Schwarze Löcher in der Physik und Astrophysik

Ulrich Sperhake

California Institute of Technology

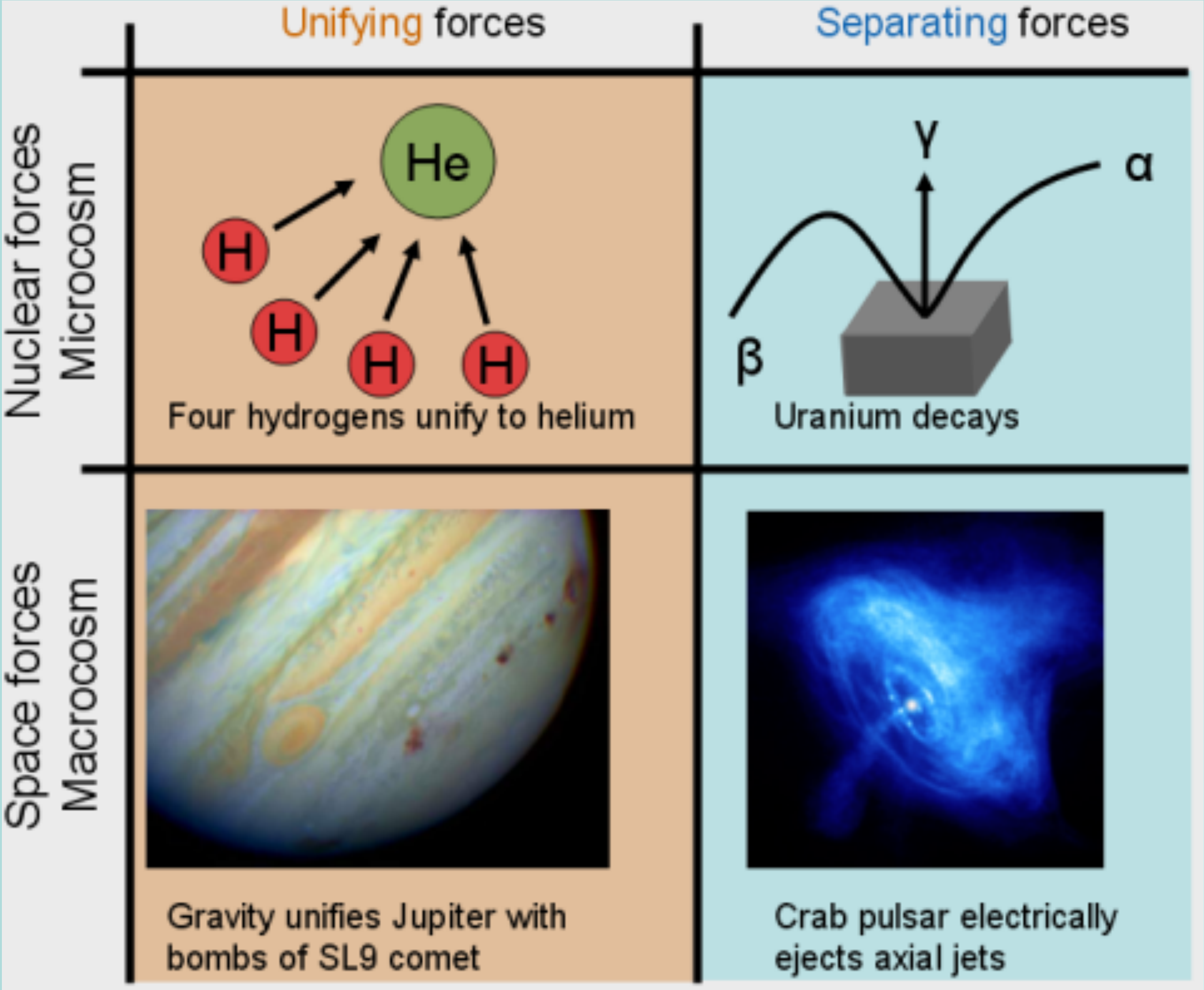
Kurs der Volkshochschule Henstedt-Ulzburg
5.Oktober 2009

Überblick

- Gravitation und Relativitätstheorie
- Was sind schwarze Löcher?
- Schwarze Löcher in der Astrophysik
- Gravitationswellen und GW-Physik
- Modellierung schwarzer Löcher
- Diskussion

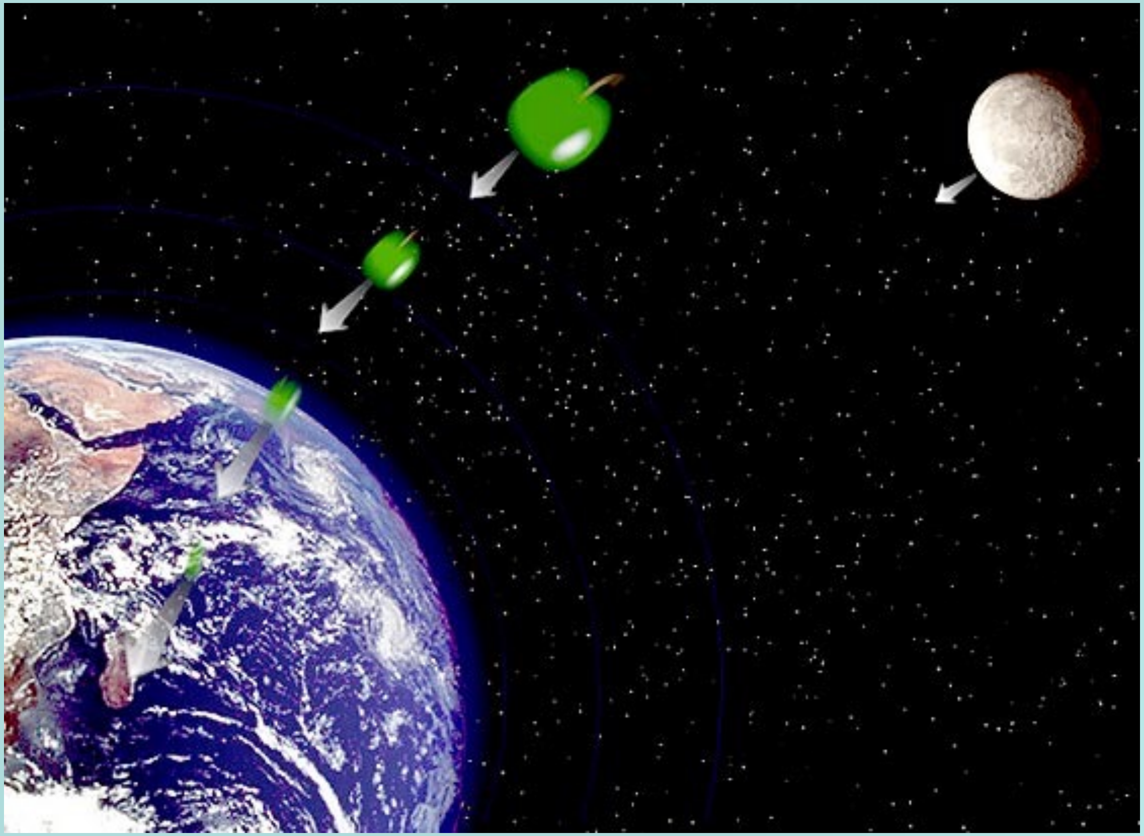
1. Gravitation und Relativitätstheorie

4 Wechselwirkungen



SL durch Einstein's Relativitätstheorie vorhergesagt

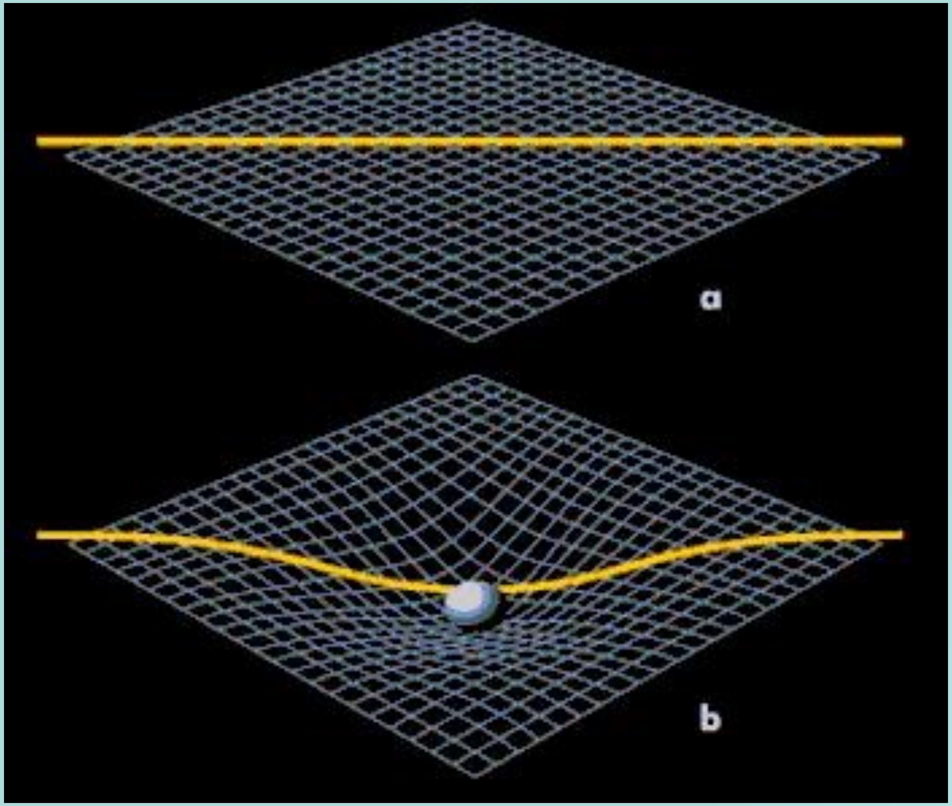
Schwerkraft ist allgegenwärtig



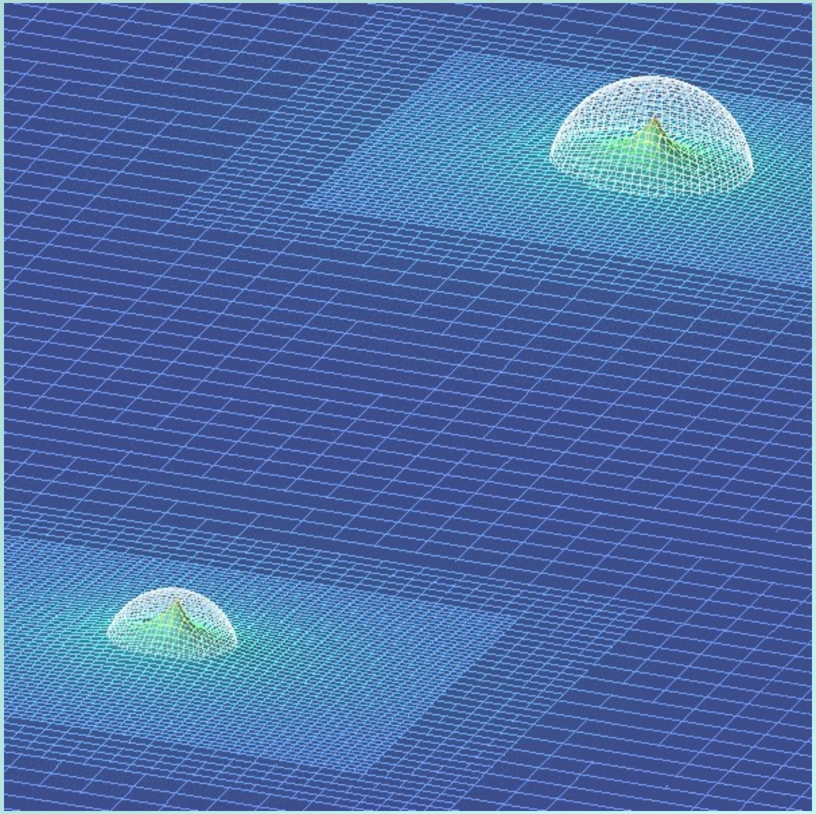
Einstein's Relativitätstheorie

Geometrie von Gummimatrazen

“Künstlerische Interpretation”



“Echte Simulation”



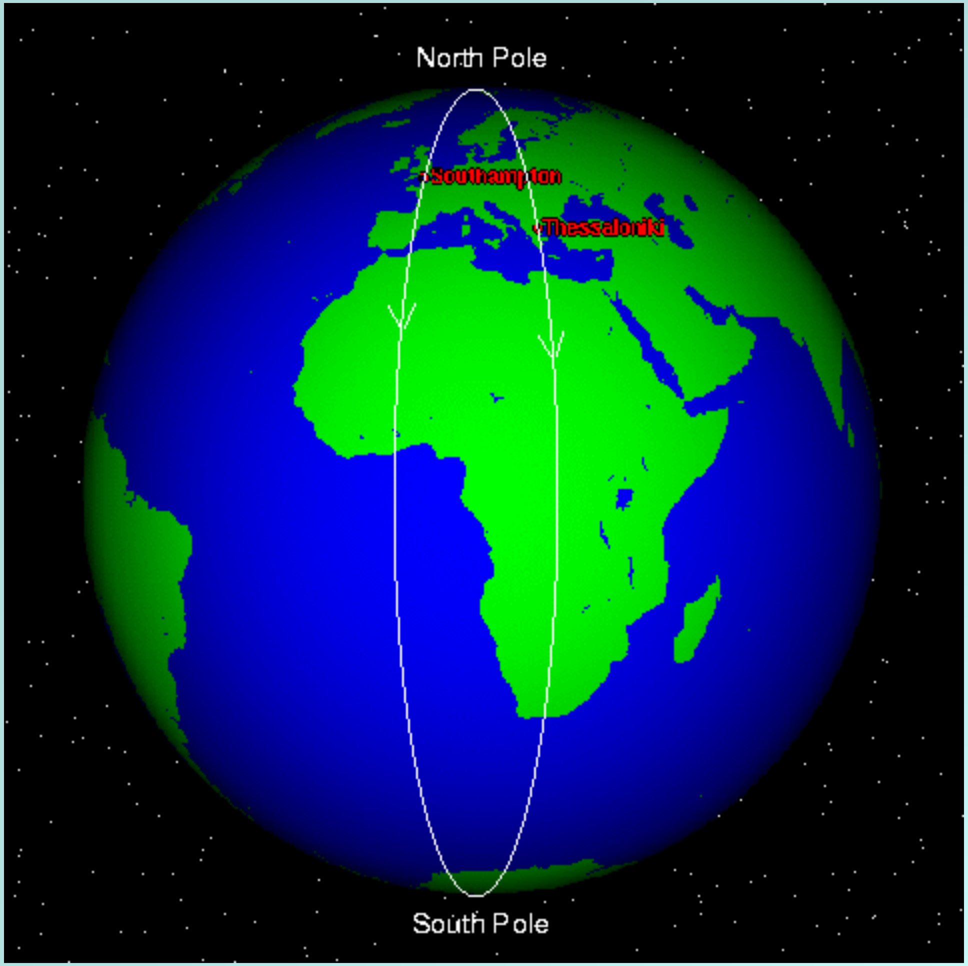
Schwerkraft als Raumkrümmung

Kraft

⇔ Beschleunigung

⇔ Ungleichförmige Bewegung

⇔ Gekrümmte Geometrie



Einstein's Gleichungen

- Raumkrümmung wird durch Metrik bestimmt $g_{\alpha\beta}$
- Die Metrik gehorcht den Einstein'schen Gleichungen

$$G_{\alpha\beta} = 8\pi\, T_{\alpha\beta}$$

Geometrie Materie

- 10 gekoppelte, nichtlineare partielle DGLn

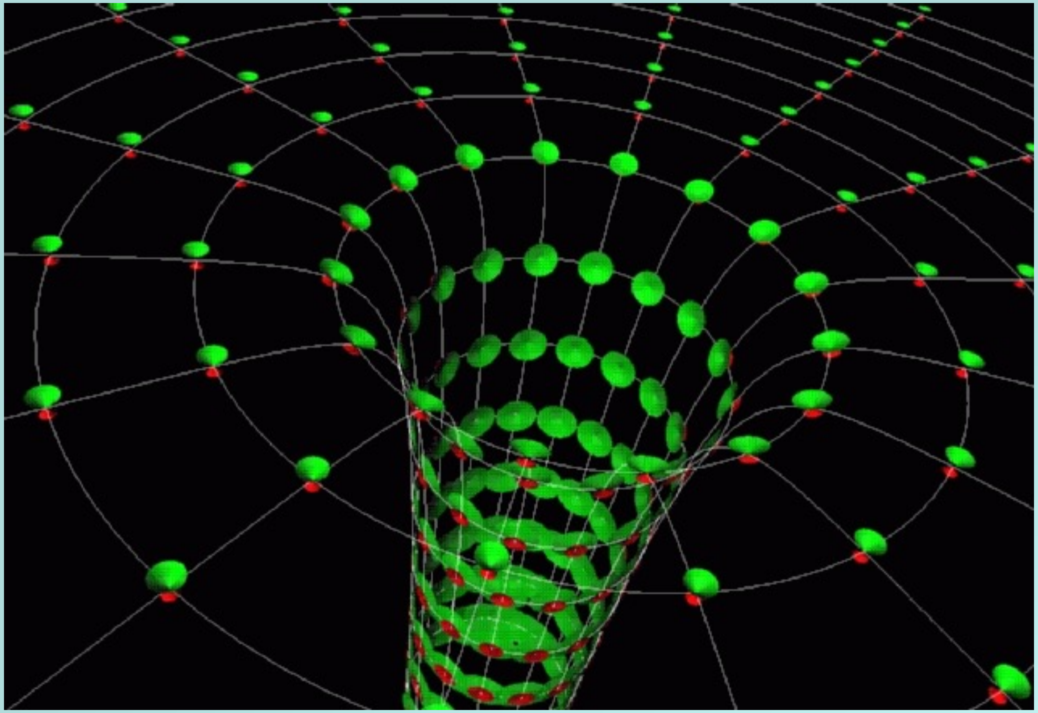
Kompliziertestes System der Physik

- "Spacetime tells matter how to move,
  matter tells spacetime how to curve" Misner, Thorne & Wheeler

2. Was sind schwarze Löcher?

Wie charakterisiert man schwarze Löcher?

- Betrachte Lichtkegel
- Aus-, eingehendes Licht
- Berechne Oberfläche
  Ausgehendes Licht
- Expansion:=Änderungs-
  rate dieser Fläche
- Scheinbarer Horizont:=
  Äußerste Oberfläche mit verschwindender Expansion
- "Lichtkegel kippen über" durch Krümmung



Schwarzschildmetrik

Schwarzschild–Metrik

$$\mathbf{g}^{\mu\nu} = \begin{pmatrix} g^{tt} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & g^{rr} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & g^{\theta\theta} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & g^{\phi\phi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1/(1-2\,M/r) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & (1-2\,M/r) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/r^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/(r\sin\theta)^2 \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{g}_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} g_{tt} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & g_{rr} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & g_{\theta\theta} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & g_{\phi\phi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -(1-2\,M/r) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/(1-2\,M/r) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r^2\sin^2\theta \end{pmatrix}$$

- Unglückliche Koordinaten!
- Singularität bei $r = 2M$
- Was heißt das?

