

密度が一様な CSM (星周物質) との 相互作用により輝く超新星の光度曲線

千葉 遼太郎 (総研大/国立天文台 M1)

指導教員: 守屋 堯 (主), 富永 望, 高橋 亘

Chiba & Moriya (2024; to appear in ApJ, arxiv:2407.07244)

アウトライン

- イントロダクション
 - 超新星の光度曲線にみられる多様性と, 星周物質の関係
 - 星周物質の密度分布について考える必要性
- 相互作用型超新星のモデル
- 結果
 - 光度曲線の形状の分類
 - 実際の観測との比較

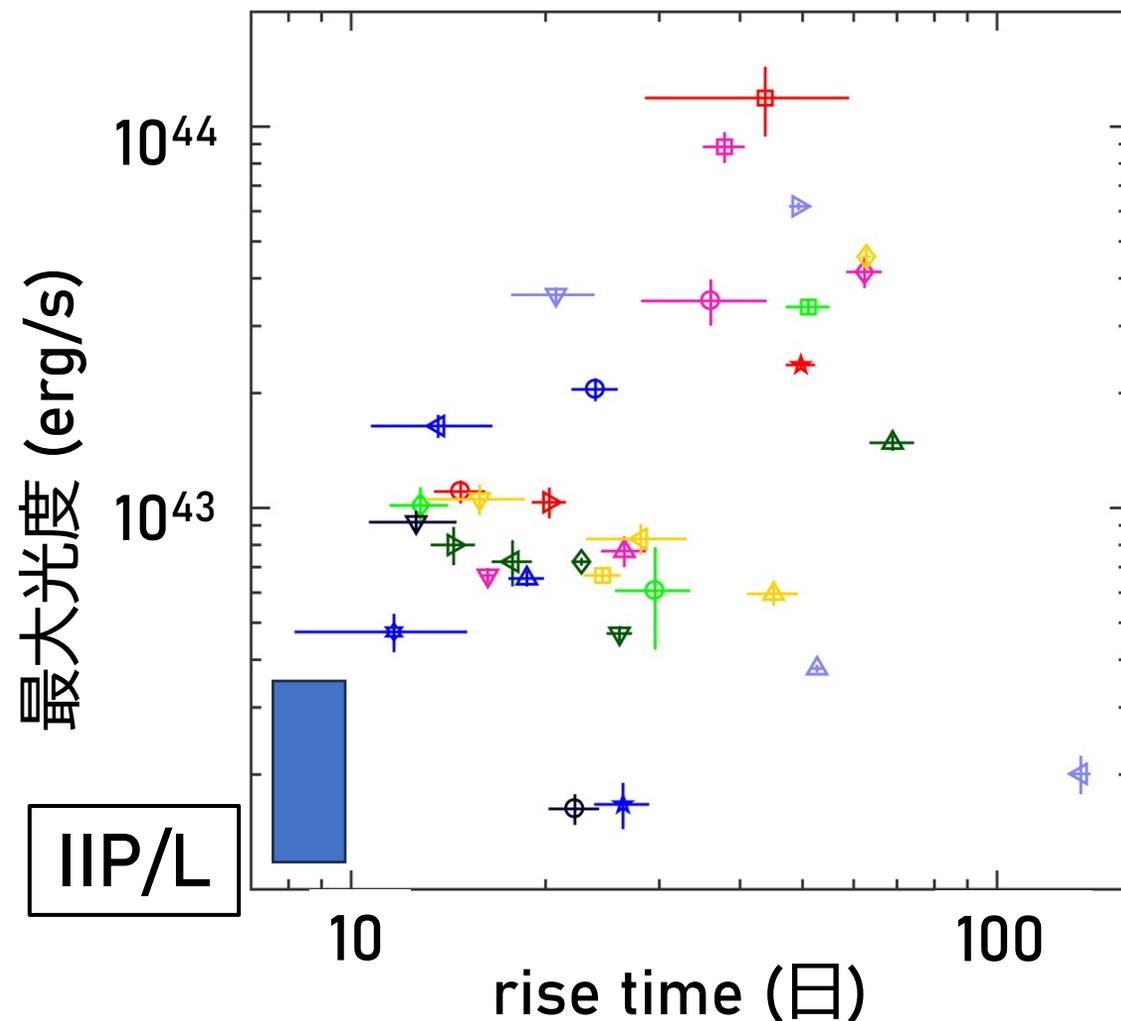
イントロダクション: 重力崩壊型超新星の多様性

- 大質量星は進化の終末に重力崩壊型超新星として爆発
- 光度曲線が様々な時間スケール・明るさを示す
 - 近年のサーベイ観測 (例: ZTF, ATLAS...) により, 超新星の多様性は深化している

イントロダクション: 相互作用型超新星

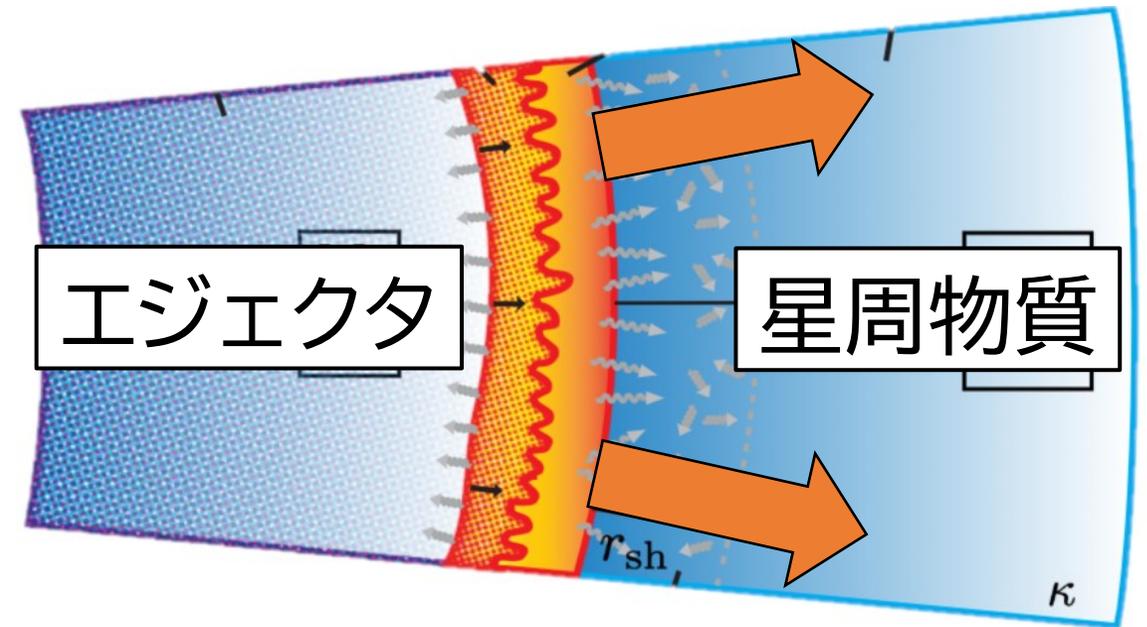
(Nyholm+20)

- 星周物質との相互作用で輝く
超新星は、多様な光度曲線を持つ
- 右図: 相互作用型超新星の
多様な光度曲線 (観測)
- 通常のII型超新星 (青四角) の
ピーク光度: $< 10^{43}$ erg/s
rise time: 5~10 日



イントロダクション: 相互作用型超新星

- 星周物質との相互作用により輝く超新星は、多様な光度曲線を持つ
 - 超新星から放出された物質 (エジェクタ) が星周物質に衝突
 - 運動エネルギーが衝突で散逸
 - 散逸したエネルギーの一部が放射に変換
- 効率的にエネルギーを放射



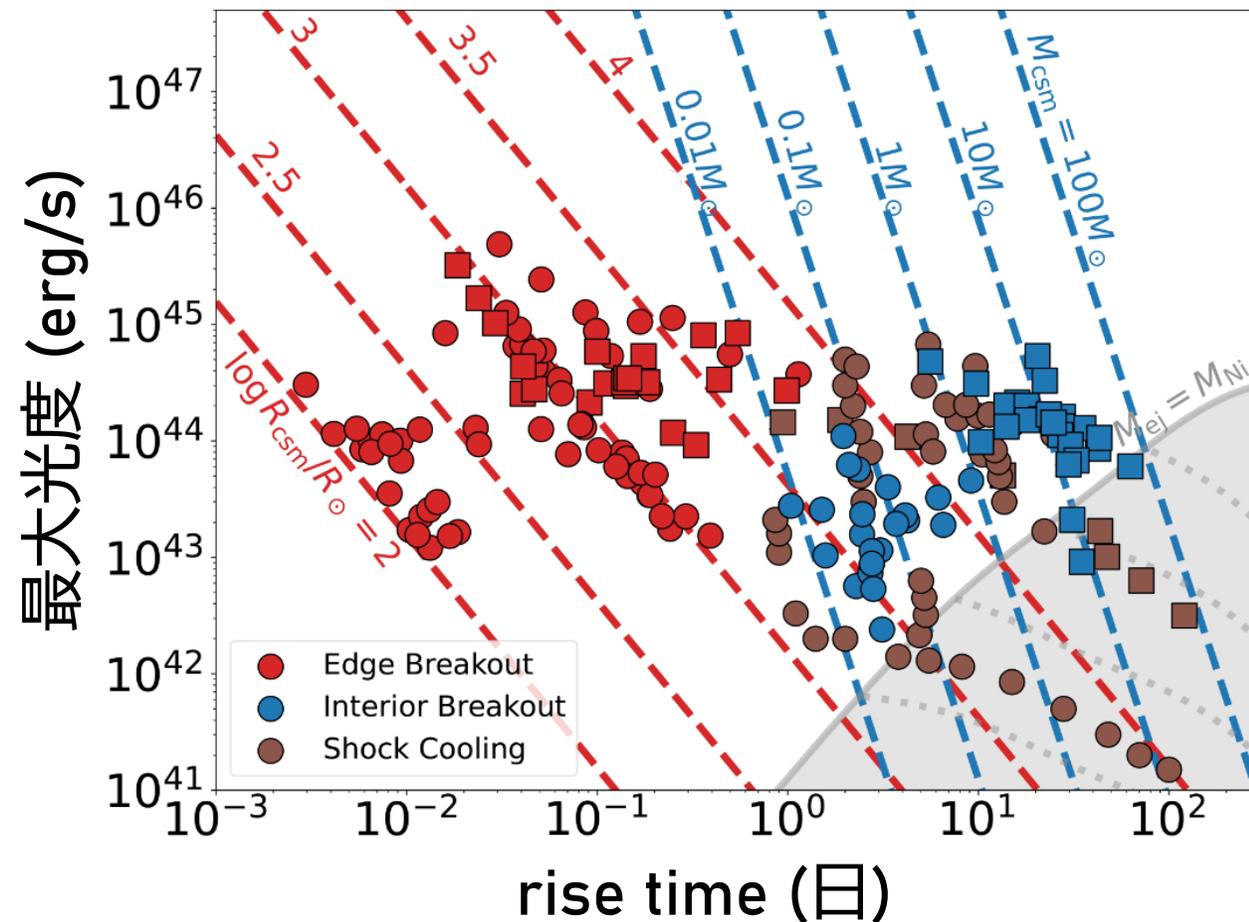
(Khatami+23)

