

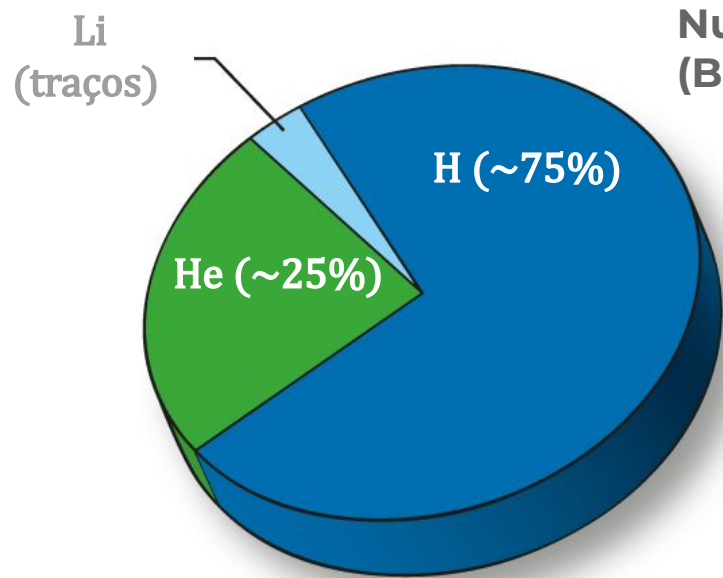
De supernovas a aglomerados de galáxias: o que os raios-X revelam sobre a história do enriquecimento químico do Universo

Rebeca Batalha

**“Somos feitos de
poeira de estrelas”**

Carl Sagan

Origem dos elementos químicos



Nucleosíntese primordial
(Big Bang nucleosynthesis, BBN)

- Os elementos mais pesados que He (salvo traços de Li e Be) não são produzidos na nucleossíntese primordial
- É necessária outra fonte de nucleossíntese.

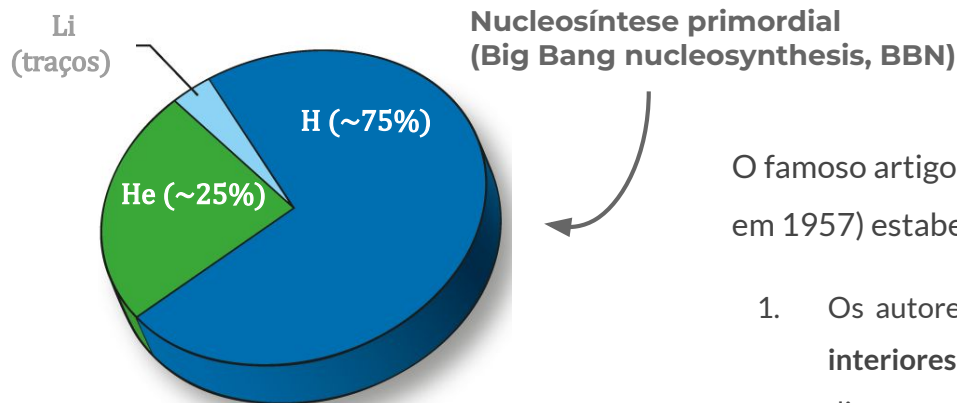
De onde vêm os elementos químicos (pesados)?

elementos químicos
pesados = metais

Para um review, veja
(Coc & Vangioni, 2017)

Origem dos elementos químicos

Isso mudou completamente nossa visão sobre a origem dos elementos químicos.
Em vez de serem produzidos no Big Bang, eles são fabricados pelas estrelas ao longo da evolução do Universo



O famoso artigo "B²FH" (escrito por Burbidge, Burbidge, Fowler e Hoyle em 1957) estabeleceu as bases da astrofísica nuclear moderna.

1. Os autores postularam que todos os metais foram produzidos em **interiores estelares ou durante explosões de supernovas**, durante os diversos estágios da vida de uma estrela, e isso pode ser demonstrado por oito processos nucleares diferentes. Dessa forma, a nucleossíntese primordial se limita a sintetizar apenas hidrogênio e hélio (e também com traços de outros elementos leves);

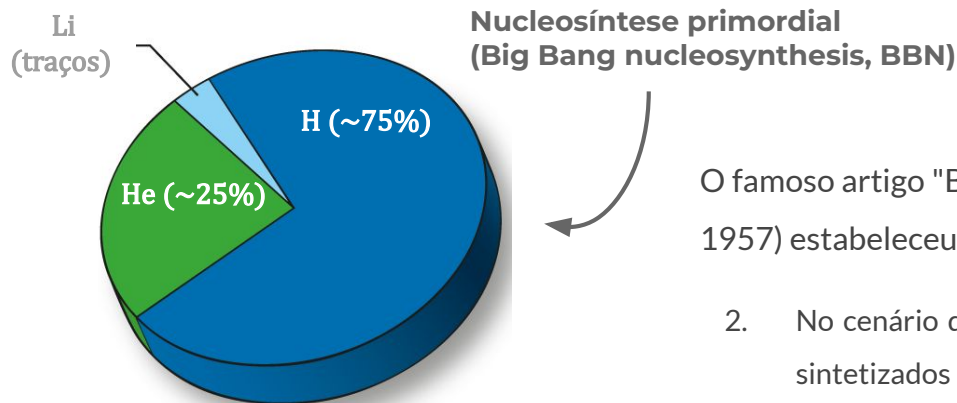
De onde vêm os elementos químicos (pesados)?

elementos químicos
pesados = metais

Para um review, veja
(Coc & Vangioni, 2017)

Origem dos elementos químicos

Eventos de supernovas desempenham um papel predominante na síntese e ejeção de elementos pesados e são extremamente importantes para entender o enriquecimento químico do Universo.



O famoso artigo "B²FH" (escrito por Burbidge, Burbidge, Fowler e Hoyle em 1957) estabeleceu as bases da astrofísica nuclear moderna.

2. No cenário de evolução química, os autores mostraram que os elementos sintetizados durante a vida das estrelas tem um papel fundamental para a evolução das suas galáxias. A explosão de uma estrela como supernova enriquecem o meio interestelar com material processado nos seus interiores e ainda depositam grandes quantidades de momento e energia nas suas vizinhanças.

De onde vêm os elementos químicos (pesados)?

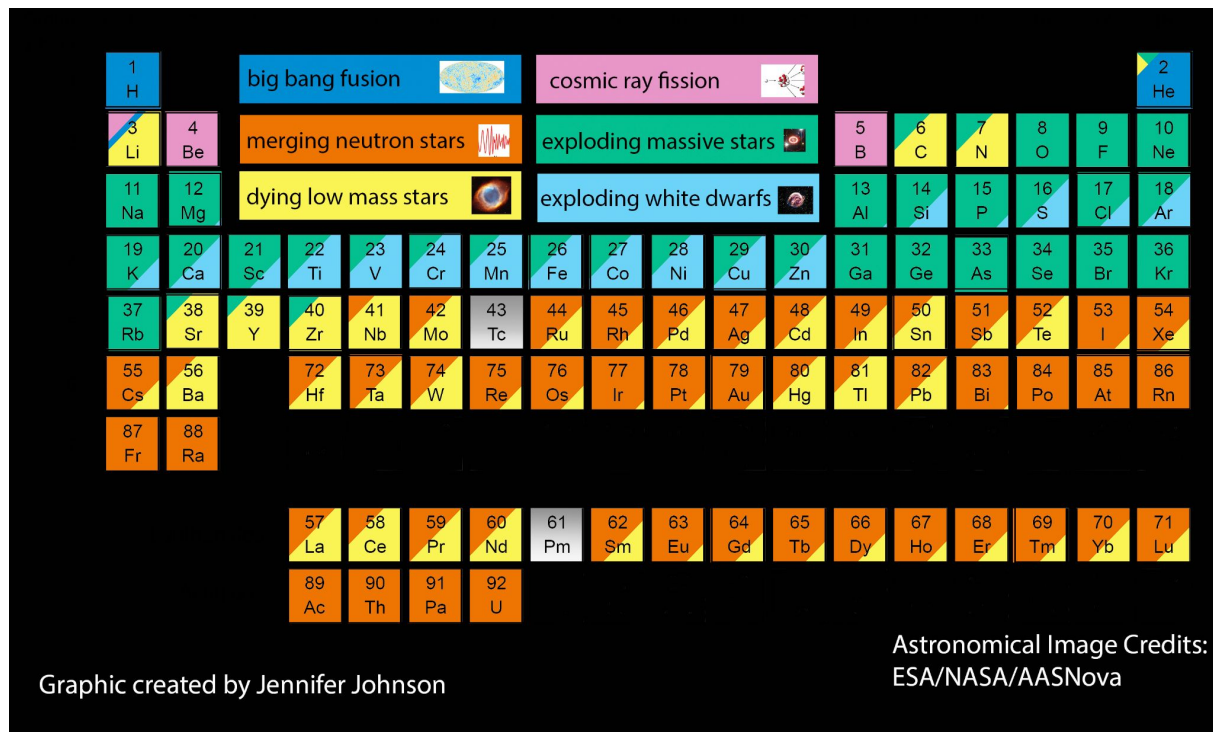
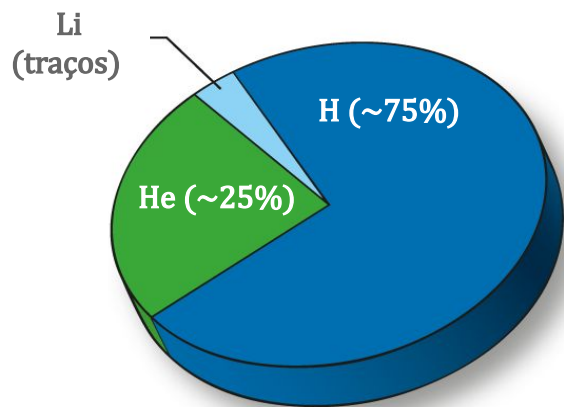
elementos químicos
pesados = metais

Para um review, veja
(Coc & Vangioni, 2017)

O que vemos hoje?

