

R-process Halting of Fallback in Neutron Star Mergers and Gamma-Ray Bursts

Ref) R-process Halting of Fallback in Neutron Star Mergers and Gamma-Ray Bursts

W. Ishizaki, K. Kiuchi, K. Ioka and S. Wanajo (2020) in prep.

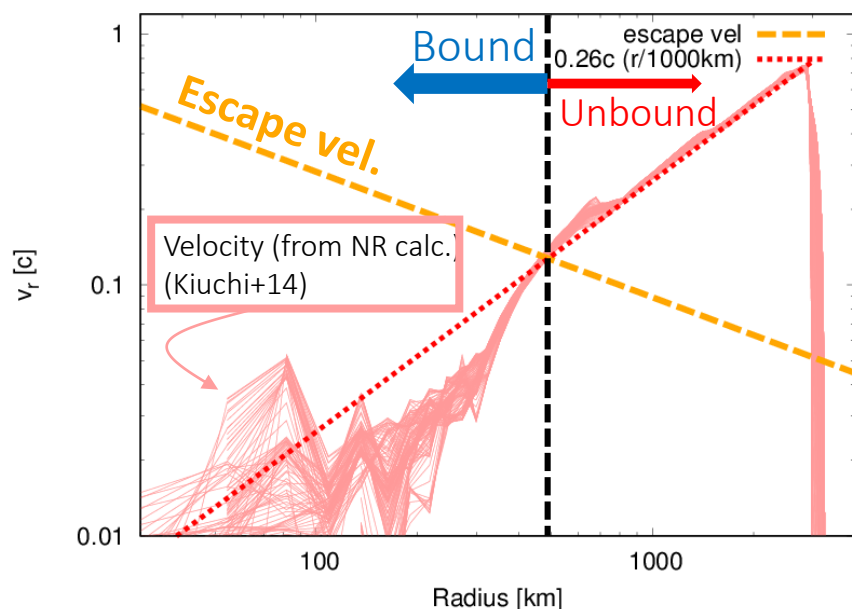
基礎物理学研究所

石崎 渉

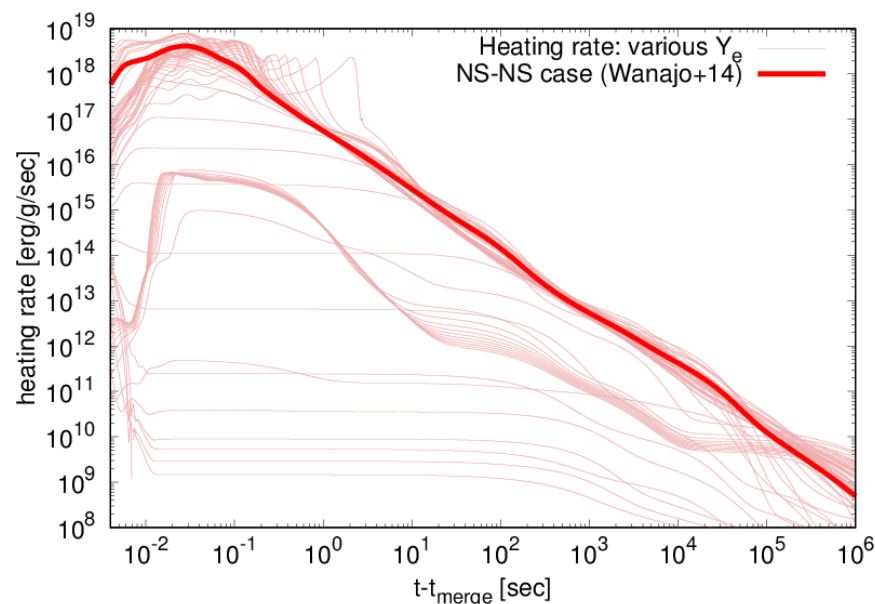
やったこと

- ✓ Kiuchi+14の数値相対論によるDynamical ejectaのプロファイルに基づき
- ✓ 加熱・点源重力を考慮した1次元の流体計算を行い
- ✓ r-process加熱が質量降着率を抑制することを見出した。
- ✓ 降着の抑制が起こるために、加熱率のプロファイルに課される条件を導いた。

Initial condition (Kiuchi+14)



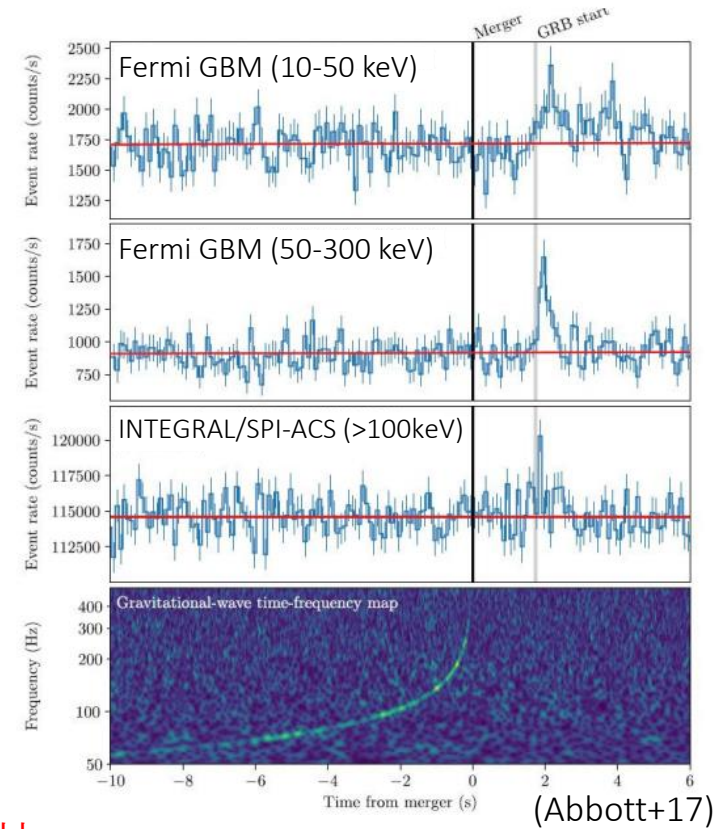
Heating rate (Wanajo+14)