イントロダクション: 相互作用型超新星

- 右図: 相互作用型超新星の多様な光度曲線 (理論)

- 星周物質の質量・半径に対応して
様々な明るさ・時間スケール
- 特異な超新星の光度曲線を
良く説明できる

(Khatami+23)

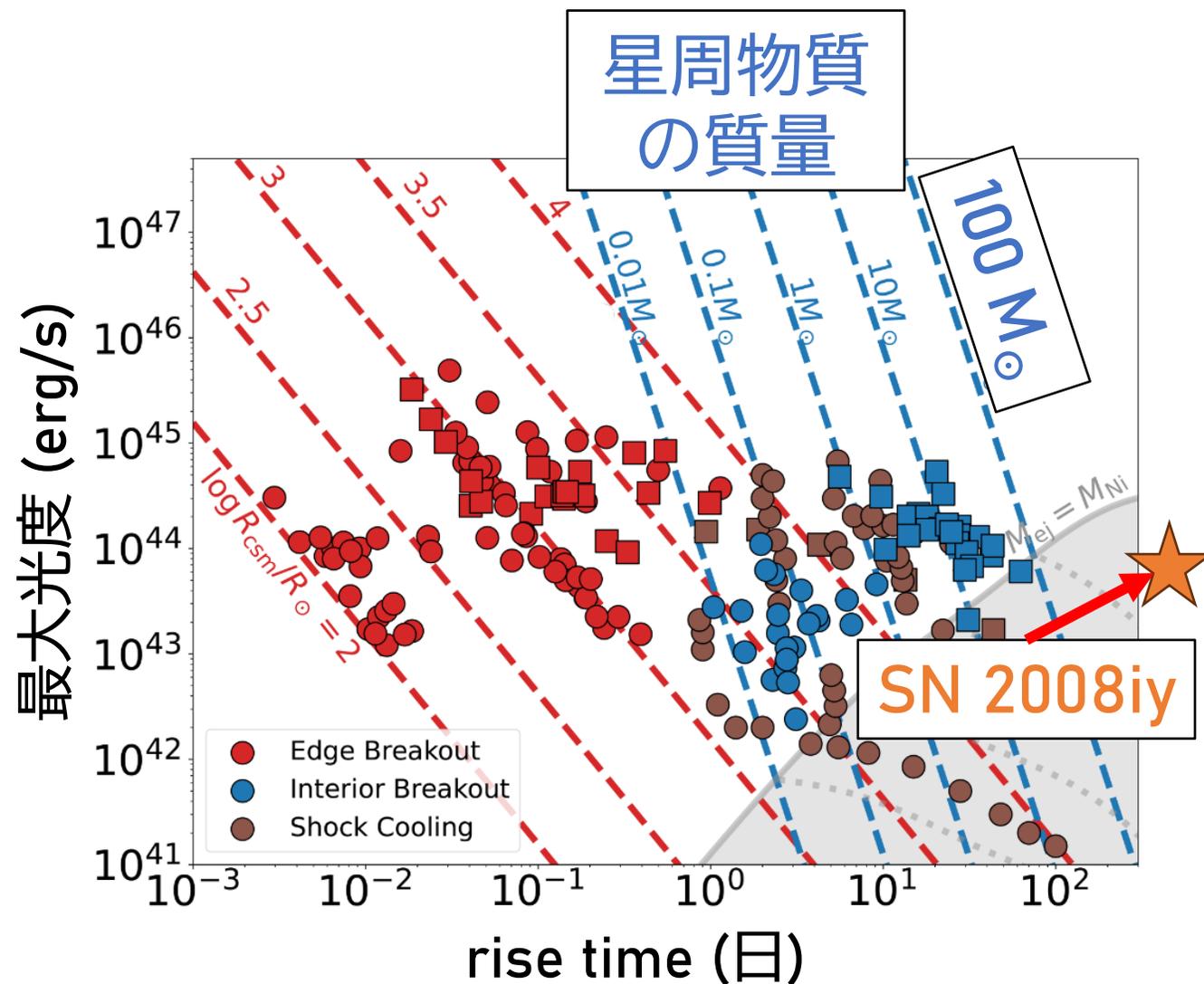


イントロダクション: 相互作用型超新星

- 進化の時間スケールが **100 日** を超えるような超新星が存在

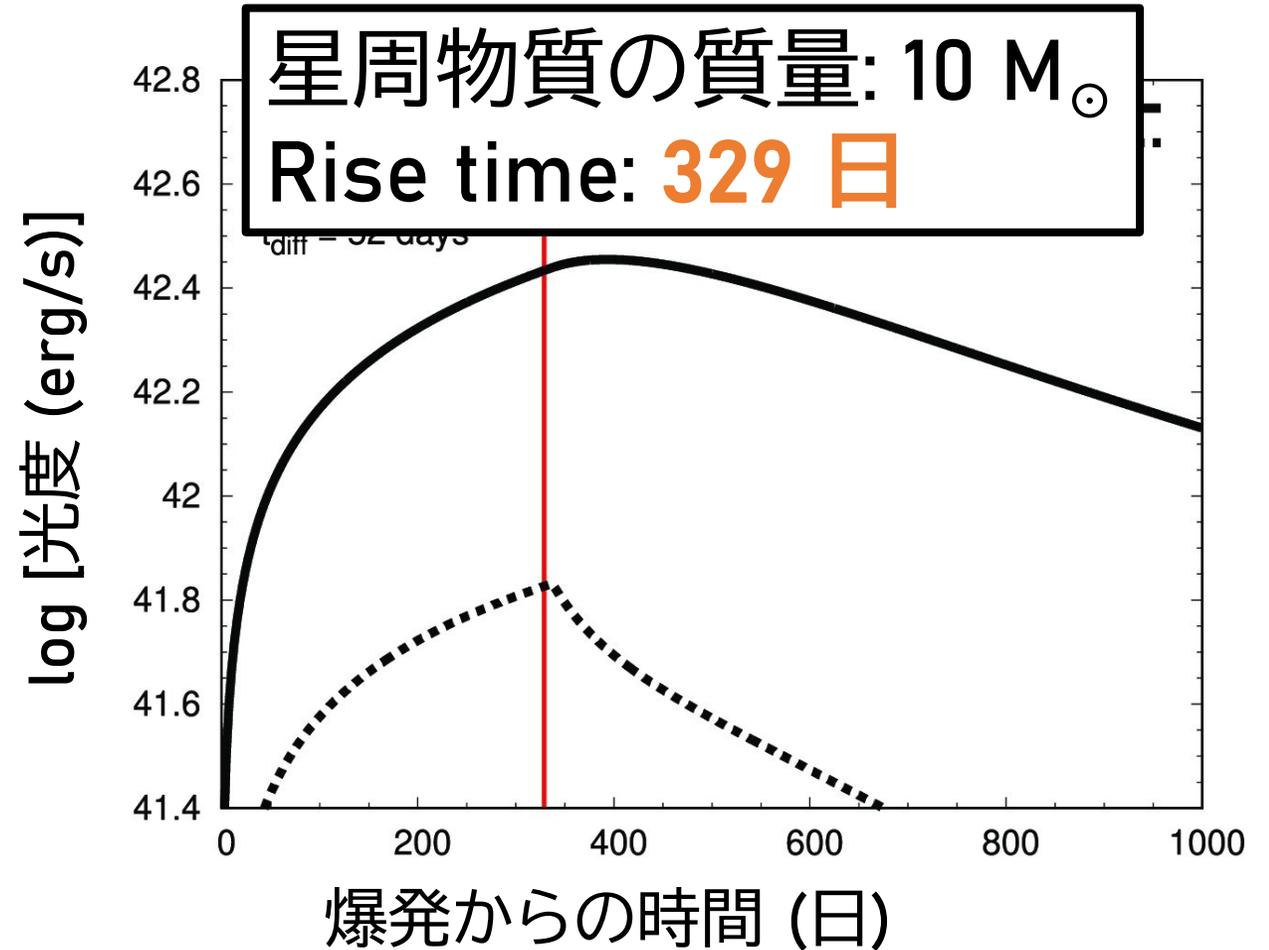
- 例: SN 2008iy
rise time は 400 日以上
最大光度 ~ -19 等

- 星周物質の質量 $\sim 1000 M_{\odot}$??