Origem dos elementos químicos (pesados)

Nucleosíntese primordial
(Big Bang nucleosynthesis, BBN)



Origem dos elementos químicos (pesados)

1 H	big bang fusion 										cosmic ray fission 						2 He
3 Li	4 Be	merging neutron stars 					exploding massive stars 					5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg	dying low mass stars 					exploding white dwarfs 					13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba		72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra																
			57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
			89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U											

Origem dos elementos químicos (pesados)

1 H	big bang fusion 					cosmic ray fission 					2 He						
3 Li	4 Be	merging neutron stars 					exploding massive stars 					5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg	dying low mass stars 					exploding white dwarfs 					13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba		72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra																
		57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu	
		89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U												

Origem dos elementos químicos (pesados)

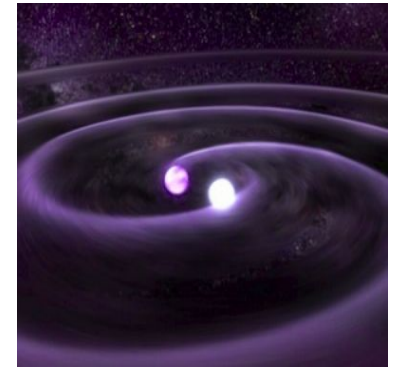
Supernova do Tipo Ia (SNIa)

O que se sabe sobre SNIa

- Explosão termonuclear de uma anã branca que captura matéria de uma estrela companheira
- Sem remanescentes
- Produz a maior parte dos elementos do grupo do ferro (p. ex., Fe, Ni) + quantidades significativas de Si, S, Ar e Ca

O que se **não** sabe sobre SNIa

- Natureza da estrela progenitora



(degenerada única vs. dupla degenerada)

- Física da explosão

(e.g., deflagração vs. detonação retardada)

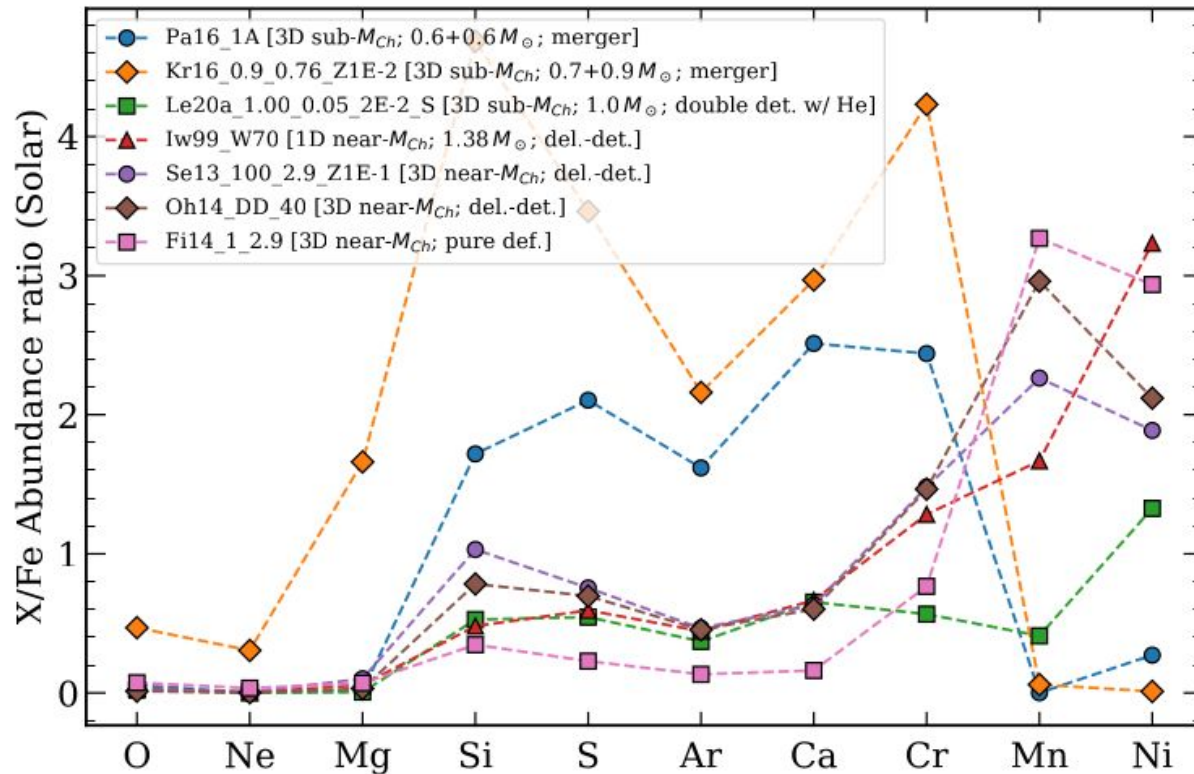
Origem dos elementos químicos (pesados)

Supernova do Tipo Ia (SNIa)

O que

- Explosão
- que cap
- compan
- Sem ren
- Produz
- grupo d

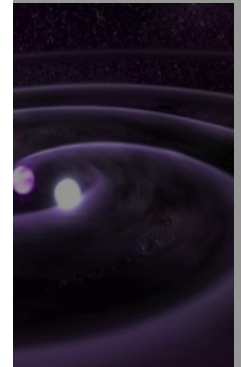
quantidades significativas de Si, S, Ar e Ca



- Física da explosão

(e.g., deflagração vs. detonação retardada)

e SNIa



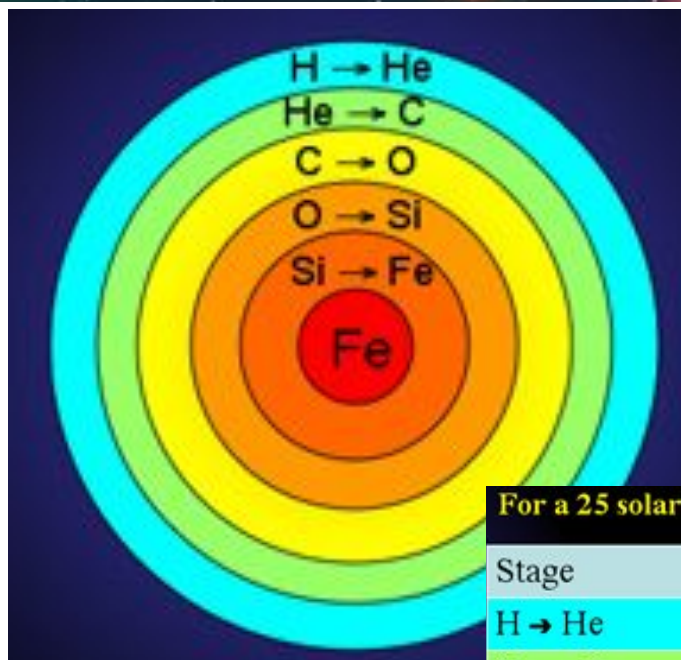
da)

Origem dos elementos químicos (pesados)

1 H	big bang fusion 										cosmic ray fission 										2 He																									
3 Li	4 Be	merging neutron stars 										exploding massive stars 										5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne																			
11 Na	12 Mg	dying low mass stars 										exploding white dwarfs 										13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar																			
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr																													
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe																													
55 Cs	56 Ba											72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn																				
87 Fr	88 Ra																																													
										57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu																						
										89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U																																	

Origem dos elementos químicos (pesados)

Supernova do Colapso do núcleo (SNcc)



Explodem (e enriquecem o meio) muito rapidamente após a formação estelar.

For a 25 solar mass star:

Stage	Duration
H → He	7×10^6 years
He → C	7×10^5 years
C → O	600 years
O → Si	6 months
Si → Fe	1 day
Core Collapse	1/4 second

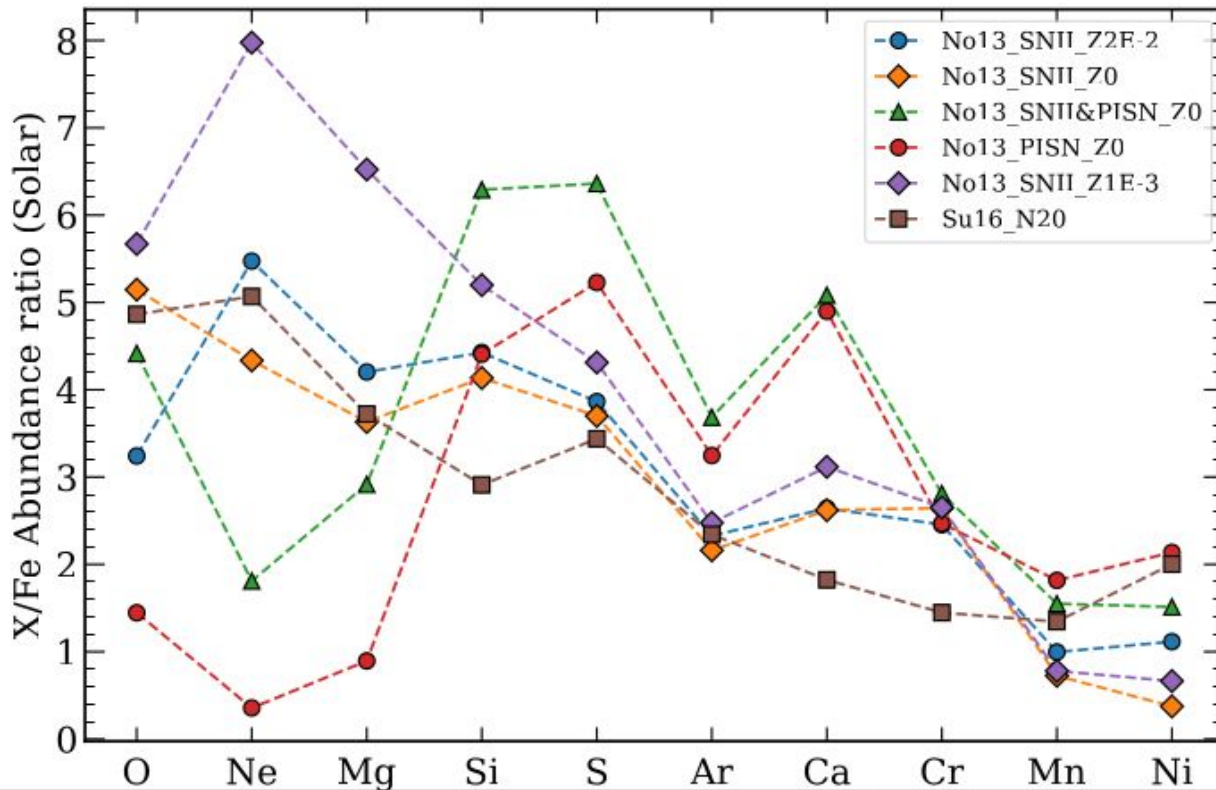
O que se sabe sobre SNcc

- Explosão decorrente do colapso do núcleo de uma estrela massiva ($M > 8M_{\odot}$)
- O remanescente é uma estrela de nêutrons
- Produz principalmente elementos alfa

O que se **não** sabe sobre SNcc

- Massa da estrela
- Metalicidade inicial da estrela

Origem dos elementos químicos (pesados)



Explodem (e enriquecem o meio) muito rapidamente após a formação estelar.

C → O	600 years
O → Si	6 months
Si → Fe	1 day
Core Collapse	1/4 second

- Massa da estrela
- Metalicidade inicial da estrela

Modelos Teóricos de Supernova

- SNcc: quase todo o **oxigênio (O)**, **neônio (Ne)** e **magnésio (Mg)** do Universo, bem como uma fração não desprezível (cerca de metade) do **silício (Si)** e **enxofre (S)** - e.g. [Kobayashi et al. \(2006\)](#).
- SNIa: a maior parte do **argônio (Ar)**, **cálcio (Ca)**, bem como os elementos do pico de Fe, em particular, **cromo (Cr)**, **manganês (Mn)**, **ferro (Fe)** e **níquel (Ni)** - e.g. [Iwamoto et al. \(1999\)](#). Além disso, quanto ao SNcc, cerca de metade do Si e do S são produzidos em explosões SNIa.

