Delayed Thermalization Effects in Thermonuclear Supernovae

Elvis do A. Soares
Instituto de Física, UFRJ, Rio de Janeiro

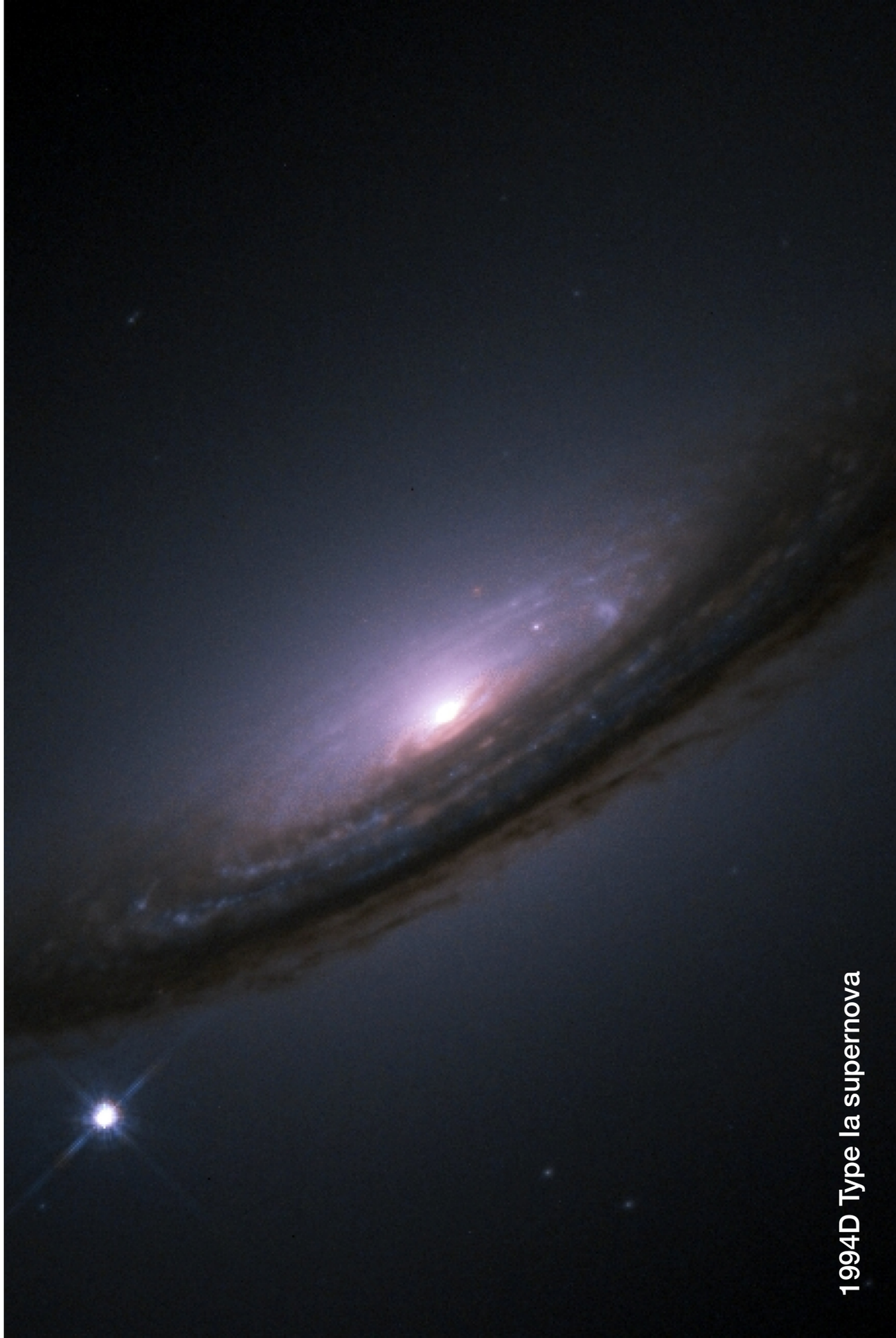
IV Oficina Carioca de Cosmologia e Gravitação
Observatório Nacional, 20 de abril de 2016

Supernovas Termonucleares

Supernovas do Tipo Ia

- Energia cinética do material em expansão (velocidades entre 5000 e 10 000 km/s): $\sim 10^{51} erg$
- Energia integrada sobre a curva de luz: $\sim 10^{49} erg$

- **Fonte de energia:** processos termonucleares do material rico em C-O em elementos mais pesados.
- A queima de $\sim 1 M_{\odot}$ de C-O fornece $\sim 10^{18} erg/g$, levando aos necessários $\sim 10^{51} erg$



Hoyle F and Fowler W A 1960 Astrophys. J. 132 565

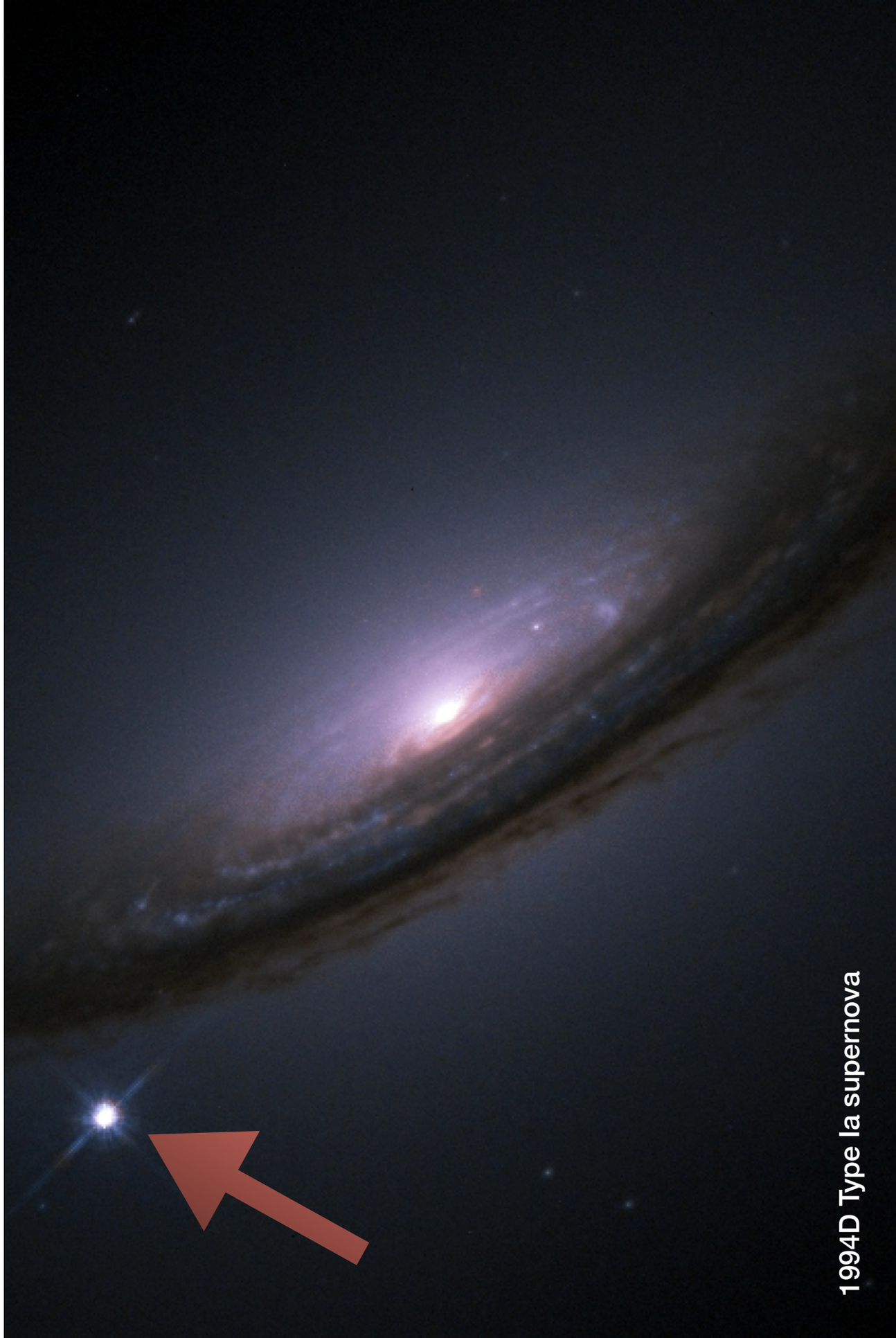
Supernovas do Tipo Ia

- Energia cinética do material em expansão (velocidades entre 5000 e 10 000 km/s): $\sim 10^{51} erg$

- Energia integrada sobre a curva de luz: $\sim 10^{49} erg$

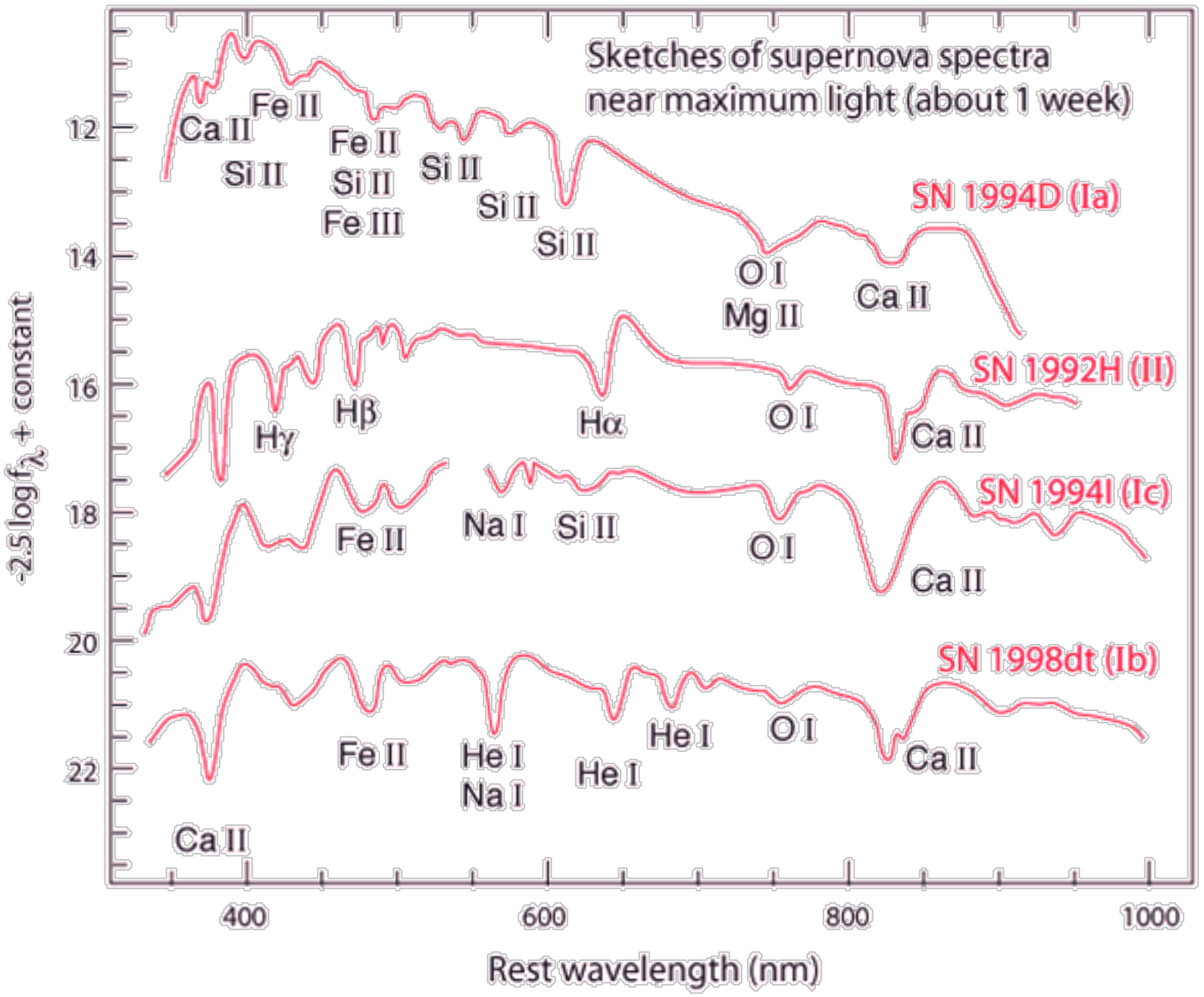
- **Fonte de energia:** processos termonucleares do material rico em C-O em elementos mais pesados.

- A queima de $\sim 1 M_{\odot}$ de C-O fornece $\sim 10^{18} erg/g$, levando aos necessários $\sim 10^{51} erg$



Hoyle F and Fowler W A 1960 Astrophys. J. 132 565

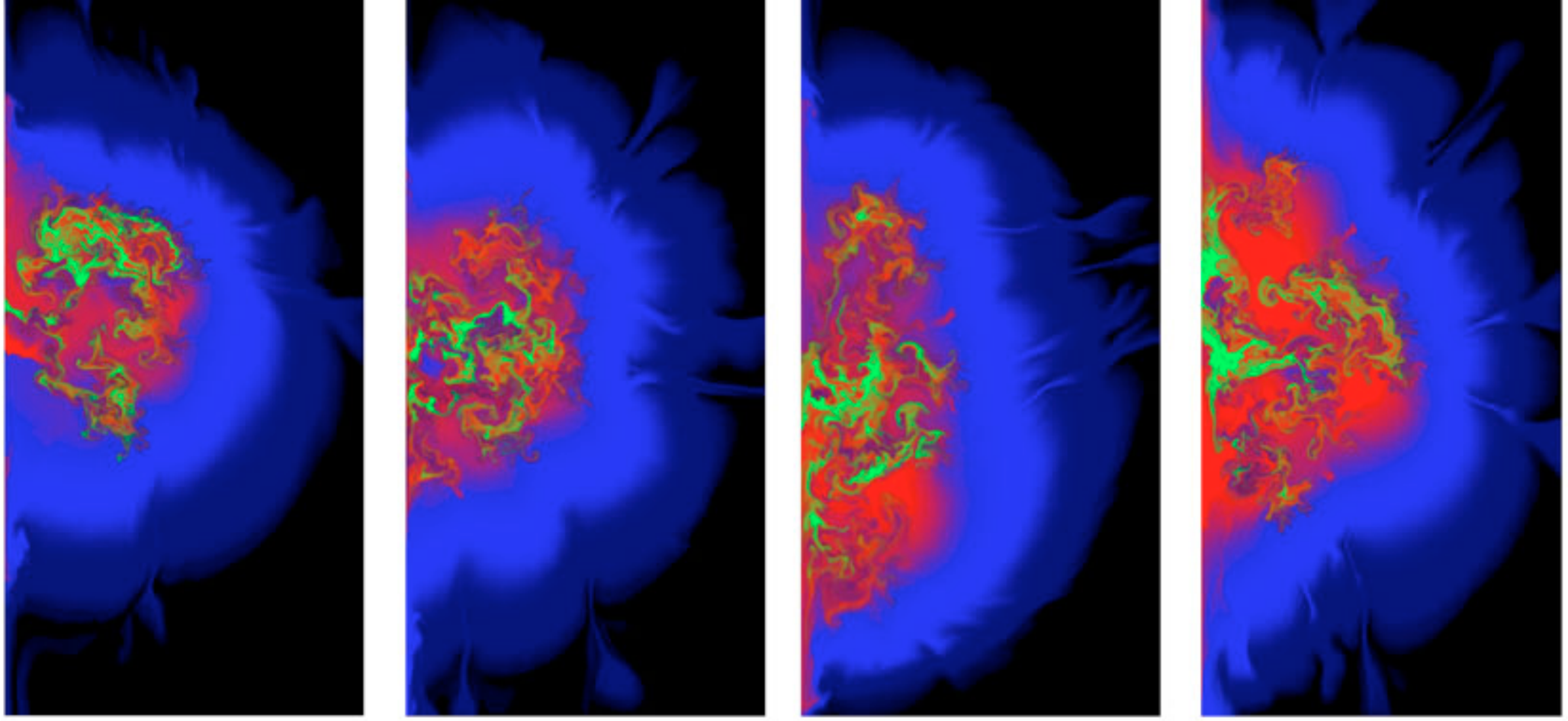
Harkness R P and Wheeler J C 1990 Supernovae ed A G Petschek (New York: Springer) p 1



- O espectro próximo ao máximo é dominado por: **Si, Ca, Mg, S e O**;
- Após uma semana: **Fe II**