イントロダクション: 一様に近い星周物質の密度分布

- 通常, 星周物質の密度分布は恒星風的 ($\rho \propto r^{-2}$) と仮定
 - 定常な質量損失の仮定と同等
- 長い rise time の理由を,
一様に近い星周物質の分布で説明できる可能性 (Moriya23)

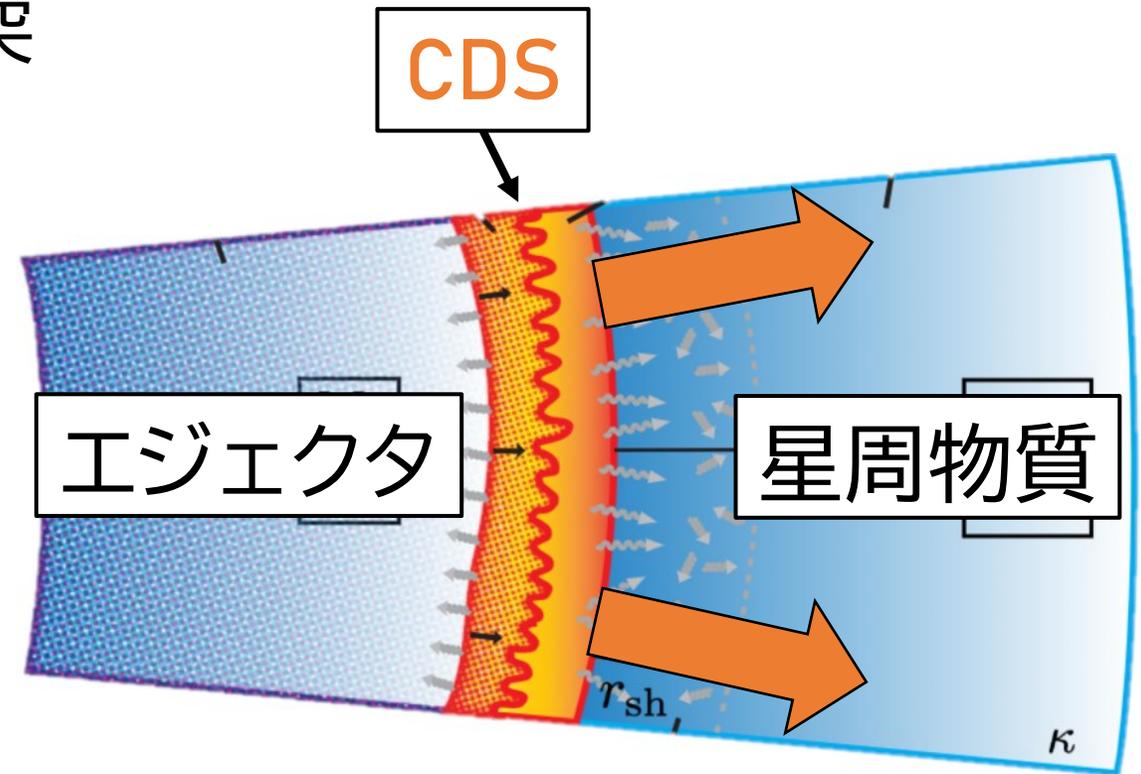


研究の目的

- 星周物質の密度分布が一様に近い相互作用型超新星の光度曲線の形状を調査
 - 星周物質内の光子拡散の効果を考慮 (特に, shock breakout の効果)
 - 光度曲線を形状により分類し, 星周物質の質量・半径と形状の対応を決定
- 得られた結果を, 光度曲線の観測例と比較

相互作用型超新星のモデル化

- 超新星エジェクタと星周物質の衝突で衝撃波が形成
- 衝撃波面間の領域は, 膨張により薄い球殻 (CDS) に (Chugai+04)
- CDS の時間変化は, 質量保存・運動量保存から解ける



相互作用型超新星のモデル化

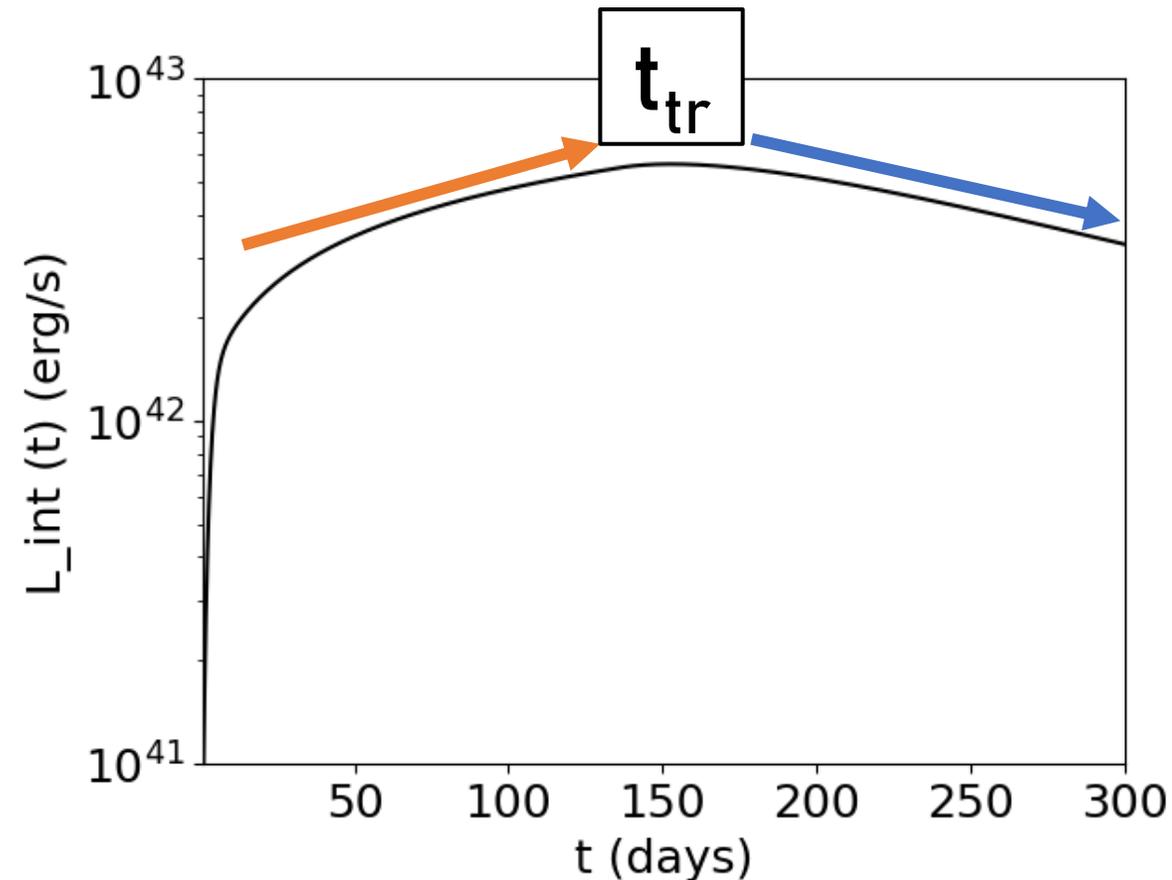
- 星周物質とエジェクタの運動エネルギーが衝突により散逸し、その一部が放射される
- つまり, エジェクタと星周物質の相互作用により生じる光度 L_{int} は

$$L_{\text{int}} = 2\pi\epsilon r_{\text{sh}}^2 [\rho_{\text{ej}}(v_{\text{sh}} - v_{\text{ej}})^3 + \rho_{\text{CSM}}(v_{\text{sh}} - v_{\text{CSM}})^3]$$

- $\epsilon \sim 0.3$: 運動エネルギーから放射エネルギーへの変換効率 (Fransson+14)

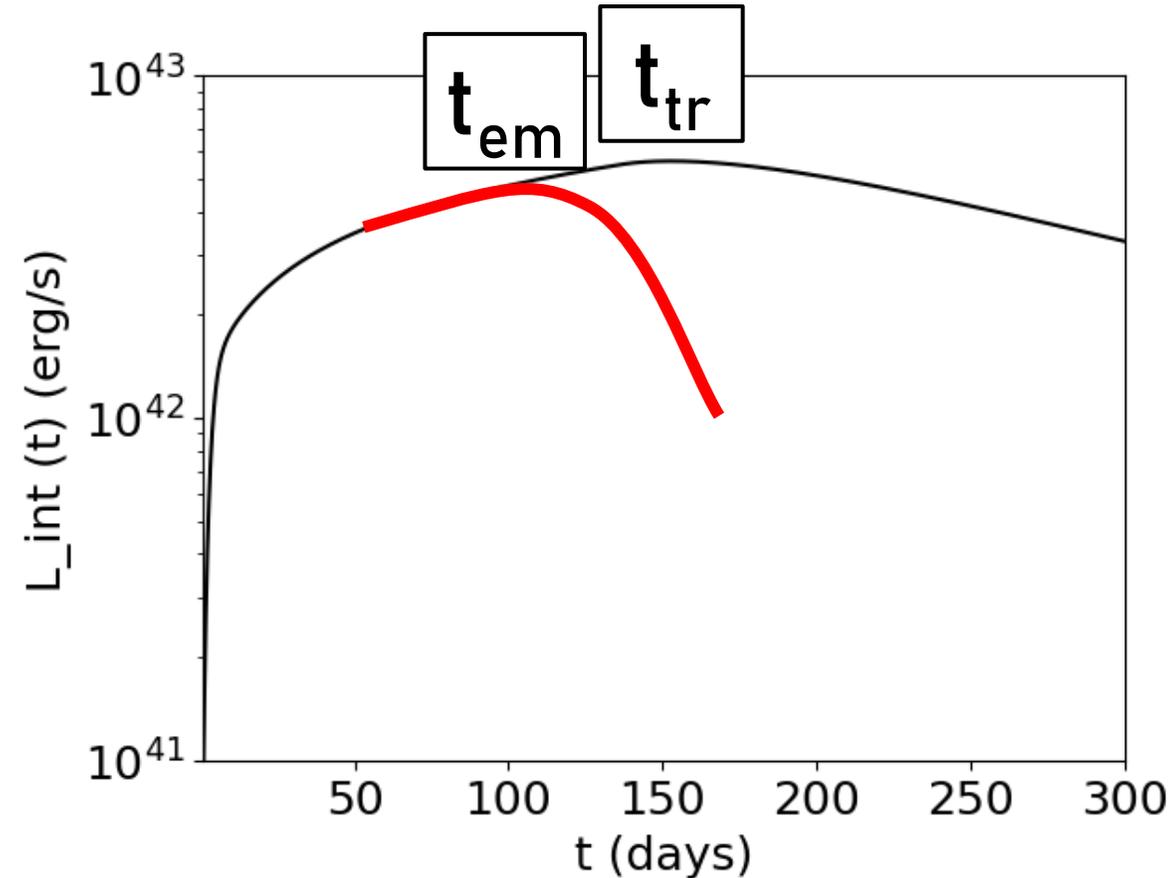
相互作用で生じる光度 (L_{int}) の時間変化

- 星周物質とエジェクタの運動エネルギーが衝突により散逸し, その一部が放射される
- 右図: 一様な星周物質の分布を仮定して得られる L_{int} の時間変化
- L_{int} が最大になる $t = t_{\text{tr}}$