Nucleosynthesis products of SN II and Ia

Species	Synthesized mass ($M_{\odot}$)					
	Type II	Type Ia				
	10~50 $M_{\odot}$	W70	W7	WDD1	WDD2	WDD3
^{12}C	7.93E-02	5.08E-02	4.83E-02	1.80E-03	1.15E-03	5.82E-04
^{13}C	3.80E-09	1.56E-09	1.40E-06	3.52E-08	1.04E-08	6.90E-09
^{14}N	1.56E-03	3.31E-08	1.16E-06	3.08E-04	2.44E-04	7.42E-05
^{15}N	1.66E-08	4.13E-07	1.32E-09	6.84E-07	2.75E-07	1.68E-07
^{16}O	1.80	1.33E-01	1.43E-01	9.96E-02	6.93E-02	4.69E-02
^{17}O	9.88E-08	3.33E-10	3.54E-08	3.99E-06	4.50E-06	1.72E-06
^{18}O	4.61E-03	2.69E-10	8.25E-10	6.96E-07	4.62E-07	2.42E-07

[Nomoto et al. \(1997b\)](#), arxiv: 9706025

Aglomerado de galáxias (óptico)

Galáxias e luz intra-aglomerado (óptico)

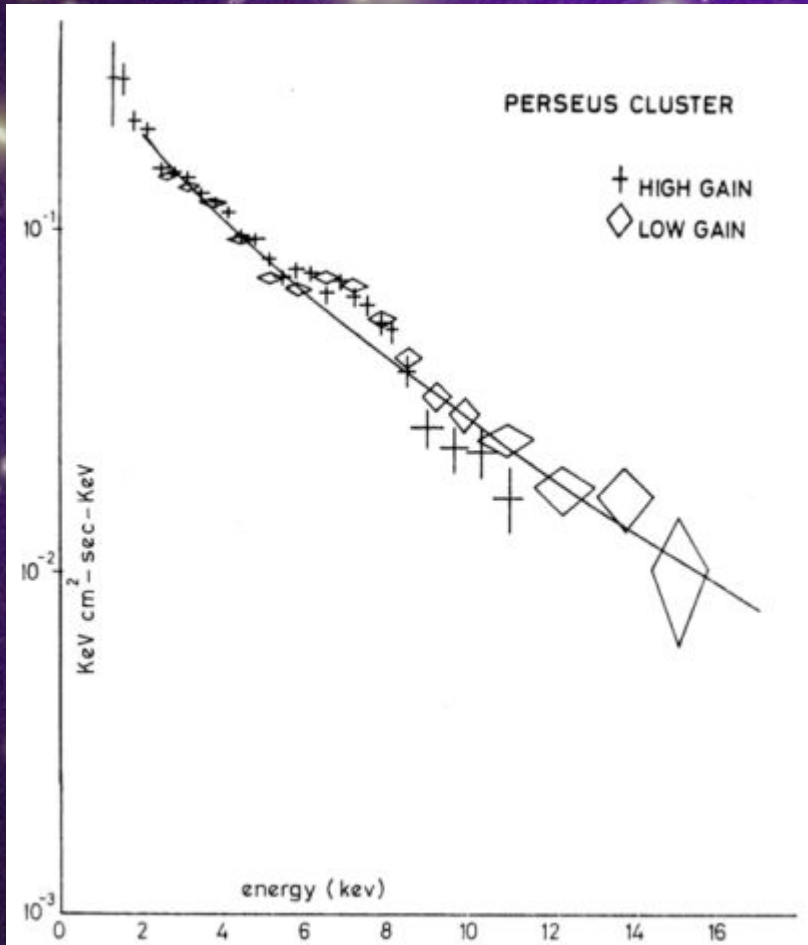
Galáxia mais brilhante
do aglomerado (BCG)



Aglomerado de galáxias (raios-X)

Galáxias e luz intra-aglomerado (óptico)

Meio intra-aglomerado (raios-X)



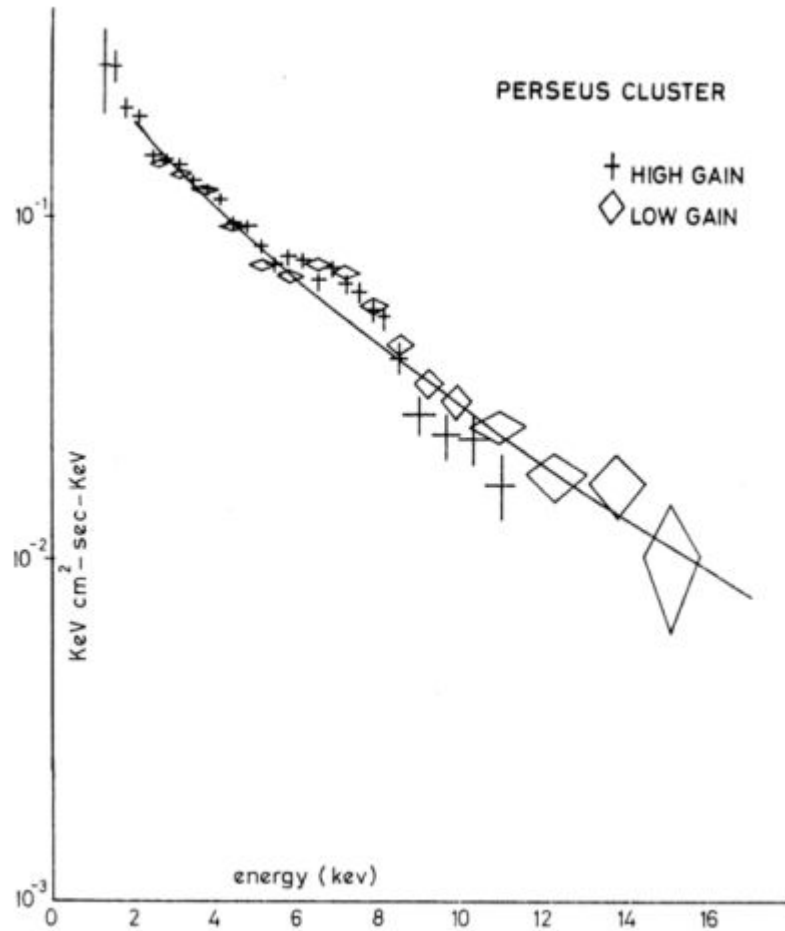
O meio intra-aglomerado (intracluster medium ou ICM)...

- ... é quente (de 10 a 100 milhões de K)
- ... é tênue (cerca de 1 partícula por cm^3)
- ... é opticamente fino (interessante para abundâncias!)
- ... está em equilíbrio de ionização colisional
- ... representa 80% da matéria bariônica total!

Ariel V

Mitchel et al. (1976)

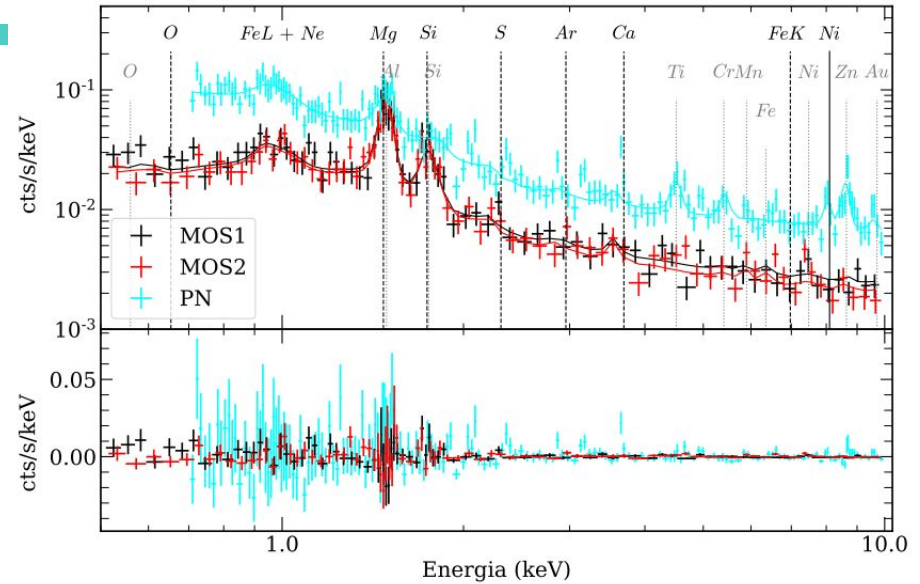
O meio intra-aglomerado contém metais



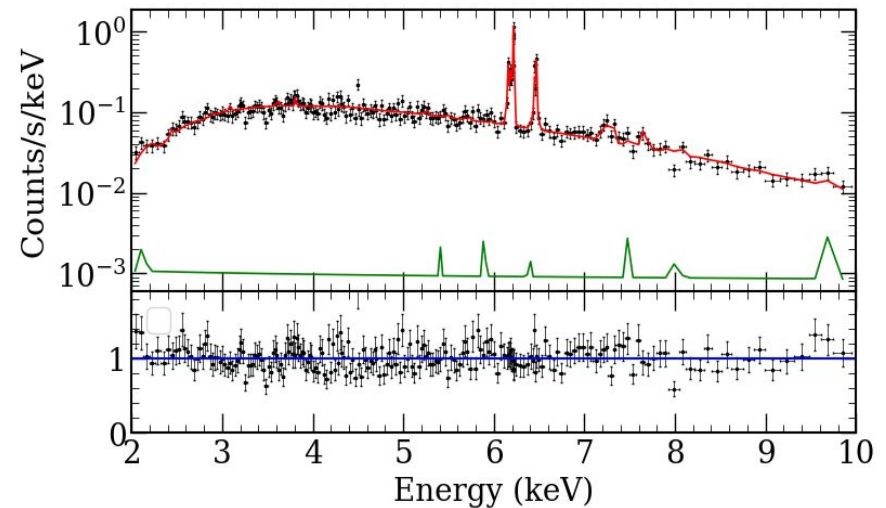
Ariel V

Mitchel et al. (1976)

XMM-Newton spectrum of RX J0856+0553



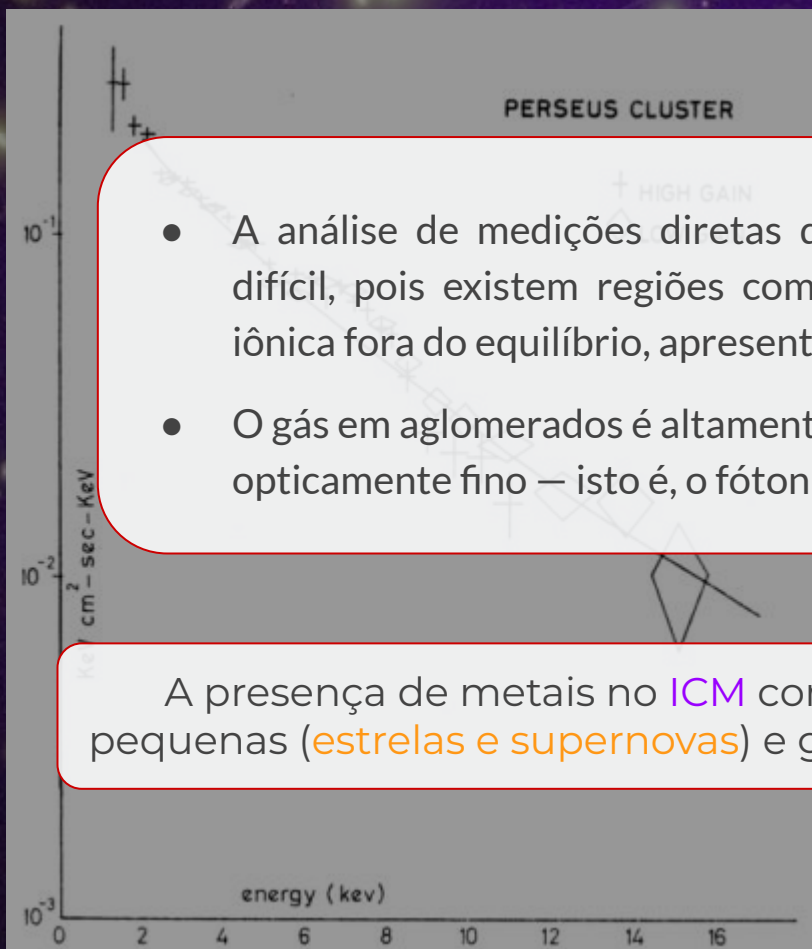
XRISM/Resolve spectrum of A2029



Por que utilizar o ICM para investigar a origem dos metais?