Kruskal Koordinaten

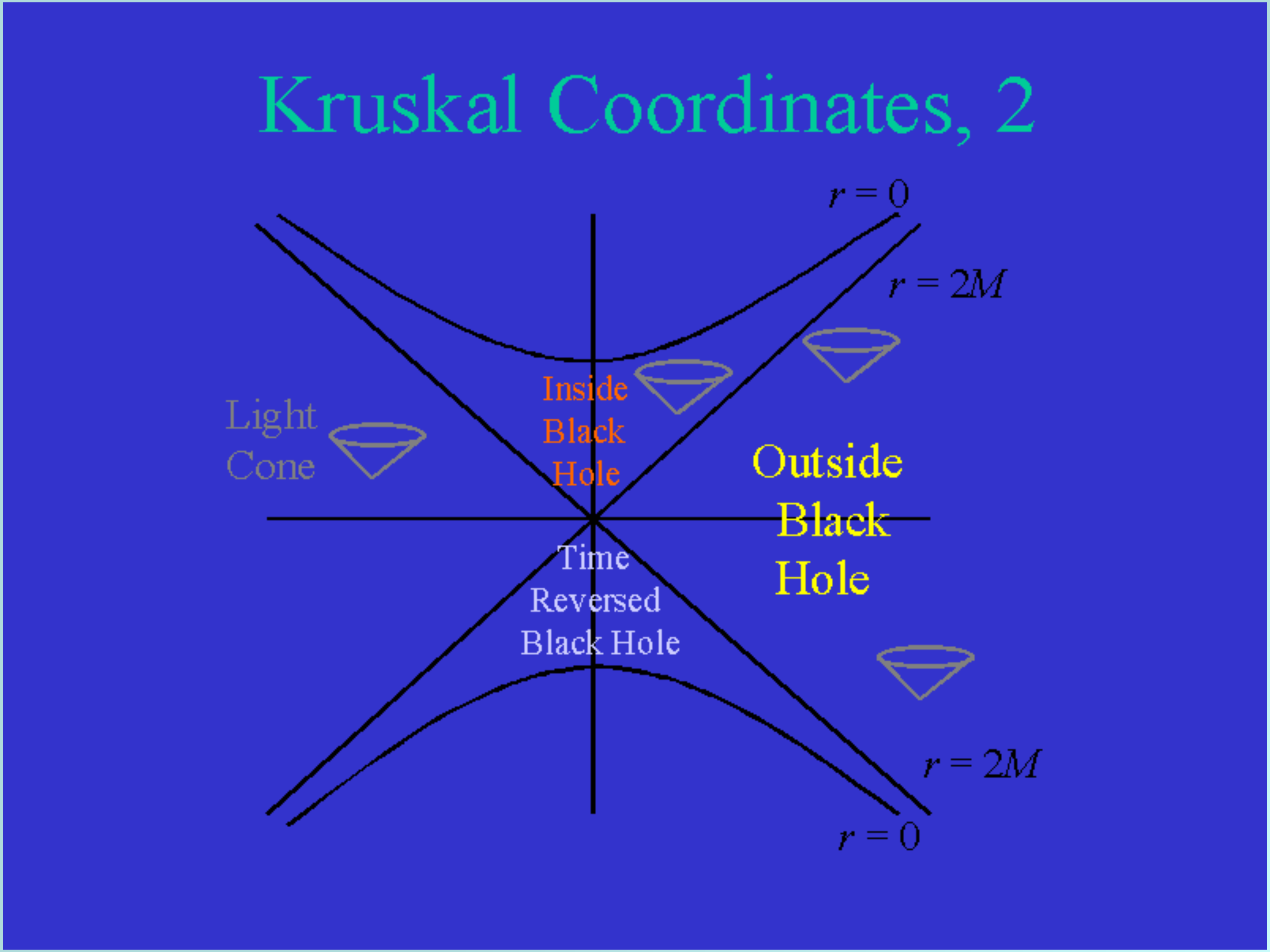
Kruskal Coordinates, 1

With $u = \pm \left| \dfrac{r}{2M} - 1 \right|^{1/2} e^{r/4M} \cosh\left(\dfrac{ct}{4M} \right)$

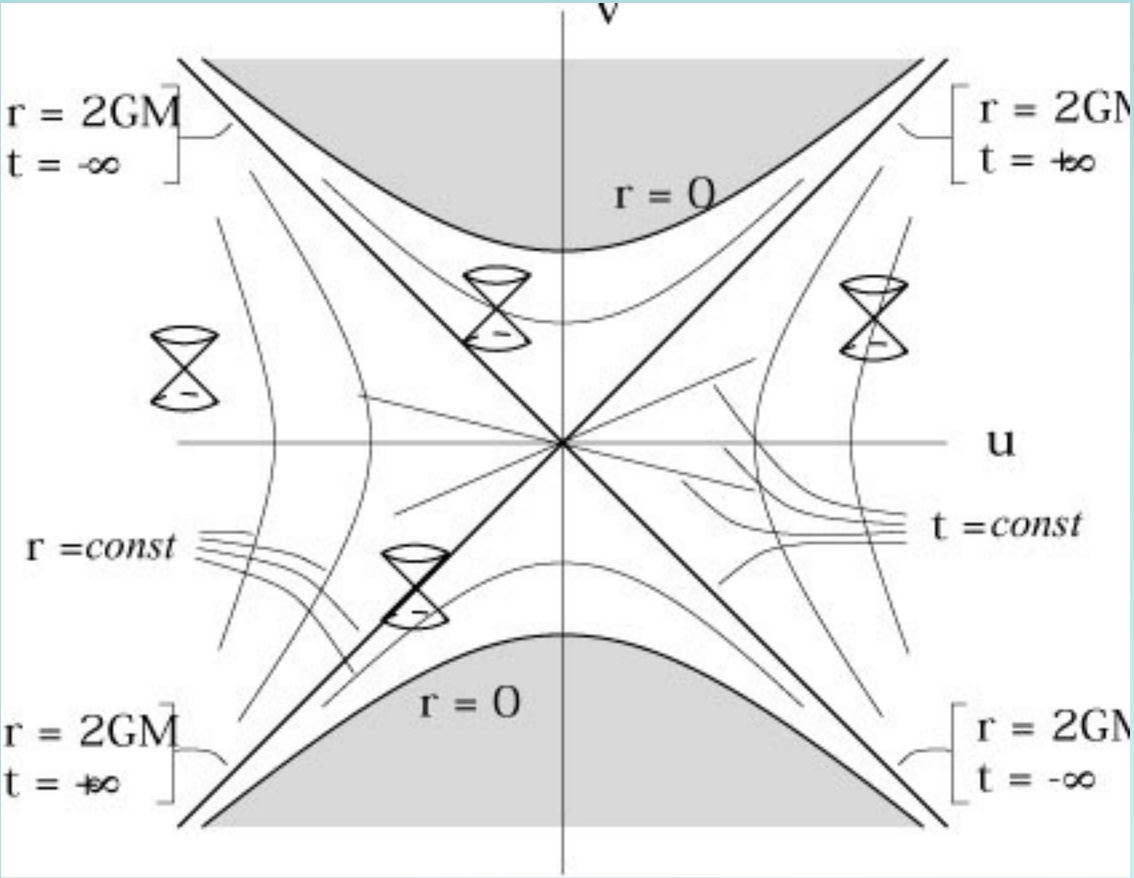
and $v = \pm \left| \dfrac{r}{2M} - 1 \right|^{1/2} e^{r/4M} \sinh\left(\dfrac{ct}{4M} \right)$

The Schwarzschild solution is represented by the following:

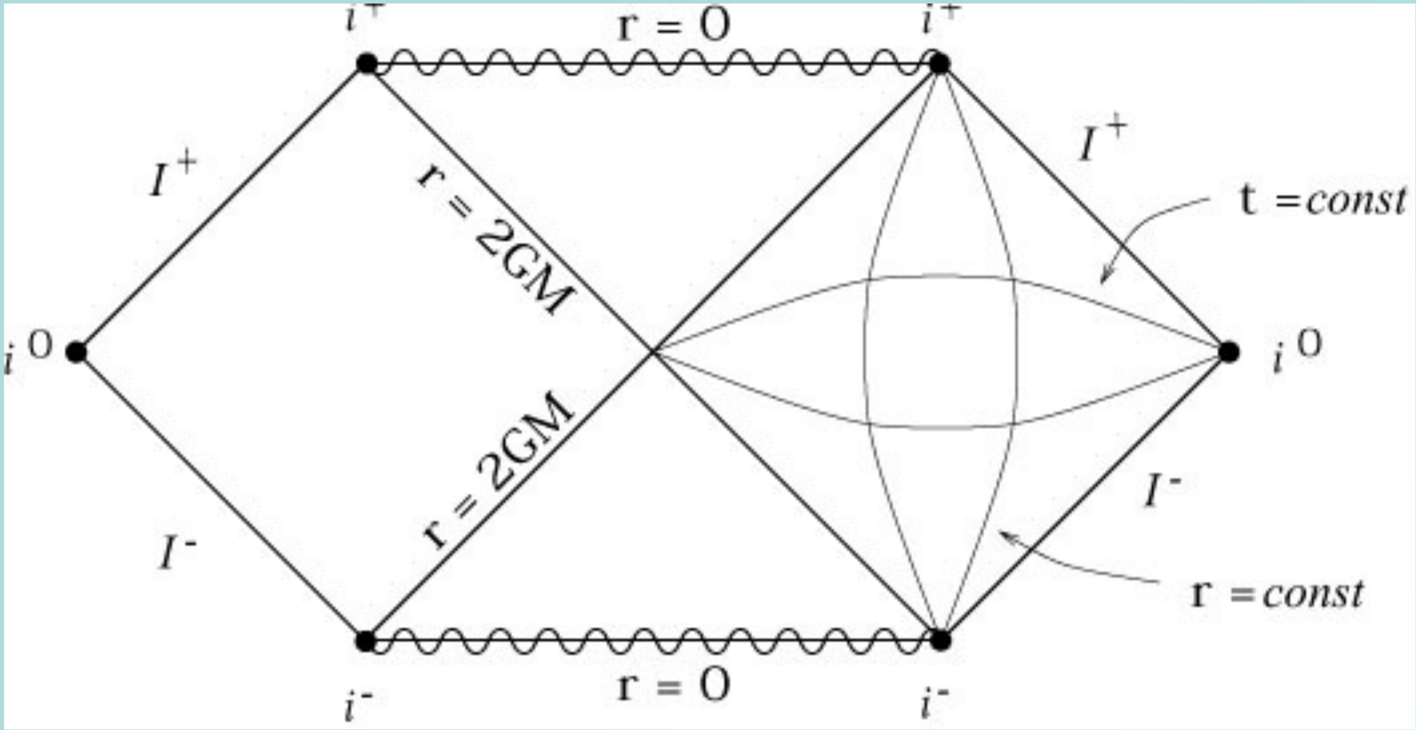
Kruskal Koordinaten



Kruskal Koordinaten



Penrose Diagramm

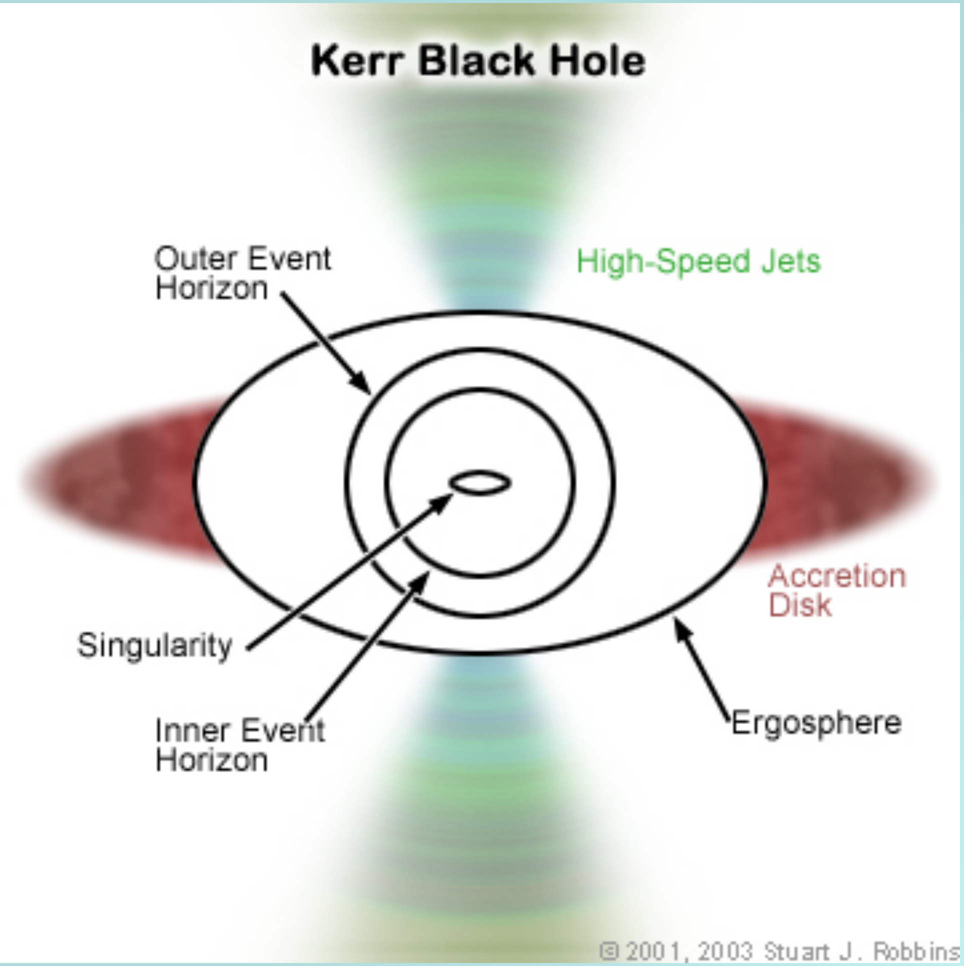


Rotierende Schwarze Löcher: Kerr Metrik

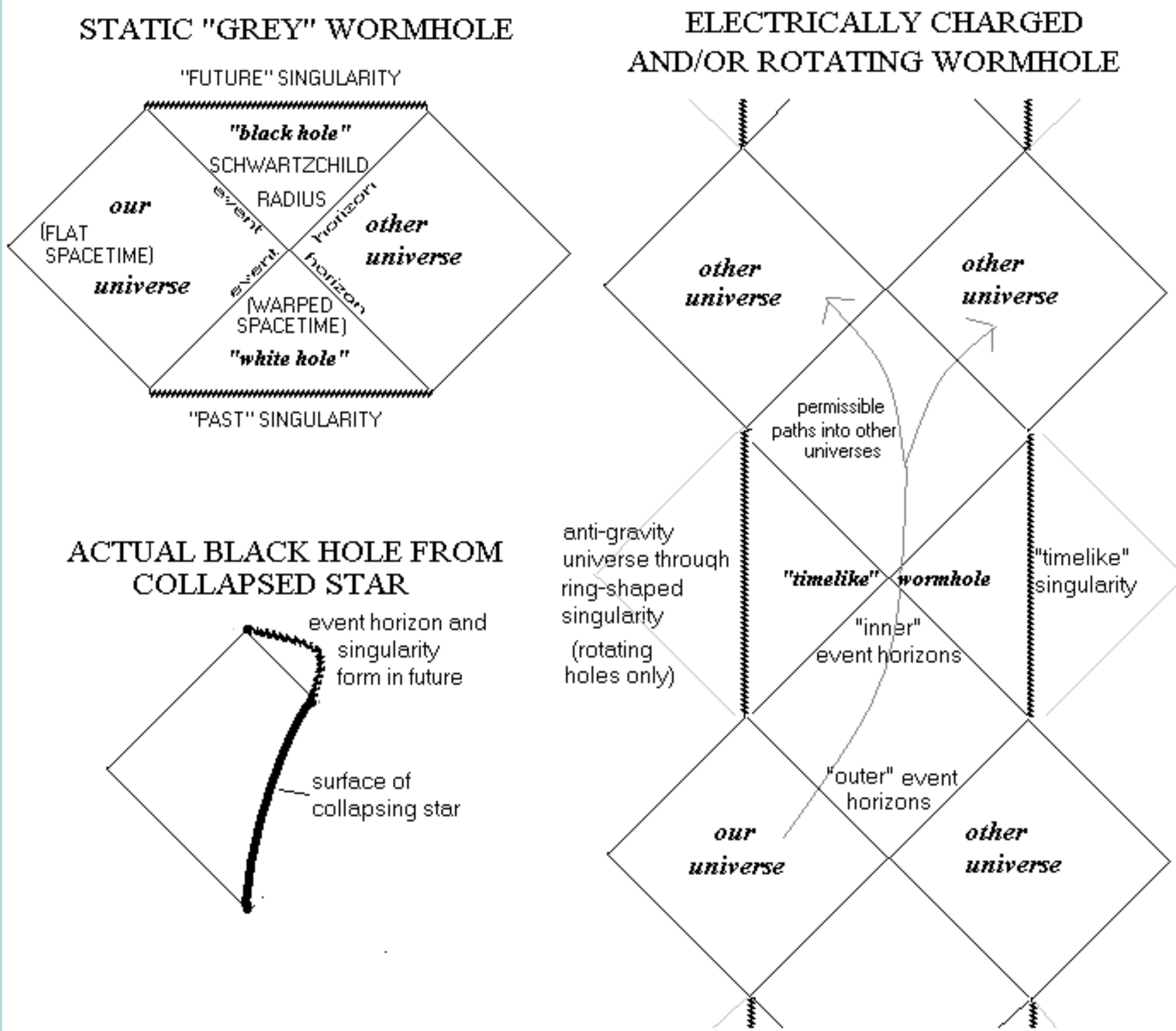
$$
\begin{aligned}
ds^2 &= -\frac{\Delta_r}{\chi^2\,\rho^2}\,\left(dt - a\,\sin^2\theta\,d\phi\right)^2 + \frac{\Delta_\theta\,\sin^2\theta}{\chi^2\,\rho^2} \\
&\quad \times \left[a\,dt - (r^2 + a^2)\,d\phi\right]^2 + \rho^2\,\left(\frac{dr^2}{\Delta_r} + \frac{d\theta^2}{\Delta_\theta}\right)
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
\rho^2 &= r^2 + \cos^2\theta \\
\Delta_r &= (r^2 + a^2)\,(1 - \frac{1}{3}\,\Lambda r^2) - 2Mr + Q^2 \\
\Delta_\theta &= 1 + \frac{1}{3}\,\Lambda a^2 \cos^2\theta \\
\chi &= 1 + \frac{1}{3}\,\Lambda a^2
\end{aligned}
$$

