

# Enriquecimento químico nos centros em aglomerados e grupos de galáxias com núcleos frios observados com *Suzaku*

Rebeca M. Batalha<sup>1,2</sup>, Renato A. Dupke<sup>2</sup> e Yolanda Jiménez-Teja<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Université Paris-Saclay

<sup>2</sup>Observatório Nacional

<sup>3</sup>Instituto de Astrofísica de Andalucía

---

## Resumo

Este estudo investiga a distribuição da fração de massa de Ferro (Fe) proveniente de Supernovas do Tipo II (SNII) em comparação com Supernovas do Tipo Ia (SNIa) em dezoito aglomerados e grupos de galáxias com núcleos frios observados com *Suzaku*. Utilizando os modelos teóricos de explosões de supernovas mais bem avaliados por [1], calculamos tal fração a partir de oito razões de abundância nas regiões dos núcleos frios e em suas regiões externas. A região interna demonstra uma contribuição menor da fração de massa de Fe de SNII/SNIa em comparação com a região externa. A média ponderada das frações de massa de Fe de SNII/SNIa, derivada das oito razões de abundância medidas, aumenta de  $17,0 \pm 0,2$  para  $21,3 \pm 0,6$ . Esse aumento médio indica que a região interna possui uma fração percentual de massa de Fe proveniente de SNIa maior do que na região externa. Entre os mecanismos de enriquecimento químico em aglomerados e grupos de galáxias, este resultado sugere que a pressão de arraste na região central desses aglomerados de galáxias desempenha um papel crucial no enriquecimento químico dessas regiões, corroborando descobertas anteriores.

## Abstract

This study investigates the distribution of the mass fraction of Iron (Fe) from Type II Supernovae (SNII) compared to Type Ia Supernovae (SNIa) in eighteen clusters and groups of galaxies with cold cores observed with *Suzaku*. Using the theoretical models of supernova explosions best evaluated by [1], we calculated this fraction from eight abundance ratios in the cold core regions and their external regions. The inner region demonstrates a smaller contribution of Fe mass fraction from SNII/SNIa compared to the outer region. The weighted average Fe mass fractions of SNII/SNIa, derived from the eight measured abundance ratios, increase from  $17.0 \pm 0.2$  to  $21.3 \pm 0.6$ . This average increase indicates that the inner region has a higher percentage mass fraction of Fe originating from SNIa than in the outer region. Among the mechanisms of chemical enrichment in galaxy clusters and groups, this result suggests that the drag pressure in the central region of these galaxy clusters plays a crucial role in the chemical enrichment of these regions, corroborating previous findings.

---

**Palavras-chave:** astrofísica, supernovas, meio intra-aglomerado, meio intragrupo

**Keywords:** astrophysics, supernovae, intra-cluster medium, intragroup medium

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v5nEspecial.44962](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v5nEspecial.44962)

## 1 Introdução

A distribuição dos elementos químicos no meio intra-aglomerado (do inglês, *intra-cluster medium* ou ICM) e no meio intragrupo (do inglês, *intragroup medium* ou IGrM) desempenha um papel crucial na compreensão do enriquecimento químico de aglomerados e grupos de galáxias. Este meio é permeado por elementos pesados, essencialmente provenientes de diversas fontes. Supernovas do tipo Ia (SNIa) produzem abundantemente elementos como oxigênio, neônio, magnésio e quantidades consideráveis

de silício, argônio e cálcio (para uma revisão, consulte [2], [3], e [4]). Enquanto supernovas por colapso do núcleo (SNcc) produzem majoritariamente elementos do grupo do Ferro (Fe), como o próprio ferro, níquel, manganês e crômio (para uma revisão, consulte [5]). Neste contexto, SNcc englobam as supernovas do tipo II (SNII), incluindo hipernovas produzidas por instabilidade de pares. Assim, as razões de abundância, como a razão entre um elemento E e Fe, fornecem pistas valiosas sobre os processos de enriquecimento químico nesses objetos, uma vez que diferentes supernovas (SNe) produzem e ejetam dife-

rentes quantidades de elementos pesados.

Os processos envolvidos no enriquecimento do ICM e sua importância relativa ainda estão em aberto. Diversos mecanismos de transporte e mistura de metais contribuem para o enriquecimento químico desses sistemas de galáxias [6, 7, para uma revisão, consulte]. Eles podem ter sido injetados por Ventos Galácticos (em inglês, *galactic winds*) energéticos de Supernovas do Tipo II [8], por Pressão de Arrasto (em inglês, *Ram Pressure Stripping* - RPS) de galáxias capturadas pelo aglomerado [9], o enriquecimento de metal do ICM poderia ter acontecido no meio antes da virialização do aglomerado [10].

A relevância de cada um desses mecanismos pode ser avaliada em comparação com os produtos ejetados por SNe. Esses produtos, também conhecidos como *yields*, são previstos pelos modelos de explosão de SNe. Esse aspecto já foi abordado em um estudo anterior com o intuito de diminuir as divergências quanto aos produtos previstos para diferentes tipos de supernovas pelos diversos modelos teóricos de explosão encontrados na literatura [11]. Uma vez justificada a escolha dos modelos teóricos de SNe, a fração de massa de Fe proveniente de um tipo de SN pode oferecer pistas sobre a relevância entre os mecanismos de enriquecimento.

Neste estudo, investigamos a contribuição relativa de SNII/SNIa por meio da fração de massa de Fe proveniente desta razão, analisando a abundância de ferro nas regiões centrais de aglomerados e grupos de galáxias com núcleos frios. Utilizamos uma abordagem que combina modelos teóricos de SNIa e SNII, especificamente os modelos de detonação retardada em três dimensões propostos por [12] e o modelo SNII com metalicidade inicial de 0,02 de [13]. Essa escolha é baseada pelos resultados do estudo recente de [1], que avaliou a capacidades desses modelos de prever o padrão de distribuição de razões de abundâncias observadas em dezoito sistemas de galáxias.