Galáxias e luz intra-aglomerado (óptico)

Meio intra-aglomerado (raios-X)



- A análise de medições diretas de remanescentes de supernovas (SNe) pode ser difícil, pois existem regiões com múltiplas temperaturas e um estado de colisão iônica fora do equilíbrio, apresentando incertezas muito elevadas (Schenck+16).
- O gás em aglomerados é altamente ionizado e de baixa densidade; trata-se de um gás opticamente fino — isto é, o fóton escapa praticamente sem interagir com nada.

A presença de metais no ICM constitui um elo direto entre escalas físicas pequenas (estrelas e supernovas) e grandes (grupos e aglomerados de galáxias).

The origin of (heavy) chemical elements

1 H	big bang fusion 						cosmic ray fission 						2 He												
3 Li	4 Be	merging neutron stars 						exploding massive stars 						5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne						
11 Na	12 Mg	dying low mass stars 						exploding white dwarfs 						13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar						
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr								
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe								
55 Cs	56 Ba		72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn								
87 Fr		Fe, Ni, Mn, Cr and also significant amounts of S, Si, Ar and Ca																							
		57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu									
		Ac	Th	Pa	U																				

Transporte de metais de galáxias-membros para o IGrM/ICM

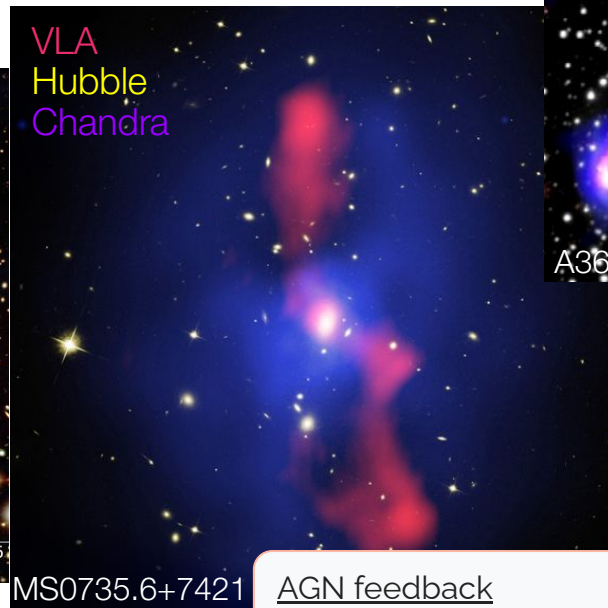
- Ainda, diferentes mecanismos produzem diferentes distribuições de metais.
- Os processos envolvidos no enriquecimento do ICM e sua importância relativa ainda estão em aberto.

Alguns dos mecanismos de transporte e mistura de metais contribuindo para o enriquecimento químico desses sistemas de galáxias podem ser:



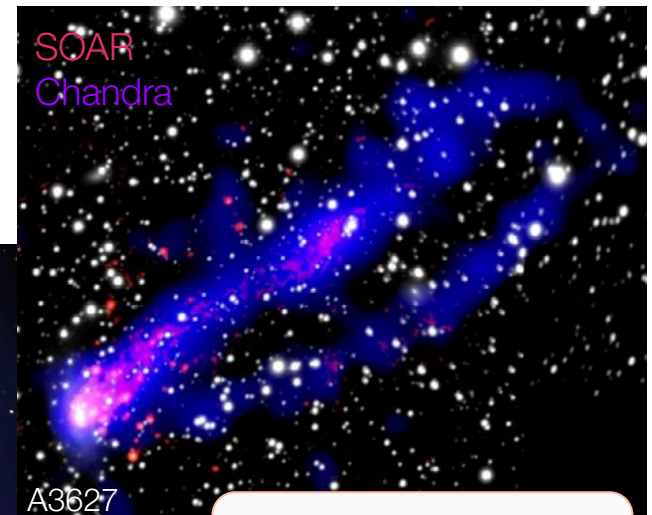
fusão em andamento

- emissão de raios-X alongada de pico duplo



AGN feedback

- Bolhas no ICM



RPS em A3627

- Multi-fase do ICM

Recapitulando a história...

Galaxies and intracluster light (optical)

Intracluster medium (X-ray)

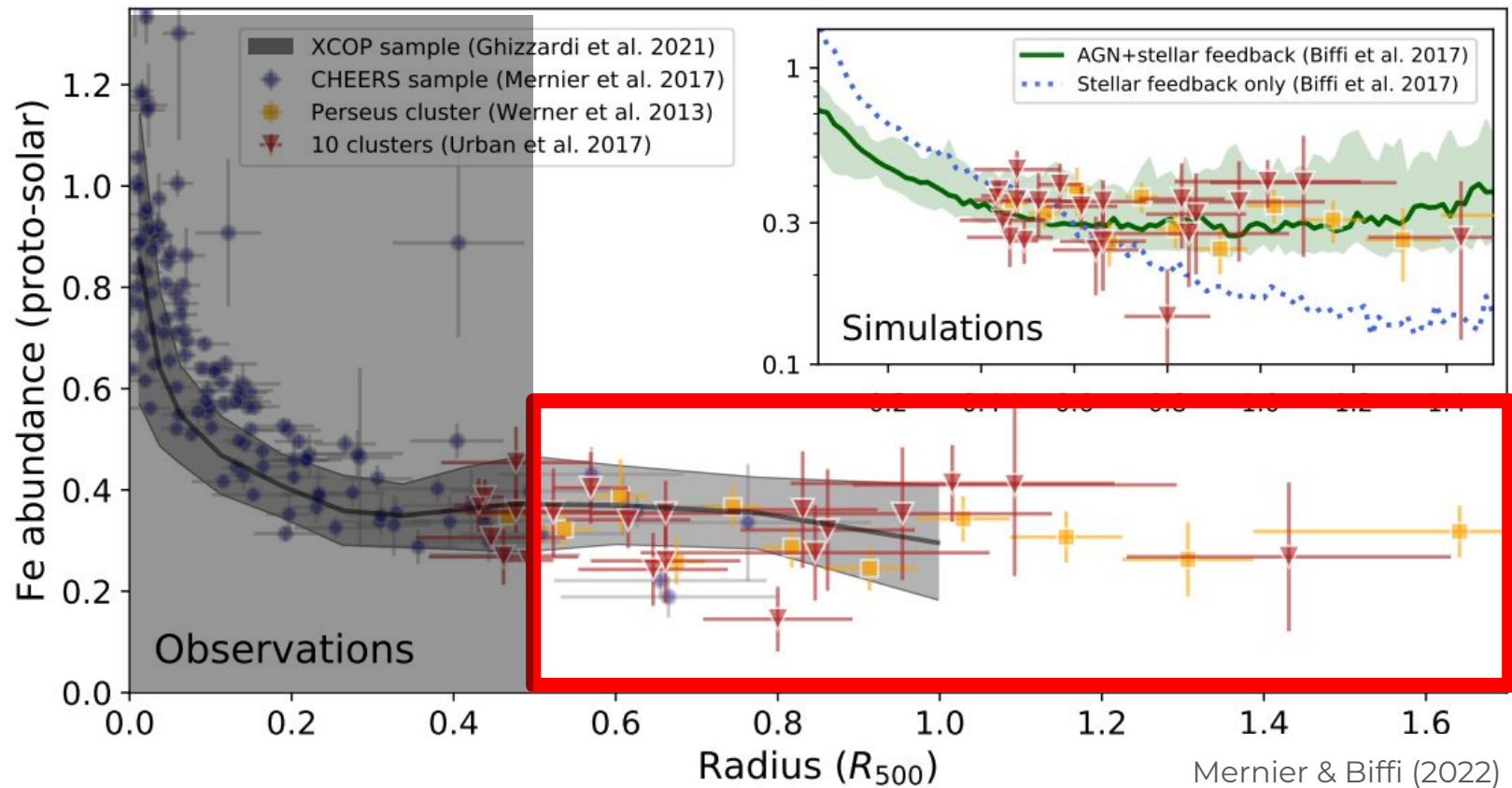
The presence of metals in **the ICM** is a direct link between small (**stars and supernovas**) and large physical scales (**galaxy groups and clusters**)

No entanto, os **modelos de SN com rendimentos** preveem valores muito diferentes entre si.

Isso nos impede de quantificar a **importância relativa da contribuição de SN** no **ICM**.

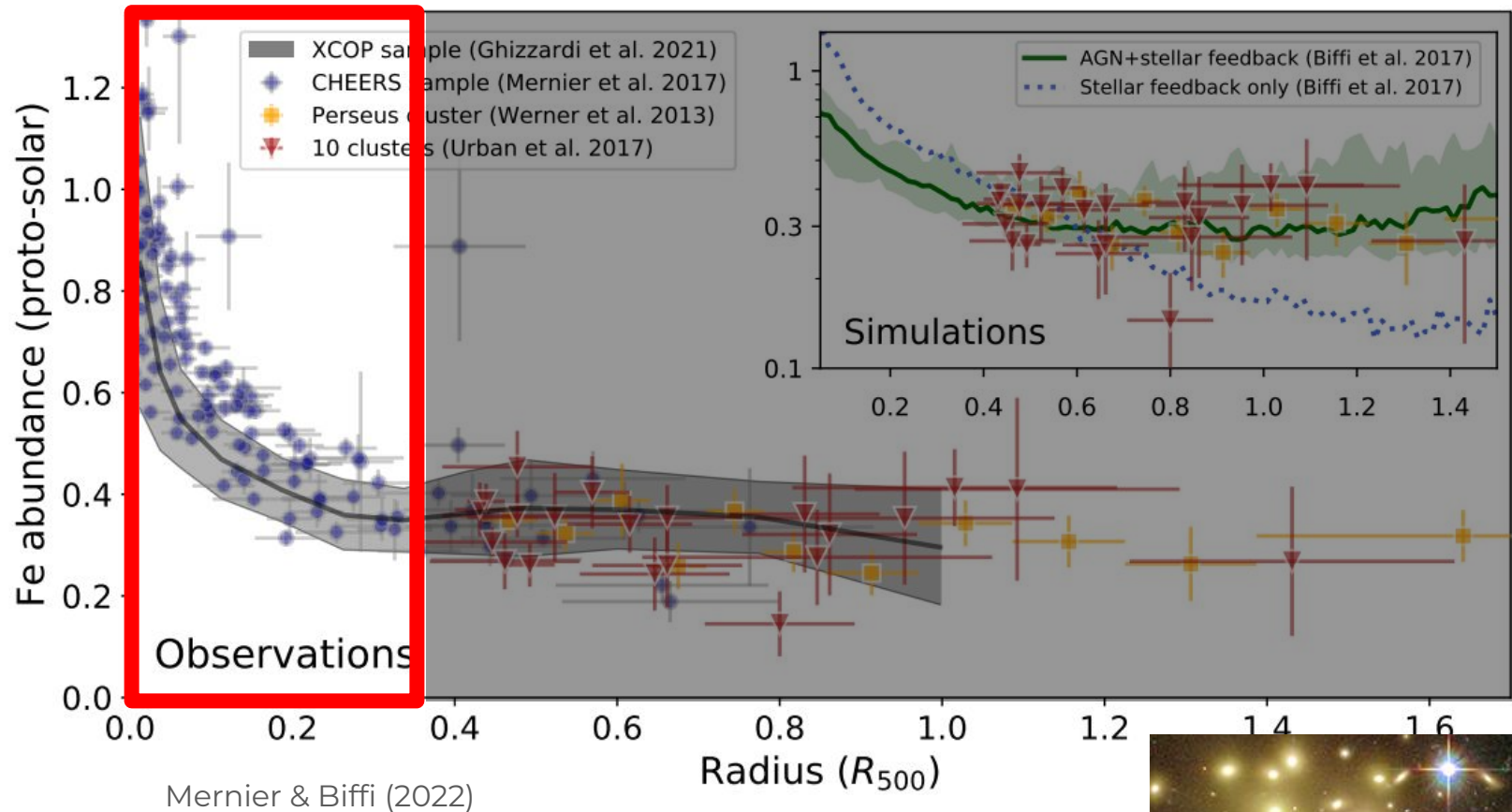
A distribuição espacial do ICM pode nos dar pistas sobre como
Investigar o transporte de metais e a eficiência dos mecanismos envolvidos no enriquecimento químico no ICM.