Rotierende Schwarze Löcher: Kerr Metrik

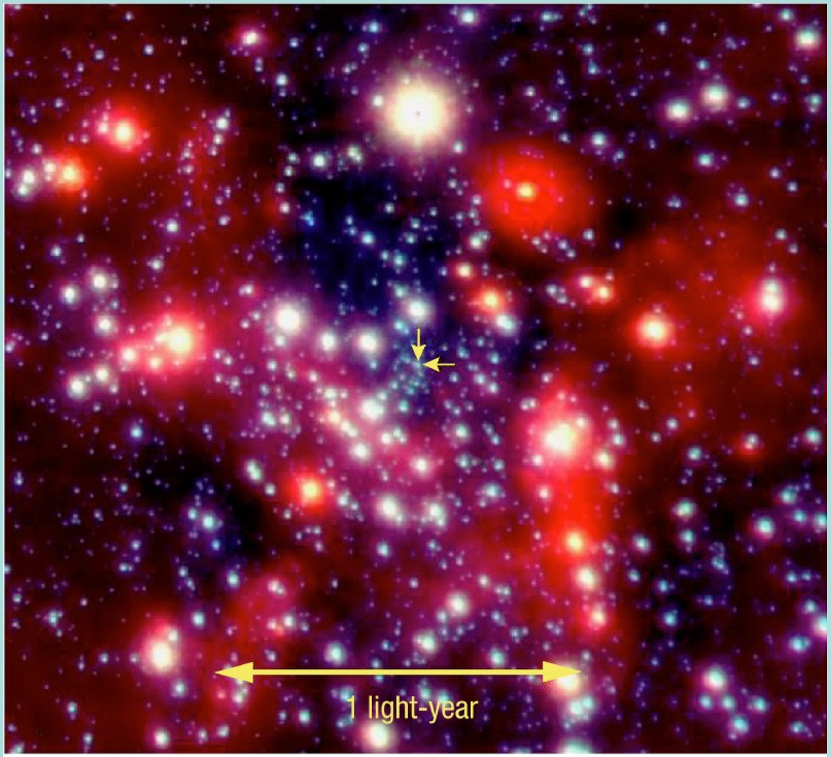


Penrose Diagramm

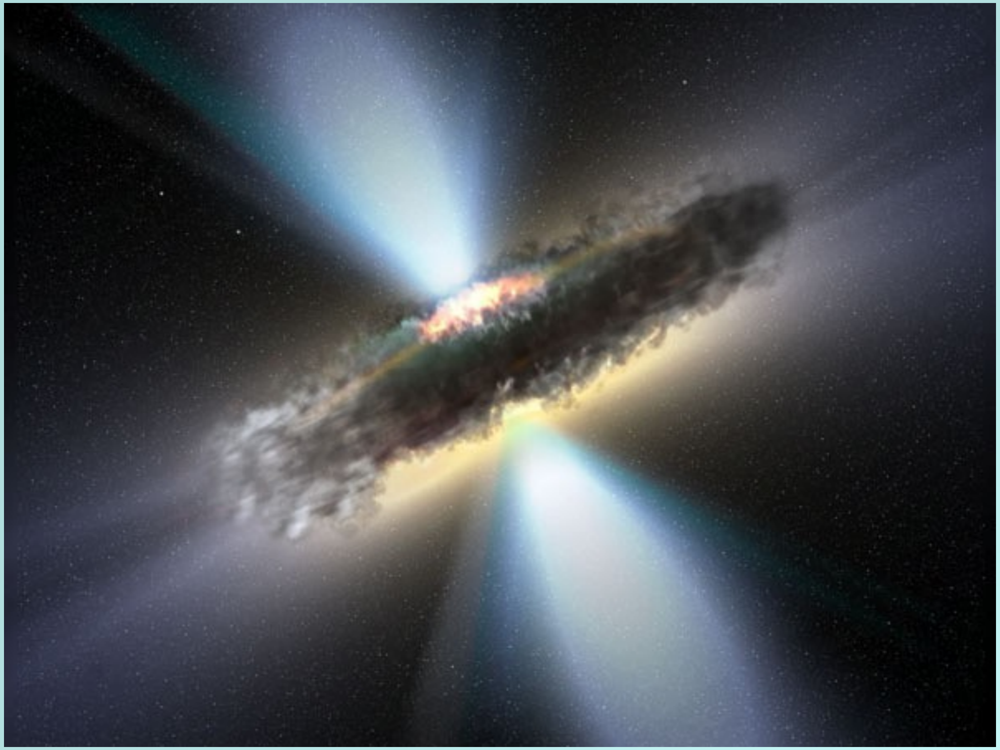


Schwarze Löcher für Astrophysiker

- Supermassive schwarze Löcher in den Zentren der Galaxien

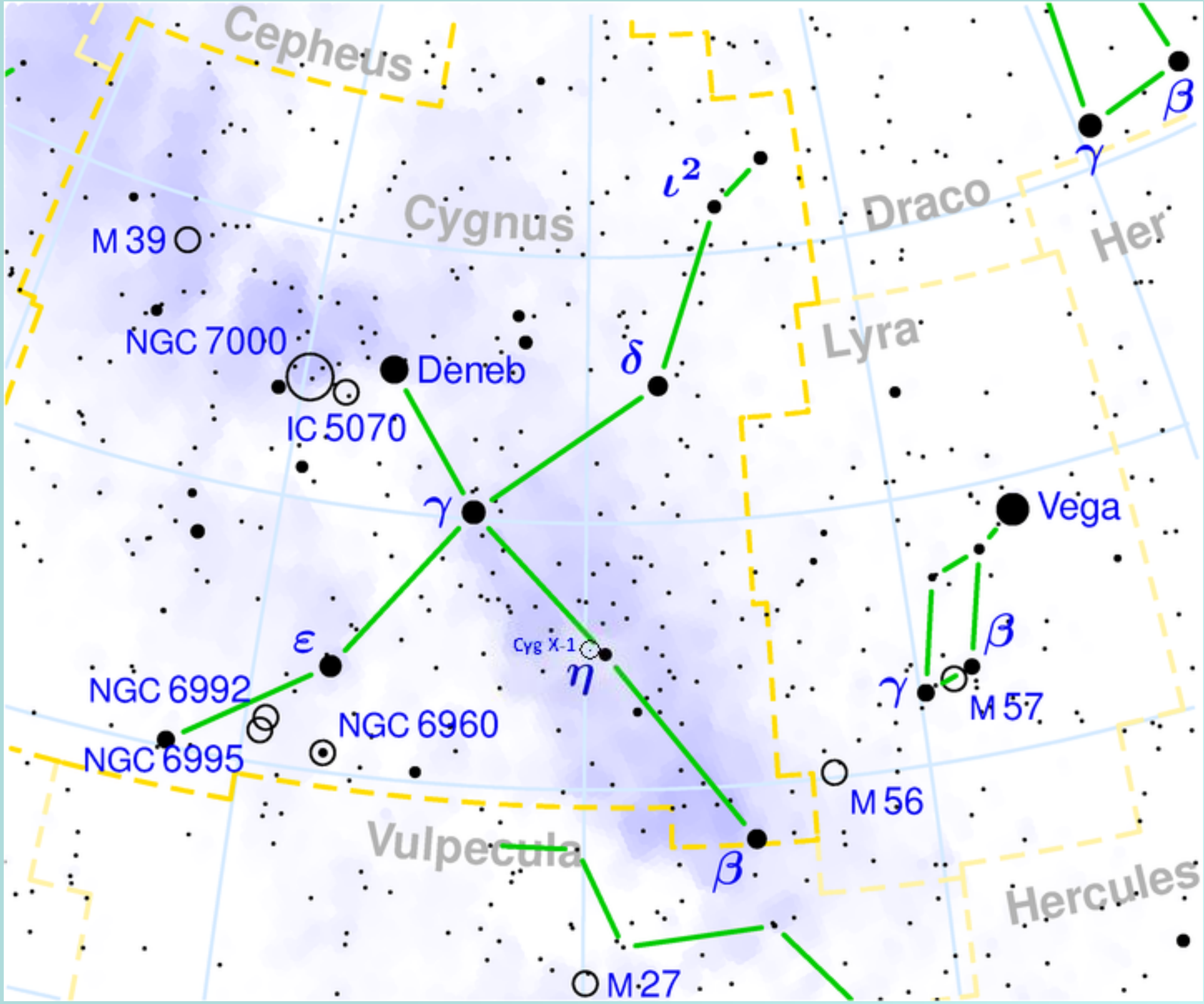


The Centre of the Milky Way
(VLT YEPUN + NACO)
ESO PR Photo 23a/02 (9 October 2002)
©European Southern Observatory



Stellare schwarze Löcher

- In Binärsystemen von stellaren Objekten: Cygnus XR-1



Stellare schwarze Löcher

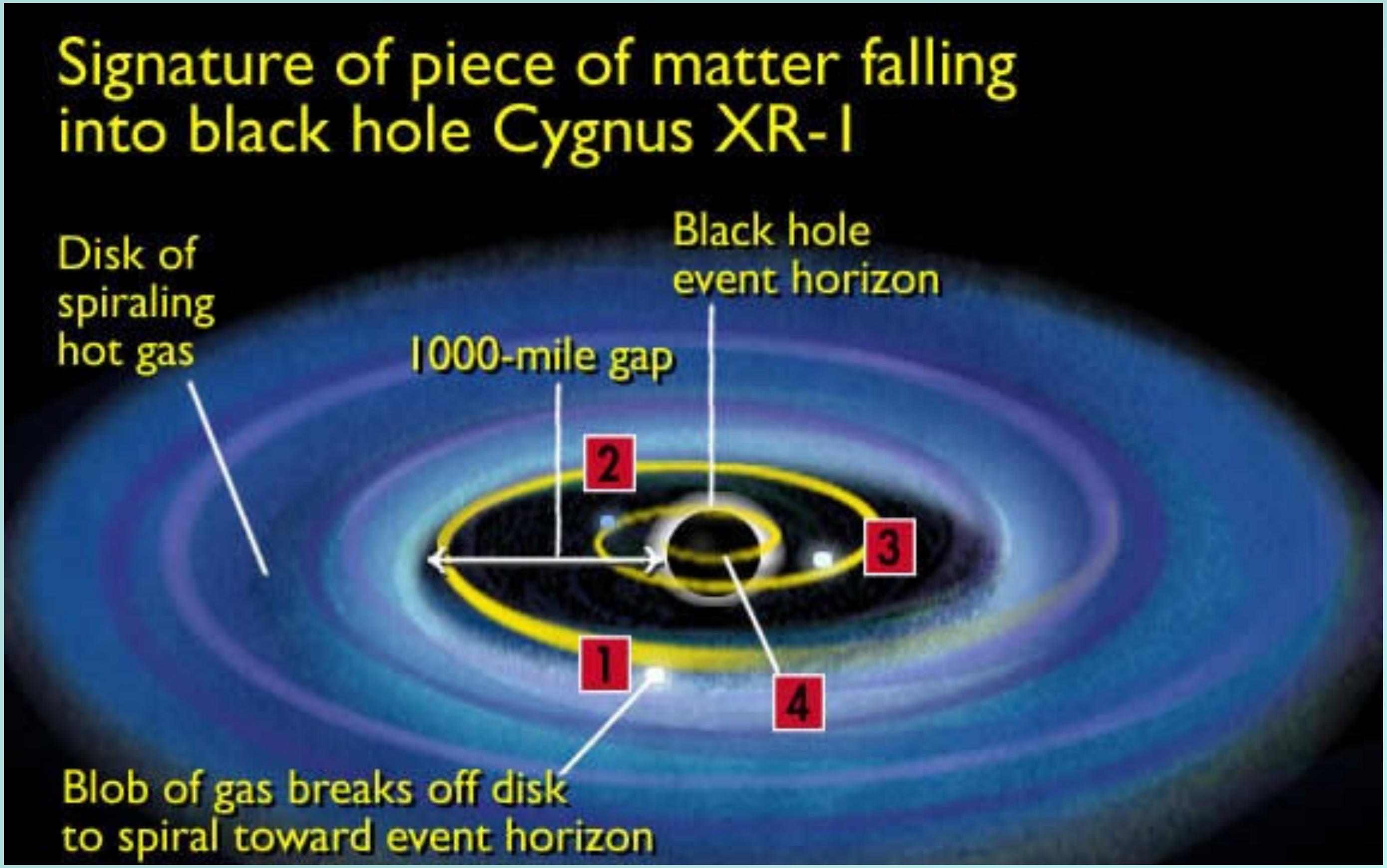
- Röntgenquelle!

Stellare schwarze Löcher

- Ein Partner sehr kompakt und massiv $\Rightarrow$ Schwarzes Loch!

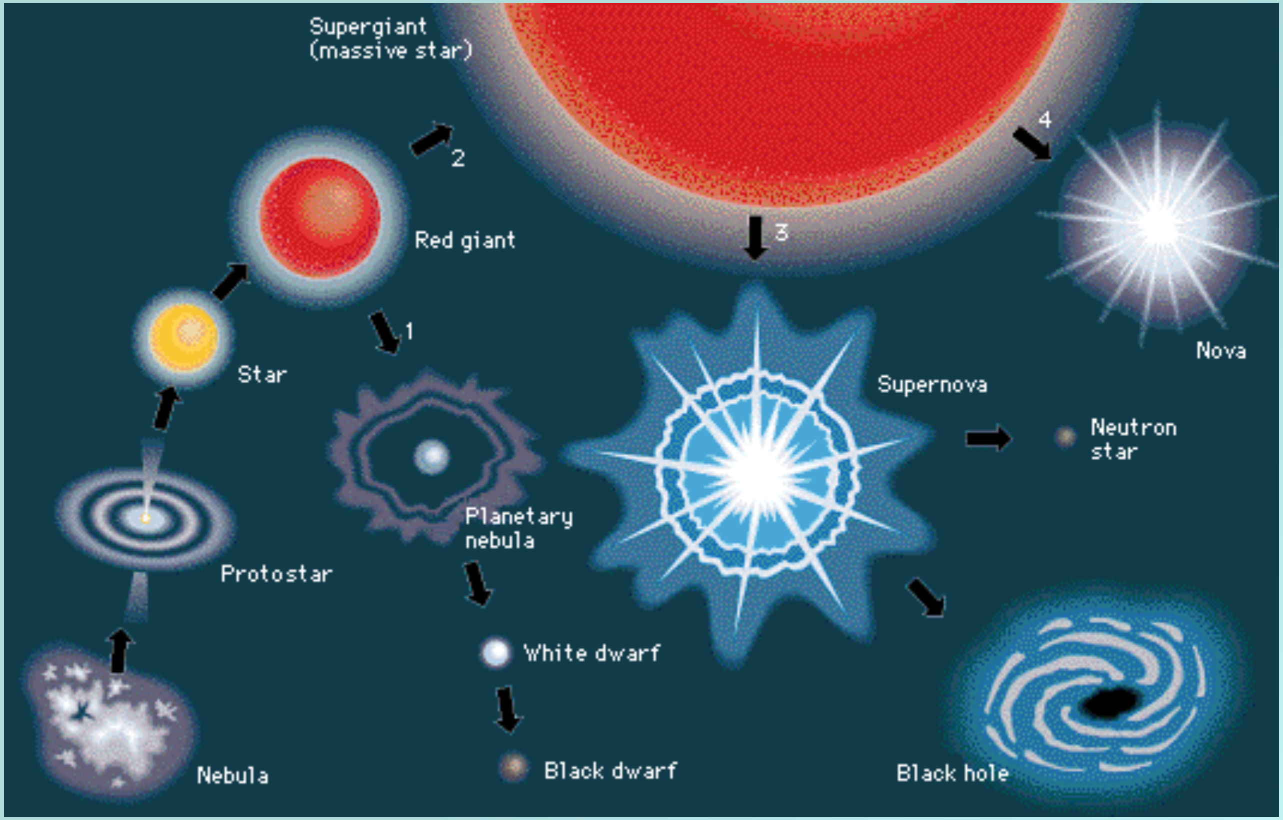
Stellare schwarze Löcher

- Massentransfer, Akkretion



Wie entstehen schwarze Löcher?

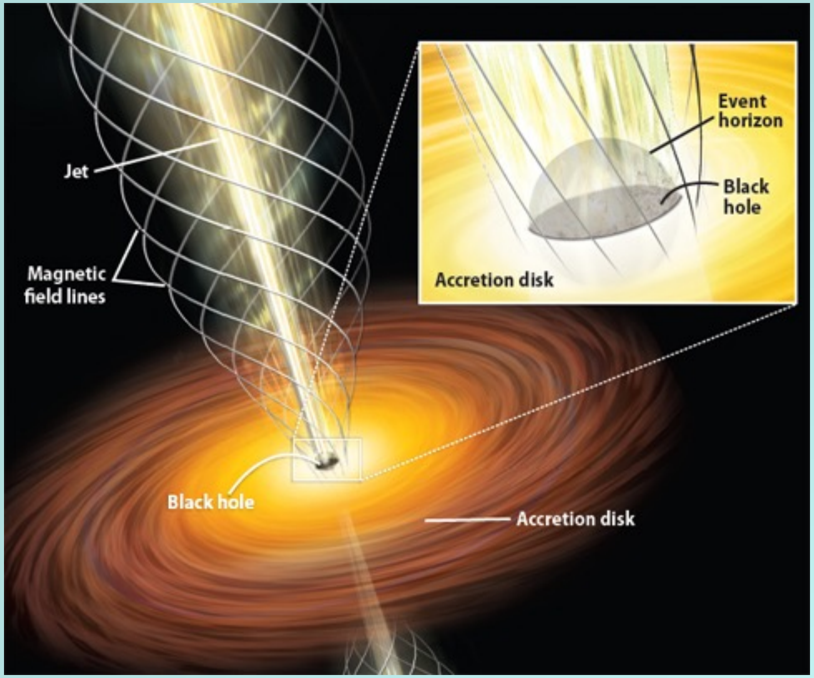
- Stellare schwarze Löcher: Supernovae

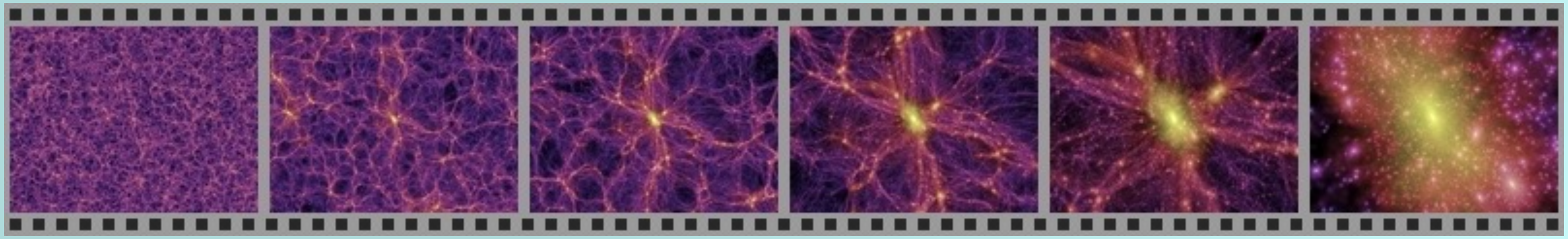


3. Schwarze Löcher in heutiger (Astro)Phys

Schwarze Löcher in der Astrophysik

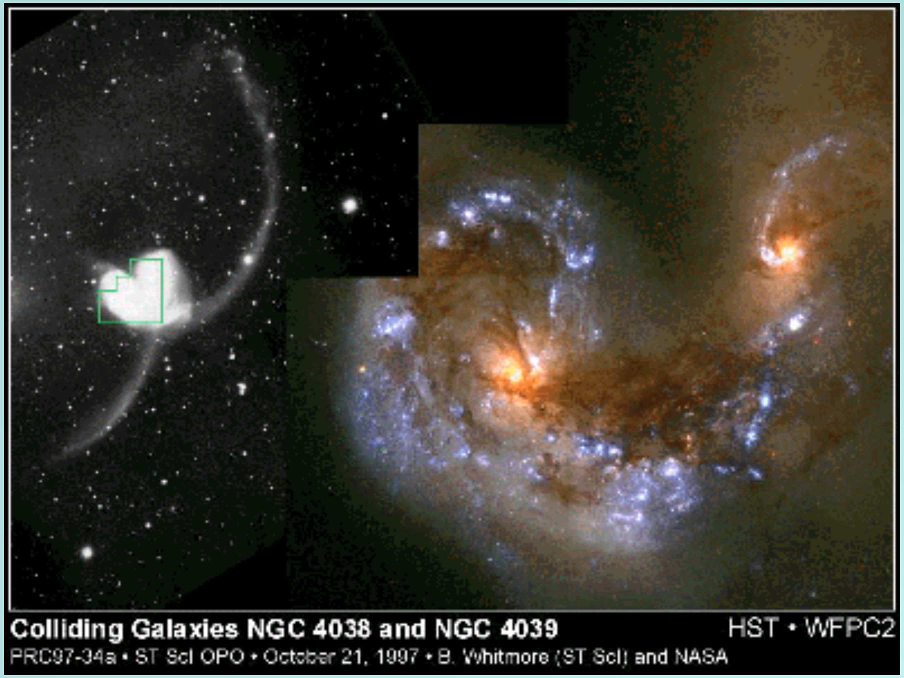
- Schwarze Löcher sind wichtig in der Astrophysik
  - Galaxien beherbergen
  - Wichtige Quellen elektromagn. Strahlung
  - Strukturbildung im frühen Universum





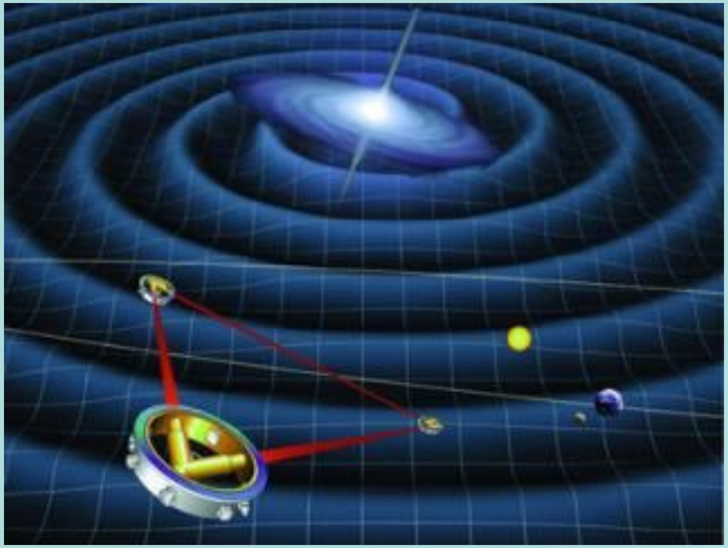
Schwarze Löcher in der Astrophysik

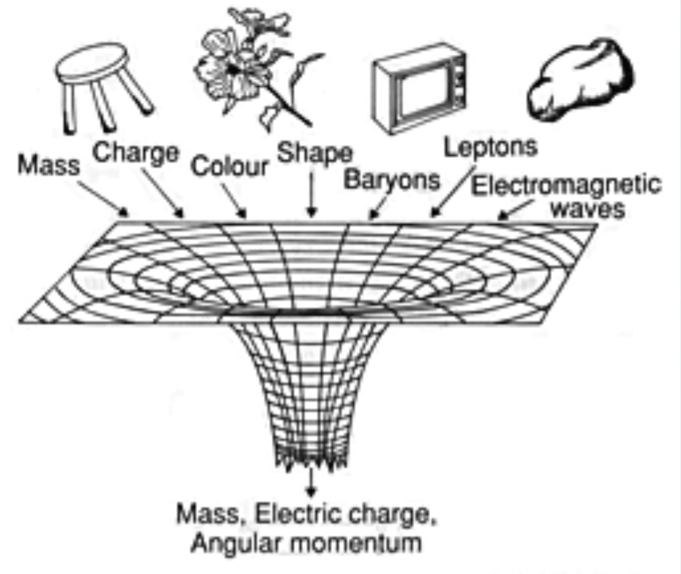
- Schwarze Löcher sind wichtig in der Astrophysik
  - Struktur von Galaxien
  - Kosmische Projektile?