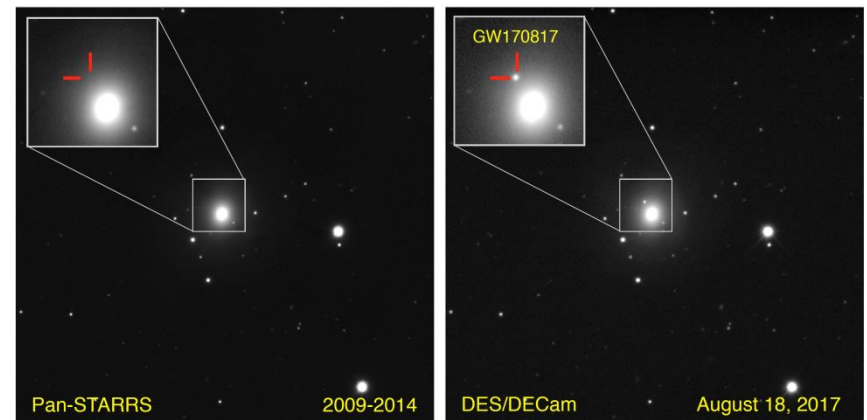
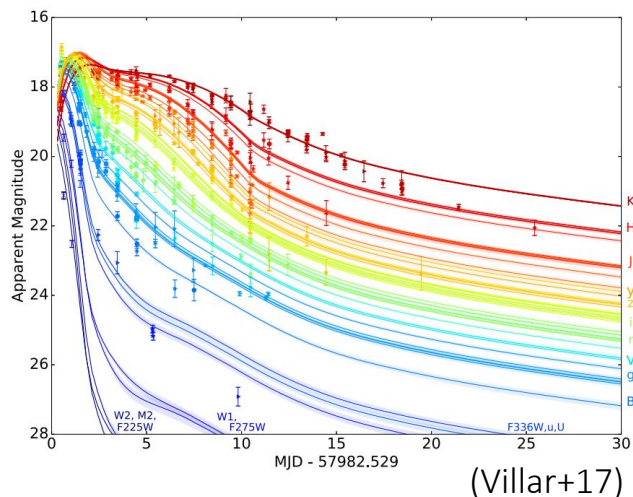
GW/GRB 170817

- 中性子星連星合体イベント GW170817
 - S/N $\sim$ 30
 - Distance $\sim$ 40Mpc
- 電磁波対応天体の観測
 - sGRB: GRB170817
 - Kilonova (SSS17)

→ NSNS merger, sGRB, kilonova の同一起源説を強く支持



(Abbott+17)

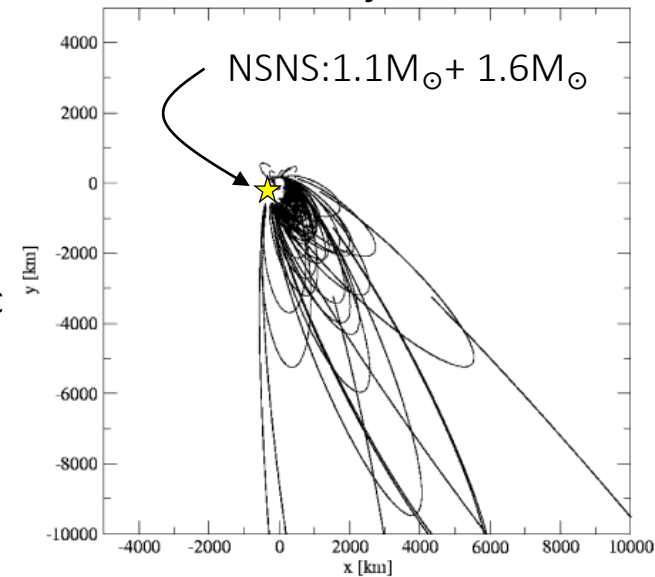


P.K. Blanchard / E.Berger / Pan-STARRS / DECam

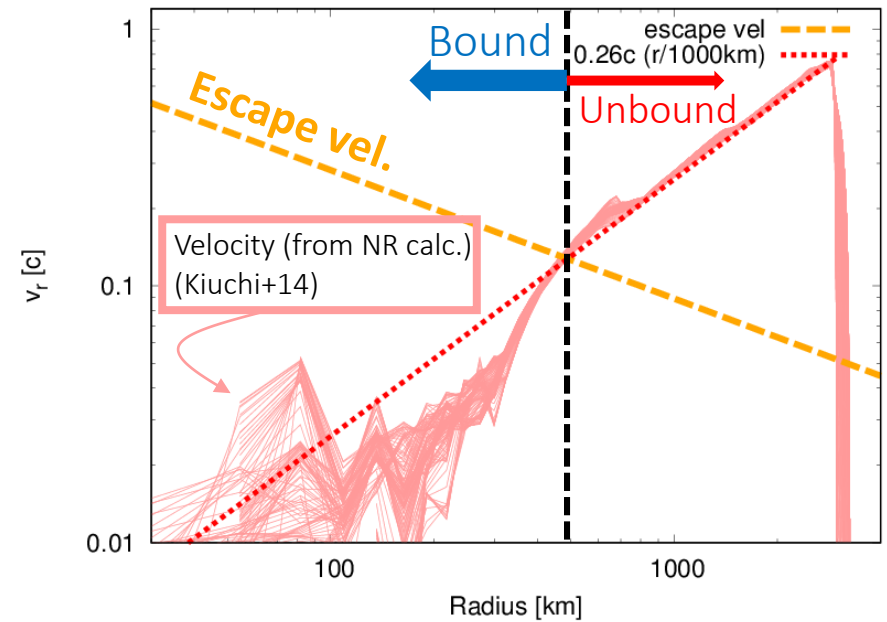
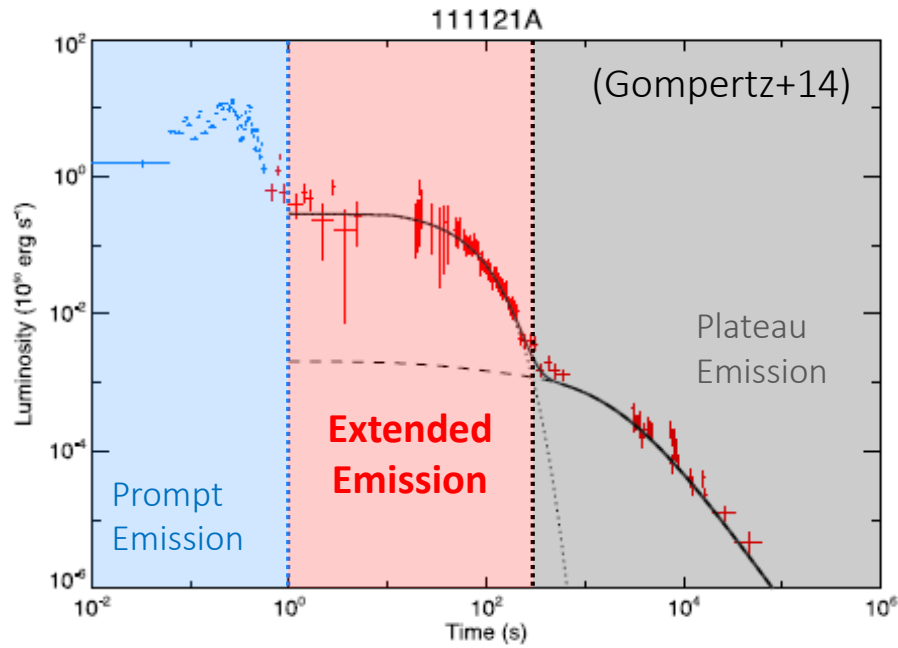
NS-NS Merger / sGRB

- sGRBの後期活動性
 - Extended emission : $L \sim 10^{48} - 10^{49}$ erg/s , $T \sim 10 - 10^3$ sec
- Additional energy injection ??
 1. Long-lived magnetar?
 - (少なくともGW170817では) 兆候なし
 2. Fallback accretion? (eg. Rosswog 07)

