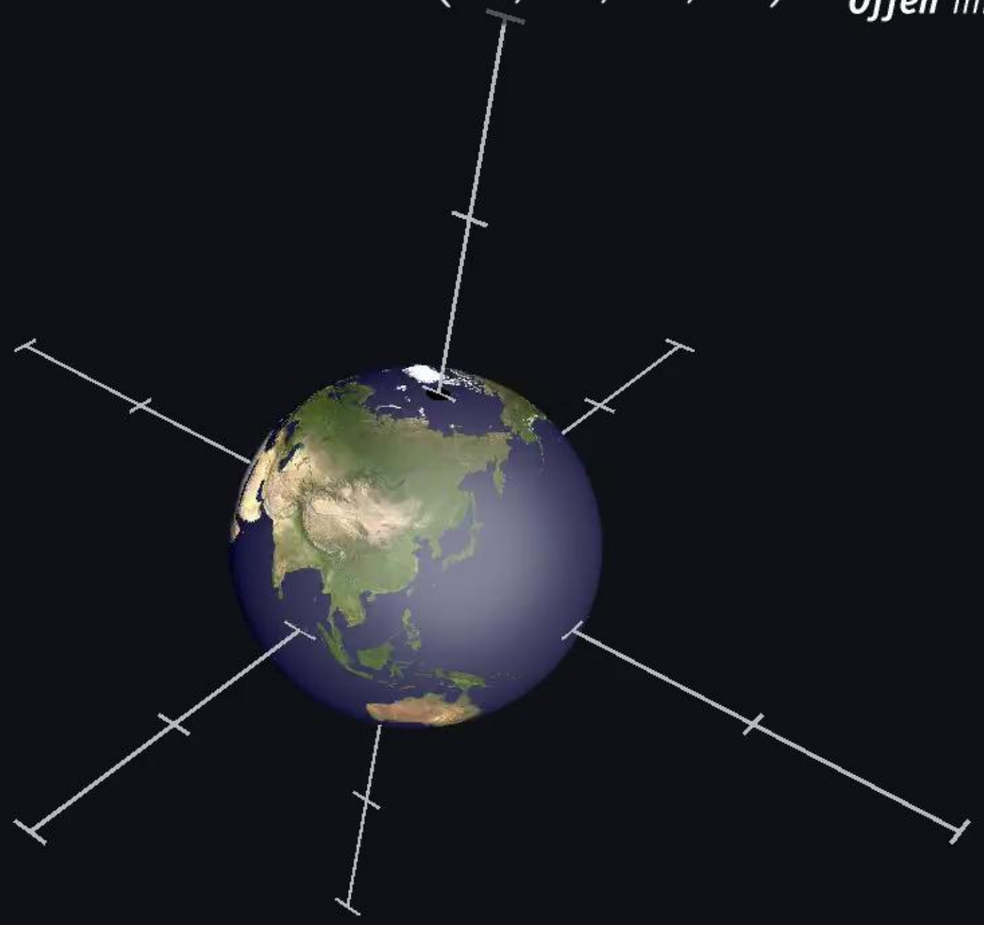
# Rotierende Kugelmasse

$$c = G = R = 1$$

$$(+, -, -, -)$$

$$\rho(|\vec{x}|) = \rho_0 \Theta(R - |\vec{x}|)$$

$$\vec{j} = \rho_0 \vec{\omega} \times \vec{x} \Theta(R - |\vec{x}|)$$



# Rotierende Kugelmasse

$$c = G = R = 1$$

$$(+, -, -, -)$$

UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

*Offen im Denken*

$$\rho(|\vec{x}|) = \rho_0 \Theta(R - |\vec{x}|)$$

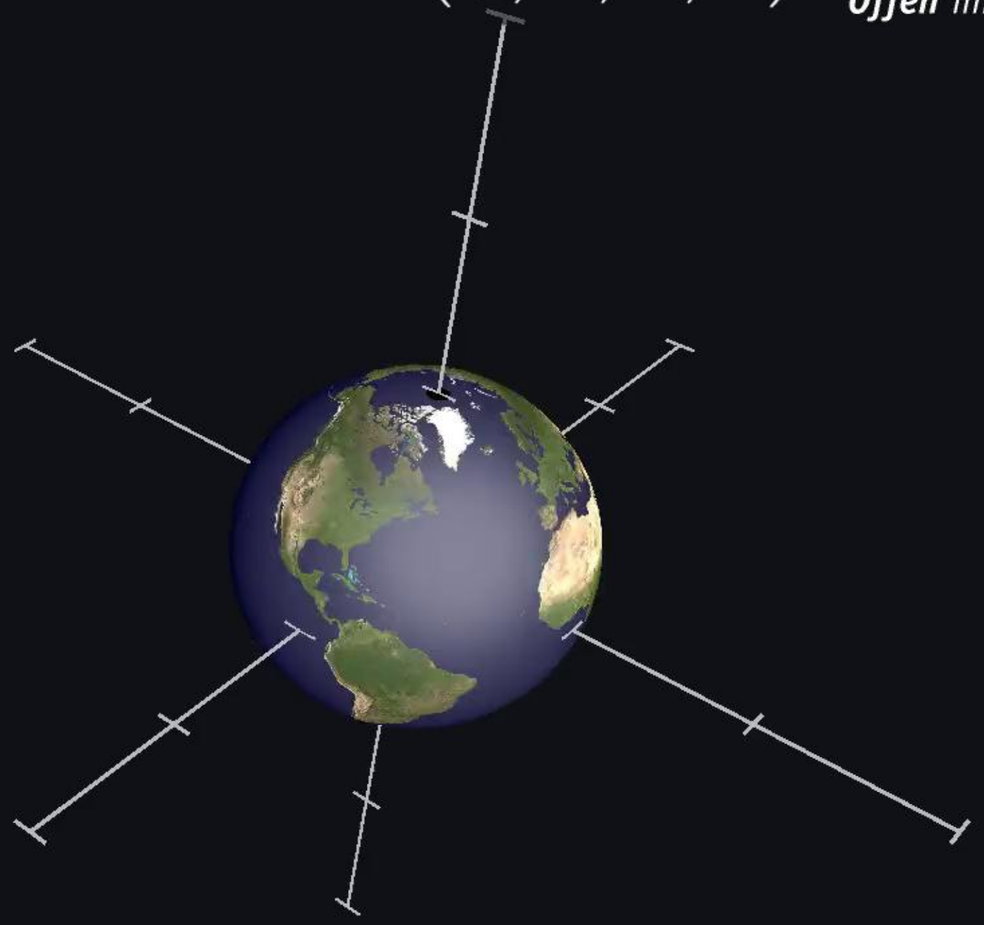
$$\vec{j} = \rho_0 \vec{\omega} \times \vec{x} \Theta(R - |\vec{x}|)$$

$$\vec{E} = -\frac{M\vec{x}}{|\vec{x}|^3}$$

$$\vec{B} = \frac{2}{|\vec{x}|^3}\left[\vec{S} - \frac{3(\vec{S}\cdot\vec{x})\vec{x}}{|\vec{x}|^2}\right]$$

$$I = \frac{2}{5}MR^2$$

$$\vec{S} = I\vec{\omega}$$



# EM-Felder

$$\rho(|\vec{x}|) = \rho_0 \Theta(R - |\vec{x}|)$$

$$\vec{j} = \rho_0 \vec{\omega} \times \vec{x} \Theta(R - |\vec{x}|)$$

$$\vec{E} = -\frac{M\vec{x}}{|\vec{x}|^3}$$

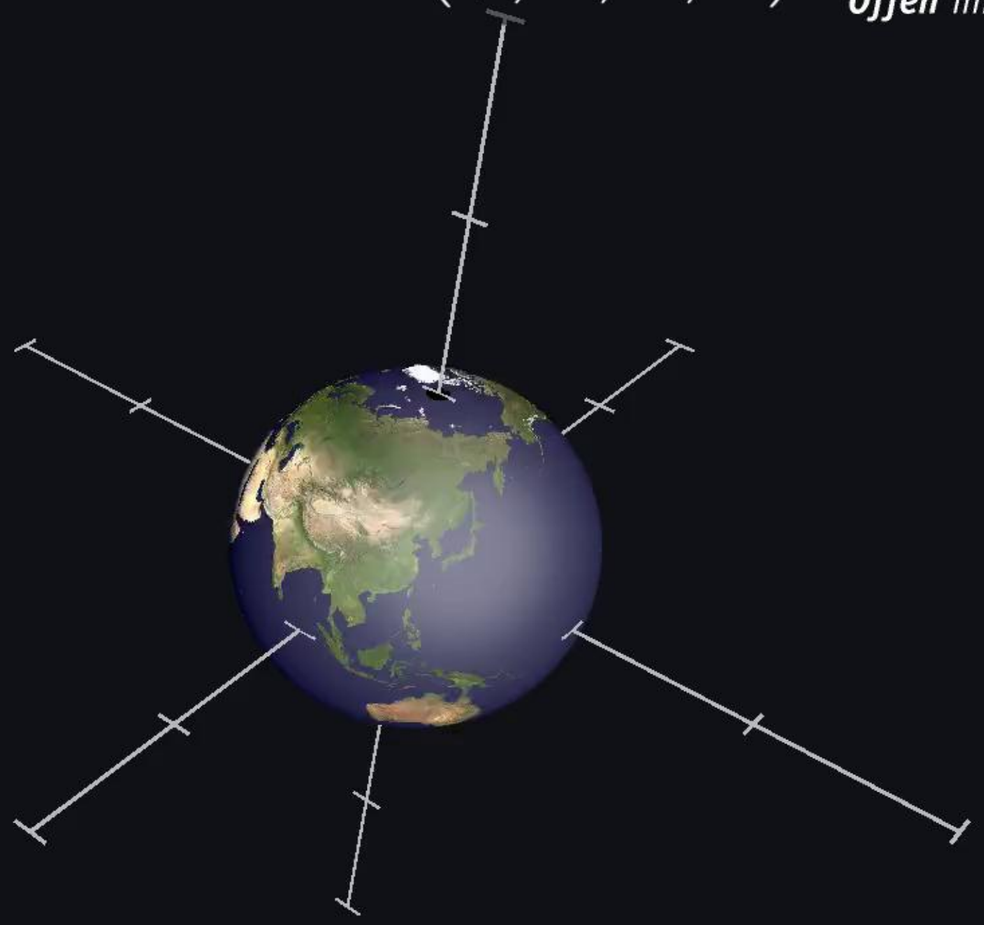
$$\vec{B} = \frac{2}{|\vec{x}|^3}\left[\vec{S} - \frac{3(\vec{S}\cdot\vec{x})\vec{x}}{|\vec{x}|^2}\right]$$

$$I = \frac{2}{5}MR^2$$

$$\vec{S} = I\vec{\omega}$$

$$c = G = R = 1$$

$$(+, -, -, -)$$



# EM-Felder

$$\rho(|\vec{x}|) = \rho_0 \Theta(R - |\vec{x}|)$$

$$\vec{j} = \rho_0 \vec{\omega} \times \vec{x} \Theta(R - |\vec{x}|)$$

$$\vec{E} = -\frac{M\vec{x}}{|\vec{x}|^3}$$

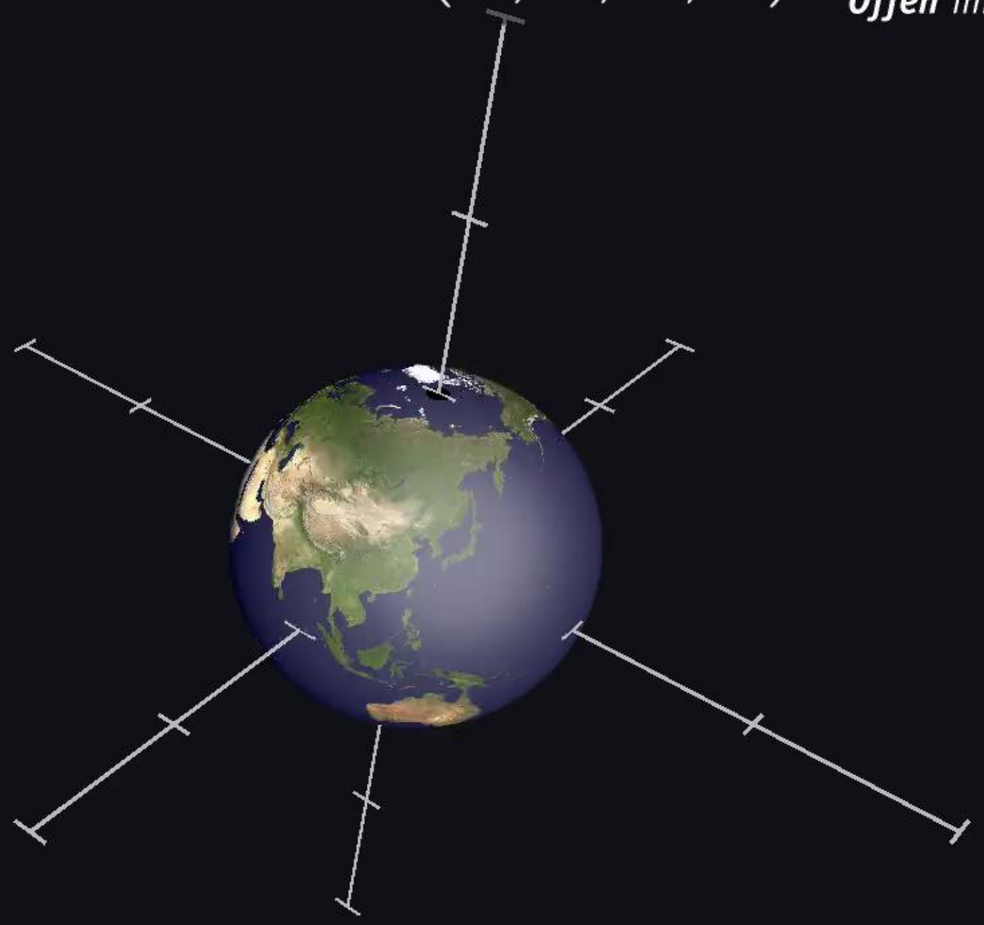
$$\vec{B} = \frac{2}{|\vec{x}|^3}\left[\vec{S} - \frac{3(\vec{S}\cdot\vec{x})\vec{x}}{|\vec{x}|^2}\right]$$

$$I = \frac{2}{5}MR^2$$

$$\vec{S} = I\vec{\omega}$$

$$c = G = R = 1$$

$$(+, -, -, -)$$



# EM-Felder

$$c = G = R = 1$$

$$(+,-,-,-)$$

UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

*Offen im Denken*

$$\rho(|\vec{x}|) = \rho_0 \Theta(R - |\vec{x}|)$$

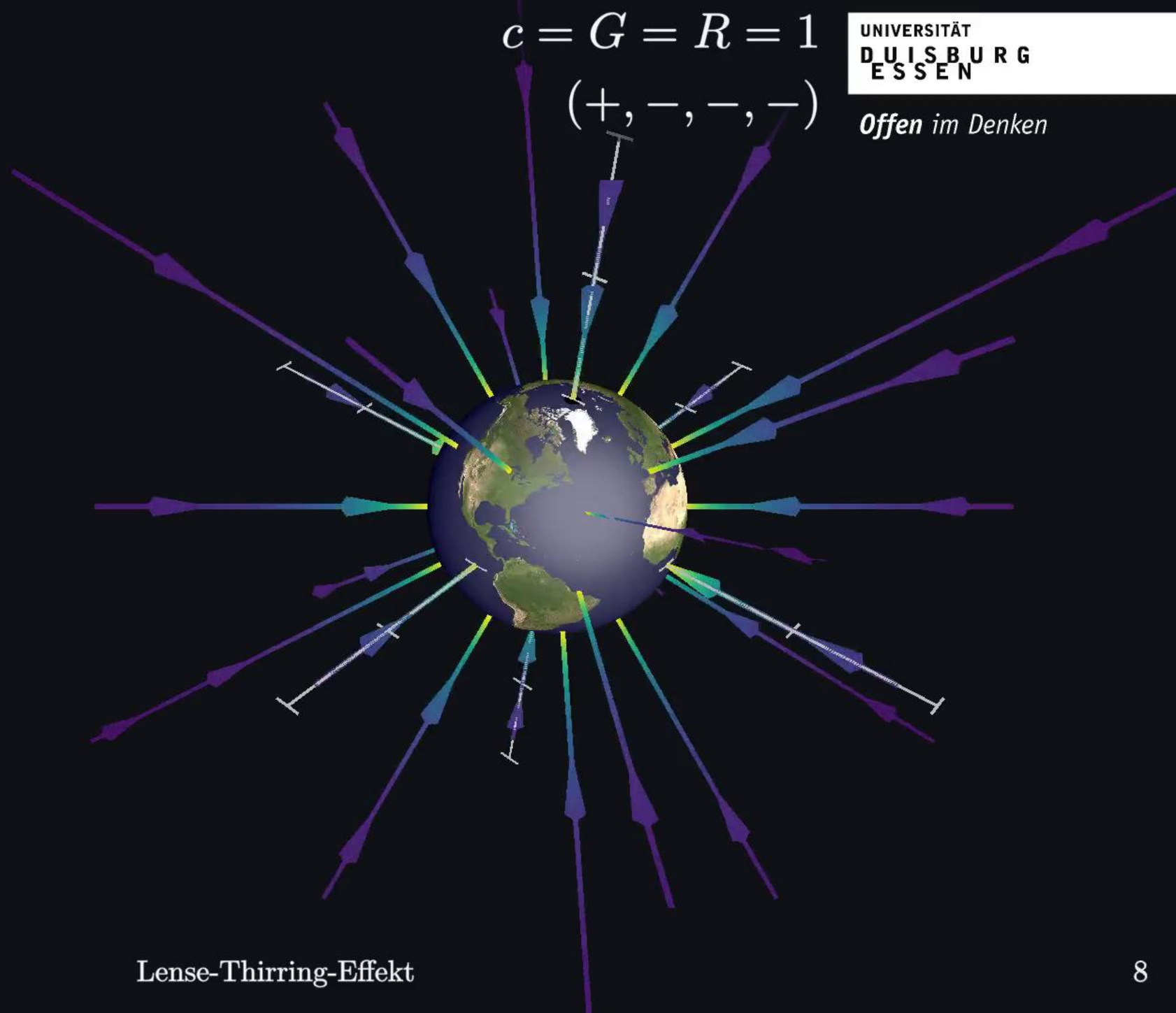
$$\vec{j} = \rho_0 \vec{\omega} \times \vec{x} \Theta(R - |\vec{x}|)$$

$$\boxed{\vec{E} = -\frac{M\vec{x}}{|\vec{x}|^3}}$$

$$\vec{B} = \frac{2}{|\vec{x}|^3}\left[\vec{S} - \frac{3(\vec{S}\cdot\vec{x})\vec{x}}{|\vec{x}|^2}\right]$$

$$I = \frac{2}{5}MR^2$$

$$\vec{S} = I\vec{\omega}$$



# EM-Felder

$$c = G = R = 1$$

$$(+,-,-,-)$$

UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

*Offen im Denken*

$$\rho(|\vec{x}|) = \rho_0 \Theta(R - |\vec{x}|)$$

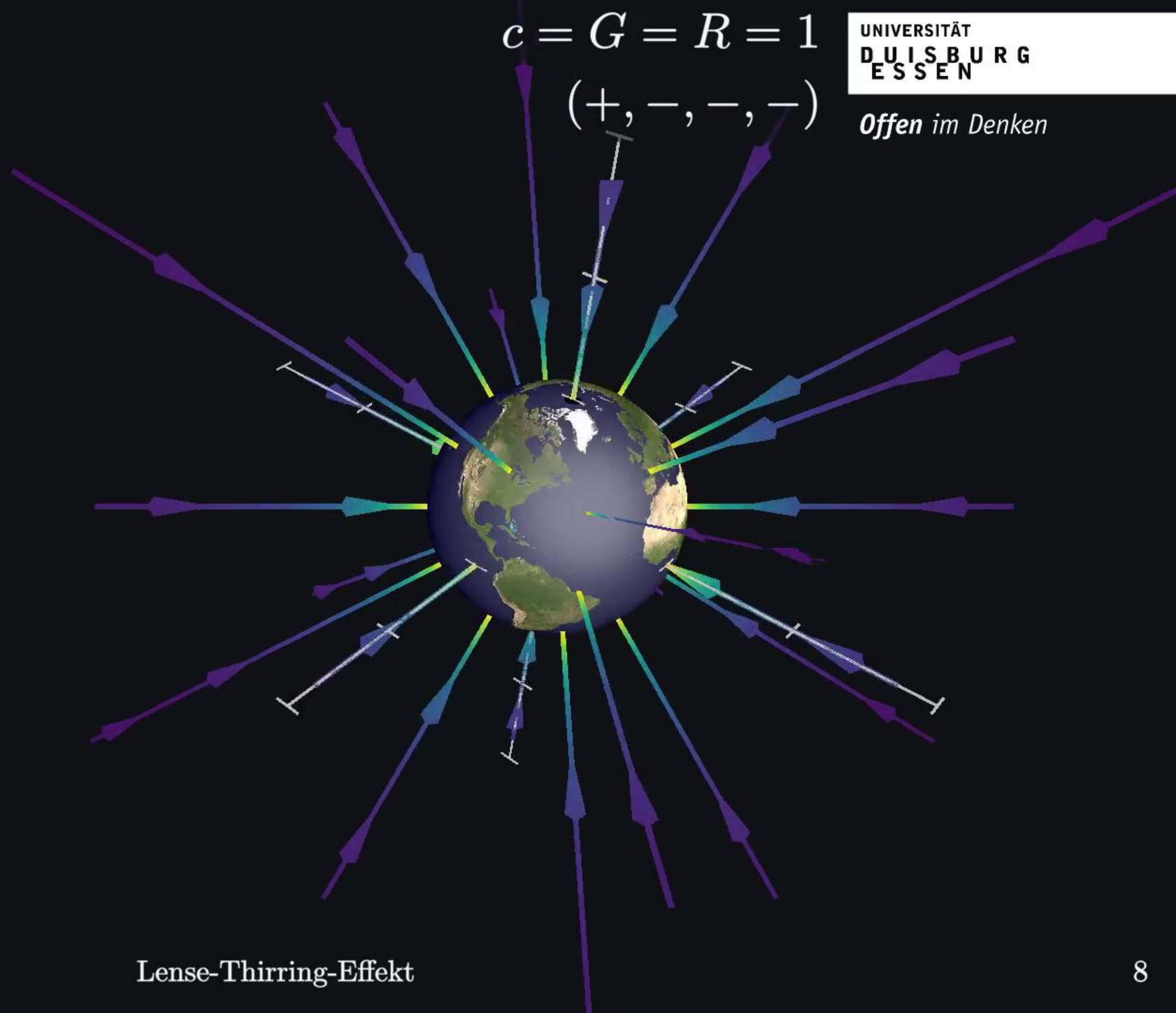
$$\vec{j} = \rho_0 \vec{\omega} \times \vec{x} \Theta(R - |\vec{x}|)$$

$$\boxed{\vec{E} = -\frac{M\vec{x}}{|\vec{x}|^3}}$$

$$\vec{B} = \frac{2}{|\vec{x}|^3}\left[\vec{S} - \frac{3(\vec{S}\cdot\vec{x})\vec{x}}{|\vec{x}|^2}\right]$$

$$I = \frac{2}{5}MR^2$$

$$\vec{S} = I\vec{\omega}$$



# EM-Felder

$$c = G = R = 1$$

$$(+,-,-,-)$$

UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

*Offen im Denken*

$$\rho(|\vec{x}|) = \rho_0 \Theta(R - |\vec{x}|)$$

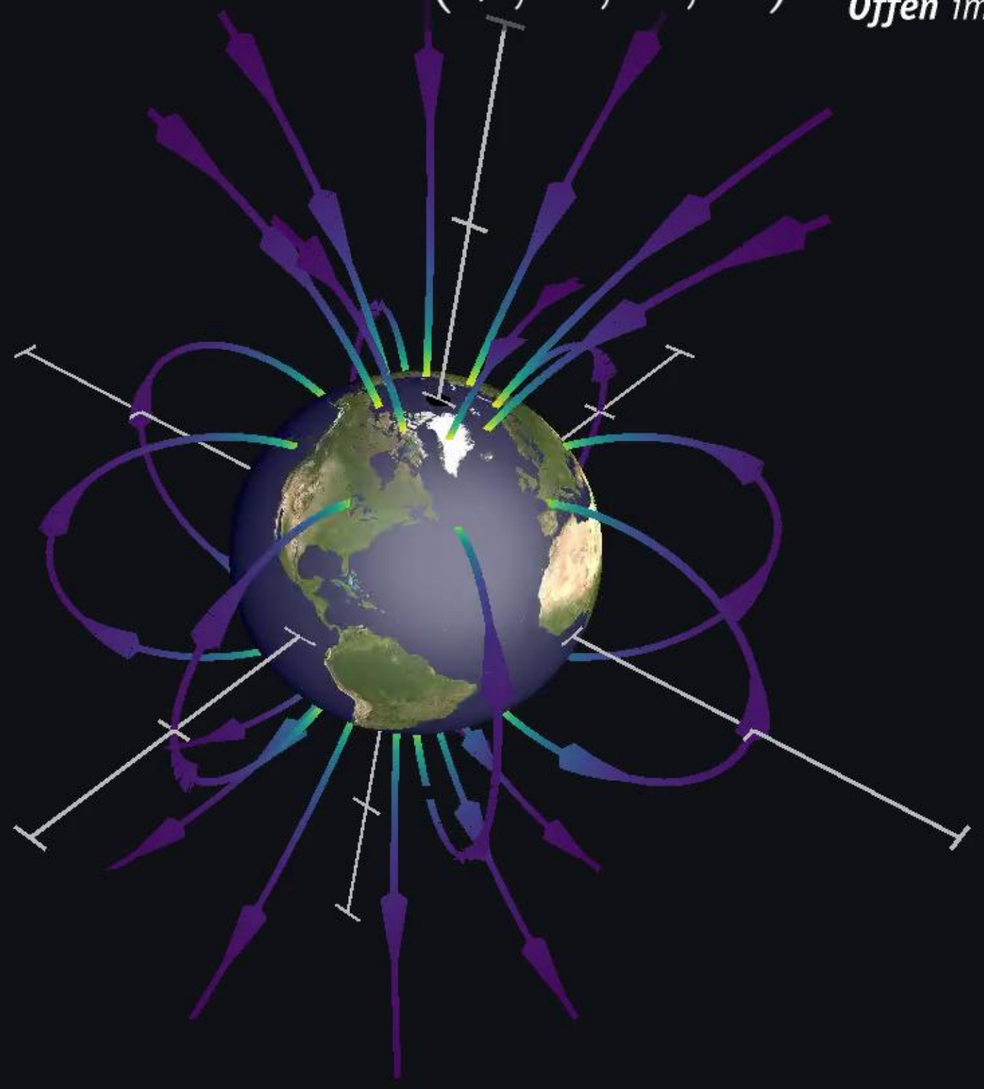
$$\vec{j} = \rho_0 \vec{\omega} \times \vec{x} \Theta(R - |\vec{x}|)$$