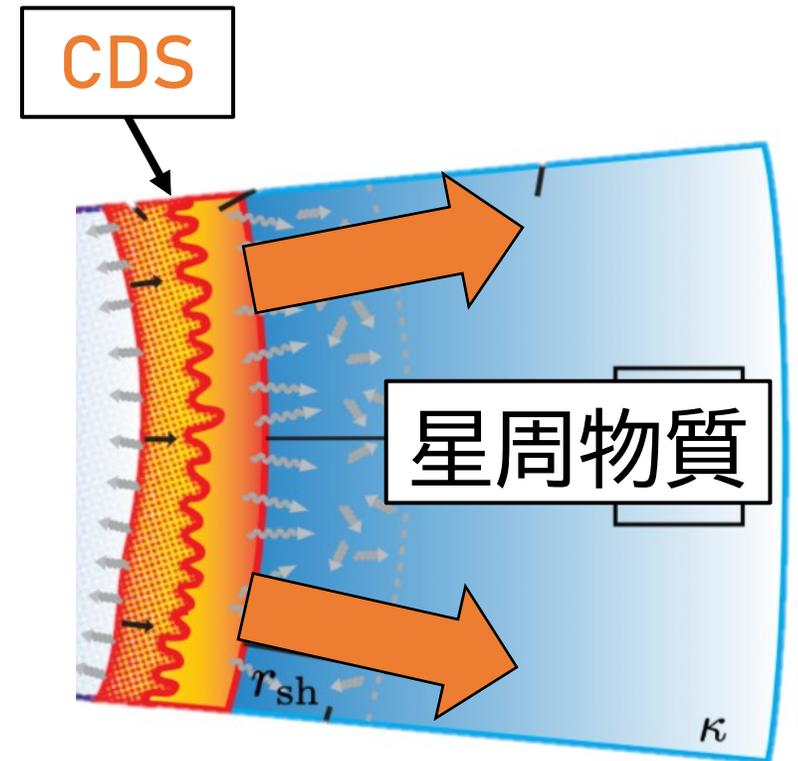
衝撃波の脱出

- CDS が $t = t_{tr}$ より前に星周物質から抜け出してしまう場合
- エジェクタと星周物質が相互作用する間 L_{int} (相互作用で生じる光度) は増加
- 相互作用が終了する ($t = t_{em}$) と減少



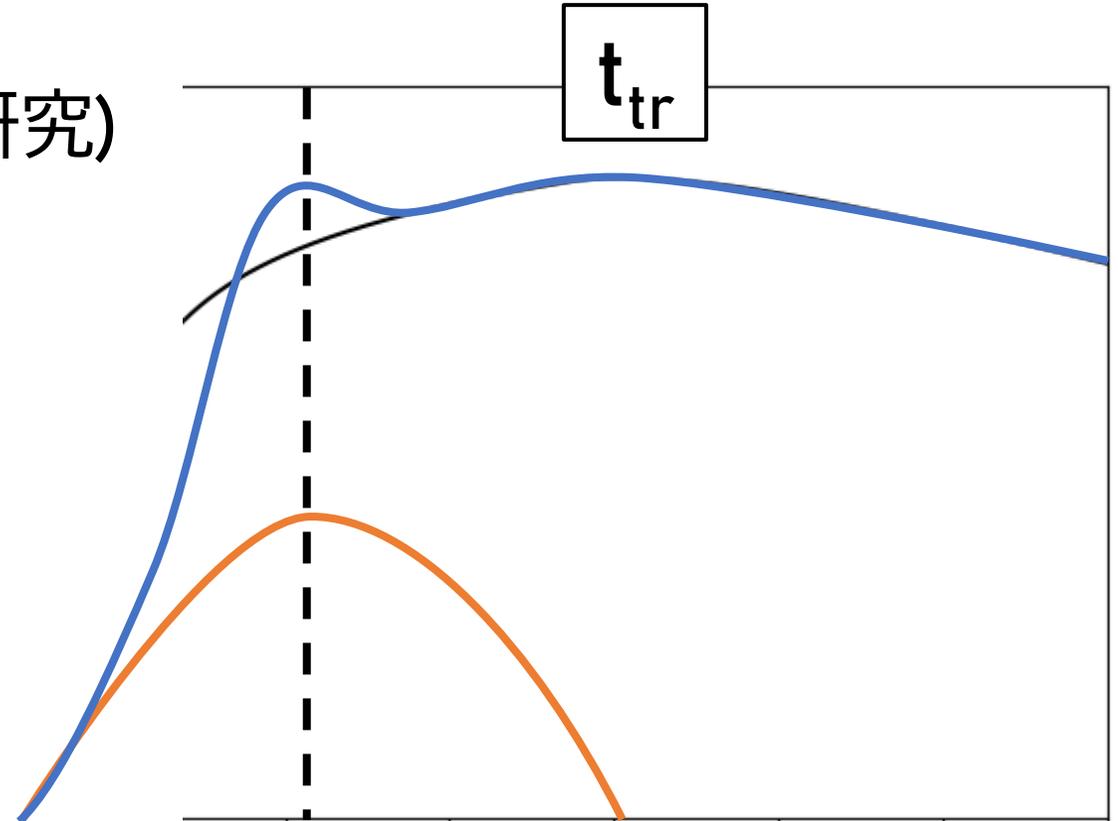
Shock breakout

- 相互作用により発生した光子は、星周物質の内部を拡散する
- 拡散が遅い場合、光子が膨張する CDS に追いつかれ、CDS を抜け出せない
- 星周物質が十分光学的に薄くなると、光子が星周物質を抜け出せるようになる



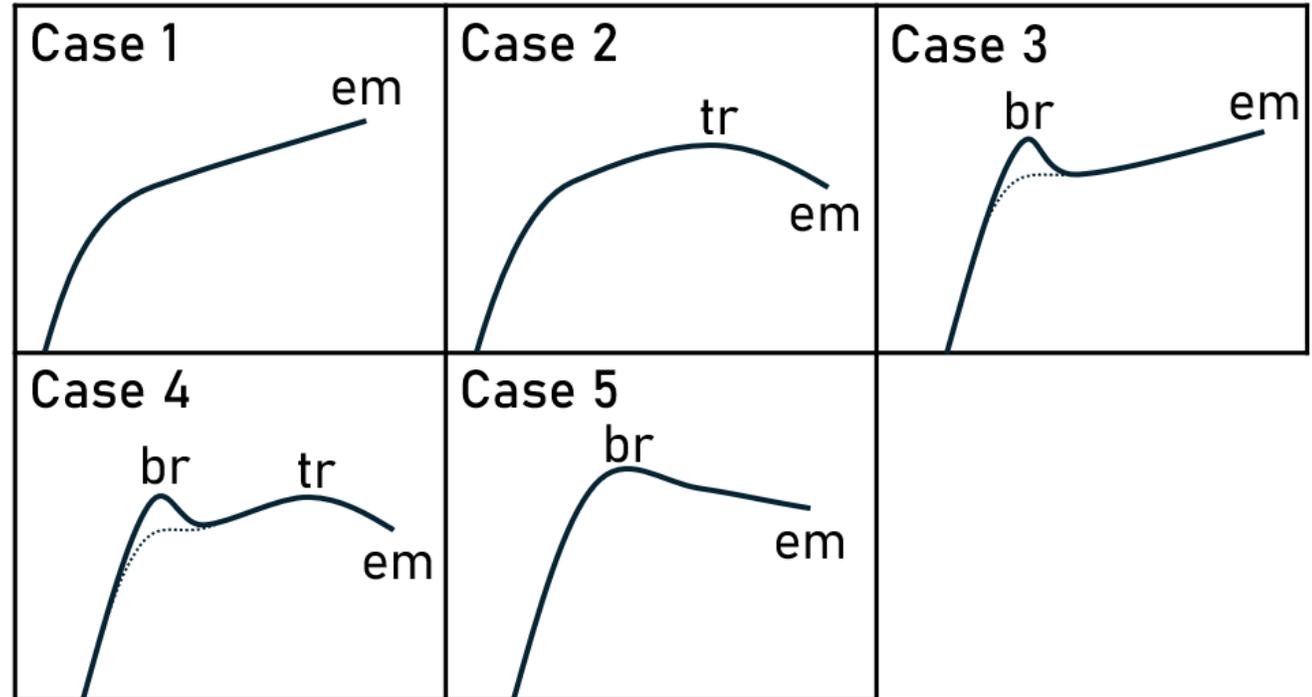
Shock breakout

- 光度曲線 =
相互作用による光度の変化 (先行研究)
+ Shock breakout の寄与 (本研究)
- Shock breakout が起こるとき,
rise time = 拡散の時間スケール