Fundamentale Physik schwarzer Löcher

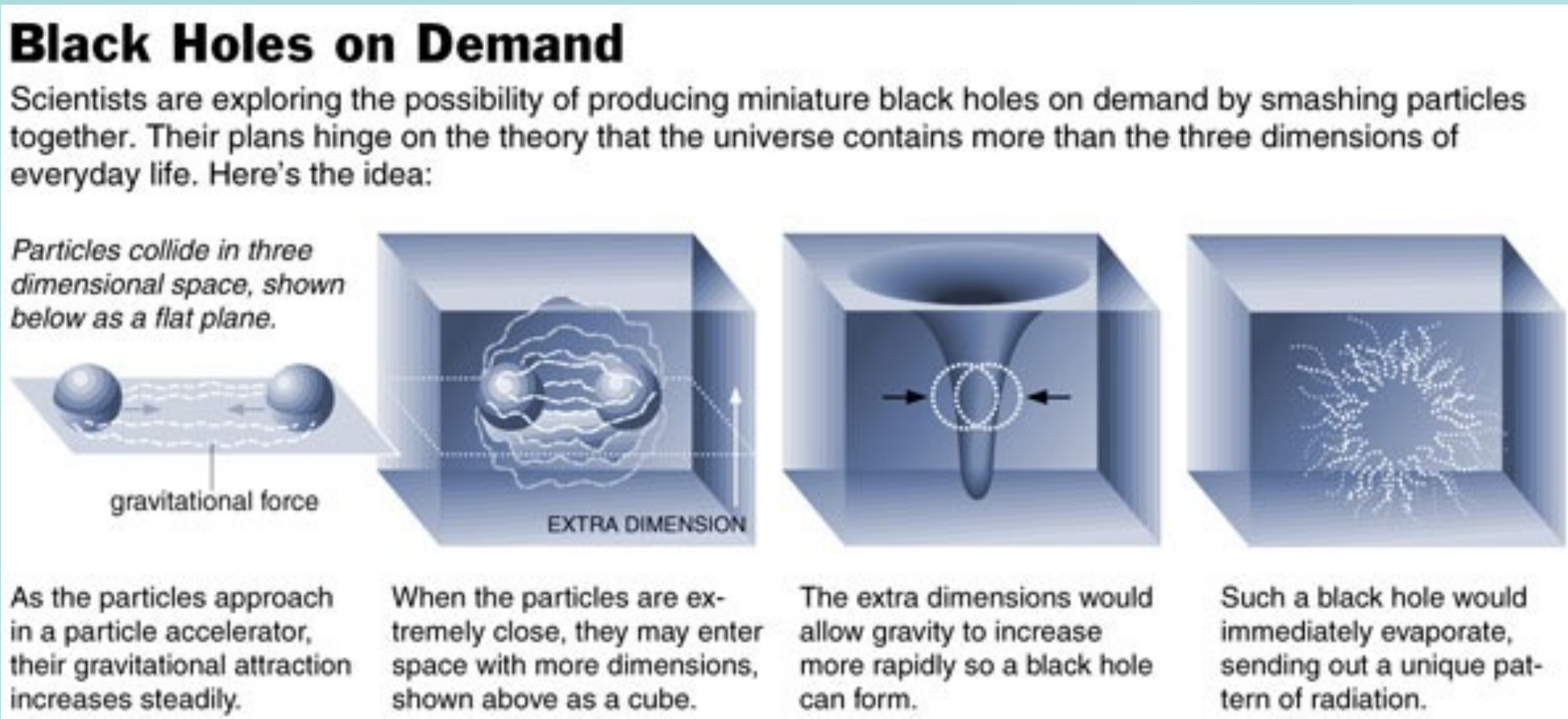
- Erlauben neue Tests fundamentaler Physik
  - Stärkste Quellen von Gravitationswellen (GW)
  - Tests alternativer Gravitationstheorien
  - No-hair Theorem der ART





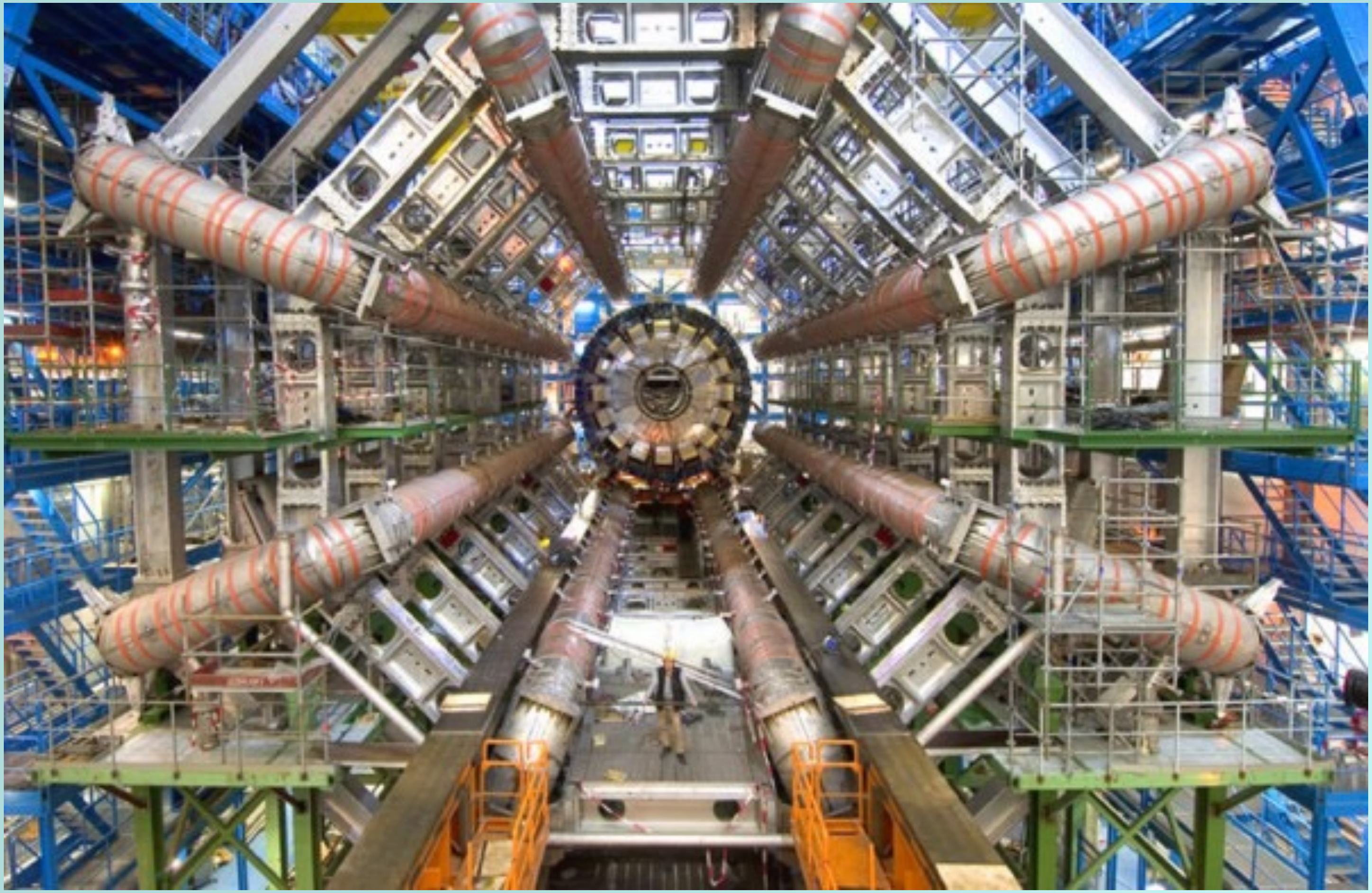
Fundamentale Physik schwarzer Löcher

- Erlauben neue Tests fundamentaler Physik
  - Produktion in Beschleunigern



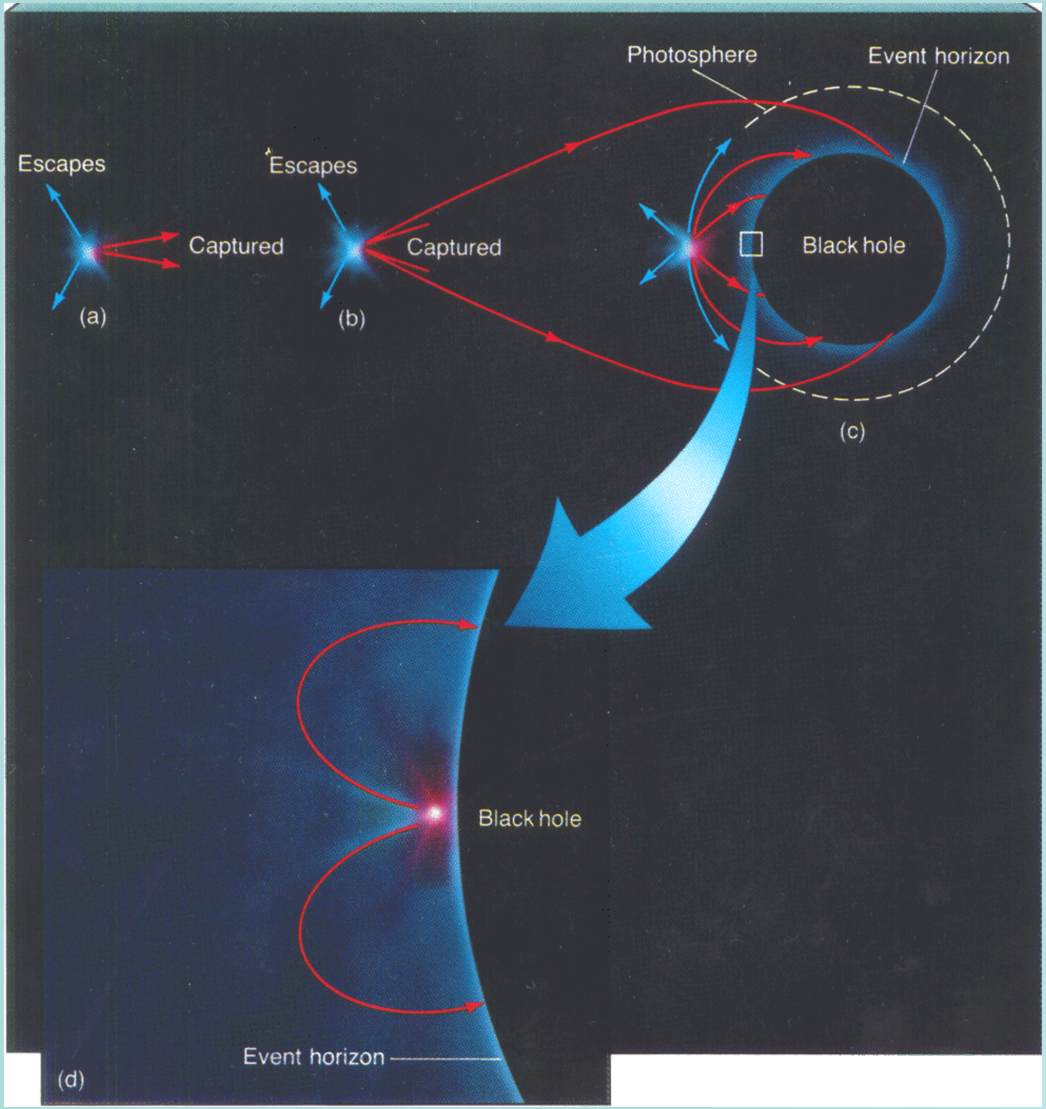
Fundamentale Physik schwarzer Löcher

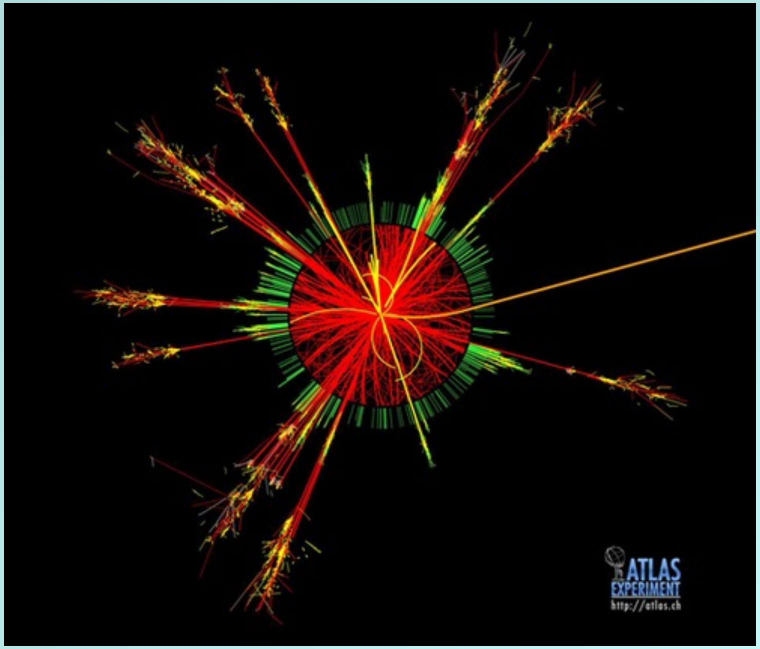
- LHC CERN



Fundamentale Physik schwarzer Löcher

- Zerstrahlung der Atome durch Hawking Strahlung





4. Gravitationswellenphysik

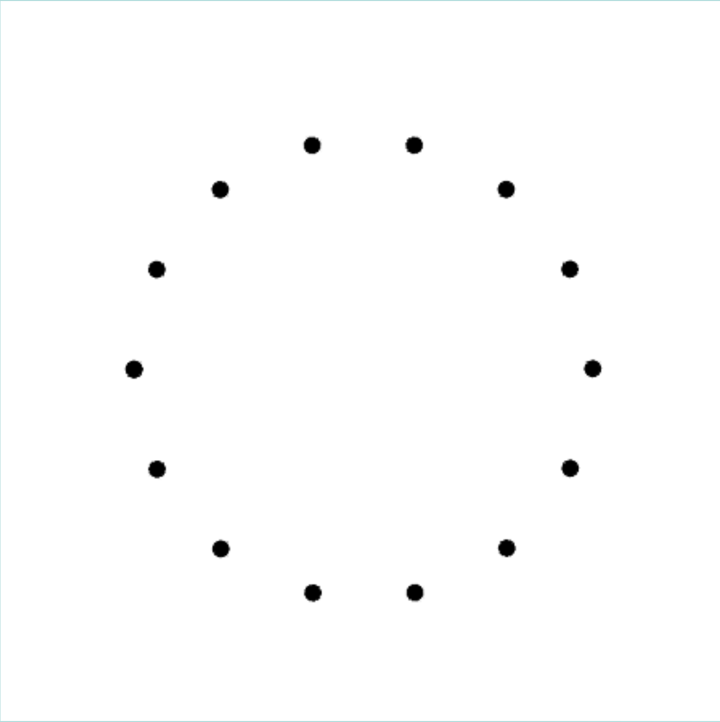
Fundamentale Physik schwarzer Löcher

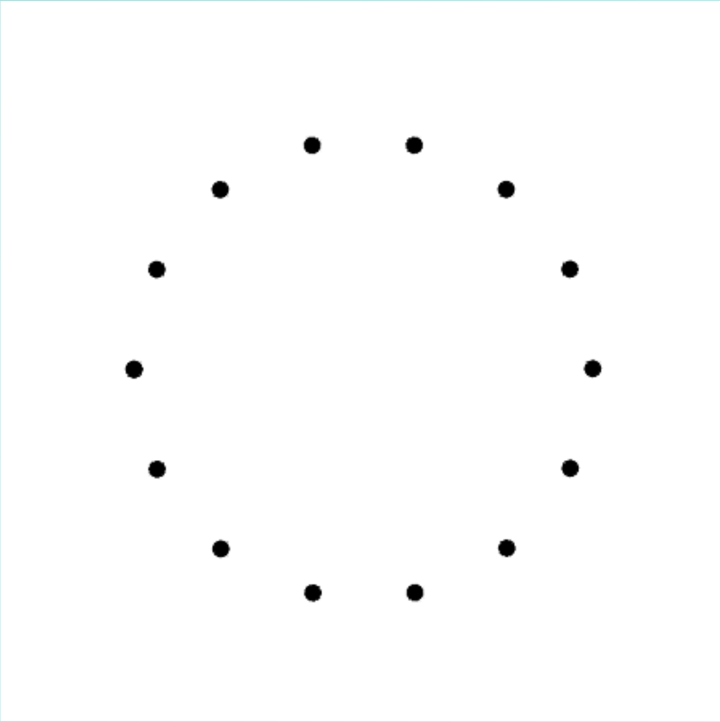
- Einstein's Gleichungen haben wellenartige Lösungen

Gravitationswellen

$$h_{ij} = h_{ij}(r - t)$$

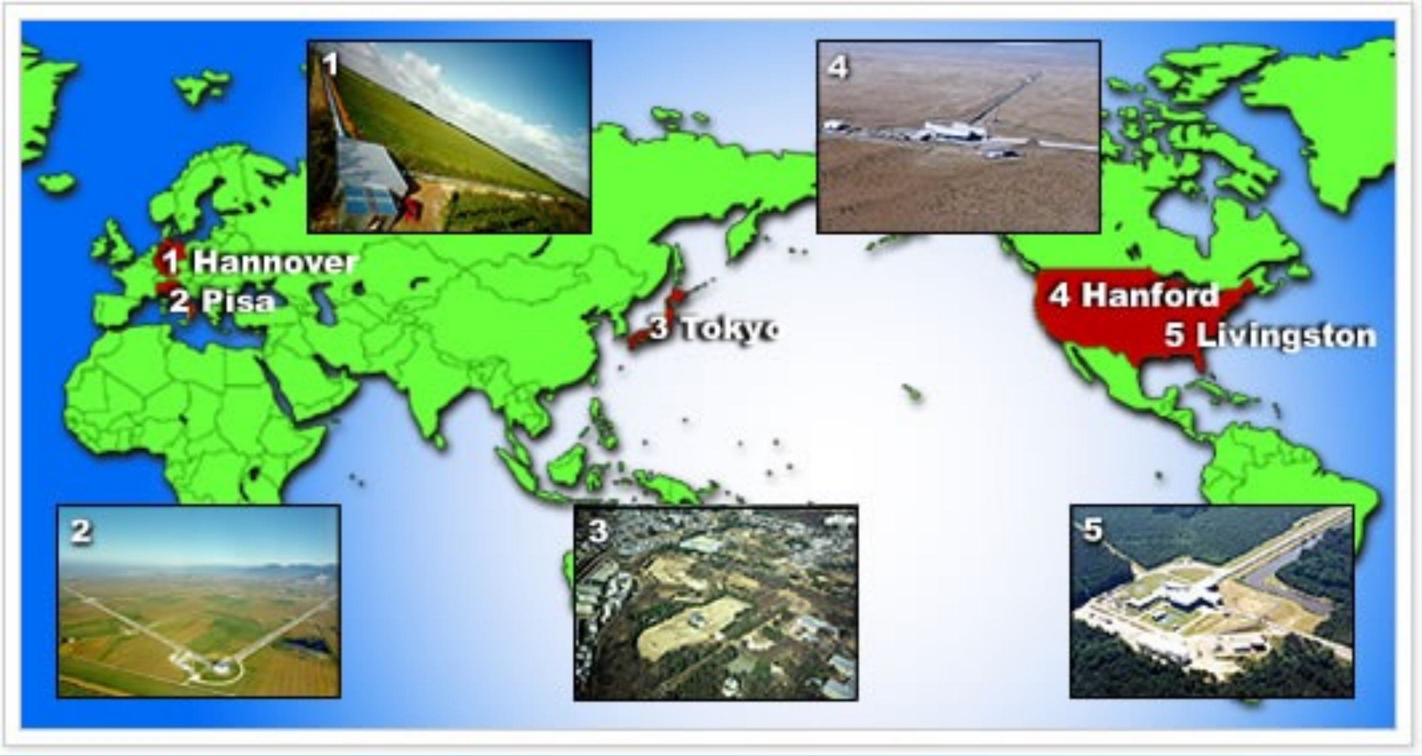
- Effekt auf Testteilchen





Gravitational wave physics

- Beschleunigte Objekte erzeugen GWs
- Wechselwirkung mit Materie sehr schwach!
- GW Observatorien: GEO600, LIGO, TAMA, VIRGO

