

EVOLUZIONE CHIMICA DELLE GALASSIE

INTRO

EVOLUZIONE CHIMICA delle GALASSIE

Ingredienti fondamentali:

- Condizioni iniziali
- Funzione di nascita stellare
- La massa restituita al mezzo interstellare dalle singole stelle sotto forma di elementi chimici (stellar yields)
- Possibili Flussi di Gas (entranti o uscenti)
- La composizione chimica di tali flussi di gas

EVOLUZIONE CHIMICA delle GALASSIE

Condizioni iniziali:

- Caratteristiche del gas iniziale. Potrebbe essere **gas primordiale** (abbondanze chimiche del Big Bang) oppure **gas arricchito chimicamente**
- Massa di gas al tempo iniziale ($t=0$). Si può ipotizzare che il gas da cui si forma la galassia sia stato già **tutto presente** al momento iniziale oppure che si sia **accumulato lentamente** nel tempo.
primo caso e' piu' adatto a sistemi sferoidali, il secondo ai dischi galattici.

EVOLUZIONE CHIMICA delle GALASSIE

La funzione di nascita stellare

- definita come il numero di stelle formatesi nell'intervallo di massa $m, m+dm$ e nell'intervallo di tempo $t, t+dt$, ovvero:

$$\varphi(m)\psi(t)dm dt$$

in cui la $\varphi(m)$ è detta funzione iniziale di massa (initial mass function o IMF), mentre la $\psi(t)$ è il tasso di formazione stellare (star formation rate o SFR).

La IMF, ovvero il numero di stelle formatesi nell'intervallo m $m+dm$ viene normalmente espressa con $\varphi(m) \propto m^{-(1+x)}$ ed è normalizzata nel seguente modo:

$$\int_0^{\infty} m\varphi(m)dm = 1$$

EVOLUZIONE CHIMICA delle GALASSIE

Come derivare la IMF

Supponiamo di sapere l'attuale distribuzione di massa di stelle di sequenza principale per unita' di area sia $n(m)$.

Le stelle di massa $0.1M_{\text{sun}} < M < 1.0M_{\text{sun}}$ sono ancora tutte vive in main sequence, quindi possiamo scrivere che:

$$n(m) = \int_0^{\infty} \varphi(m) \psi(t) dt$$

Se la IMF è costante nel tempo allora possiamo scrivere:

$$n(m) = \varphi(m) \langle \psi \rangle t_{\text{Hubble}}$$

e derivarci la IMF in questo range di masse.

EVOLUZIONE CHIMICA delle GALASSIE

Come derivare la IMF

Nel caso opposto, per stelle che muoiono (quasi) immediatamente ($M > 2.0M_{\text{sun}}$), possiamo scrivere che:

$$n(m) = \int_{t_{\text{Hubble}} - \tau_m}^{t_{\text{Hubble}}} \varphi(m) \psi(t) dt$$

Se la IMF è costante nel tempo allora possiamo scrivere:

$$n(m) = \varphi(m) \psi(t_{\text{Hubble}}) \tau_m$$

e derivarci la IMF anche in questo range di masse.

EVOLUZIONE CHIMICA delle GALASSIE

Come derivare la IMF

Per stelle fra 1 e 2 Msun, la situazione è complicata, e si tende ad interpolare fra le due situazioni precedenti.

Per stelle di $M < 0.1$ Msun, è molto difficile perché è difficile osservare queste stelle, sono molto poco luminose.

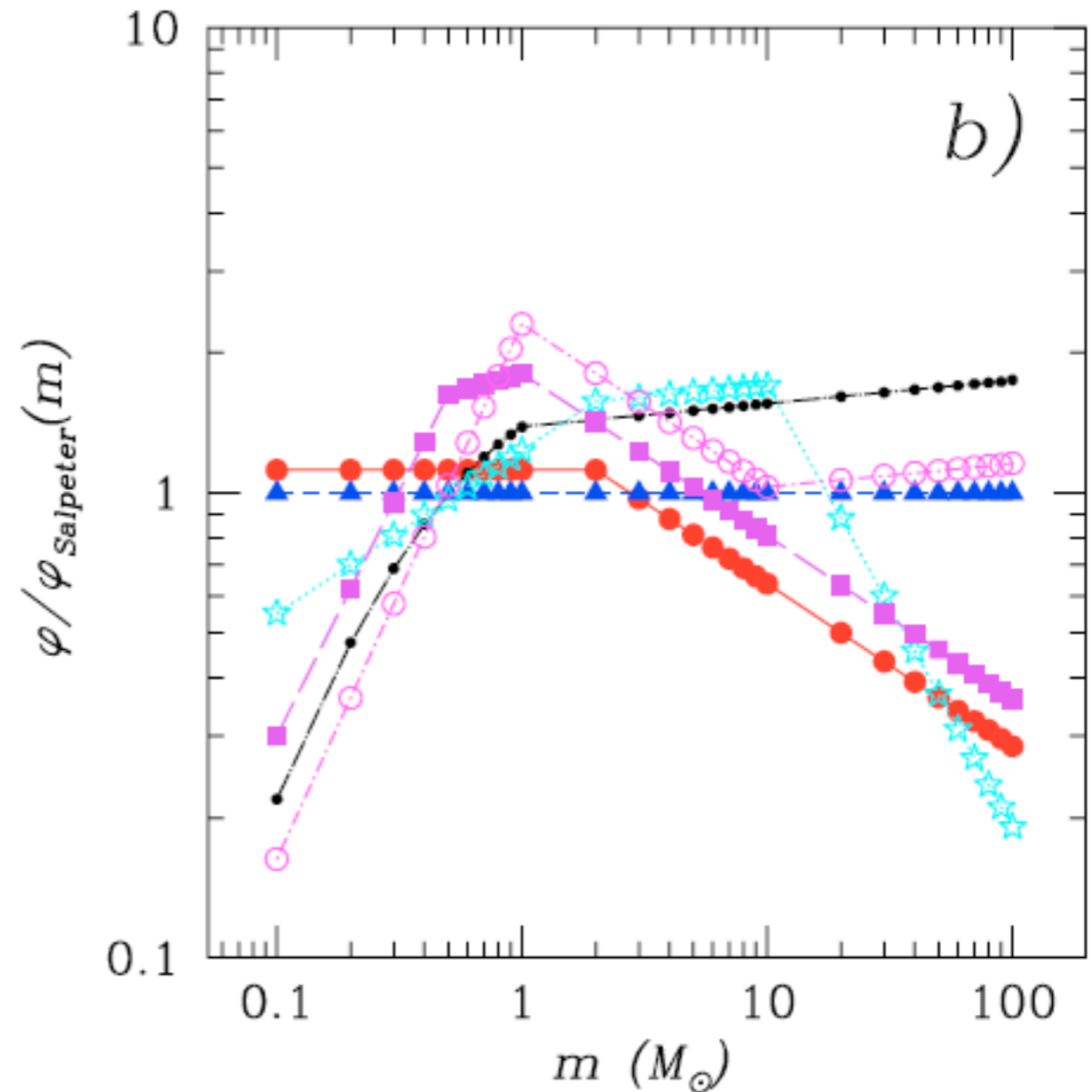
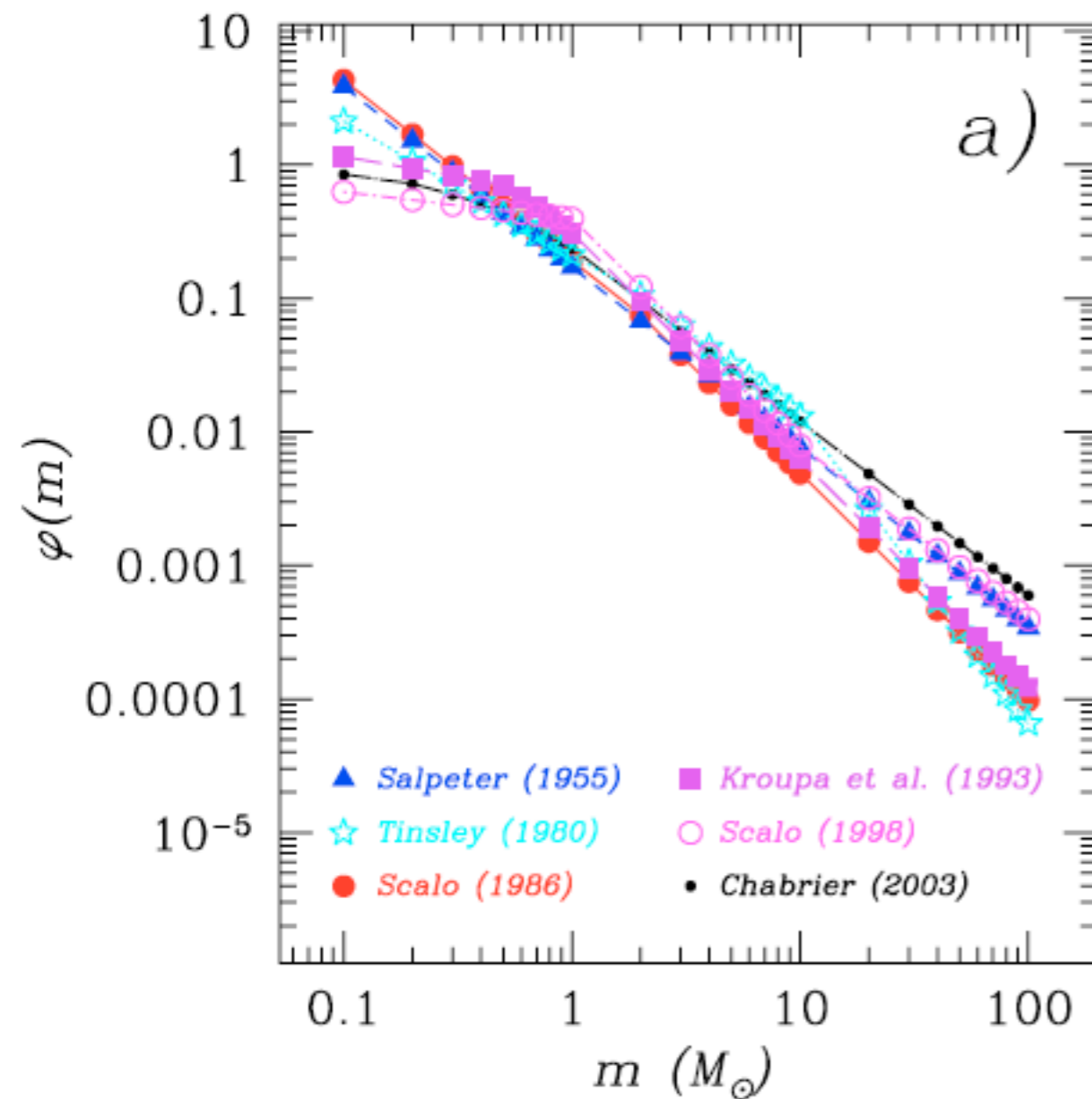
La IMF che si deriva ha tipicamente questa forma:

$$\varphi(m) \propto m^{-(1+x)}$$

La IMF piu' nota e' quella derivata da Salpeter(1955)
con $x = 1.35$

Initial mass function

Salpeter's IMF: $\phi(m) \sim m^{-1.35}$



Describe the probability to create a star with a certain mass.
1 star of 100Msun every ~ 50000 stars of 1Msun