Ao calcular a fração percentual de massa de Fe proveniente de SNII, analisamos diferentes razões de abundância, comparando os resultados para as regiões interna e externa dos aglomerados e grupos selecionados. O objetivo é discernir padrões e variações na contribuição relativa de cada tipo de fonte de SN, proporcionando uma visão mais aprofundada sobre os mecanismos de enriquecimento em diferentes regiões do meio intra-aglomerado.

## 2 Amostra de aglomerados e grupos de galáxias

Consideramos os ajustes espectrais da amostra de aglomerados e grupos de galáxias observados pelo instrumento XIS a bordo do satélite *Suzaku*, conforme descrito em [1]. A análise é baseada em dezoito grupos e aglomerados de galáxias próximos ( $z \leq 0,0391$ ), observados com o espectrômetro XIS a bordo do satélite *Suzaku*. Suas propriedades estão listadas na Tabela 1 do artigo.

### Seleção de regiões de interesse

Neste estudo, estabelecemos três regiões distintas para cada aglomerado/grupo da amostra: uma região interna que abrange (quase) todo o núcleo frio (do inglês, *cool-core*), uma região externa projetada para evitar a contaminação proveniente do núcleo frio e uma região correspondente ao campo de visão completo do XIS/*Suzaku*. Aglomerados do tipo *cool-core* são caracterizados por gradientes centrais de abundância de Fe, onde se observa um pico de brilho da superfície e abundância de Fe no centro, enquanto a temperatura, tipicamente, declina para valores aproximadamente  $\sim 2 - 3$  vezes abaixo dos registrados nas regiões periféricas. Em contrapartida, aglomerados sem núcleos frios não apresentam o pico de brilho da superfície e queda de temperatura central, como destacado por [14].

A faixa de *redshift* da amostra de aglomerados e grupos de galáxias é determinada considerando a função de espalhamento pontual e o campo de visão do XIS a bordo do satélite *Suzaku*. As regiões internas são círculos com raios de  $1'$  a  $4'$ , escolhidos com base no raio *cool-core* e na minimização da contaminação pela PSF. Os raios são determinados com referência ao projeto ACCEPT [15], exceto para Abell 3571 [16, 17], NGC 6338, NGC 2300 [18], NGC 4472 [19], Grupos NGC 1550 [20] e UGC 3957 [21]. As regiões externas são anéis com raio interno  $\geq 5'$  e raio externo  $8'$ . A escolha de  $5'$  reduz a contaminação da vizinhança do núcleo frio.<sup>1</sup> Regiões totais têm um raio de  $8'$ .

## 3 Metodologia

Elaboramos uma metodologia não paramétrica para comparar os *yields* preditos por modelos de ex-

<sup>1</sup>[http://www.astro.isas.jaxa.jp/suzaku/process/caveats/caveats\\_xrtxis03.html](http://www.astro.isas.jaxa.jp/suzaku/process/caveats/caveats_xrtxis03.html)

plosão de SNe com as razões de abundâncias observadas no meio intra-grupo/aglomerado de nossa amostra. Para detalhes sobre a metodologia, sugerimos a consulta ao trabalho [1]. A abordagem desenvolvida atribui pesos a cada medida de razão de abundância, formando assim uma função de distribuição de probabilidade total. Essa abordagem visa evitar a atenuação ao calcular a média dessas medidas.

### 3.1 Relação entre abundâncias no ICM e modelos teóricos de explosão de supernovas com yields

Os elementos químicos presentes no ICM/IGrM têm origens distintas em fontes estelares. Supomos que os elementos pesados observados no ICM/IGrM provêm, em última instância, do material expelido por dois tipos de supernovas (SN): SNIa e SNcc, sendo este último representativo de todas as supernovas resultantes do colapso do núcleo estelar. O enriquecimento químico no ICM/IGrM pode, assim, ser quantificado por meio de uma combinação linear de cada tipo de SNe. O número *observado* de átomos no ICM, denotado como  $N(E)$  para um determinado elemento E, é expresso como:

$$\underbrace{N(E)}_{\text{observado no ICM}} = \underbrace{n_i N_i^{\text{Ia}}(E) + n_j N_j^{\text{cc}}(E)}_{\text{previsto por modelos de SN}}, \quad (1)$$

onde  $N_i^{\text{Ia}}(E)$  e  $N_j^{\text{cc}}(E)$  são os números de átomos previstos pelos modelos SNIa  $i$  e modelos SNcc  $j$ , respectivamente. Aqui,  $i = 1, 2, \dots, 232$  refere-se aos 232 modelos de SNIa considerados, e  $j = 1, 2, \dots, 31$  indexa os 31 modelos de SNcc. As abundâncias numéricas  $A_i^{\text{Ia}}(E)$  e  $A_j^{\text{cc}}(E)$  representam o número de átomos de um dado elemento E dividido pelo número de átomos de hidrogênio (H), normalizado para a mesma razão que o valor solar, produzido pelos modelos de SNIa  $i$  e pelos modelos de SNcc  $j$ , respectivamente. Os coeficientes  $n_i$  e  $n_j$  indicam o número de SNIa e de SNcc que contribuíram para o enriquecimento do ICM/IGrM, calculados adotando-se os modelos  $i$  e  $j$ , respectivamente. O argumento E representa o elemento químico considerado, onde E=O, Ne, Mg, Si, S, Ar, Ca, Fe, Ni. Daqui em diante, desenvolveremos a notação para os modelos de SNIa  $i$ . Entretanto, uma expressão análoga das equações nesta seção pode ser obtida para os modelos de SNcc  $j$ .