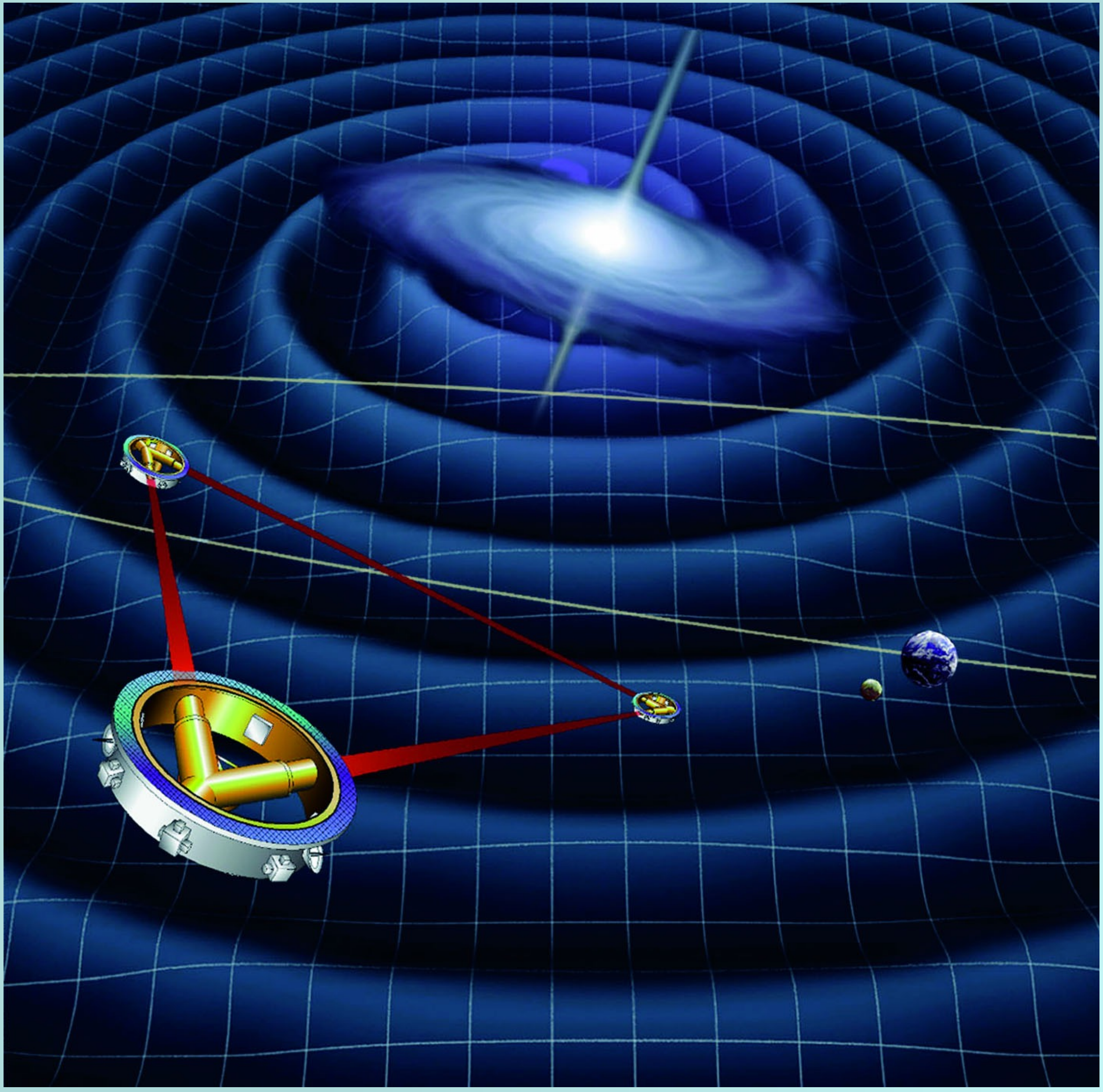


Space interferometer LISA

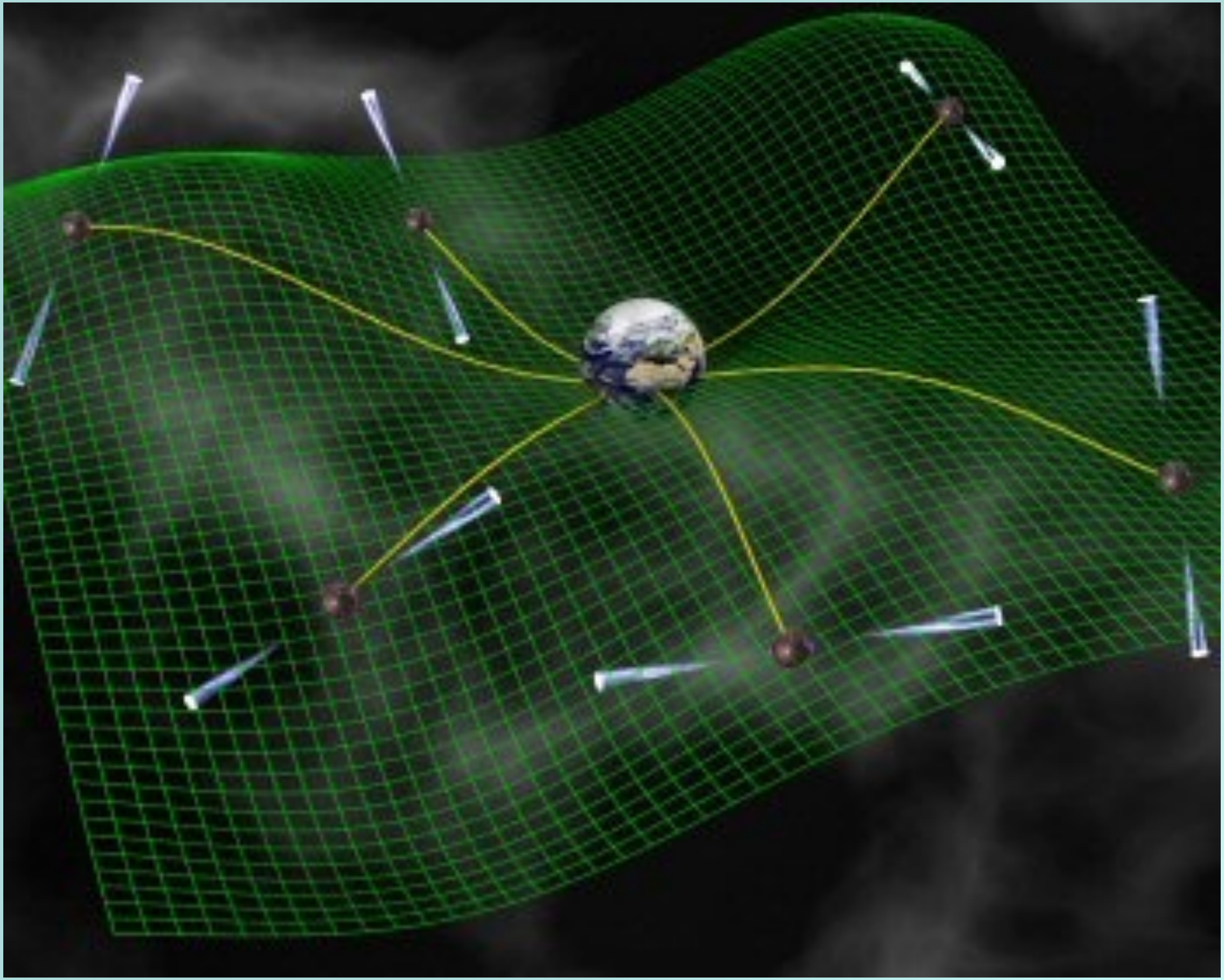
- Funktionsprinzip: Michelsen Morley Interferometer

  nur: vieeeeeel genauer: Bruchteil eines Atomkerns auf km

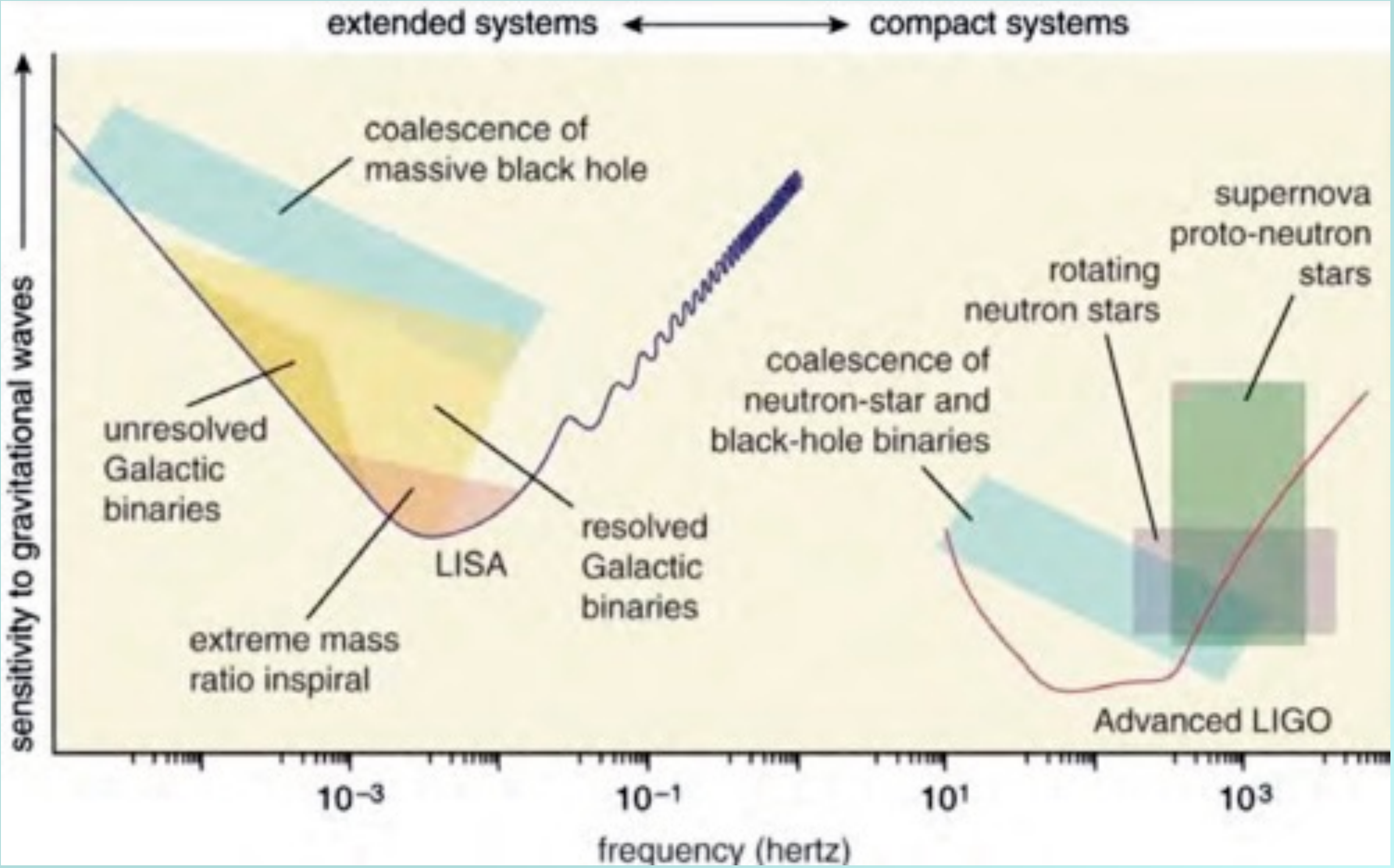
Space interferometer LISA



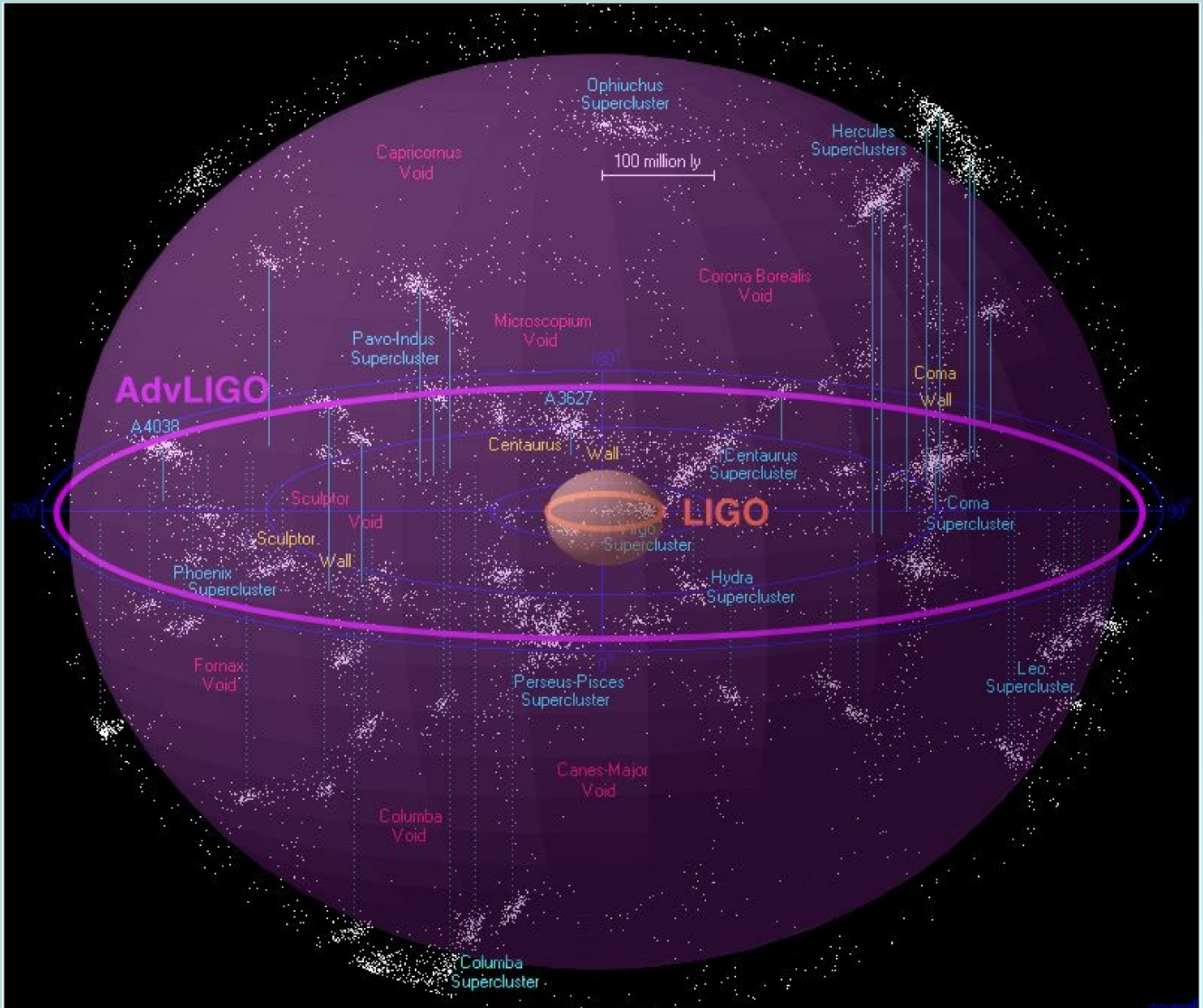
Pulsar timing arrays



Erwartete Quellen



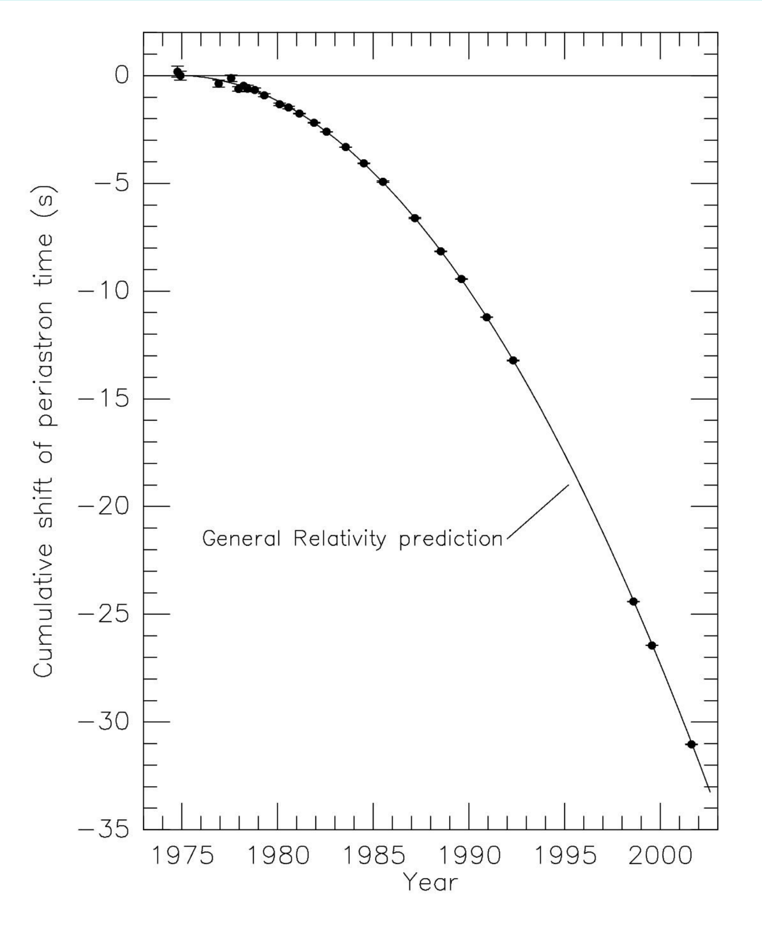
Erwartete Quellen



Einige Ziele der Gravitationswellenphysik

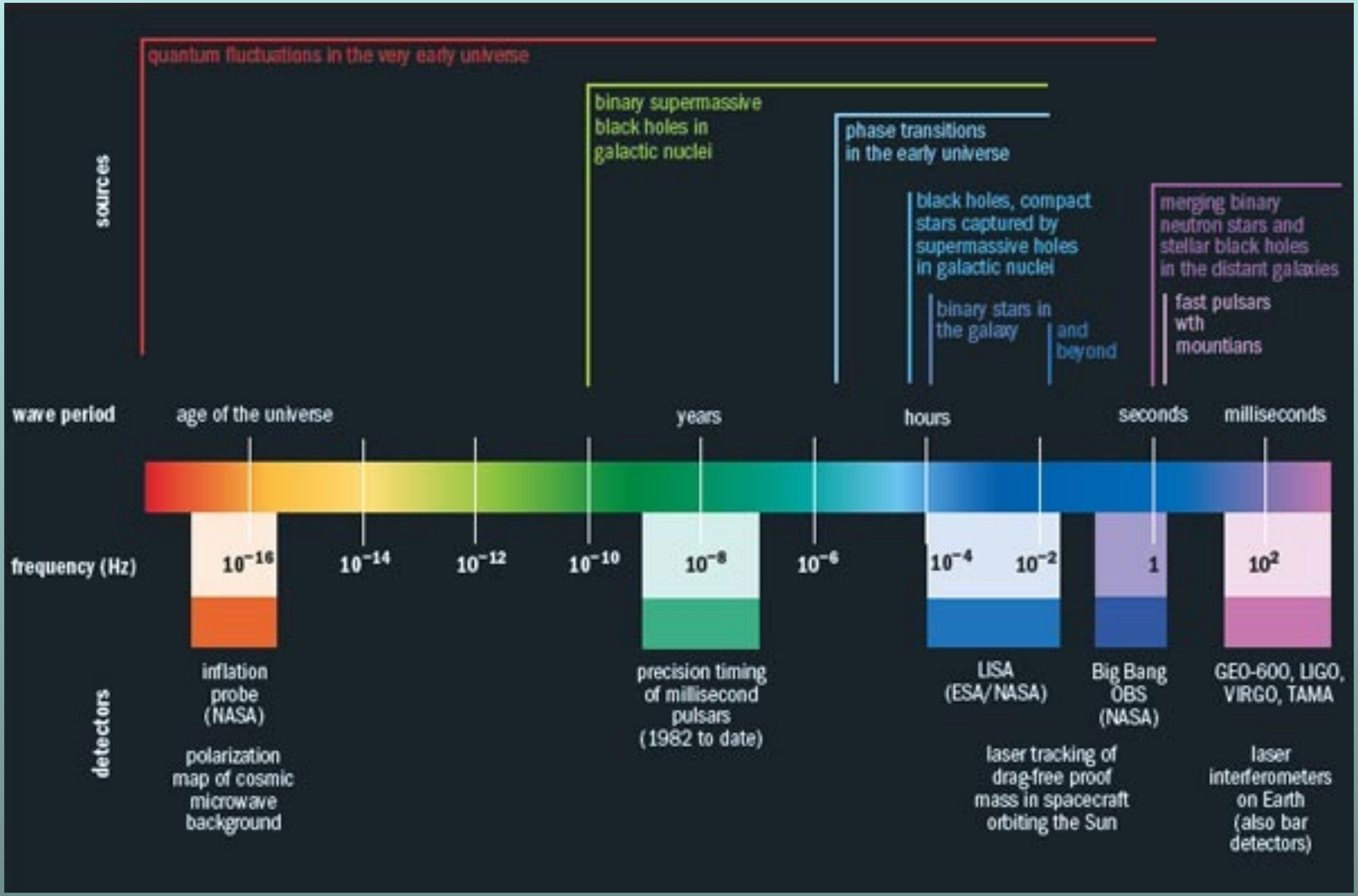
- Bestätigung der ART

  Hulse & Taylor 1993 Nobel Prize

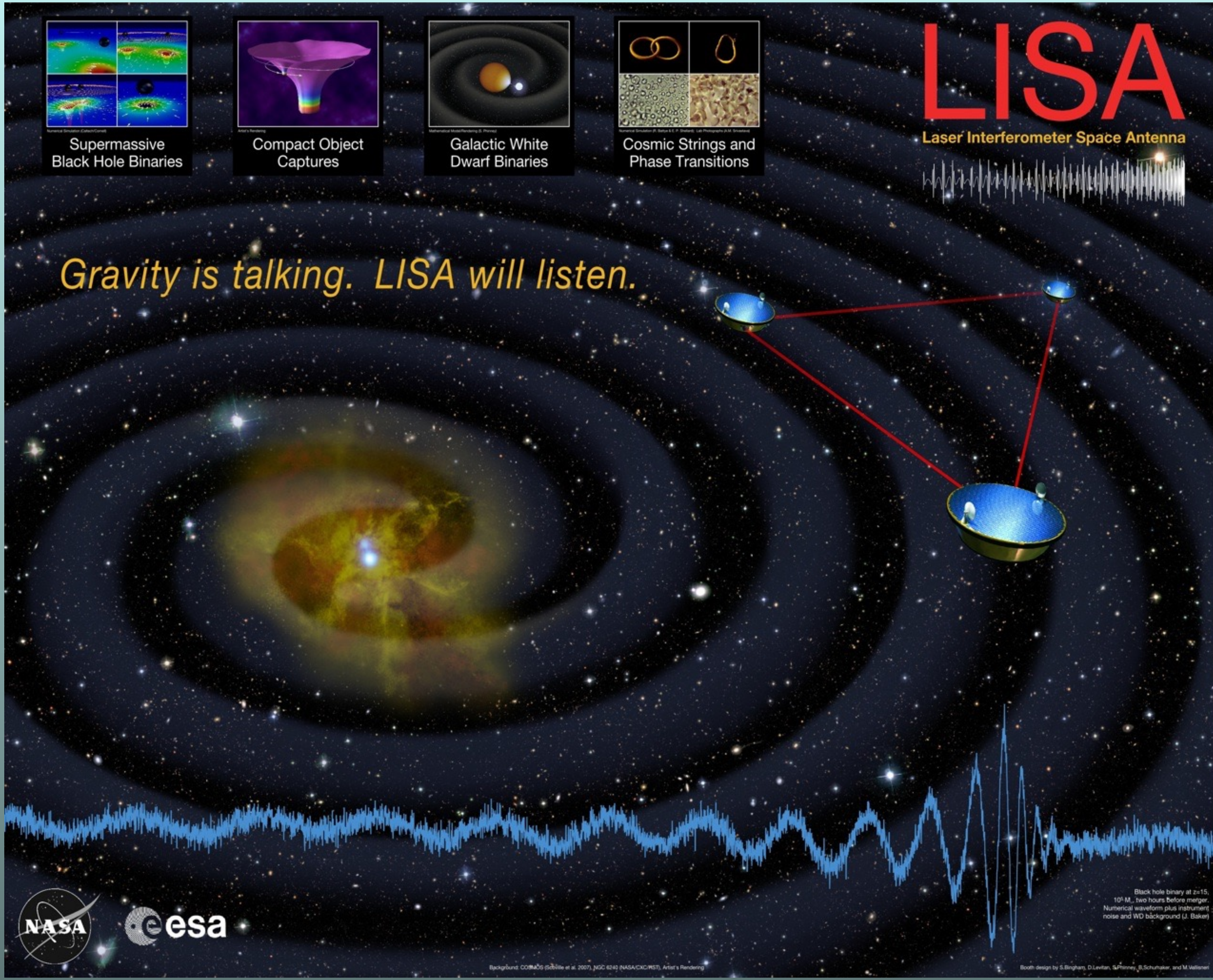


- Parameter Bestimmung schwarzer Löcher $M, \vec{S}$
- Optische Gegenstücke
  - Standard Sirenen (Kerzen)
  - Masse des Gravitons
- Tests der Kerr Natur
- Kosmologische Quellen
- Neutronsterne: Zustandsgleichung der Materie