Romano et al. (2003)

EVOLUZIONE CHIMICA delle GALASSIE

Tasso di formazione stellare

Anche per derivare la SFR, bisogna fare delle assunzioni. La più semplice è assumerla **costante**. Una possibilità più realistica è collegarla alla densità del gas:

$$\psi(t) = \nu \rho_{gas}^n$$

Dove ν è chiamata efficienza di SF e viene calibrato per riprodurre quello osservato al tempo attuale (per esempio).

Una versione più matematica è:

$$\psi(t) = \nu e^{-t/\tau}$$

Nei modelli di evoluzione chimica si usa in genere la densità superficiale del gas, poiché $n(m)$ è una quantità proiettata sul piano galattico.

EVOLUZIONE CHIMICA delle GALASSIE

Tasso di formazione stellare

Per derivare la SFR nel disco galattico vicino al Sole (solar vicinity) è possibile utilizzare di nuovo il $n(m)$ e assumere una IMF. Miller e Scalo (1979) ottennero usando una IMF a più pendenze un valore:

$$3 < \psi(t_{Hubble}) < 7 M_{\odot} pc^{-2} Gyr^{-1}$$

Mentre Tinsley (1980) ottenne con una IMF leggermente diversa:

$$\psi(t_{Hubble}) \sim 10 M_{\odot} pc^{-2} Gyr^{-1}$$

EVOLUZIONE CHIMICA delle GALASSIE

Tasso di formazione stellare

Per valutare in altre regioni del disco Galattico ed in galassie esterne si ricorre ad indicatori di formazione stellare quali:

(a) stelle supergiganti che possono essere viste anche in galassie vicine, assumendo che il numero sia proporzionale al tasso di formazione stellare attuale.

(b) Il flusso $H\alpha$ e $H\beta$ proveniente da regioni HII, ionizzate da stelle giovani e calde, è proporzionale al tasso di formazione stellare. Kennicutt (1998) suggerisce

$$\psi(t) = 7.9 \cdot 10^{42} L_{H\alpha} (\text{ergsec}^{-1}) M_{\odot} \text{yr}^{-1}$$

EVOLUZIONE CHIMICA delle GALASSIE

Tasso di formazione stellare

c) La luminosità del continuo UV e' anche usato per derivare il tasso di formazione stellare

d) La luminosità infrarossa che proviene dalla polvere che circonda le regioni di formazione stellare

e) I tassi di esplosione delle supernovae di tipo II possono anche darci un'idea del tasso di formazione stellare attuale.

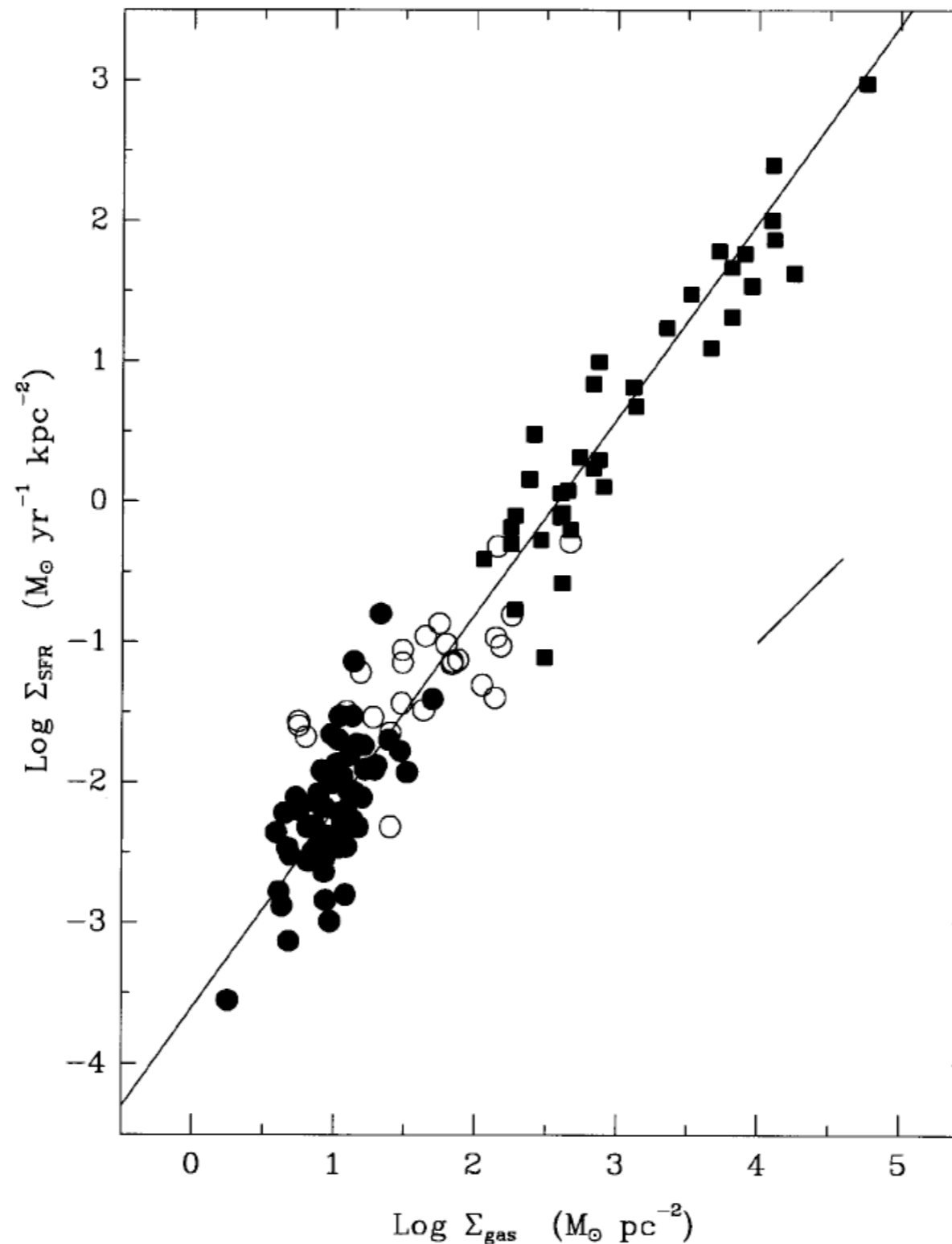
...

Chiaramente per derivare la SFR, dobbiamo assumere un IMF con le incertezze che vi si collegano.

Legge di formazione stellare

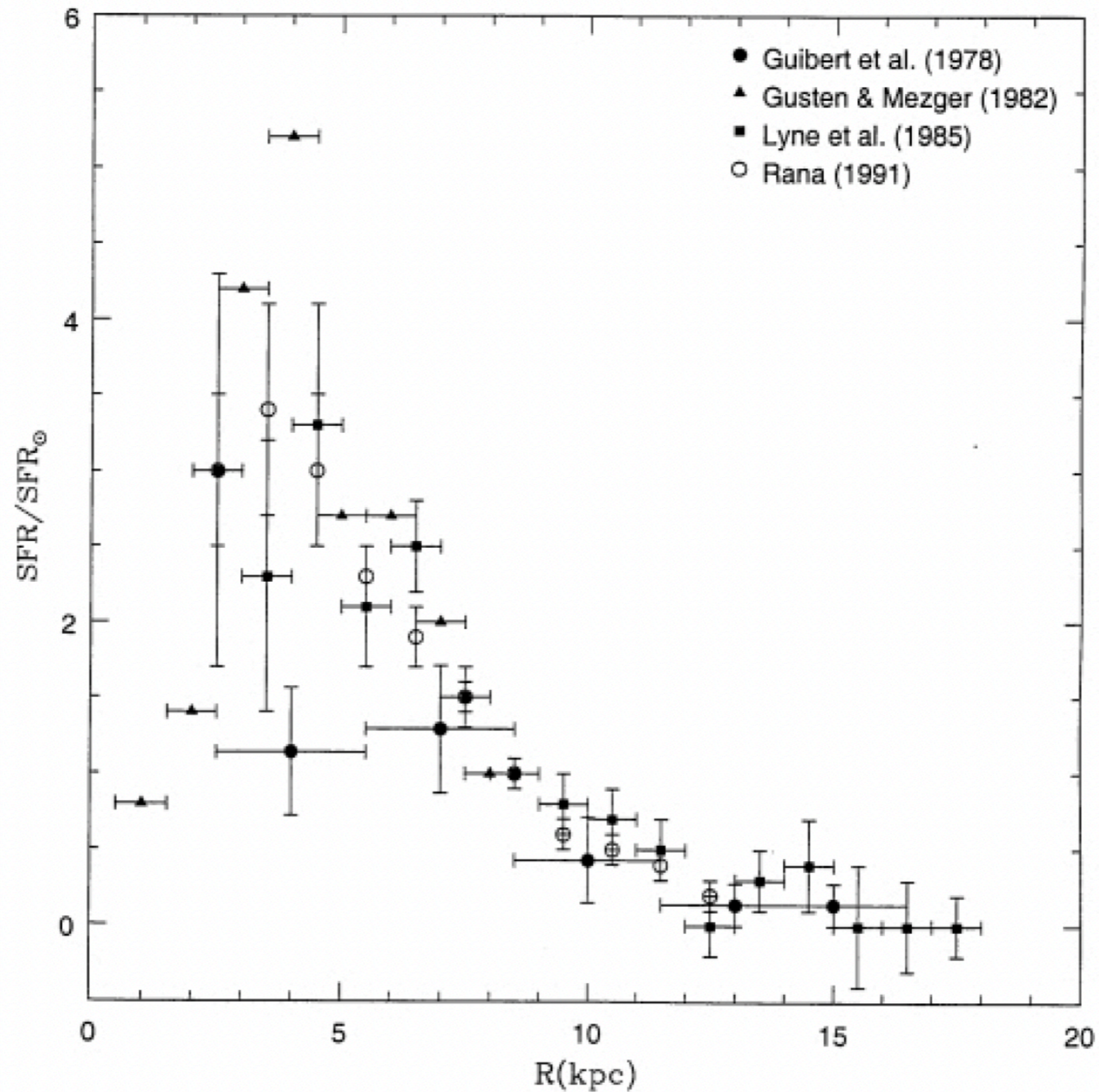
The SFR as measured in star forming galaxies. The continuous line represents the best fit to the data and it can be achieved with the SF law with $k=1.4$