O número de átomos,  $N_i^{\text{Ia}}$ , de um dado elemento E,

é definido como:

$$N_i^{\text{Ia}} = N_i^{\text{Ia}}(E) = \frac{Y_i^{\text{Ia}}(E)}{\mu(E)}, \quad (2)$$

onde  $Y_i^{\text{Ia}}(E)$  é o *yield* em massa do elemento E (simulado) pelo modelo SNIa  $i$ , e  $\mu(E)$  é a massa atômica do elemento E.

Enquanto os *yields*  $Y_i^{\text{Ia}}$  são diretamente extraídos das tabelas de *yields* considerando as conversões de unidades, os *yields* de Supernovas do colapso do núcleo (SNcc) são fornecidos para diferentes massas da estrela progenitora ( $m$ ) e sua metalicidade inicial,  $Z_{\text{init}}$ , ou seja,  $Y_j^{\text{cc}}(m, E, Z_{\text{init}})$ . Utilizamos a Função de Massa Inicial (FMI) de Salpeter [22] com inclinação  $\alpha = -2,35$  para ponderar esses *yields* discretos dentro dos limites de massa simulados ( $m_{j,\text{low}}$  a  $m_{j,\text{up}}$ ) para uma  $Z_{\text{init}}$  comum.

A média total de *yields*,  $\bar{Y}_j^{\text{cc}}(E, Z_{\text{init}})$ , para um elemento E específico, ponderada pela Função de Massa Inicial (do inglês, *Initial Mass Function* ou IMF) de Salpeter dentro do intervalo de  $m_{j,\text{low}}$  e  $m_{j,\text{up}}$  para uma dada metalicidade inicial da estrela progenitora,  $Z_{\text{init}}$ , é expressa como:

$$\bar{Y}_j^{\text{cc}} = \bar{Y}_j^{\text{cc}}(E, Z_{\text{init}}) = \frac{\int_{m_{j,\text{low}}}^{m_{j,\text{up}}} Y_j^{\text{cc}}(m, E, Z_{\text{init}}) m^\alpha dm}{\int_{m_{j,\text{low}}}^{m_{j,\text{up}}} m^\alpha dm}, \quad (3)$$

onde  $Y_j^{\text{cc}}(m, E, Z_{\text{init}})$  é o *yield* sintetizado pelo modelo de SNcc  $j$  por uma estrela progenitora com massa inicial  $m$  e metalicidade  $Z_{\text{init}}$  para o elemento E.

Por definição, a abundância numérica  $A_i^{\text{Ia}}$  (relativa a H) de um dado elemento E medida no XSPEC tem a relação abaixo:

$$A_i^{\text{Ia}} = A_i^{\text{Ia}}(E) \equiv \frac{[N_i^{\text{Ia}}(E)/N(\text{H})]}{[N(E)/N(\text{H})]_\odot}, \quad (4)$$

onde  $N(E)$  e  $N(\text{H})$  são o número de átomos dos elementos E e hidrogênio, respectivamente, e  $[N(E)/N(\text{H})]_\odot$  representa essa razão para o sol, ou seja, a abundância solar (adotada de [23]).

A razão de abundância elementar individual de um dado elemento E para aquela de Fe,  $R(E)$ , usando as Equações (1), (2) e (4), pode ser escrita como

$$R(E) = f_i R_i^{\text{Ia}}(E) + f_j R_j^{\text{cc}}(E), \quad (5)$$

onde  $R_i^{\text{Ia}} = R_i^{\text{Ia}}(E) \equiv \frac{A_i^{\text{Ia}}(E)}{A_i^{\text{Ia}}(\text{Fe})}$  é a razão de abundância do elemento E prevista pelo modelo de SNIa  $i$ . A

fração de massa de ferro  $f_i$  resulta do enriquecimento do ICM usando o modelo de SNIa  $i$ , expressa como

$$f_i = \frac{n_i N_i^{\text{Ia}}(\text{Fe})}{N(\text{Fe})} \text{ e } f_j = \frac{n_j N_j^{\text{cc}}(\text{Fe})}{N(\text{Fe})}. \quad (6)$$

Tal fração também pode ser expressa em termos dos *yields* e das medidas de abundâncias observadas no ICM como

$$f_i = \frac{Y_i^{\text{Ia}}(\text{Fe}) \bar{Y}_j^{\text{cc}}(\text{Fe}) - Y_i^{\text{Ia}}(\text{Fe}) \bar{Y}_j^{\text{cc}}(\text{E}) \frac{A(\text{Fe})}{A(\text{E})} \frac{\mu(\text{Fe})}{\mu(\text{E})} \left( \frac{N(\text{E})}{N(\text{Fe})} \right)_{\odot}}{\frac{A(\text{Fe})}{A(\text{E})} \frac{\mu(\text{Fe})}{\mu(\text{E})} \left( \frac{N(\text{E})}{N(\text{Fe})} \right)_{\odot} [Y_i^{\text{Ia}}(\text{E}) \bar{Y}_j^{\text{cc}}(\text{Fe}) - Y_i^{\text{Ia}}(\text{Fe}) \bar{Y}_j^{\text{cc}}(\text{E})]}, \quad (7)$$

onde, por definição,  $f_i + f_j \equiv 1$ . As abundâncias numéricas medidas no ICM para elementos específicos E e Fe são denotadas como  $A(\text{E})$  e  $A(\text{Fe})$ , respectivamente.

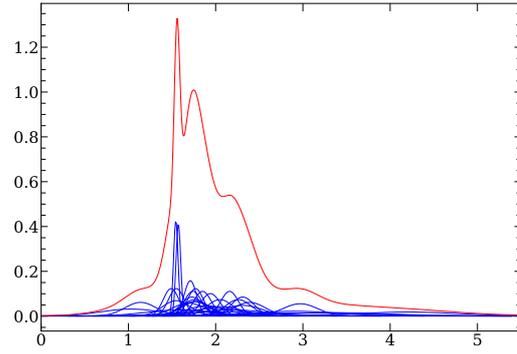
Portanto, as razões de abundância observadas do elemento E em relação ao elemento Fe ( $R(\text{E})$ ) revelam uma combinação linear das razões dos *yields* teóricos dos modelos de SNIa e SNcc ( $R_i^{\text{Ia}}(\text{E})$  e  $R_j^{\text{cc}}(\text{E})$ , respectivamente), como mostra a Equação (5). Posteriormente, vamos comparar a distribuição das razões de abundância *teóricas* dos modelos de SNIa e SNcc com a distribuição da razão de abundância *observada*.