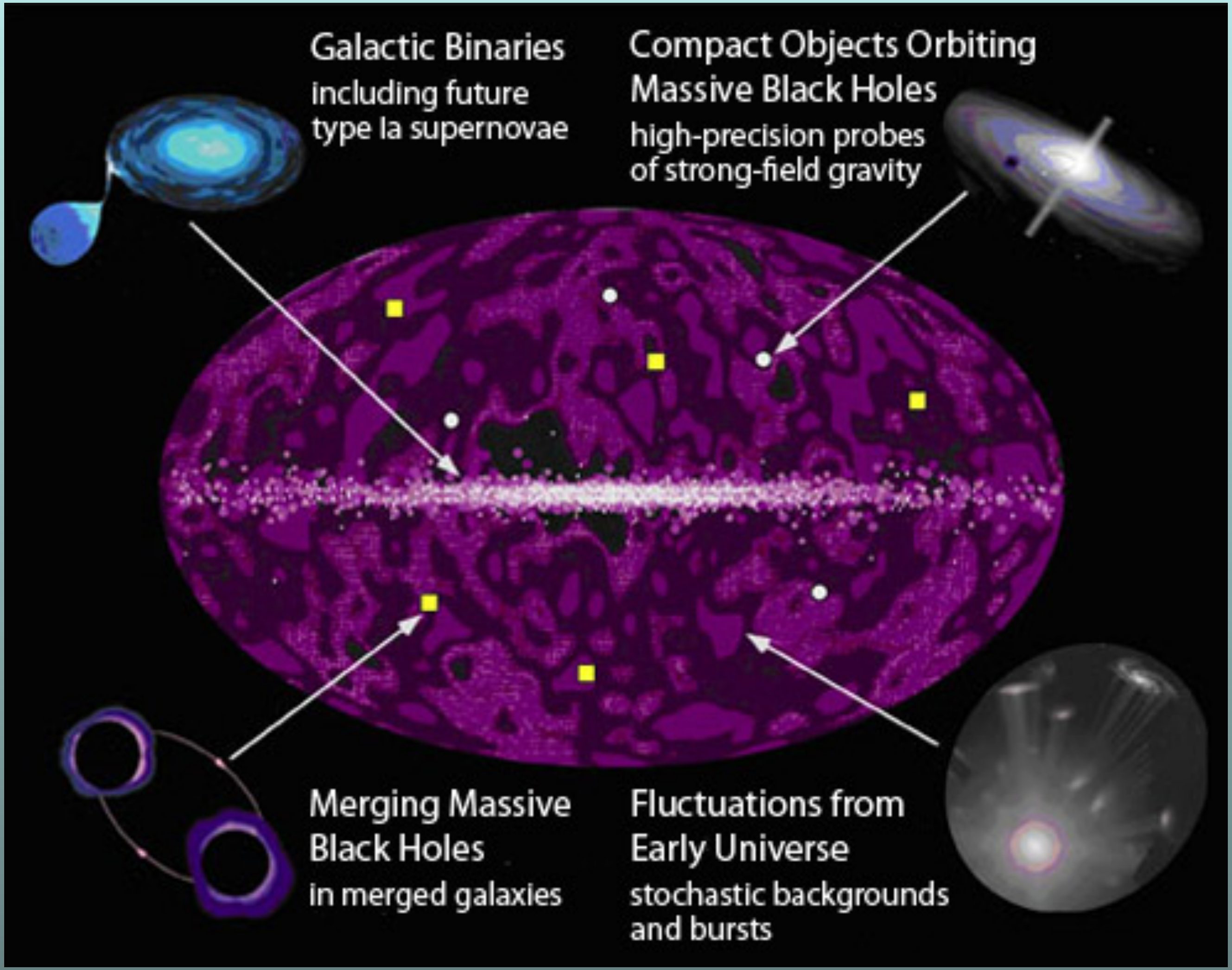
Einige Ziele der Gravitationswellenphysik



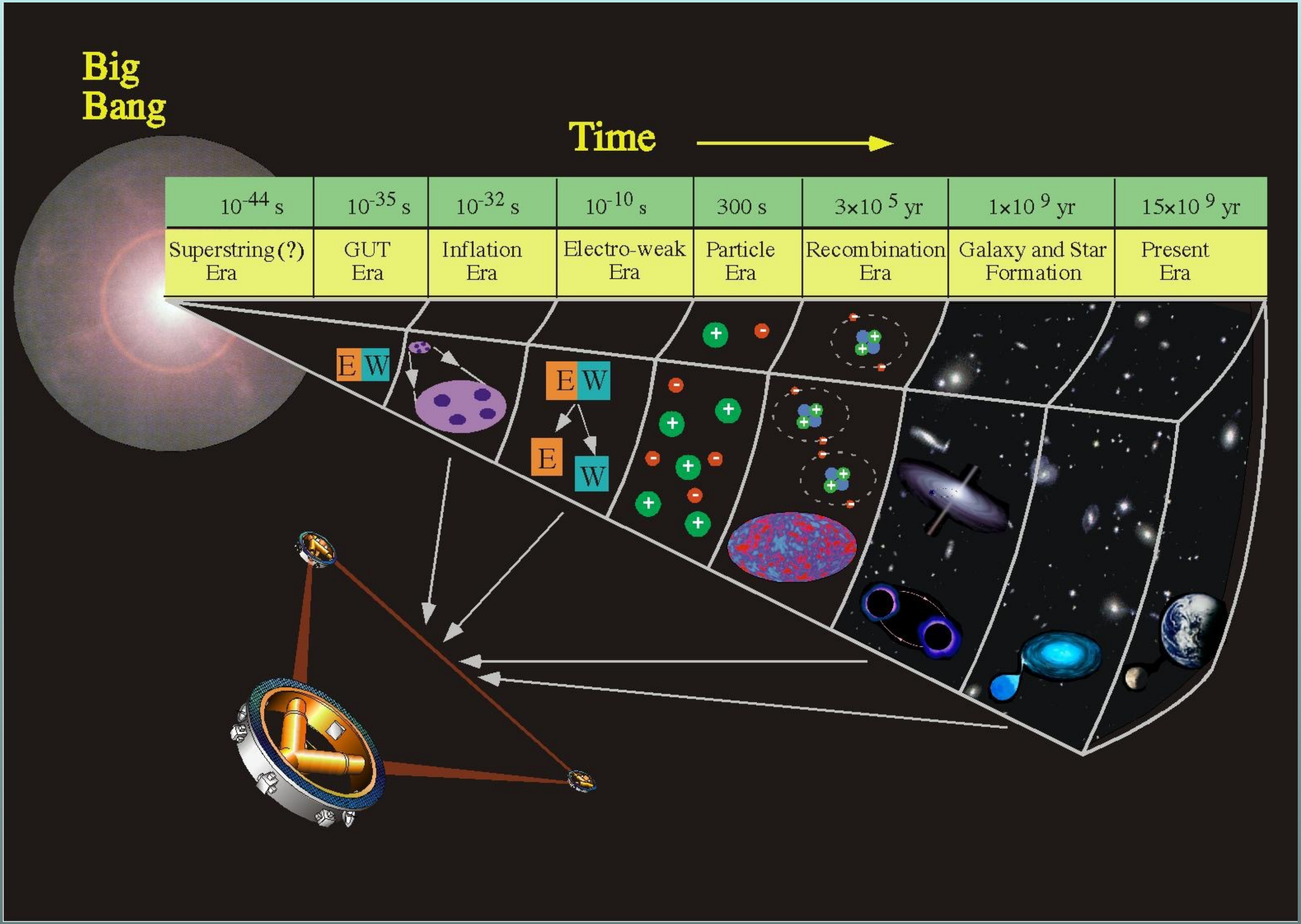
Gravitationswellenphysik mit LISA



Gravitationswellenphysik mit LISA

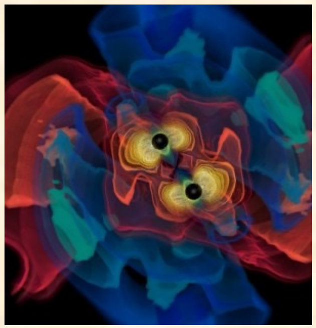


Gravitationswellenphysik mit LISA



Überblick

Physikalisches System



beobachtet

Detektoren

testet

Hilft Detektion

beschreibt

Liefert Info

Model

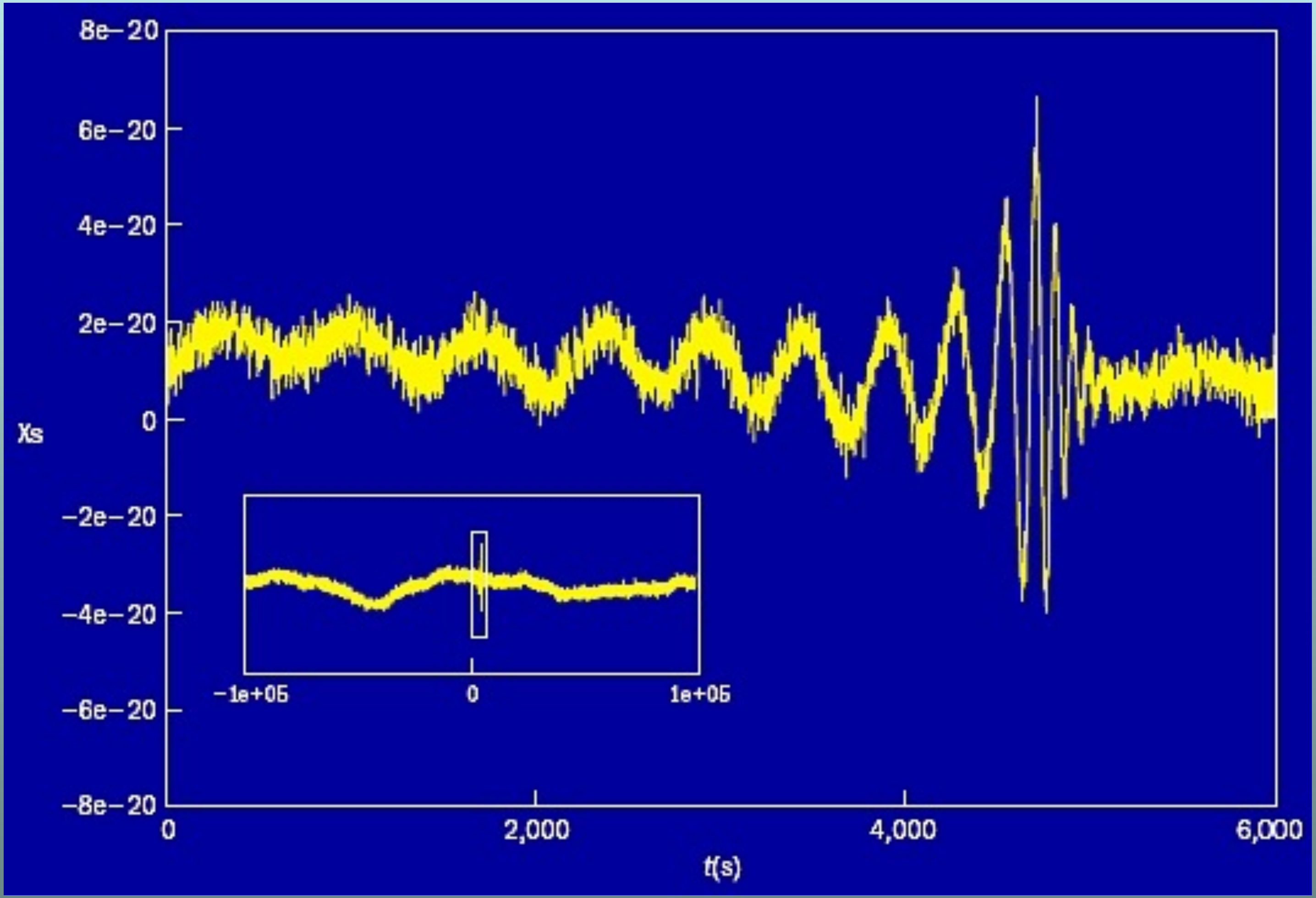
- GR (NR)
- PN
- Perturbative Theorie
- Alternative Theorien?

Externe Physik

- Astrophysik
- Fundamentale Physik
- Kosmologie

Genaue Vorhersagen der GW Signale notwendig!!!

Matched filtering



5. Modellierung von GW Quellen

Theoretischer Rahmen der Quellenmodellierung

- Beschreibung der Raumzeit

Metrik $g_{\alpha\beta}$

- Feldgleichungen: $G_{\alpha\beta}\left(g_{\alpha\beta}, \partial g_{\alpha\beta}, \partial^2 g_{\alpha\beta}\right) = 8\pi\, T_{\alpha\beta}$

MTW: "Spacetime tells matter how to move,
matter tells spacetime how to curve"

In vacuum: $G_{\alpha\beta} = R_{\alpha\beta} = 0$

10 PDGLn 2^{ter} Ordnung für die Metrik

- Gleichungssystem extrem komplex: Stapel von Papier!

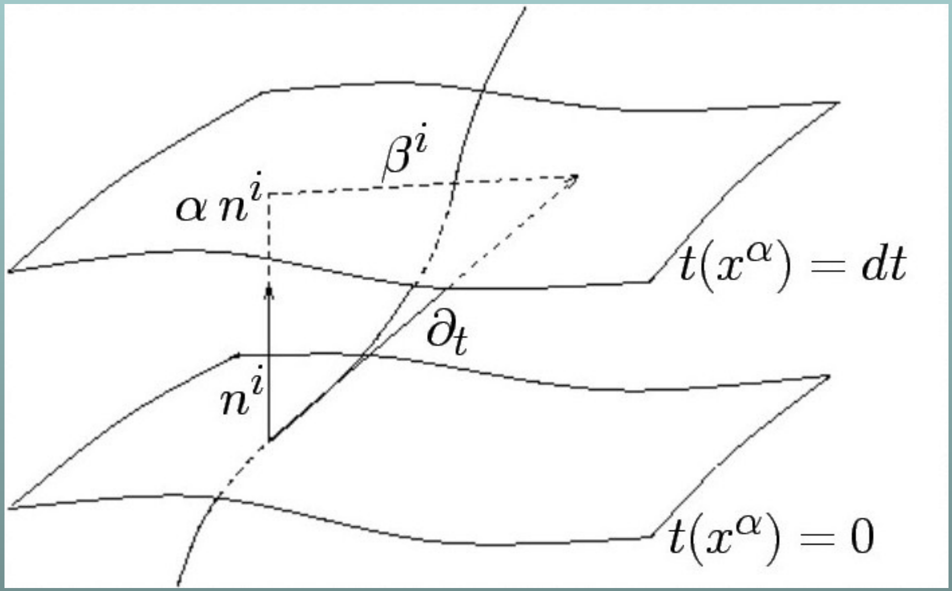
Numerische Methoden notwendig für allgemeine Szenarien!

3+1 Dekomposition

- ART: “Raum und Zeit existieren als Einheit: Raumzeit”
- NRT: ADM 3+1 Spaltung

Arnowitt, Deser, Misner (1962)
York (1979)
Choquet-Bruhat, York (1980)

3-Metrik γ_{ij}
Lapse α
Shift β^i



- lapse, shift $\Longrightarrow$ Eichung
- Einsteingleichungen
  $\Longrightarrow$ 6 Entwicklungsgleich.
  4 Zwangsgleichungen
- Zwangsbedingungen bleiben unter Entwicklung erhalten!