Simulações Atuais

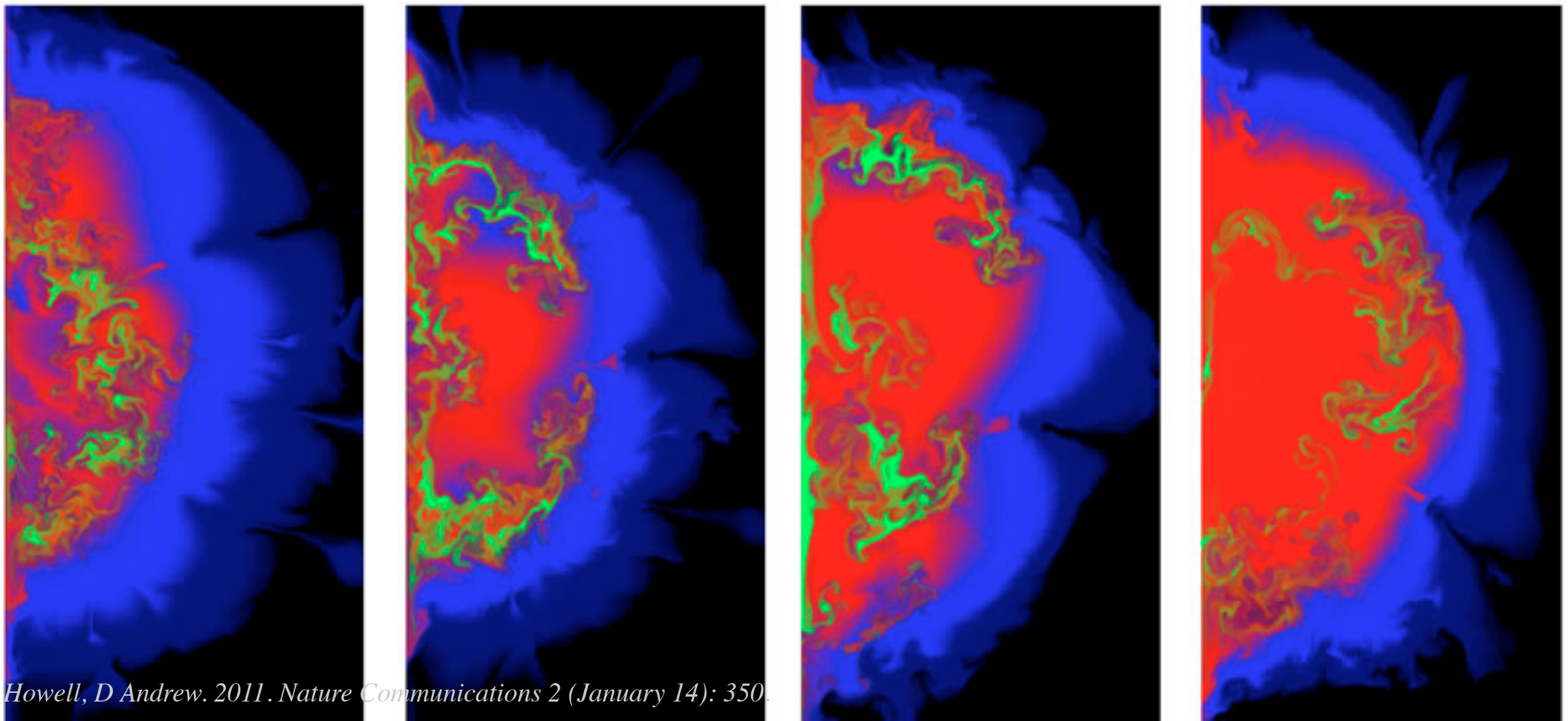
Strong deflagration
Weak detonation



[Si]

Ni

[Fe]

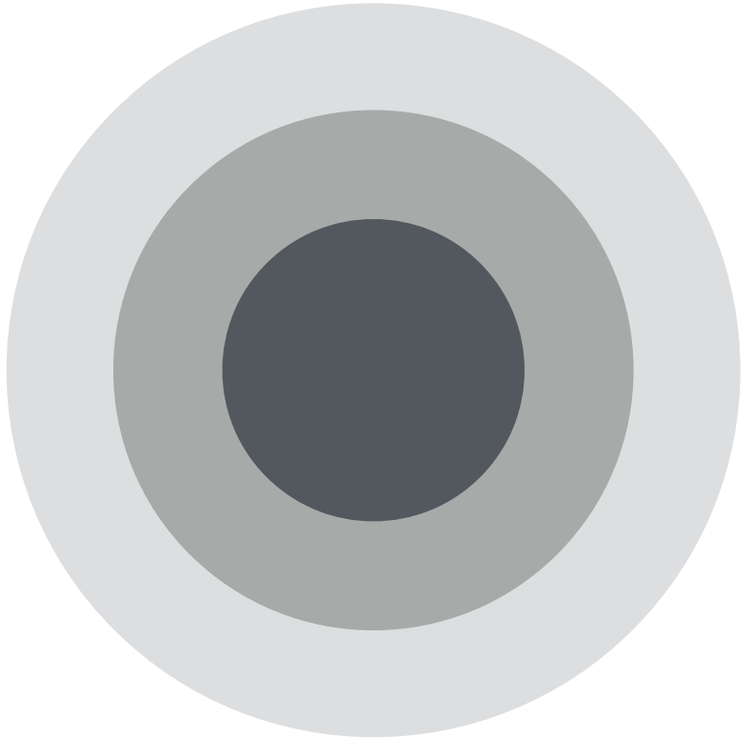


Weak deflagration
Strong detonation

Howell, D Andrew. 2011. Nature Communications 2 (January 14): 350

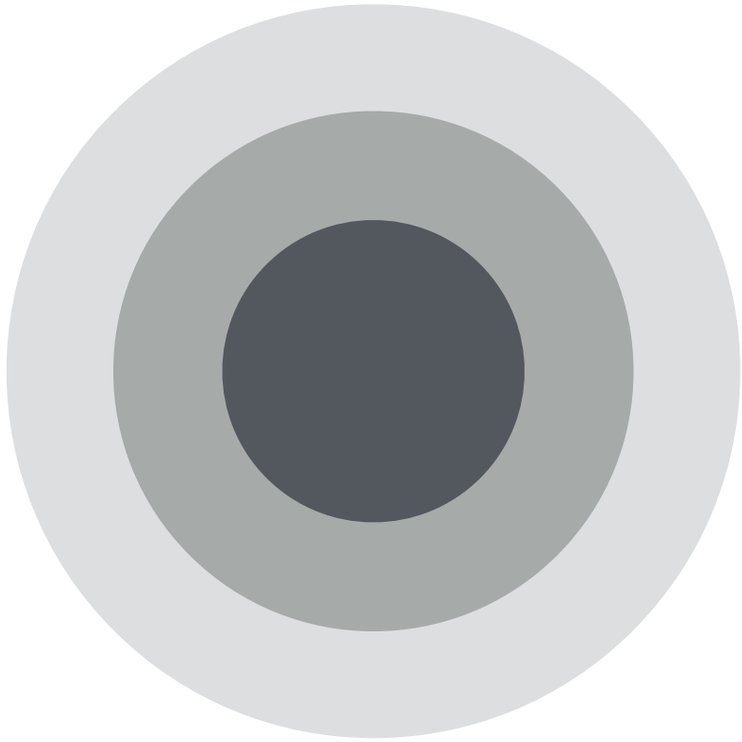
Termalização Atrasada em Supernovas

Motivação



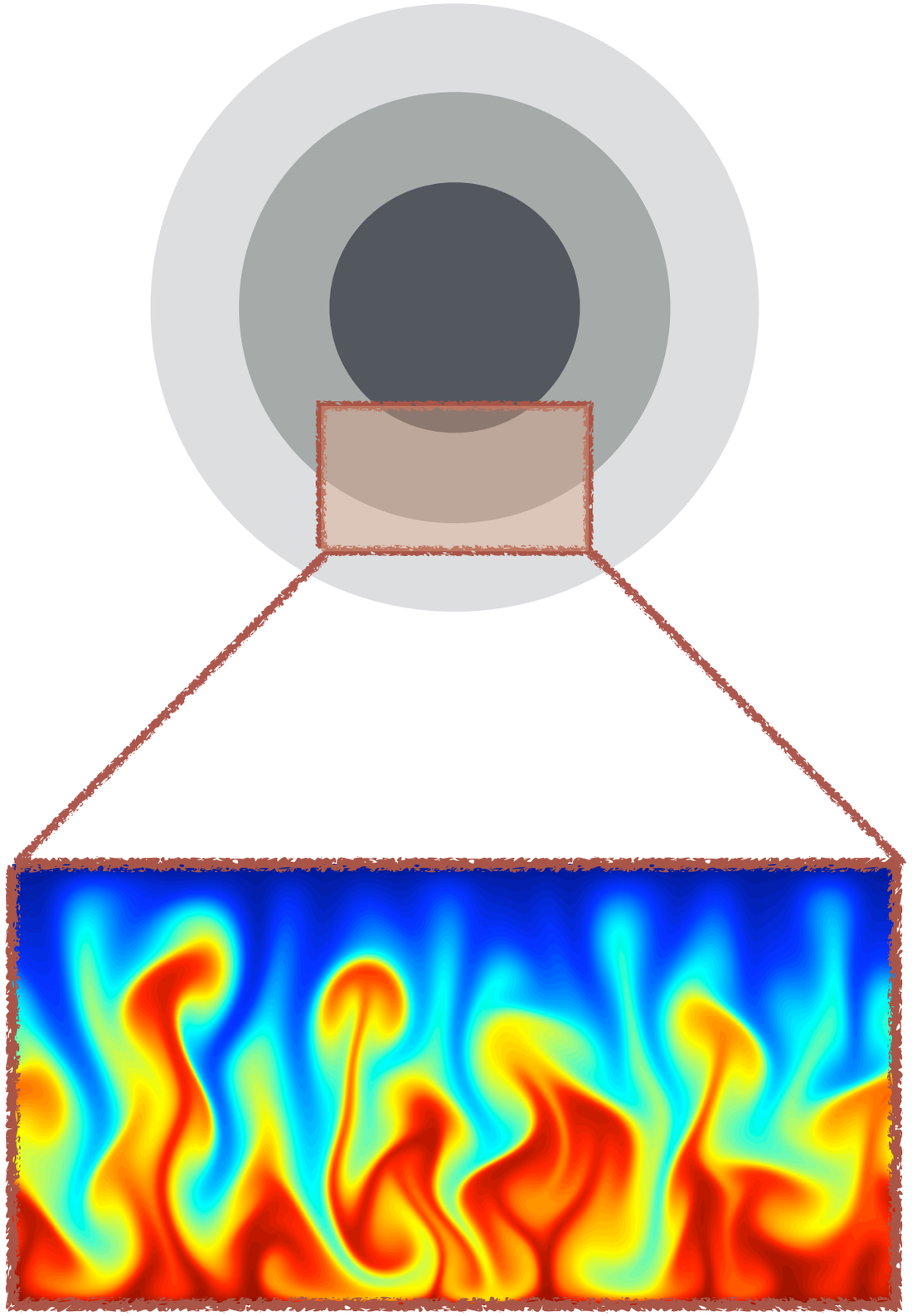
Motivação

- Mudanças violentas nas coordenadas geram movimento não-laminar (vórtices, turbulência, ...).



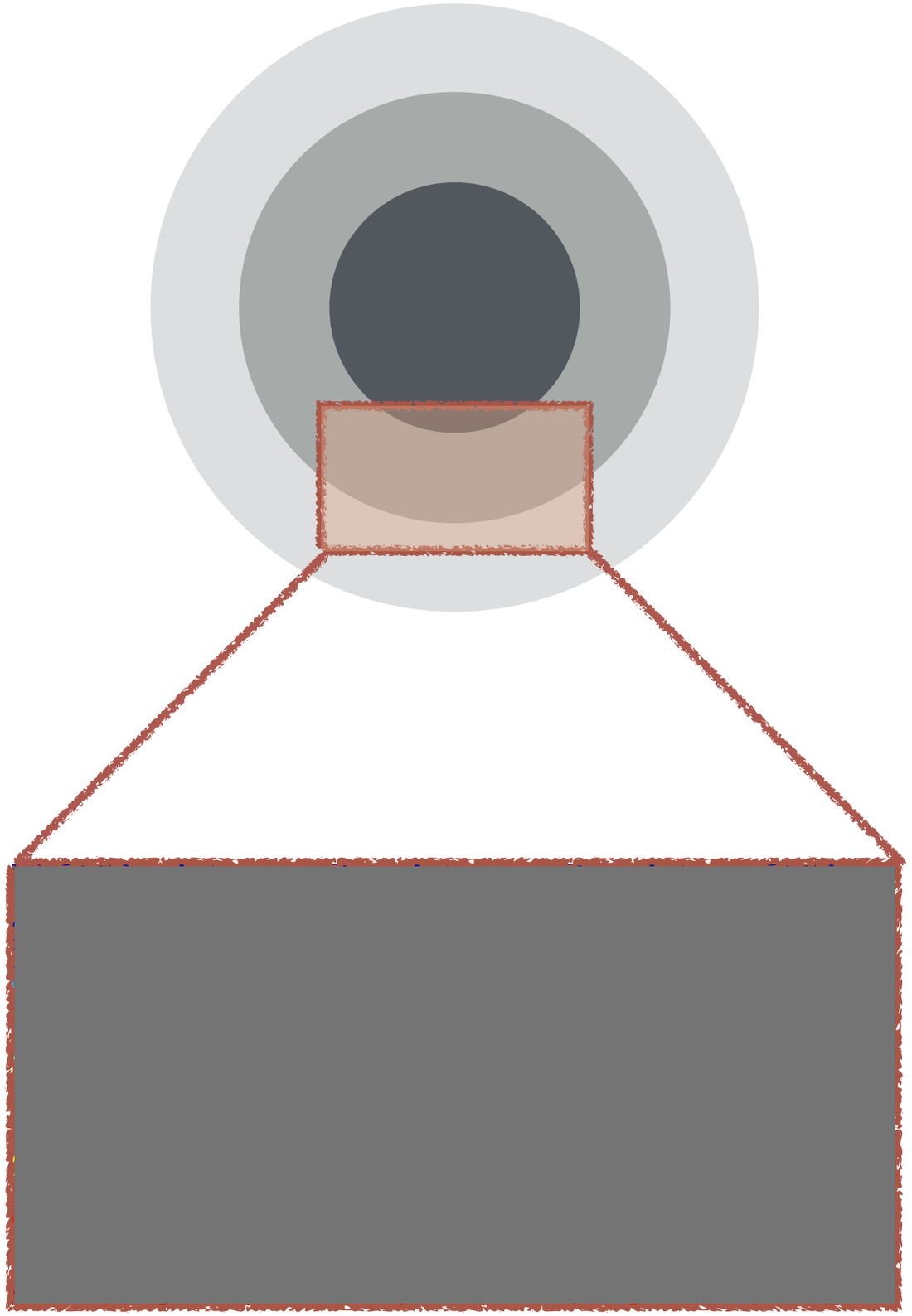
Motivação

- Mudanças violentas nas coordenadas geram movimento não-laminar (vórtices, turbulência, ...).
- Escalas menores que célula numérica.