Fallback trajectories



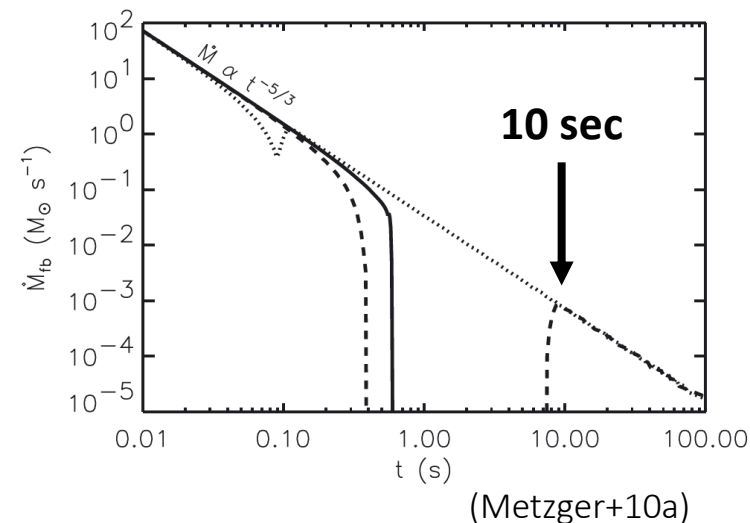
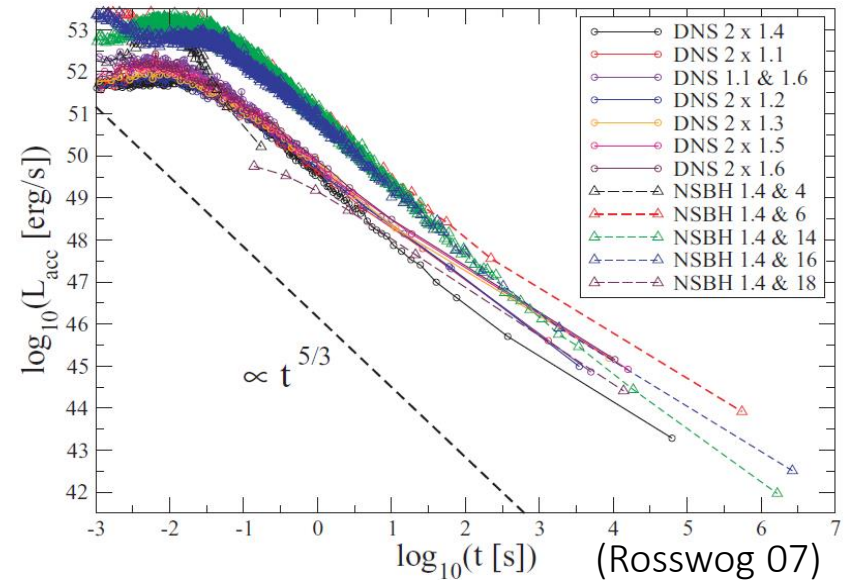
(Rosswog 07)



NS-NS merger / sGRB + kilonova

- Fallback accretion model
 - Energetics (10^{48} - 10^{49} erg/s) → OK
 - **Time scale ($T \sim 10$ - 10^3 sec) → ??**
- r-process heating
 - kilonovaの検出
 - ↔ r-process heatingの強い傍証
- FallbackにおけるHeatingの効果 (Metzger+10a)
 - heatingによって、本来fallbackするはずの ejectaの一部がunboundに
 - r-process heatingのtimescaleに対応して fallbackが中断(→再開)

→ $T \sim 10$ - 10^3 secのtime scaleを作った



Fallback accretion w/ heating

- Desai+19

- Metzger+10aと同様のモデルを、より現実的な initial profile + heating rateで計算
- そのHeating rateを用いてtest-particle simulation
- Heatingがすべて運動エネルギーに渡るとして fallbackするtest particleのエネルギーを計算

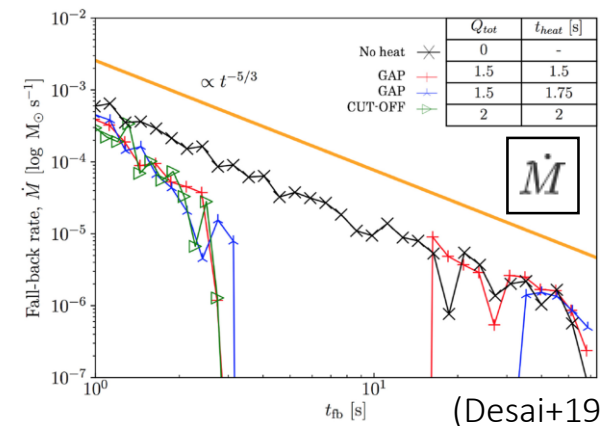
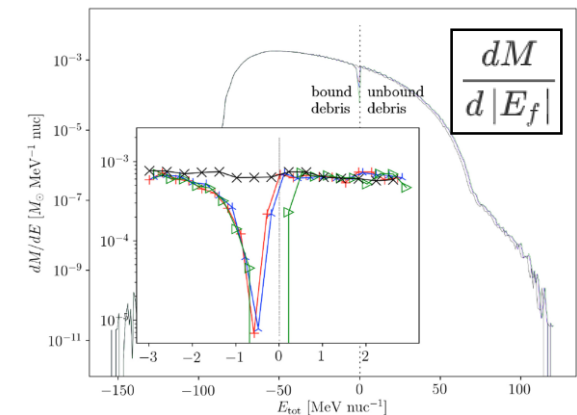
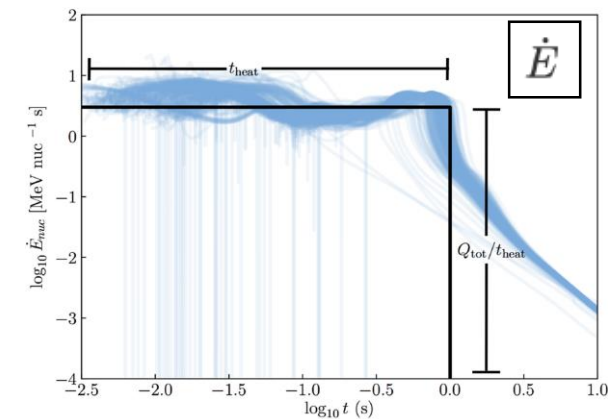
$$E_f = E_i + \int_0^{t_{\text{off}}(E)} \dot{E} dt \longrightarrow \dot{M} = \frac{dM}{dt} = \frac{dM}{d|E_i|} \frac{d|E_i|}{d|E_f|} \frac{d|E_f|}{dt}$$

$$\left[t_{\text{orb}} = 2\pi \left(\frac{a^3}{GM} \right)^{1/2} \approx 1.6\text{s} \left(\frac{|E_{\text{tot}}|}{1\text{MeV}} \right)^{-3/2} \left(\frac{M}{5M_\odot} \right) \right]$$

気になること

流体的な相互作用を考えたら結果が変わるのでは？

⇒ 同様のセットアップを流体方程式で計算してみよう！



(Desai+19)

基礎方程式

- 方程式系(特殊相対論的流体力学, 球対称)