#### 4 Comparação não-paramétrica: ranqueando modelos teóricos de explosão de supernova

Utilizamos o teste de Kolmogorov-Smirnov (KS) para ranquear a semelhança entre duas CDFs, representando a distribuição teórica de *yields* (tCDF, associada ao par de modelos de explosões de SNe) e a distribuição dos dados observados (eCDF, associada às medidas de razões de abundância no ICM). Para isso, utilizamos o estimador de semelhança entre as CDFs,  $D_{i,j}(\text{E})$ , que calcula a distância máxima entre elas para um par específico ( $i, j$ ) dos modelos de SNe ( $i, j$ ), expressa

$$D_{i,j}(\text{E}) = \max |e\text{CDF}(R(\text{E})) - \text{tCDF}(R_i^{\text{Ia}}(\text{E}), R_j^{\text{cc}}(\text{E}))|. \quad (8)$$

Escolhemos um nível de significância pré-estabelecido de  $\alpha = 0,05$  como limite para rejeitar a hipótese nula. Quando o valor  $p$  (do inglês, *valor de p*) é inferior a esse limite, concluímos que as duas distribuições são significativamente diferentes e rejeitamos a hipótese nula. Implementamos o teste KS de duas amostras, adaptando a rotina `scipy.stats.kstest` da biblioteca SciPy-Python [24].



**Figura 1:** Função de distribuição de probabilidade das medidas da razão de abundância Si/Fe das regiões interna e externa. As linhas azuis indicam a medida de Si/Fe para cada objeto em nossa amostra, representada por distribuições normais cuja média é o valor nominal de Si/Fe e o desvio padrão é o respectivo erro. A linha vermelha é a soma final de cada distribuição normal em nossa amostra.

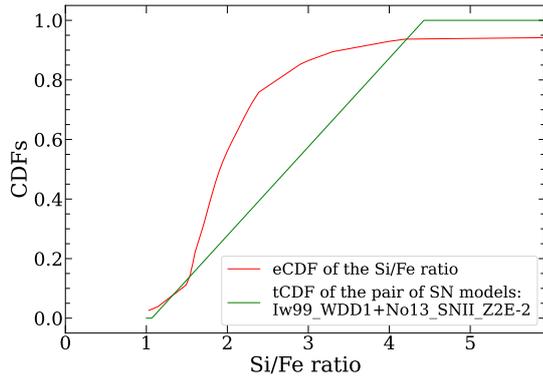
#### Função de distribuição cumulativa empírica (eCDF)

A função de distribuição cumulativa empírica (eCDF) é construída a partir das razões de abundância medidas no meio intra-grupo/aglomerado (ICM) de um determinado elemento E (eCDF( $R(\text{E})$ )).

A Figura 1 apresenta as distribuições normais das razões Si/Fe,  $R(\text{E})$ , para cada aglomerado e grupo de galáxias (linhas azuis) em nossa amostra. A eCDF é construída considerando os valores nominais das razões de abundância observadas e seus erros associados. O procedimento é exemplificado usando a razão de abundância Si/Fe. Cada medida de Si/Fe é modelada como uma distribuição normal centrada no valor nominal da razão de abundância, com um desvio padrão igual ao erro associado. A função de distribuição de probabilidade total de Si/Fe (linha vermelha) é obtida pela soma e normalização das distribuições normais individuais. A eCDF correspondente de Si/Fe (linha sólida verde na Figura 2) é calculada usando a distribuição de probabilidade total. Este procedimento é repetido para cada uma das oito razões de abundância consideradas neste trabalho.

#### Função de distribuição cumulativa teórica (tCDF)

A função de distribuição cumulativa teórica (tCDF) é construída para cada par de modelos de SNe, composto por um modelo de Supernova Tipo Ia (SNIa) e um modelo de Supernova por colapso



**Figura 2:** Comparação entre a função de distribuição cumulativa empírica (eCDF) e a função de distribuição cumulativa teórica (tCDF) para o par SN composto por Iw99\_WDD1 (SNIa,  $R(\text{Si})_{\text{WDD1}}^{\text{Ia}} = 1,067$ ) e No13\_SNII\_Z2E-2 (SNcc,  $R(\text{Si})_{\text{SNII Z2E-2}}^{\text{cc}} = 4,43$ ). A linha vermelha sólida representa a eCDF da razão de abundância Si/Fe dos grupos e aglomerados de galáxias de nossa amostra. A linha verde sólida indica o tCDF construído a partir do par de modelos de SNe Iw99\_WDD1 e No13\_SNII\_Z2E-2 (ver texto).

do núcleo (SNcc) associada às razões de abundância teóricas de um par de modelos de Supernovas (SNe),  $R_i^{\text{Ia}}(E)$  e  $R_j^{\text{cc}}(E)$ , compostos por um modelo SNIa  $i$  e um modelo SNcc  $j$  ( $\text{tCDF}(R_i^{\text{Ia}}(E), R_j^{\text{cc}}(E))$ ). A tCDF é construída considerando essas razões como limites da função de distribuição de probabilidade (PDF) e assumindo que, entre esses limites, cada valor tem a mesma probabilidade, ou seja, uma PDF plana.

