Gamma felvillanás típusai:

- Rövid felvillanás (t>2 s):
  - –Fekete lyuk vagy neutron csillag kettősök
- Hosszú felvillanás (t<2 s):
  - –Hipernóva robbanás
  - –Szupernóva magösszeomlás

Gravitációs összeomlás fajtái:

- Csillag magok:
  - Átlagos szupernóva → neutron csillag
  - Nagytömegű csillag → fekete lyuk
  - III. populációs csillagok → nagytömegú fekete lyuk
  - Szupermasszív csillag → fekete lyuk

- Összeolvadó neutron csillag kettősök

Szimuláció alapjai:

- Általános relativitás (extra erős gravitáció)
- Csillag model, csillag fejlődés
- Állapotegyenletek és nukleoszintézis: részecske és magfizika
- Folyadék áramlása: hidrodinamika
- Neutrinók hatása: Boltzmann transzport
- Mágneses tér: MHD

Newtoni hidrodinamika:

- Megmaradó hidrodinamika mennyiségek: $D=\rho$, $S_i=\rho v_i$, $\tau=\rho h-P-D$, ahol $h=\varepsilon+P/\rho+v_i v^i/2$
- Ideális folyadék mozgásának leírásából hiperbolikus megmaradási egyenletek adódnak:

$$\frac{1}{\sqrt{\hat{\gamma}}}\left(\frac{\partial\sqrt{\hat{\gamma}}D}{\partial t}+\frac{\partial\sqrt{\hat{\gamma}}\,Dv^i}{\partial x^i}\right)=0,$$

Kontinuitási egyenlet

$$\frac{1}{\sqrt{\hat{\gamma}}}\left(\frac{\partial\sqrt{\hat{\gamma}}S_j}{\partial t}+\frac{\partial\sqrt{\hat{\gamma}}\,(S_j v^i+P\delta_j^i)}{\partial x^i}\right)=\rho\,\frac{\partial\Phi}{\partial x^j},$$

Euler momentumok

$$\frac{1}{\sqrt{\hat{\gamma}}}\left(\frac{\partial\sqrt{\hat{\gamma}}\tau}{\partial t}+\frac{\partial\sqrt{\hat{\gamma}}[(\tau+P)v^i]}{\partial x^i}\right)=\rho v^i\,\frac{\partial\Phi}{\partial x^i},$$

Energia egyenlet

- Általánosan hiperbolikus megmaradási egyenletet kapunk:

$$\frac{1}{\sqrt{\hat{\gamma}}}\left[\frac{\partial\sqrt{\hat{\gamma}}C}{\partial t}+\frac{\partial\sqrt{\hat{\gamma}}F^{i}}{\partial x^{i}}\right]=S,$$

ahol C a megmaradó mennyiség, F a fluxus, S a forrás.

- Cauchy probléma:
  - K. é. probléma megoldása a hf-en (C^0, t^0)
  - $C^n \rightarrow C^{n+1}$ a $t^n \rightarrow t^{n+1}$ időpontban