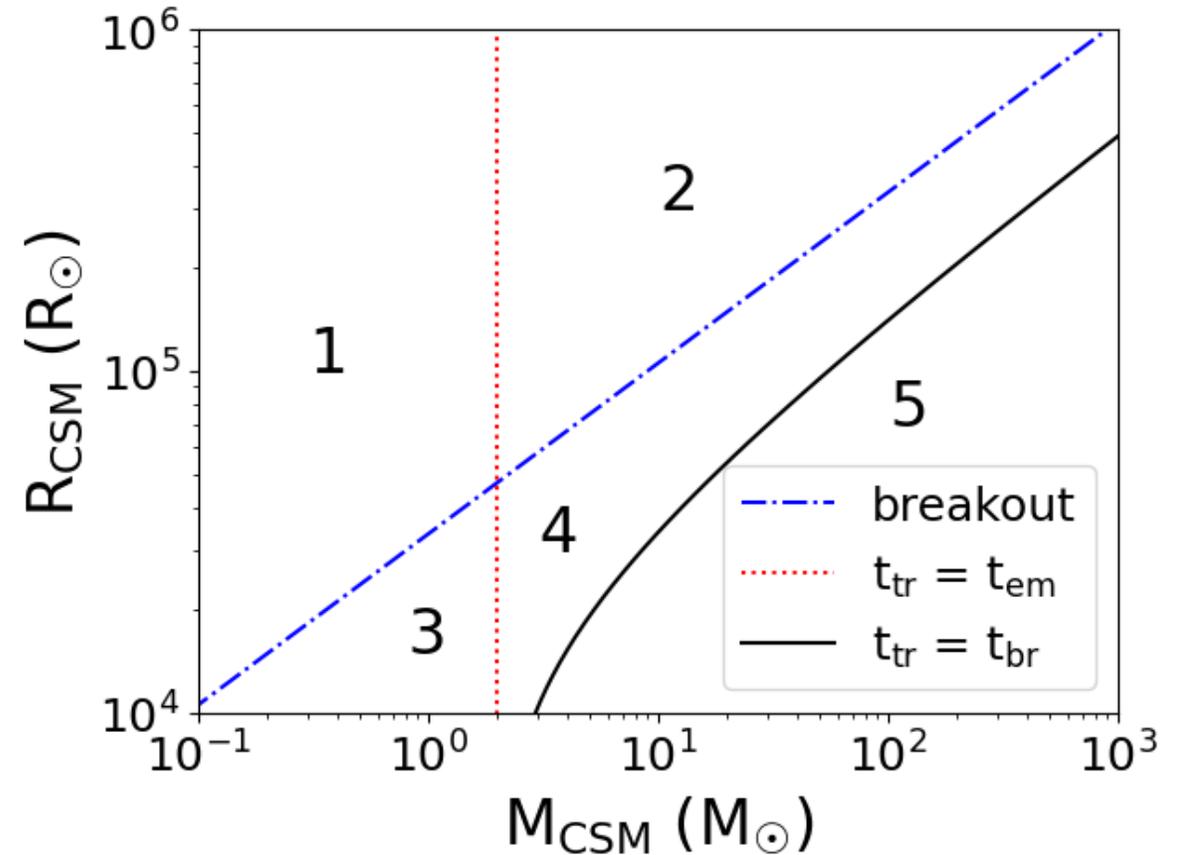
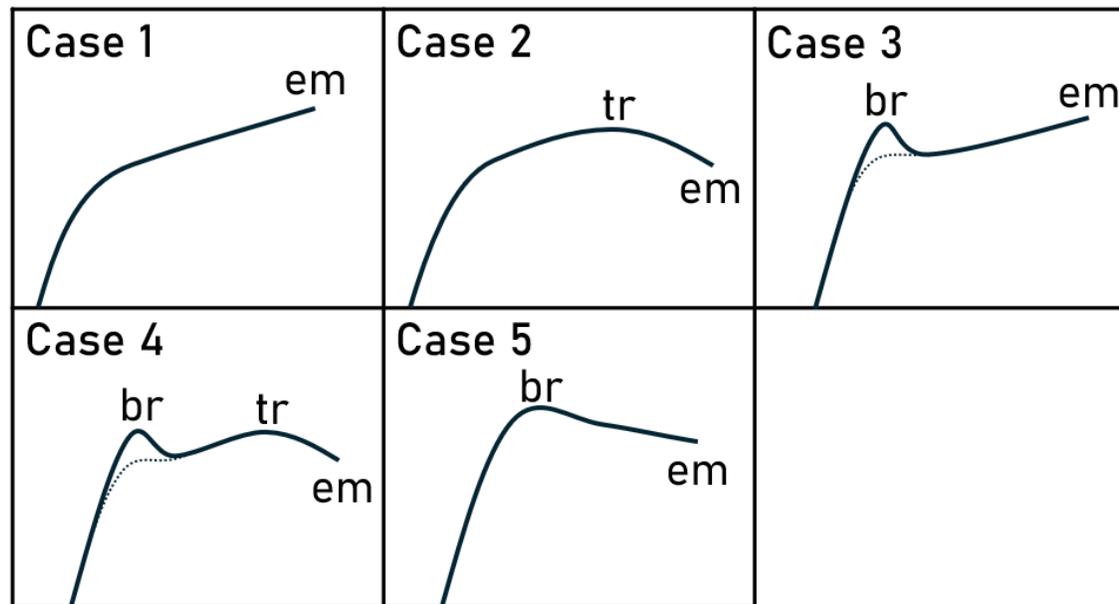
結果: 光度曲線の形状の分類