Para um enriquecimento total devido apenas a SNIa no meio intra-grupo/aglomerado (ICM), a razão de abundância seria  $R_i^{\text{Ia}}(E)$ . No extremo oposto, com todo o enriquecimento proveniente de SNcc, a razão seria  $R_j^{\text{cc}}(E)$ . Além disso, (i) qualquer medida intermediária  $R_i^{\text{Ia}}(E) < R(\text{Si}) < R_j^{\text{cc}}(E)$  resulta de uma combinação linear de ambos os tipos de SN e (ii) este par de modelos de SN explica a razão de abundância observada entre esses limites. A probabilidade de medir  $R(\text{Si})$  fora desse intervalo é 0. Em termos da função de distribuição cumulativa ( $\text{tCDF}(x) = P[\text{Si/Fe} \leq x]$ ), isso pode ser expresso como:

$$\text{tCDF}(x) = \begin{cases} 0 & \text{se } x < R_i^{\text{Ia}}(E), \\ \frac{x - R_i^{\text{Ia}}(E)}{R_j^{\text{cc}}(E) - R_i^{\text{Ia}}(E)} & \text{se } \begin{cases} R_i^{\text{Ia}}(E) \leq x \\ x < R_j^{\text{cc}}(E) \end{cases} \\ 1 & \text{se } x \geq R_j^{\text{cc}}(E). \end{cases} \quad (9)$$

**Tabela 1:** *Yields* dos modelos teóricos de SN em unidades solar.

Razões de Abundância	No06_SNII_Z2E-2 (SNcc)	Oh14_DD_40 (SNIa)
O/Fe	3,04	0,013
Ne/Fe	5,17	0,002
Mg/Fe	4,24	0,03
Si/Fe	3,54	0,78
S/Fe	2,82	0,70
Ar/Fe	1,71	0,45
Ca/Fe	2,05	0,60
Ni/Fe	1,16	2,12

## 5 Resultados e discussão

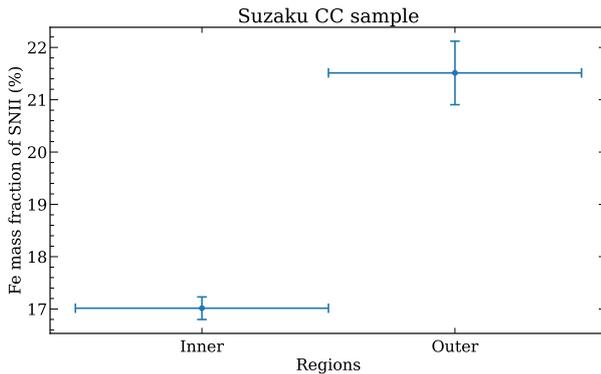
Considerando duas classes de Supernovas (SNe): SNcc e SNIa, calculamos a fração de massa de Fe de SNII para várias regiões interna e externa do IGrM/ICM. Utilizamos a combinação do modelo Oh14\_DD\_40 de detonação retardada 3D [12] (SNIa) e o modelo No06\_SNII\_Z2E-2 de Supernova Tipo II com metalicidade inicial de 0,02 [13] (SNII), pesada na IMF de Salpeter na faixa de massa de 13-40  $M_{\odot}$ , conforme apresentado em [1]. A Tabela 1 apresenta os *yields* para esses modelos.

No trabalho de [1], avaliamos a compatibilidade entre razões de abundância previstas por 7192 pares de modelos de supernovas (SN) e observações no meio intra-grupo/aglomerado (ICM/IGM) para oito razões de abundância em 18 aglomerados e grupos de galáxias. Aplicamos o teste Kolmogorov-Smirnov (KS) para cada par de modelos SN, rejeitando a hipótese nula quando o valor de  $p$  é menor que 0,05 ( $2\sigma$ ).

Calculamos a fração média percentual de massa de Fe para as regiões interna e externa, utilizando as razões de abundâncias observadas pelo satélite Suzaku e os modelos de SNe mencionados (ver Tabela 2). Valores percentuais não-físicos foram excluídos da média, representando aqueles fora da faixa de 0–100%. A Figura 3 mostra a média ponderada das frações médias percentuais de massa de Fe de todas as razões E/Fe, exceto O/Fe. Essa média revela que a região interna tem uma fração percentual de massa de Fe proveniente de SNII menor do que na região externa, onde esse valor cresce de  $17,0 \pm 0,2$  para  $21,3 \pm 0,6$ .

**Tabela 2:** Fração percentual da massa de Fe de SNII em valores percentuais para a amostra de aglomerados e grupos de galáxias com núcleos frios.<sup>2</sup>

Região	O/Fe (%)	Ne/Fe (%)	Mg/Fe (%)	Si/Fe (%)	S/Fe (%)	Ar/Fe (%)	Ca/Fe (%)	Ni/Fe (%)
Interna	2,0±0,3	43,3±0,7	33,3±0,6	31,2±0,6	37,0±0,9	100±4	69±4	58±4
Externa	3,6±0,8	32,4±1,7	51,8±1,7	38,0±1,6	40,3±2,6	> 100 <sup>3</sup>	78±9	< 0 <sup>4</sup>

**Figura 3:** Fração percentual de massa de Fe de SNII das medidas do Suzaku de aglomerados e grupos com núcleos frios, baseada na combinação dos modelos Oh14\_DD\_40 [12] e modelo No06\_SNII\_Z2E-2 [13].

A Tabela 2 apresenta a fração percentual de massa de Fe de SNII para diferentes razões de abundância na amostra de aglomerados e grupos de galáxias com núcleos frios. Valores acima de 100% ou abaixo de 0% não são físicos, portanto, apenas os limites inferiores ou superiores são apresentados. A Figura 3 ilustra esses resultados, destacando a importância das diferentes razões de abundância na determinação da fração de massa de Fe de SNII.