$$\Psi(R, t) = v(R, t) G(R, t)^k$$



Kennicutt (1998)

Formazione stellare nel disco Galattico



EVOLUZIONE CHIMICA delle GALASSIE

Nucleosintesi Stellare

Si definisce R , ovvero la «frazione di ritorno», la massa restituita al mezzo interstellare sotto forma di elementi vecchi e nuovi ed è calcolata come:

$$R = \frac{\int_1^\infty (m - m_{rem}) \varphi(m) dm}{\int_0^\infty m \varphi(m) dm}$$

dove m_{rem} è la massa del resto stellare.

Per come abbiamo normalizzato la IMF abbiamo quindi che

$$R = \int_1^\infty (m - m_{rem}) \varphi(m) dm$$

EVOLUZIONE CHIMICA delle GALASSIE

Nucleosintesi Stellare

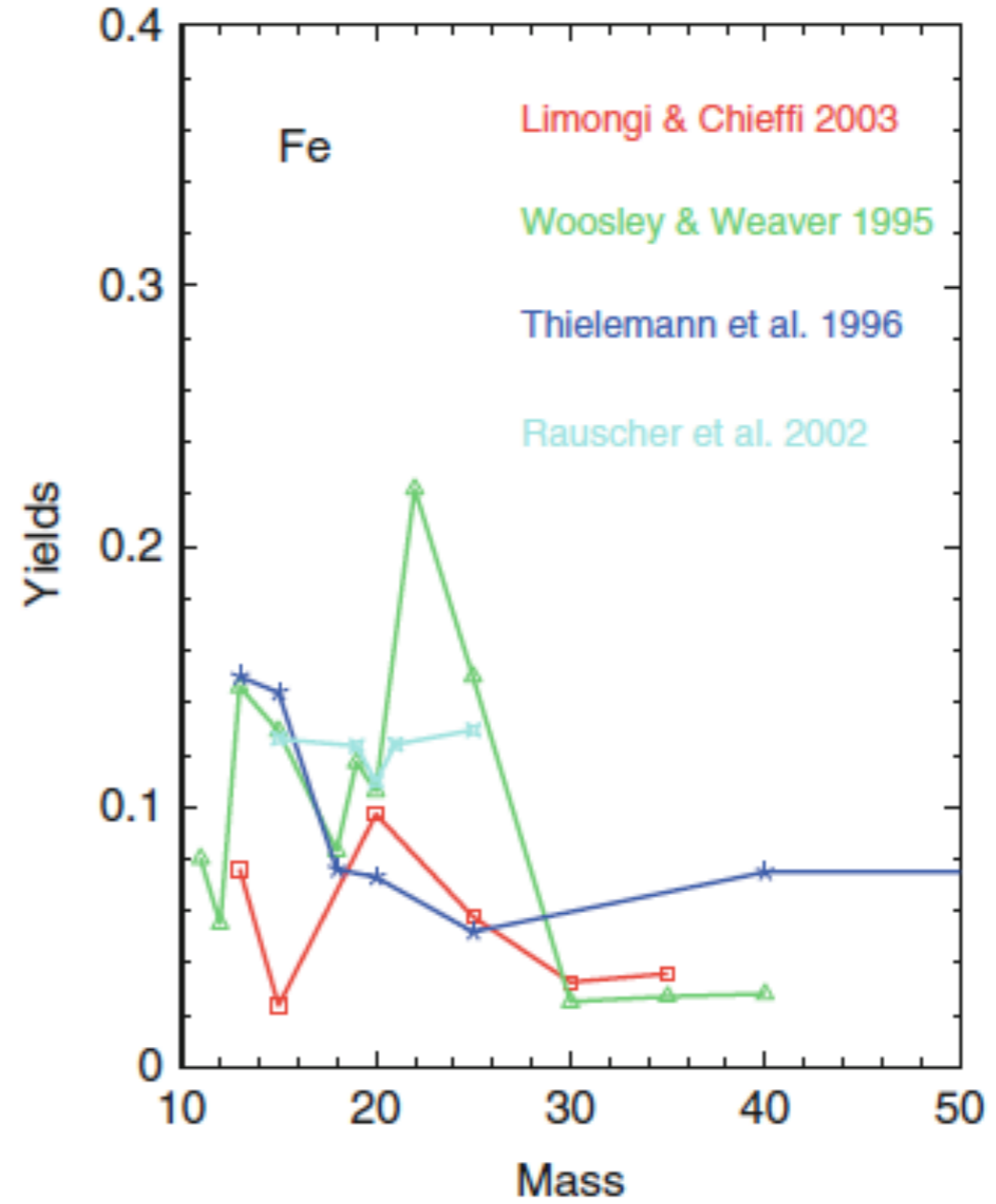
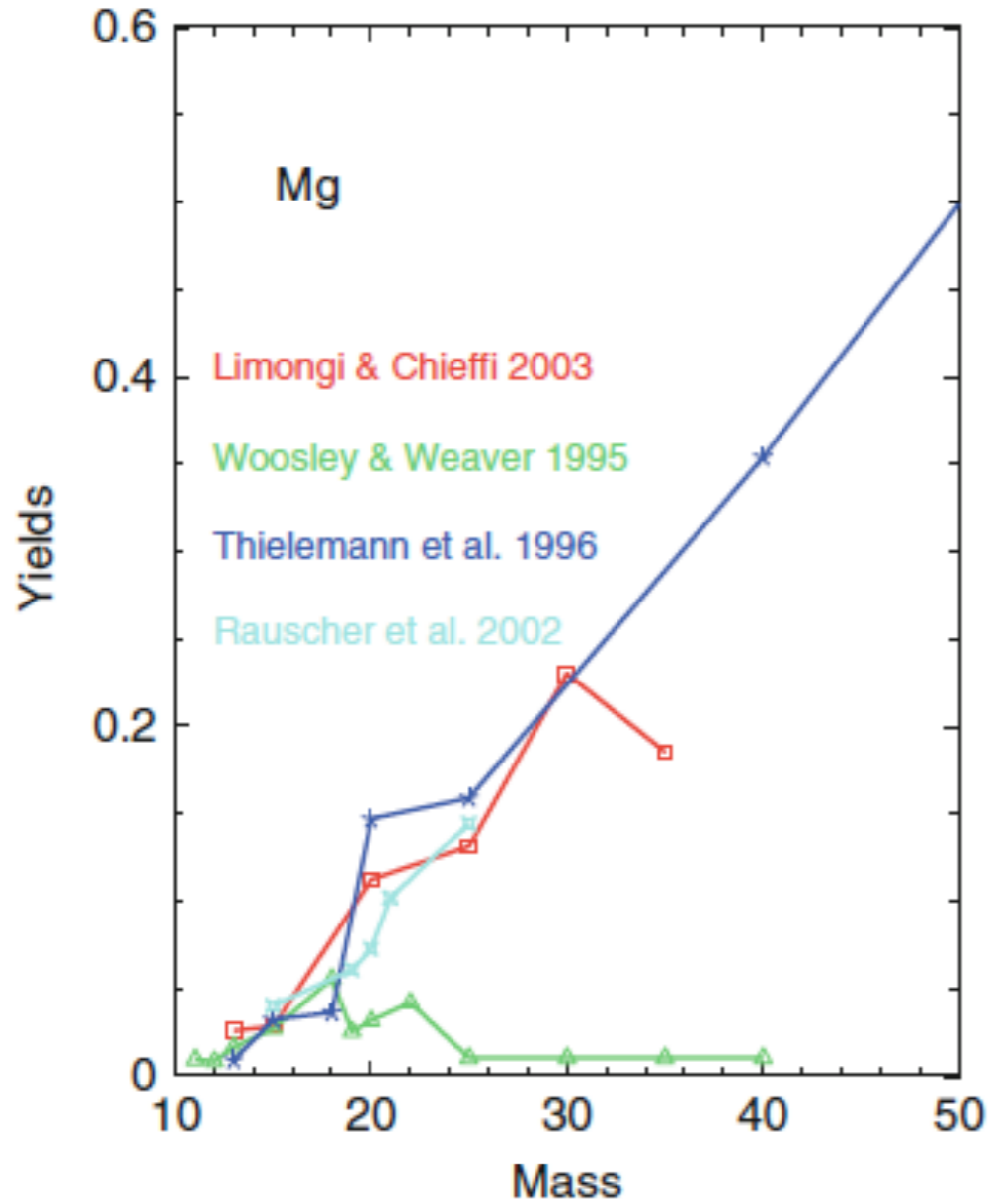
Si definisce yields (o guadagno) il rapporto tra la frazione di massa espulsa sotto forma di nuovi elementi chimici che una generazione di stelle restituisce al mezzo interstellare e la frazione massa che rimane sotto forma di stelle di piccola massa e resti stellari:

$$y_i = \frac{1}{1 - R} \int_1^{\infty} m p_{im} \varphi(m) dm$$

dove p_{im} è e' la frazione di massa prodotta ed espulsa da una stella di massa **m** sotto forma di elemento **i**-esimo nuovo prodotto

Stellar nucleosynthesis

Due esempi di nucleosintesi stellare (magnesio e ferro) per autori diversi, nell'ambito delle stelle massicce.