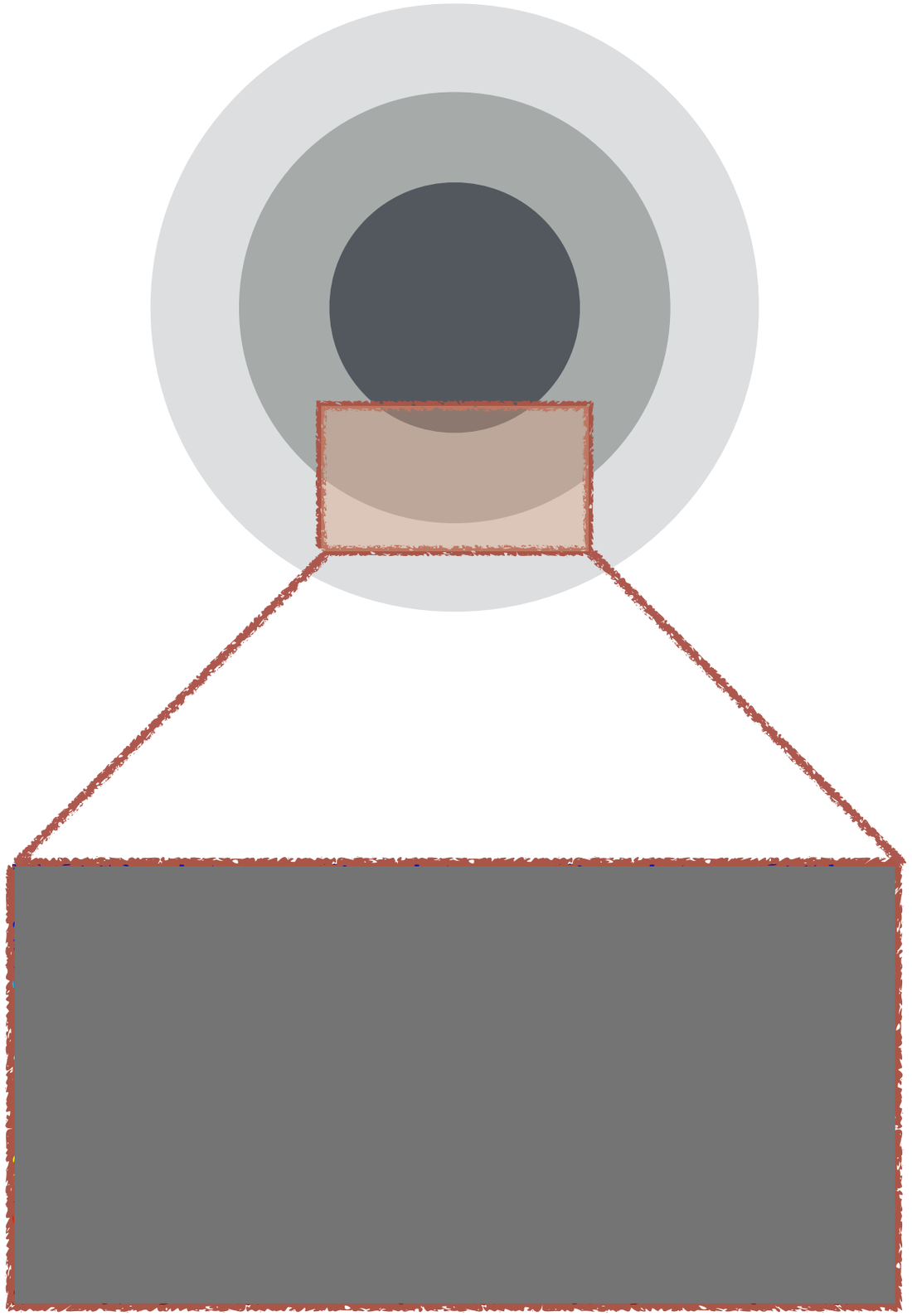
Motivação

- Mudanças violentas nas coordenadas geram movimento não-laminar (vórtices, turbulência, ...).
- Escalas menores que célula numérica.
- Invisíveis ao cálculo numérico até termalização



Motivação

- Mudanças violentas nas coordenadas geram movimento não-laminar (vórtices, turbulência, ...).
- Escalas menores que célula numérica.
- Invisíveis ao cálculo numérico até termalização



- **Atrasam** o equilíbrio térmico do elemento de fluido.

Modelo

$$\frac{dU}{dt} = -p\frac{dV}{dt} + \dot{Q},$$

Modelo

$$\frac{dU}{dt} = -p\frac{dV}{dt} + [\dot{Q}],$$

$$[\dot{Q}] = \int_{-\infty}^{t} dt' G(t,t')\dot{Q}(t'),$$

Modelo

Características gerais:

(1) seja normalizado, isto é

$$\int_{-\infty}^{\infty} dt' G(t,t') = 1;$$

(2) seja uma função de $t - t'$, isto é, o processo de retardamento é não-Markoviano;

(3) deve ser zero para $t - t'$ grande;

(4) o principal efeito pode ser representado por um único tempo de relaxação τ.

$$\frac{dU}{dt} = -p\frac{dV}{dt} + [\dot{Q}],$$

$$[\dot{Q}] = \int_{-\infty}^{t} dt' G(t,t')\dot{Q}(t'),$$

Modelo

Características gerais:

(1) seja normalizado, isto é

$$\int_{-\infty}^{\infty} dt' G(t,t') = 1;$$

(2) seja uma função de $t - t'$, isto é, o processo de retardamento é não-Markoviano;

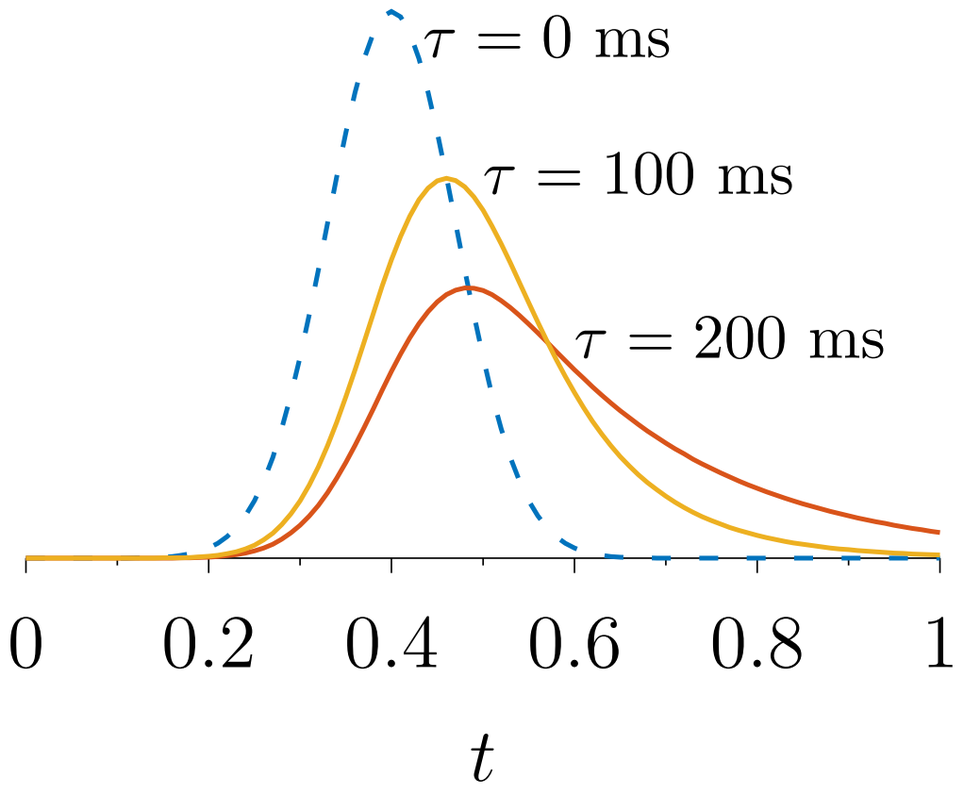
(3) deve ser zero para $t - t'$ grande;

(4) o principal efeito pode ser representado por um único tempo de relaxação τ.

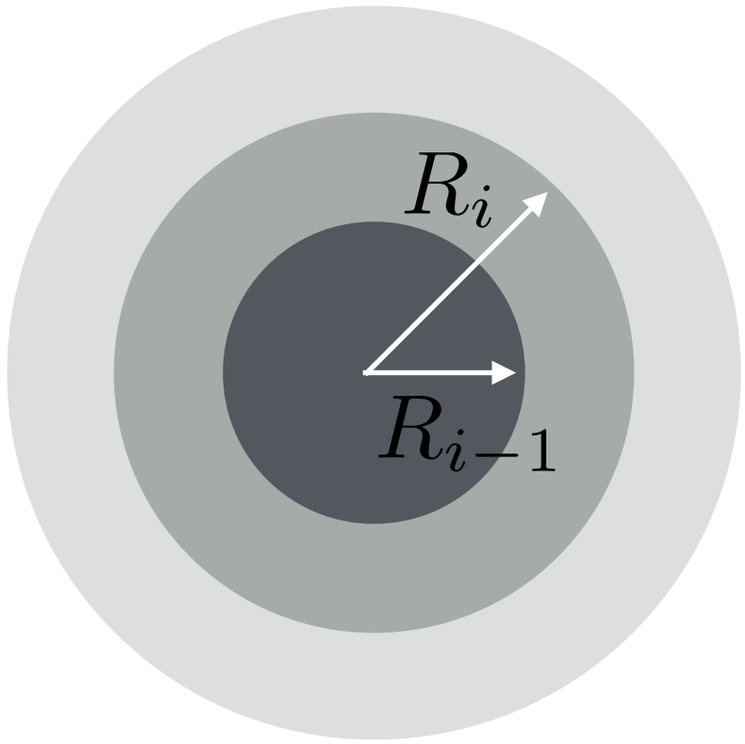
$$G(t,t') = \frac{1}{\tau} e^{-(t-t')/\tau}$$

$$\frac{dU}{dt} = -p\frac{dV}{dt} + [\dot{Q}],$$

$$[\dot{Q}] = \int_{-\infty}^{t} dt' G(t,t') \dot{Q}(t'),$$

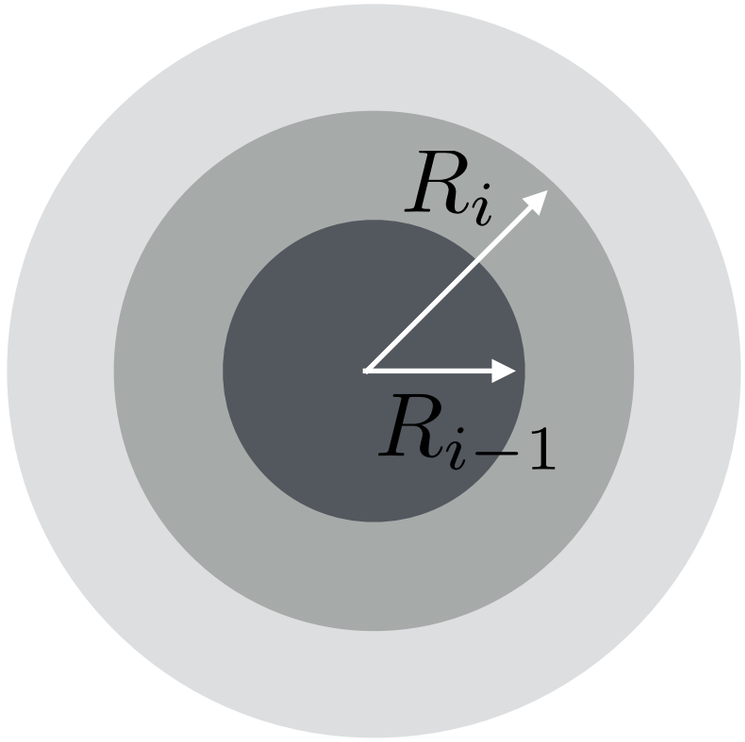


Modelagem Computacional


R_i
R_{i-1}

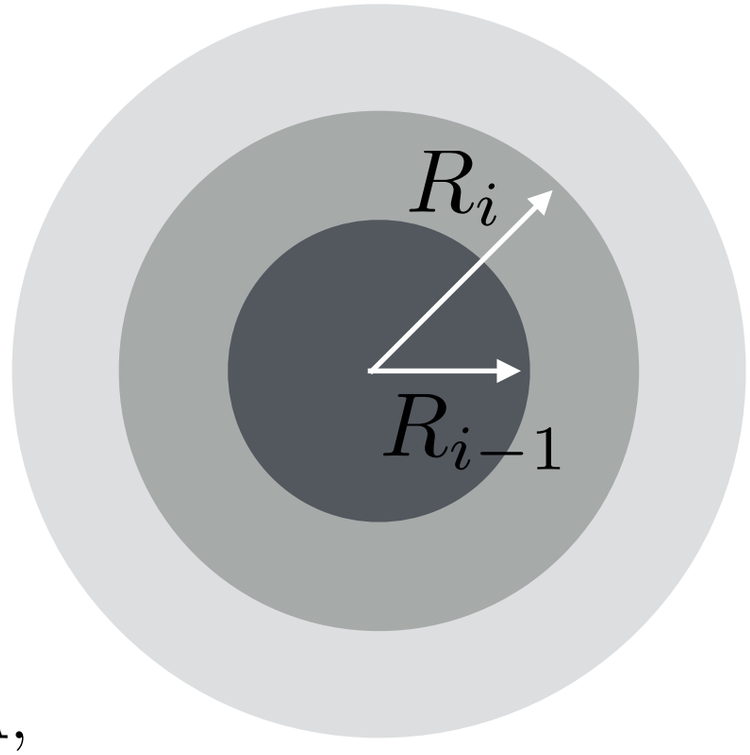
- Lagrangiana Efetiva:

$$\mathcal{L}(\{R_i\},\{T_i\},\{\boldsymbol{Y}_i\}) = \sum_{i=1}^{N} K^{(i)} - V^{(i)}_{\rm grav} - U^{(i)}$$



- Lagrangiana Efetiva:

$$\mathcal{L}(\{R_i\},\{T_i\},\{\boldsymbol{Y}_i\}) = \sum_{i=1}^{N} K^{(i)} - V^{(i)}_{\rm grav} - U^{(i)}$$

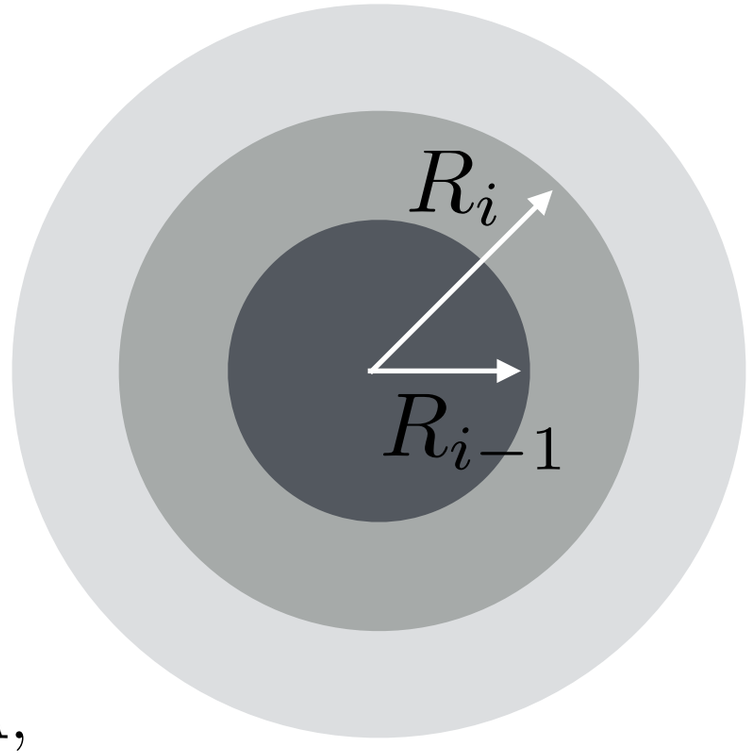


- Equações de evolução:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{R}_i}\right) = \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial R_i}, \qquad \frac{dU}{dt} = -p\frac{dV}{dt} + \dot{Q}, \qquad \frac{d\boldsymbol{Y}}{dt} = \dot{\boldsymbol{\Lambda}},$$

- Lagrangiana Efetiva:

$$\mathcal{L}(\{R_i\},\{T_i\},\{\boldsymbol{Y}_i\}) = \sum_{i=1}^{N} K^{(i)} - V^{(i)}_{\rm grav} - U^{(i)}$$



- Equações de evolução:

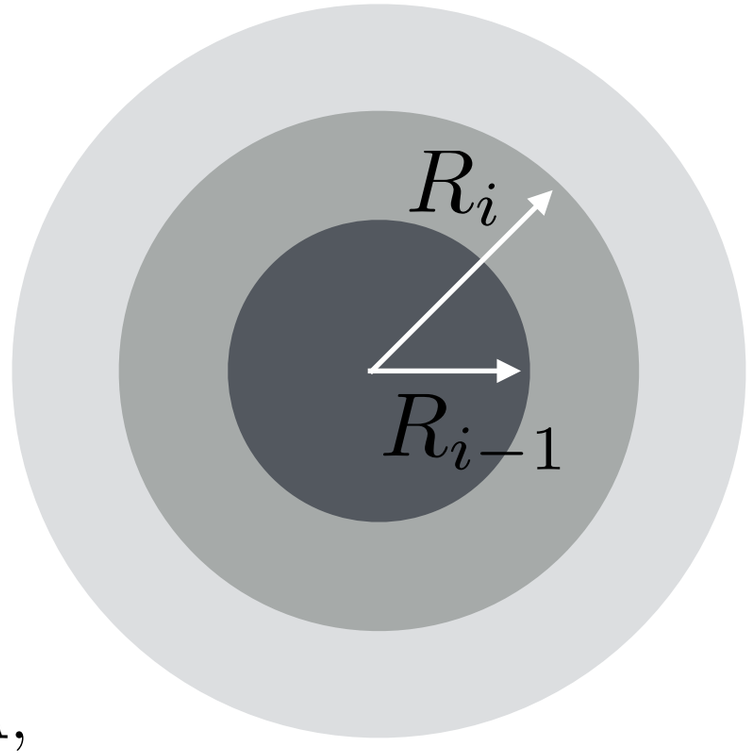
$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{R}_i}\right) = \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial R_i}, \qquad \frac{dU}{dt} = -p\frac{dV}{dt} + \dot{Q}, \qquad \frac{d\boldsymbol{Y}}{dt} = \dot{\boldsymbol{\Lambda}},$$

- Equação de estado:

$$u(\rho, T) = u_{\rm ion} + u_{\rm rad} + u_{\rm ele} + u_{\rm pos}$$

- Lagrangiana Efetiva:

$$\mathcal{L}(\{R_i\},\{T_i\},\{\boldsymbol{Y}_i\}) = \sum_{i=1}^{N} K^{(i)} - V^{(i)}_{\rm grav} - U^{(i)}$$