- 光度曲線 =
相互作用による光度の変化
+ Shock breakout の寄与
- 光度曲線の形状は,
全部で 5 種類



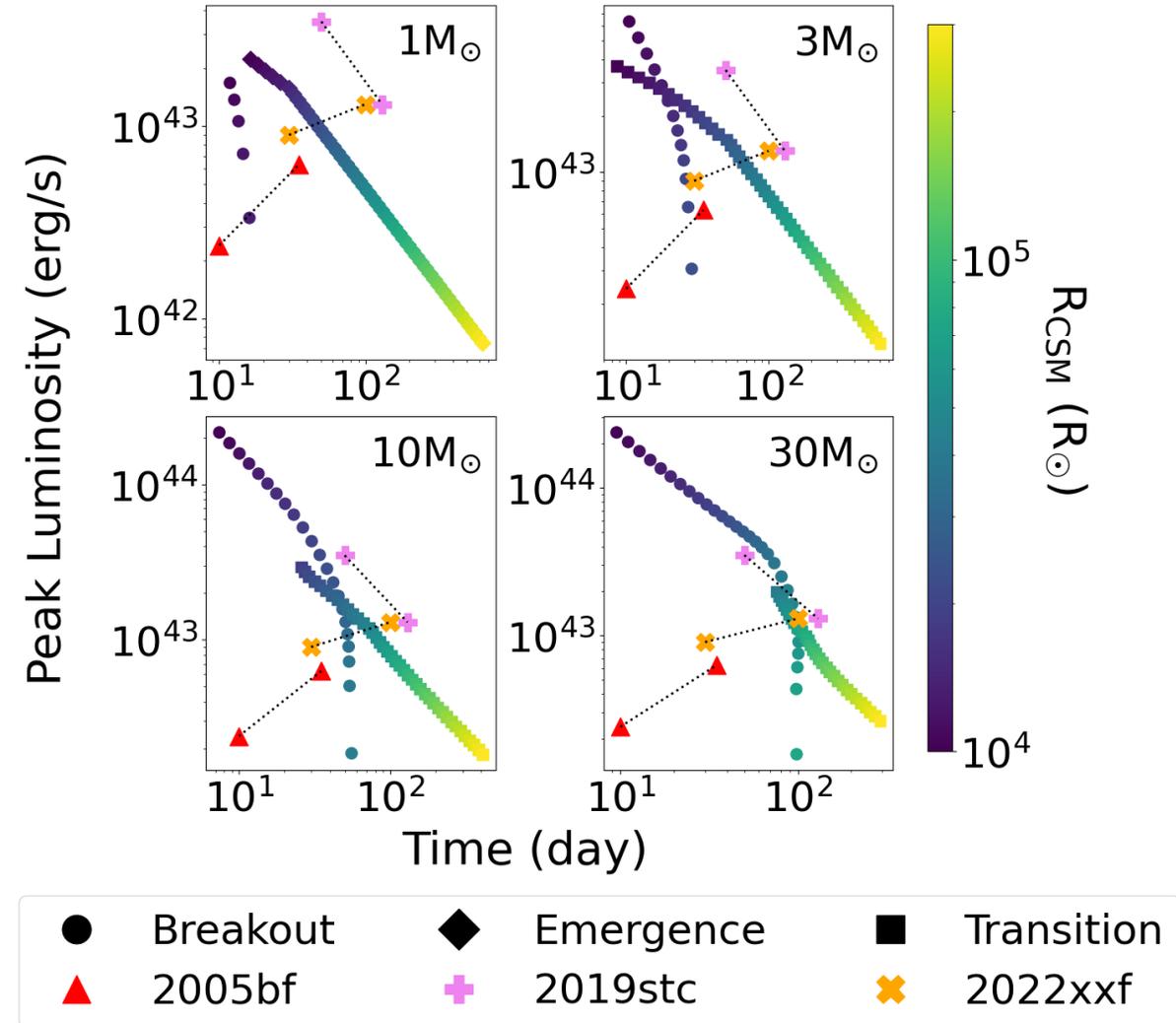
結果: 光度曲線の形状の分類

- 星周物質の質量・半径によって、光度曲線の形状が決まる



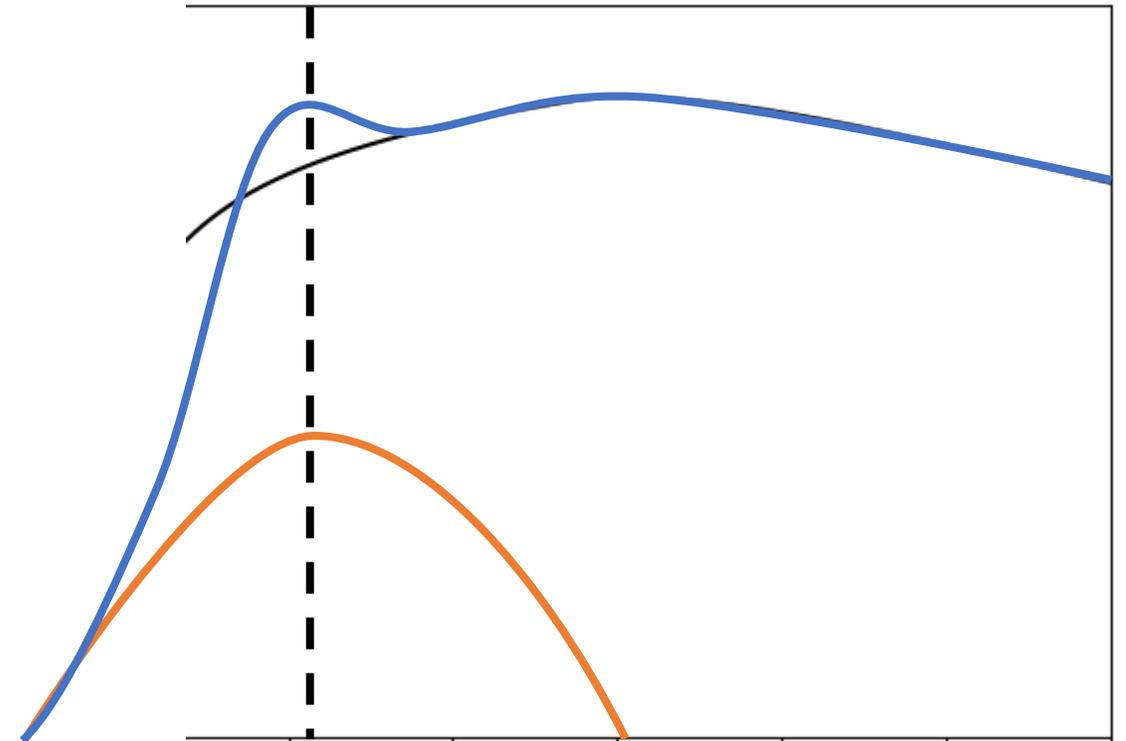
結果: 時間スケールとピーク光度

- 右図は時間スケールと明るさの関係の例
- 星周物質の半径が小さいほど、超新星は明るく、光度曲線の時間スケールが短い



結果: ピークを 2 つもつ光度曲線

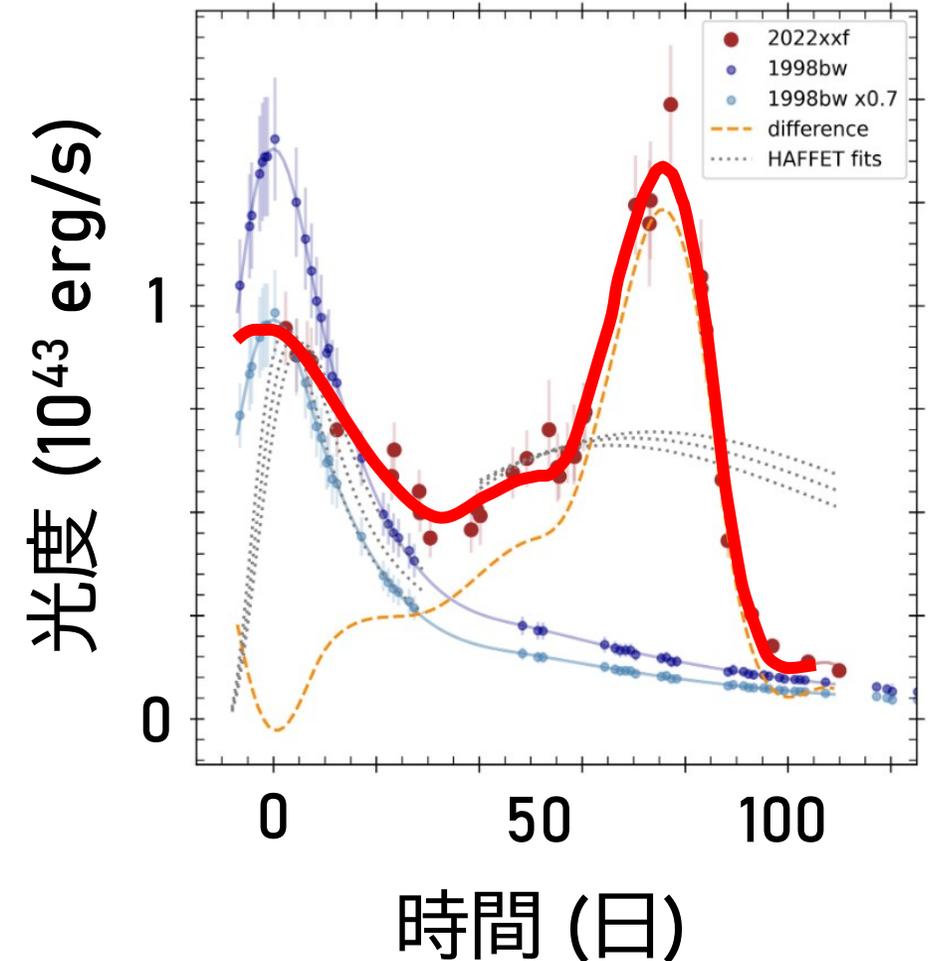
- Shock breakout が発生する場合、光度曲線にピークが 2 つできる可能性がある
- 光度曲線 =
相互作用による光度の変化
+ Shock breakout の寄与



結果: ピークを 2 つもつ光度曲線

(Kuncarayacti+21)

- Shock breakout が発生する場合、光度曲線にピークが 2 つできる可能性がある
- ダブルピークの光度曲線は観測例がいくつかある
 - 例: SN 2022xxf (右図赤線)



結果: ピークを 2 つもつ光度曲線

- 一様な光度曲線を持つモデルで, SN 2022xxf の光度曲線の明るさと 70 日程度のピーク間隔を再現できる
 - 爆発エネルギー: $5\sim 10 \times 10^{51}$ erg
 - エジェクタ質量: $50\sim 150 M_{\odot}$
 - 星周物質の質量: $15\sim 40 M_{\odot}$
 - 星周物質の半径: $\sim 5 \times 10^{15}$ cm

まとめ

- 密度分布が一様に近い星周物質との相互作用で輝く超新星は、非常に遅く (~100 日) 進化する光度曲線を説明できることが知られている
- 本研究によると、同様のタイムスケールで進化するような、ダブルピークの光度曲線を説明することも可能
 - 今後詳しい計算を行う際に、星周物質の密度分布の多様性も重要な側面として考慮が必要

イントロダクション: 重力崩壊型超新星の多様性

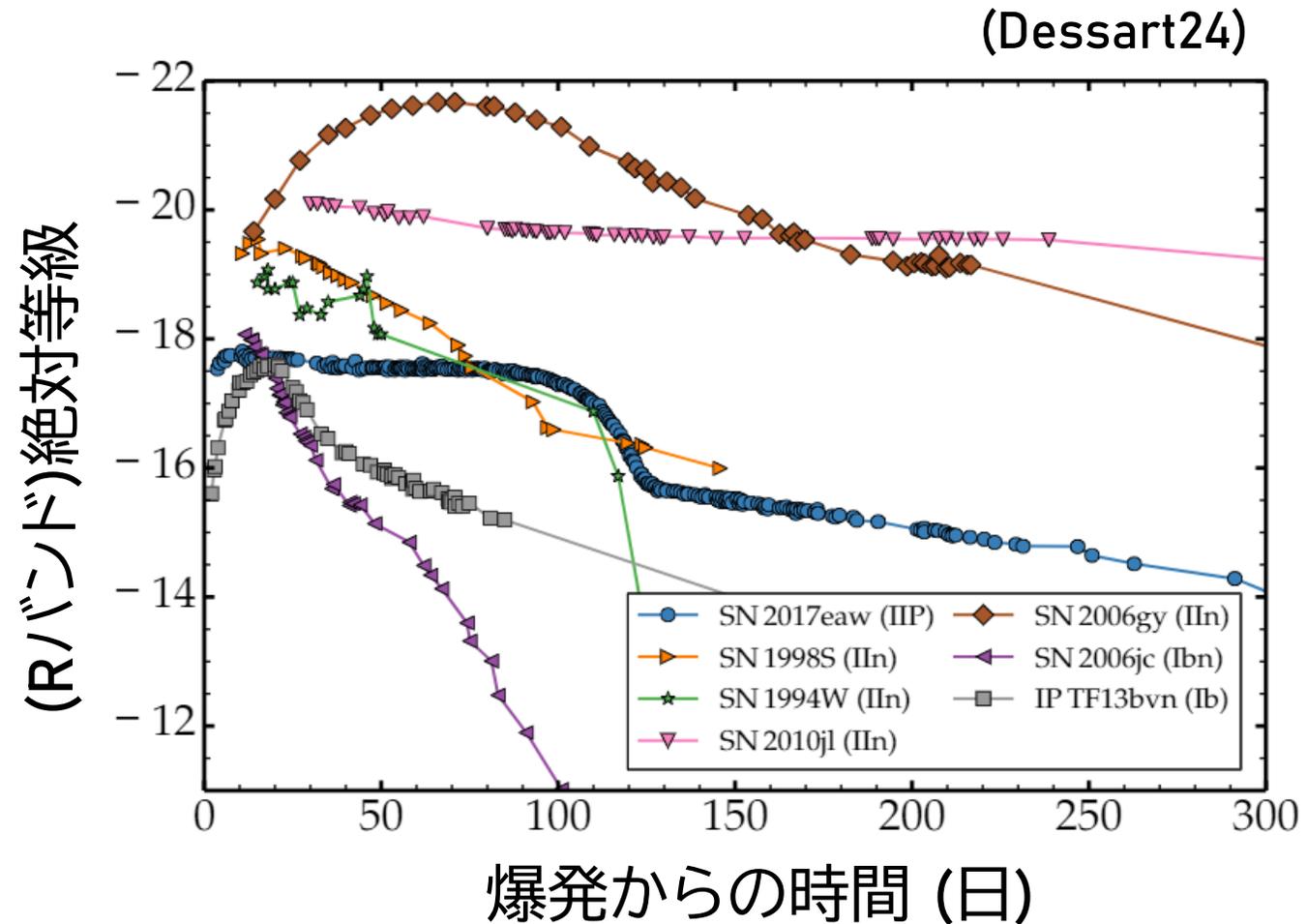
- 右図: 例外的な光度曲線の例

- 青: 典型的な IIP 型超新星

- 茶・桃色: 例外的

光度が大きい (明るい)