É importante observar que a região interna apresenta uma medida discrepante para a razão O/Fe em Abell 3526 (também conhecido como aglomerado de Centauro), resultando em uma fração percentual de massa de Fe de SNII de  $2,2 \pm 0,3$ . Desconsiderando essa medida, a média ponderada da fração de massa de Fe de SNII aumenta para  $0,79 \pm 0,03$  solar. Essa discrepância em Centauros pode ser atribuída à com-

<sup>2</sup>Os valores acima de 100% e abaixo de 0% não são físicos, logo apresentamos apenas os limites inferiores ou superiores. Para informação do leitor os erros fracionários percentuais também estão indicados neste rodapé.

<sup>3</sup>Erro fracionário de 9%.

<sup>4</sup>Erro fracionário de 9%.

plexidade de seu núcleo, incluindo bolhas e subestruturas. A região englobada com o Suzaku é dominada pela região central do aglomerado, e Centauros possui um núcleo bem complexo, com bolhas e subestruturas, incluída pela nossa região interna nos seus  $3'$  ( $\sim 45$  kpc) centrais [25]. Por outro lado, nossa medida mais baixa de O,  $0,011 \pm 0,007$  solar, pode ter sido afetada devido à simplicidade de modelos (1T) que usamos para ajustar essa zona central complexa, ainda pelo fato de fixarmos o valor da densidade de coluna de hidrogênio durante o ajuste espectral. Medidas mais detalhadas e modelos mais refinados podem esclarecer essa disparidade.

A delimitação das regiões internas maximiza o excesso de abundância de ferro medida, pois se baseia na região espacial do núcleo frio. O pico de abundância de Fe no centro dos sistemas de galáxias do tipo *cool-core* pode derivar de um prolongado período de enriquecimento por explosões SNIa, cujos produtos são depositados na galáxia mais brilhante em aglomerados [26, 27]. Estudos iniciais apontavam uma contribuição relativamente maior da fração de massa de Fe proveniente do material ejetado de SNIa nas regiões centrais de aglomerados do tipo *cool-core*, em comparação com as regiões externas [16, 28]. Essa tendência não se revelou uma característica universal, carecendo de confirmação sistemática em todas as medições das razões de abundâncias [29–32]. Contudo, encontramos a existência do gradiente radial na fração de massa de Fe proveniente de SNIa nas regiões centrais de aglomerados do tipo *cool-core*. Este resultado apoia a hipótese de que a Pressão de Arrasto desempenha um papel significativo no transporte de metais dentro desses sistemas. A pressão de arrasto é mais eficiente no centro devido à mais alta densidade do ICM/IGrM do que nas regiões periféricas, produzindo uma distribuição de metais concentrada nas regiões centrais. Sobretudo para aglomerados massivos, onde essa característica foi mostrada

em simulações numéricas de N-corpos [33]. Nossos resultados (e todo resultado quantitativo em relação ao enriquecimento químico) são sensíveis à escolha dos modelos de explosão de supernovas. Para minimizar esta incerteza, consideramos os melhores modelos teóricos para reproduzir o padrão observado no ICM/IGrM [1].

Ventos galácticos impulsionados por supernovas (do inglês, *SN-driven galactic winds*) já foram sugeridos como um possível mecanismo de transferência de metais do meio intergalático para o ICM. Esse mecanismo parece desempenhar um papel importante tanto na reprodução dos valores observados de metais no ICM quanto no aquecimento do ICM próximo às regiões centrais de grupos de galáxias [8]. Em escalas maiores de aglomerados, esse mecanismo também pode ser relevante no enriquecimento químico do ICM. Estimativas baseadas nas metalicidades do ICM sugerem que esse mecanismo é uma importante fonte de material rico em metais, enriquecendo o ICM com ejeções de SNII, abundantes em elementos *alpha* [34].

## 6 Conclusão

Neste estudo, calculamos a fração de massa de ferro das razões de abundância nas regiões centrais de dezoito aglomerados e grupos de galáxias com núcleos frios, considerando a contribuição de SNII e SNIa. A escolha do par de modelos de SN afeta o valor dessa fração. Para reduzir esta incerteza, utilizamos modelos teóricos de detonação retardada 3D de [12] para Supernovas do Tipo Ia (SNIa) e o modelo de SNII com metalicidade inicial de 0,02 da estrela progenitora de [13], um dos pares de modelos mais bem avaliados dentre o conjunto de mais de sete mil combinações [1]. Com isso, nossa abordagem, utilizando os modelos mais bem avaliados, proporcionou uma avaliação robusta da fração percentual de massa de Fe proveniente de SNII/SNIa, revelando padrões distintos no enriquecimento químico da amostra para regiões centrais e externas.

Os resultados destacam variações significativas na fração de massa de Fe proveniente de SNII entre as regiões interna e externa dos aglomerados e grupos estudados. Observamos uma diminuição da contribuição de SNII/SNIa na região interna, indicando que os processos envolvidos no enriquecimento químico nessa área mais centralizada podem ter uma contri-

buição significativa da galáxia dominante no centro desses sistemas através da pressão de arrasto. Esse resultado favorece o cenário em que a pressão de arrasto é um dos mecanismos relevantes no transporte de metais nesses sistemas.

Além disso, a medida discrepante em Centauros ressalta a complexidade desses sistemas e destaca a necessidade de investigações mais aprofundadas. A discrepância na razão O/Fe em Centauros aponta para desafios na modelagem das regiões centrais complexas, indicando a importância de técnicas de modelagem mais refinadas para uma compreensão abrangente desses ambientes. Observações desse tipo de objeto com os observatórios de ponta, como Athena [35] e XRISM [36], proporcionarão caracterização dinâmica e química sem precedentes. As nuances identificadas na distribuição do Fe incentivam futuras investigações a aprimorar ainda mais nossos modelos e abordagens analíticas, promovendo uma compreensão mais completa dos processos que regem o enriquecimento químico do meio intra-grupo e intra-aglomerado.