- Equações de evolução:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{R}_i}\right) = \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial R_i}, \qquad \frac{dU}{dt} = -p\frac{dV}{dt} + \dot{Q}, \qquad \frac{d\boldsymbol{Y}}{dt} = \dot{\boldsymbol{\Lambda}},$$

- Equação de estado:

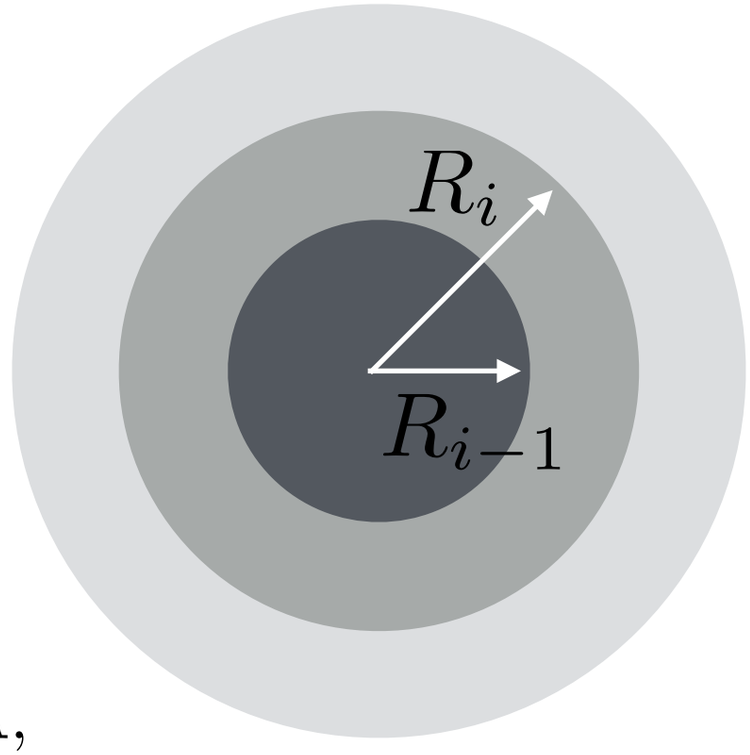
$$u(\rho, T) = u_{\rm ion} + u_{\rm rad} + u_{\rm ele} + u_{\rm pos}$$

- Opacidade:

$$\kappa = \kappa_{\rm cond}^{-1} + \kappa_{\rm rad}^{-1}$$

- Lagrangiana Efetiva:

$$\mathcal{L}(\{R_i\},\{T_i\},\{\boldsymbol{Y}_i\}) = \sum_{i=1}^{N} K^{(i)} - V^{(i)}_{\rm grav} - U^{(i)}$$



- Equações de evolução:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{R}_i}\right) = \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial R_i}, \qquad \frac{dU}{dt} = -p\frac{dV}{dt} + \dot{Q}, \qquad \frac{d\boldsymbol{Y}}{dt} = \dot{\boldsymbol{\Lambda}},$$

- Equação de estado:

$$u(\rho, T) = u_{\rm ion} + u_{\rm rad} + u_{\rm ele} + u_{\rm pos}$$

- Opacidade:

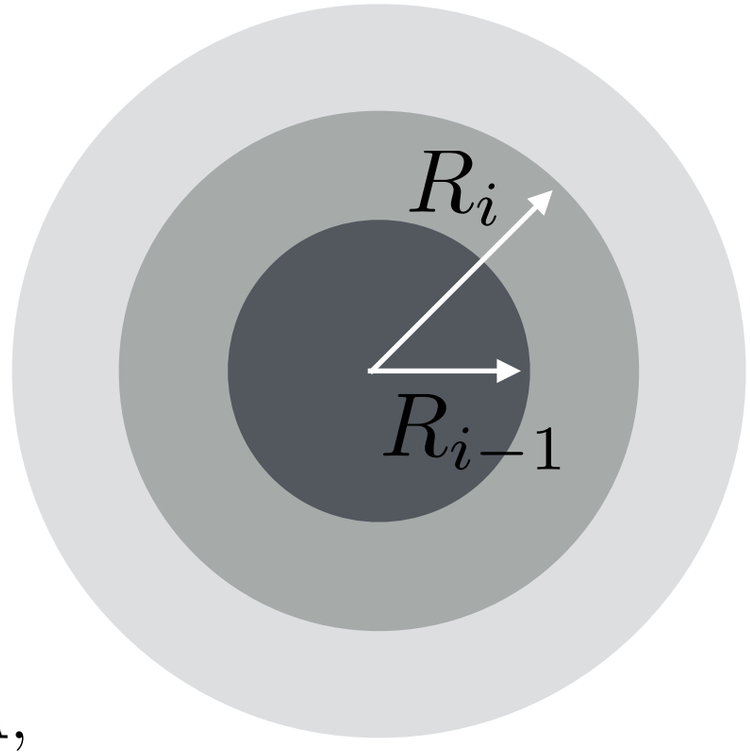
$$\kappa = \kappa_{\rm cond}^{-1} + \kappa_{\rm rad}^{-1}$$

- Reações Termonucleares:

$$\boldsymbol{Y}^T = ({}^4{\rm He}, {}^{12}{\rm C}, {}^{16}{\rm O}, {}^{20}{\rm Ne}, {}^{24}{\rm Mg}, [{}^{28}{\rm Si}], [{}^{56}{\rm Ni}])$$

- Lagrangiana Efetiva:

$$\mathcal{L}(\{R_i\},\{T_i\},\{\boldsymbol{Y}_i\}) = \sum_{i=1}^{N} K^{(i)} - V^{(i)}_{\rm grav} - U^{(i)}$$



- Equações de evolução:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{R}_i}\right) = \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial R_i}, \qquad \frac{dU}{dt} = -p\frac{dV}{dt} + \dot{Q}, \qquad \frac{d\boldsymbol{Y}}{dt} = \dot{\boldsymbol{\Lambda}},$$

- Equação de estado:

$$u(\rho, T) = u_{\rm ion} + u_{\rm rad} + u_{\rm ele} + u_{\rm pos}$$

- Opacidade:

$$\kappa = \kappa_{\rm cond}^{-1} + \kappa_{\rm rad}^{-1}$$

- Reações Termonucleares:

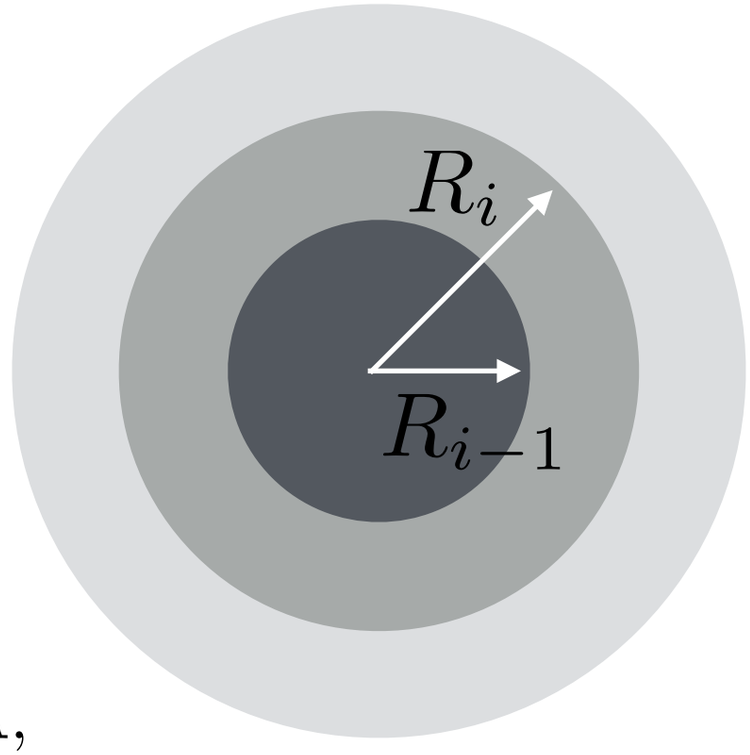
$$\boldsymbol{Y}^T = ({}^4{\rm He}, {}^{12}{\rm C}, {}^{16}{\rm O}, {}^{20}{\rm Ne}, {}^{24}{\rm Mg}, [{}^{28}{\rm Si}], [{}^{56}{\rm Ni}])$$

Controle da Energia

$$\frac{dE}{dt} = \sum_i \dot{Q}_i.$$

- Lagrangiana Efetiva:

$$\mathcal{L}(\{R_i\},\{T_i\},\{\boldsymbol{Y}_i\}) = \sum_{i=1}^{N} K^{(i)} - V^{(i)}_{\rm grav} - U^{(i)}$$



- Equações de evolução:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{R}_i}\right) = \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial R_i}, \qquad \frac{dU}{dt} = -p\frac{dV}{dt} + \dot{Q}, \qquad \frac{d\boldsymbol{Y}}{dt} = \dot{\boldsymbol{\Lambda}},$$

$$\frac{d[\dot{Q}]}{dt} = \frac{1}{\tau}\left(\dot{Q} - [\dot{Q}]\right)$$

- Equação de estado:

$$u(\rho, T) = u_{\rm ion} + u_{\rm rad} + u_{\rm ele} + u_{\rm pos}$$

- Opacidade:

$$\kappa = \kappa^{-1}_{\rm cond} + \kappa^{-1}_{\rm rad}$$

- Reações Termonucleares:

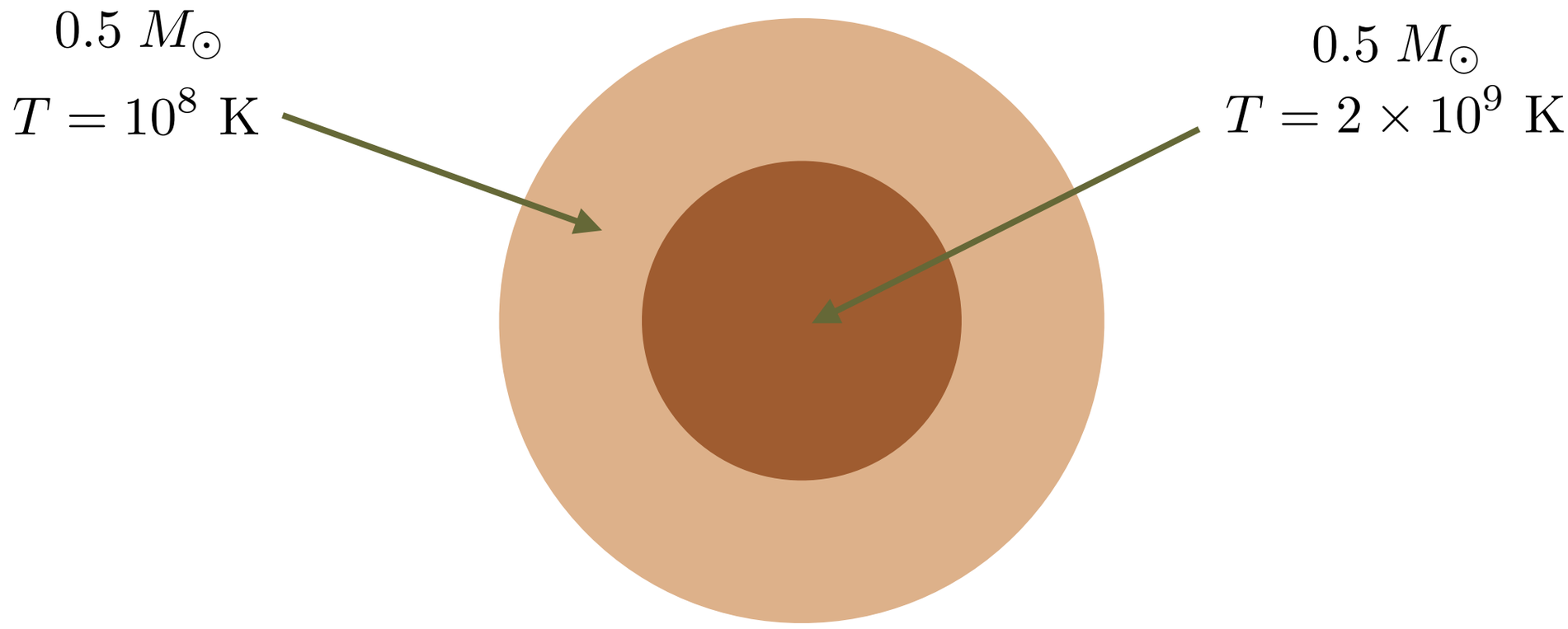
$$\boldsymbol{Y}^T = ({}^4{\rm He}, {}^{12}{\rm C}, {}^{16}{\rm O}, {}^{20}{\rm Ne}, {}^{24}{\rm Mg}, [{}^{28}{\rm Si}], [{}^{56}{\rm Ni}])$$

Controle da Energia

$$\frac{dE}{dt} = \sum_i \dot{Q}_i.$$

Resultados Preliminares

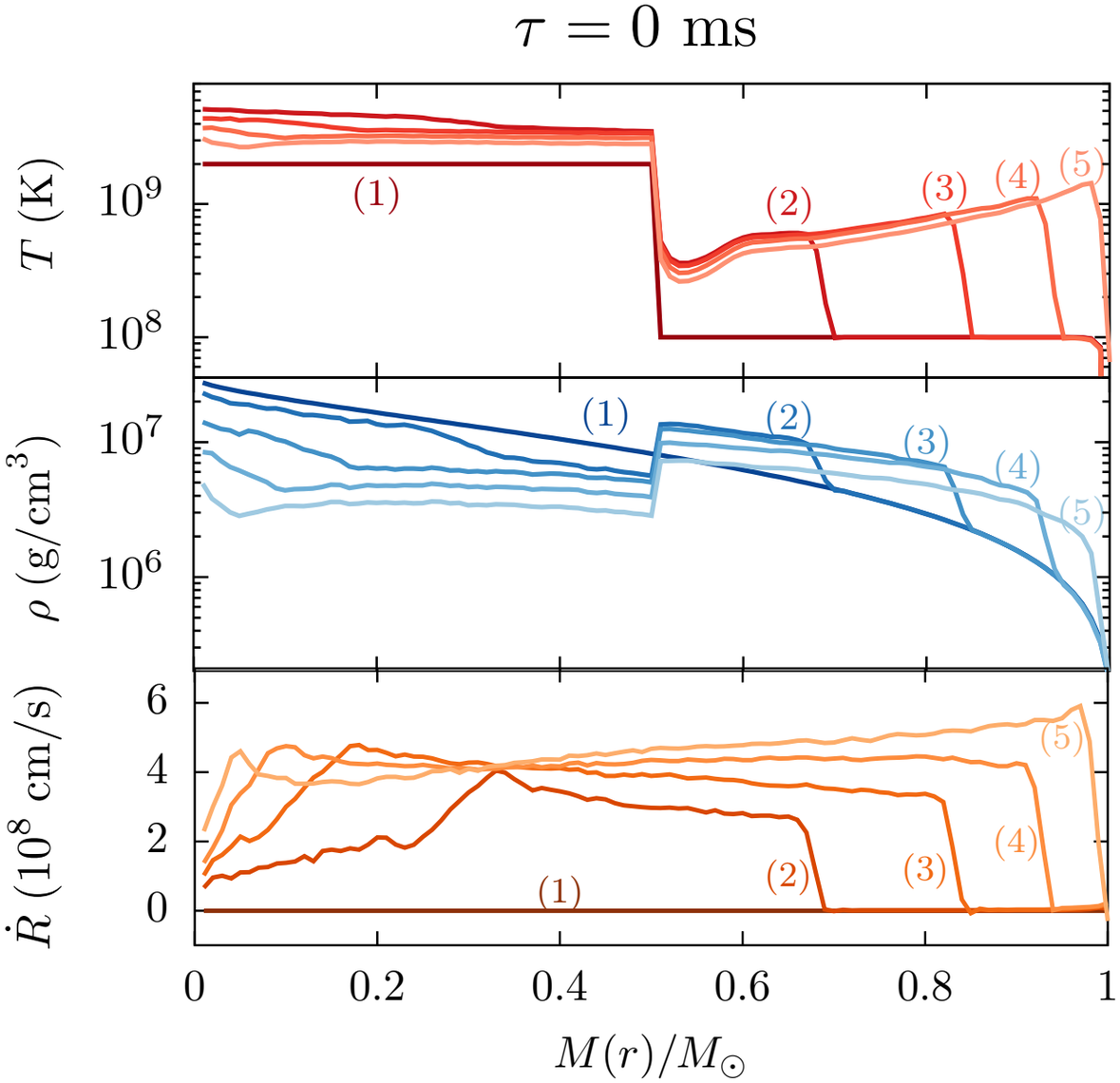
Condição Inicial (IC1)