Modello Semplice

Definiamo ora le seguenti quantità:

$$\mu = \frac{M_{gas}}{M_{tot}} \quad (200)$$

$$M_{tot} = M_* + M_{gas} \quad (201)$$

dove M_* e' la massa in stelle (vive e morte) ed e' data da:

$$M_* = (1 - \mu)M_{tot} \quad (202)$$

La metallicita' e' definita da:

$$Z = \frac{M_Z}{M_{gas}} \quad (203)$$

dove M_Z e' la massa sotto forma di metalli.

Le condizioni iniziali sono:

$$\begin{aligned} M_{gas}(0) &= M_{tot} \\ Z(0) &= 0 \end{aligned} \quad (204)$$

Scriviamo ora l'equazione che regola l'evoluzione del gas nel sistema:

$$\frac{dM_{gas}}{dt} = -\psi(t) + E(t) \quad (205)$$

dove $E(t)$ e' il tasso di restituzione di materia da parte delle stelle al tempo t :

$$E(t) = \int_{m(t)}^{\infty} (m - m_{rem})\psi(t - \tau_m)\varphi(m)dm \quad (206)$$

Modello Semplice

Dove $M_{ej} = m - m_{rem}$ e' la massa totale espulsa da una stella di massa m , ovvero la massa di elementi nuovi e vecchi. L'equazione e' pertanto un'equazione integro-differenziale integrabile solo numericamente. Tuttavia, se noi facciamo l'ipotesi semplificativa del riciclaggio istantaneo quest'equazione puo' essere integrata analiticamente.

L'ipotesi del riciclaggio istantaneo consiste nell'assumere che:

- 1) Tutte le stelle con massa maggiore di $1M_{sun}$ nascono e muoiono istantaneamente
- 2) Tutte quelle con massa inferiore ad $1M$ vivono per sempre.

Questa ipotesi consente di trascurare il tempo di vita stellare e di portare fuori dal segno di integrale ora funzione del solo tempo.

Se ci ricordiamo della definizione dello yield e di R possiamo pertanto scriverla come:

Modello Semplice

$$E(t) = \psi(t)R \quad (207)$$

e di conseguenza la (205) come:

$$\frac{dM_{gas}}{dt} = -\psi(t)(1 - R) \quad (208)$$

Scriviamo ora l'equazione per i metalli:

$$\frac{d(ZM_{gas})}{dt} = -Z\psi(t) + E_Z(t) \quad (209)$$

dove:

$$E_Z(t) = \int_{m(t)}^{\infty} [(m - m_{rem} - mp_{Zm})Z(t - \tau_m) + mp_{Zm}]\psi(t - \tau_m)\varphi(m)dm \quad (210)$$

Questa e' l'iniziale definizione di Tinsley (1980) dove si ripete il termine mp_{Zm} due volte, prima per sottrarlo a tutta la massa che viene espulsa dalla stella e poi per sommarlo in qualita' di nuovo elemento prodotto ed espulso. Maeder (1992) fece notare che la definizione corretta dovrebbe essere la seguente:

$$E_Z(t) = \int_{m(t)}^{\infty} [(m - m_{rem})Z(t - \tau_m) + mp_{Zm}]\psi(t - \tau_m)\varphi(m)dm \quad (210bis)$$

che considera il termine mp_{Zm} una sola volta. Il ragionamento di Maeder fu il seguente: non c'e' ragione di sottrarre il termine due volte poiche' se si prende un generico elemento i che puo' essere sia prodotto che distrutto durante l'evoluzione stellare e si scrive:

$$E_{im} = (m - m_{rem})X_i(t - \tau_m) + mp_{im}$$

Modello Semplice

quale massa totale espulsa dalla stella di massa m in forma di elemento i e poi si somma su tutti gli elementi si ottiene:

$$\sum E_{im} = \sum X_i(t - \tau_m) \cdot (m - m_{rem}) + m \sum p_{im},$$

ovvero:

$$\sum E_{im} = m - m_{rem}$$

come ci si aspetta. Poiche' $\sum X_i = 1$ e $\sum p_{im} = 0$ se si considerano sia gli elementi prodotti che quelli distrutti quali H e D.

Ritorniamo per il momento alla (210) e procediamo con la soluzione, la quale non cambia nel caso si adotti la (210bis), come e' facile verificare.

Si vede facilmente che nell'ipotesi di *riciclaggio istantaneo* la (210) si trasforma in:

$$E_Z(t) = \psi(t)RZ(t) + y_Z(1 - R)[1 - Z(t)]\psi(t) \quad (211)$$

da cui si ha che la (209) si trasforma in:

$$\frac{d(ZM_{gas})}{dt} = -Z(t)\psi(t) + \psi(t)RZ(t) + y_Z(1 - R)[1 - Z(t)]\psi(t) \quad (212)$$

Modello Semplice

A questo punto se scrivo la parte sinistra della (212) nel seguente modo:

$$\frac{d(ZM_{gas})}{dt} = \frac{dZ}{dt}M_{gas} + Z\frac{dM_{gas}}{dt}$$

e la sostituisco nella (212) ottenendo:

$$\frac{dZ}{dt}M_{gas} = y_Z(1 - R)[1 - Z(t)]\psi(t) \quad (213)$$

Se $Z \ll 1$ come spesso accade in situazioni astrofisiche la (213) si puo' semplificare nel seguente modo:

$$\frac{dZ}{dt}M_{gas} = y_Z(1 - R)\psi(t) \quad (214)$$

E' interessante verificare che la (214) la si ottiene anche nella versione di Maeder delle equazioni. In questo caso infatti non e' necessario assumere $Z \ll 1$.

Se divido la (214) per la eq. del gas (205) ottengo:

$$\frac{dZ}{dM_{gas}}M_{gas} = -y_Z \quad (215)$$

che, integrata con le condizioni iniziali (204), da':

$$Z = y_Z \ln\left(\frac{1}{\mu}\right) \quad (216)$$

Modello Semplice

$$Z = y_Z \ln\left(\frac{1}{\mu}\right) \quad (216)$$

Questa e' la soluzione dell'equazione del MODELLO SEMPLICE. Nella versione di Tinsley la (216) vale solo se $Z \ll 1$, altrimenti la soluzione e':

$$Z = 1 - \mu^{y_Z} \quad (217)$$

Si vede dalla (217) che se $\mu \rightarrow 0$ allora $Z \rightarrow 1$. Nella versione di Maeder la (216) vale comunque.

Infine, definiamo *yield effettivo di una generazione stellare*, lo yield che corrisponde alla soluzione del Modello Semplice, ovvero, dalla (217):

$$y_Z = \frac{Z}{\ln \mu^{-1}}.$$

Tale yield non rappresenta lo *yield vero* di una galassia poiche' quest'ultimo sara' influenzato da fenomeni di accrescimento e/o perdita di gas dal sistema.

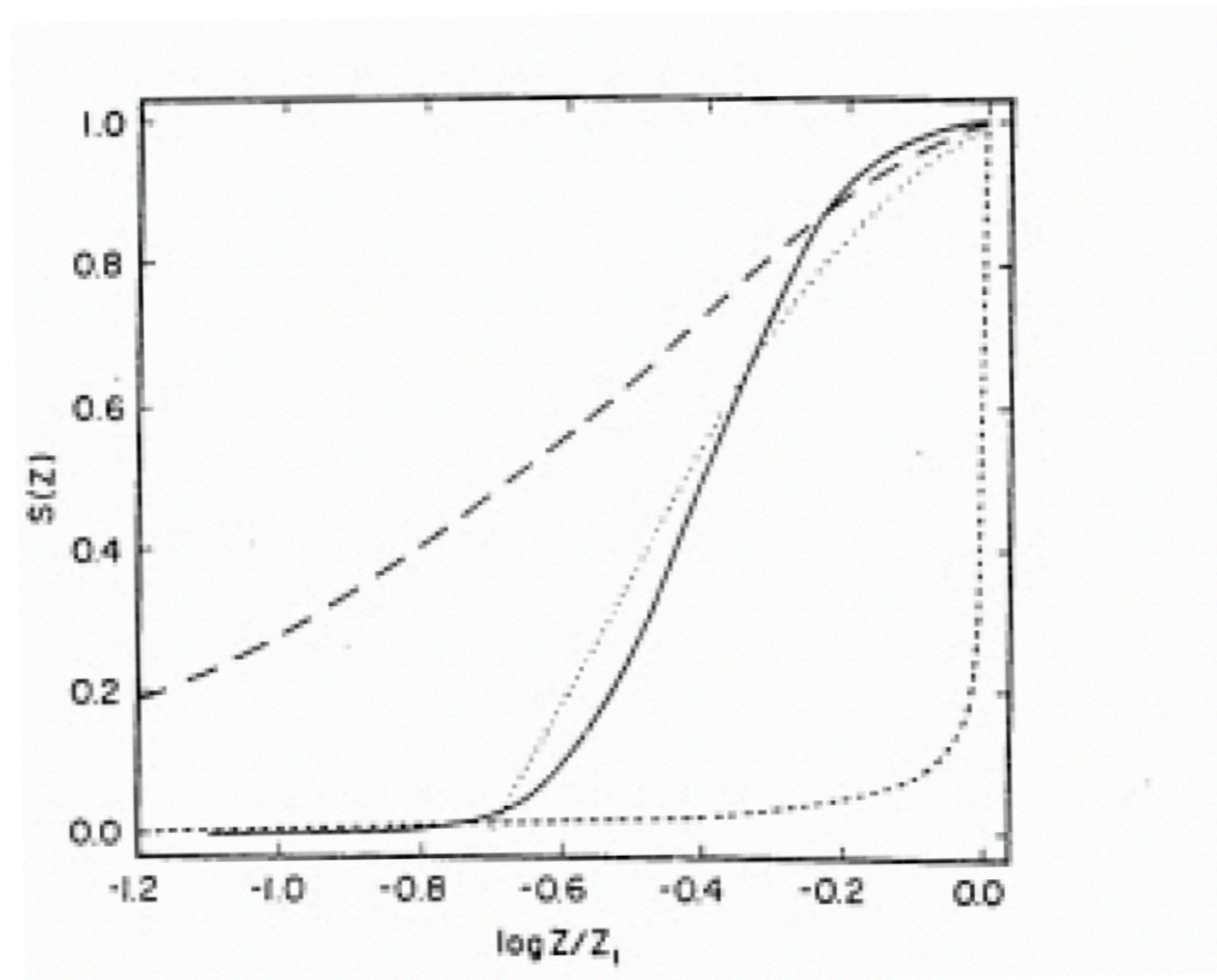
Limiti del modello semplice

Partendo dalla eq. (202) che definisce la massa in stelle possiamo definire la seguente quantità:

$$S(Z) = \frac{M_*}{M_*(t_H)} = \frac{(1 - \mu)M_{tot}}{(1 - \mu_1)M_{tot}}$$

ovvero la frazione di stelle formatesi con metallicità $\leq Z$. Usando l'equazione (216) posso esprimere μ in funzione di Z e dello yield:

$$S(Z) = \frac{1 - e^{-Z/yZ}}{1 - \mu_1} = \frac{1 - \mu_1^{Z/Z_1}}{1 - \mu_1} \quad (218)$$





**UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI TRIESTE**



Osservatorio Astronomico di Trieste
Astronomical Observatory of Trieste



Galactic Archaeology with neutron capture elements

Gabriele Cescutti



Uppsala, 25th November 2024

ChETEC-INFRA – key facts at a glance

[ketek-infra]

- EU Horizon 2020 **Starting Community** of research infrastructures to serve nuclear astrophysics
- H2020-INFRAIA-2020-1
- **32 partners** in 17 EU+ countries
- 1 May 2021 – 30 April 2025
- 5.0 M€ support by EU
- **13 research infrastructures** offer EU-supported transnational access, selection based on scientific merit
- <https://www.chetec-infra.eu>



SCHOOLS



CHINOS First ChETEC–INFRA Observational School in Ondrejov, July 2023:

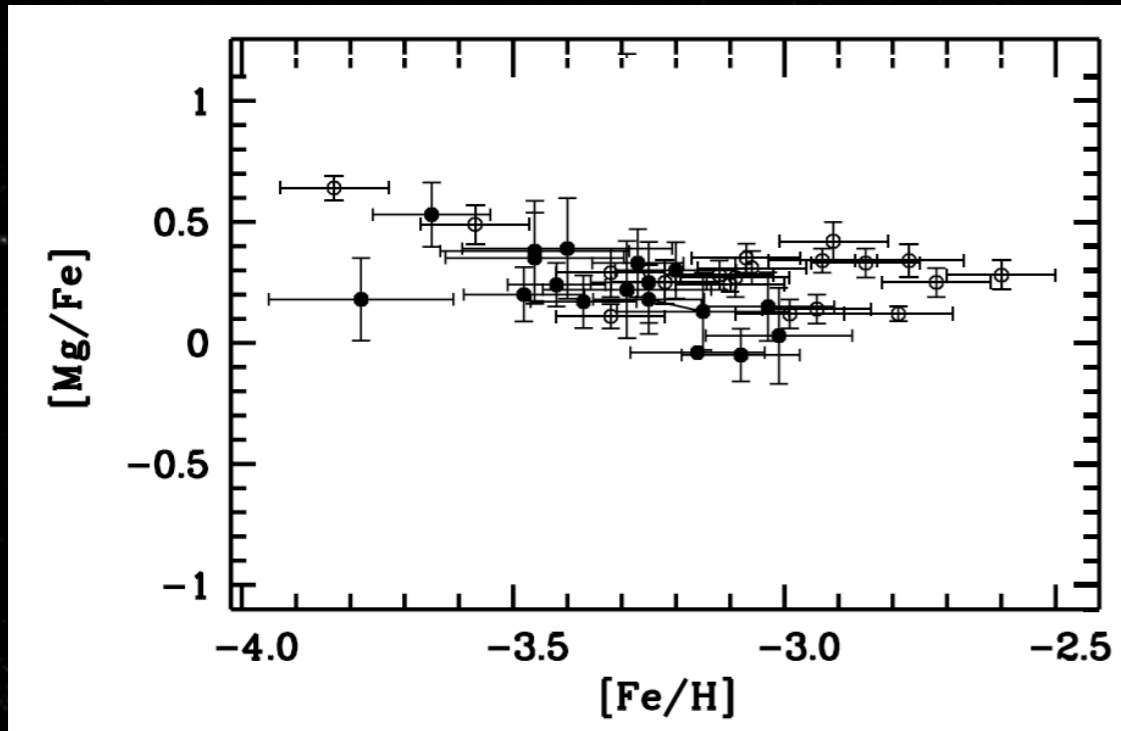
- ~20 students
- 3 nights of remote observations with NOT, lots of data obtained for the analysis
- successful usage of webSME pipeline by students to analyze the data obtained
- students (and lecturers!) excited! •



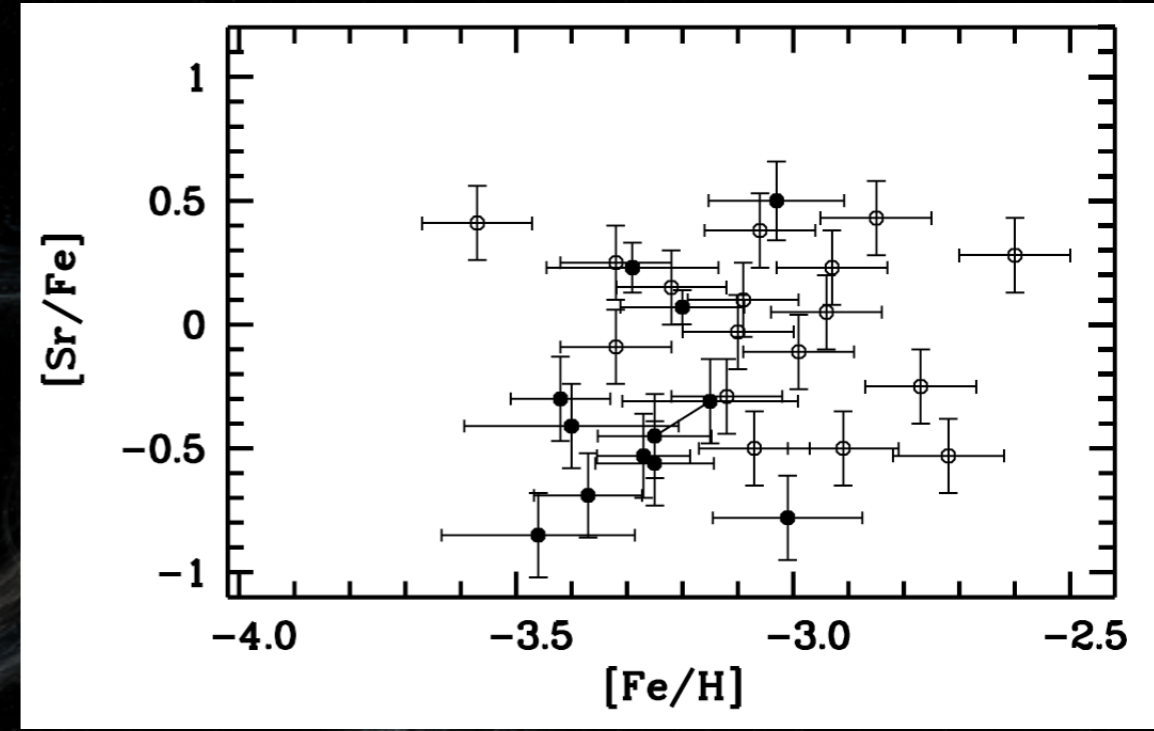
A second CHINOS will be organised in 2025!

Why neutron capture elements?