ADM Gleichungen

- Entwicklungsgleichungen

$$(\partial_t - L_\beta)\gamma_{ij} = -2\alpha K_{ij}$$

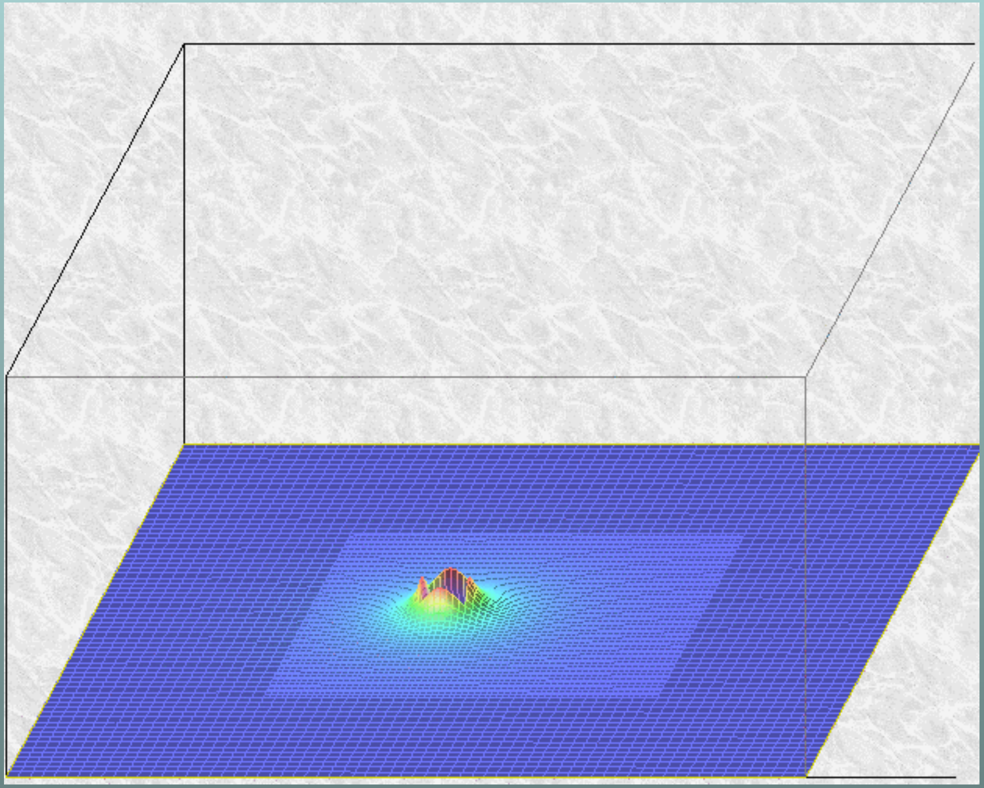
$$(\partial_t - L_\beta)K_{ij} = -D_i D_j \alpha + \alpha[R_{ij} - 2K_{im}K^m{}_j + K_{ij}K]$$

- Zwangsgleichungen

$$R + K^2 - K_{ij}K^{ij} = 0$$

$$-D_j K^{ij} + D^i K = 0$$

- Entwicklung
  - Löse Zwangsgleich.
  - Entwickle Daten
  - Konstruiere Raumzeit
  - Extrahiere Physik



Paper 1

ART spezifische Probleme

- Anfangsdaten müssen Zwangsbedingungen erfüllen

  $\Longrightarrow$ Numerische Lösung elliptischer DGLn

  Hier: Puncture Daten   Brandt & Brügmann ‘97

- Formulierung der Einstein-Gleichungen

- Koordinaten werden erst konstruiert $\Longrightarrow$ Eichbedingungen

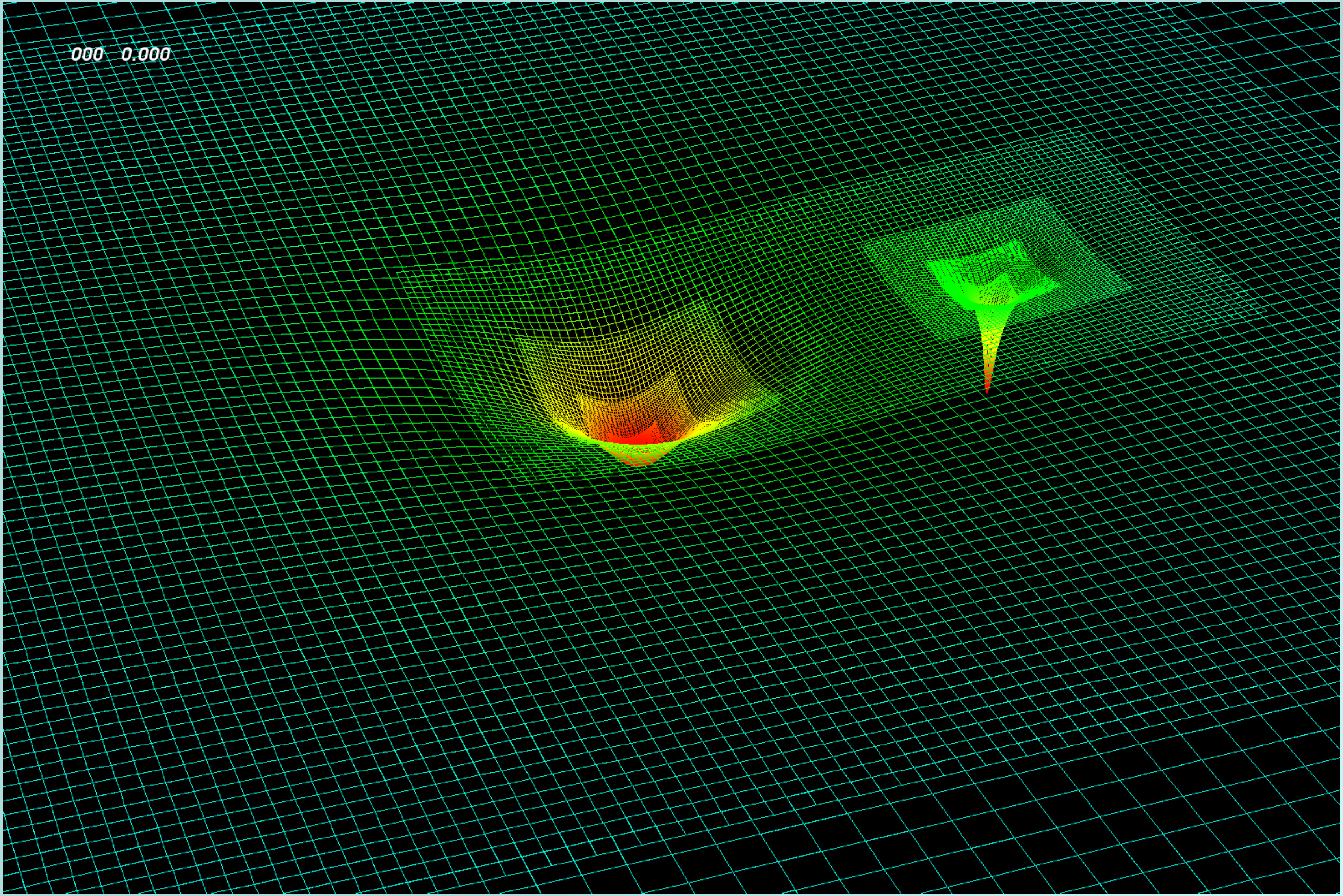
- Unterschiedlich Längenskalen $\Longrightarrow$ Mesh-refinement

- Gleichungen extrem lang $\Longrightarrow$ Turnover time
  Parallelisiserung, Großrechner

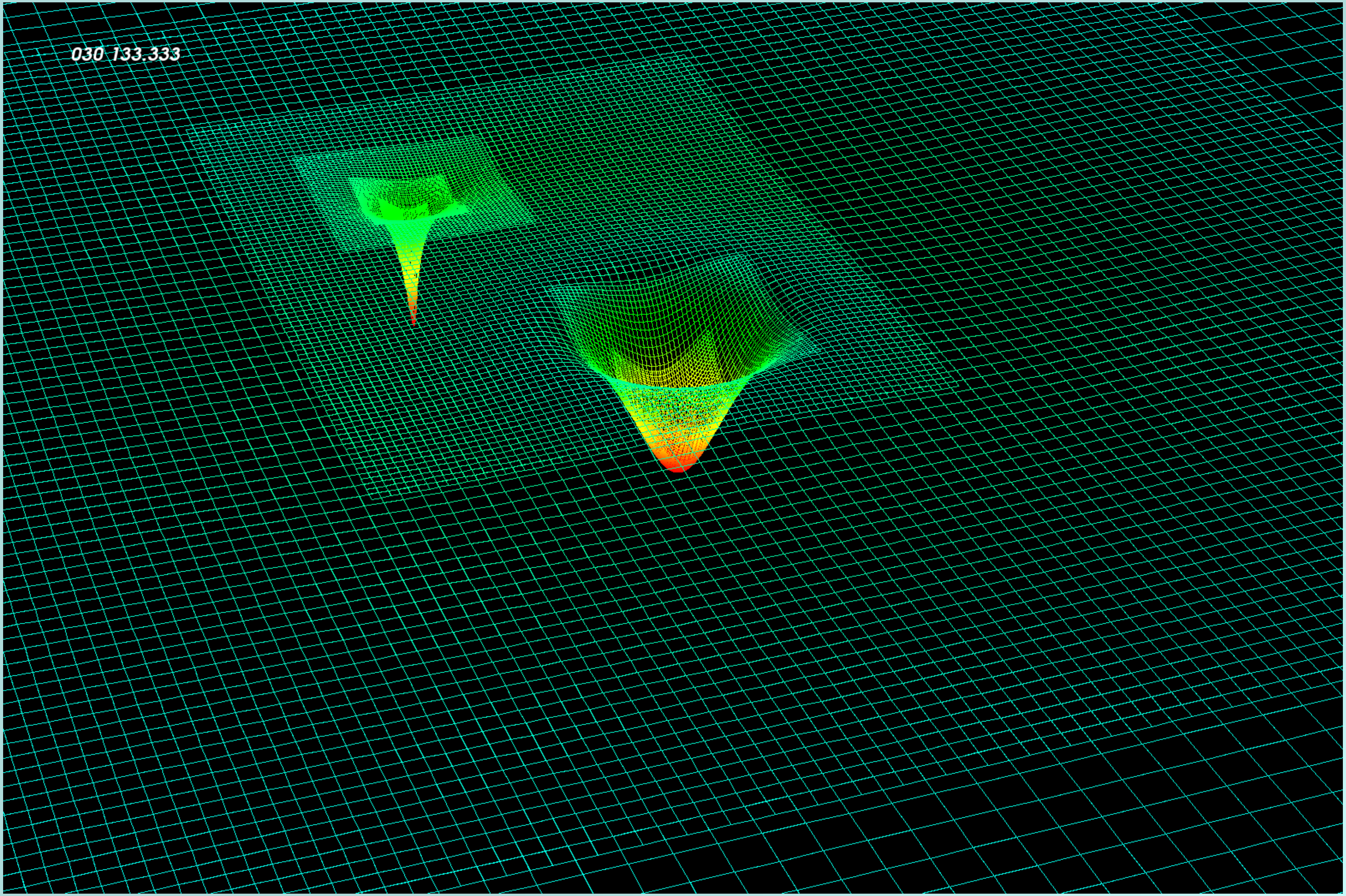
- Bedeutung der Ergebnisse? Was ist “Energie”, “Masse”?