$$\vec{E} = -\frac{M\vec{x}}{|\vec{x}|^3}$$

$$\boxed{\vec{B} = \frac{2}{|\vec{x}|^3}\left[\vec{S} - \frac{3(\vec{S}\cdot\vec{x})\vec{x}}{|\vec{x}|^2}\right]}$$

$$I = \frac{2}{5}MR^2$$

$$\vec{S} = I\vec{\omega}$$



$$c = G = R = 1$$

$$(+,-,-,-)$$

UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

*Offen im Denken*

# EM-Felder

$$\rho(|\vec{x}|) = \rho_0 \Theta(R - |\vec{x}|)$$

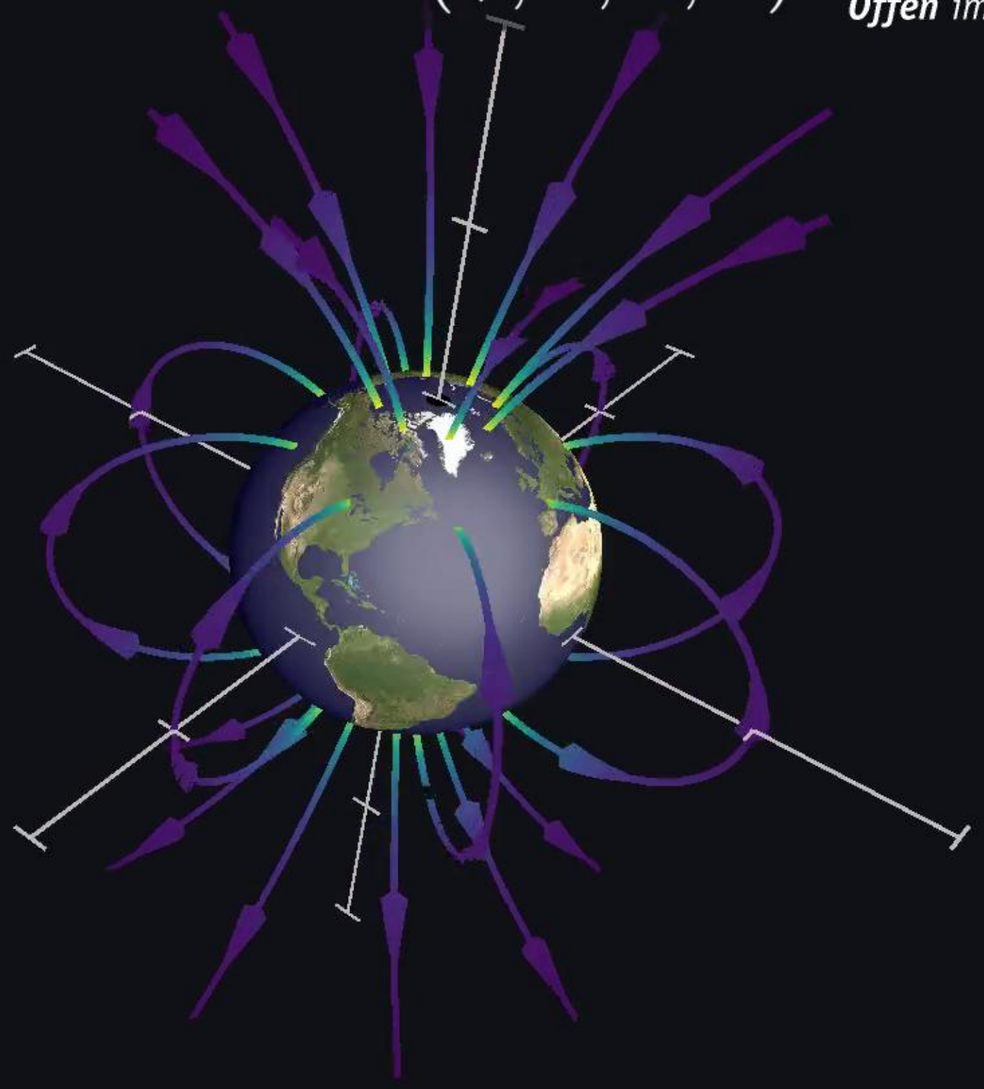
$$\vec{j} = \rho_0 \vec{\omega} \times \vec{x} \Theta(R - |\vec{x}|)$$

$$\vec{E} = -\frac{M\vec{x}}{|\vec{x}|^3}$$

$$\boxed{\vec{B} = \frac{2}{|\vec{x}|^3}\left[\vec{S} - \frac{3(\vec{S}\cdot\vec{x})\vec{x}}{|\vec{x}|^2}\right]}$$

$$I = \frac{2}{5}MR^2$$

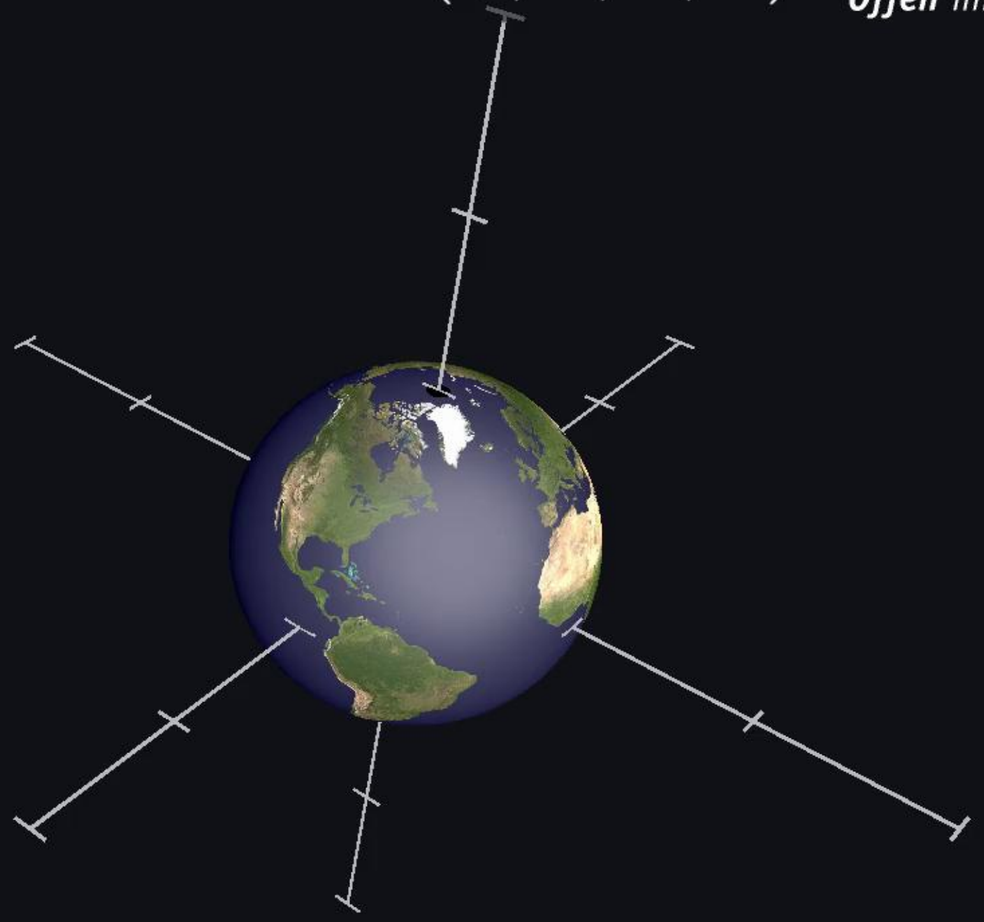
$$\vec{S} = I\vec{\omega}$$



# Trajektorien

$$c = G = R = 1$$

$$(+, -, -, -)$$



# Trajektorien

$$\vec{F} = m\left(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}\right)$$

$$\omega = \ 0.00$$

$$c = G = R = 1$$

$$(+, -, -, -)$$

UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

*Offen im Denken*

# Trajektorien

$$\vec{F} = m\left(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}\right)$$

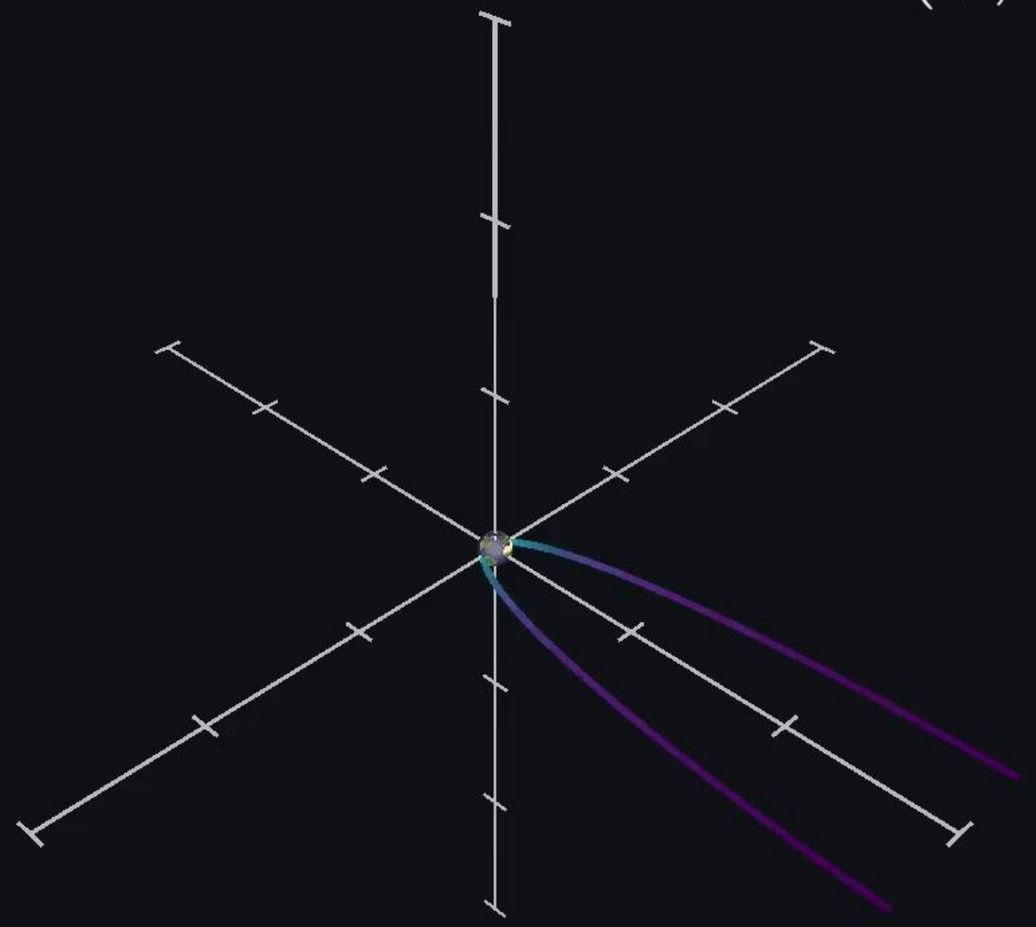
$$\omega = \ 0.00$$

$$c = G = R = 1$$

$$(+, -, -, -)$$

UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

*Offen im Denken*



# Trajektorien

$$\vec{F} = m\left(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}\right)$$

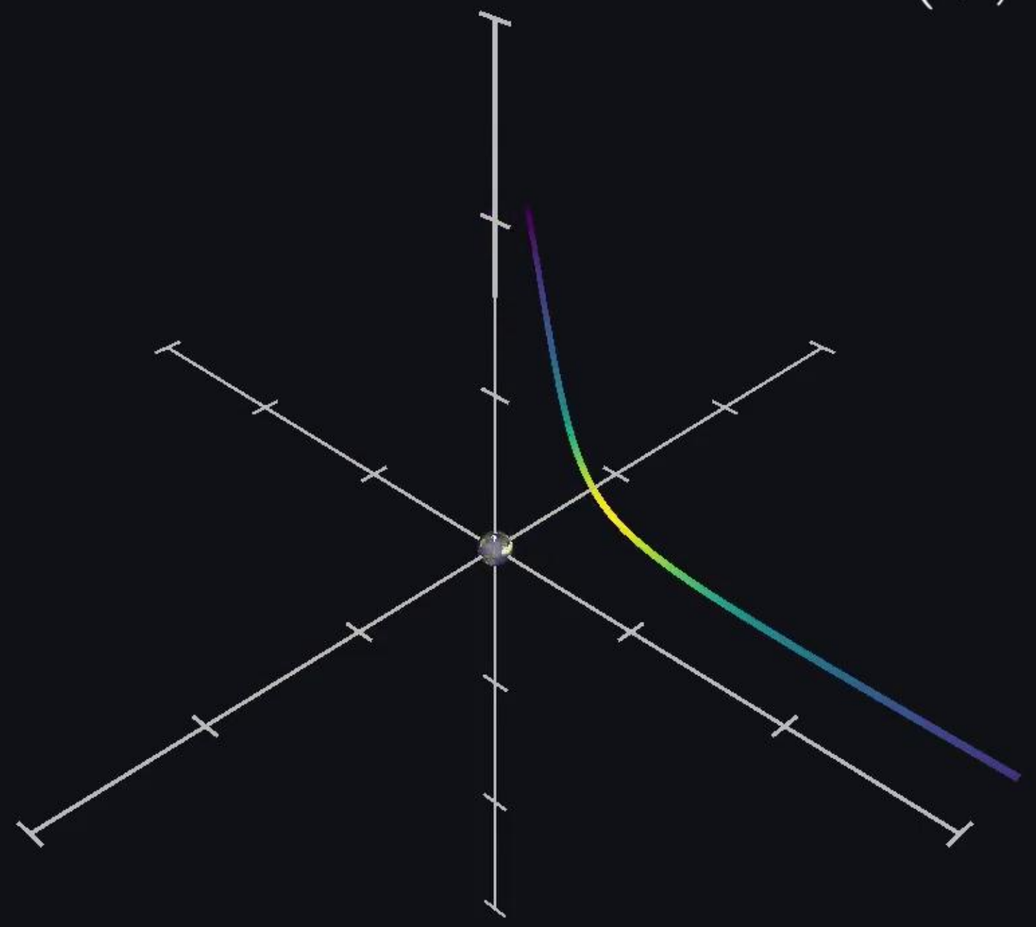
$$\omega = 1.00$$

$$c = G = R = 1$$

$$(+, -, -, -)$$

UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

*Offen im Denken*



# Trajektorien

$$\vec{F} = m\left(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}\right)$$

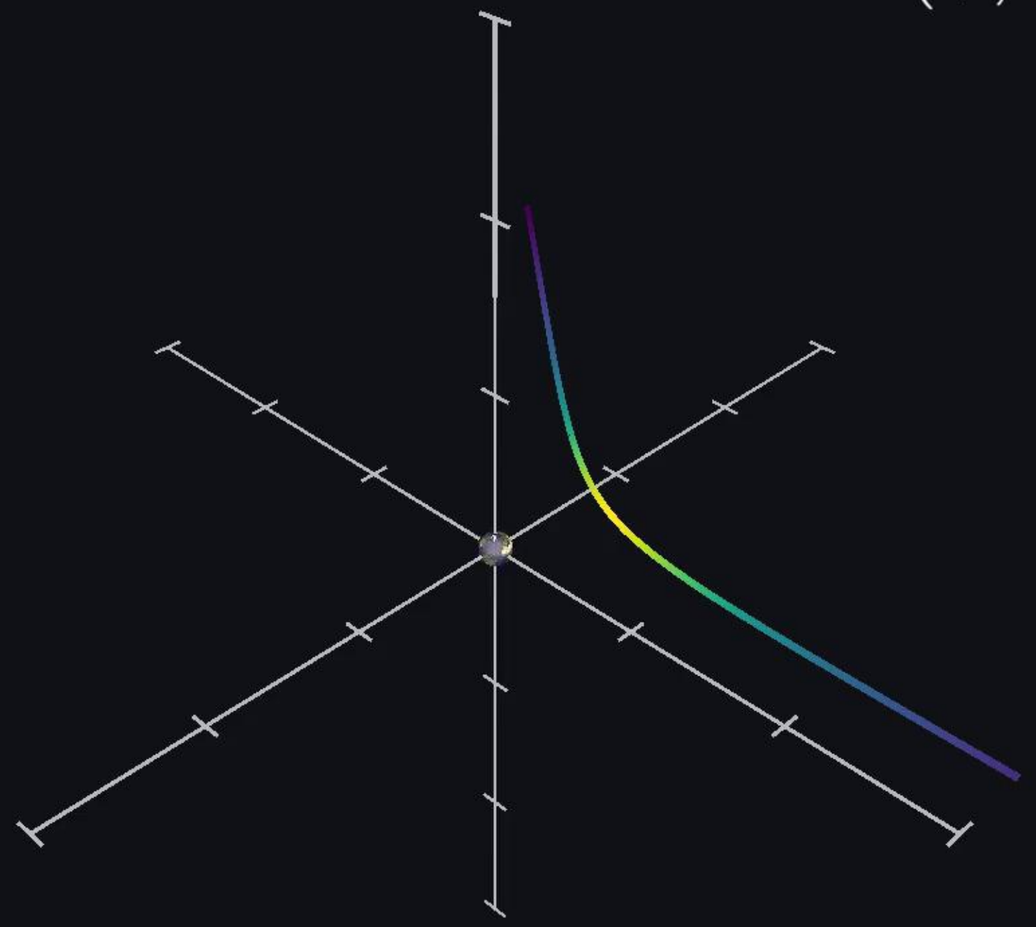
$$\omega = 1.00$$

$$c = G = R = 1$$

$$(+, -, -, -)$$

UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

*Offen im Denken*



# Trajektorien

$$c = G = R = 1$$

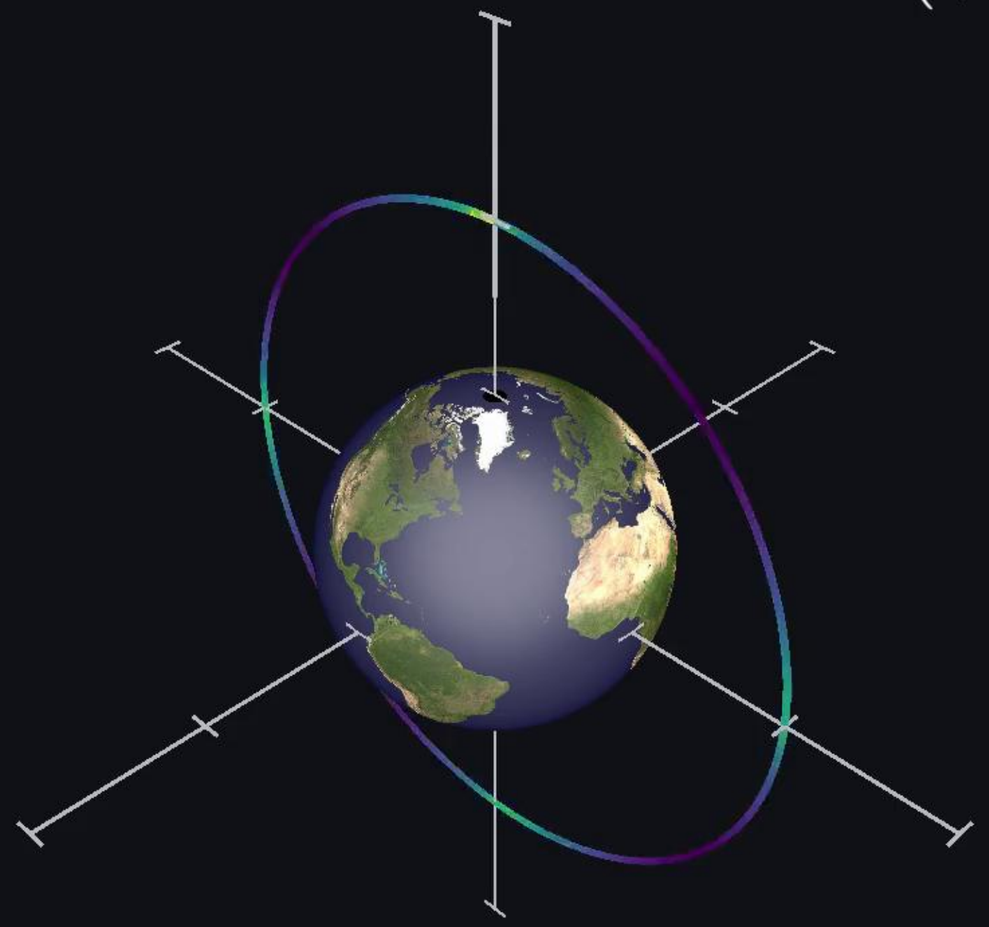
$$(+, -, -, -)$$

UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

*Offen im Denken*

$$\vec{F} = m\left(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}\right)$$

$$\omega = \ 0.00$$



# Trajektorien

$$c = G = R = 1$$

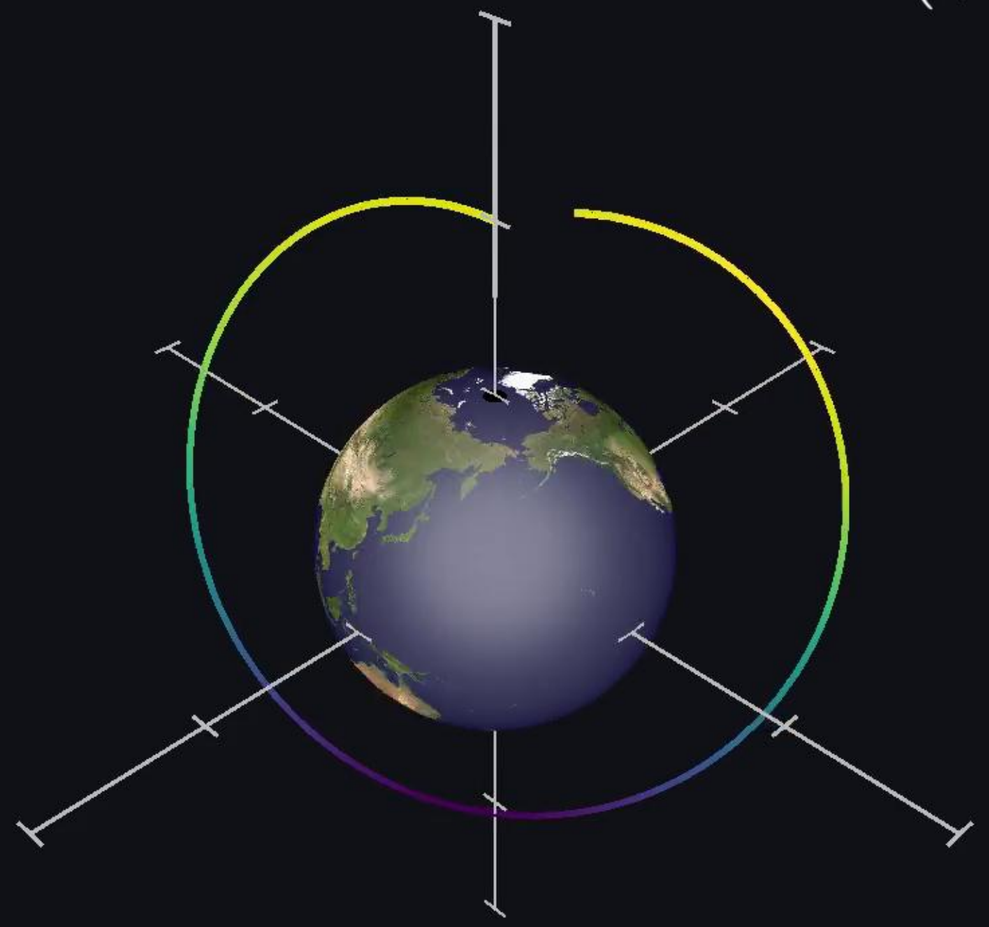
$$(+, -, -, -)$$

UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

*Offen im Denken*

$$\vec{F} = m\left(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}\right)$$

$$\omega = 0.71$$



# Trajektorien

$$c = G = R = 1$$

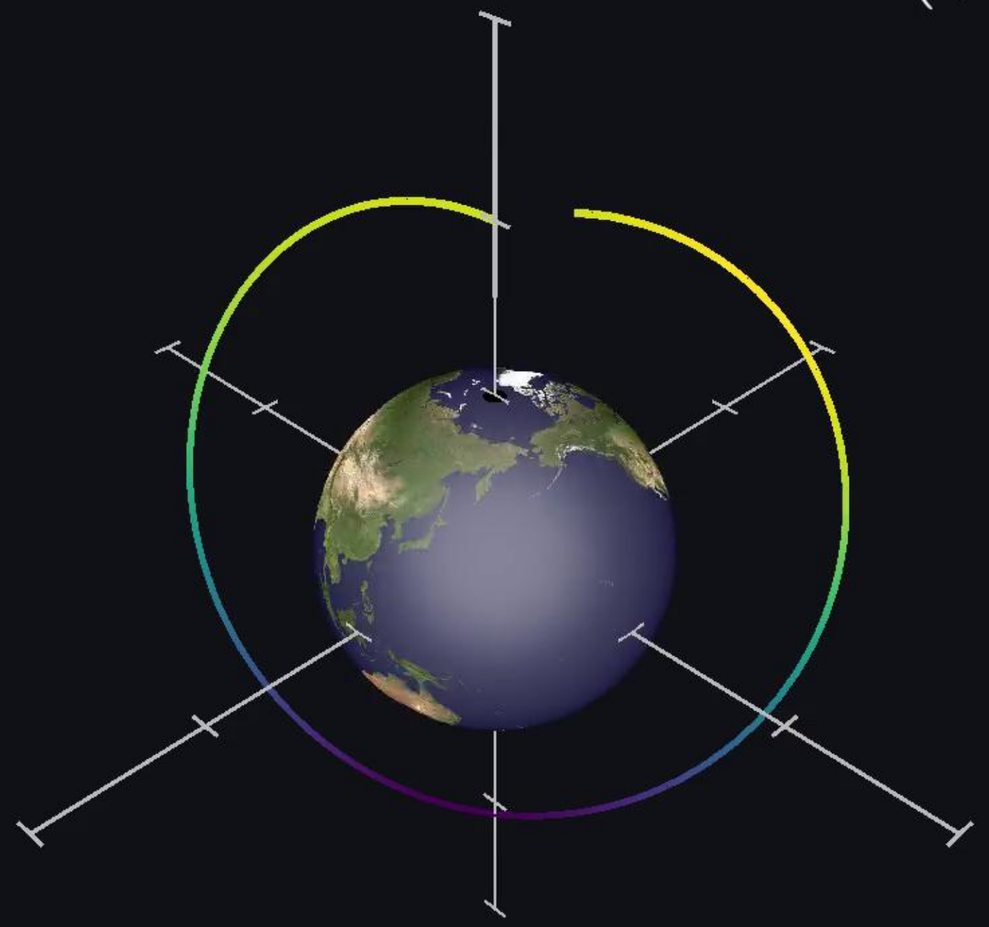
$$(+, -, -, -)$$

UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

*Offen im Denken*

$$\vec{F} = m\left(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}\right)$$