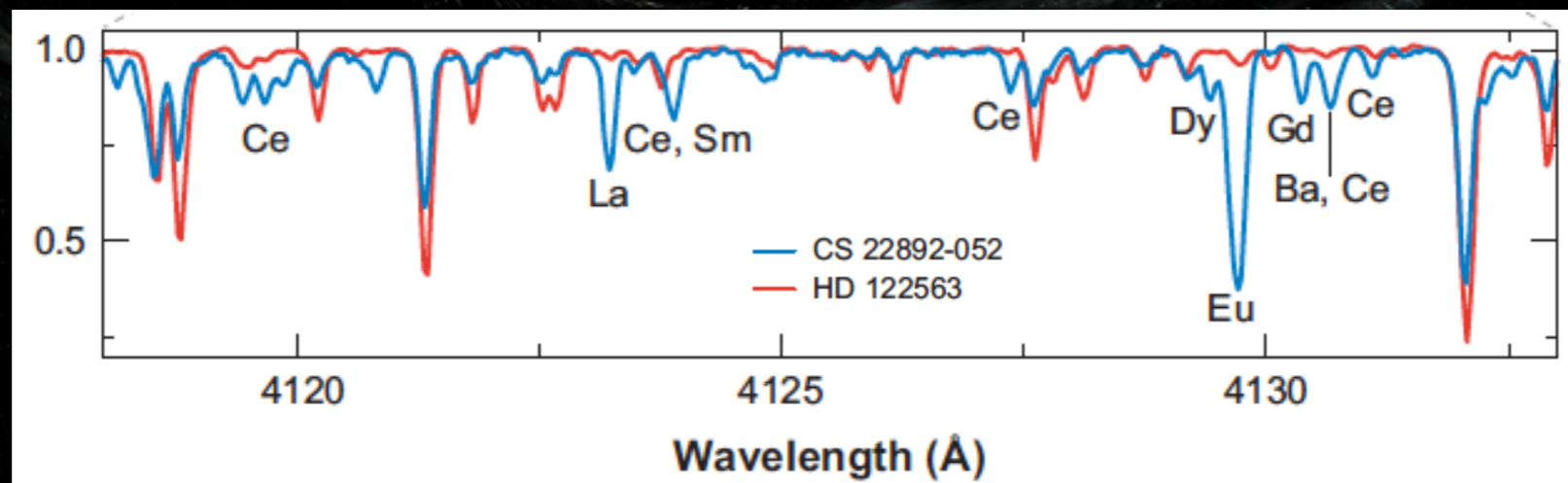
Mg: alpha-element



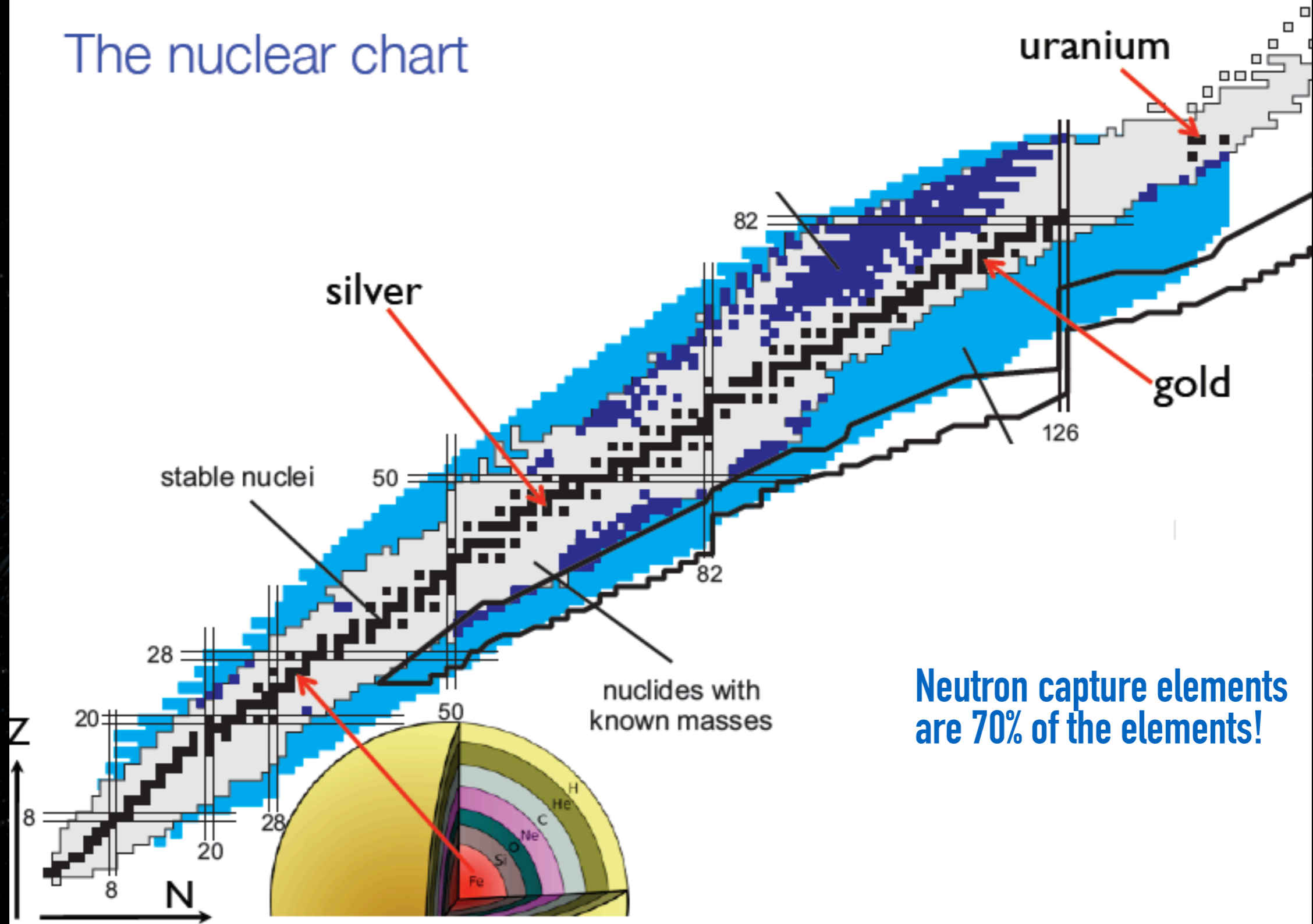
Sr: neutron capture element



Bonifacio+12



The nuclear chart



Neutron capture elements are 70% of the elements!

Neutron capture elements: r-s process

The elements beyond the iron peak ($A > 60$) are mainly formed through neutron capture on seed nuclei (iron and silicon).

Two cases:

s-process

Different Timescale of the neutron capture

r-process

$$\tau_{\beta} \ll \tau_c$$

Different process path

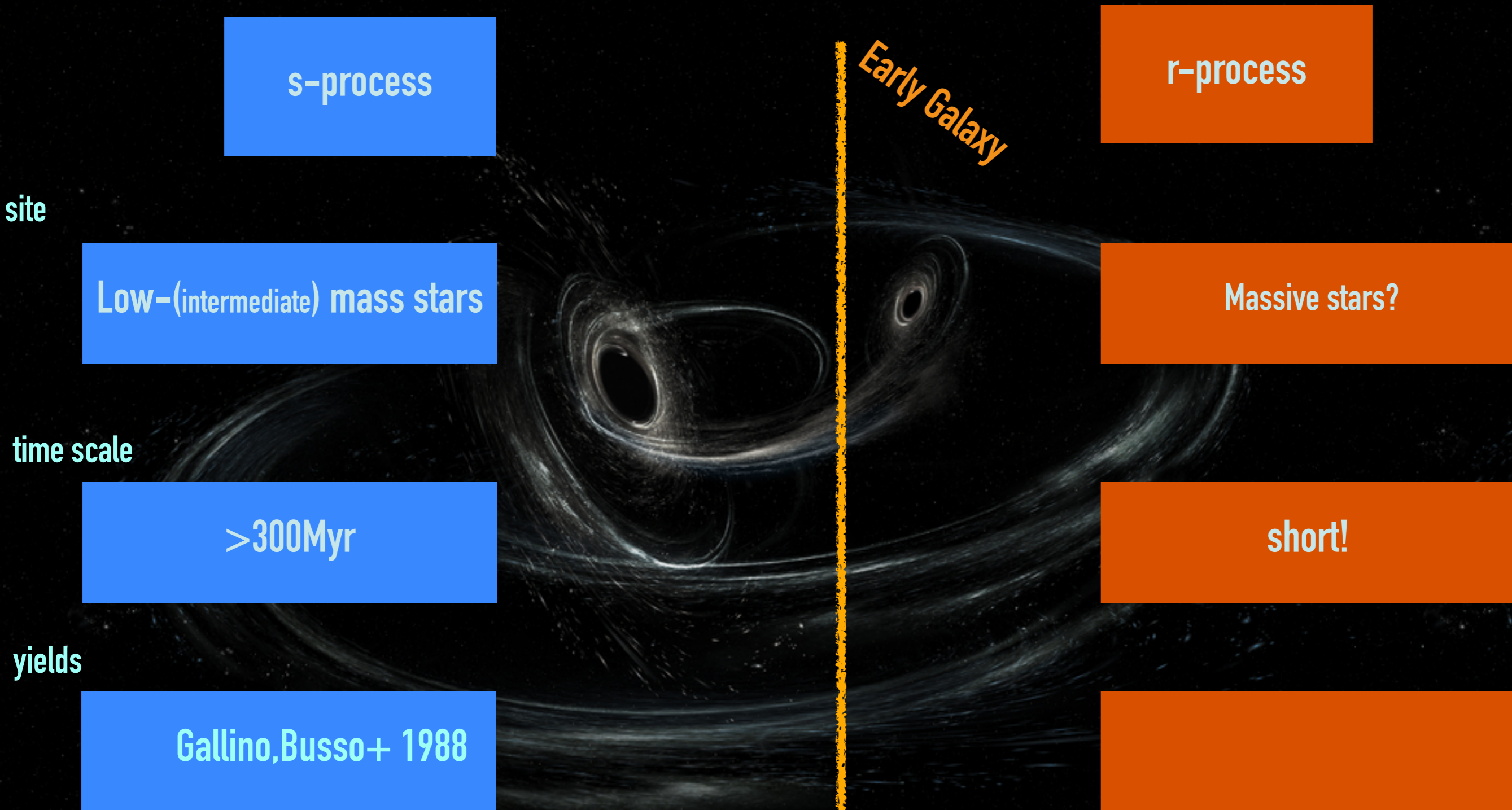
$$\tau_{\beta} \gg \tau_c$$

		N = 82					Elemental breakdown		
							<i>r</i>	<i>s</i>	
Nd		142 <i>s</i>					42%	58%	
Pr		141 <i>s,r</i> 100%					51%	49%	
Ce		140 <i>s,r</i> 88.5%				142 <i>r</i> 11.2%	19%	81%	
La		139 <i>s,r</i> 99.9%					25%	75%	
Ba		134 <i>s</i> 2.4%	135 <i>s,r</i> 6.6%	136 <i>s</i> 7.9%	137 <i>s,r</i> 11.2%	138 <i>s,r</i> 71.7%	15%	85%	
Cs		133 <i>s,r</i> 100%					85%	15%	
Xe	128 <i>s</i> 1.9%	129 <i>s,r</i> 26.4%	130 <i>s</i> 4.1%	131 <i>s,r</i> 21.2%	132 <i>s,r</i> 26.9%	134 <i>r</i> 10.4%	136 <i>r</i> 8.9%	80%	20%
	s-process path		r-process path						