Perfil radial de Fe de aglomerados cool-core



- A distribuição da abundância de Fe é uniformemente constante em torno de $0.3Z_{\text{sol}}$
- Simulações também mostram isso desde que incluam AGN feedback bem cedo
- Evidência (indireta) do *early enrichment scenario*
 - Antes do aglomerado formar, mais de 10Gyr atrás ($z > 2-3$)
 - Mostly via AGN feedback (galactic winds)

Perfil radial de Fe de aglomerados cool-core



- A distribuição da abundância de Fe aumenta na direção central
- Interpretação inicial: Assinatura da contribuição tardia da SNIa na BCG

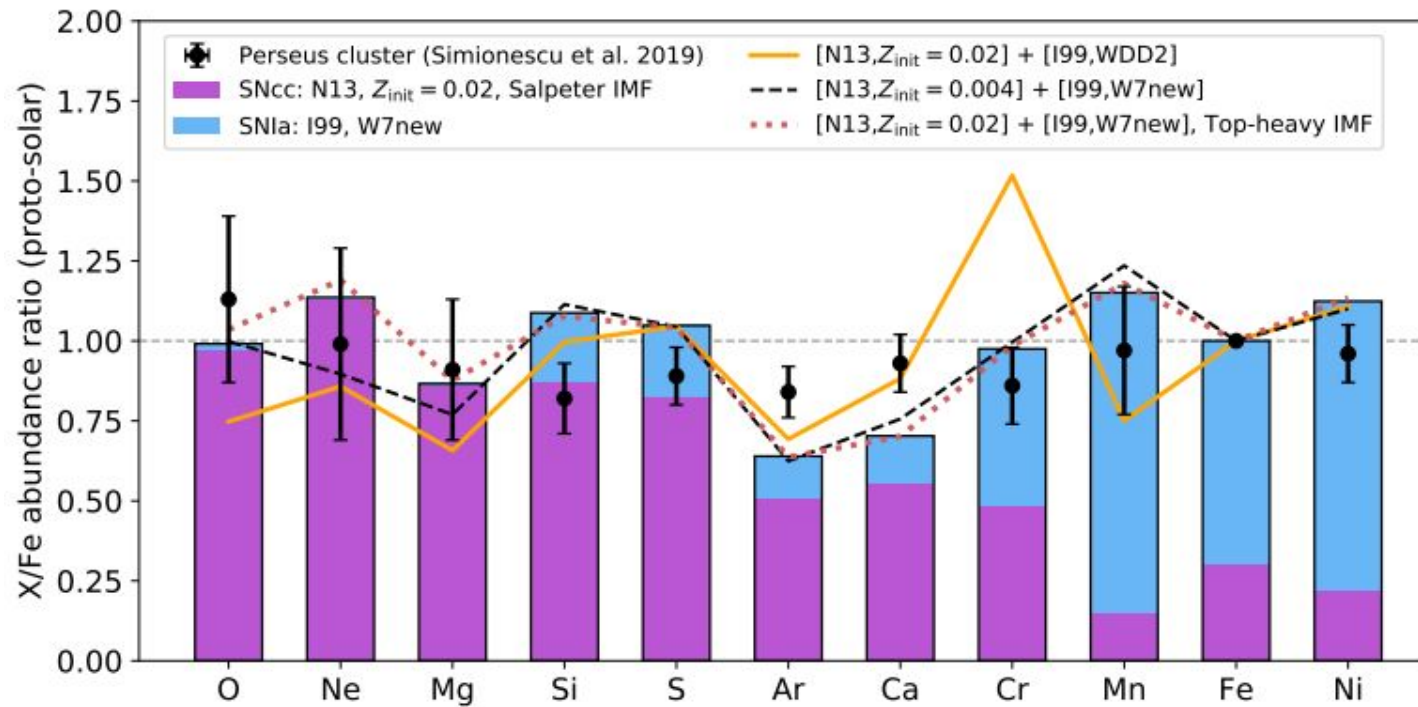


Ranquear os modelos de SNe

Para diminuir essas grandes incertezas,

1. **Classificação dos modelos de SN com base nas medições de abundância de ICM.**
2. Uso destes modelos para quantificar a contribuição relativa de supernovas para o ICM.
 - a. Nearby clusters and groups
 - b. Fossil groups
 - c. CHEX-MATE Heritage Sample
 - d. XRISM sample
 - e. NewAthena forecast for the collaboration

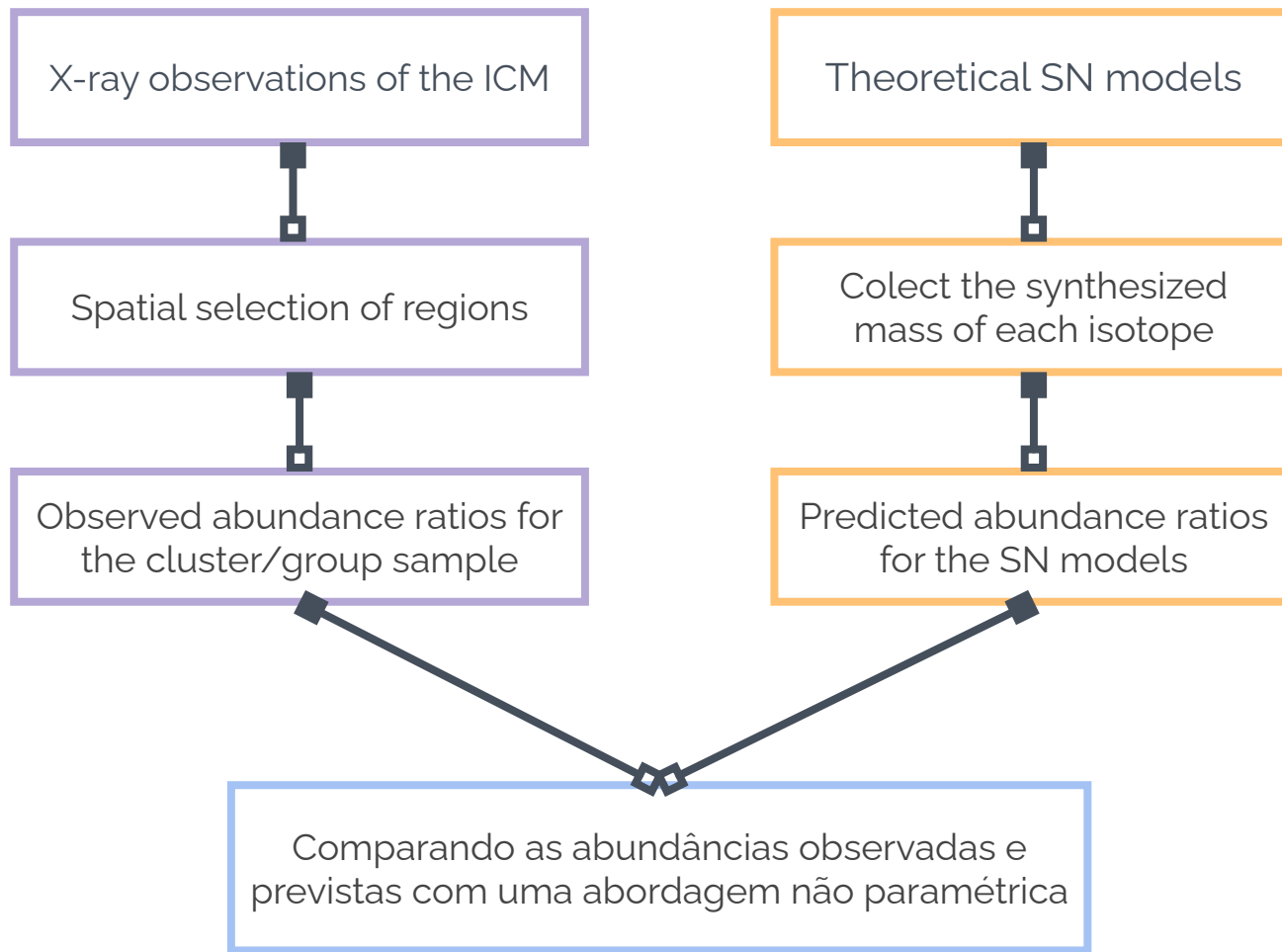
Razões de abundância medidas no núcleo do ICM do aglomerado de Perseus (XMM-Newton/RGS e Hitomi/SXS)



Mernier & Biffi (2022)

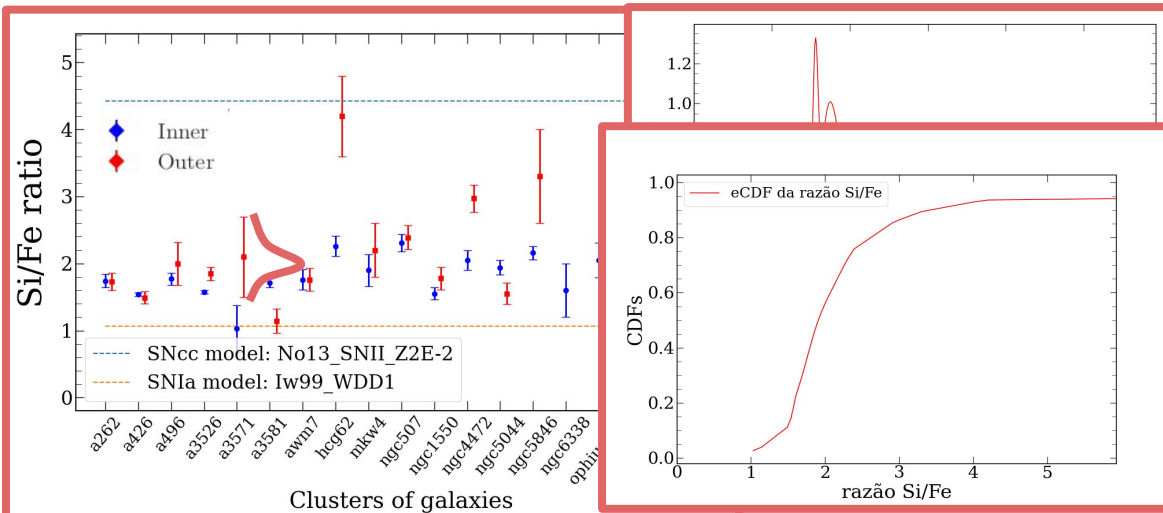
Não existe combinação satisfatória de modelos de SNIIa e SNcc pra descrever as abundâncias observadas no ICM

Quais modelos específicos de explosão são compatíveis com os dados?