Anã Branca
C/O

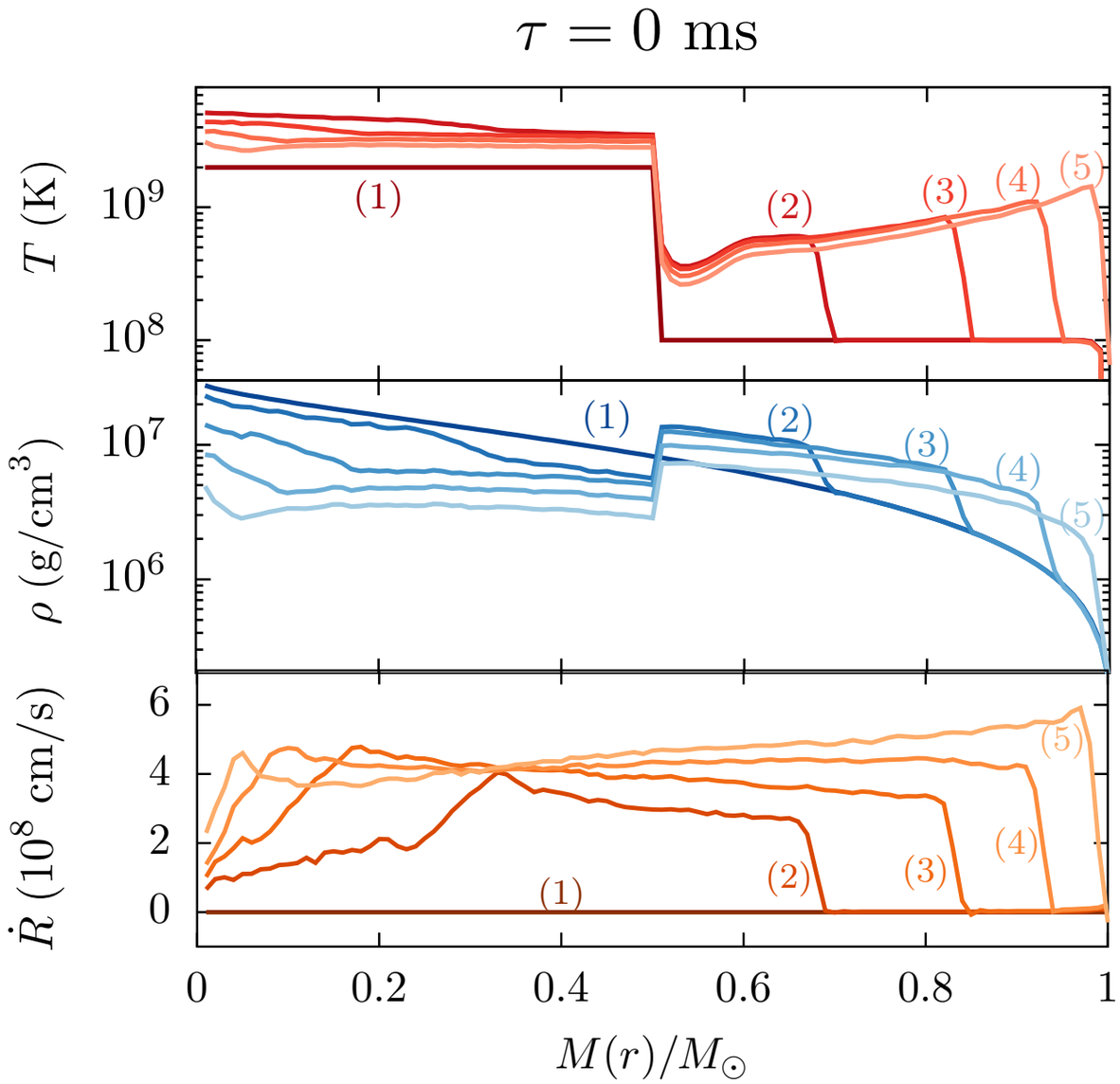
Perfis de temperatura e densidade (IC1)

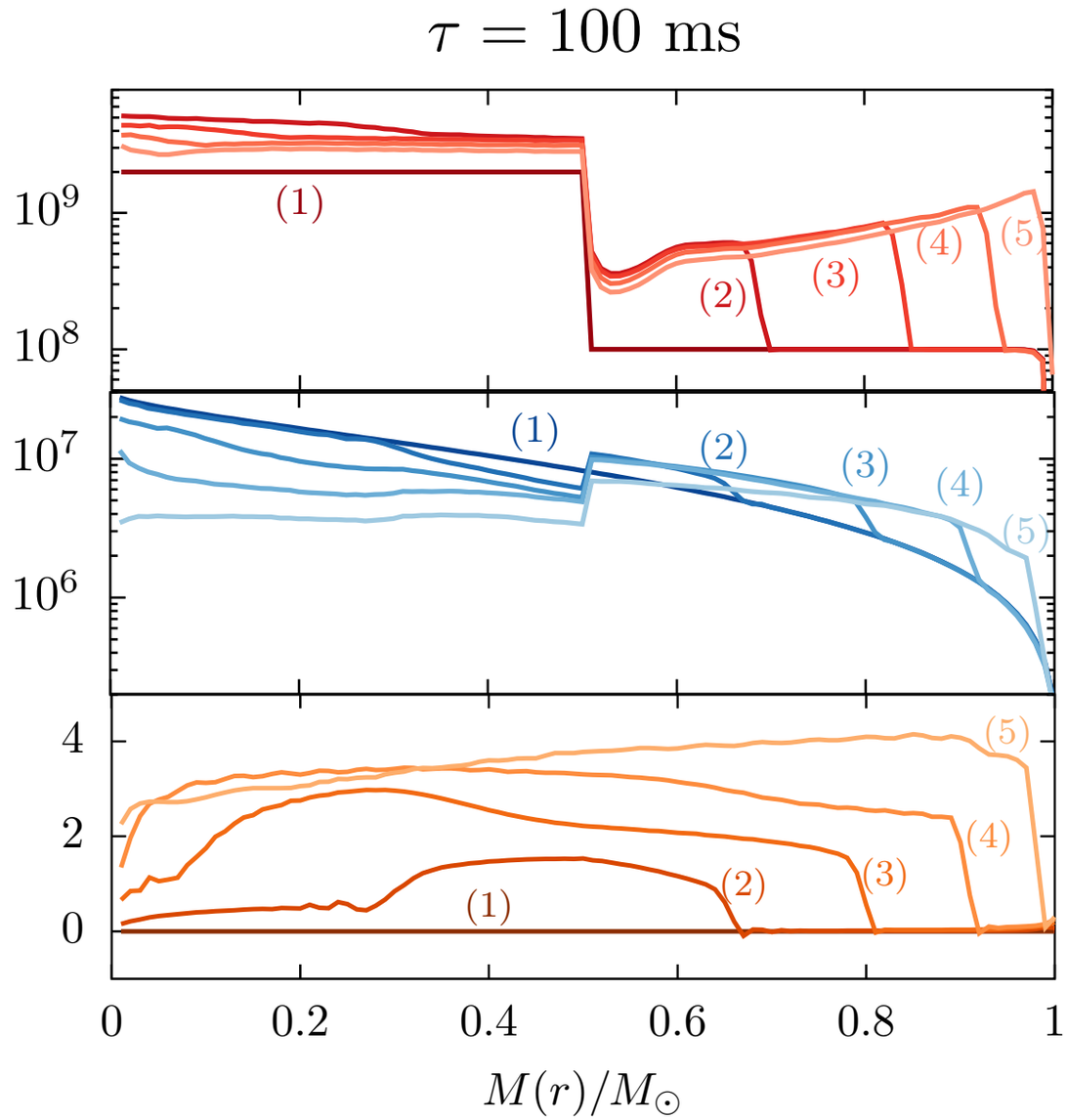
Perfis de temperatura e densidade (IC1)



(1) t = 0, (2) t = 111 ms, (3) t = 221 ms, (4) t = 329 ms, (5) t = 440 ms.

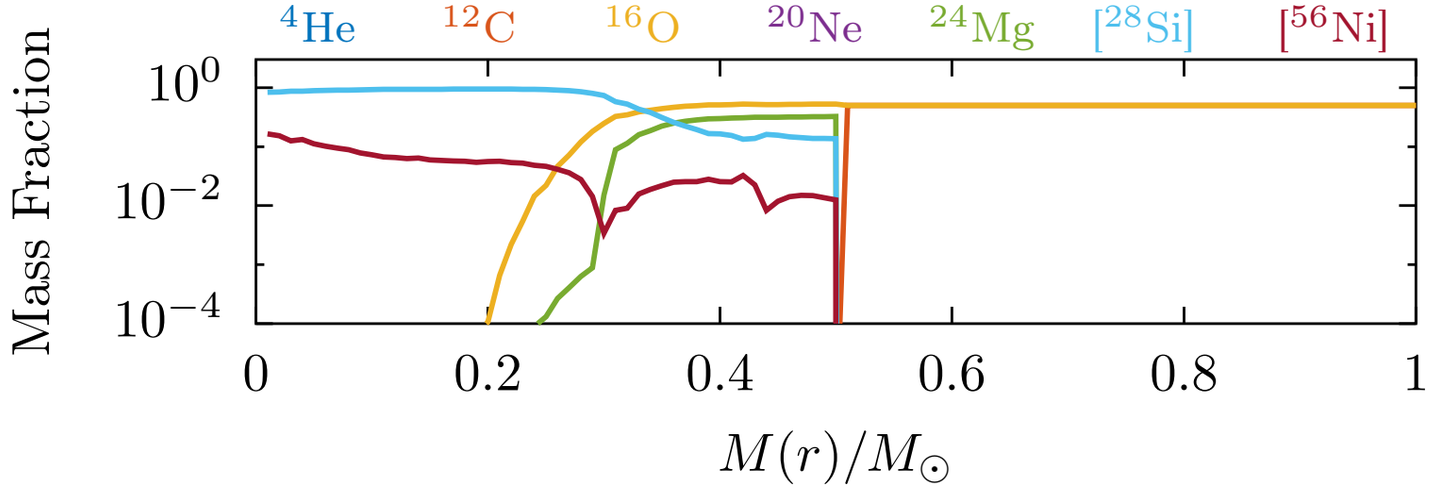
Perfis de temperatura e densidade (IC1)





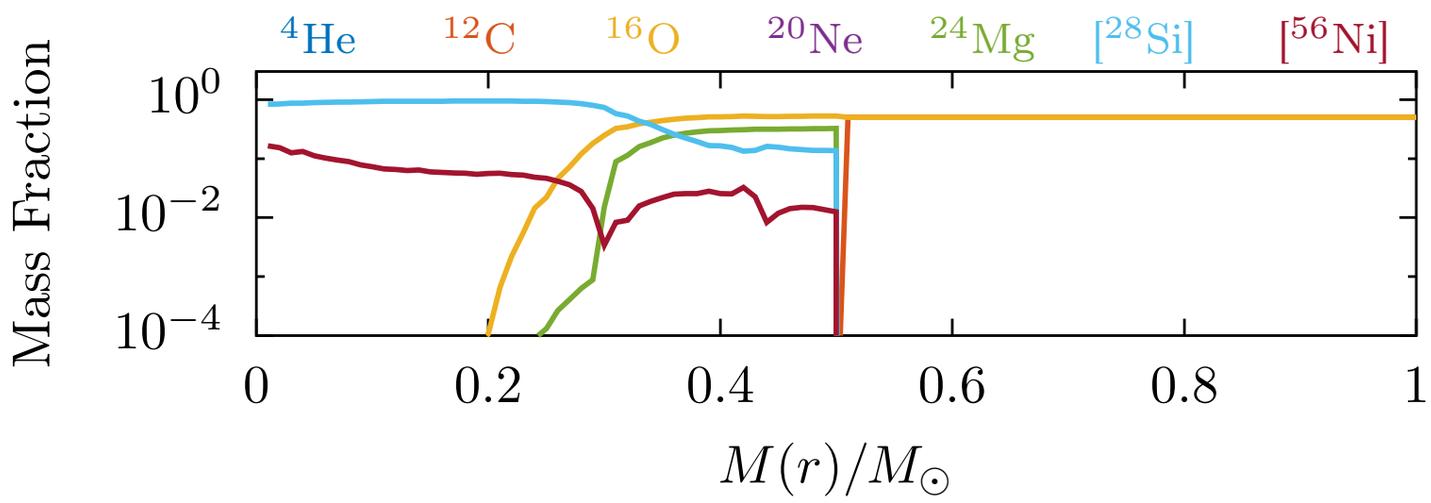
(1) t = 0, (2) t = 111 ms, (3) t = 221 ms, (4) t = 329 ms, (5) t = 440 ms.

Abundância e Energia Liberada (IC1)



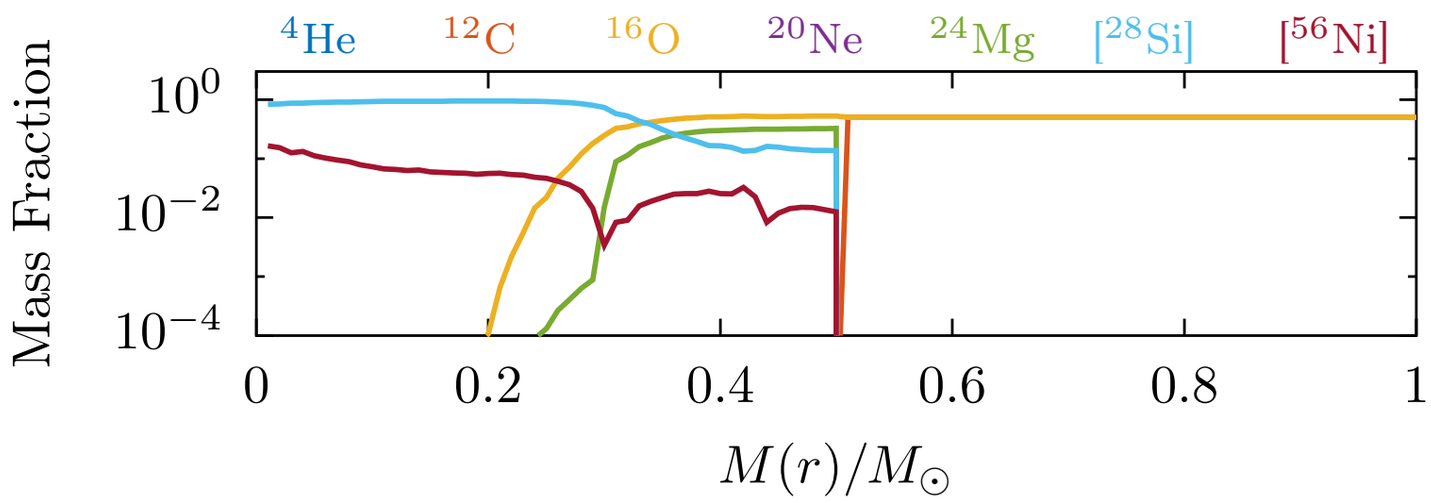
Abundância e Energia Liberada (IC1)

τ (ms)	^{4}He ($M_\odot$)	^{12}C ($M_\odot$)	^{16}O ($M_\odot$)	^{20}Ne ($M_\odot$)	^{24}Mg ($M_\odot$)	[^{28}Si] ($M_\odot$)	[^{56}Ni] ($M_\odot$)
0	0.001	0.250	0.250	10^{-5}	10^{-5}	0.233	0.266
5	10^{-4}	0.250	0.253	10^{-6}	10^{-5}	0.286	0.211
10	10^{-5}	0.250	0.254	10^{-6}	10^{-5}	0.307	0.189
25	10^{-10}	0.250	0.266	10^{-6}	10^{-4}	0.337	0.147
50	10^{-10}	0.250	0.300	10^{-6}	0.015	0.359	0.076
100	10^{-11}	0.250	0.353	10^{-6}	0.054	0.318	0.025
200	10^{-12}	0.250	0.424	10^{-6}	0.099	0.219	0.008
400	10^{-20}	0.250	0.503	10^{-6}	0.150	0.095	0.002