$$\omega = 0.71$$



# Trajektorien

$$c = G = R = 1$$

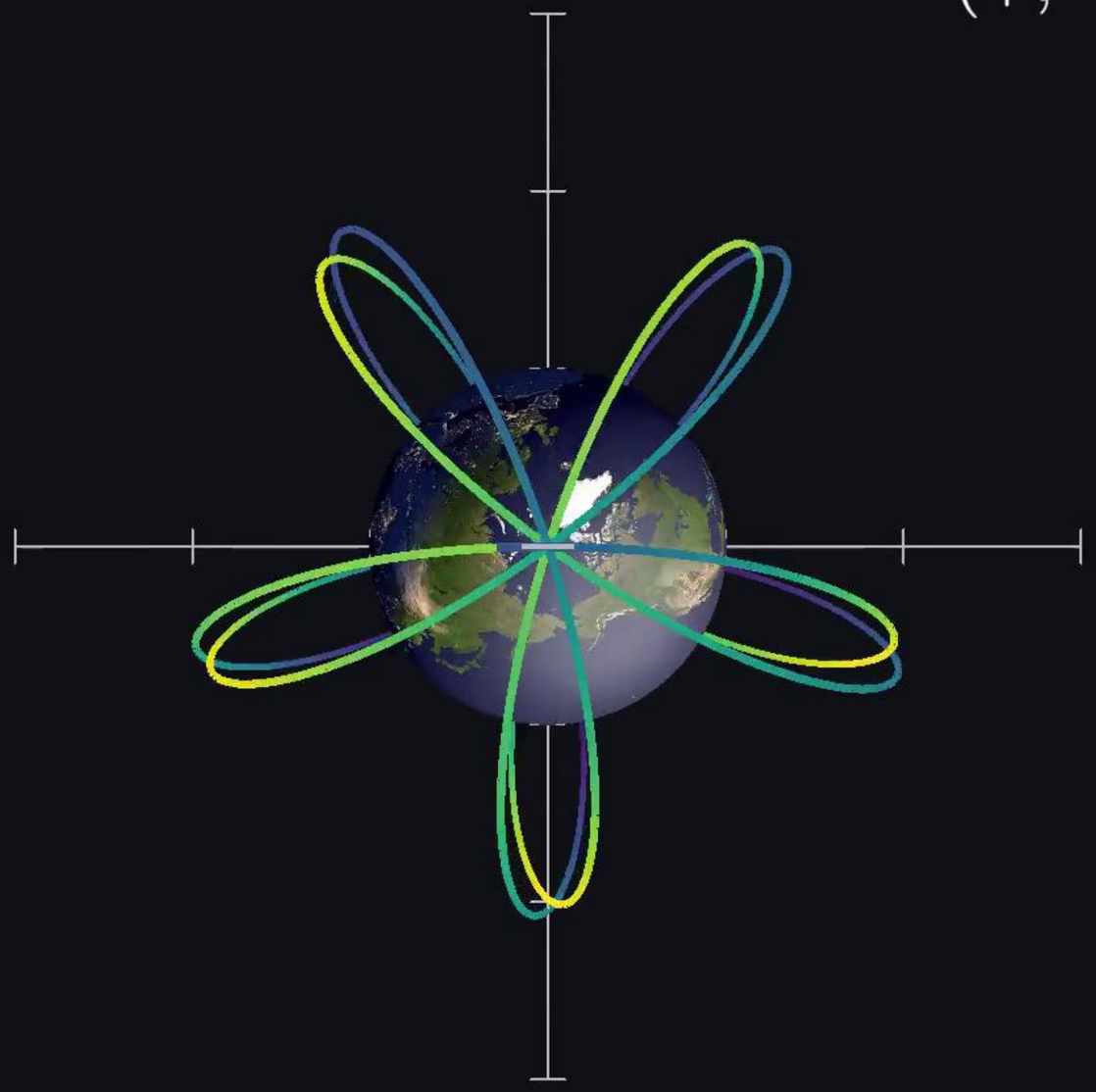
$$(+, -, -, -)$$

UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

*Offen im Denken*

$$\vec{F} = m\left(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}\right)$$

$$\omega = 0.71$$



# Trajektorien

$$c = G = R = 1$$

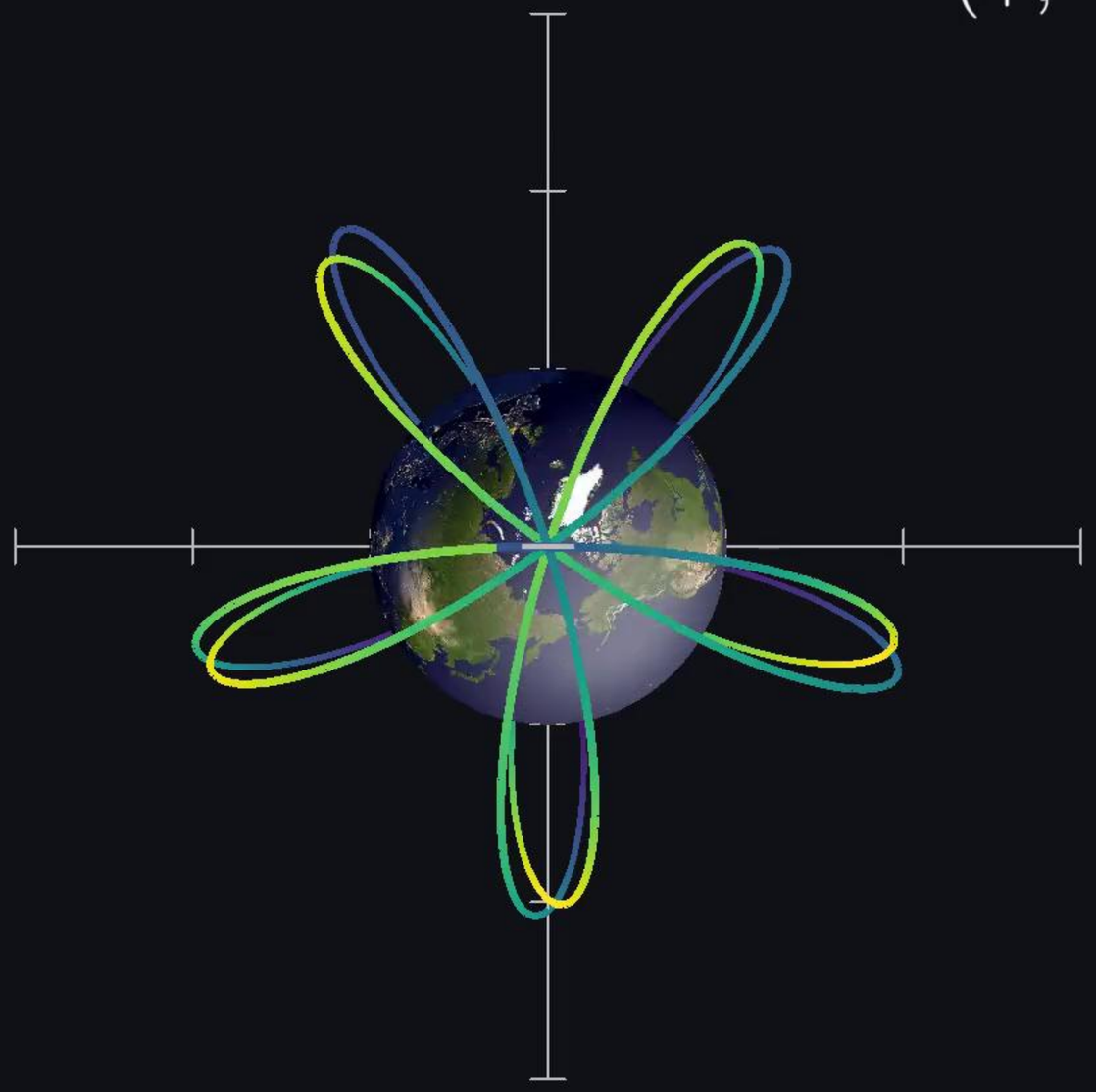
$$(+, -, -, -)$$

UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

*Offen im Denken*

$$\vec{F} = m\left(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}\right)$$