## Agradecimentos

Agradecemos aos pareceristas pelos comentários extremamente úteis, que nos permitiram melhorar este artigo. Este trabalho utiliza observações arquivadas do satélite *Suzaku*. Este estudo foi financiado em parte pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código Financeiro 001. R.M.B. acknowledges support by Centre National d’Études Spatiales (CNES) under the EPICSSC project for XMM-Newton.

## Sobre as autoras

Rebeca M. Batalha ([rbatalha.astro@gmail.com](mailto:rbatalha.astro@gmail.com)) é graduada em Física pela UFRRJ (2016) e mestre e doutora em Astronomia pelo Observatório Nacional (2018 e 2022). Atualmente, ela é pesquisadora pós-doutoral no Département d’Astrophysique no instituto CEA Paris-Saclay, França. Sua pesquisa se concentra na astrofísica de altas energias de aglomerados de galáxias, dedicando-se à investigação do enriquecimento químico desses objetos através dos dados dos observatórios espaciais de raios-X do meio intra-aglomerado (ICM). Ela faz parte da colaboração do

CHEXMATE (Cluster HERitage project with XMM-Newton: Mass Assembly and Thermodynamics at the Endpoint of structure formation), que busca obter observações XMM-Newton homogêneas de uma amostra representativa de 118 aglomerados de galáxias para reconstruir a distribuição das principais grandezas termodinâmicas do ICM. Além disso, ela participa do levantamento J-PAS, atuando na seleção bayesiana de grupos fósseis no grupo de aglomerados e lentes. Seu trabalho atual em astrofísica extragaláctica enfatiza estruturas em larga escala, aglomerados e grupos de galáxias, grupos fósseis, enriquecimento de metais e modelos de explosão de supernovas.

Yolanda Jiménez-Teja graduou-se em Matemática pela Universidad de Cádiz (2003) e obteve seu doutorado em Física y Matemáticas pela Universidad de Granada (2011). Atualmente, ela é pesquisadora pós-doutoral no Instituto de Astrofísica de Andaluzia em Granada, Espanha, onde recebeu uma prestigiosa bolsa Marie Curie. Dedicou-se à astrofísica, com foco particular no estudo da luz intra-aglomerado (ICL) e na dinâmica dos aglomerados de galáxias. Jiménez-Teja contribuiu para várias publicações importantes, incluindo estudos sobre lentes gravitacionais e propriedades de galáxias e aglomerados distantes. Ela tem um histórico notável de pesquisa e colaboração em importantes projetos de astronomia observacional, como a pesquisa de lentes gravitacionais e supernovas com o Hubble (CLASH). Seu trabalho é significativamente relevante para a compreensão das propriedades dos aglomerados de galáxias e a estrutura em larga escala do universo.

---

### Sobre o autor

Renato de Alencar Dupke é formado em Astronomia pela Universidade Estatal de Moscou M. V. Lomonossov (1990), possui mestrado em Física e Matemática pela mesma universidade (1993) e doutorado em Astrofísica pela University of Alabama (1998). Atualmente, ele é astrônomo e pesquisador titular afiliado ao Observatório Nacional no Rio de Janeiro, Brasil, e atua também como pesquisador assistente visitante na Universidade de Michigan e na Universidade do Alabama, nos Estados Unidos. Sua pesquisa foca em astrofísica de altas energias, especialmente nas origens e evolução de aglomerados e grupos de galáxias. Ele é diretor científico da colaboração e investigador principal do levantamento J-PAS (Java-

lambre Physics of the Accelerating Universe Survey) no Brasil (PAU-BRASIL), um levantamento terrestre destinado a coletar dados espectro-fotométricos de milhões de galáxias para entender melhor a energia escura e a estrutura do universo. Seu trabalho atual na área de astrofísica extragaláctica enfatiza estruturas em larga escala, aglomerados e grupos de galáxias, grupos fósseis, enriquecimento de metais, dinâmica do meio intra-aglomerado, luz intra-aglomerado e modelos de explosão de supernovas.

### Referências

- [1] R. M. Batalha, R. A. Dupke e Y. Jiménez-Teja, *Ranking Theoretical Supernovae Explosion Models from Observations of the Intracluster Gas*, *Annual Review of Astronomy & Astrophysics* **262**(1), 27 (2022). [ArXiv:2207.00601](#).
- [2] K. Maeda e Y. Terada, *Progenitors of type Ia supernovae*, *International Journal of Modern Physics D* **25**, 1630024 (2016). [ArXiv:1609.03639](#).
- [3] I. R. Seitenzahl e D. M. Townsley, *Nucleosynthesis in Thermonuclear Supernovae* (2017), 1955.
- [4] M. Livio e P. Mazzali, *On the progenitors of Type Ia supernovae*, *Physics Reports* **736**, 1 (2018). [ArXiv:1802.03125](#).
- [5] K. Nomoto, C. Kobayashi e N. Tominaga, *Nucleosynthesis in Stars and the Chemical Enrichment of Galaxies*, *Annual Review of Astronomy & Astrophysics* **51**(1), 457 (2013).
- [6] S. Schindler e A. Diaferio, *Metal Enrichment Processes*, *Space Science Reviews* **134**(1-4), 363 (2008). [ArXiv:0801.1061](#).
- [7] F. Mernier et al., *Enrichment of the Hot Intracluster Medium: Observations*, *Space Science Reviews* **214**(8), 129 (2018). [ArXiv:1811.01967](#).
- [8] R. B. Larson e H. L. Dinerstein, *Gas loss in groups of galaxies*, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* **87**, 911 (1975).