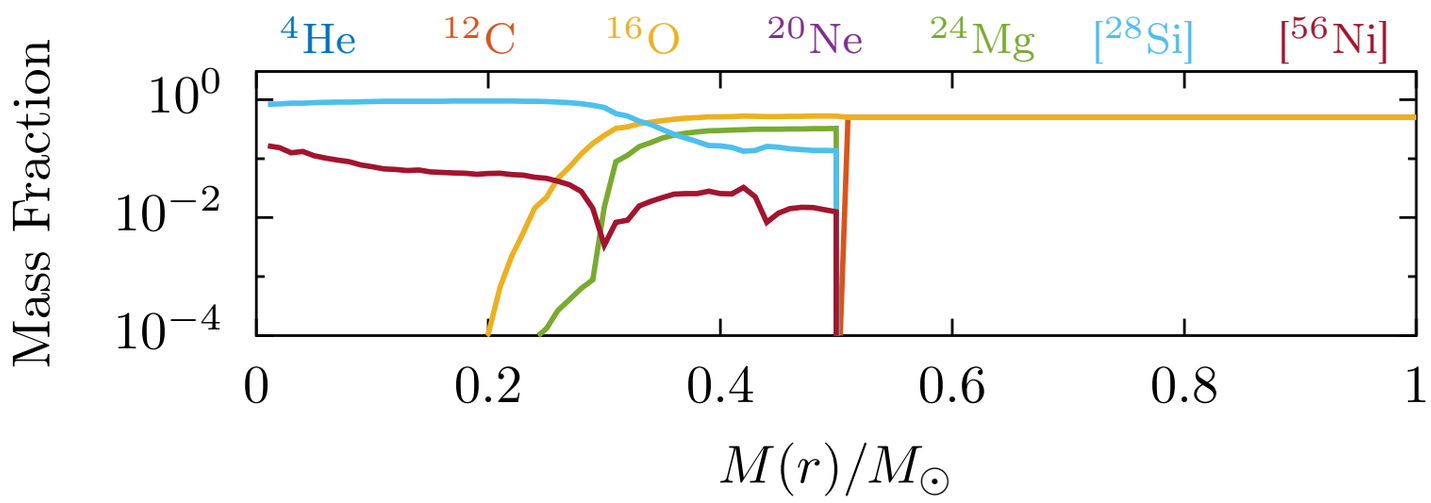
Abundância e Energia Liberada (IC1)

τ (ms)	^{4}He ($M_\odot$)	^{12}C ($M_\odot$)	^{16}O ($M_\odot$)	^{20}Ne ($M_\odot$)	^{24}Mg ($M_\odot$)	[^{28}Si] ($M_\odot$)	[^{56}Ni] ($M_\odot$)
0	0.001	0.250	0.250	10^{-5}	10^{-5}	0.233	0.266
5	10^{-4}	0.250	0.253	10^{-6}	10^{-5}	0.286	0.211
10	10^{-5}	0.250	0.254	10^{-6}	10^{-5}	0.307	0.189
25	10^{-10}	0.250	0.266	10^{-6}	10^{-4}	0.337	0.147
50	10^{-10}	0.250	0.300	10^{-6}	0.015	0.359	0.076
100	10^{-11}	0.250	0.353	10^{-6}	0.054	0.318	0.025
200	10^{-12}	0.250	0.424	10^{-6}	0.099	0.219	0.008
400	10^{-20}	0.250	0.503	10^{-6}	0.150	0.095	0.002



Abundância e Energia Liberada (IC1)

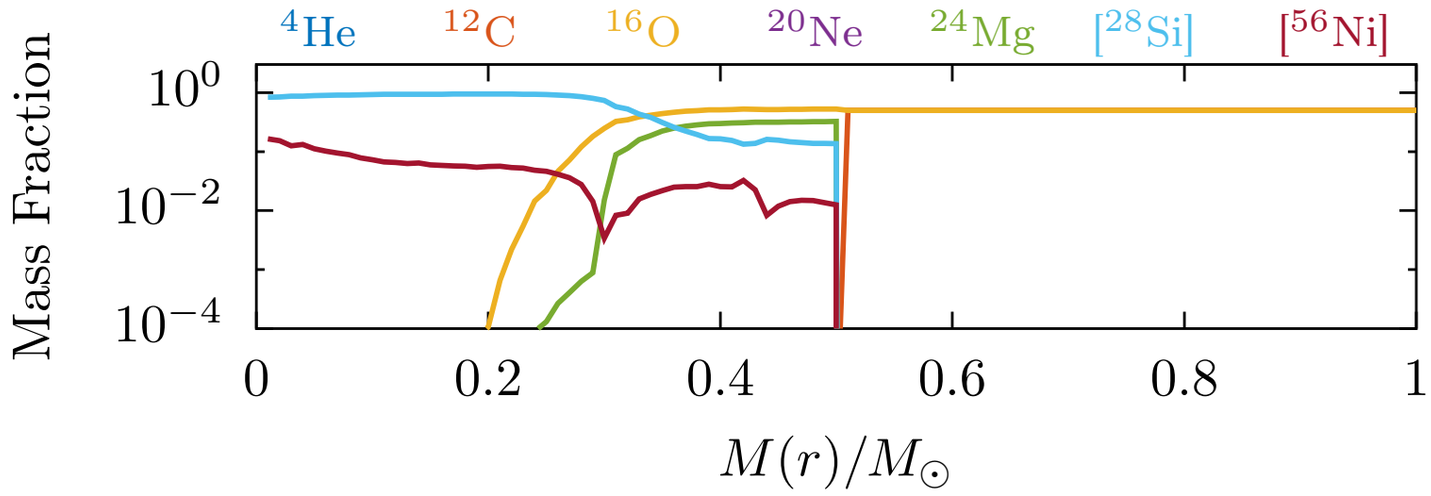
τ (ms)	^{4}He ($M_\odot$)	^{12}C ($M_\odot$)	^{16}O ($M_\odot$)	^{20}Ne ($M_\odot$)	^{24}Mg ($M_\odot$)	[^{28}Si] ($M_\odot$)	[^{56}Ni] ($M_\odot$)
0	0.001	0.250	0.250	10^{-5}	10^{-5}	0.233	0.266
5	10^{-4}	0.250	0.253	10^{-6}	10^{-5}	0.286	0.211
10	10^{-5}	0.250	0.254	10^{-6}	10^{-5}	0.307	0.189
25	10^{-10}	0.250	0.266	10^{-6}	10^{-4}	0.337	0.147
50	10^{-10}	0.250	0.300	10^{-6}	0.015	0.359	0.076
100	10^{-11}	0.250	0.353	10^{-6}	0.054	0.318	0.025
200	10^{-12}	0.250	0.424	10^{-6}	0.099	0.219	0.008
400	10^{-20}	0.250	0.503	10^{-6}	0.150	0.095	0.002



Abundância e Energia Liberada (IC1)

τ (ms)	^{4}He ($M_\odot$)	^{12}C ($M_\odot$)	^{16}O ($M_\odot$)	^{20}Ne ($M_\odot$)	^{24}Mg ($M_\odot$)	[^{28}Si] ($M_\odot$)	[^{56}Ni] ($M_\odot$)
0	0.001	0.250	0.250	10^{-5}	10^{-5}	0.233	0.266
5	10^{-4}	0.250	0.253	10^{-6}	10^{-5}	0.286	0.211
10	10^{-5}	0.250	0.254	10^{-6}	10^{-5}	0.307	0.189
25	10^{-10}	0.250	0.266	10^{-6}	10^{-4}	0.337	0.147
50	10^{-10}	0.250	0.300	10^{-6}	0.015	0.359	0.076
100	10^{-11}	0.250	0.353	10^{-6}	0.054	0.318	0.025
200	10^{-12}	0.250	0.424	10^{-6}	0.099	0.219	0.008
400	10^{-20}	0.250	0.503	10^{-6}	0.150	0.095	0.002

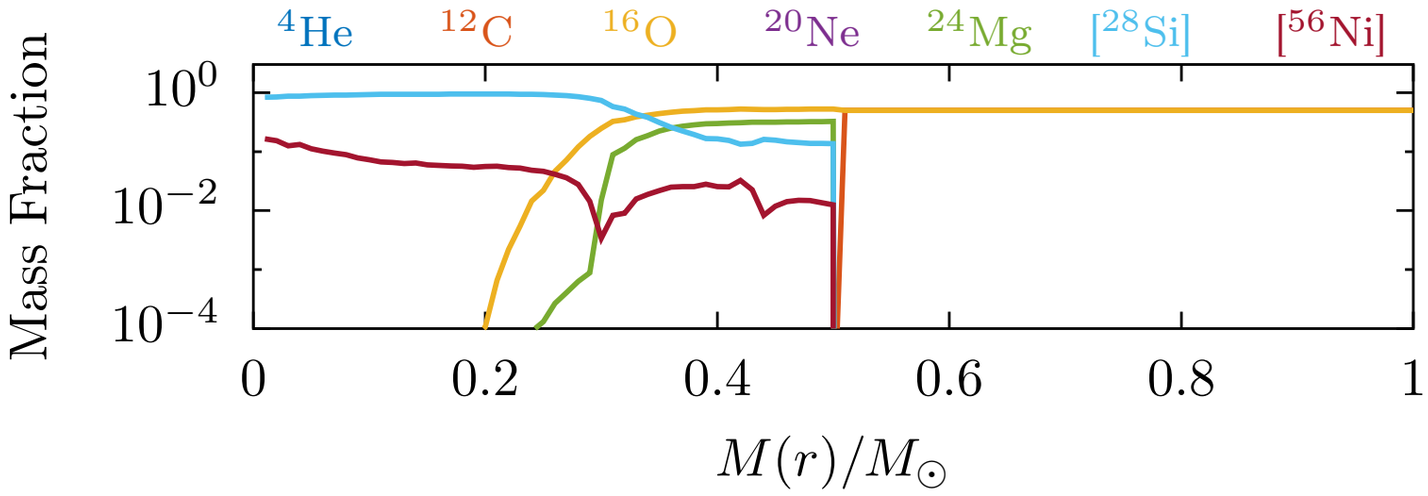
τ (ms)	Q_n (10^{51} erg)
0	0.684
5	0.665
10	0.657
25	0.631
50	0.571
100	0.491
200	0.405
400	0.312



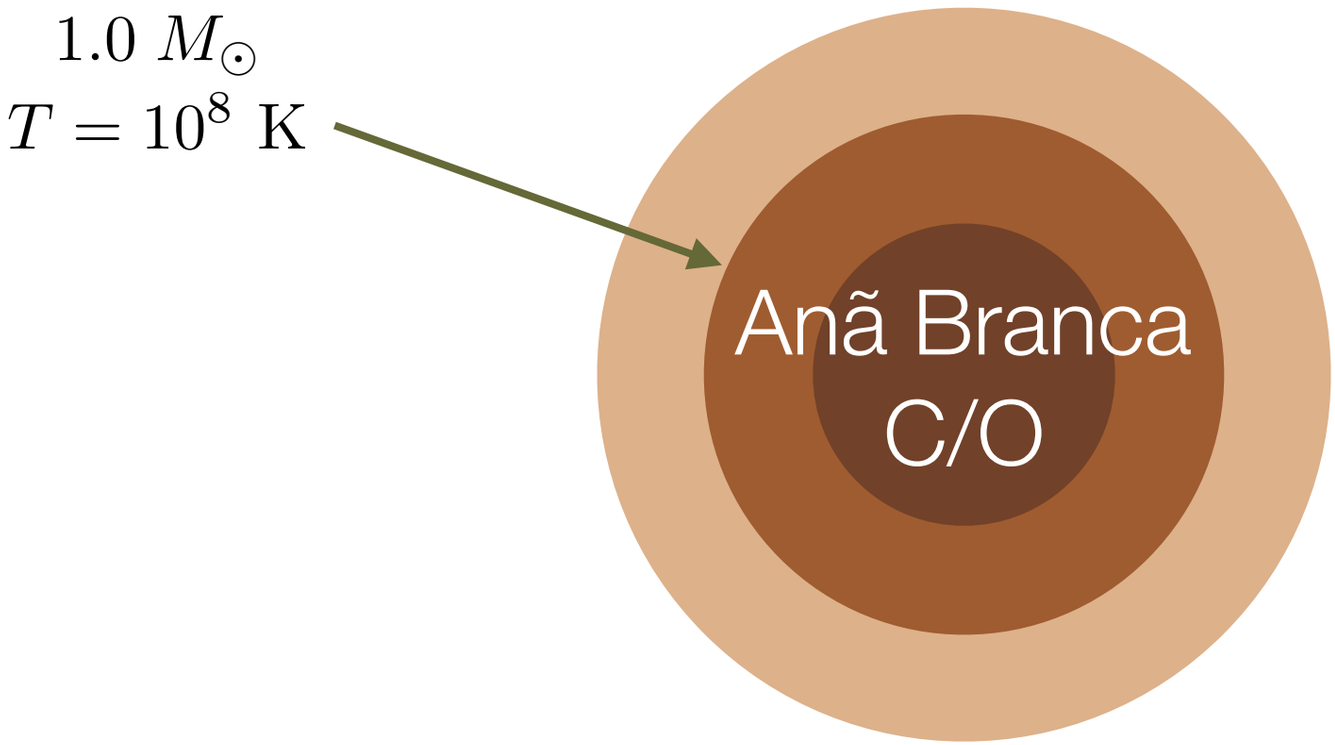
Abundância e Energia Liberada (IC1)

τ (ms)	^{4}He ($M_\odot$)	^{12}C ($M_\odot$)	^{16}O ($M_\odot$)	^{20}Ne ($M_\odot$)	^{24}Mg ($M_\odot$)	[^{28}Si] ($M_\odot$)	[^{56}Ni] ($M_\odot$)
0	0.001	0.250	0.250	10^{-5}	10^{-5}	0.233	0.266
5	10^{-4}	0.250	0.253	10^{-6}	10^{-5}	0.286	0.211
10	10^{-5}	0.250	0.254	10^{-6}	10^{-5}	0.307	0.189
25	10^{-10}	0.250	0.266	10^{-6}	10^{-4}	0.337	0.147
50	10^{-10}	0.250	0.300	10^{-6}	0.015	0.359	0.076
100	10^{-11}	0.250	0.353	10^{-6}	0.054	0.318	0.025
200	10^{-12}	0.250	0.424	10^{-6}	0.099	0.219	0.008
400	10^{-20}	0.250	0.503	10^{-6}	0.150	0.095	0.002

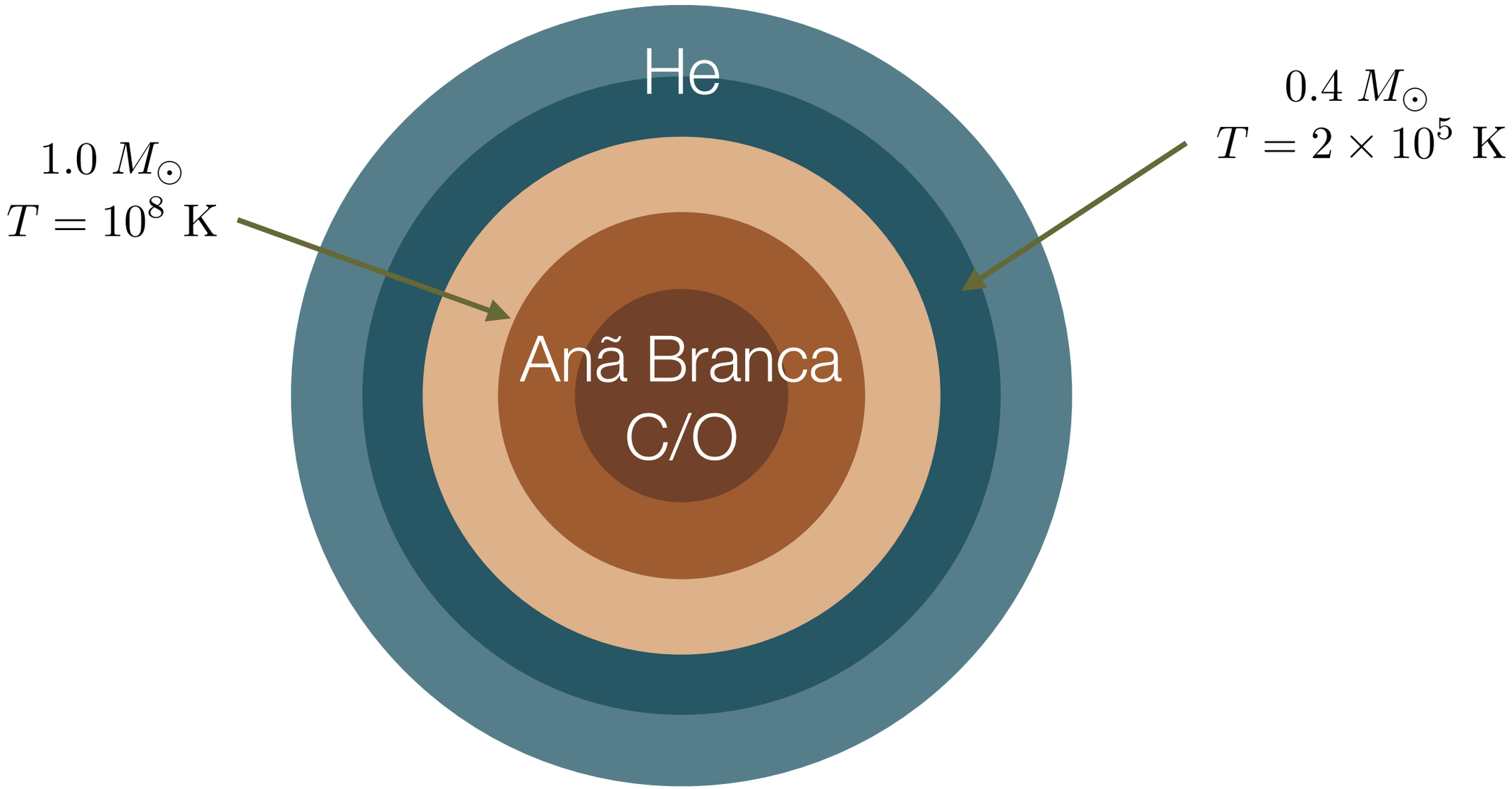
τ (ms)	Q_n (10^{51} erg)
0	0.684
5	0.665
10	0.657
25	0.631
50	0.571
100	0.491
200	0.405
400	0.312