$$\omega = 0.71$$

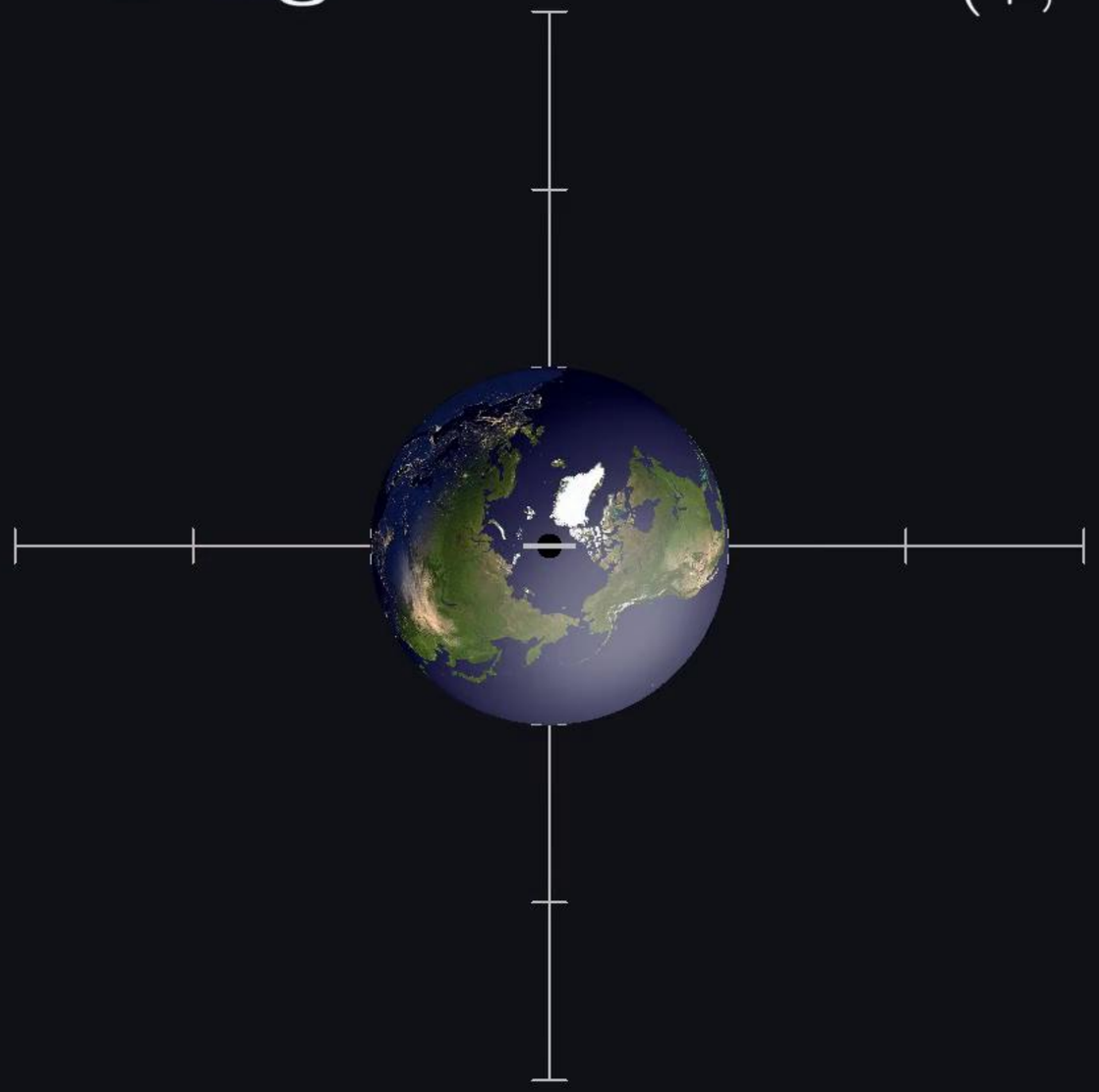


# Raumzeitdarstellung

$$c = G = R = 1$$
$$(+, -, -, -)$$

UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

*Offen im Denken*



# Raumzeitdarstellung

$$c = G = R = 1$$

$$(+, -, -, -)$$

UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

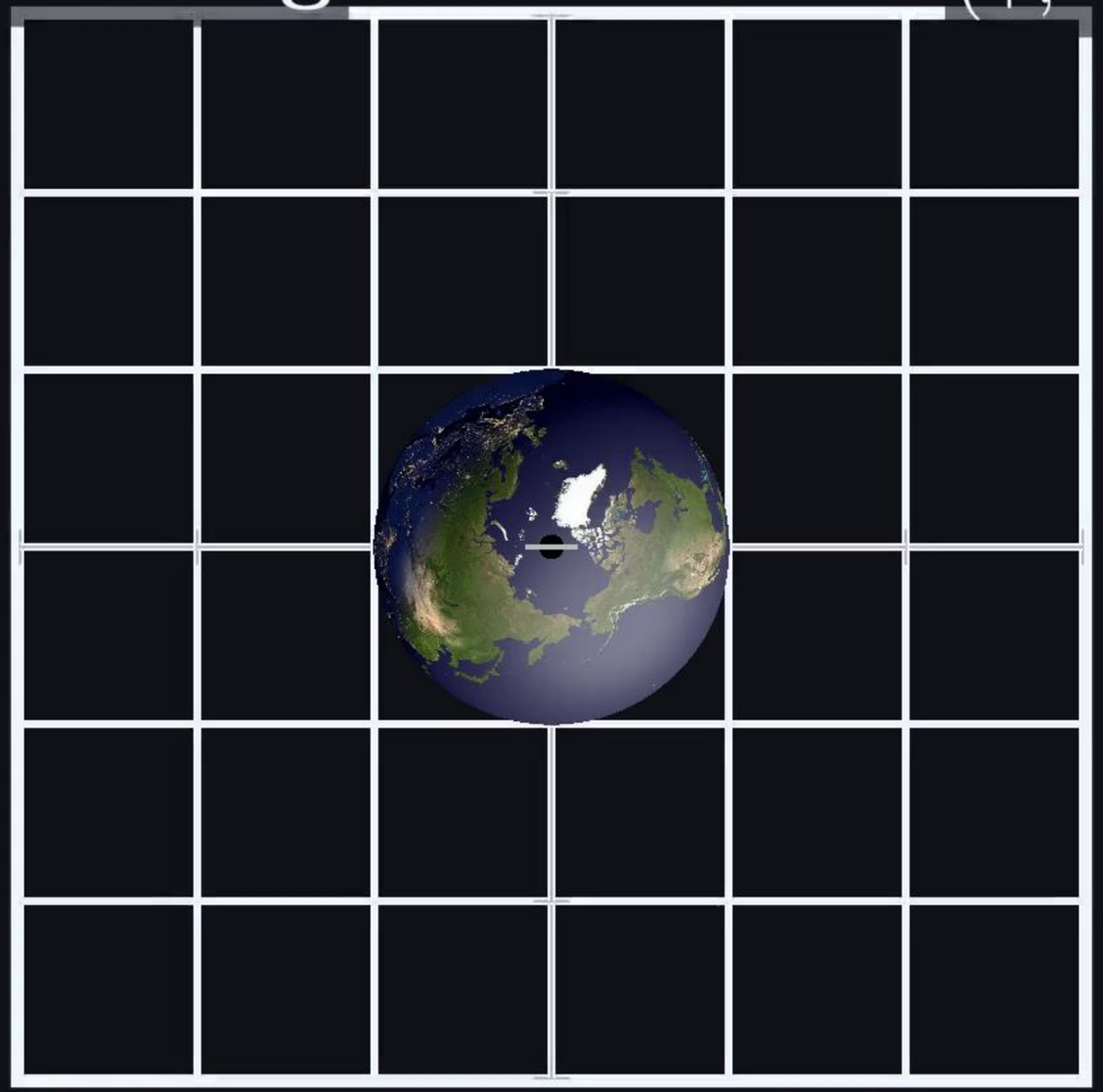
*Offen im Denken*

Zeitentwicklung

für jeden

Gitterpunkt

bei $\omega = 0$



$c = G = R = 1$

$(+, -, -, -)$

UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

*Offen im Denken*

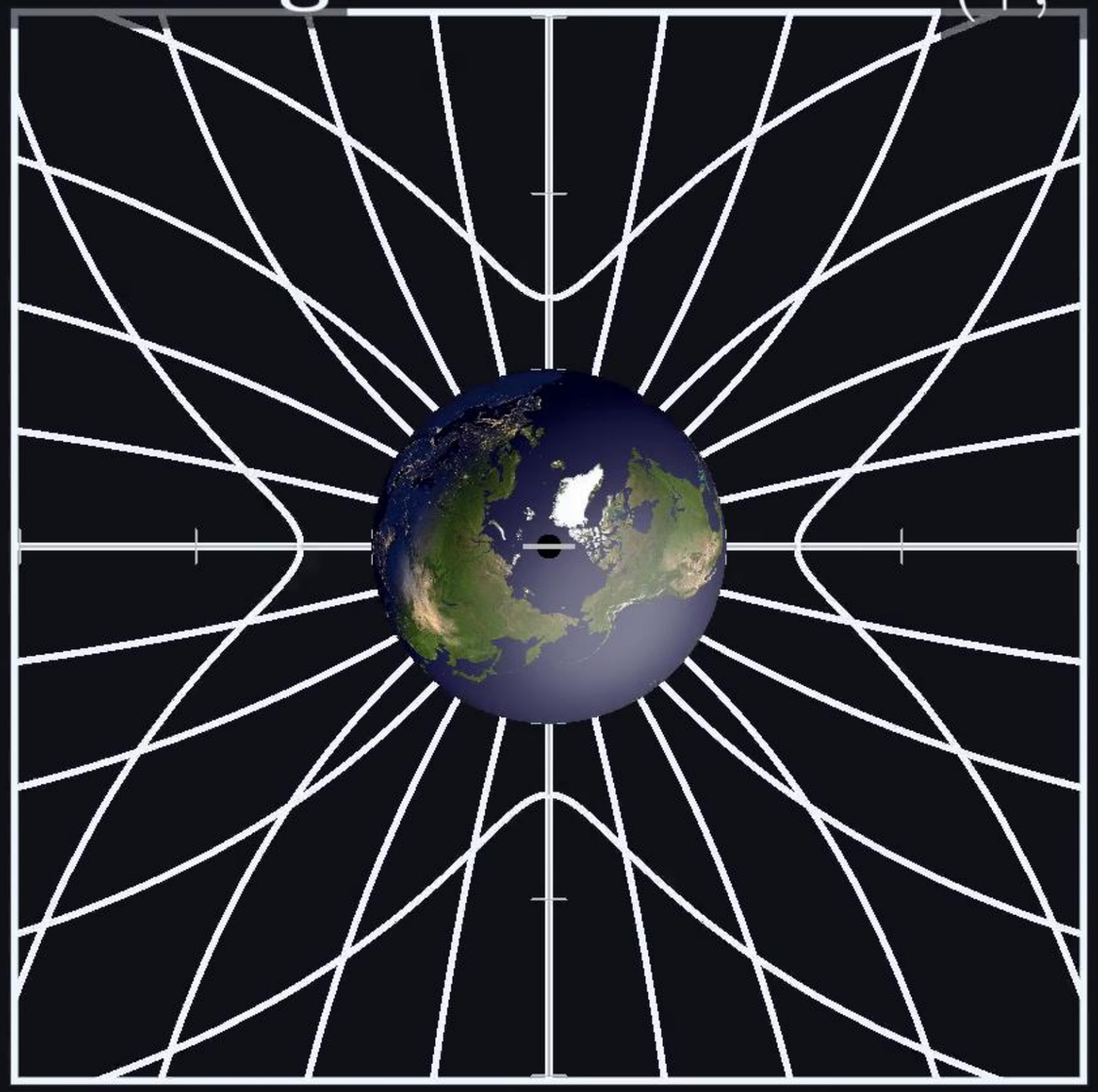
# Raumzeitdarstellung

Zeitentwicklung

für jeden

Gitterpunkt

bei $\omega = 0$



# Raumzeitdarstellung

$$c = G = R = 1$$

$$(+, -, -, -)$$

UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

*Offen im Denken*

Zeitentwicklung

für jeden

Gitterpunkt

bei $\omega = 1$

$c = G = R = 1$

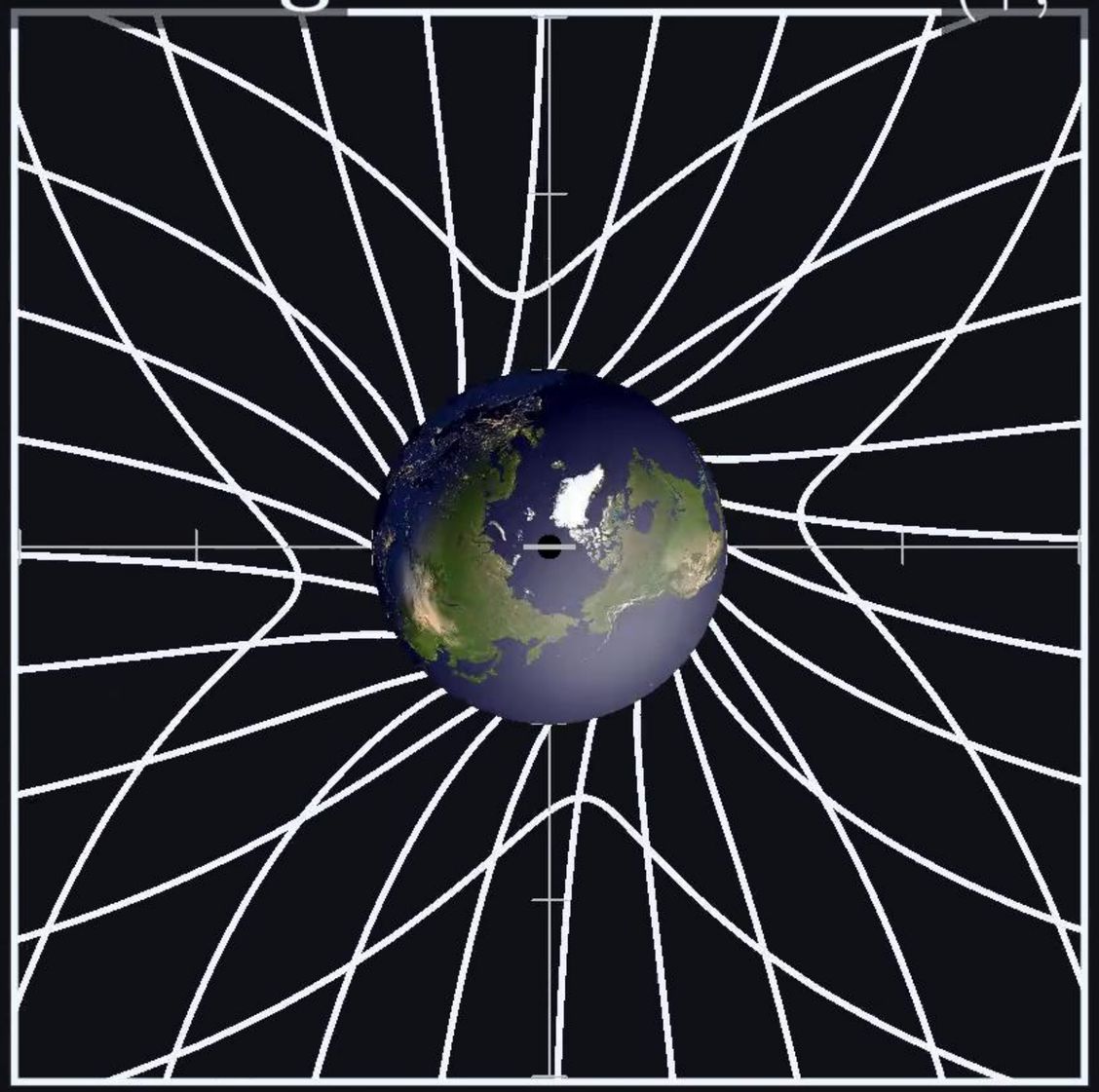
$(+, -, -, -)$

UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

*Offen im Denken*

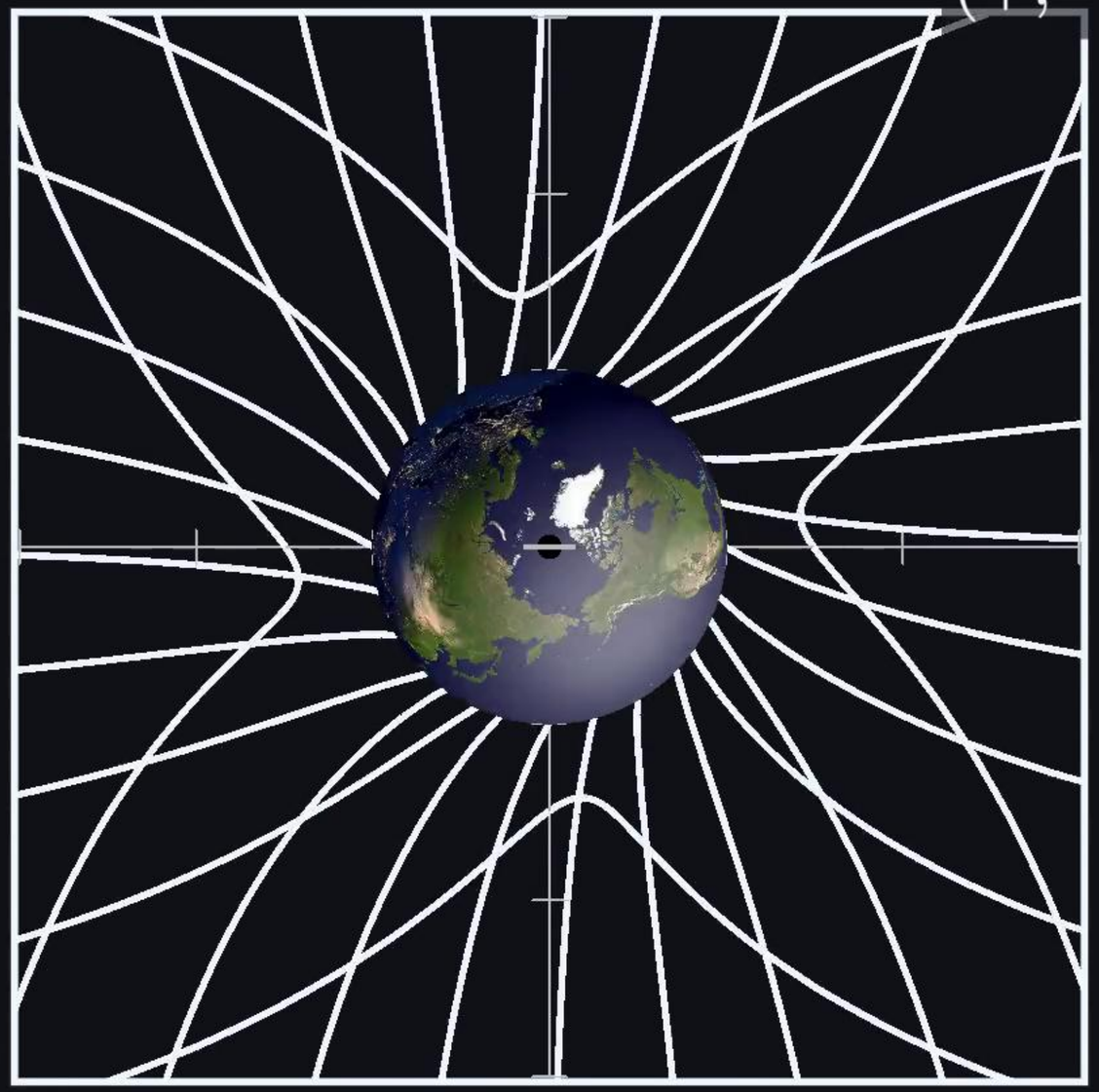
# Raumzeitdarstellung

Zeitentwicklung für jeden Gitterpunkt bei $\omega = 1$



# Präzession

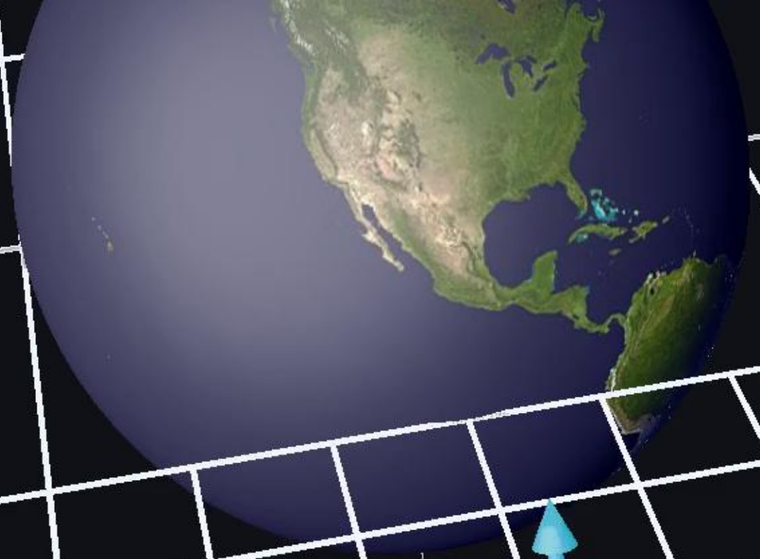
$$c = G = R = 1$$
$$(+, -, -, -)$$



# Präzession

$$c = G = R = 1$$

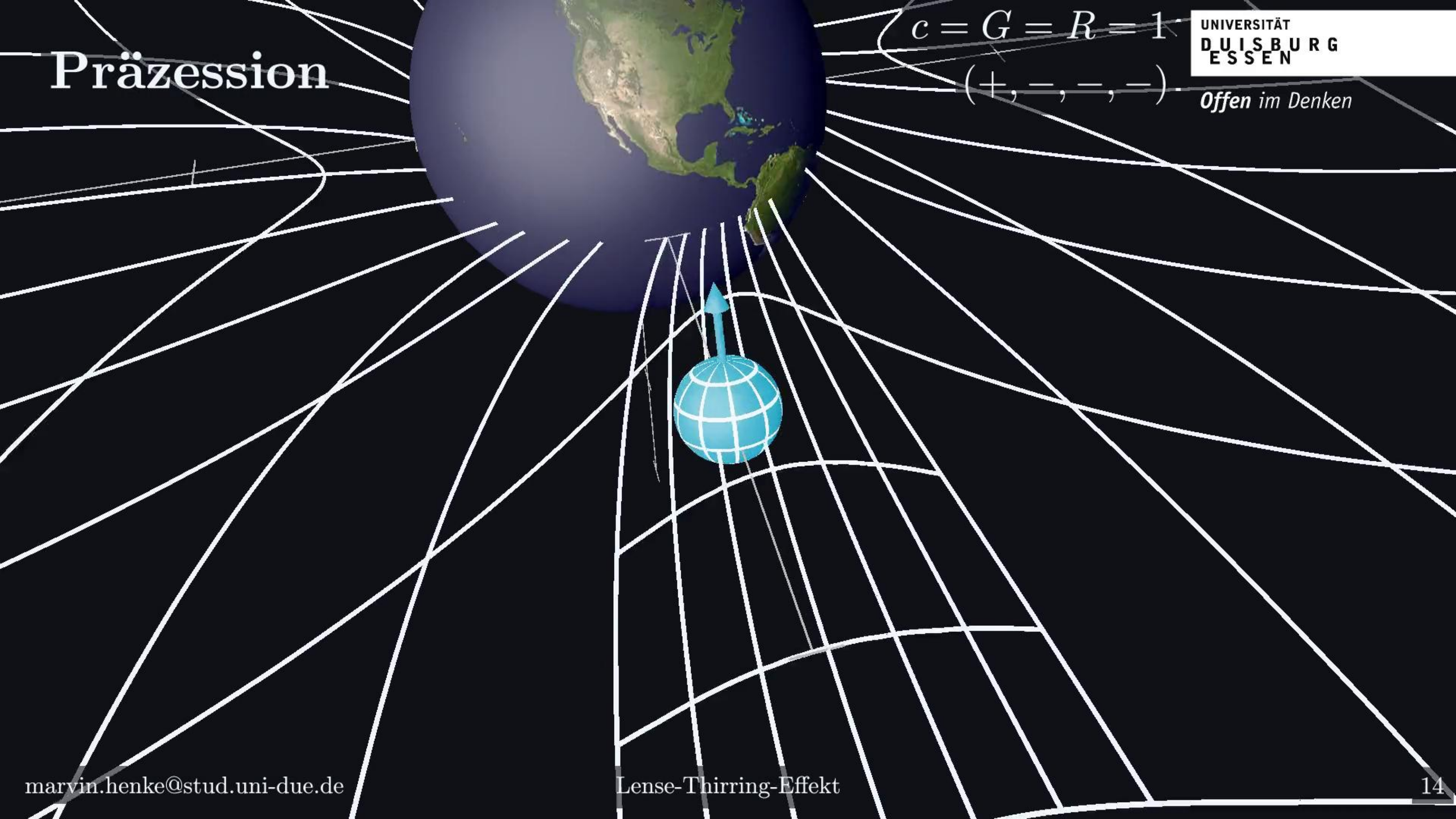
$$(+,-,-,-)$$



# Präzession

$$c = G = R = 1$$

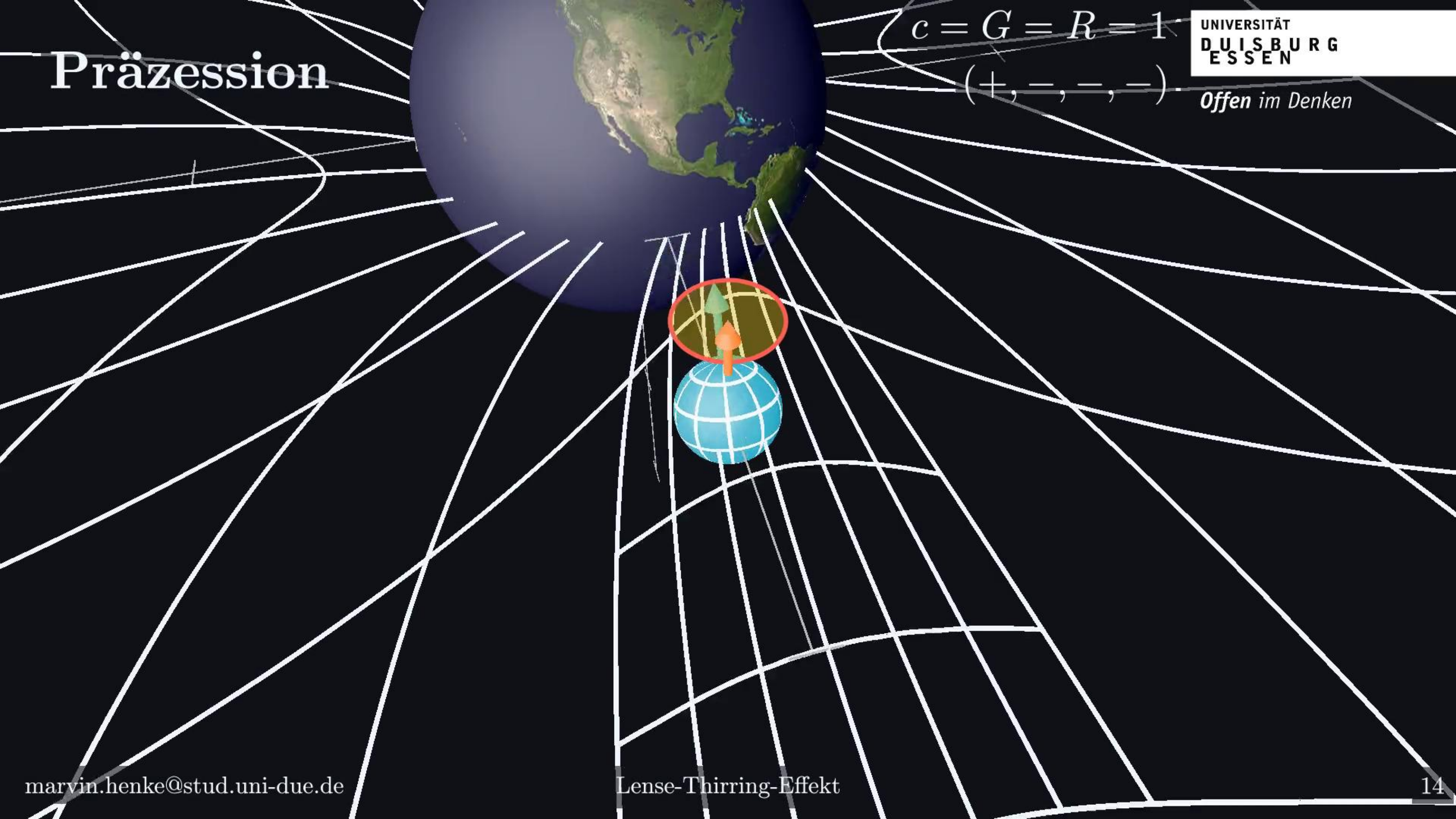
$$(+, -, -, -)$$



# Präzession

$$c = G = R = 1$$

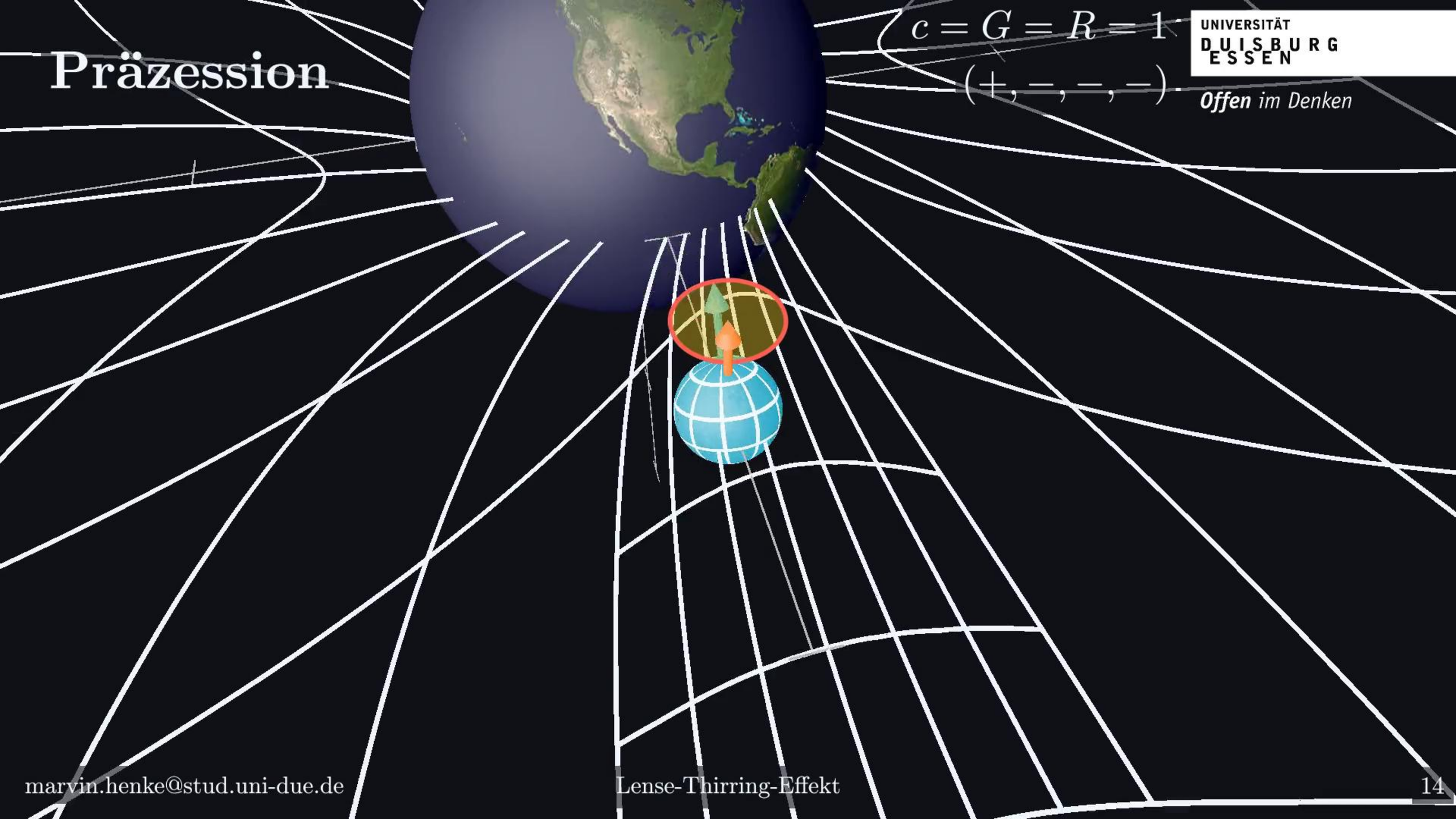
$$(+, -, -, -)$$



# Präzession

$$c = G = R = 1$$

$$(+, -, -, -)$$



$$c = G = R = 1$$
$$(+, -, -, -)$$

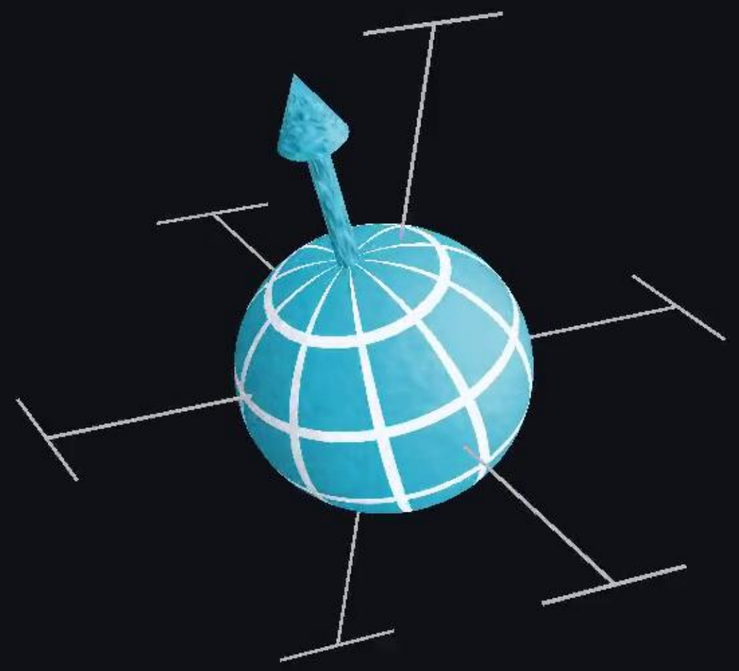
UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

*Offen im Denken*

# Präzession

Drehimpuls:

$\vec{L}$



$c = G = R = 1$

$(+, -, -, -)$

UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

*Offen im Denken*

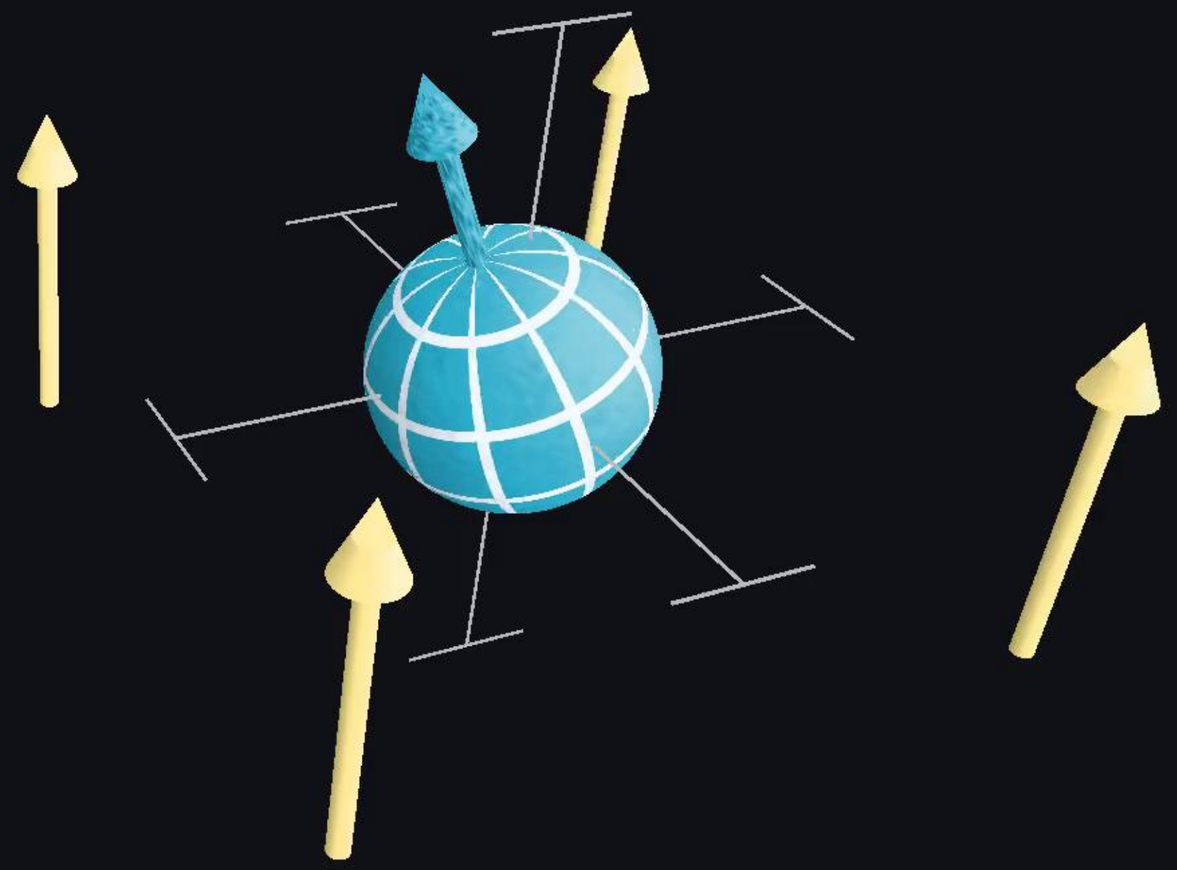
# Präzession

Drehimpuls:

$\vec{L}$

Gravitomagnetisches Feld:

$\vec{B} = \frac{2\vec{S}}{r^3}$



$c = G = R = 1$

$(+, -, -, -)$

UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

*Offen im Denken*

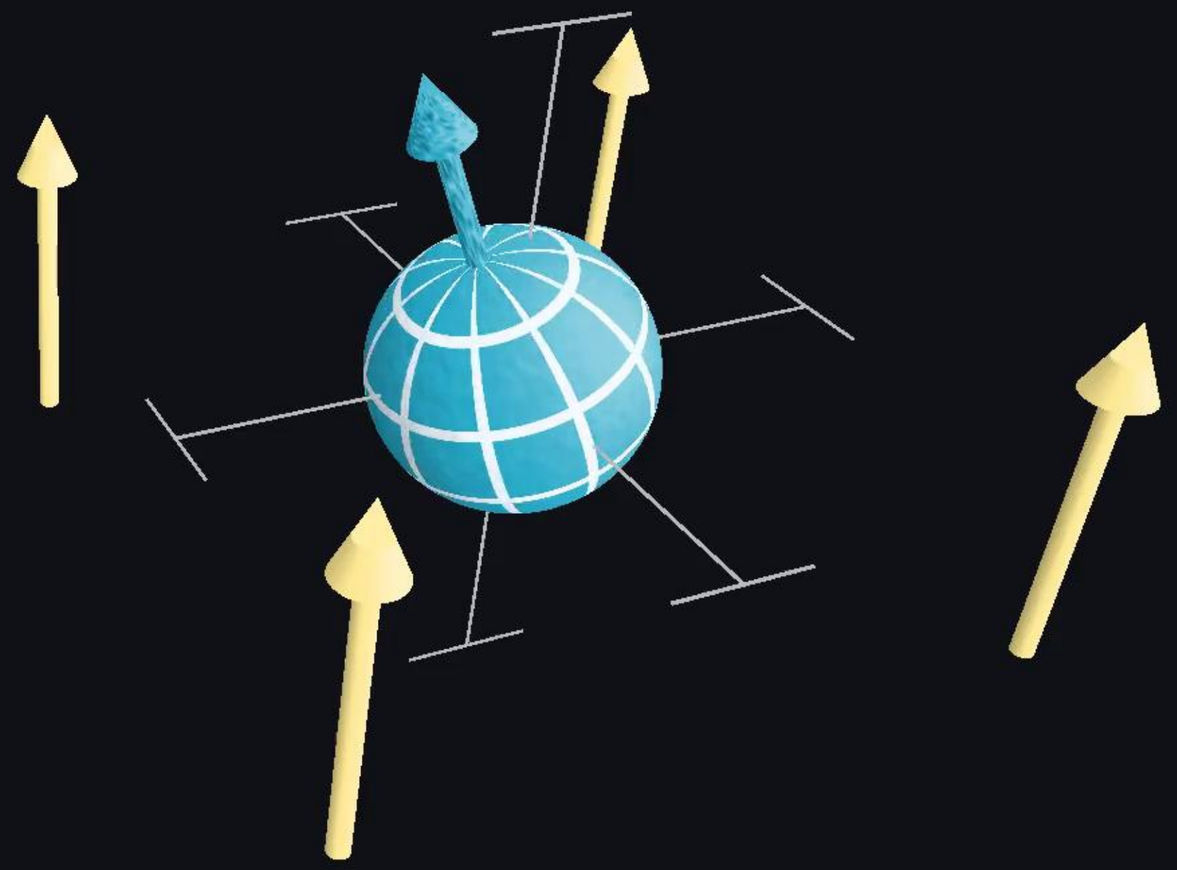
# Präzession

Drehimpuls:

$\vec{L}$

Gravitomagnetisches Feld:

$\vec{B} = \frac{2\vec{S}}{r^3}$



$c = G = R = 1$

$(+, -, -, -)$

UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

*Offen im Denken*

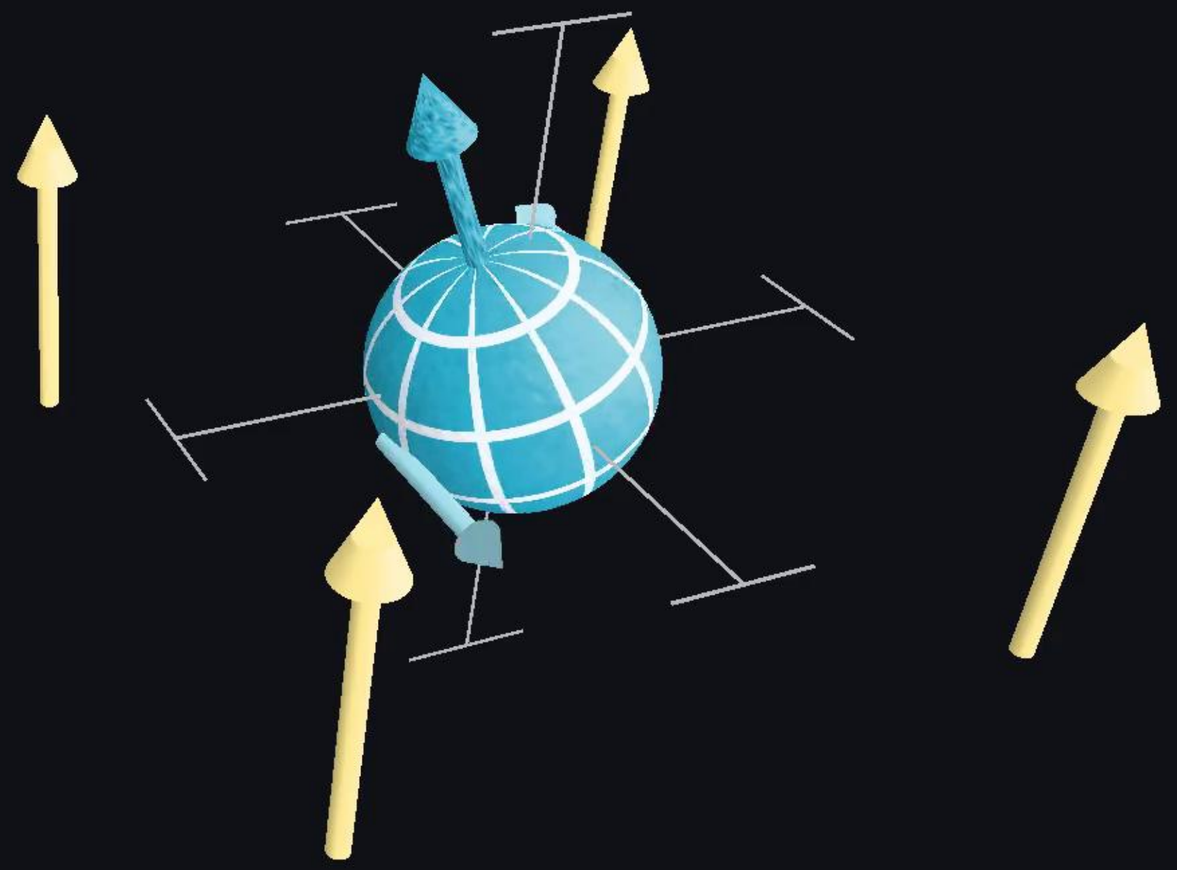
# Präzession

Drehimpuls:

$\vec{L}$

Gravitomagnetisches Feld:

$\vec{B} = \frac{2\vec{S}}{r^3}$



$c = G = R = 1$

$(+, -, -, -)$

UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

*Offen im Denken*

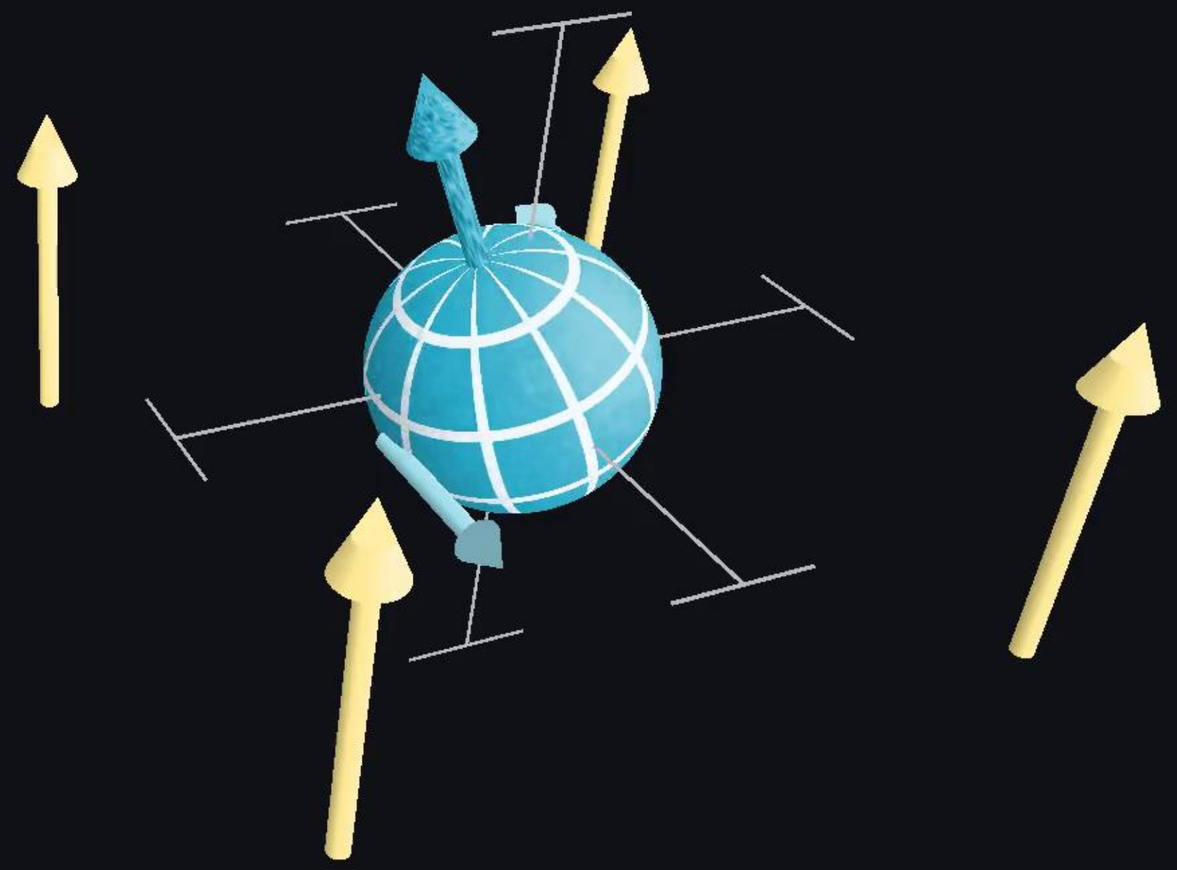
# Präzession

Drehimpuls:

$\vec{L}$

Gravitomagnetisches Feld:

$\vec{B} = \frac{2\vec{S}}{r^3}$



$c = G = R = 1$

$(+, -, -, -)$

UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

*Offen im Denken*

# Präzession

Drehimpuls:

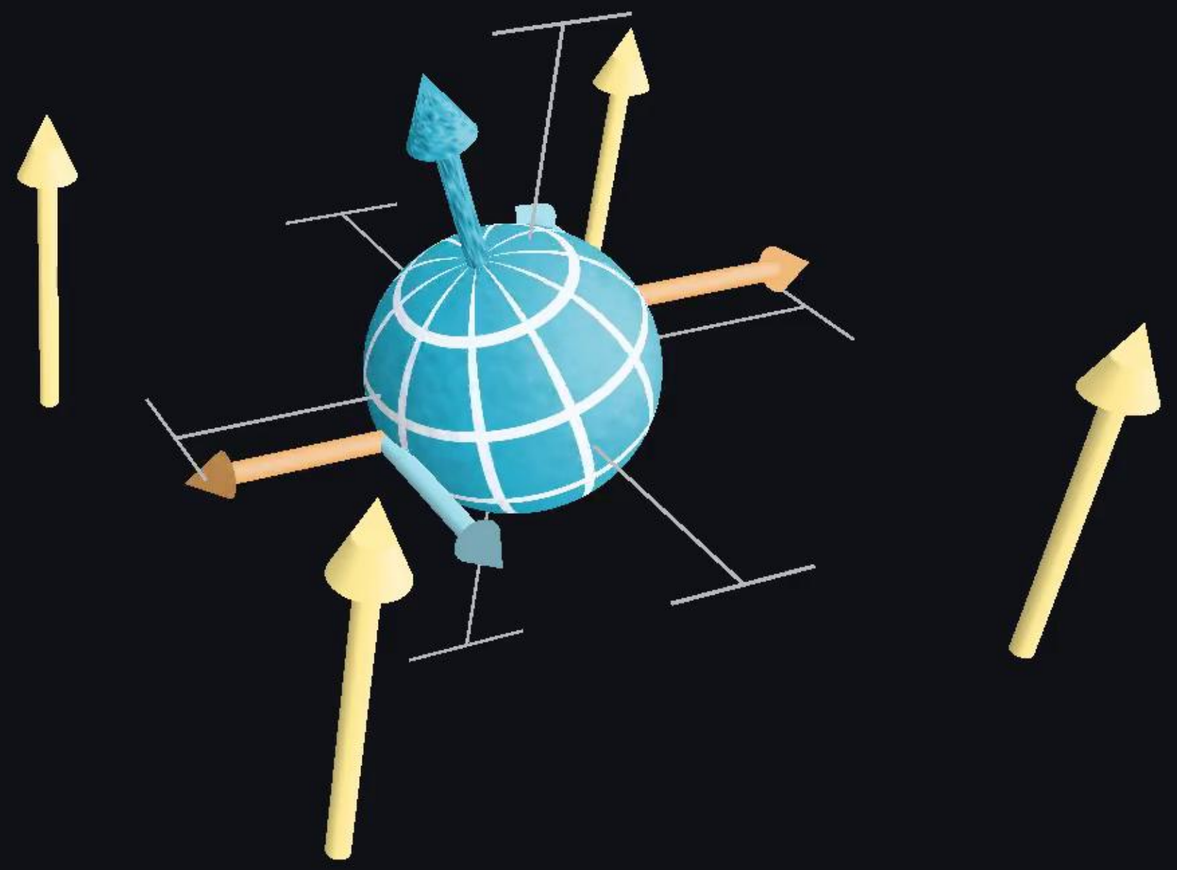
$\vec{L}$

Gravitomagnetisches Feld:

$\vec{B} = \frac{2\vec{S}}{r^3}$

Lorentz-Kraft:

$\vec{F} = m\vec{v} \times \vec{B}$



$c = G = R = 1$

$(+, -, -, -)$

UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

*Offen im Denken*

# Präzession

Drehimpuls:

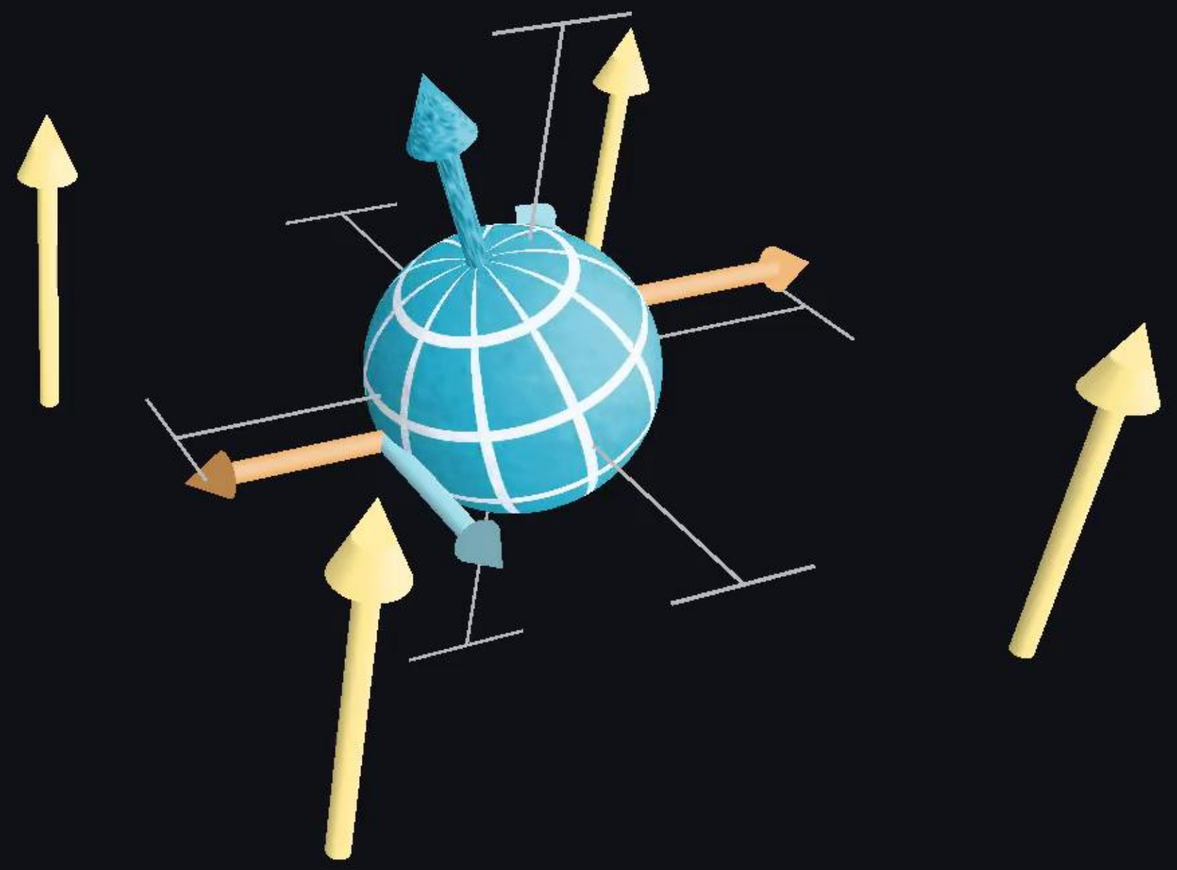
$\vec{L}$

Gravitomagnetisches Feld:

$\vec{B} = \frac{2\vec{S}}{r^3}$

Lorentz-Kraft:

$\vec{F} = m\vec{v} \times \vec{B}$



$c = G = R = 1$

$(+, -, -, -)$

UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

*Offen im Denken*

# Präzession

Drehimpuls:

$\vec{L}$

Gravitomagnetisches Feld:

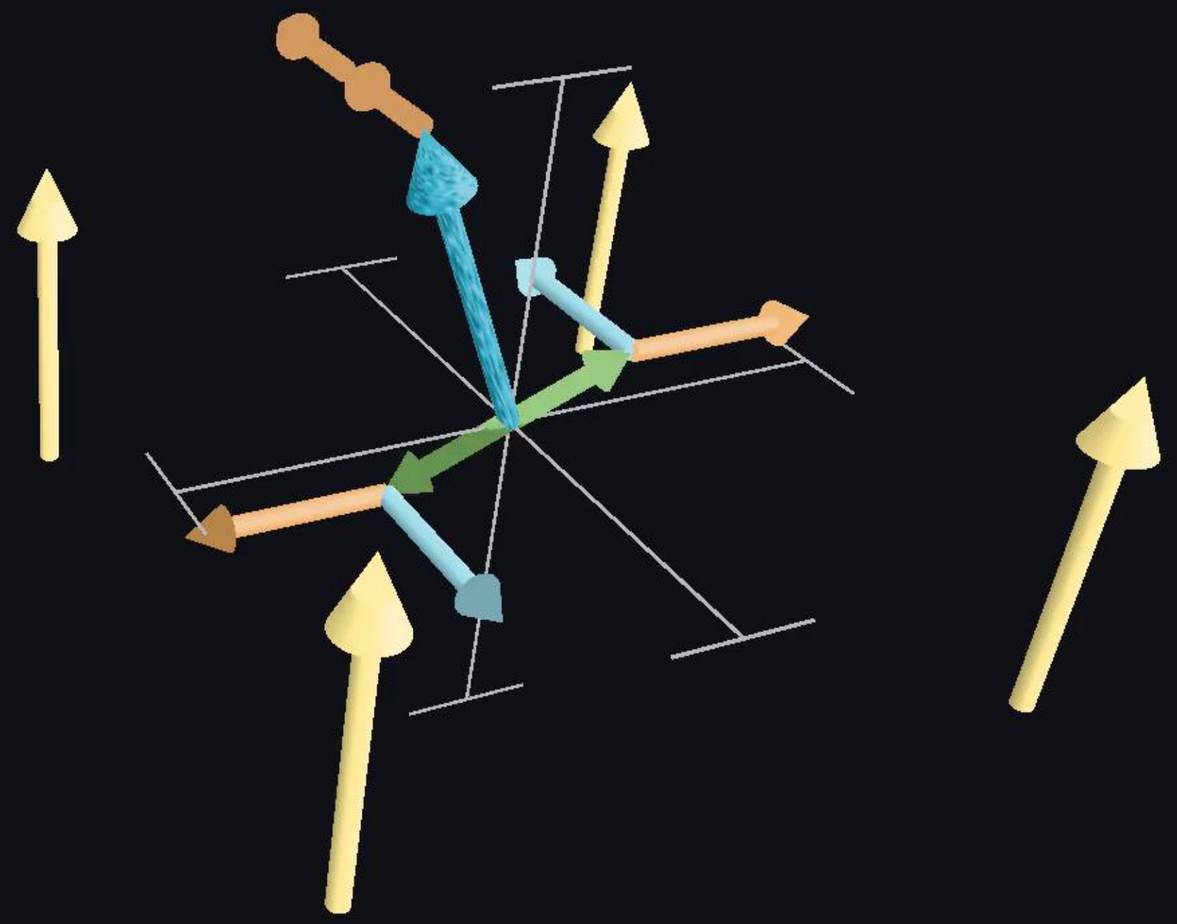
$\vec{B} = \frac{2\vec{S}}{r^3}$

Lorentz-Kraft:

$\vec{F} = m\vec{v} \times \vec{B}$

Drehmoment:

$\frac{\mathrm{d}\vec{L}}{\mathrm{d}t} = \vec{M} = \vec{r} \times \vec{F}$



$c = G = R = 1$

$(+, -, -, -)$

UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

*Offen im Denken*

# Präzession

Drehimpuls:

$\vec{L}$

Gravitomagnetisches Feld:

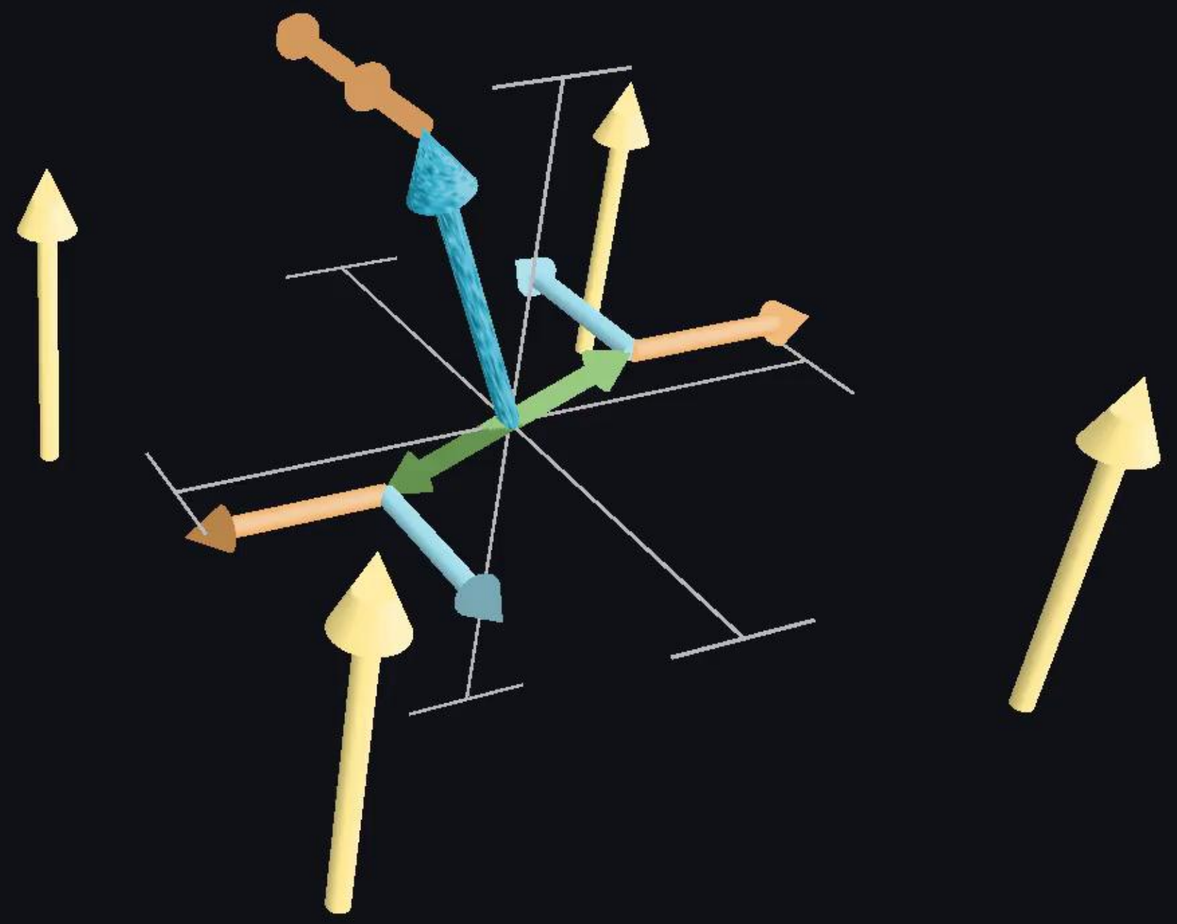
$\vec{B} = \frac{2\vec{S}}{r^3}$

Lorentz-Kraft:

$\vec{F} = m\vec{v} \times \vec{B}$

Drehmoment:

$\frac{\mathrm{d}\vec{L}}{\mathrm{d}t} = \vec{M} = \vec{r} \times \vec{F}$



$c = G = R = 1$

$(+, -, -, -)$

UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

*Offen im Denken*

# Präzession

Drehimpuls:

$\vec{L}$

Gravitomagnetisches Feld:

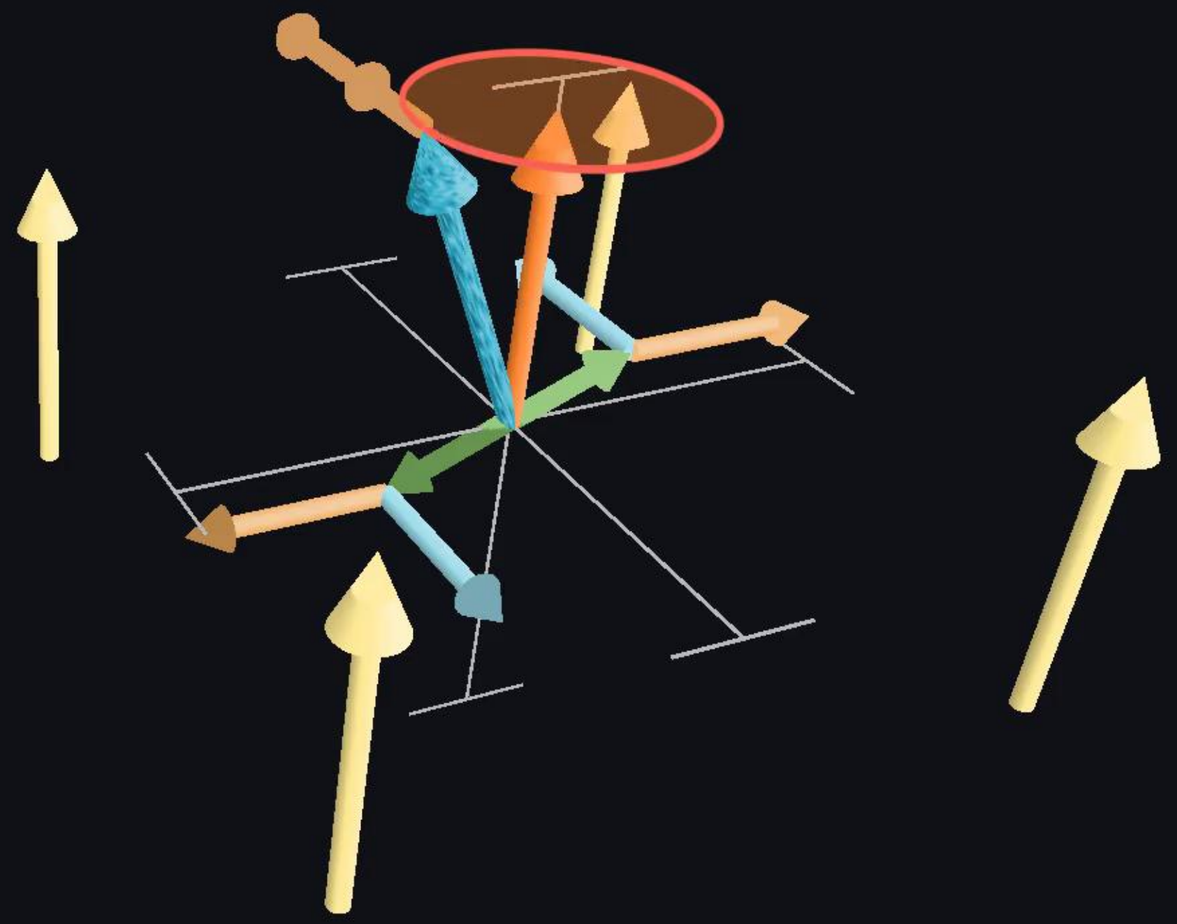
$\vec{B} = \frac{2\vec{S}}{r^3}$

Lorentz-Kraft:

$\vec{F} = m\vec{v} \times \vec{B}$

Drehmoment:

$\frac{\mathrm{d}\vec{L}}{\mathrm{d}t} = \vec{M} = \vec{r} \times \vec{F}$



$c = G = R = 1$

$(+, -, -, -)$

UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

*Offen im Denken*

# Präzession

Drehimpuls:

$\vec{L}$

Gravitomagnetisches Feld:

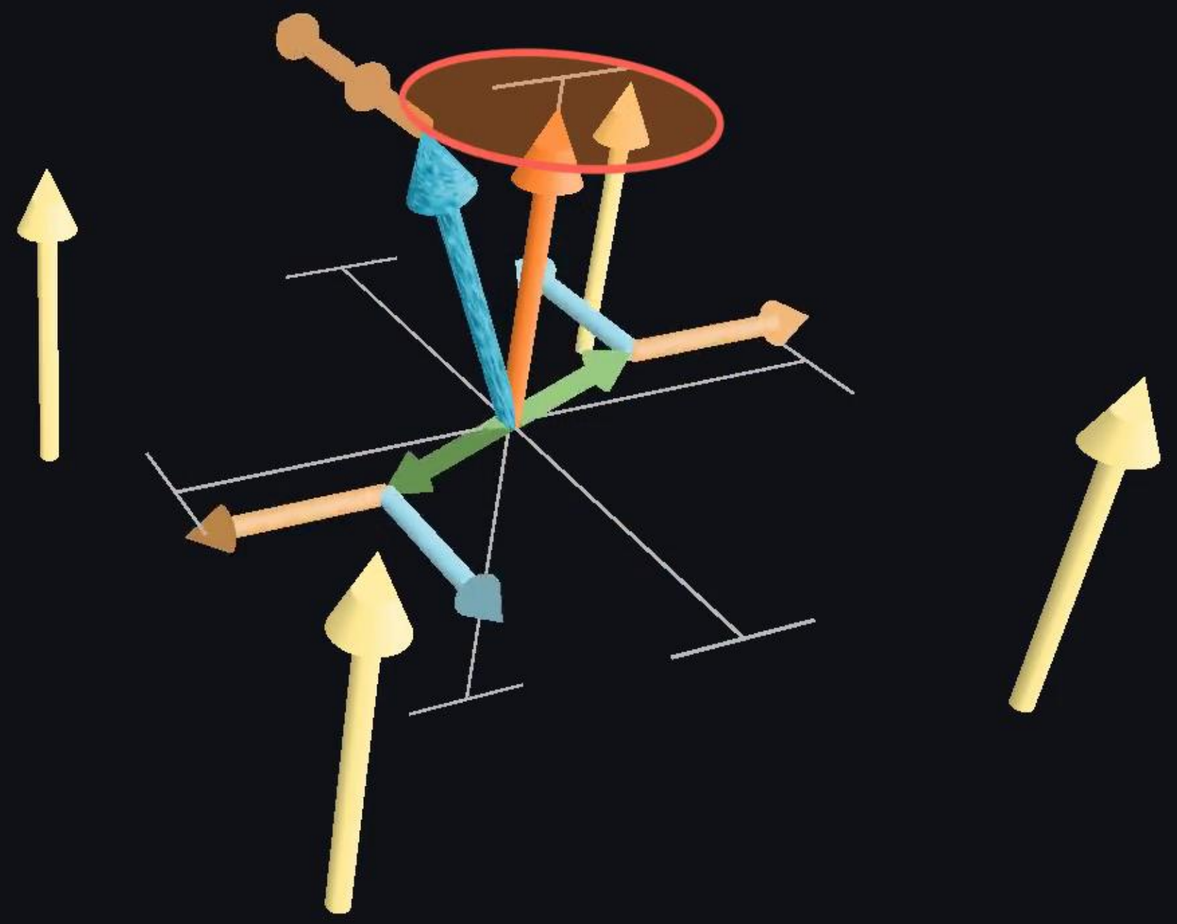
$\vec{B} = \frac{2\vec{S}}{r^3}$

Lorentz-Kraft:

$\vec{F} = m\vec{v} \times \vec{B}$

Drehmoment:

$\frac{\mathrm{d}\vec{L}}{\mathrm{d}t} = \vec{M} = \vec{r} \times \vec{F}$



# Präzession

$$c = G = R = 1$$
$$(+, -, -, -)$$

$$c = G = R = 1$$

$$(+, -, -, -)$$

# Präzession

Allgemeiner für einen ausgedehnten Körper mit der Massendichte $\rho$:

$$c = G = R = 1$$

$$(+,-,-,-)$$

UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

*Offen im Denken*

# Präzession

Allgemeiner für einen ausgedehnten Körper mit der Massendichte $\rho$:

$$\frac{\mathrm{d}\vec{L}}{\mathrm{d}t} = \int \mathrm{d}^3 r \; \vec{r} \times \vec{f}_{LT}$$

$$c = G = R = 1$$

$$(+,-,-,-)$$

UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

*Offen im Denken*

# Präzession

Allgemeiner für einen ausgedehnten Körper mit der Massendichte $\rho$:

$$\frac{\mathrm{d}\vec{L}}{\mathrm{d}t} = \int \mathrm{d}^3 r \; \vec{r} \times \vec{f}_{LT}$$

Näherungen: $r_G \approx r_S$ und $\vec{S} \cdot \vec{r}_G \approx \vec{S} \cdot \vec{r}_S$

$$c = G = R = 1$$

$$(+,-,-,-)$$

UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

*Offen im Denken*

# Präzession

Allgemeiner für einen ausgedehnten Körper mit der Massendichte $\rho$:

$$\frac{\mathrm{d}\vec{L}}{\mathrm{d}t} = \int \mathrm{d}^3 r \; \vec{r} \times \vec{f}_{LT}$$

Näherungen: $r_G \approx r_S$ und $\vec{S} \cdot \vec{r}_G \approx \vec{S} \cdot \vec{r}_S$

$$\vec{f}_{LT} = \rho \vec{v} \times \vec{B}(\vec{r} + \vec{r}_S)$$

$$c = G = R = 1$$

$$(+,-,-,-)$$

UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

*Offen im Denken*

# Präzession

Allgemeiner für einen ausgedehnten Körper mit der Massendichte $\rho$:

$$\frac{\mathrm{d}\vec{L}}{\mathrm{d}t} = \int \mathrm{d}^3 r \; \vec{r} \times \vec{f}_{LT}$$

Näherungen: $r_G \approx r_S$ und $\vec{S} \cdot \vec{r}_G \approx \vec{S} \cdot \vec{r}_S$

$$\vec{f}_{LT} = \rho \vec{v} \times \vec{B}(\vec{r} + \vec{r}_S) \; = \frac{\rho}{r_S^3} \left[ 2\vec{v} \times \vec{S} - \frac{6(\vec{S} \cdot \vec{r}_S)}{r_S^2} \vec{v} \times (\vec{r} + \vec{r}_S) \right]$$

$$c = G = R = 1$$

$$(+,-,-,-)$$

UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

*Offen im Denken*

# Präzession

Allgemeiner für einen ausgedehnten Körper mit der Massendichte $\rho$:

$$\frac{\mathrm{d}\vec{L}}{\mathrm{d}t} = \int \mathrm{d}^3r \; \vec{r} \times \vec{f}_{LT}$$

Näherungen: $r_G \approx r_S$ und $\vec{S} \cdot \vec{r}_G \approx \vec{S} \cdot \vec{r}_S$

$$\vec{f}_{LT} = \rho \vec{v} \times \vec{B}(\vec{r} + \vec{r}_S) = \frac{\rho}{r_S^3} \left[ 2\vec{v} \times \vec{S} - \frac{6(\vec{S} \cdot \vec{r}_S)}{r_S^2} \vec{v} \times (\vec{r} + \vec{r}_S) \right]$$

$$\frac{\mathrm{d}\vec{L}}{\mathrm{d}t} = \vec{L} \times \vec{\Omega}$$

$$c = G = R = 1$$

$$(+,-,-,-)$$

UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

*Offen im Denken*

# Präzession

Allgemeiner für einen ausgedehnten Körper mit der Massendichte $\rho$:

$$\frac{\mathrm{d}\vec{L}}{\mathrm{d}t} = \int \mathrm{d}^3r \; \vec{r} \times \vec{f}_{LT}$$

Näherungen: $r_G \approx r_S$ und $\vec{S} \cdot \vec{r}_G \approx \vec{S} \cdot \vec{r}_S$

$$\vec{f}_{LT} = \rho \vec{v} \times \vec{B}(\vec{r} + \vec{r}_S) = \frac{\rho}{r_S^3} \left[ 2\vec{v} \times \vec{S} - \frac{6(\vec{S} \cdot \vec{r}_S)}{r_S^2} \vec{v} \times (\vec{r} + \vec{r}_S) \right]$$

$$\frac{\mathrm{d}\vec{L}}{\mathrm{d}t} = \vec{L} \times \vec{\Omega}$$

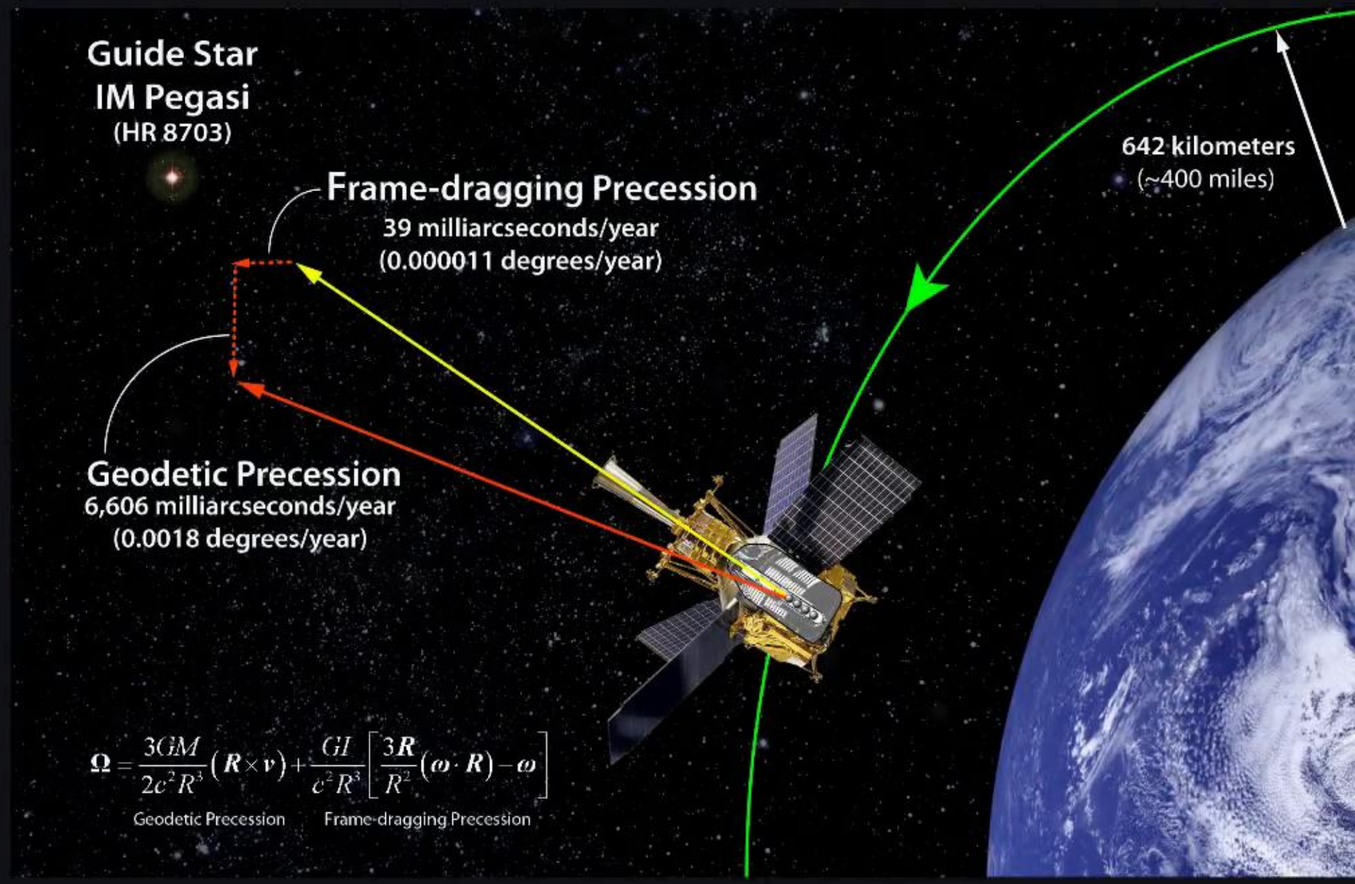
$$\vec{\Omega} = \frac{\vec{B}(\vec{r}_S)}{2}$$

# Gravity Probe B

$$c = G = R = 1$$
$$(+,-,-,-)$$

UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

*Offen im Denken*




Gravity Probe B Team, Stanford, NASA

# Gravity Probe B

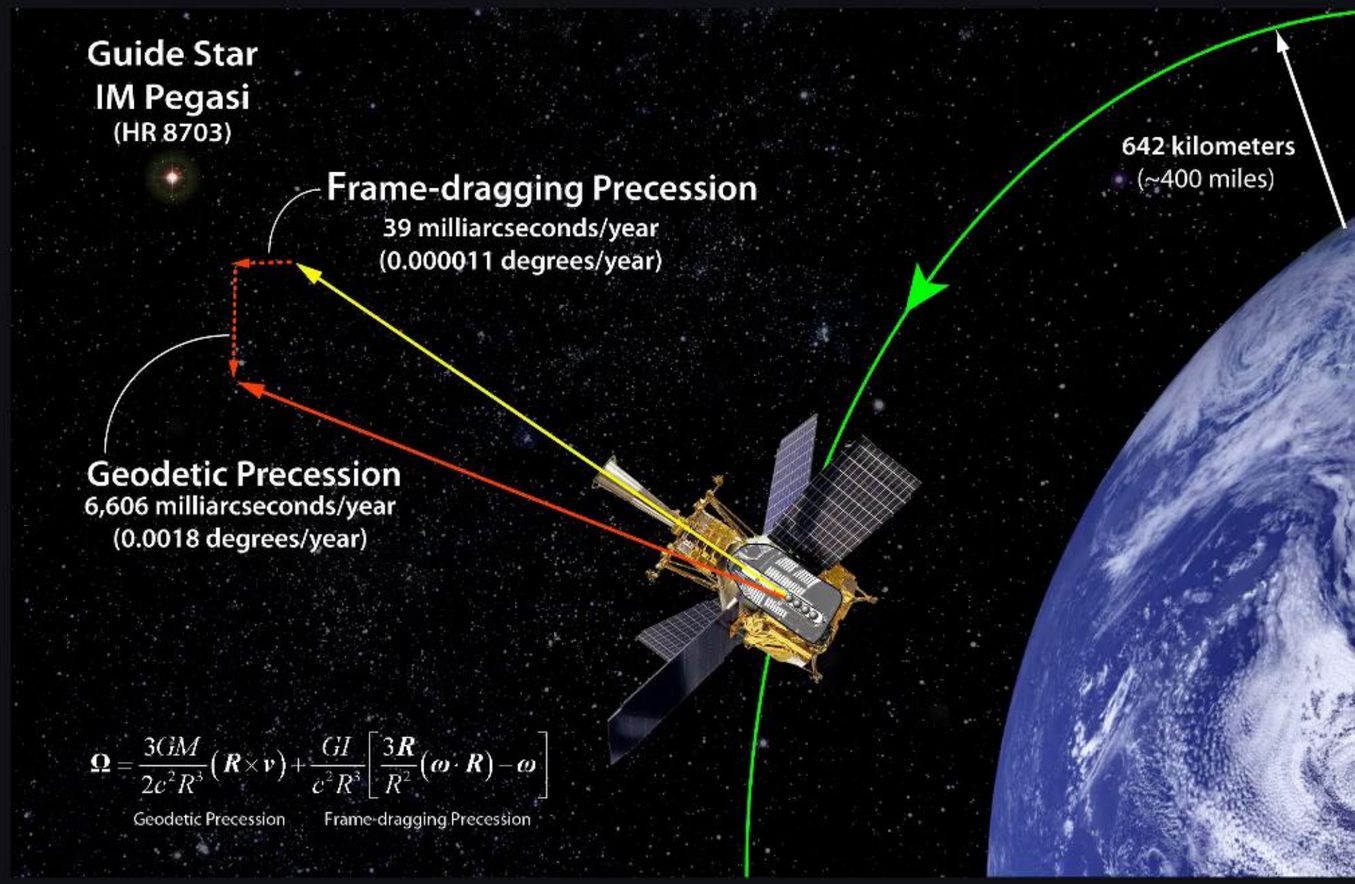
$c = G = R = 1$

$(+, -, -, -)$

UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

*Offen im Denken*

- Missionsdauer $\sim$ 6 Jahre (2004-2010)




Gravity Probe B Team, Stanford, NASA

# Gravity Probe B

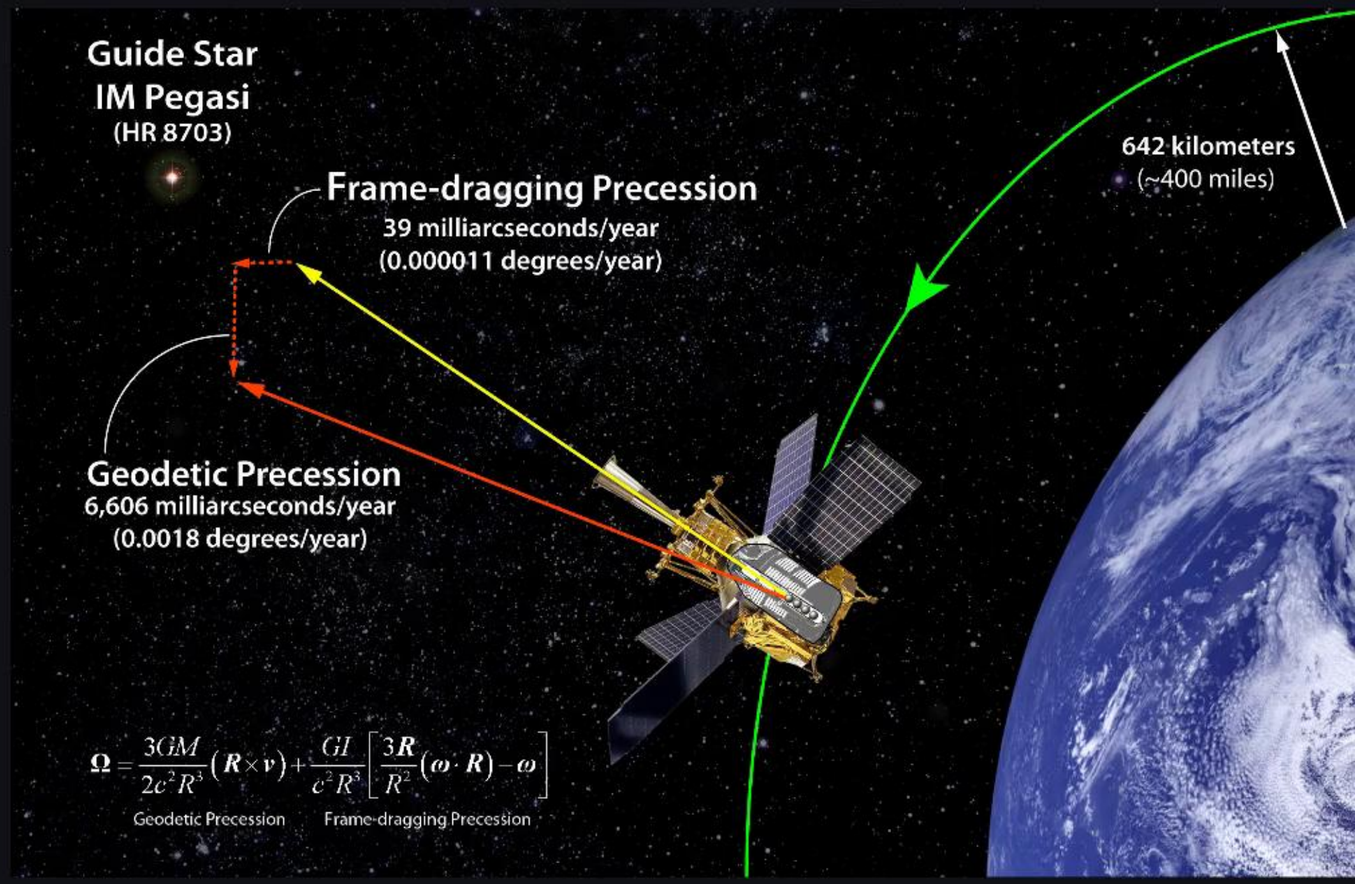
$c = G = R = 1$

$(+, -, -, -)$

UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

*Offen im Denken*

- Missionsdauer $\sim$ 6 Jahre (2004-2010)
- 4 Gyroskope gerichtet auf IM Pegasi




Gravity Probe B Team, Stanford, NASA

# Gravity Probe B

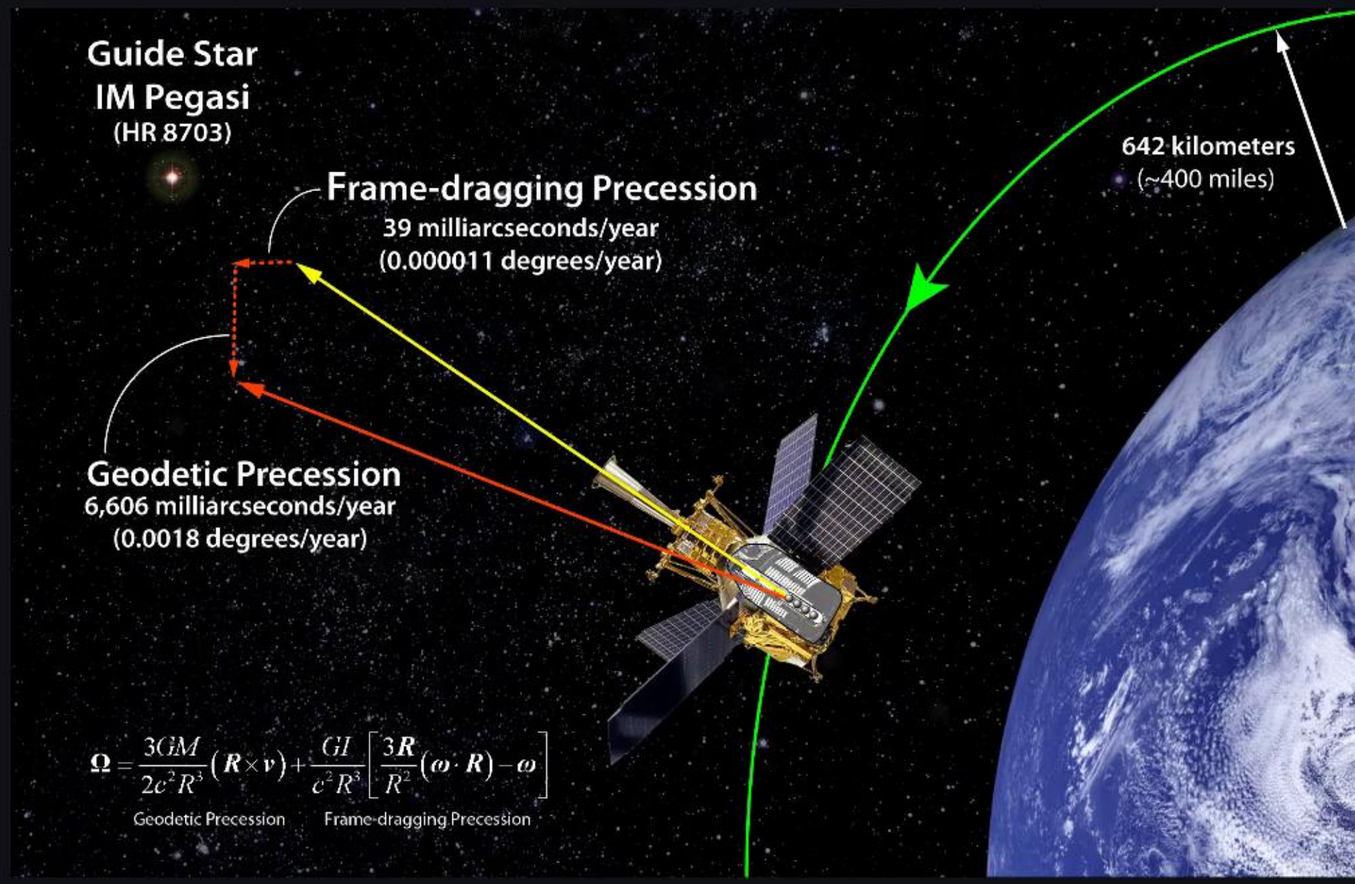
$c = G = R = 1$

$(+, -, -, -)$

UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

*Offen im Denken*

- Missionsdauer $\sim$ 6 Jahre (2004-2010)
- 4 Gyroskope gerichtet auf IM Pegasi
- Zwei relativistische Effekte:




Gravity Probe B Team, Stanford, NASA

# Gravity Probe B

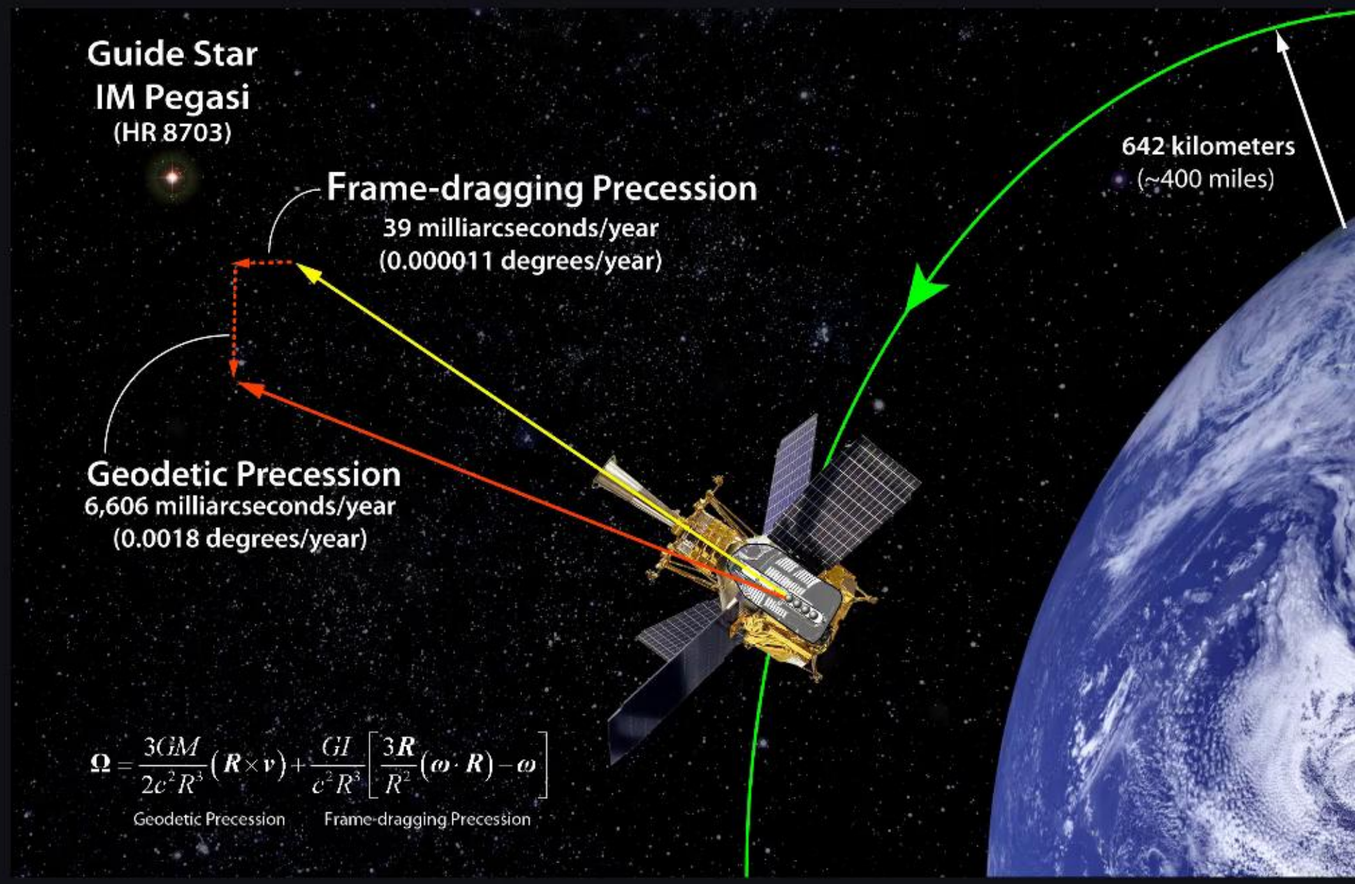
$c = G = R = 1$

$(+, -, -, -)$

UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

*Offen im Denken*

- Missionsdauer $\sim$ 6 Jahre (2004-2010)
- 4 Gyroskope gerichtet auf IM Pegasi
- Zwei relativistische Effekte:
  - de-Sitter-Effekt