連続の式: $\frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} [\gamma \rho] + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} [r^2 \rho \gamma \beta] = 0$ r-process heating

エネルギー保存: $\frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} [w \gamma^2 - P] + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} [r^2 w \gamma^2 \beta] = \boxed{\gamma Q_{\text{heat}}} - \boxed{w \gamma^2 \beta \frac{r_g}{2r^2}}$ 点源重力

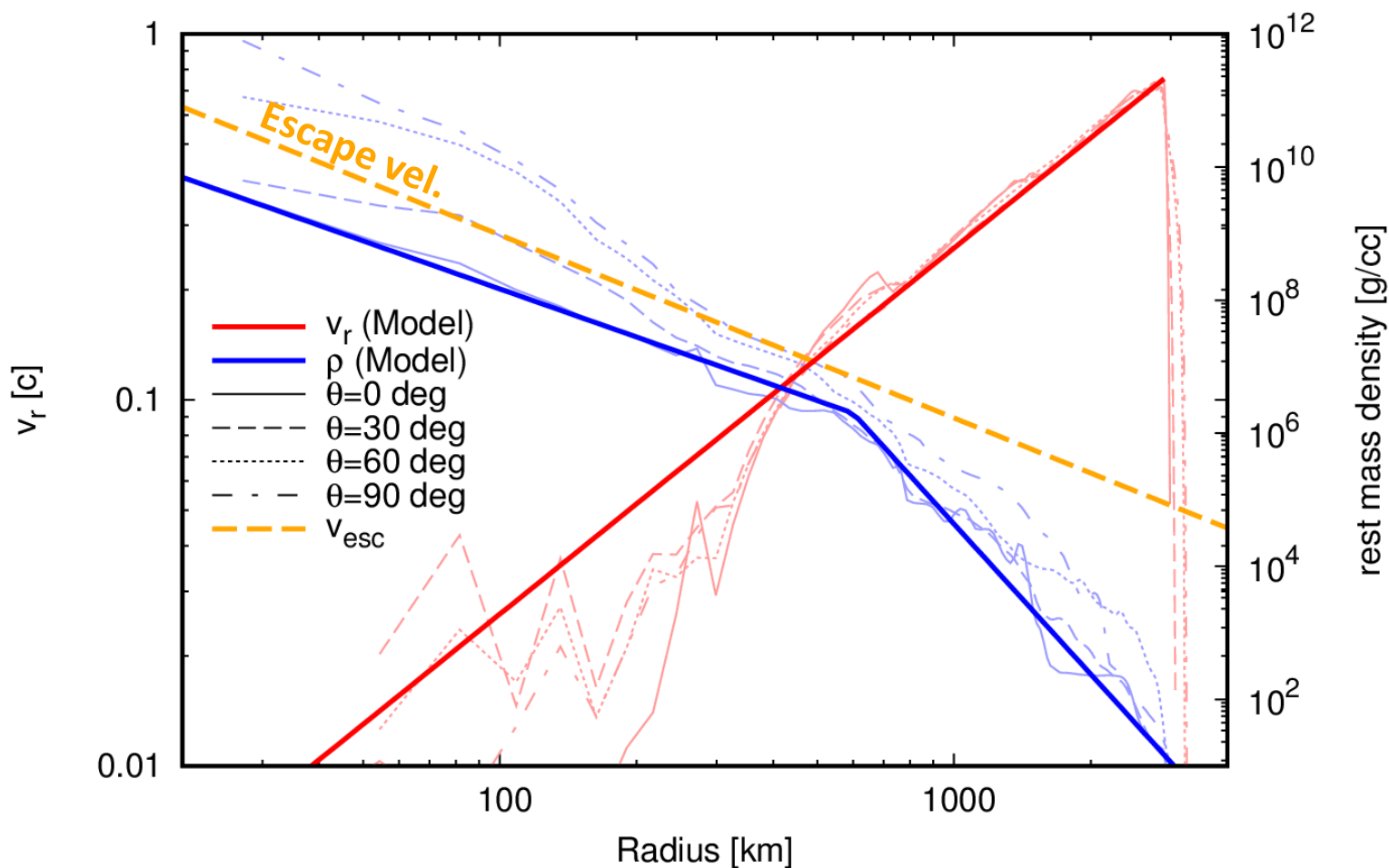
運動量保存: $\frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} [w \gamma^2 \beta] + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} [r^2 (w \gamma^2 \beta^2 + P)] = \boxed{\gamma \beta Q_{\text{heat}}} + \frac{2P}{r} - \boxed{(w \gamma^2 - P) \frac{r_g}{2r^2}}$

$$\begin{cases} w = \epsilon + P \\ \epsilon = \rho c^2 + \epsilon_{\text{int}} \\ P = \frac{\epsilon}{3} \end{cases}$$

- 弱い重力場の取り扱いはNagakura+10を参考にした
- 理想気体、輻射圧優勢 ($\Gamma \sim 4/3$)を仮定
- 計算手法
 - Eulerian code, HLL & MUSCL(PPM)+RK4, 空間3次・時間4次
 - 球対称、一様グリッド $N=16384$, $r_{\text{max}}=160000\text{km}$