Condição Inicial (IC2)

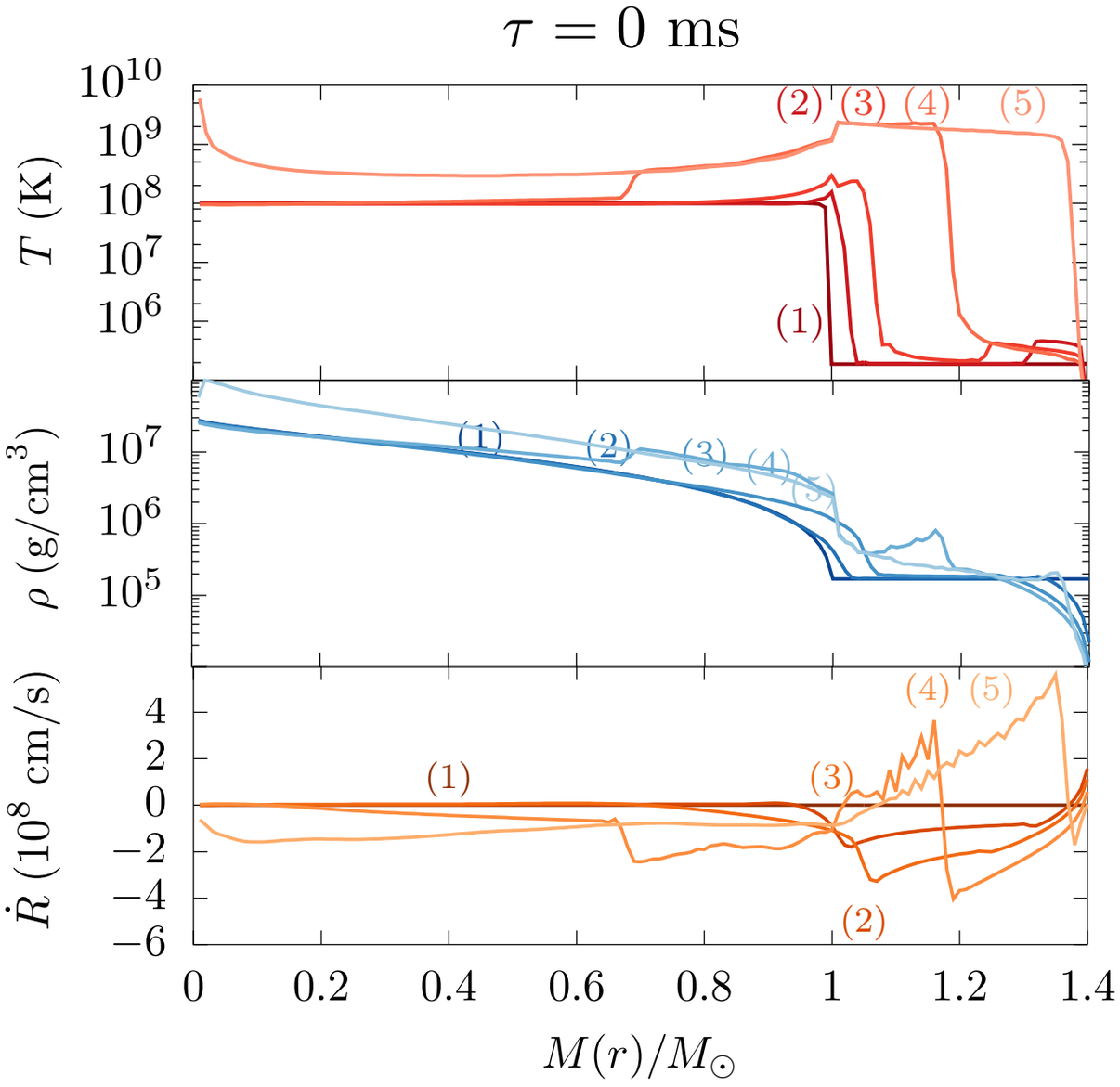


Condição Inicial (IC2)



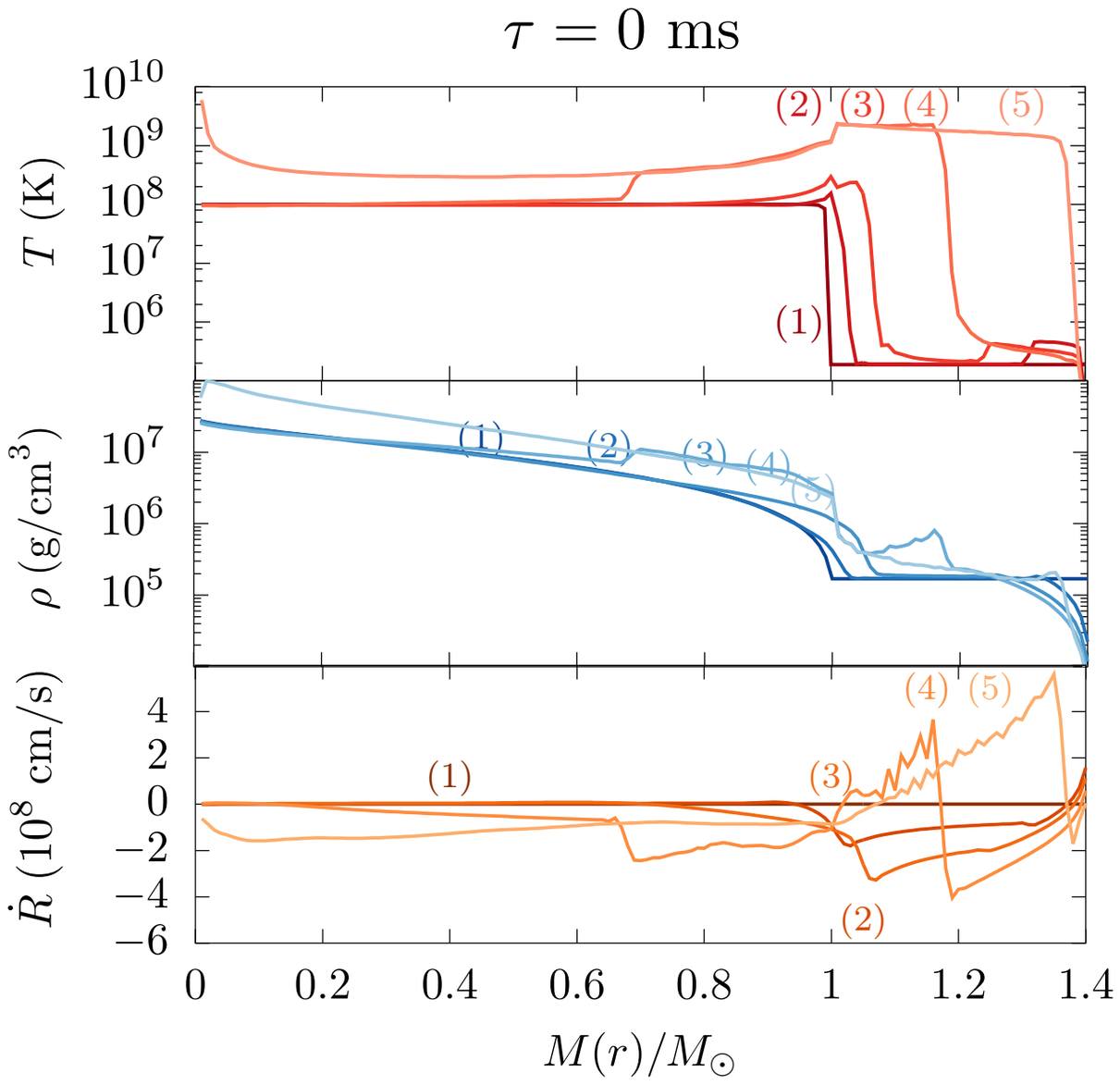
Perfis de temperatura e densidade (IC2)

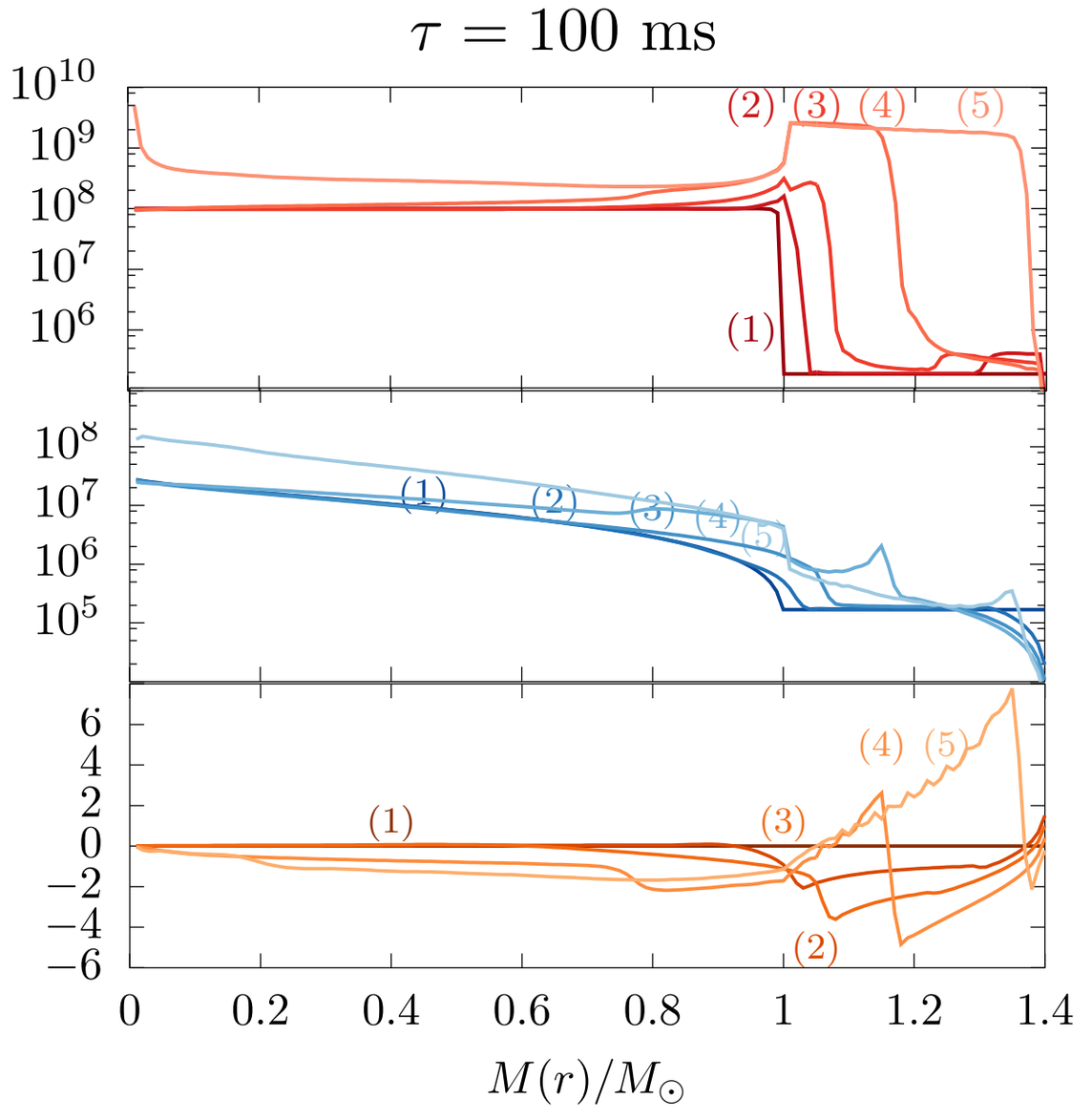
Perfis de temperatura e densidade (IC2)



(1) t = 0 s, (2) t = 0.473 s, (3) t = 0.981 s, (4) t = 1.509 s, (5) t = 1.991 s.

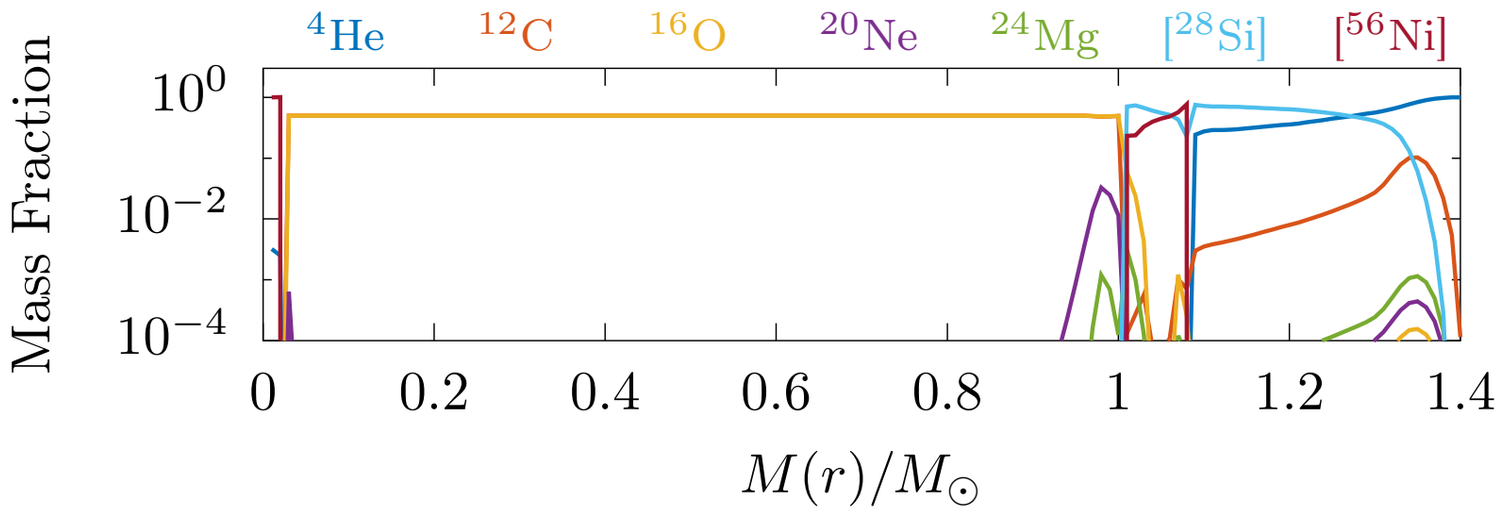
Perfis de temperatura e densidade (IC2)





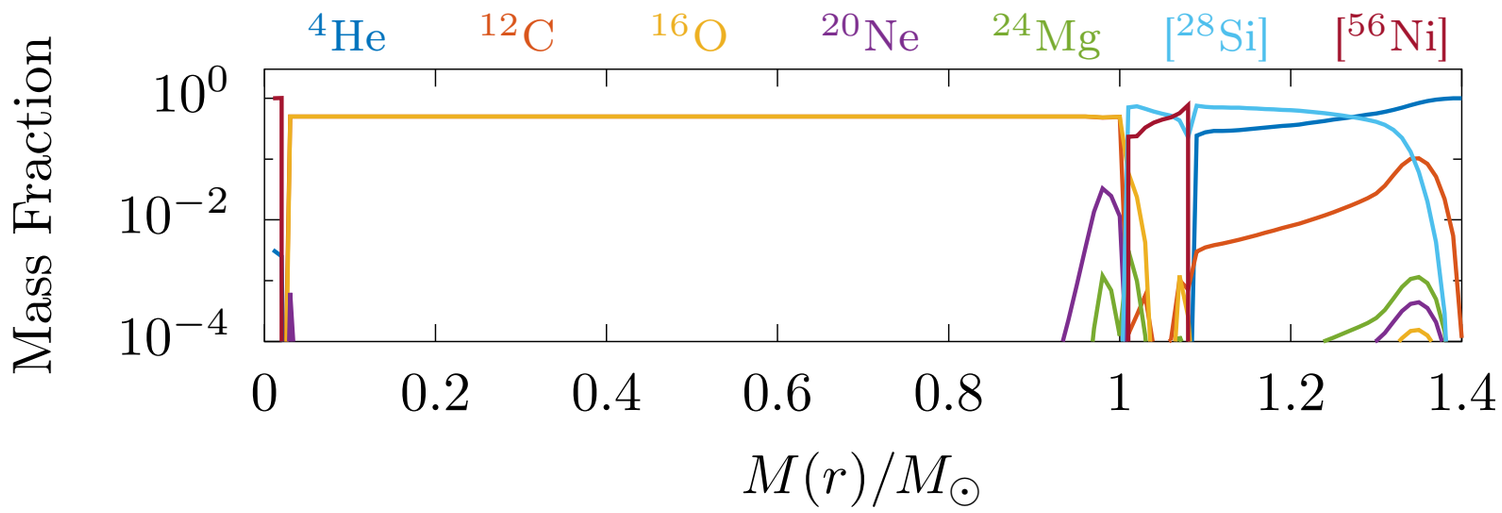
(1) t = 0 s, (2) t = 0.473 s, (3) t = 0.981 s, (4) t = 1.509 s, (5) t = 1.991 s.