Gravity Probe B Team, Stanford, NASA

# Gravity Probe B

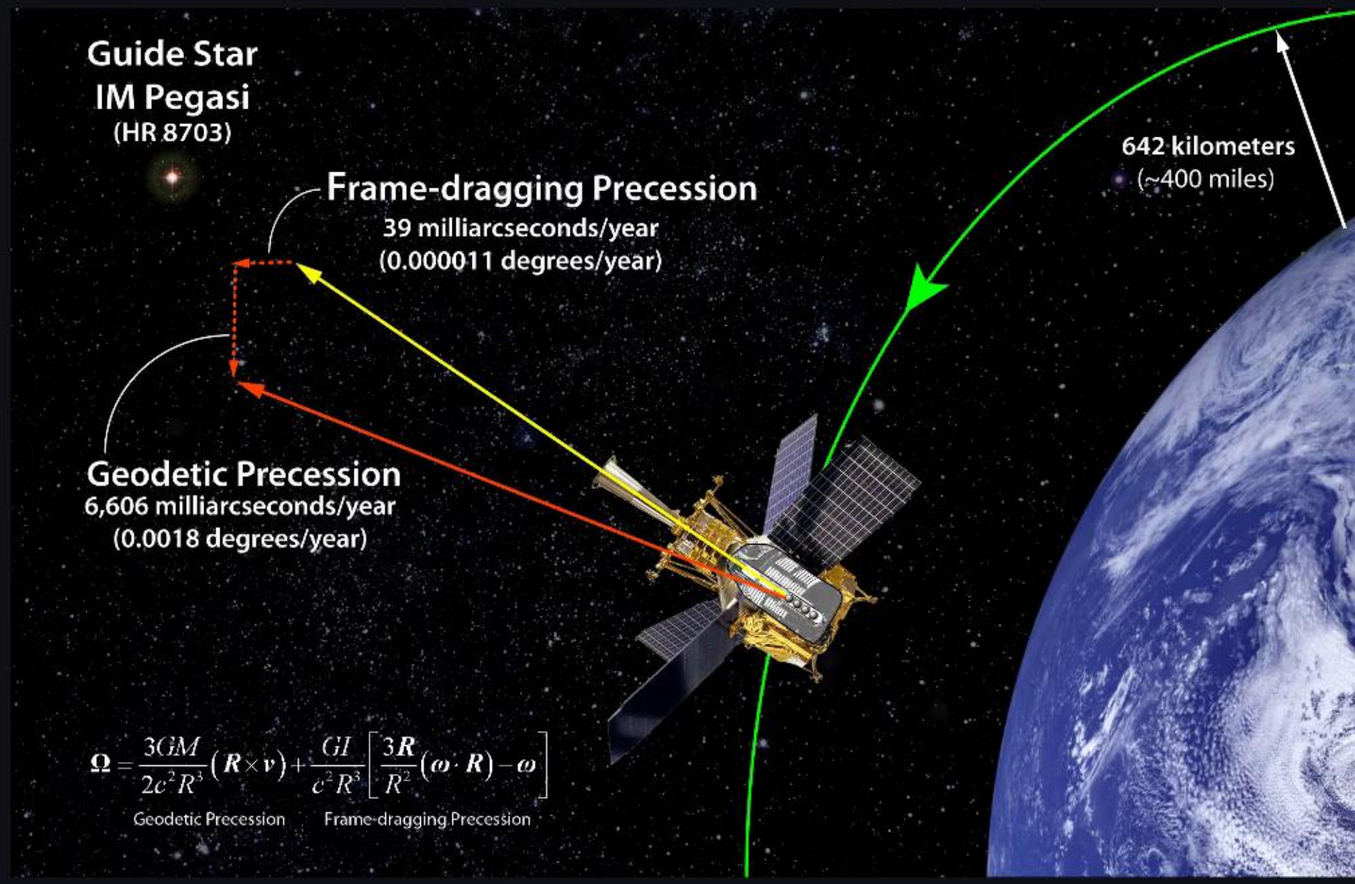
$c = G = R = 1$

$(+, -, -, -)$

UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

*Offen im Denken*

- Missionsdauer $\sim$ 6 Jahre (2004-2010)
- 4 Gyroskope gerichtet auf IM Pegasi
- Zwei relativistische Effekte:
  - de-Sitter-Effekt
  - Lense-Thirring-Effekt




Gravity Probe B Team, Stanford, NASA

# Gravity Probe B

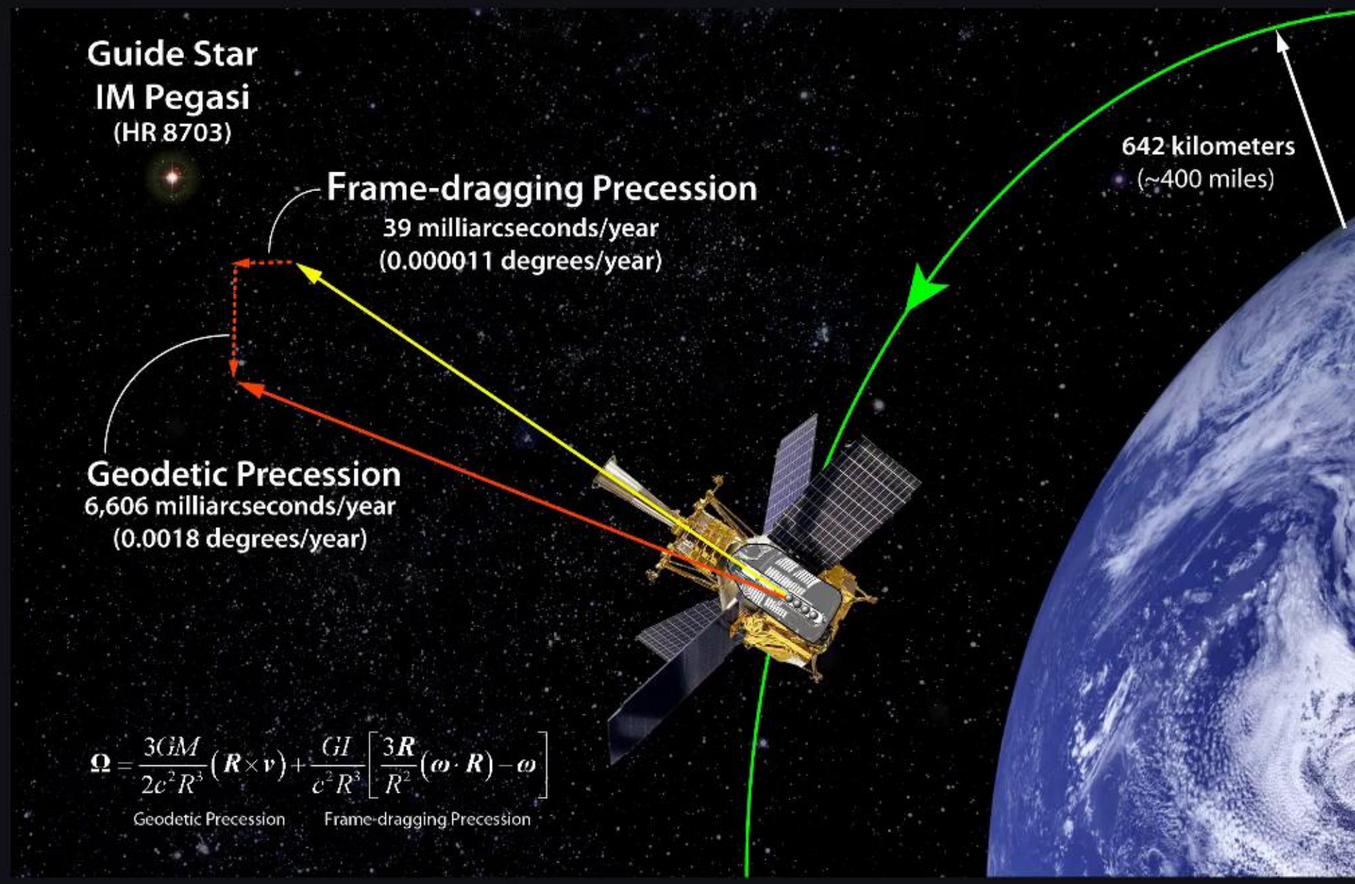
$c = G = R = 1$

$(+, -, -, -)$

UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

*Offen im Denken*

- Missionsdauer $\sim$ 6 Jahre (2004-2010)
- 4 Gyroskope gerichtet auf IM Pegasi
- Zwei relativistische Effekte:
  - de-Sitter-Effekt
  - Lense-Thirring-Effekt
- Ergebnisse:




Gravity Probe B Team, Stanford, NASA

# Gravity Probe B

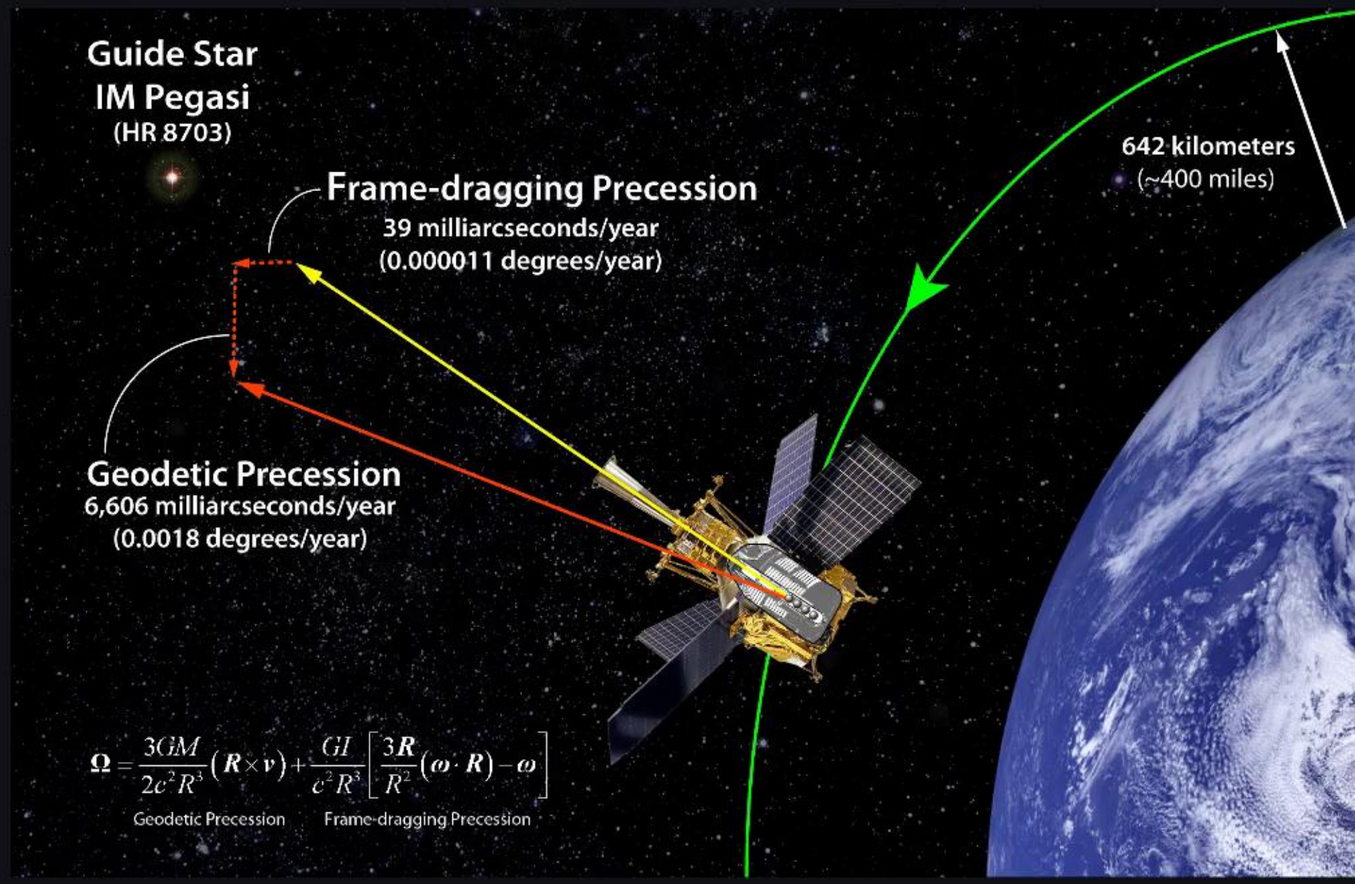
$c = G = R = 1$

$(+, -, -, -)$

UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

*Offen im Denken*

- Missionsdauer $\sim$ 6 Jahre (2004-2010)
- 4 Gyroskope gerichtet auf IM Pegasi
- Zwei relativistische Effekte:
  - de-Sitter-Effekt
  - Lense-Thirring-Effekt
- Ergebnisse:
  - $(6601.8 \pm 18.3)$ macs/yr




Gravity Probe B Team, Stanford, NASA

$c = G = R = 1$

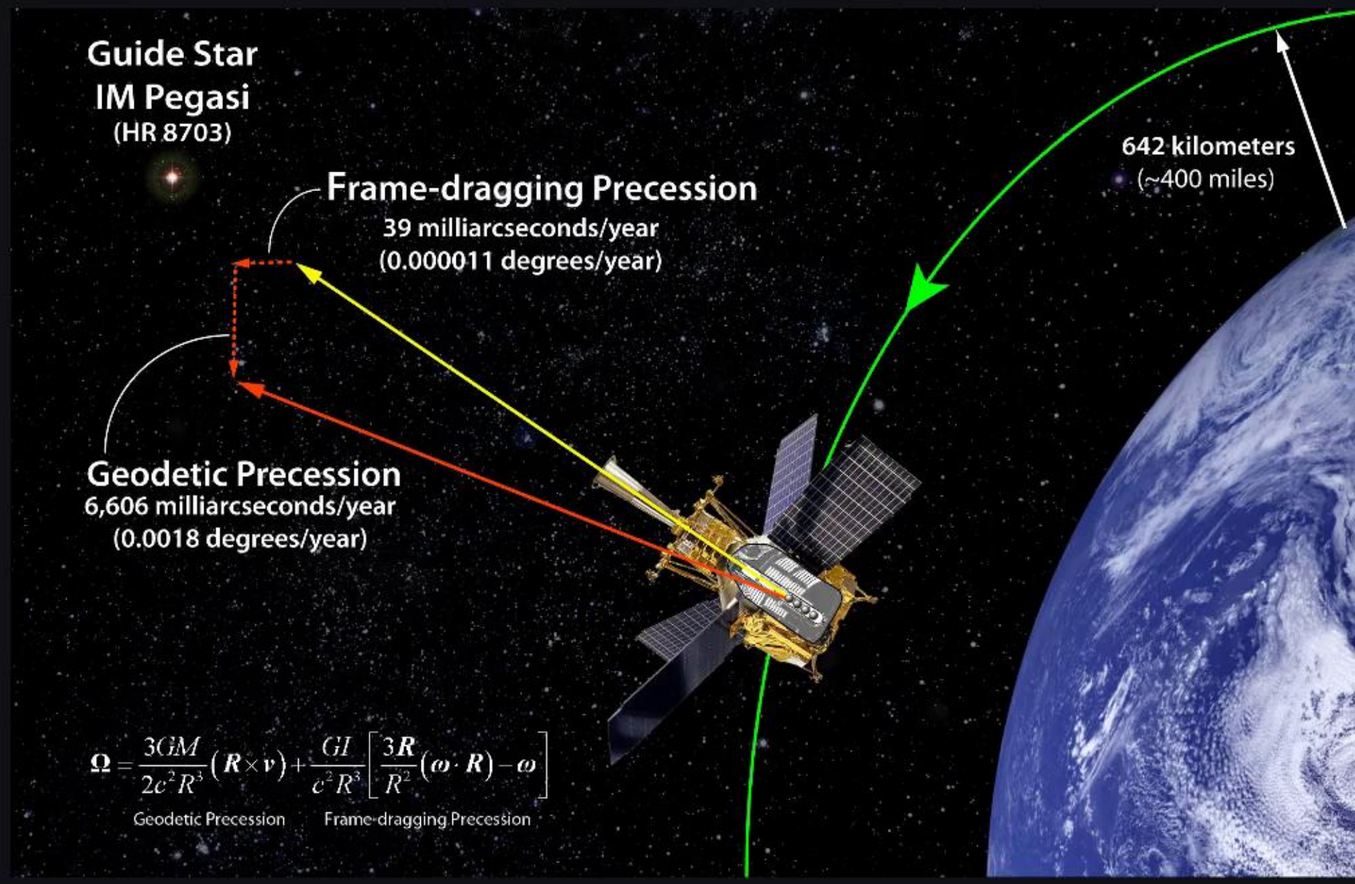
$(+, -, -, -)$

UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

*Offen im Denken*

# Gravity Probe B

- Missionsdauer $\sim$ 6 Jahre (2004-2010)
- 4 Gyroskope gerichtet auf IM Pegasi
- Zwei relativistische Effekte:
  - de-Sitter-Effekt
  - Lense-Thirring-Effekt
- Ergebnisse:
  - $(6601.8 \pm 18.3)$ macs/yr
  - $(37.2 \pm 7.2)$ macs/yr




Gravity Probe B Team, Stanford, NASA

# Akkretionsscheibe (AS) eines supermassiven Schwarzen Lochs (SL)

$$c = G = R = 1$$

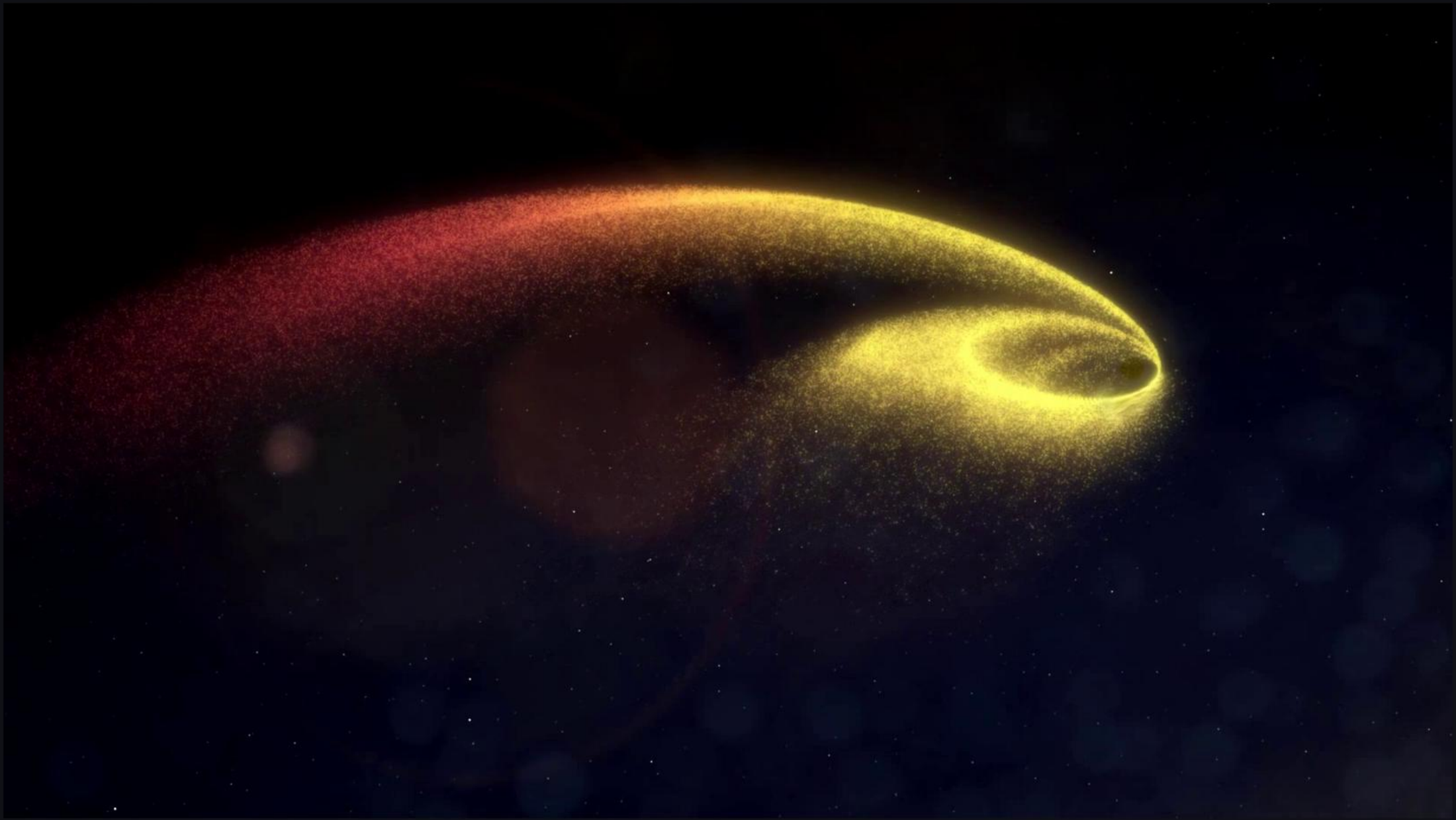
$$(+, -, -, -)$$

UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

*Offen im Denken*

Tidal Disruption Event, NASA's Goddard Space Flight Center/Chris Smith (USRA/GESTAR)

Tidal Disruption Event, NASA's Goddard Space Flight Center/Chris Smith (USRA/GESTAR)



# Akkretionsscheibe (AS) eines supermassiven Schwarzen Lochs (SL)

$$c = G = R = 1$$

$$(+, -, -, -)$$

UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

*Offen im Denken*

$c = G = R = 1$

$(+, -, -, -)$

UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

*Offen im Denken*

# Akkretionsscheibe (AS) eines supermassiven Schwarzen Lochs (SL)

- Entsteht durch das Zerreißen eines Sterns durch das SL

$c = G = R = 1$

$(+, -, -, -)$

UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

*Offen im Denken*

# Akkretionsscheibe (AS) eines supermassiven Schwarzen Lochs (SL)

- Entsteht durch das Zerreißen eines Sterns durch das SL
- Rotationsachse der AK ist gekippt gegenüber der des SL

$c = G = R = 1$

$(+, -, -, -)$

UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

*Offen im Denken*

# Akkretionsscheibe (AS) eines supermassiven Schwarzen Lochs (SL)

- Entsteht durch das Zerreißen eines Sterns durch das SL
- Rotationsachse der AK ist gekippt gegenüber der des SL
- Hochfrequentes Röntgen-Monitoring liefert Zeitreihe

$c = G = R = 1$

$(+, -, -, -)$

UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

*Offen im Denken*

# Akkretionsscheibe (AS) eines supermassiven Schwarzen Lochs (SL)

- Entsteht durch das Zerreißen eines Sterns durch das SL
- Rotationsachse der AK ist gekippt gegenüber der des SL
- Hochfrequentes Röntgen-Monitoring liefert Zeitreihe

  $\sim 15$ Tage Periodizität in den ersten $\sim 130$ Tagen

$c = G = R = 1$

$(+, -, -, -)$

UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

*Offen im Denken*

# Akkretionsscheibe (AS) eines supermassiven Schwarzen Lochs (SL)

- Entsteht durch das Zerreißen eines Sterns durch das SL
- Rotationsachse der AK ist gekippt gegenüber der des SL
- Hochfrequentes Röntgen-Monitoring liefert Zeitreihe

  $\sim 15$ Tage Periodizität in den ersten $\sim 130$ Tagen
- statistische Signifikanz über Monte-Carlo-Simulationen $> 3.9\sigma$

$c = G = R = 1$

$(+, -, -, -)$

UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

*Offen im Denken*

# Akkretionsscheibe (AS) eines supermassiven Schwarzen Lochs (SL)

- Entsteht durch das Zerreißen eines Sterns durch das SL
- Rotationsachse der AK ist gekippt gegenüber der des SL
- Hochfrequentes Röntgen-Monitoring liefert Zeitreihe

  $\sim 15$ Tage Periodizität in den ersten $\sim 130$ Tagen
- statistische Signifikanz über Monte-Carlo-Simulationen $> 3.9\sigma$

  $\Rightarrow$ Lense-Thirring Präzession ist Ursache

# Binärsystem aus Pulsar und weißem Zwerg

$$c = G = R = 1$$

$$(+, -, -, -)$$

UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

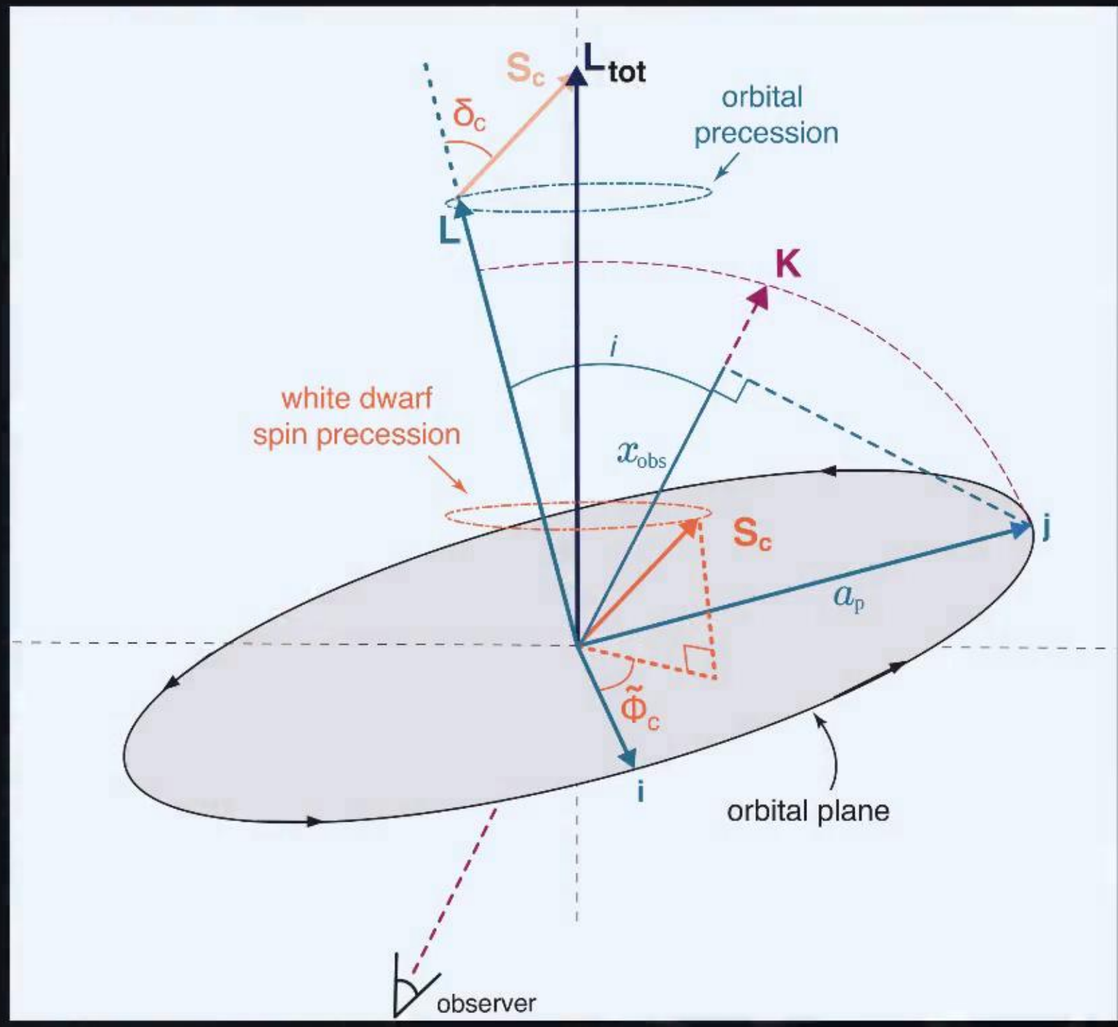
*Offen im Denken*

# Binärsystem aus Pulsar und weißem Zwerg

$$c = G = R = 1$$
$$(+, -, -, -)$$

UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

*Offen im Denken*




Abgeändert nach: Krishnan et al., Science 367, 577-580 (2020)