p

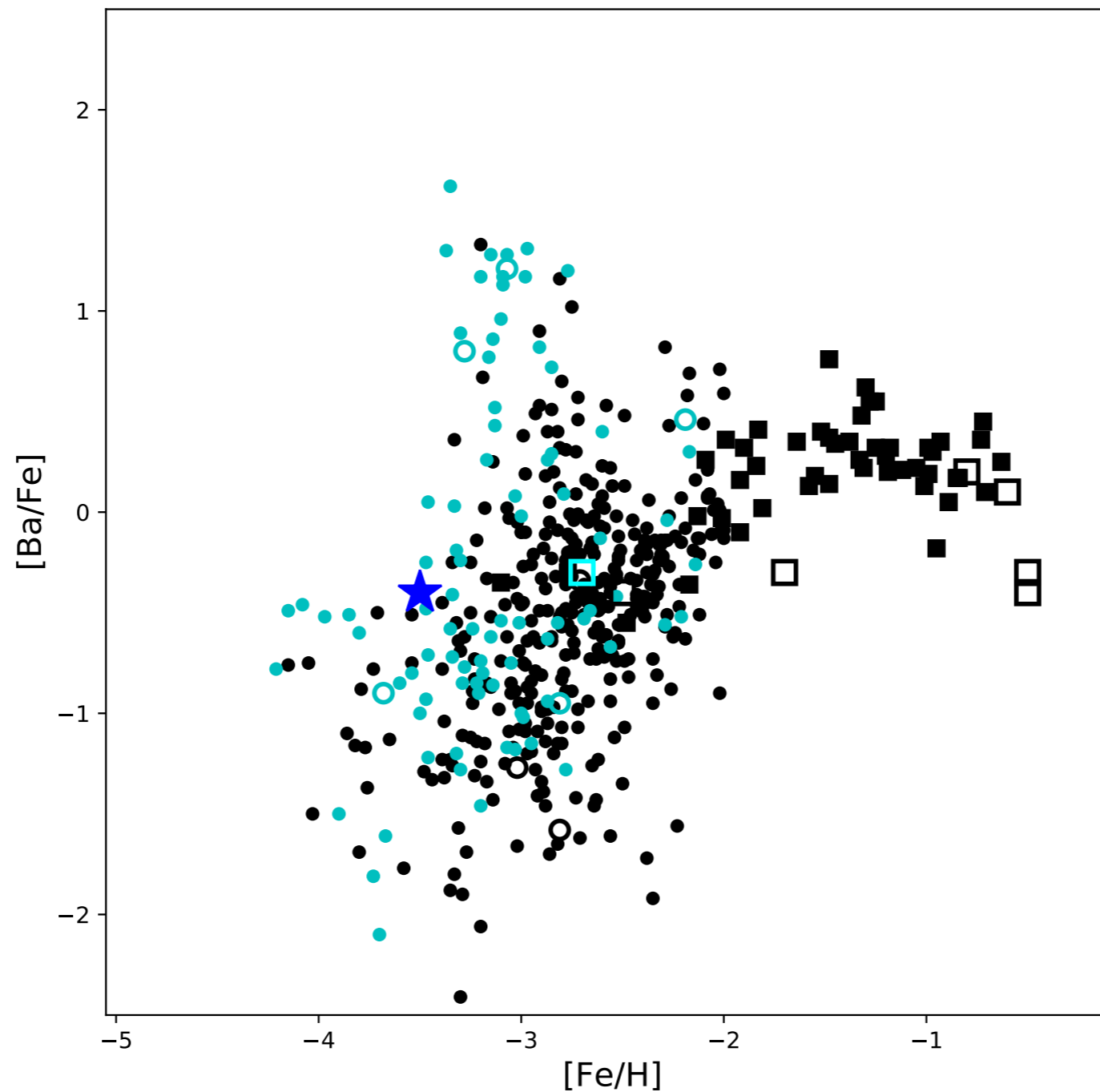
Neutron capture elements

Since Truran 1980 short timescale



[Ba/Fe] in the Galactic halo

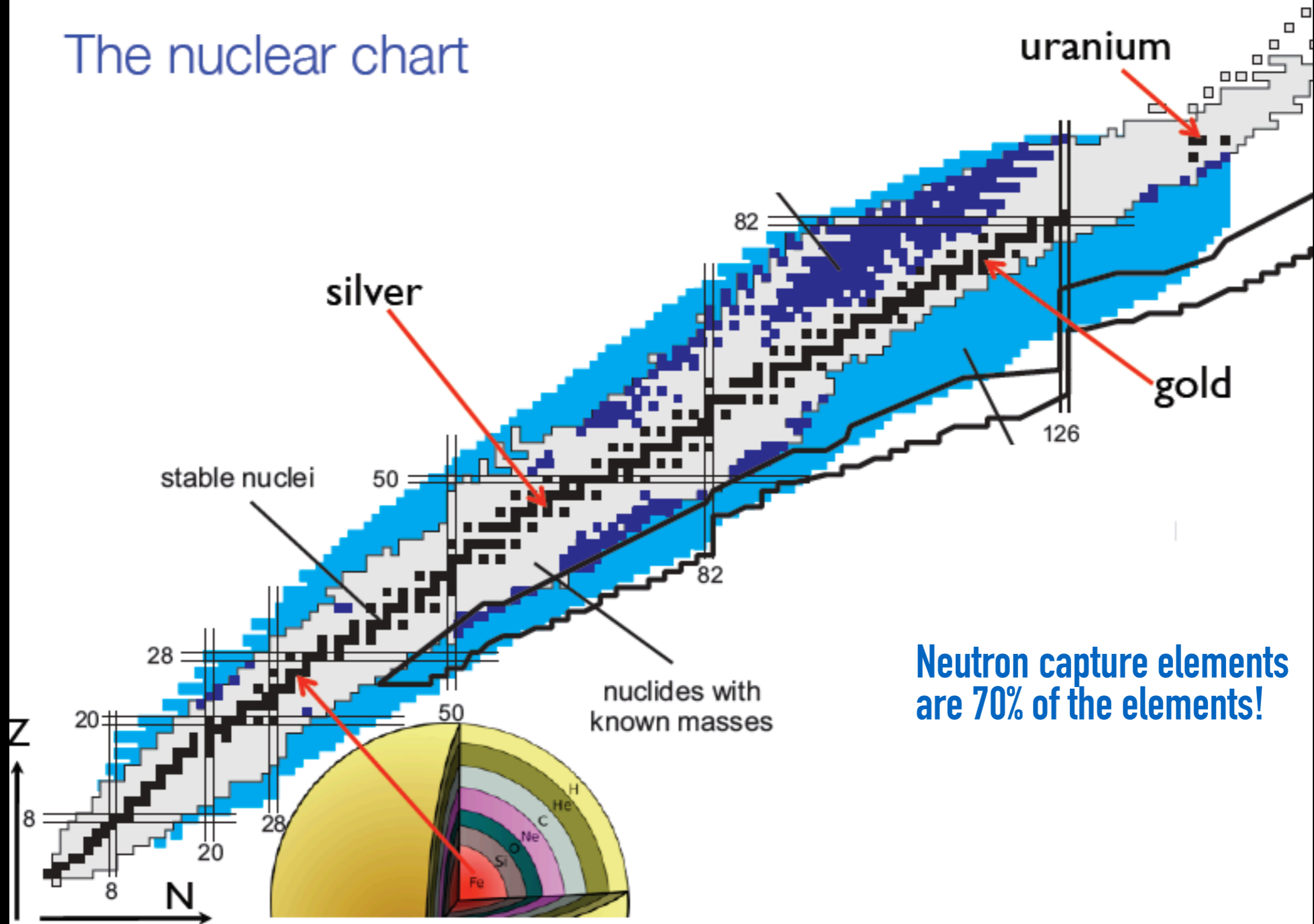
Since McWilliam95 idea of RARE events for r-process events
(see also Primas+94, Ryan+91, Norris+93)



data from in
Placco+14 ● ●
Hansen+12 ■ ■
Hansen+16 □ □
Cescutti+16 ★

Neutron capture elements

The nuclear chart



Neutron capture elements are 70% of the elements!

Neutron capture elements

s-process

r-process

site

Low-(intermediate) mass stars

NS mergers
(& Massive stars?)