Testamos **7.192 combinações de modelos de SN** em relação a dados observacionais para refinar nossa compreensão das contribuições das SN.

CDF Empírica (eCDF) e CDF teórica (tCDF)



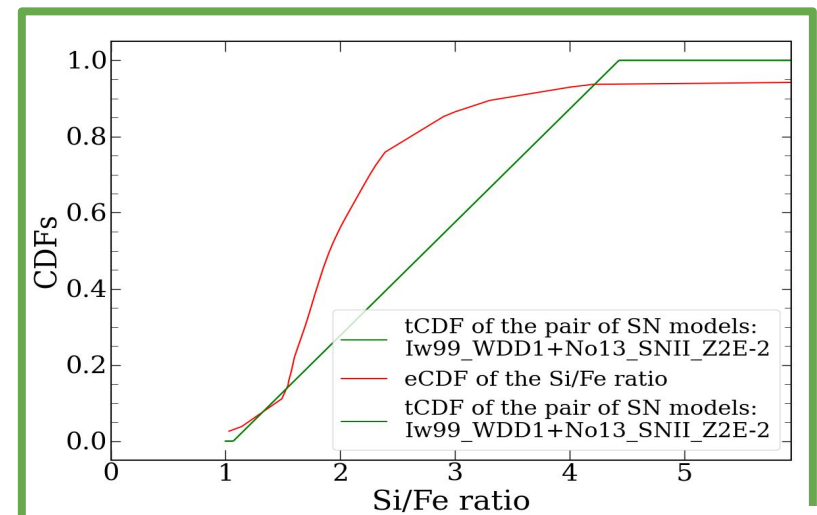
A função de distribuição acumulada (CDF) empírica foi construída considerando os dados como distribuições normais, nas quais os dados correspondem à média gaussiana e os desvios-padrão correspondem aos erros associados às razões de abundância.

Com base na razão Si/Fe *prevista* a partir de Iw99_WDD1 (SNIa) e No13_SNII_Z2E-2 (SNII)

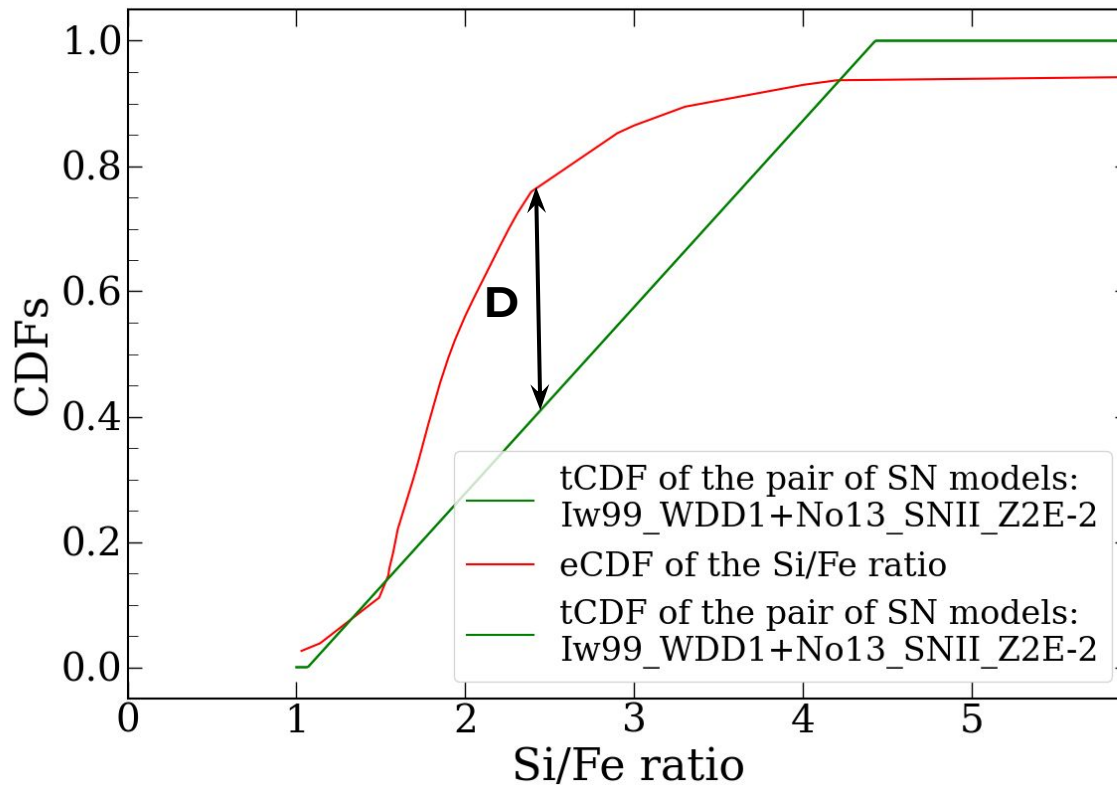
$$R(\text{Si})_{\text{WDD1}}^{\text{Ia}} = 1.067$$

$$R(\text{Si})_{\text{SNII Z2E-2}}^{\text{cc}} = 4.43$$

$$\text{tCDF}(x) = \begin{cases} 0 & \text{if } x < 1.067, \\ \frac{x - 1.067}{4.43 - 1.067} & \text{if } 1.067 \leq x < 4.43, \\ 1 & \text{if } x \geq 4.43. \end{cases}$$



Teste Kolmogorov-Smirnov



$$D = \max |F_1(x_1) - F_2(x_2)|$$

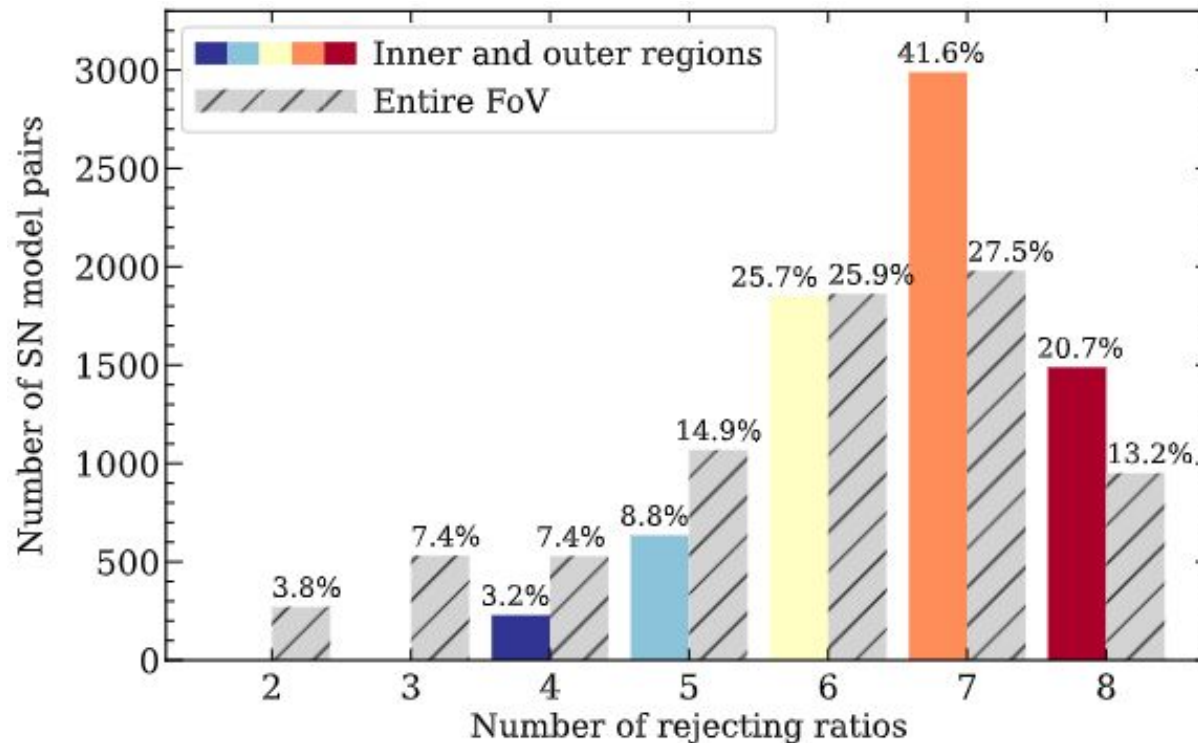
onde $F_1(x_1)$ e $F_2(x_2)$ são duas funções de distribuição acumulada

P-value threshold = 0.05

Para rejeitar a hipótese nula de que as distribuições têm a mesma origem.

Repetido para todas as razões e todos os pares de modelos SN.

Resultados



- O fato de que a separação entre as regiões interna e externa aumenta o poder discriminativo do método é consistente com a presença de gradientes radiais nas razões de abundância.
- Dentre os 7.192 pares distintos de modelos de SN testados, cerca de 21% (ou seja, 1.489 pares de SN) apresentam discrepâncias totais em todas as razões de abundância.

Conclusões

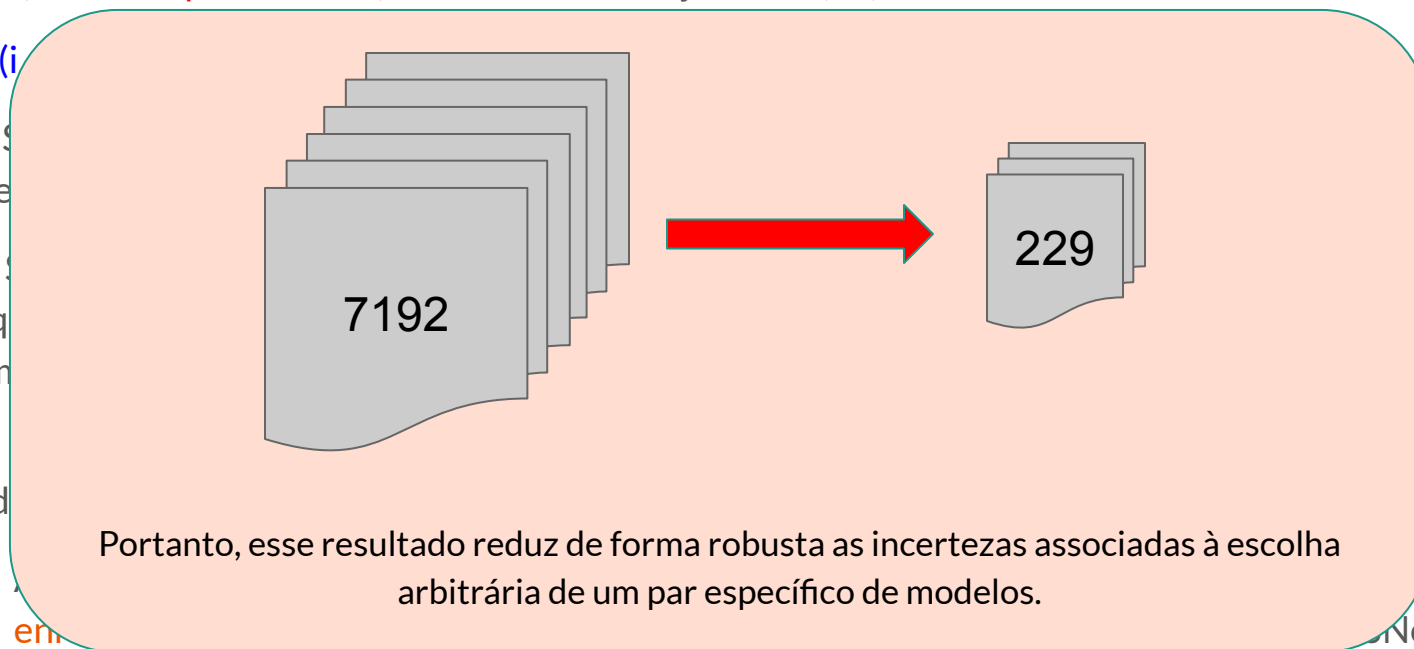
Dentre os 7.192 pares diferentes de modelos de SN testados:

- ~21% (i.e., 1489 pares de SN) são totalmente rejeitados (8x);

- ~3% (i.e., 229 pares de SN) são rejeitados (8x);

- Para SNIa com progenitores com metalicidade zero (WD)

- Para SNIa com progenitores com qualquer metalicidade, com qualquer densidade central, com qualquer densidade superficial.