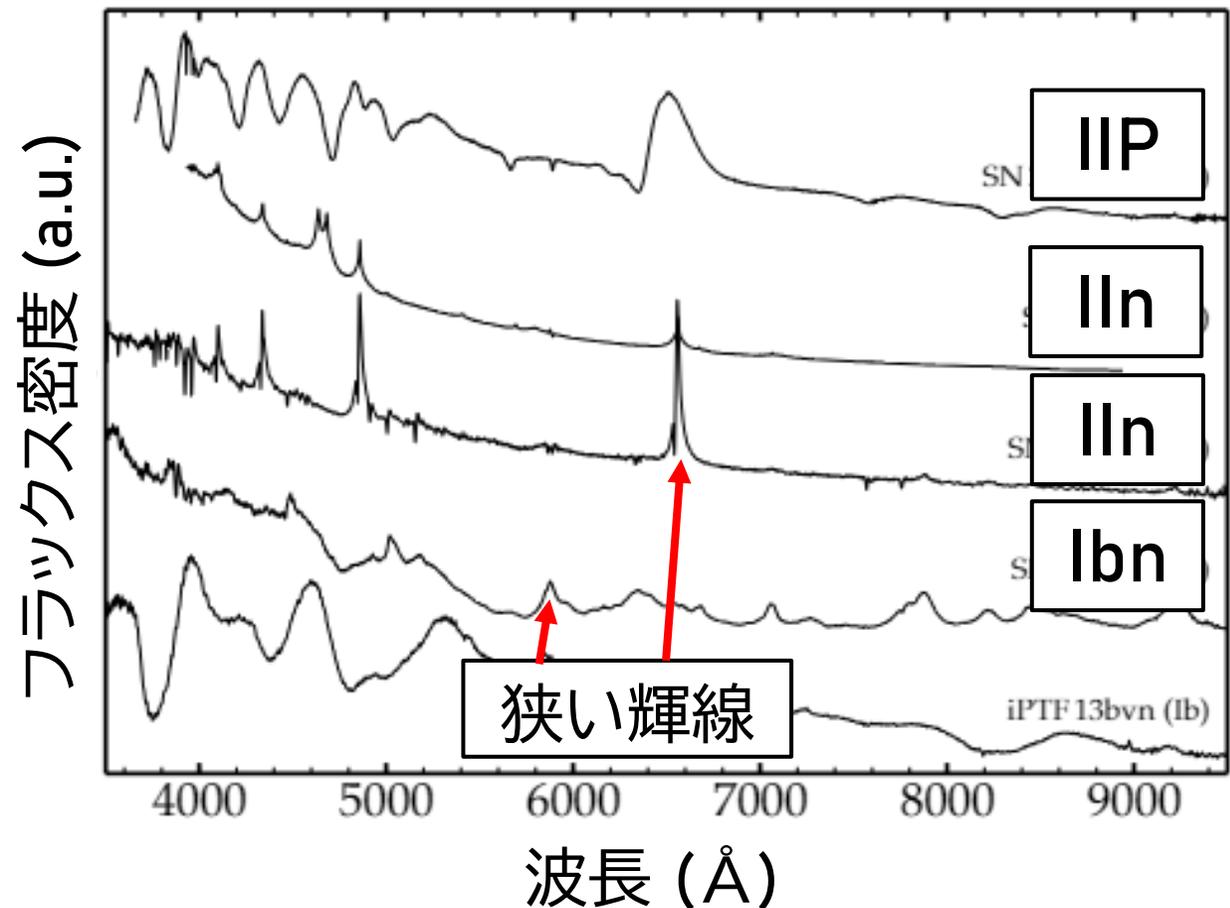
時間変化がゆっくり



イントロダクション: 相互作用型超新星

(Dessart24)

- 重力崩壊型超新星の約1割は、スペクトルに狭い輝線を持つ (IIn 型, Ibn 型, Icn 型)
 - 速度 ~ 1000 km/s
 - 超新星と星周物質との相互作用により形成



相互作用型超新星のモデル化

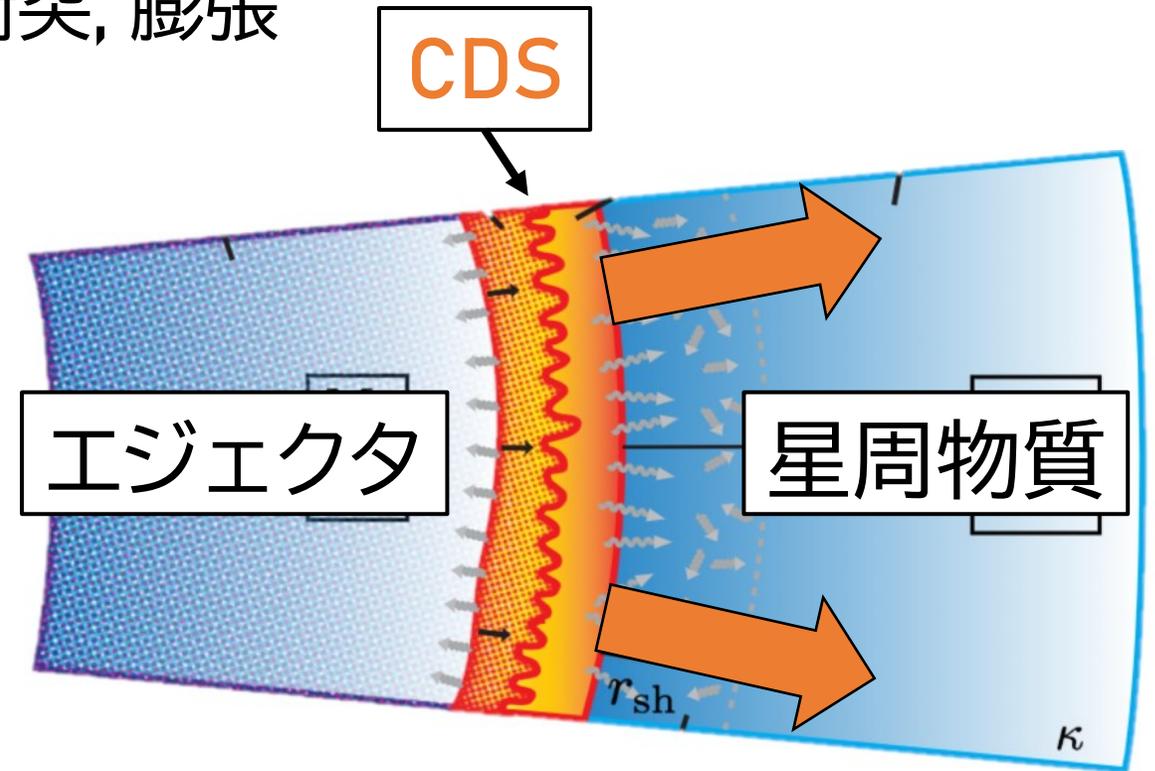
- 超新星エジェクタが星周物質と衝突, 膨張
- エジェクタの密度分布は,
べき乗 2 つの組合せ

(Matzner+99)

$$\rho_{ej} \propto \begin{cases} r^{-\delta} & (v < v_{tr}) \\ r^{-n} & (v > v_{tr}) \end{cases}$$

- $\delta \sim 0, n \sim 10$

- “Homologous expansion” ($v = r/t$)



相互作用型超新星のモデル化

- CDS の時間変化を, 質量保存・運動量保存から立式

$$M_{\text{sh}} \frac{dv_{\text{sh}}}{dt} = 4\pi R_{\text{sh}}^2 \rho_{\text{SN}} (v_{\text{SN}} - v_{\text{sh}})^2 - 4\pi R_{\text{sh}}^2 \rho_{\text{CSM}} (v_{\text{sh}} - v_{\text{CSM}})^2$$

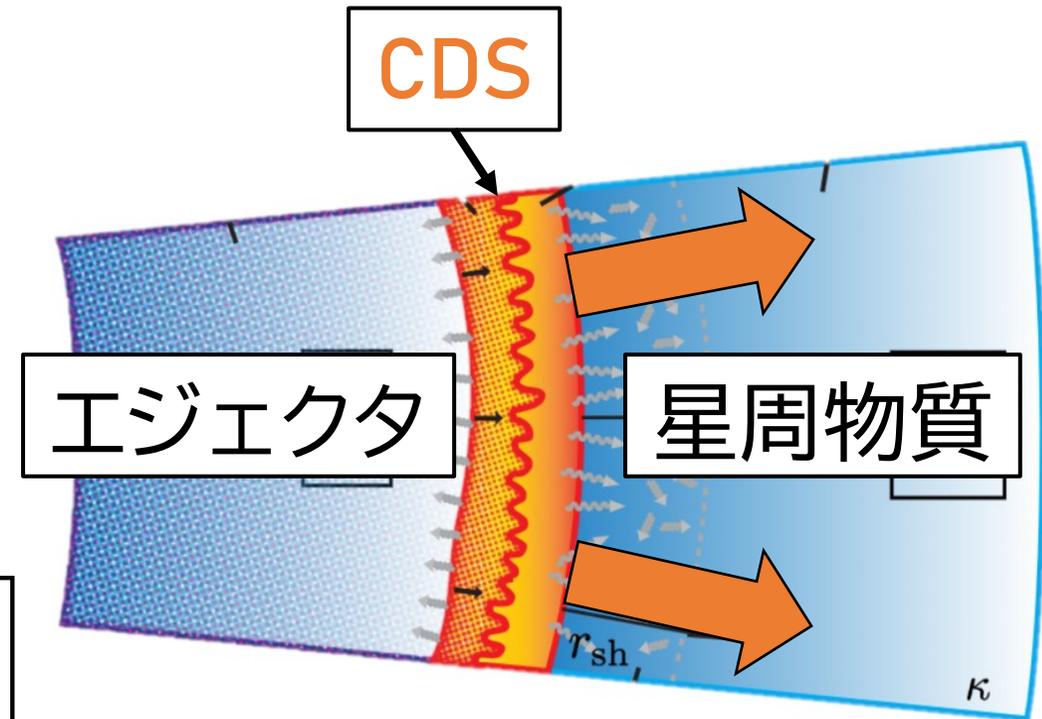
$$\frac{dM_{\text{sh}}}{dt} = 4\pi R_{\text{sh}}^2 \rho_{\text{SN}} (v_{\text{SN}} - v_{\text{sh}}) + 4\pi R_{\text{sh}}^2 \rho_{\text{CSM}} (v_{\text{sh}} - v_{\text{CSM}})$$

- 星周物質の密度分布 $\rho_{\text{CSM}}(r)$ を与えれば, 微分方程式として解ける

相互作用で生じる光度 (L_{int}) の導出

- 星周物質とエジェクタの運動エネルギーが衝突により散逸
- CDS とともに動く系から見て,
単位時間に散逸するエネルギーは

$$4\pi r_{\text{sh}}^2 \left[(v_{\text{sh}} - v_{\text{ej}}) \left(\frac{1}{2} \rho_{\text{ej}} (v_{\text{sh}} - v_{\text{ej}})^2 \right) + (v_{\text{sh}} - v_{\text{CSM}}) \left(\frac{1}{2} \rho_{\text{CSM}} (v_{\text{sh}} - v_{\text{CSM}})^2 \right) \right]$$