Gourgoulhon   gr-qc/0703035

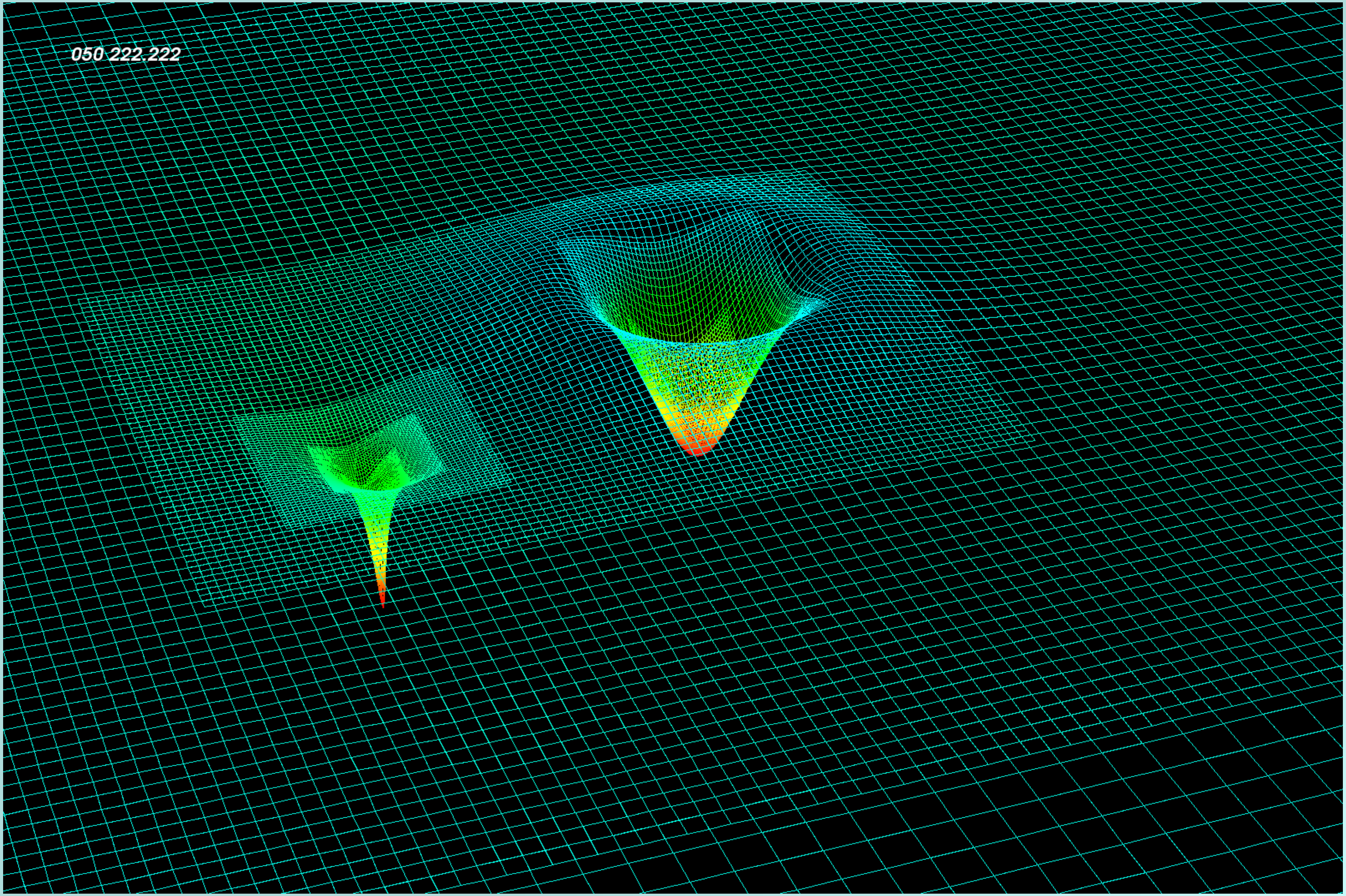
Lange Zeit keine stabilen Lösungen



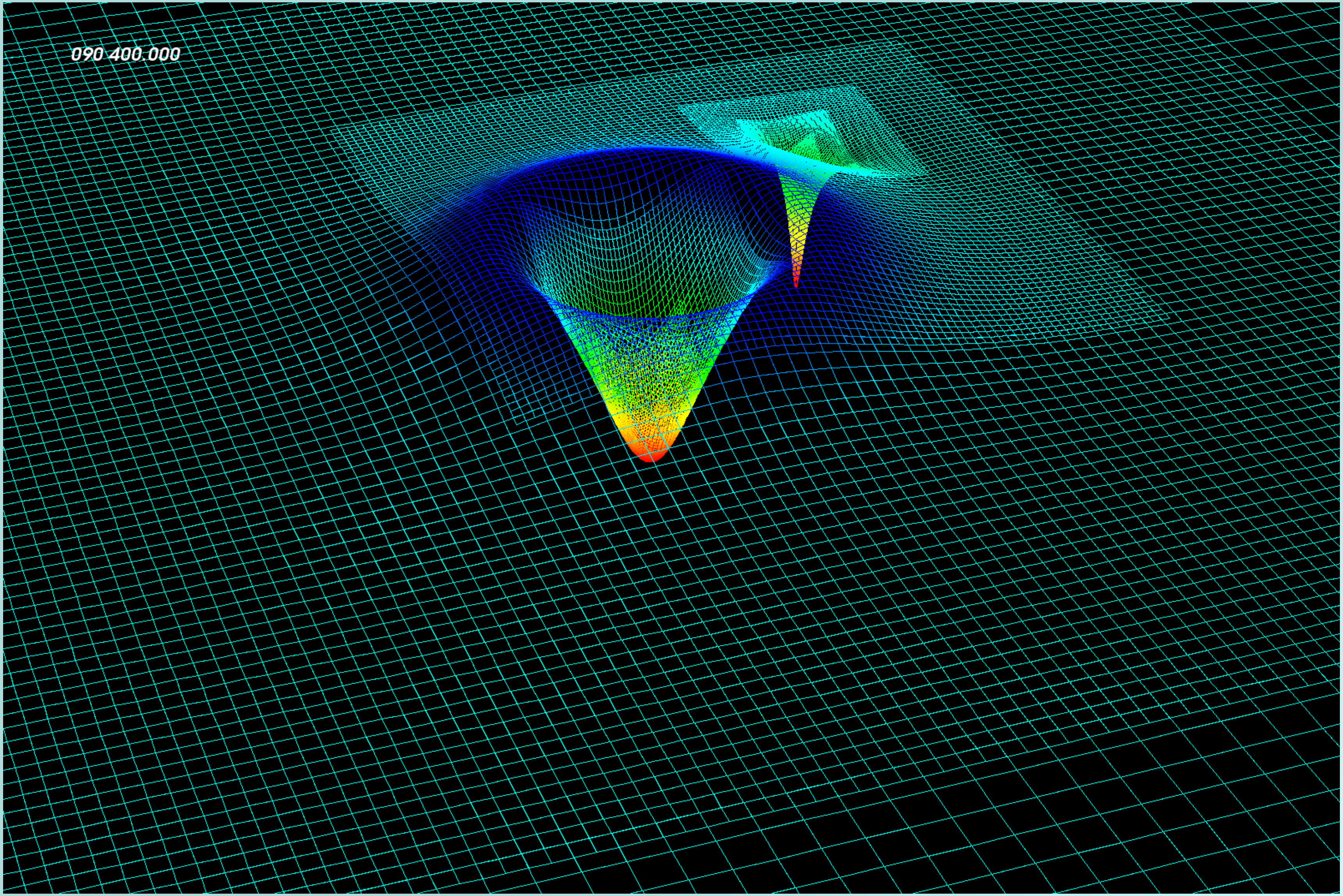
Lange Zeit keine stabilen Lösungen



Lange Zeit keine stabilen Lösungen

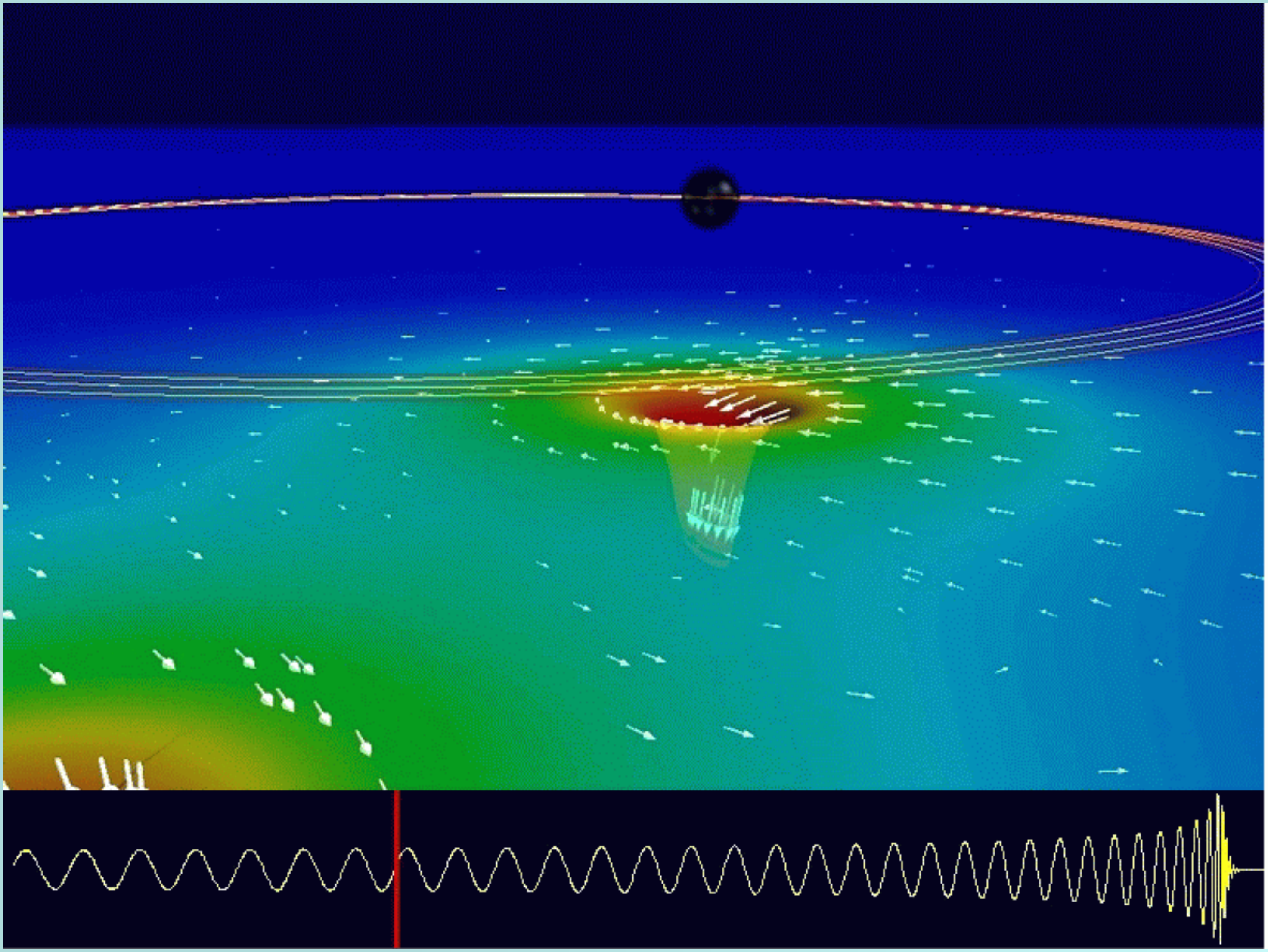


Lange Zeit keine stabilen Lösungen



Animationen

- Caltech Cornell

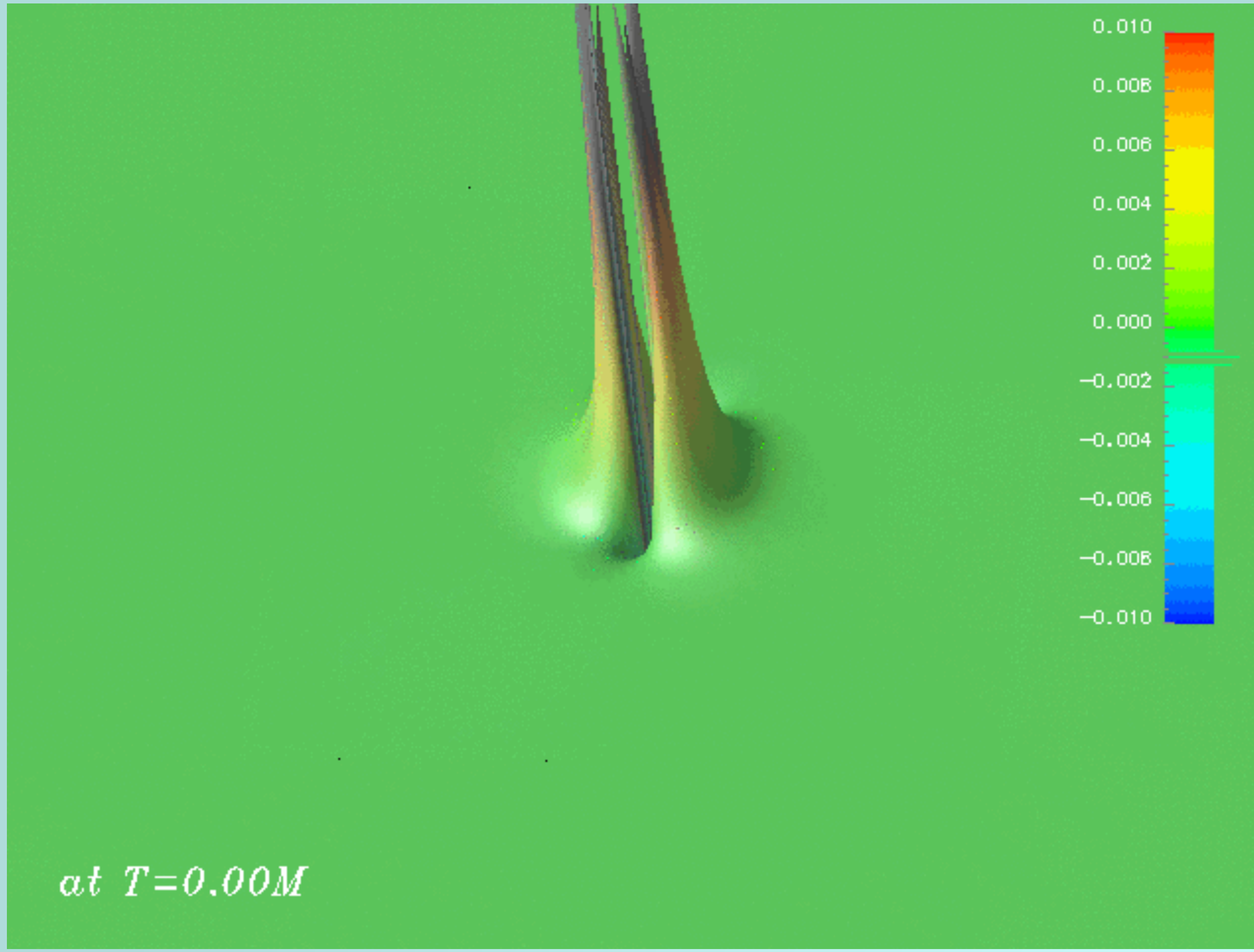


Animations

- $\mathrm{Re}[\Psi_4]$
- Angular dependence

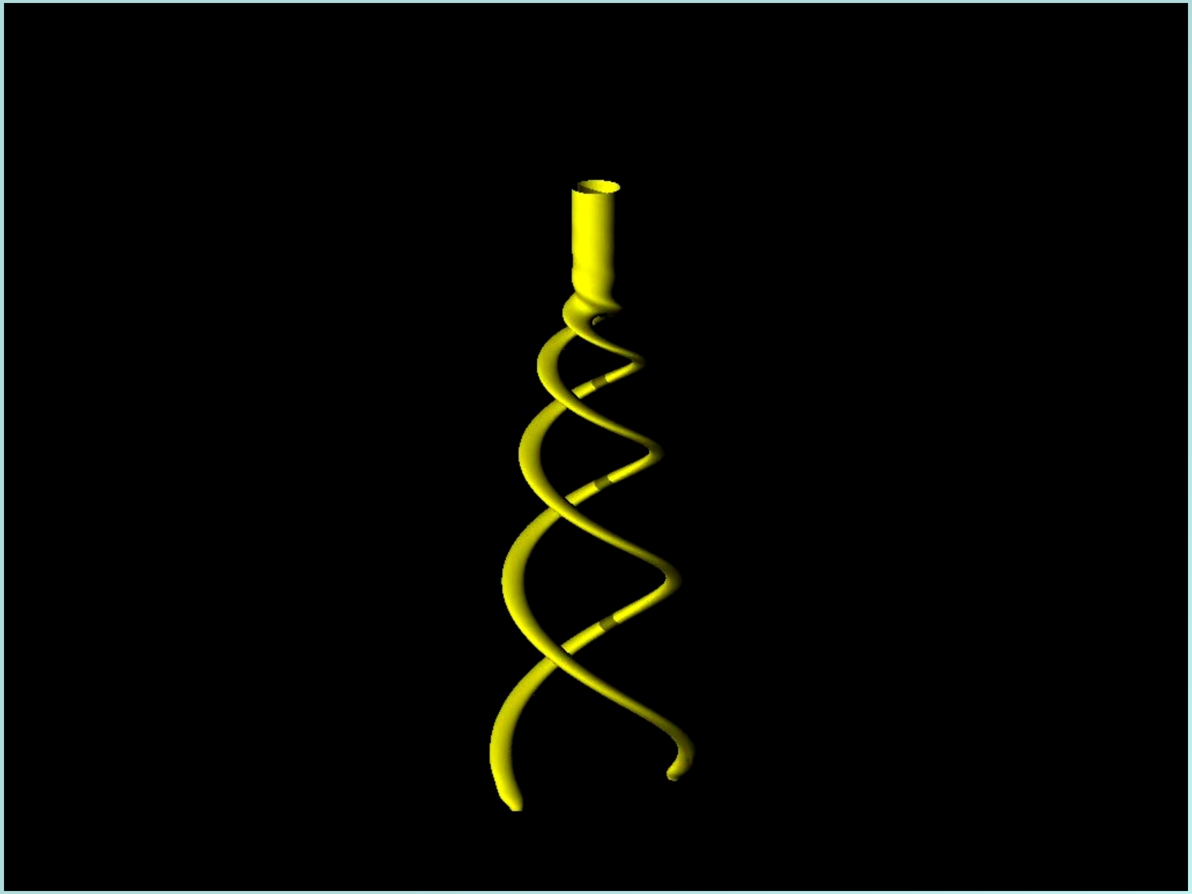
$\Rightarrow$ Spherical harmonics

$\ell = 2, m = 2$ dominant



Animations

- Event horizon of binary inspiral and merger Jena



Thanks to Marcus Thierfelder

Gravitativer Rückstoß "Kick"

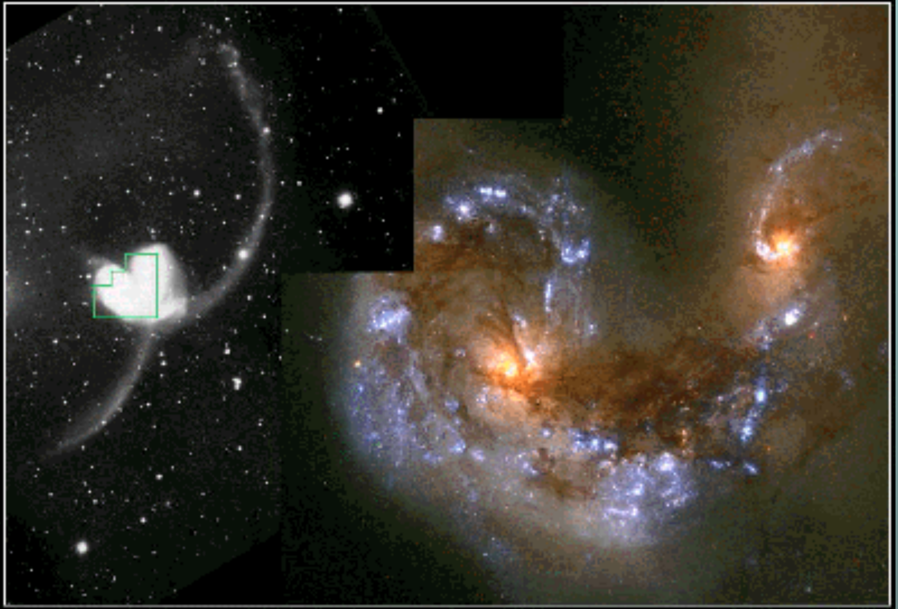
- Anisotrope GW Emission strahlt Impuls ab
  $\Rightarrow$ Rückstoss des Restsystems

  Bonnor & Rotenburg '61, Peres '62, Bekenstein '73

- SL Verschmelzung infolge Galaxienkollision $\Rightarrow$ Rückstoß
- Fluchtgeschwindigkeiten

  $$v_{\rm esc} = 20 \ \ldots \ 1000\,\mathrm{km/s}$$

- Auswirkungen des Kicks
  - Wachstum massiver SL
  - Galaxienstruktur
  - SL Populationen
- Wie groß ist der Rückstoß?



Colliding Galaxies NGC 4038 and NGC 4039 HST • WFPC2
PRC97-34a • ST ScI OPO • October 21, 1997 • B. Whitmore (ST ScI) and NASA

Wie groß sind kicks?

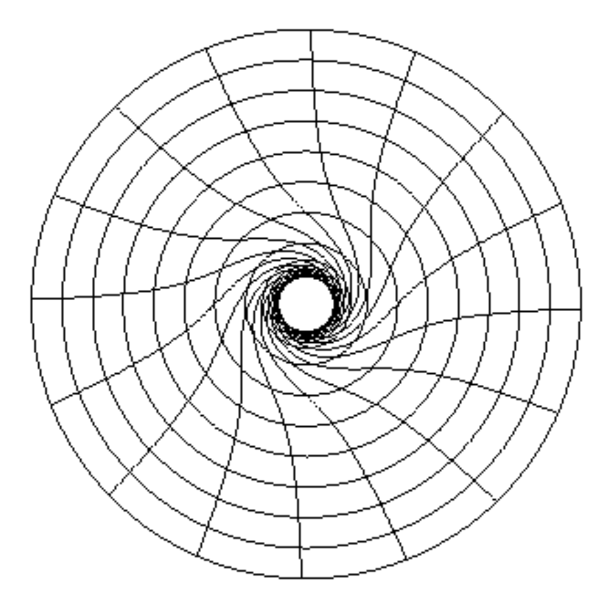
- Je nach Eigenschaften der SL: $v_{\text{kick}} = 0 \ldots 4000\,\text{km/s}$
- Genug um SL aus Galaxien zu “kicken”
- Beobachtungen zeigen evtl. Diesen Effekt

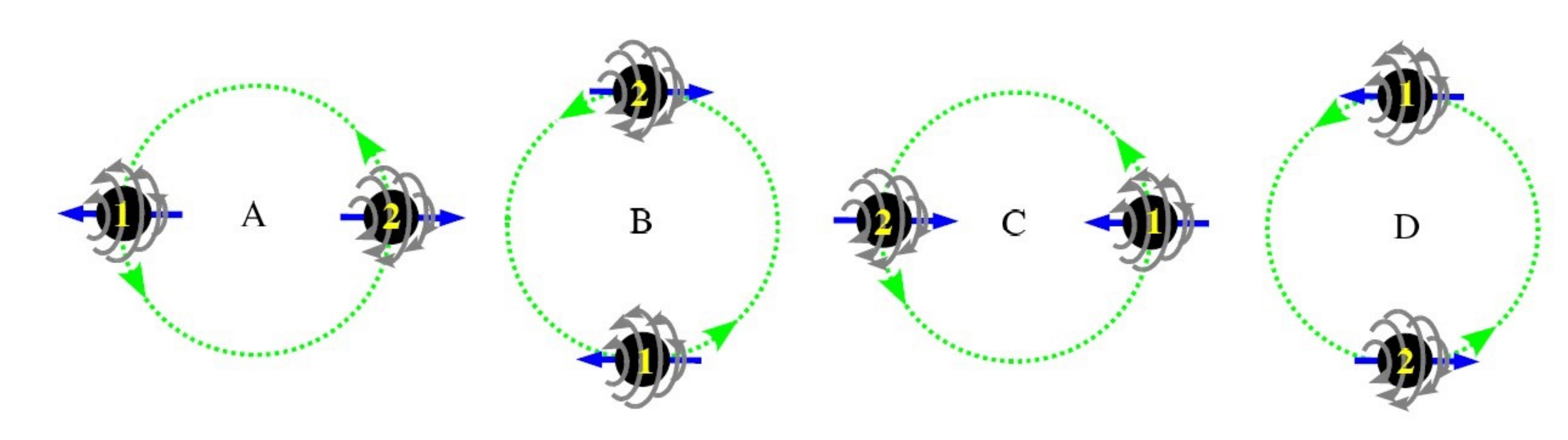
Komossa et al. 2008

Wie entstehen Kicks?

- Relativitätstheorie
  ⟹ "Frame dragging"

- Rotierende SL ziehen Objekte entlang ihrer Rotation

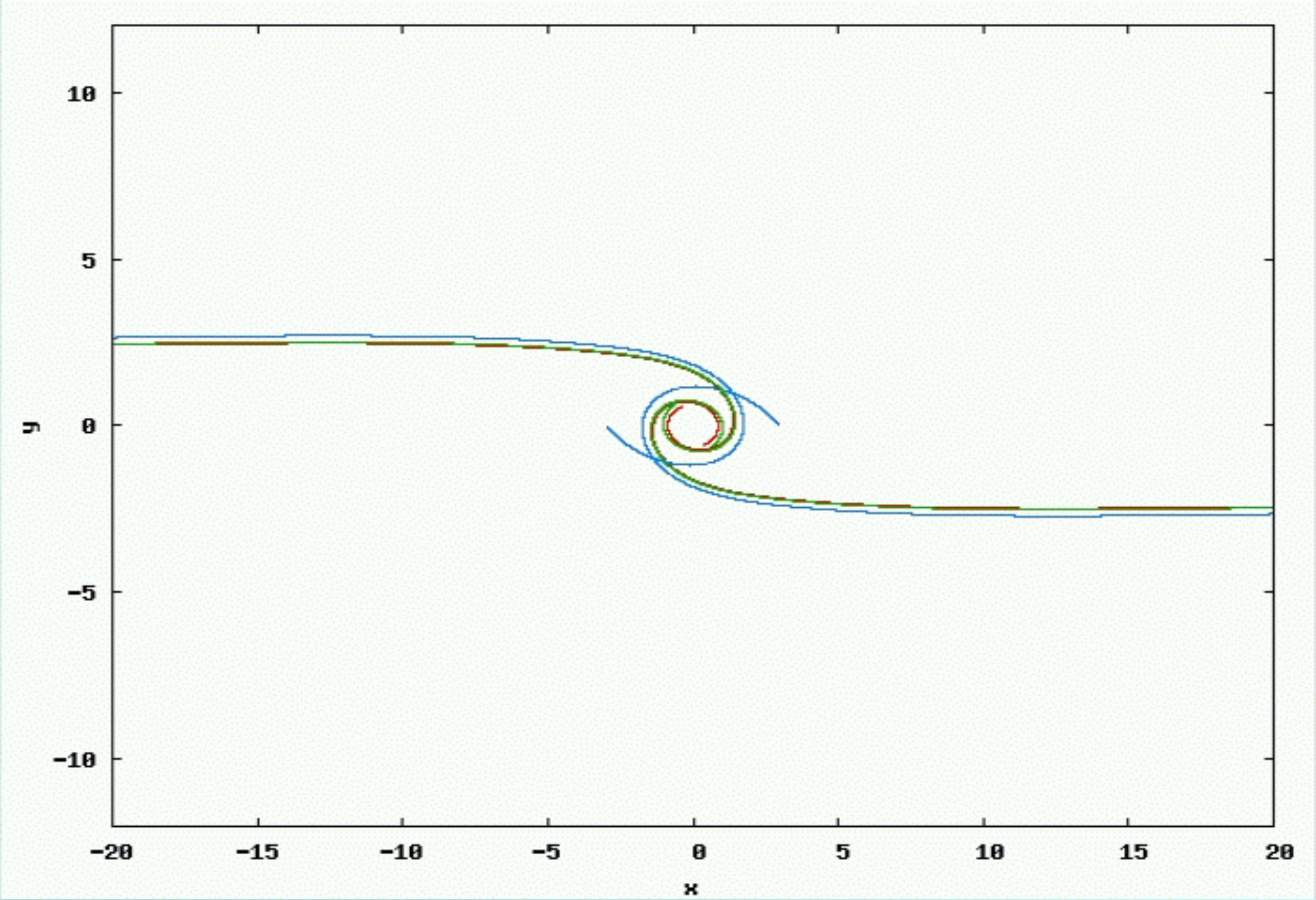




Thanks to F. Pretorius

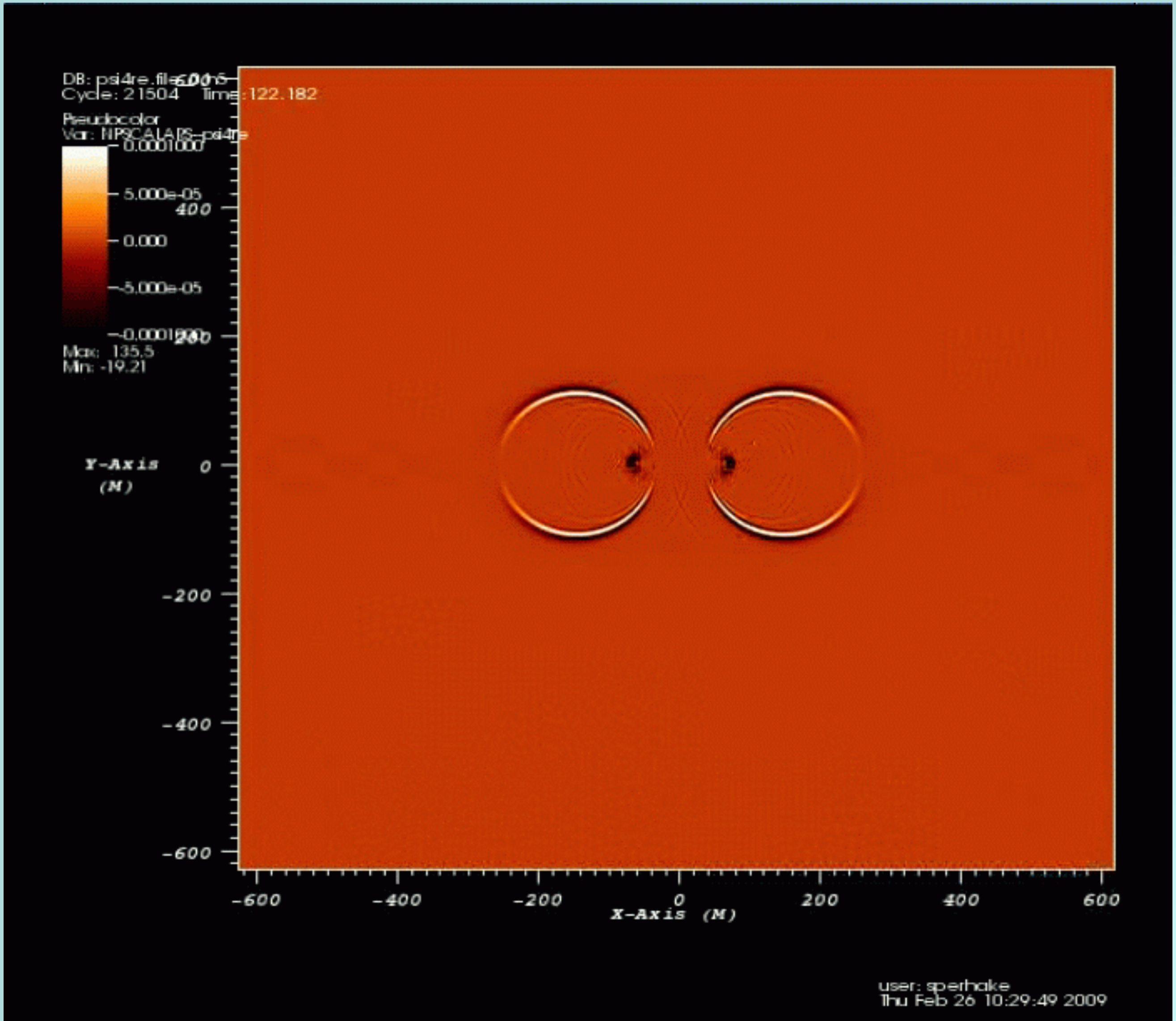
Hochenergiekollisionen schwarzer Löcher

- Kollision schwarzer Löcher generieren enorme Strahlung
- Ziel: Bestimmung möglicher Massen und Spins der SL



Hochenergiekollisionen schwarzer Löcher

- Gravitationswellenemission



6. Zusammenfassung

Hochenergiekollisionen schwarzer Löcher

- Schwarze Löcher lange rein mathematische Objekte
- Schwarze Löcher als reale astrophys. Objekte anerkannt
- Stärkste Quelle von Gravitationswellen
- GW Observation $\Rightarrow$ neues Fenster zum Universum
- Stärkste Quelle von Gravitationswellen
- Erzeugung in Teilchenkollisionen ?
- Werden SL aus Galaxien “gekickt” ?
- Viele offene Fragen…