初期条件

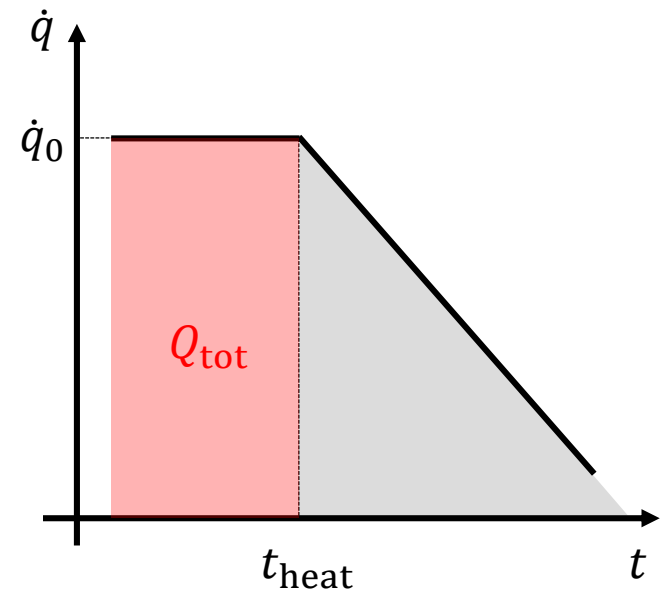
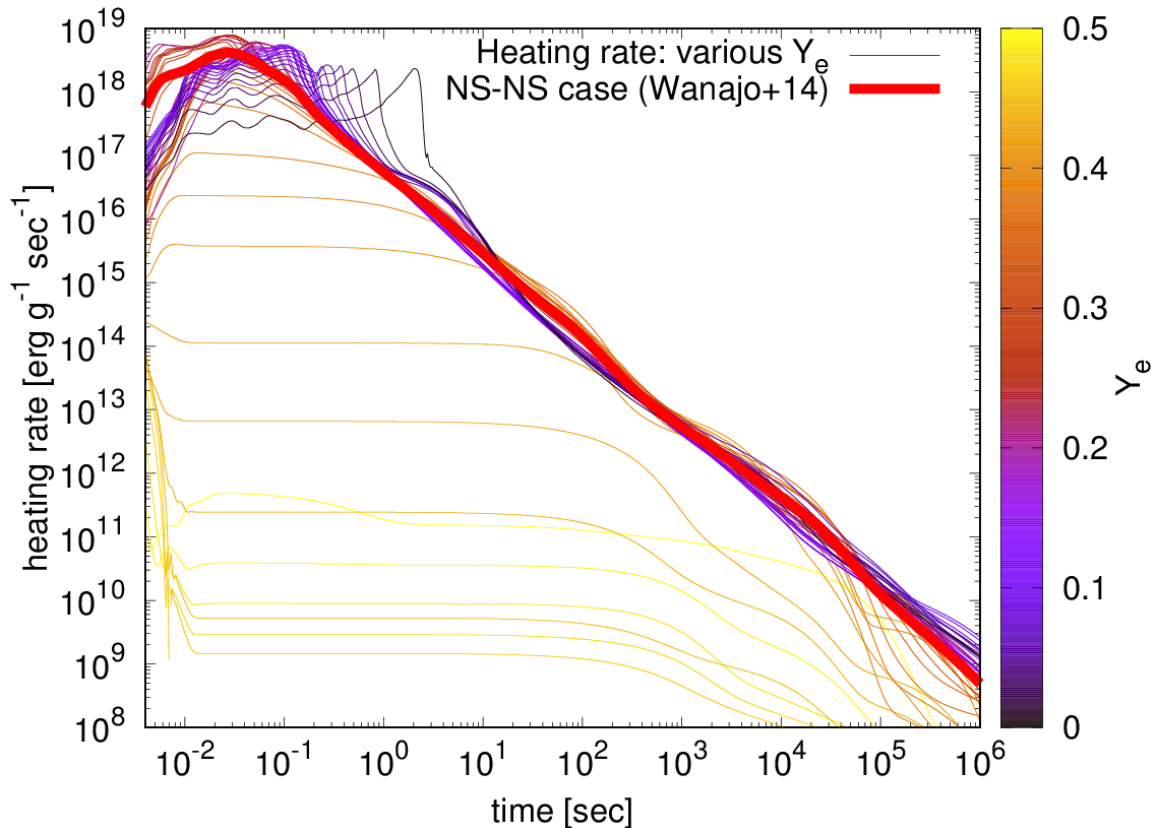
- Kiuchi+14 (1.35+1.35 Msun NS-NS, H model, $t_{\text{merge}}=60\text{ms}$, $t_{\text{snapshot}}=73.9\text{ms}$)
 - Model : 速度 $\rightarrow$ Homologous expansion : $v \propto r$ ($r < 3000\text{km}$) (Homologous expansion)
 - : 密度 $\rightarrow$ Broken Power-law ($p=-2.4$ for $r < 600\text{km}$, $p=-7.5$ for $r > 600\text{km}$)



Heating model

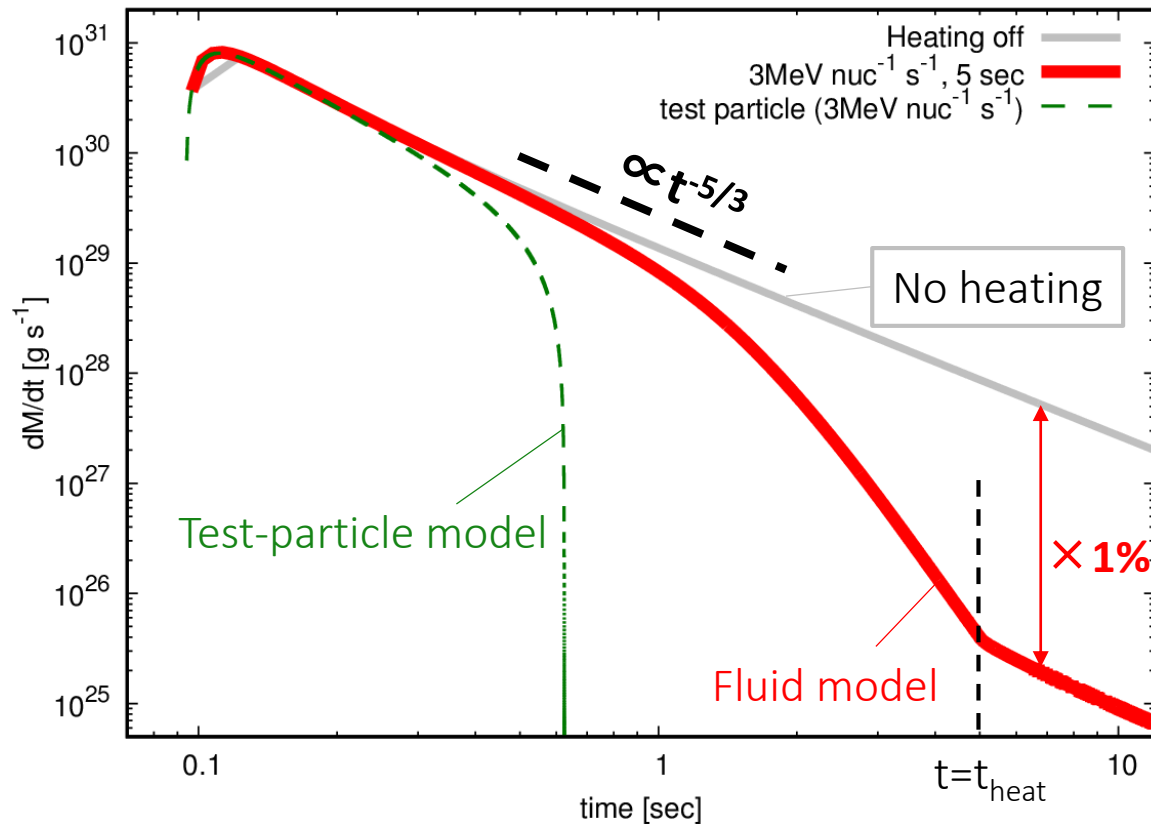
- r-process加熱: “Constant phase + Decay phase” (Wanajo+14)
 - Constant phase: $O(0.1)$ - $O(100)$ sec, **total energyはこちらが主要**
 - Decay phase: power-lawで減少 (indexは1よりsteep)

⇒ 簡単のため、まずはConstant phaseのみを考える



Test-particle modelとの比較

- $\dot{q}_0 = 3 \text{ MeV nuc}^{-1} \text{ s}^{-1}$, $t_{\text{heat}} = 5 \text{ s}$ の場合
 - Heatingがない場合に対して、降着率は1%程度に抑制
 - Test-particle modelのようなsharpなcutoffはなく、timescaleも1桁くらい長い