Relativisztikus hidrodinamika

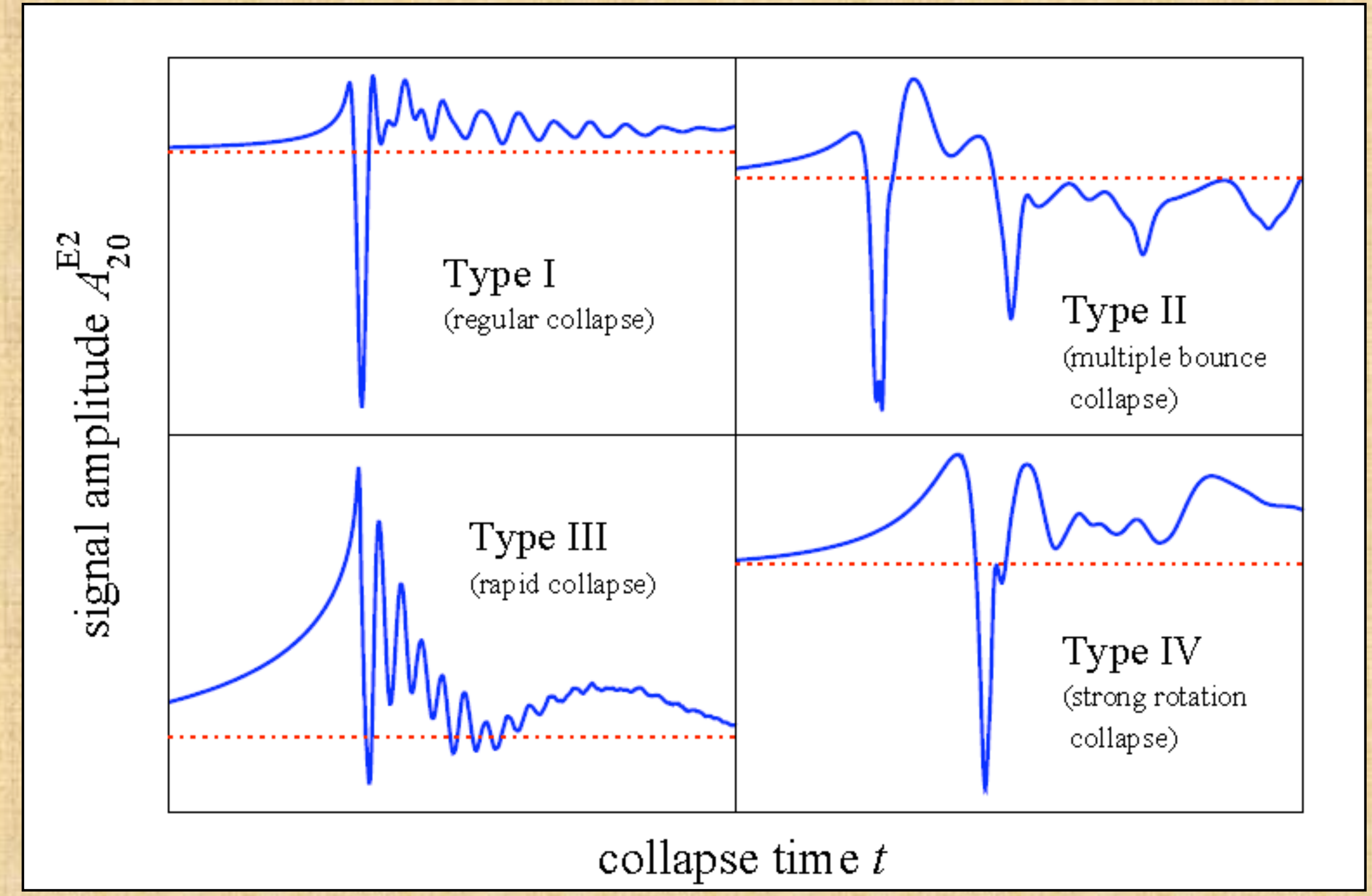
- Einstein egyenletek megoldása: $G^{\mu\nu}=8\pi T^{\mu\nu}$
- Egyenletek egyesítése:

$$
\begin{array}{ccc}
G^{\mu\nu} = 8\pi T^{\mu\nu} & \Longrightarrow & \nabla_\nu T^{\mu\nu} = 0, \\
 & \uparrow & \\
 & \nabla_\nu G^{\mu\nu} = 0. &
\end{array}
$$

•ADM 3+1 koordinára rendszer

•Téridő szétesik tér és idő komponensekre

Eddigi tanulmányok alapján négy típus különböztethető meg



Fekete lyukak összeolvadása

- Einstein egyenletek numerikus megoldása
- Három fázis:
  - Bespirálozás
  - Összeolvadás
  - Lecsengés
- Newman-Penrose skalár, Ψ_4 meghatározása

Newton-Penrose skalár:

$$\Psi_4 = -C_{\alpha\mu\beta\nu}\ell^{\mu}\ell^{\nu}\bar{m}^{\alpha}\bar{m}^{\beta}$$

ahol

$$\begin{aligned} \ell^{\mu} &= \frac{1}{\sqrt{2}}(t^{\mu} - r^{\mu}), \\ m^{\mu} &= \frac{1}{\sqrt{2}r}\left(\frac{\partial}{\partial\theta} + i\frac{1}{\sin\theta}\frac{\partial}{\partial\phi}\right)^{\mu} \end{aligned}$$

Gömbi harmónikusok szerint kifejtve:

$$\Psi_4(t,r,\theta,\phi) = \sum_{lm} \Psi_4^{lm}(t,r)\ {}_{-2}Y_{lm}(\theta,\phi),$$

Az (l,m)=(2,2) módusra ez kifejezve:

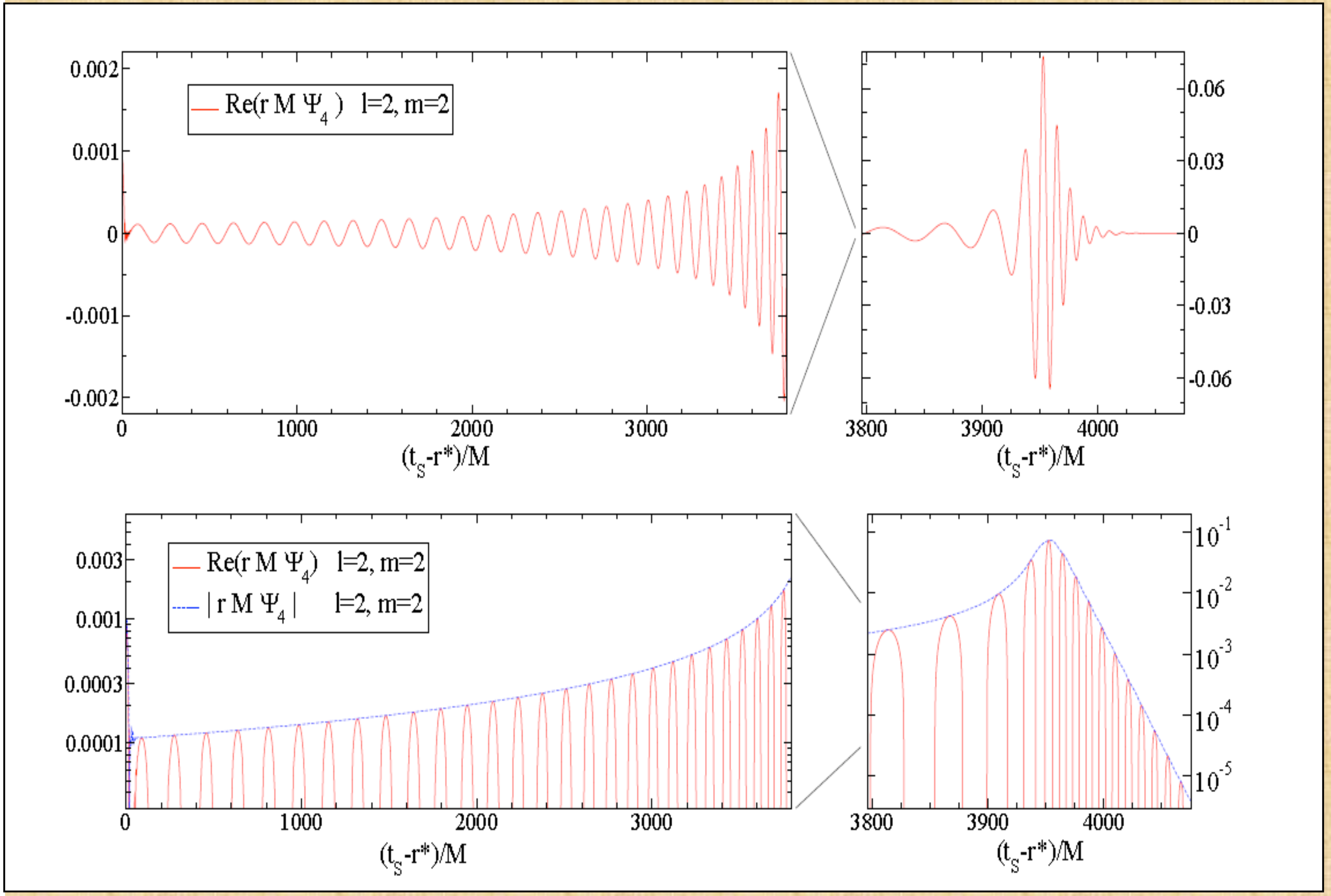
$$\Psi_4^{22}(r,t) = A(r,t)e^{-i\phi(r,t)}$$

Gravitációs hullám frekvenciája:

$$\omega = \frac{d\phi}{dt}$$

Hullámforma extrapolálása:

- Szimulációkban csak véges távolság használható
- A kiszámított hullámformát a végtelenbe kell extrapolálni
- $\Psi_4^{22}(u,r)$, ahol u a retardált idő


Re(r M Ψ4) l=2, m=2
0.002
0.001
0
-0.001
-0.002
0
1000
2000
3000
(tS-r*)/M
0.06
0.03
0
-0.03
-0.06
3800
3900
4000
(tS-r*)/M
Re(r M Ψ4) l=2, m=2
| r M Ψ4 | l=2, m=2
0.003
0.001
0.0003
0.0001
0
1000
2000
3000
(tS-r*)/M
10-1
10-2
10-3
10-4
10-5
3800
3900
4000
(tS-r*)/M