Os resultados

- A escolha de um par específico de modelos para o SNcc com metalicidade zero ($Z_{\text{init}}=0$) não reproduzem de forma satisfatória o padrão de distribuição das razões de abundância do ICM, independentemente da escolha do pareamento com SNIa;
- A origem da maior parte do gás do ICM reside em SNIa provenientes de progenitores com massa próxima ao limite de Chandrasekhar e múltiplos pontos de ignição próximos ao centro.

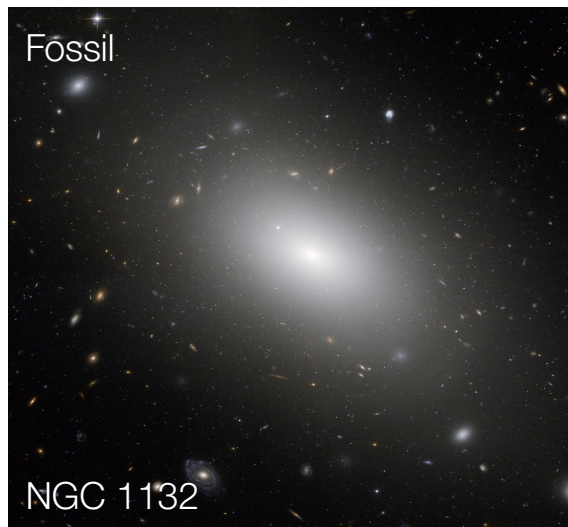
Ranquear os modelos de SNe

Para diminuir essas grandes incertezas,

1. Classificação dos modelos de SN com base nas medições de abundância de ICM.
2. Uso destes modelos para quantificar a contribuição relativa de supernovas para o ICM.
 - a. **Grupos Fósseis de galáxias**
 - b. Grupos e aglomerados próximos
 - c. Aglomerados próximos com XRISM
 - d. Forecast na colaboração do NewAthena

2a. Grupos Fósseis de galáxias

Fossil Galaxy Systems



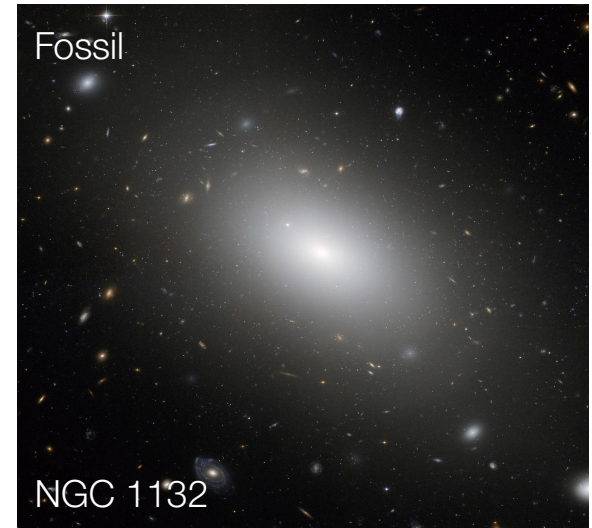
- Fossil systems are defined as a central dominant galaxy brighter than the 2nd brightest is at least 2 magnitudes apart (R band) within half of R_{200} .
- Extended X-ray emission $L_X > 10^{42} \text{ ergs}^{-1}$ from the size of a galaxy group (Jones et al. 2003).

FGs were originally thought to be the end product of galaxies merging into a normal group of galaxies, losing energy through dynamical friction.

Given the expected long times involved in dynamical friction and the lack of evidence for X-ray substructures, this model would imply that FGs formed at early epochs and remained undisturbed for a long time.

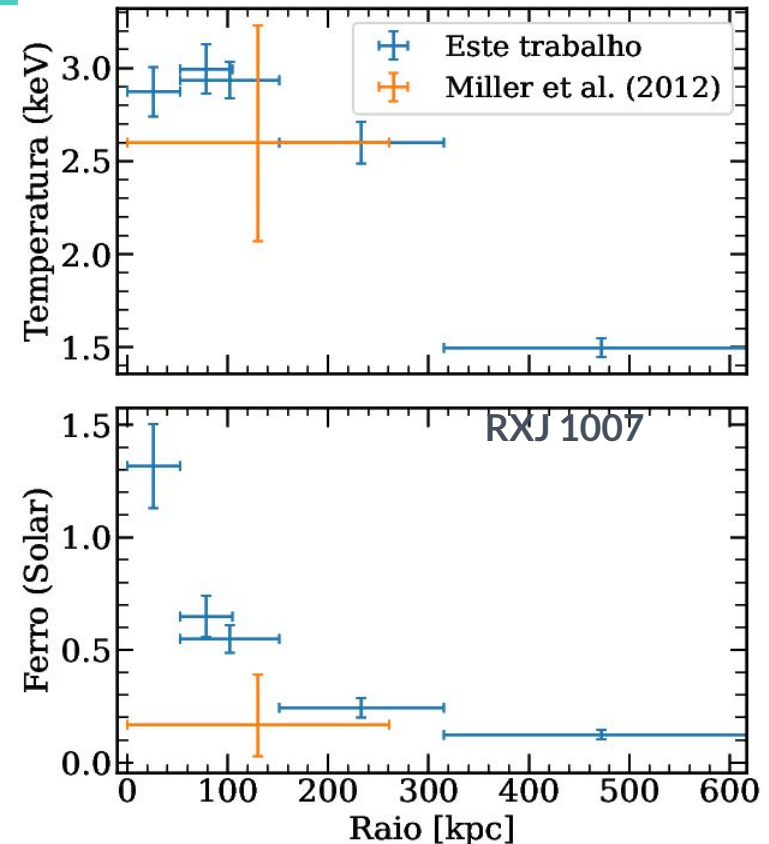
Grupos Fósseis (XMM-Newton)

- Sistemas fósseis de galáxias (GFs): a galáxia central dominante é pelo menos 2 magnitudes mais brilhante do que a segunda galáxia mais brilhante (na banda R) dentro de metade do raio R_{200} (Jones+03).
- Alguns GFs não apresentam núcleos frios bem desenvolvidos, o que sugere a existência de uma fonte externa de aquecimento.



Grupos Fósseis (XMM-Newton)

- Alguns GFs não apresentam núcleos frios bem desenvolvidos, o que sugere a existência de uma fonte externa de aquecimento.
- Utilizamos razões de abundância para avaliar a dominância relativa do enriquecimento químico proveniente de diferentes tipos de SNe.
- Galáxias centrais brilhantes em GFs podem apresentar **isofotas em forma de disco**, indicando formação por meio de fusões de galáxias ricas em gás (Khosroshahi+06).
- Se essa hipótese for verdadeira, **superventos galácticos** (Heckman+90) impulsos por SNIi poderiam explicar o aquecimento e a injeção de metais nas regiões centrais.
- Essa hipótese pode ser testada por meio de:
 1. Medições de razões de abundância (X/Fe)
 2. Rendimentos de modelos teóricos de supernovas



- **Todos FGs:** A abundância de Fe aumenta nas regiões centrais, variando de $\sim 0,5$ a $1,3 Z_{\odot}$.
- **RXJ1007:** Apresenta o aumento de temperatura central mais extremo, passando de $1,50 \pm 0,05$ keV para $2,87 \pm 0,13$ keV.

Sumário e Resultados

- Coleta de dados 
 - a. Perfis radiais de temperatura e abundância de Fe para RXJ1007, RXJ1410 e RXJ0856.
 - b. Comparação com modelos teóricos de SN.
- Análise 
 - a. Cálculo da fração de massa de Fe ejetada por SNII.
 - b. Estimativa da energia injetada e seu impacto nas temperaturas centrais de FGs.
- Resultados
 - a. A temperatura central de FGs é ~50% mais alta do que nas regiões externas.
 - b. A fração de massa de Fe proveniente de SNII é de 30-60% em FGs, em comparação com ~17% em sistemas com núcleo frio (cool-core).
 - c. A energia liberada por SNII pode explicar tanto o aquecimento quanto o enriquecimento do gás central.

Fusões de galáxias ricas em gás são uma explicação plausível para o aquecimento central e o enriquecimento de galáxias fósseis.

Ranquear os modelos de SNe

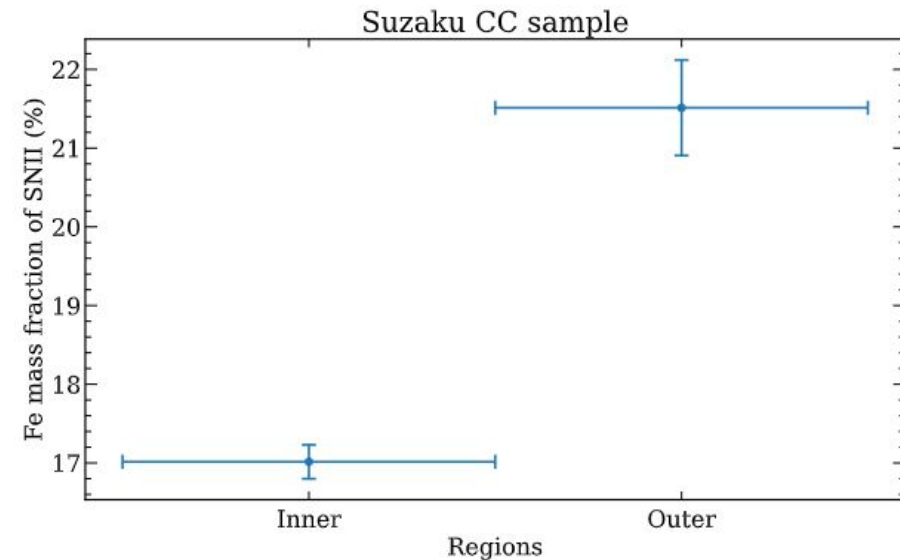
Para diminuir essas grandes incertezas,

1. Classificação dos modelos de SN com base nas medições de abundância de ICM.
2. Uso destes modelos para quantificar a contribuição relativa de supernovas para o ICM.
 - a. Grupos Fósseis de galáxias
 - b. Grupos e aglomerados próximos**
 - c. Aglomerados próximos com XRISM
 - d. Forecast na colaboração do NewAthena

2b. Grupos e aglomerados próximos

Amostra de sistemas de galáxias próximos cool-core (Suzaku)

- *Que mecanismo transporta os metais para fora? Cada mecanismo — ventos, fusões, pressão de arraste — deixa uma assinatura espacial diferente.*
- *A escolha do par de modelos de SN afeta o valor dessa fração e um dos pares de modelos mais bem avaliados foi: **SN Ia** modelo detonação retardada 3D (Ohlmann+14) e **SN II** modelo com metalicidade inicial de 0,02 da estrela (Nomoto+26).*
- *Em média, SN_{cc} cresce de ~17% no centro para ~21% nas partes mais externas*
- *A diminuição da fração SN_{II}/SN_{Ia} na região interna, indica que os processos envolvidos no enriquecimento químico nessa área mais centralizada podem ter uma **contribuição mais significativa da galáxia dominante no centro desses sistemas através da pressão de arrasto.***



- Amostra: 18 cool core galaxy systems (clusters and groups), nearby ($z=0.004-0.034$) from the Suzaku XIS spectrometer of inner & outer.
- Até aqui, amostras de ~20 sistemas e instrumentos da geração atual. O que vem a seguir muda a escala das duas coisas.