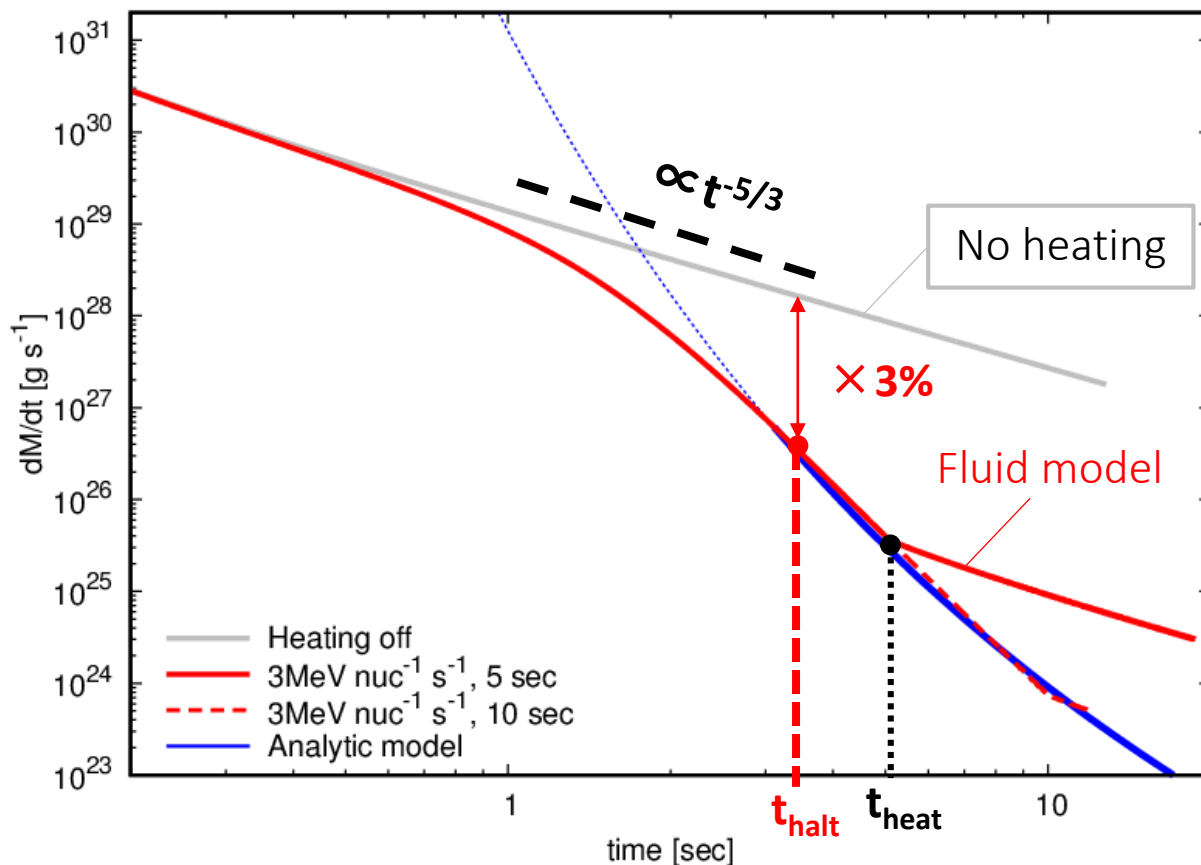
⇒ 流体計算から得られる質量降着率は、Test-particle modelと定量的に異なる！

Semi-analytic modeling / Halting time

- Semi-analytic modeling (詳細は省略)

- t_{halt} : Accretion rateが $\sim 3\%$ になる時間スケール
- t_{halt} 以降は $t^{-5/3}$ より急に減衰することがわかった

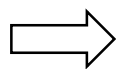
- 質量降着率が加熱によって十分抑制される条件 $\implies t_{\text{halt}} > t_{\text{heat}}$



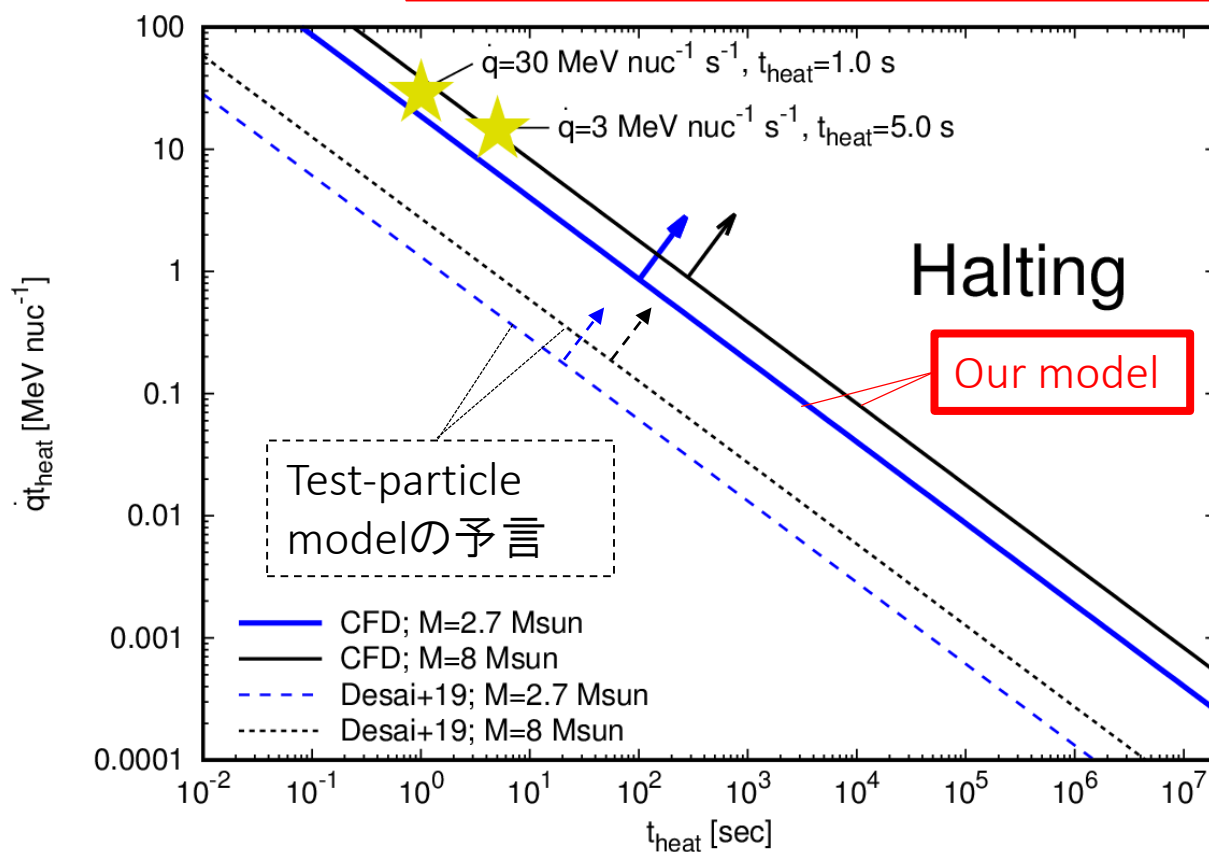
Heating modelに対する制限

- r-process加熱により質量降着率が抑制される条件

$$t_{\text{halt}} > t_{\text{heat}}$$



$$Q_{\text{tot}} \gtrsim 18.6 \text{ MeV nuc}^{-1} \left(\frac{M}{2.7 M_{\odot}} \right)^{2/3} \left(\frac{t_{\text{heat}}}{1 \text{ s}} \right)^{-2/3}$$