相互作用で生じる光度 (L_{int}) の導出

- 衝突により散逸したエネルギーの一部が放射される
- 放射への変換効率を ε とすると,

$$L_{\text{int}} = \varepsilon \frac{dE_{\text{kin}}}{dt}$$
$$= 2\pi\varepsilon r_{\text{sh}}^2 [\rho_{\text{ej}}(v_{\text{sh}} - v_{\text{ej}})^3 + \rho_{\text{CSM}}(v_{\text{sh}} - v_{\text{CSM}})^3]$$

相互作用で生じる光度 (L_{int}) の時間変化

- 超新星エジェクタの外部が相互作用しているとき... $\rho_{\text{ej}} \propto \begin{cases} r^{-\delta} & (v < v_{\text{tr}}) \text{ 内部} \\ r^{-n} & (v > v_{\text{tr}}) \text{ 外部} \end{cases}$

- CDS の半径変化

$$r_{\text{sh}}(t) = \left[\frac{(3-s)(4-s)}{4\pi D(n-4)(n-3)(n-\delta)} \frac{[2(5-\delta)(n-5)E_{\text{ej}}]^{(n-3)/2}}{[(3-\delta)(n-3)M_{\text{ej}}]^{(n-5)/2}} \right]^{1/n} t^{(n-3)/(n-s)}$$

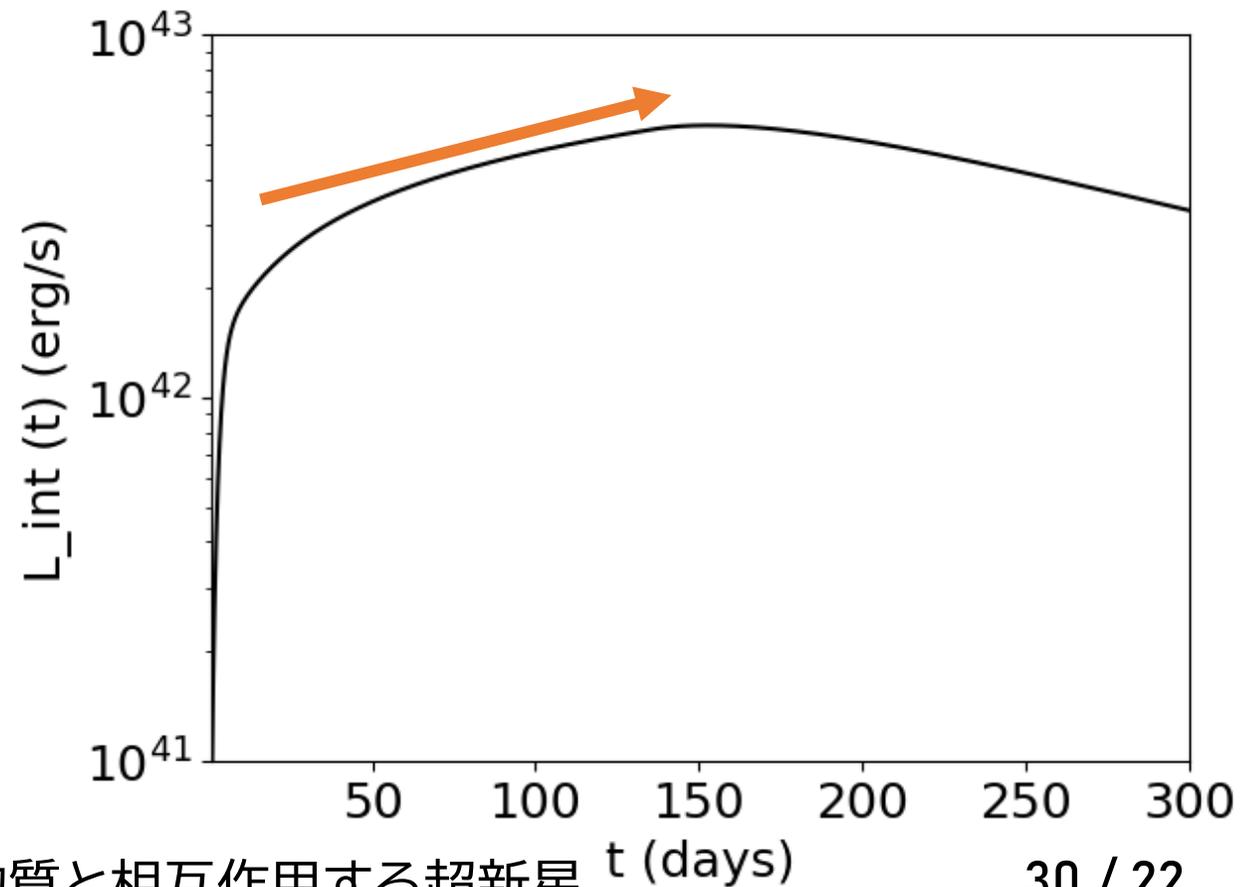
- L_{int} の変化

$$L_{\text{int}}(t) = \frac{\varepsilon}{2} (4\pi D)^{(n-5)/(n-s)} \left(\frac{n-3}{n-s} \right)^3 \left[\frac{(3-s)(4-s)}{(n-4)(n-3)(n-\delta)} \right]^{(5-s)/(n-s)} \frac{[2(5-\delta)(n-5)E_{\text{ej}}]^{(n-3)/2}}{[(3-\delta)(n-3)M_{\text{ej}}]^{(n-5)/2}} t^{(6s-15+2n-ns)/(n-s)}$$

時間依存性

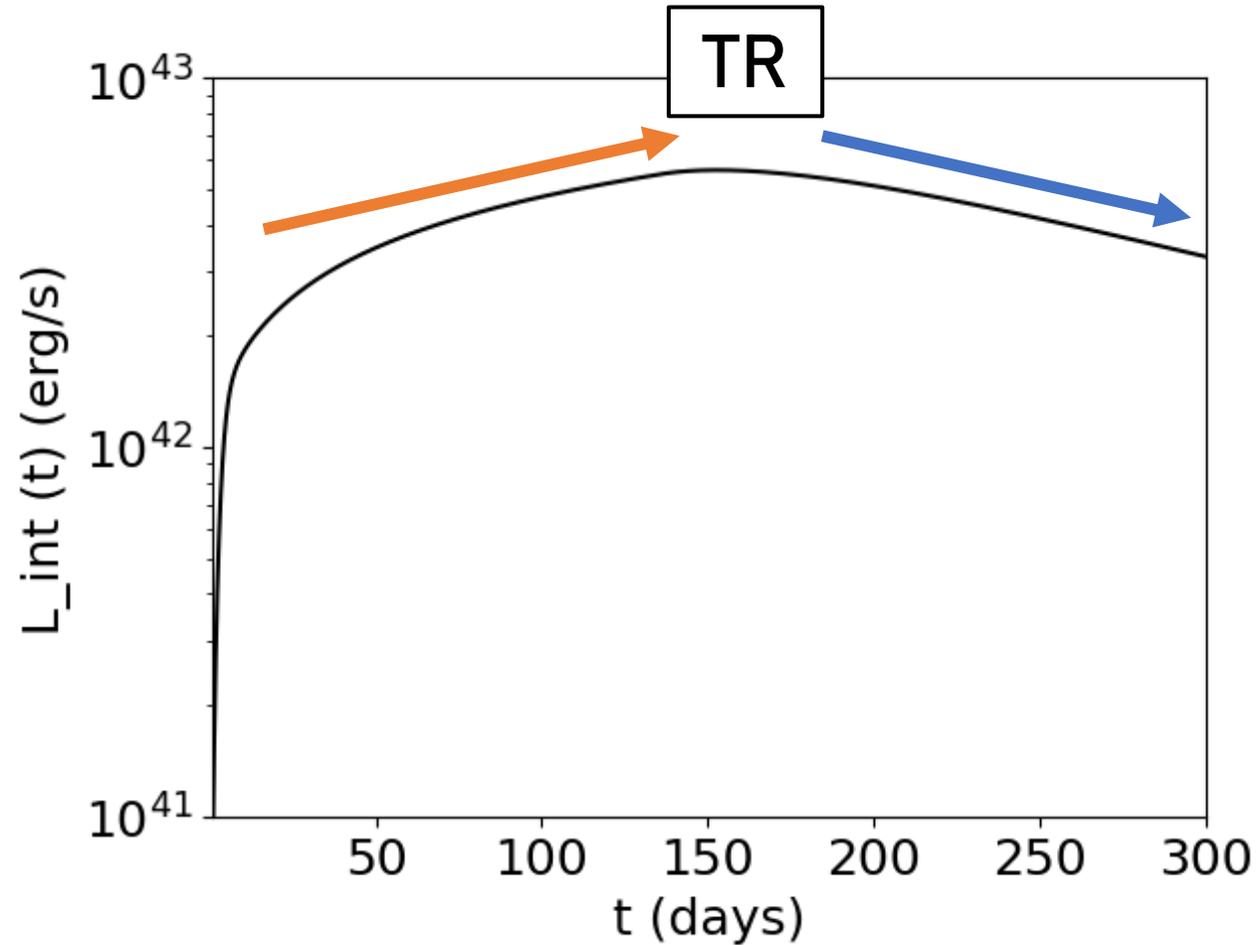
相互作用で生じる光度 (L_{int}) の時間変化

- 超新星エジェクタの外部が相互作用しているとき...
- 星周物質が恒星風の分布
($\rho_{\text{CSM}} \propto r^{-2}$) なら, $L_{\text{int}} \propto t^{-3/8}$
- 星周物質が一様分布
($\rho_{\text{CSM}} = \text{一定}$) なら, $L_{\text{int}} \propto t^{1/2}$
- エジェクタの外部が相互作用しているとき, L_{int} は**単調増加**



L_{int} の時間変化

- エジェクタの外部が相互作用しているとき, L_{int} は**増加**
- エジェクタの内部が相互作用しているとき, L_{int} は**減少**
- エジェクタの内部が相互作用を始めた時, L_{int} は**最大**



Shock breakout に伴う光度の概算

- Breakout までの間に CDS に蓄えられる光子の総エネルギーは,

$$E = \int_0^{t_{\text{br}}} L_{\text{int}}(t) dt$$

- t_{br} : shock breakout が起こる時間
- Breakout に伴い, 総エネルギー E の放射が星周物質を拡散して抜ける
- 光度曲線への shock breakout の寄与は最大で $L_{\text{br}} \sim E / t_{\text{diff}}$
- t_{diff} : 拡散の時間スケール