Ranquear os modelos de SNe

Para diminuir essas grandes incertezas,

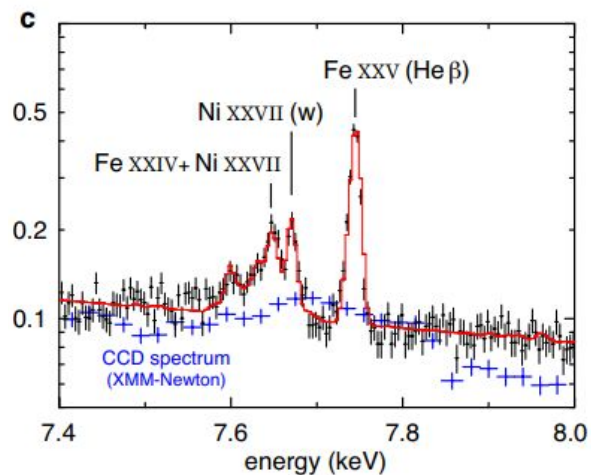
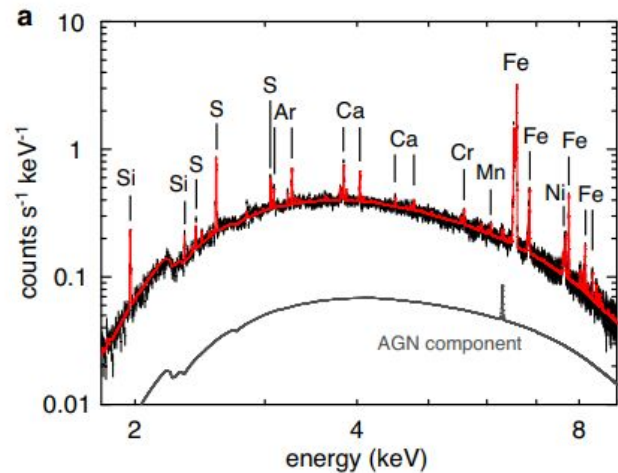
1. Classificação dos modelos de SN com base nas medições de abundância de ICM.
2. Uso destes modelos para quantificar a contribuição relativa de supernovas para o ICM.
 - a. Grupos Fósseis de galáxias
 - b. Grupos Fósseis de galáxias
 - c. Aglomerados próximos com XRISM**
 - d. Forecast na colaboração do NewAthena**

2(c-d). Hitomi, XRISM & NewAthena

**O futuro — quando as digitais ficam
nítidas**

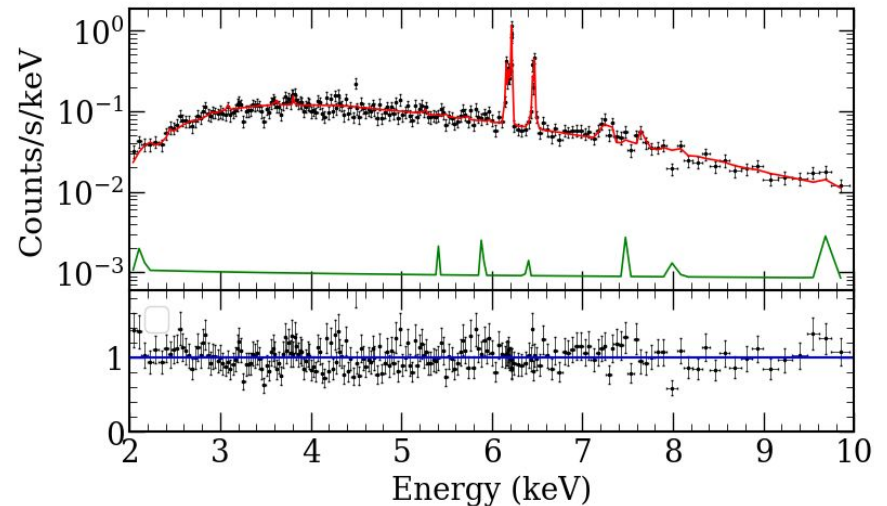
Espectros de Alta Resolução

Hitomi Collaboration (2016)



Lançado em 2023

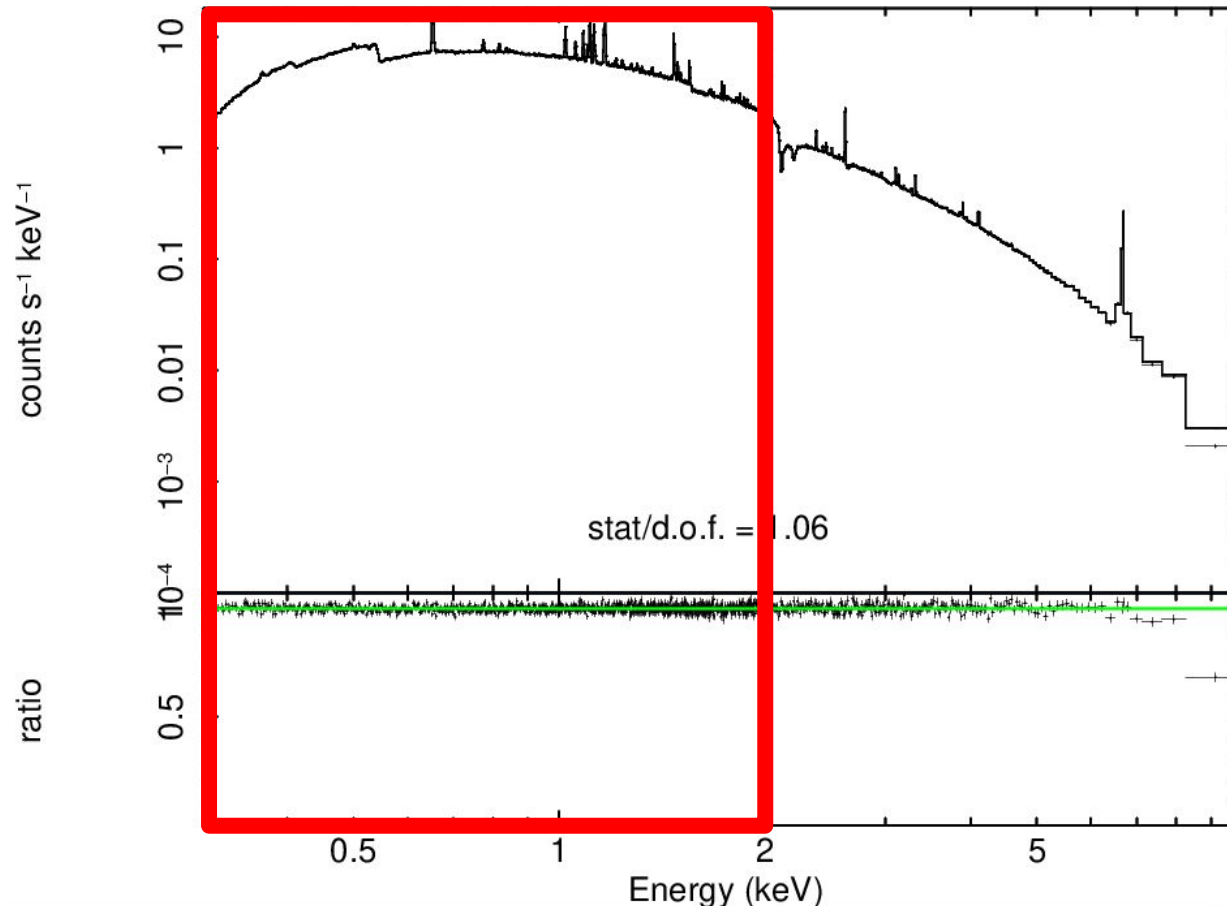
XRISM/Resolve spectrum of A2029



Origem dos elementos químicos (pesados)

1 H	big bang fusion 										cosmic ray fission 										2 He												
3 Li	4 Be	merging neutron stars 										exploding massive stars 										5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne						
11 Na	12 Mg	dying low mass stars 										exploding white dwarfs 										13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar						
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr																
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe																
55 Cs	56 Ba											72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn							
87 Fr	88 Ra																					Por exemplo, Mn é particularmente importante pra diferenciar os progenitores de SNIa											

Espectros de Alta Resolução (NewAthena)



New Athena (simulação)

Model tbabs*bapec

- 4keV
- $Z=0.5$ solar
- 500ks

Por que ir além das abundâncias clássicas de ICM?

O que outros satélites já fazem bem

- ✓ O, Ne, Mg, Si, S, Ar, Ca — elementos alfa
- ✓ Fe — linha mais brilhante do ICM, medida com precisão $<2\%$ em 500 ks
- ✓ Ni — acessível em aglomerados brilhantes
- ✓ Si/Fe, O/Fe — discriminação entre SNcc e SNe Ia

A lacuna: elementos do pico de Fe e elementos com Z ímpar

Mn/Fe

Metalicidade da progenitora de SNe Ia (Kobayashi+25)

Zn/Fe,
Co/Fe

Traçador de energia de hipernovas — assinatura da Pop III

Al,Na/Mg

Valores extremamente baixos para Pop III ($Z=0$) em comparação com SNIa e SNcc normais

Na/Fe,
Al/Fe

Elementos com Z ímpar suprimidos em $Z=0$ — exclusivo da Pop III

Ni/Fe

SNe Ia com massa de Chandrasekhar vs. sub-Chandrasekhar

Si,S/O

Traçador de PISNe — assinatura da Pop III

4. Sumário e conclusões

Sumário e conclusões

A presença de metais no ICM constitui um elo direto entre escalas físicas pequenas (**estrelas e supernovas**) e grandes (**grupos e aglomerados de galáxias**).

Ranqueamos 7192 pares de modelos teóricos de SN, onde apenas **~3% (ou seja, 229 pares de SN)** apresentam a **mais baixa rejeição com as razões de abundância**. Portanto, este resultado diminui, robustamente, as incertezas atreladas a escolha arbitrária de um par de modelos em particular.

Dentre esse 229 pares, o cenário favorecido é de **estrelas massivas progenitoras da SNI** que **enriqueceram o ICM/IGrM** devem ter sido **inicialmente enriquecidas**. Além disso, a origem da maioria do **gás metálico intra-aglomerado enriquecendo SNIa como progenitores de massa próximos de Chandrasekhar com pontos de ignição múltiplos próximos ao centro**.

A presença de núcleos quentes nos FGs pode ter tido origem de uma fusão de galáxias ricas em gás, sendo eficiente para aquecer e enriquecer os seus centros após um longo período sem fusões de sistemas de galáxias.

XRISM (atual) e o NewAthena (próxima geração) medem e medirão abundâncias de forma precisa e acurada como nunca visto antes e isso vai trazer uma compreensão mais ampla do enriquecimento químico do Universo.