$c = G = R = 1$

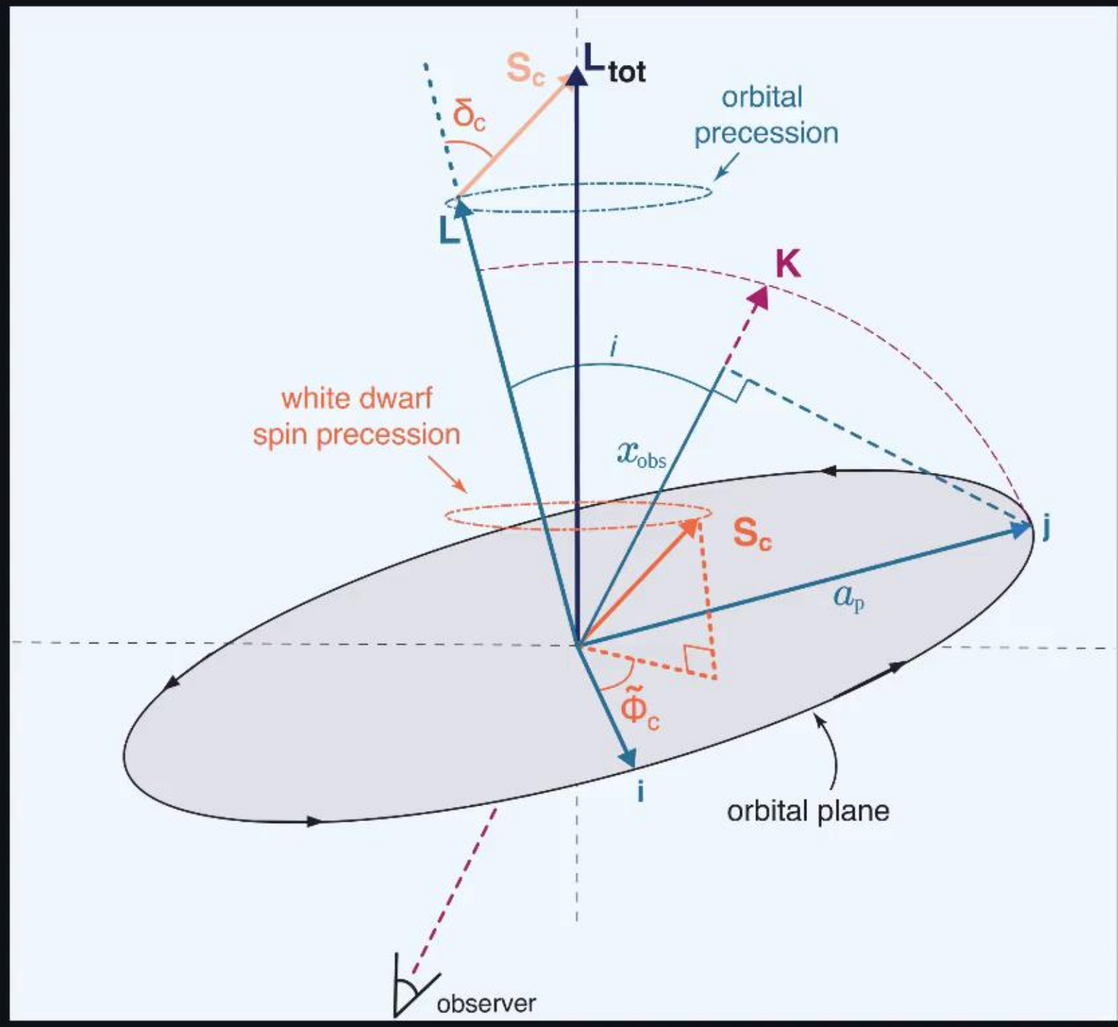
$(+, -, -, -)$

UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

*Offen im Denken*

# Binärsystem aus Pulsar und weißem Zwerg

- Umlaufperiode: 4.74 h
  Exzentrizität: 0.17




Abgeändert nach: Krishnan et al., Science 367, 577-580 (2020)

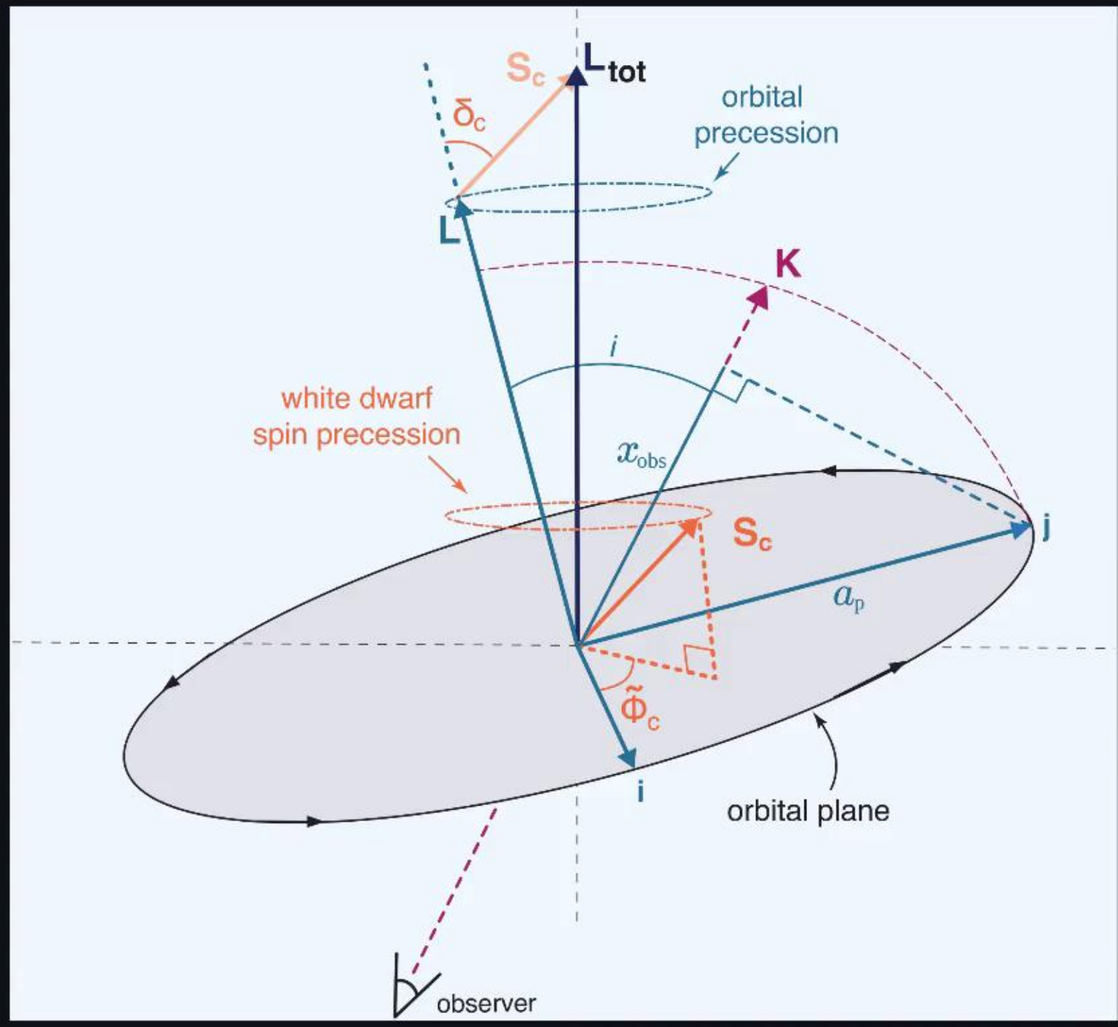
$$c = G = R = 1$$
$$(+,-,-,-)$$

UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

*Offen im Denken*

# Binärsystem aus Pulsar und weißem Zwerg

- Umlaufperiode: 4.74 h
  Exzentrizität: 0.17
- Pulsartiming über 18 Jahre




Abgeändert nach: Krishnan et al., Science 367, 577-580 (2020)

$c = G = R = 1$

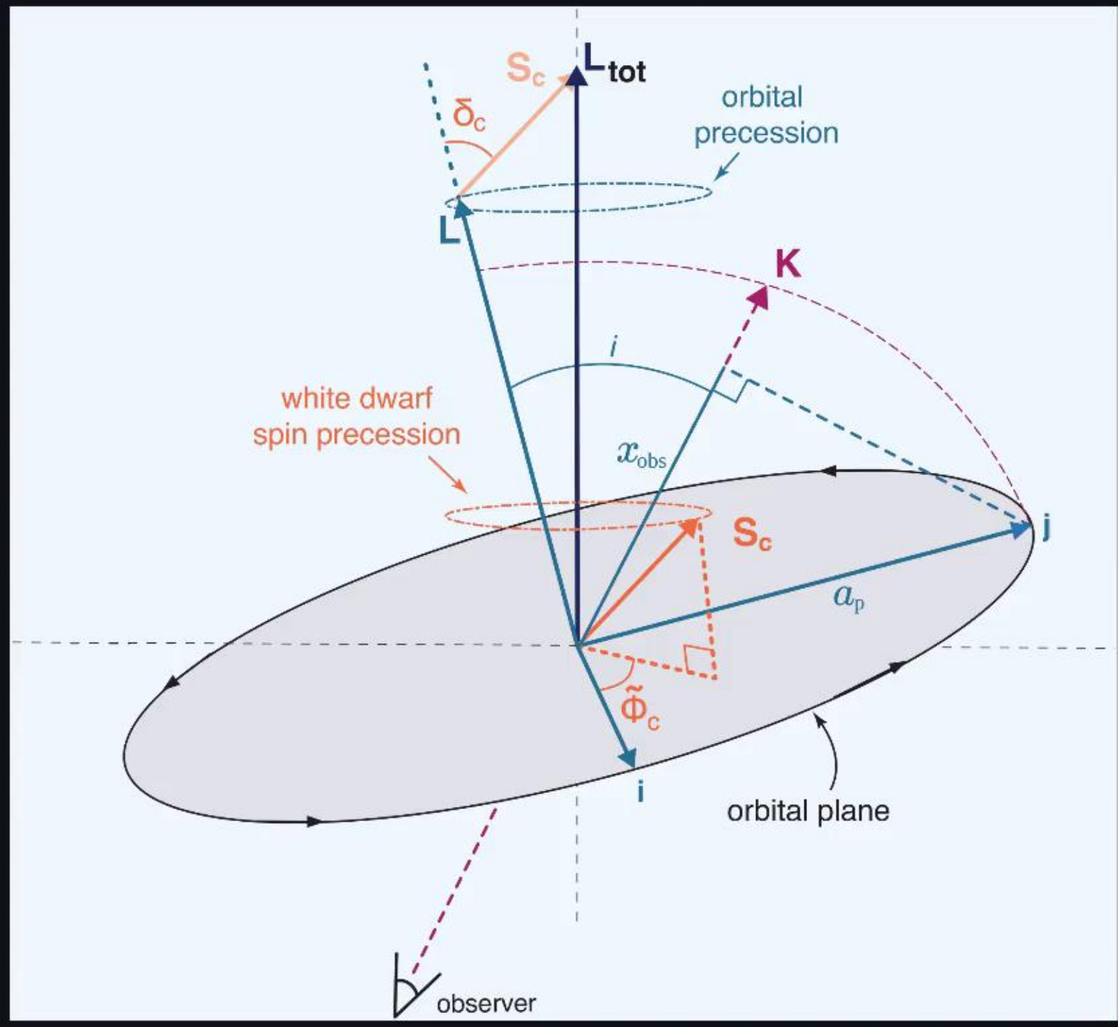
$(+, -, -, -)$

UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

*Offen im Denken*

# Binärsystem aus Pulsar und weißem Zwerg

- Umlaufperiode: 4.74 h
  Exzentrizität: 0.17
- Pulsartiming über 18 Jahre
- Änderung der projizierten Halbachse
  $\dot{x}_{\text{obs}} = (1.7 \pm 0.3) \cdot 10^{-13} ss^{-1}$




Abgeändert nach: Krishnan et al., Science 367, 577-580 (2020)

$c = G = R = 1$

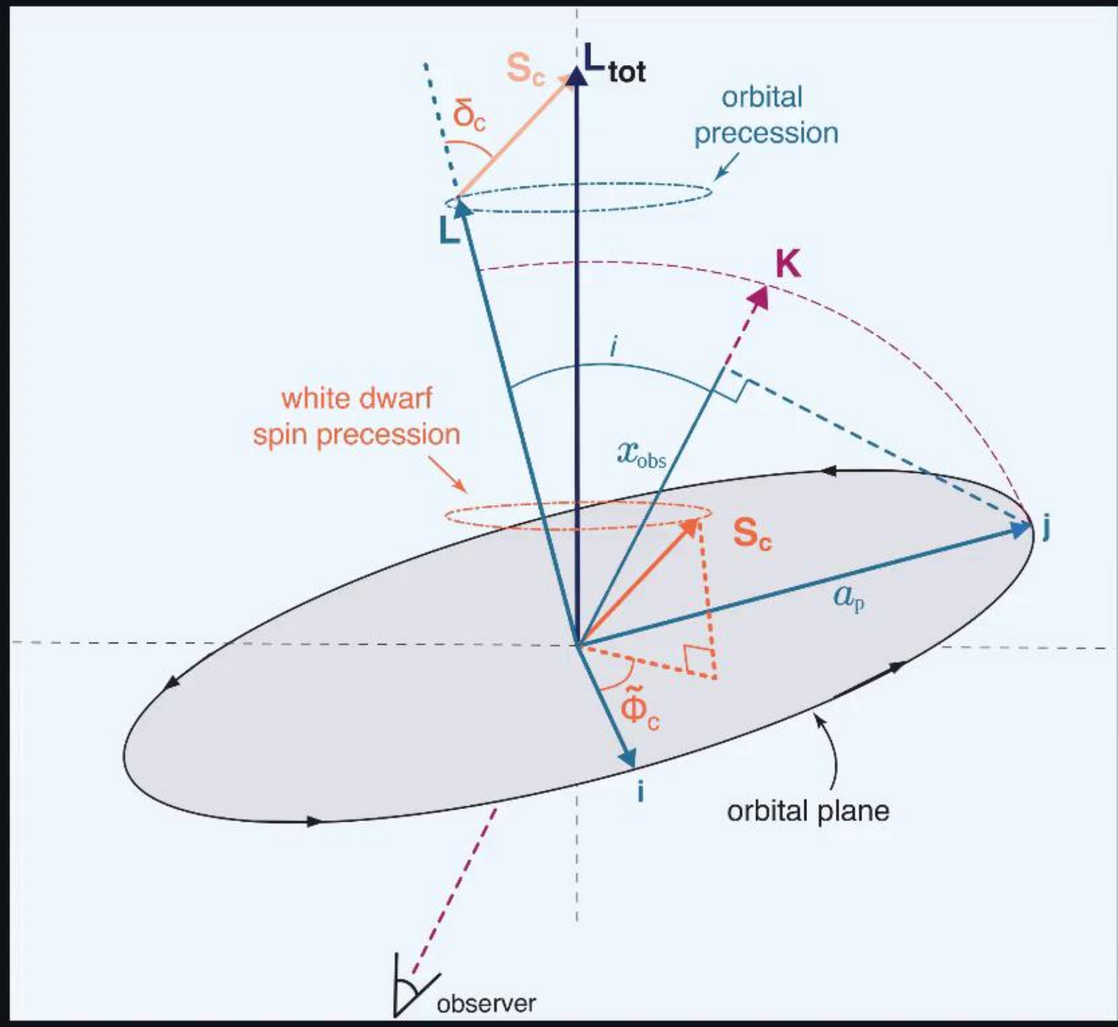
$(+, -, -, -)$

UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

*Offen im Denken*

# Binärsystem aus Pulsar und weißem Zwerg

- Umlaufperiode: 4.74 h
  Exzentrizität: 0.17
- Pulsartiming über 18 Jahre
- Änderung der projizierten Halbachse
  $\dot{x}_{\mathrm{obs}} = (1.7 \pm 0.3) \cdot 10^{-13} ss^{-1}$
- zwei Hauptkomponenten
  $\dot{x}_{\mathrm{QPM}}$ ($\sim 20\,\%$), $\dot{x}_{\mathrm{LT}}$ ($\sim 60\,\%$)




Abgeändert nach: Krishnan et al., Science 367, 577-580 (2020)

$c = G = R = 1$

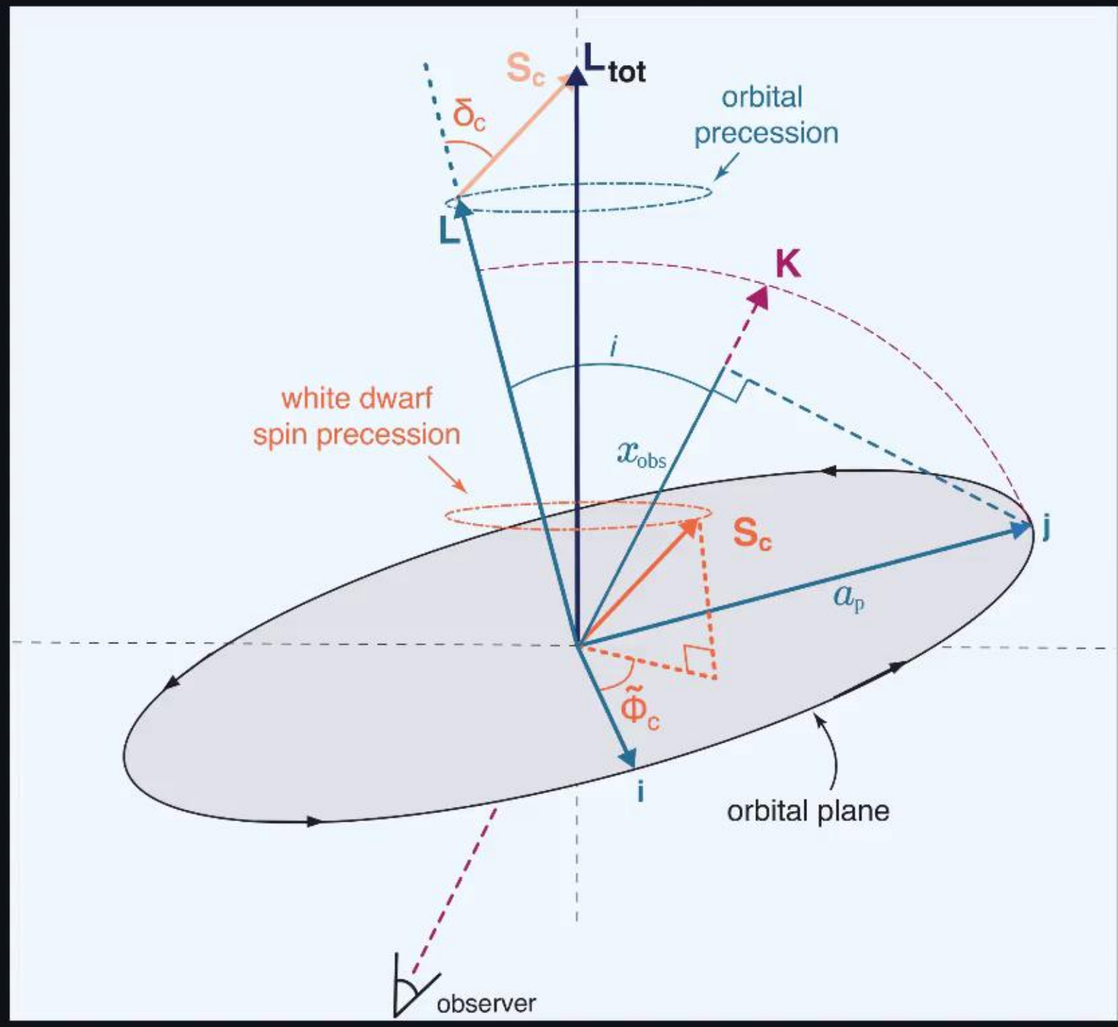
$(+, -, -, -)$

UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

*Offen im Denken*

# Binärsystem aus Pulsar und weißem Zwerg

- Umlaufperiode: 4.74 h
  Exzentrizität: 0.17
- Pulsartiming über 18 Jahre
- Änderung der projizierten Halbachse
  $\dot{x}_{\mathrm{obs}} = (1.7 \pm 0.3) \cdot 10^{-13} ss^{-1}$
- zwei Hauptkomponenten
  $\dot{x}_{\mathrm{QPM}}$ ($\sim 20\,\%$), $\dot{x}_{\mathrm{LT}}$ ($\sim 60\,\%$)
- LT-Präzession des Orbits
  mit $\Omega_{\mathrm{LT}} \sim \frac{S_{\mathrm{WD}}}{a^3(1-e^2)^{3/2}}$




Abgeändert nach: Krishnan et al., Science 367, 577-580 (2020)

$c = G = R = 1$

$(+, -, -, -)$

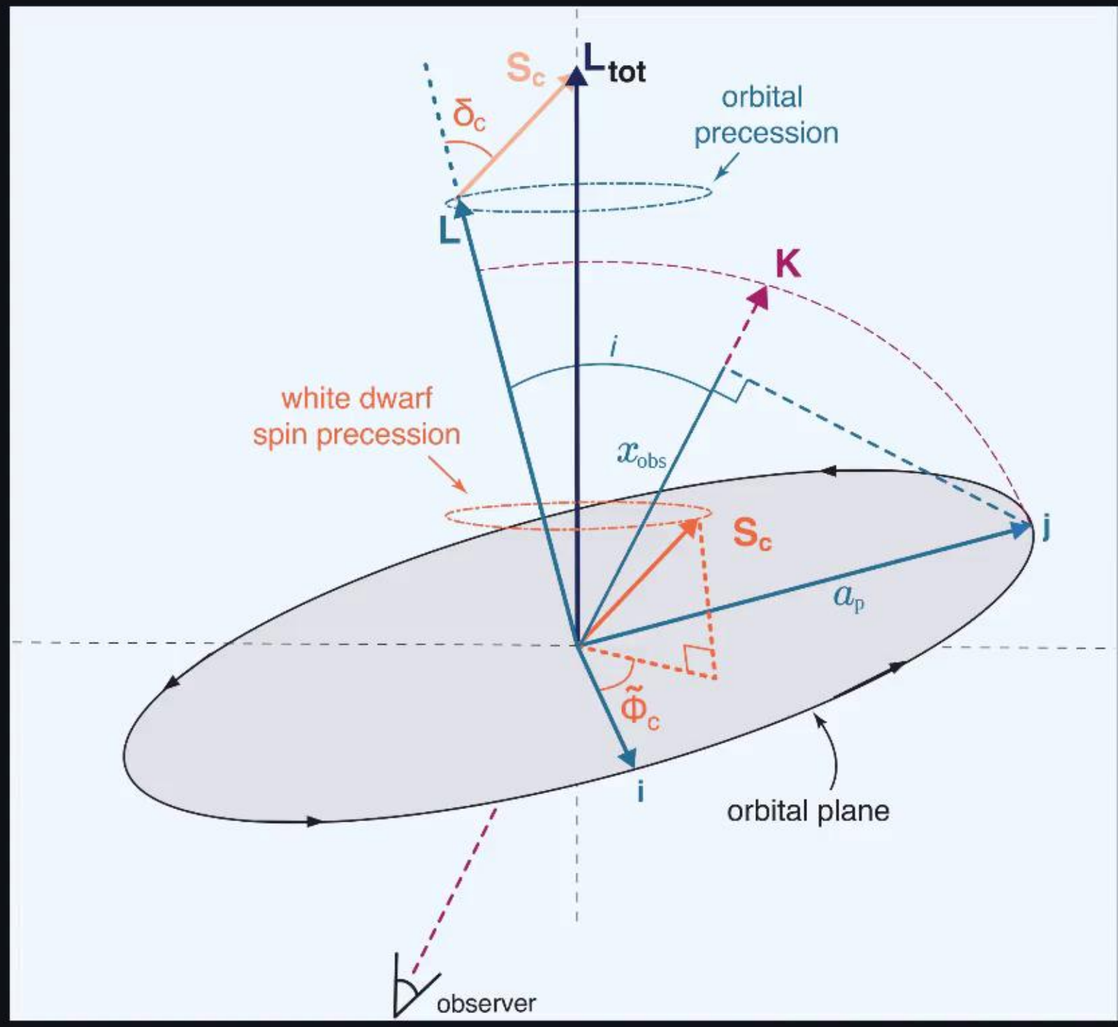
UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

*Offen im Denken*

# Binärsystem aus Pulsar und weißem Zwerg

- Umlaufperiode: 4.74 h
  Exzentrizität: 0.17
- Pulsartiming über 18 Jahre
- Änderung der projizierten Halbachse
  $\dot{x}_{\mathrm{obs}} = (1.7 \pm 0.3) \cdot 10^{-13} ss^{-1}$
- zwei Hauptkomponenten
  $\dot{x}_{\mathrm{QPM}}$ ($\sim 20\,\%$), $\dot{x}_{\mathrm{LT}}$ ($\sim 60\,\%$)
- LT-Präzession des Orbits
  mit $\Omega_{\mathrm{LT}} \sim \frac{S_{\mathrm{WD}}}{a^3(1-e^2)^{3/2}}$

  $\Rightarrow$ passt zu Messung




Abgeändert nach: Krishnan et al., Science 367, 577-580 (2020)

$$c = G = R = 1$$
$$(+, -, -, -)$$

UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

*Offen im Denken*

# Zusammenfassung

- Test1

$$c = G = R = 1$$
$$(+, -, -, -)$$

UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

*Offen im Denken*

# Zusammenfassung

- Test1
- Test2

# Quellen


- N. Szpak Übung & Skript zur Vorlesung zu Spezielle und Allgemeine Relativitätstheorie
- J. Lense, H. Thirring, *Phys. Z.* **19**, 156 (1918)
- C. Misner, K. Thorne, & J. Wheeler. - Gravitation (1973)
- C.W.F. Everitt, B.W. Parkinson Gravity Probe B Science Results—NASA Final Report. (2009)
- V. Venkatraman Krishnan *et al.* Lense-Thirring frame dragging induced by a fast-rotating white dwarf in a binary pulsar system. *Science* **367**, 577-580 (2020)
- D.R. Pasham, M. Zajaček, C.J. Nixon *et al.* Lense-Thirring precession after a supermassive black hole disrupts a star. *Nature* **630**, 325-328 (2024)