Abundância e Energia Liberada (IC2)



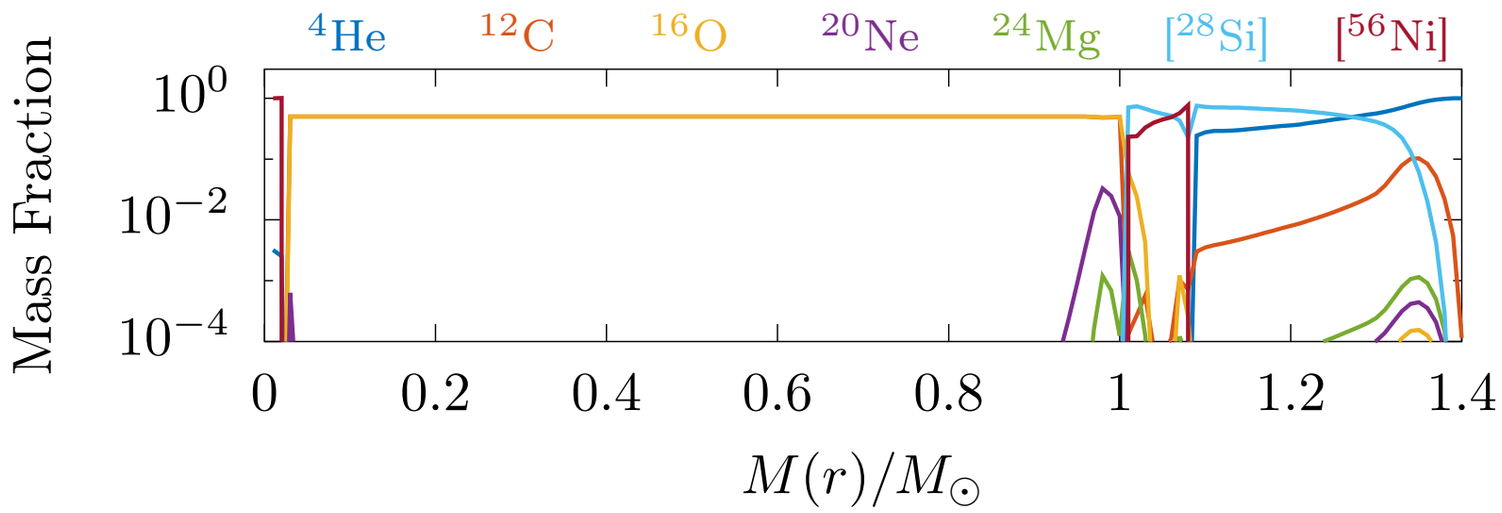
Abundância e Energia Liberada (IC2)

τ (ms)	^{4}He ($M_\odot$)	^{12}C ($M_\odot$)	^{16}O ($M_\odot$)	^{20}Ne ($M_\odot$)	^{24}Mg ($M_\odot$)	[^{28}Si] ($M_\odot$)	[^{56}Ni] ($M_\odot$)
0							
5	0.166	0.497	0.490	0.001	10^{-4}	0.191	0.055
10	0.163	0.497	0.491	10^{-4}	10^{-4}	0.208	0.041
25	0.150	0.496	0.491	10^{-5}	0.001	0.236	0.026
50	0.126	0.494	0.492	10^{-5}	0.003	0.264	0.021
100	0.082	0.494	0.495	10^{-4}	0.011	0.298	0.020
200	0.061	0.505	0.505	0.002	0.035	0.282	0.010
300	0.055	0.513	0.507	0.004	0.048	0.263	0.010
500	0.052	0.523	0.509	0.007	0.060	0.239	0.010



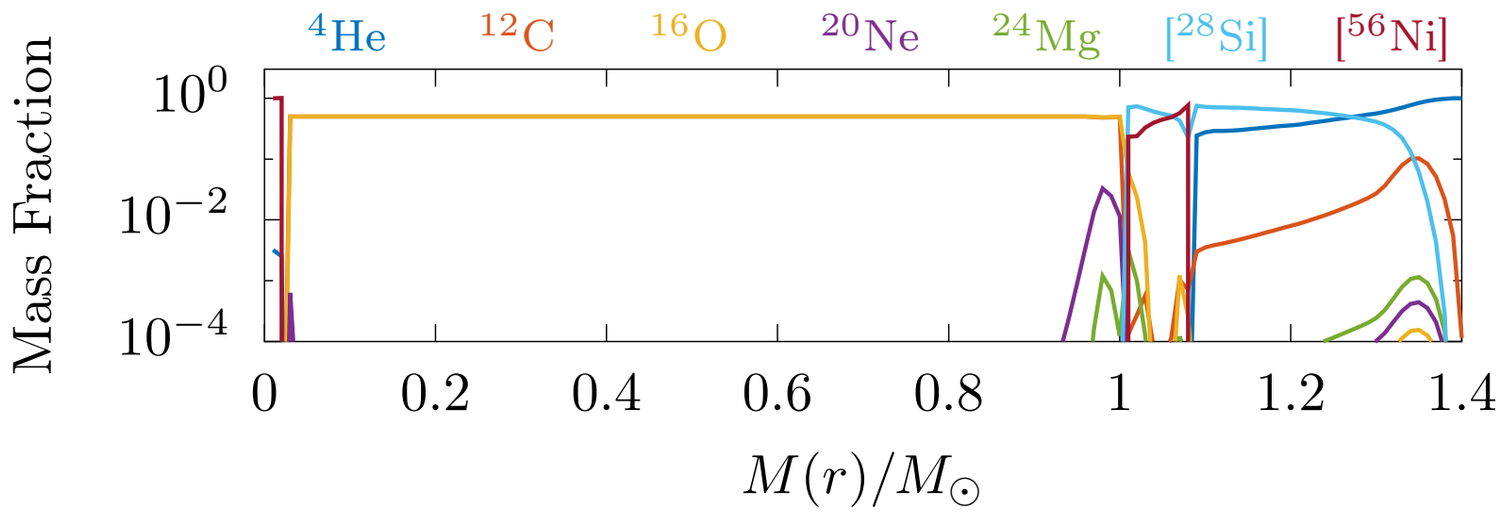
Abundância e Energia Liberada (IC2)

τ (ms)	^{4}He ($M_\odot$)	^{12}C ($M_\odot$)	^{16}O ($M_\odot$)	^{20}Ne ($M_\odot$)	^{24}Mg ($M_\odot$)	[^{28}Si] ($M_\odot$)	[^{56}Ni] ($M_\odot$)
0							
5	0.166	0.497	0.490	0.001	10^{-4}	0.191	0.055
10	0.163	0.497	0.491	10^{-4}	10^{-4}	0.208	0.041
25	0.150	0.496	0.491	10^{-5}	0.001	0.236	0.026
50	0.126	0.494	0.492	10^{-5}	0.003	0.264	0.021
100	0.082	0.494	0.495	10^{-4}	0.011	0.298	0.020
200	0.061	0.505	0.505	0.002	0.035	0.282	0.010
300	0.055	0.513	0.507	0.004	0.048	0.263	0.010
500	0.052	0.523	0.509	0.007	0.060	0.239	0.010



Abundância e Energia Liberada (IC2)

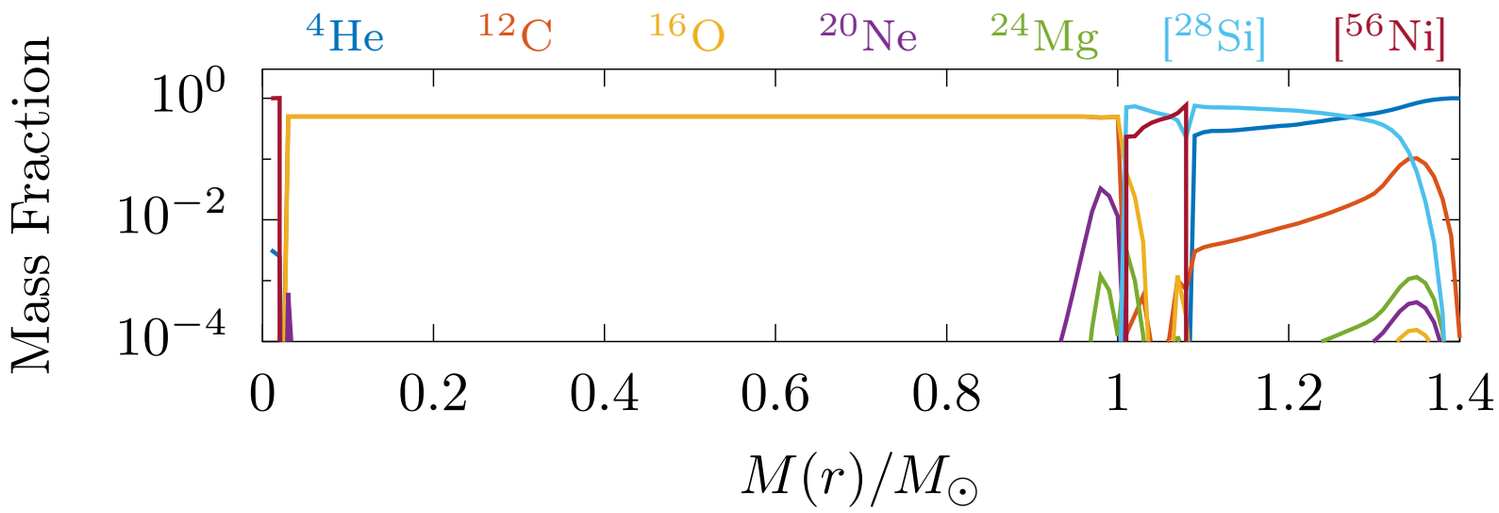
τ (ms)	^{4}He ($M_\odot$)	^{12}C ($M_\odot$)	^{16}O ($M_\odot$)	^{20}Ne ($M_\odot$)	^{24}Mg ($M_\odot$)	[^{28}Si] ($M_\odot$)	[^{56}Ni] ($M_\odot$)
0							
5	0.166	0.497	0.490	0.001	10^{-4}	0.191	0.055
10	0.163	0.497	0.491	10^{-4}	10^{-4}	0.208	0.041
25	0.150	0.496	0.491	10^{-5}	0.001	0.236	0.026
50	0.126	0.494	0.492	10^{-5}	0.003	0.264	0.021
100	0.082	0.494	0.495	10^{-4}	0.011	0.298	0.020
200	0.061	0.505	0.505	0.002	0.035	0.282	0.010
300	0.055	0.513	0.507	0.004	0.048	0.263	0.010
500	0.052	0.523	0.509	0.007	0.060	0.239	0.010



Abundância e Energia Liberada (IC2)

τ (ms)	^{4}He ($M_\odot$)	^{12}C ($M_\odot$)	^{16}O ($M_\odot$)	^{20}Ne ($M_\odot$)	^{24}Mg ($M_\odot$)	[^{28}Si] ($M_\odot$)	[^{56}Ni] ($M_\odot$)
0							
5	0.166	0.497	0.490	0.001	10^{-4}	0.191	0.055
10	0.163	0.497	0.491	10^{-4}	10^{-4}	0.208	0.041
25	0.150	0.496	0.491	10^{-5}	0.001	0.236	0.026
50	0.126	0.494	0.492	10^{-5}	0.003	0.264	0.021
100	0.082	0.494	0.495	10^{-4}	0.011	0.298	0.020
200	0.061	0.505	0.505	0.002	0.035	0.282	0.010
300	0.055	0.513	0.507	0.004	0.048	0.263	0.010
500	0.052	0.523	0.509	0.007	0.060	0.239	0.010

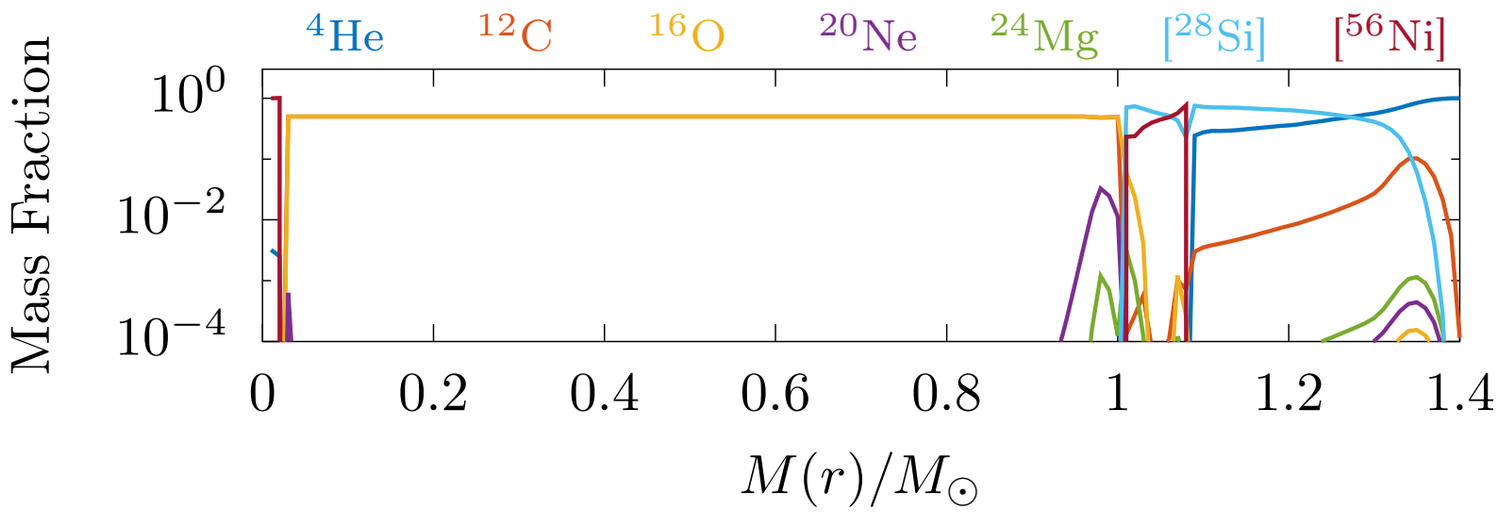
τ (ms)	Q_n (10^{51} erg)
0	
5	0.651
10	0.653
25	0.683
50	0.745
100	0.854
200	0.871
300	0.866
500	0.851



Abundância e Energia Liberada (IC2)

τ (ms)	^{4}He ($M_\odot$)	^{12}C ($M_\odot$)	^{16}O ($M_\odot$)	^{20}Ne ($M_\odot$)	^{24}Mg ($M_\odot$)	[^{28}Si] ($M_\odot$)	[^{56}Ni] ($M_\odot$)
0							
5	0.166	0.497	0.490	0.001	10^{-4}	0.191	0.055
10	0.163	0.497	0.491	10^{-4}	10^{-4}	0.208	0.041
25	0.150	0.496	0.491	10^{-5}	0.001	0.236	0.026
50	0.126	0.494	0.492	10^{-5}	0.003	0.264	0.021
100	0.082	0.494	0.495	10^{-4}	0.011	0.298	0.020
200	0.061	0.505	0.505	0.002	0.035	0.282	0.010
300	0.055	0.513	0.507	0.004	0.048	0.263	0.010
500	0.052	0.523	0.509	0.007	0.060	0.239	0.010

τ (ms)	Q_n (10^{51} erg)
0	
5	0.651
10	0.653
25	0.683
50	0.745
100	0.854
200	0.871
300	0.866
500	0.851



Conclusões e Perspectivas

- Termalização atrasada parece ser **inerente aos cálculos numéricos de hidrodinâmica**;

- Termalização atrasada parece ser **inerente aos cálculos numéricos de hidrodinâmica**;

- Características observacionais **dependem fortemente** do valor de τ.

- Termalização atrasada parece ser **inerente aos cálculos numéricos de hidrodinâmica**;

- Características observacionais **dependem fortemente** do valor de τ.

- Possível explicação da **transição deflagração-detonação**?!

- Termalização atrasada parece ser **inerente aos cálculos numéricos de hidrodinâmica**;

- Características observacionais **dependem fortemente** do valor de τ.

- Possível explicação da **transição deflagração-detonação**?!

- Qual a **condição inicial** advinda de um sistema single degenerate?

- Termalização atrasada parece ser **inerente aos cálculos numéricos de hidrodinâmica**;

- Características observacionais **dependem fortemente** do valor de τ.

- Possível explicação da **transição deflagração-detonação**?!

- Qual a **condição inicial** advinda de um sistema single degenerate?

- Qual o **valor físico** de τ?

Obrigado!