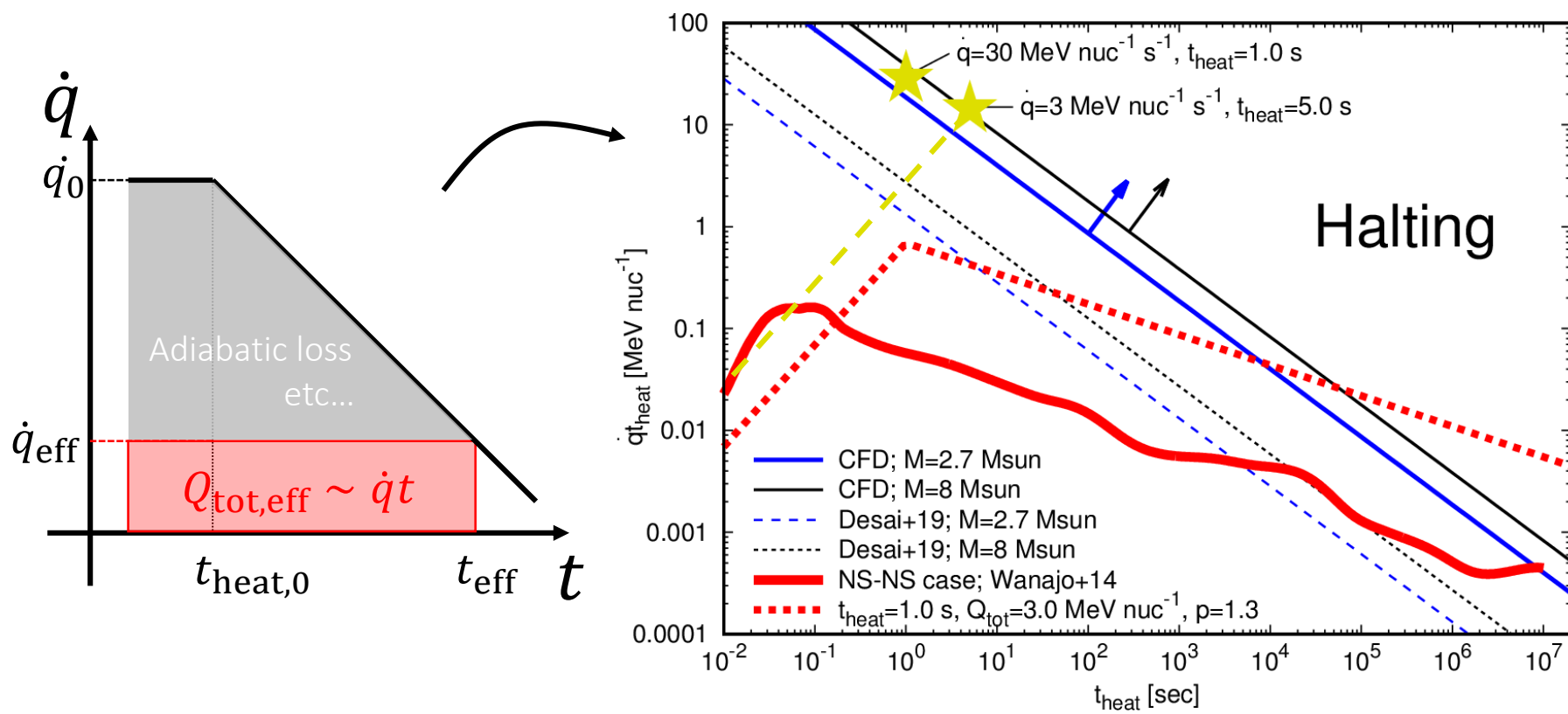


質量降着を抑制するためには、(test-particle modelより) 強い加熱・長い加熱が必要

Decay phaseへの拡張

- Heating profile $\rightarrow$ Constant phase + Decay phase
 - 同じtotal heatでも、長い時間かけて注入すると、haltingを引き起こす
 - Decay phaseで、実効的に $Q_{\text{tot,eff}} \sim \dot{q}t$ のHeatingがあったとみなせる

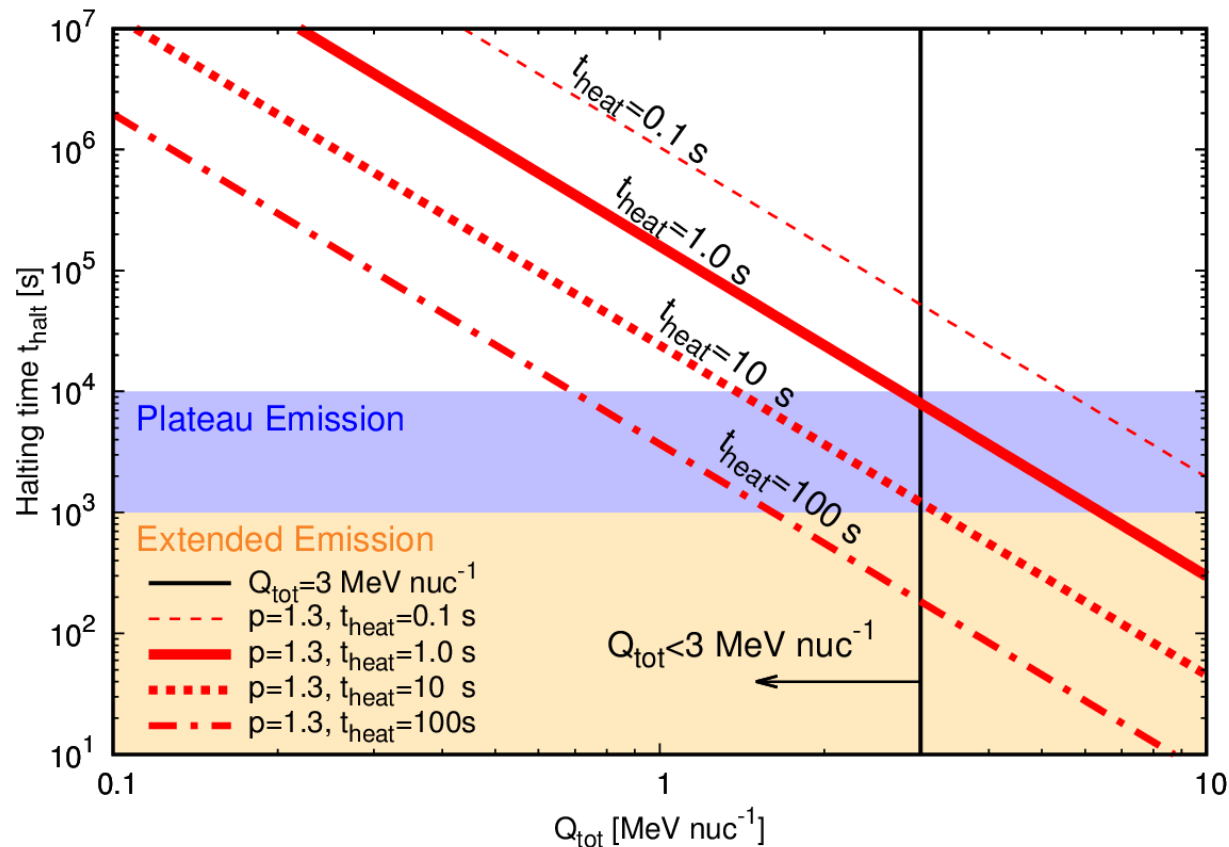
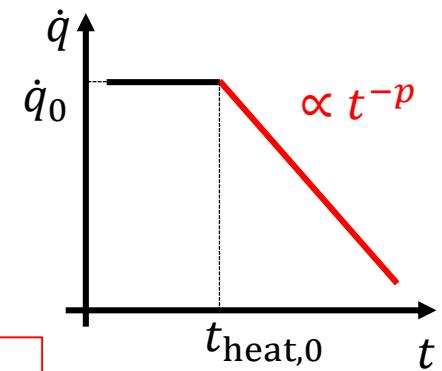
$\rightarrow$ Decay phaseの間にHaltingが起こるパラメータスペースが存在