- [9] J. E. Gunn e J. R. Gott, III, *On the Infall of Matter Into Clusters of Galaxies and Some Effects on Their Evolution*, *The Astrophysical Journal* **176**, 1 (1972).
- [10] V. Biffi, F. Mernier e P. Medvedev, *Enrichment of the Hot Intracluster Medium: Numerical Simulations*, *Space Science Reviews* **214**(8), 123 (2018). [ArXiv:1811.01955](#).
- [11] K. Maeda e Y. Terada, *Progenitors of type Ia supernovae*, *International Journal of Modern Physics D* **25**(10), 1630024 (2016). [ArXiv:1609.03639](#).
- [12] S. T. Ohlmann et al., *The white dwarf's carbon fraction as a secondary parameter of Type Ia supernovae*, *Astronomy & Astrophysics* **572**, A57 (2014). [ArXiv:1409.2866](#).
- [13] K. Nomoto et al., *Nucleosynthesis yields of core-collapse supernovae and hypernovae, and galactic chemical evolution*, *Nuclear Physics A* **777**, 424 (2006). [ArXiv:astro-ph/0605725](#).
- [14] S. De Grandi e S. Molendi, *Metallicity Gradients in X-Ray Clusters of Galaxies*, *Annual Review of Astronomy & Astrophysics* **551**(1), 153 (2001). [ArXiv:astro-ph/0012232](#).
- [15] K. W. Cavagnolo et al., *Intracluster Medium Entropy Profiles for a Chandra Archival Sample of Galaxy Clusters*, *Annual Review of Astronomy & Astrophysics* **182**(1), 12 (2009). [ArXiv:0902.1802](#).
- [16] R. A. Dupke e I. White, Raymond E., *Constraints on Type IA Supernova Models from X-Ray Spectra of Galaxy Clusters*, *Annual Review of Astronomy & Astrophysics* **528**(1), 139 (2000). [ArXiv:astro-ph/9907343](#).
- [17] D. Eckert, S. Molendi e S. Paltani, *The cool-core bias in X-ray galaxy cluster samples. I. Method and application to HIFLUGCS*, *Astronomy & Astrophysics* **526**, A79 (2011). [ArXiv:1011.3302](#).
- [18] J. Rasmussen e T. J. Ponman, *Temperature and abundance profiles of hot gas in galaxy groups – I. Results and statistical analysis*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **380**(4), 1554 (2007).
- [19] R. P. Kraft et al., *The gas dynamics of NGC 4472 revealed by XMM-Newton*, *The Astrophysical Journal* **727**(1), 41 (2010).
- [20] K. Kolokythas et al., *Evidence of AGN feedback and sloshing in the X-ray luminous NGC 1550 galaxy group*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **496**(2), 1471 (2020). [ArXiv:2005.12950](#).
- [21] S. Thölken et al., *X-ray analysis of the galaxy group UGC 03957 beyond  $R_{200}$  with Suzaku*, *Astronomy & Astrophysics* **592**, A37 (2016). [ArXiv:1603.05255](#).
- [22] E. E. Salpeter, *The Luminosity Function and Stellar Evolution.*, *Annual Review of Astronomy & Astrophysics* **121**, 161 (1955).
- [23] E. Anders e N. Grevesse, *Abundances of the elements: Meteoritic and solar*, *Geochimica Cosmochimica Acta* **53**(1), 197 (1989).
- [24] P. Virtanen et al., *SciPy 1.0: Fundamental Algorithms for Scientific Computing in Python*, *Nature Methods* **17**, 261 (2020).
- [25] J. S. Sanders et al., *A very deep Chandra view of metals, sloshing and feedback in the Centaurus cluster of galaxies*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **457**(1), 82 (2016). [ArXiv:1601.01489](#).
- [26] S. De Grandi et al., *On the iron content in rich nearby clusters of galaxies*, *Astronomy & Astrophysics* **419**, 7 (2004). [ArXiv:astro-ph/0310828](#).
- [27] H. Böhringer et al., *Implications of the central metal abundance peak in cooling core clusters of galaxies*, *Astronomy & Astrophysics* **416**, L21 (2004). [ArXiv:astro-ph/0402216](#).
- [28] A. Finoguenov, L. P. David e T. J. Ponman, *An ASCA Study of the Heavy-Element Distribution in Clusters of Galaxies*, *Annual Review of Astronomy & Astrophysics* **544**(1), 188 (2000). [ArXiv:astro-ph/9908150](#).
- [29] J. de Plaa et al., *Chemical evolution in Sérsic 159-03 observed with XMM-Newton*, *Astronomy & Astrophysics* **452**(2), 397 (2006). [ArXiv:astro-ph/0602582](#).

- [30] A. Simionescu et al., *Chemical enrichment in the cluster of galaxies Hydra A*, *Astronomy & Astrophysics* **493**(2), 409 (2009). [ArXiv:0809.2613](#).
- [31] H. Böhringer e N. Werner, *X-ray spectroscopy of galaxy clusters: studying astrophysical processes in the largest celestial laboratories*, *Astronomy & Astrophysics Reviews* **18**(1-2), 127 (2010).
- [32] F. Mernier et al., *Radial metal abundance profiles in the intra-cluster medium of cool-core galaxy clusters, groups, and ellipticals*, *Astronomy & Astrophysics* **603**, A80 (2017). [ArXiv:1703.01183](#).
- [33] S. Schindler et al., *Metal enrichment processes in the intra-cluster medium*, *Astronomy & Astrophysics* **435**(2), L25 (2005). [ArXiv:astro-ph/0504068](#).
- [34] V. Baumgartner e D. Breitschwerdt, *Metal enrichment of the intracluster medium: SN-driven galactic winds*, *Astronomische Nachrichten* **330**, 898 (2009). [ArXiv:0908.1309](#).
- [35] E. Cucchetti et al., *Athena X-IFU synthetic observations of galaxy clusters to probe the chemical enrichment of the Universe*, *Astronomy & Astrophysics* **620**, A173 (2018). [ArXiv:1809.08903](#).
- [36] XRISM Science Team, *Science with the X-ray Imaging and Spectroscopy Mission (XRISM)* (2020). [ArXiv:2003.04962](#).