Halting time

- Decay phaseを考慮した場合のHalting time

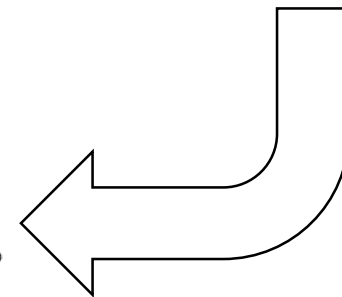
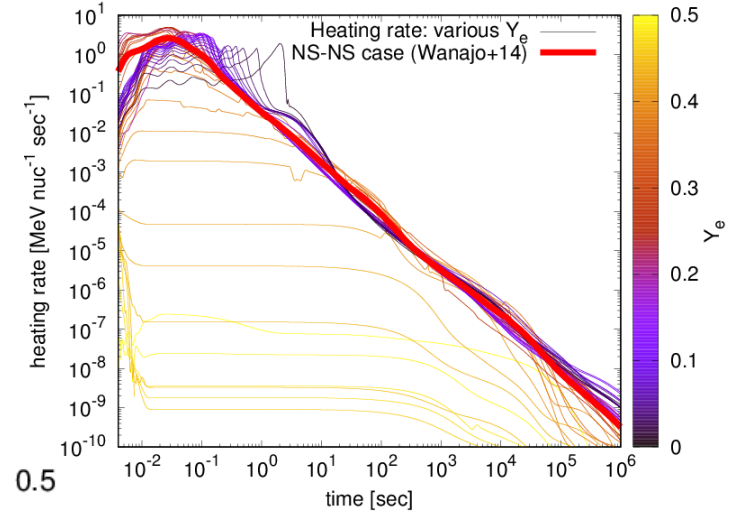
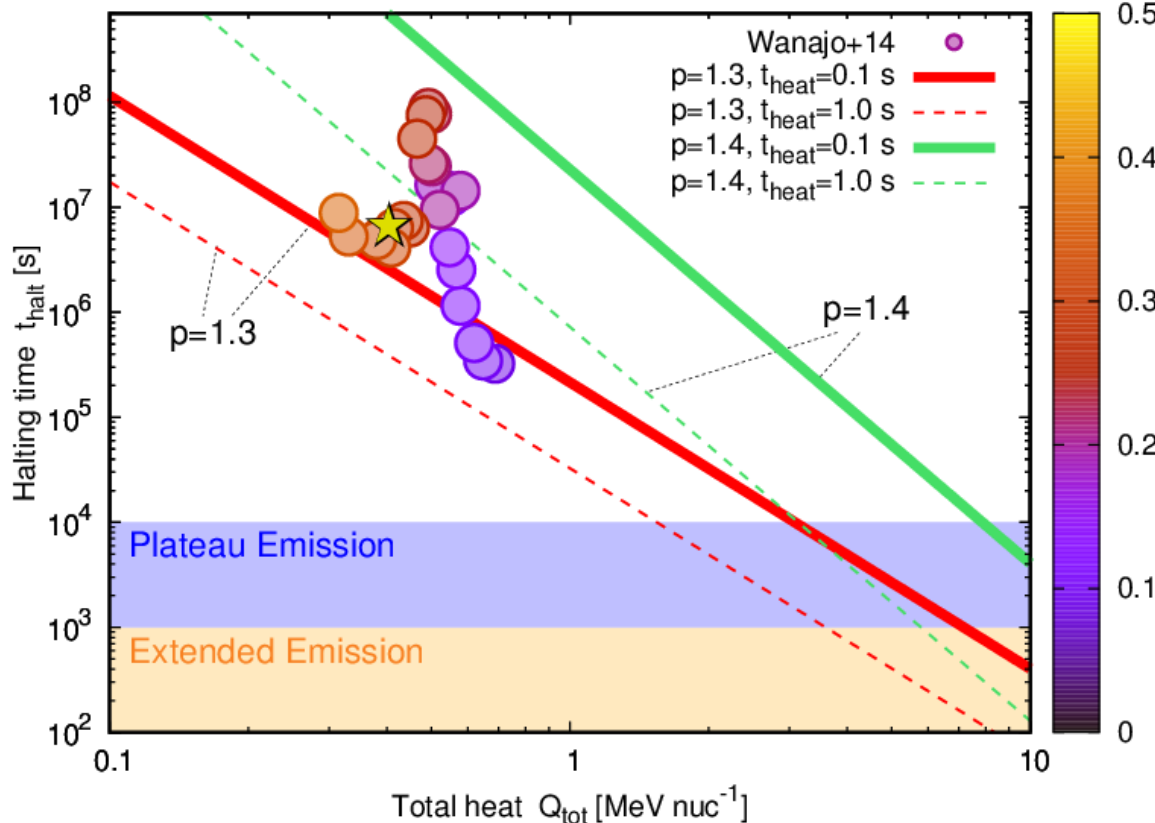
$$t_{\text{halt}} \sim 8 \times 10^3 \text{ sec} \left(\frac{M}{2.7 M_{\odot}} \right)^{1.82} \left(\frac{Q_{\text{tot}}}{3 \text{ MeV nuc}^{-1}} \right)^{-2.72} \left(\frac{t_{\text{heat},0}}{1 \text{ sec}} \right)^{-3.55} \quad (p = 1.3)$$



Heating rateのプロファイル次第で、質量降着率に多様な時間スケールが現れうる

Halting time

- 実際の元素合成のデータを使って計算すると？
 - Y_e 依存性を考慮しても、EEやPlateauは難しい？



Fallback w/ r-process heatingではExtended emissionやPlateauのtime scaleは難しい... ?

まとめ

- やったこと
 - 数値相対論の流体プロファイルに基づいて、r-process加熱のあるdynamical ejectaのfallback accretionを長時間計算した
 - Constant phaseの質量降着率を準解析的にモデル化した
- わかったこと
 - 流体相互作用を考えた場合、test-particle modelと定量的に異なる $\dot{M}$ が得られる
 - 流体モデルでも質量降着率の抑制は見られるが、より大きな加熱率が必要になる
 - Decay phaseへ結果を外挿すると、多様な時間スケールでHaltingが起こりうる

おわり