time scale

>300Myr

DTD NSM or/and
< 30Myr for MRD SNe

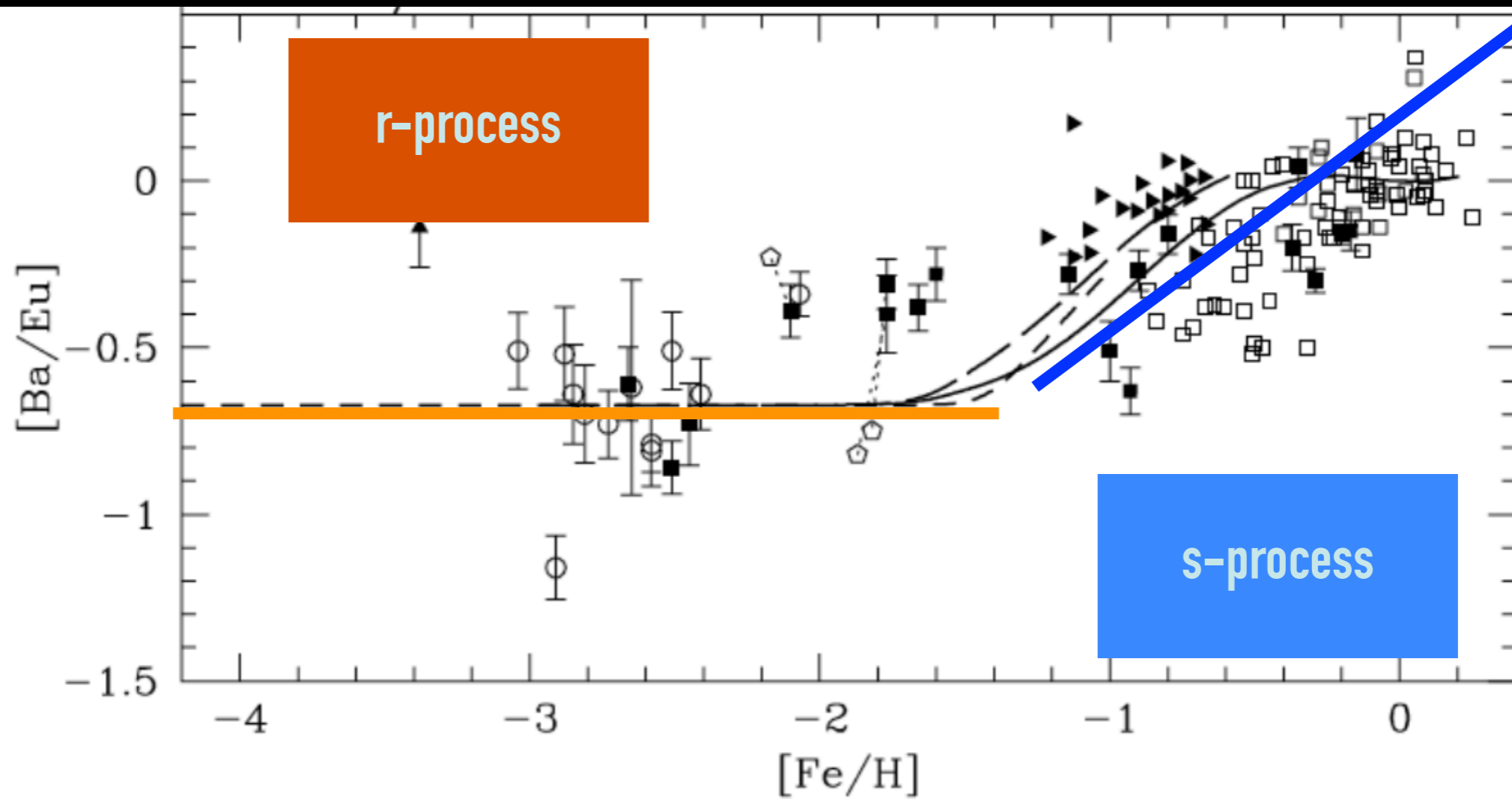
yields

Cristallo+11

nucleosynthesis available
(but ...)

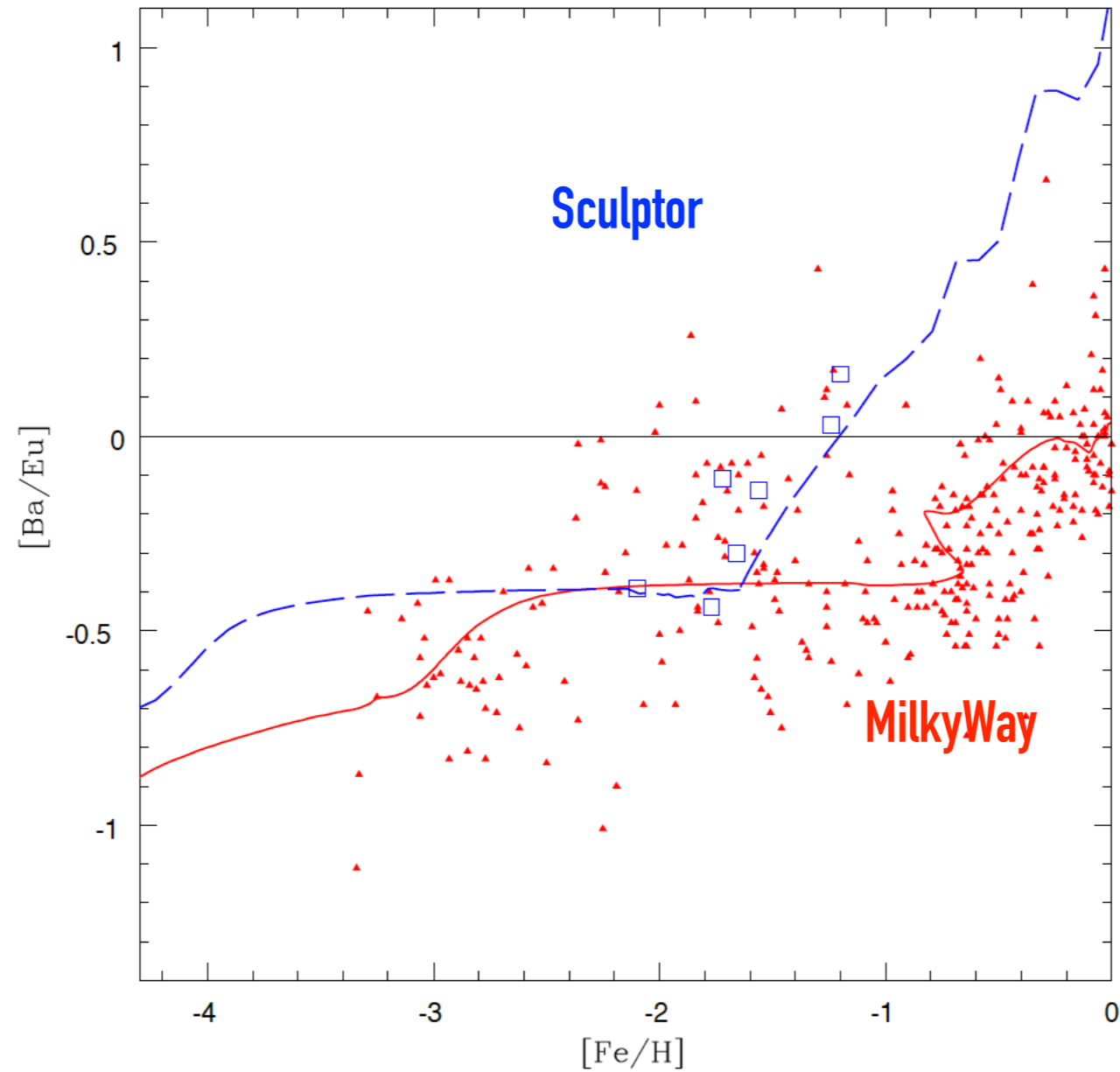
Karakas+12

The case of [Ba/Eu] knee



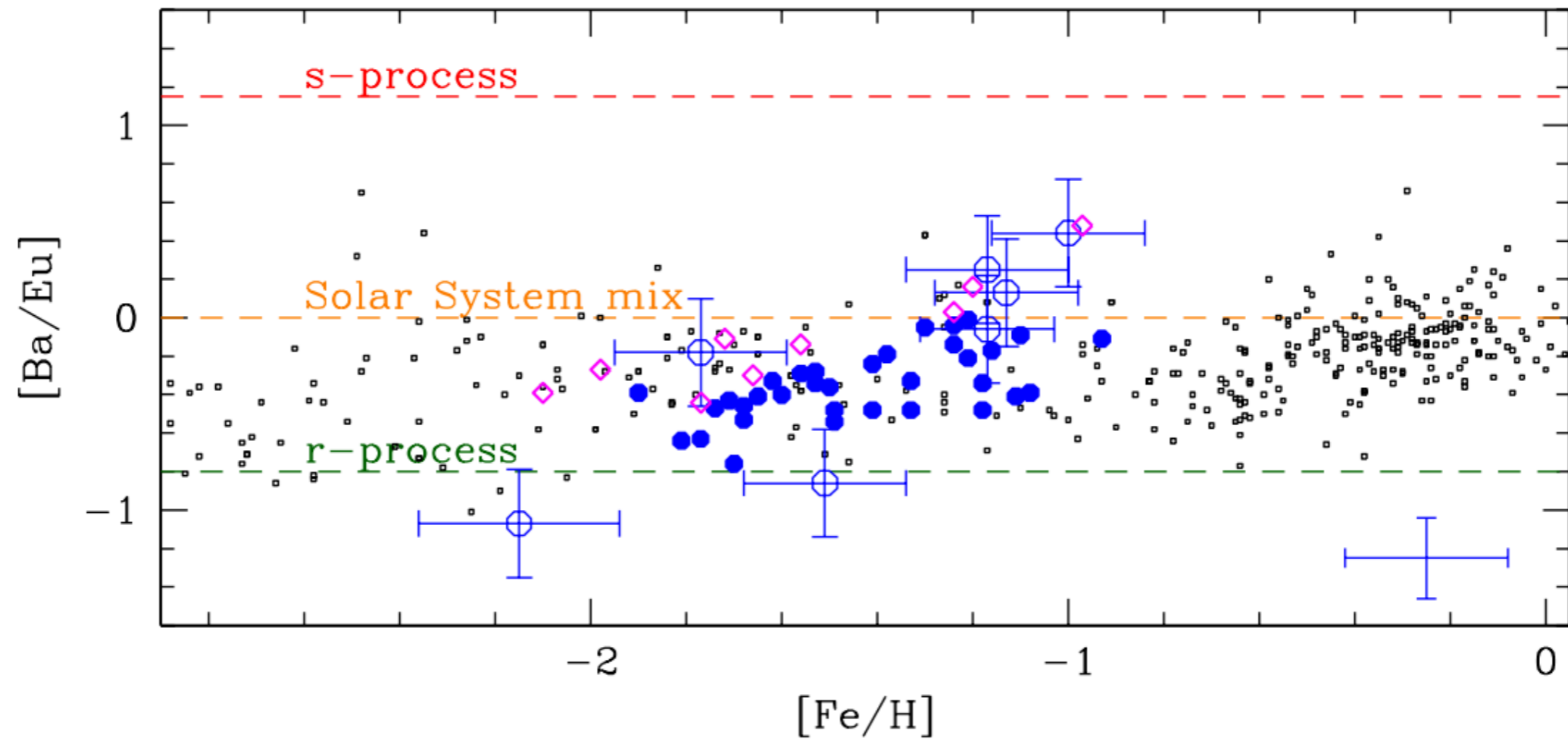
Travaglio+99

The case of [Ba/Eu] knee



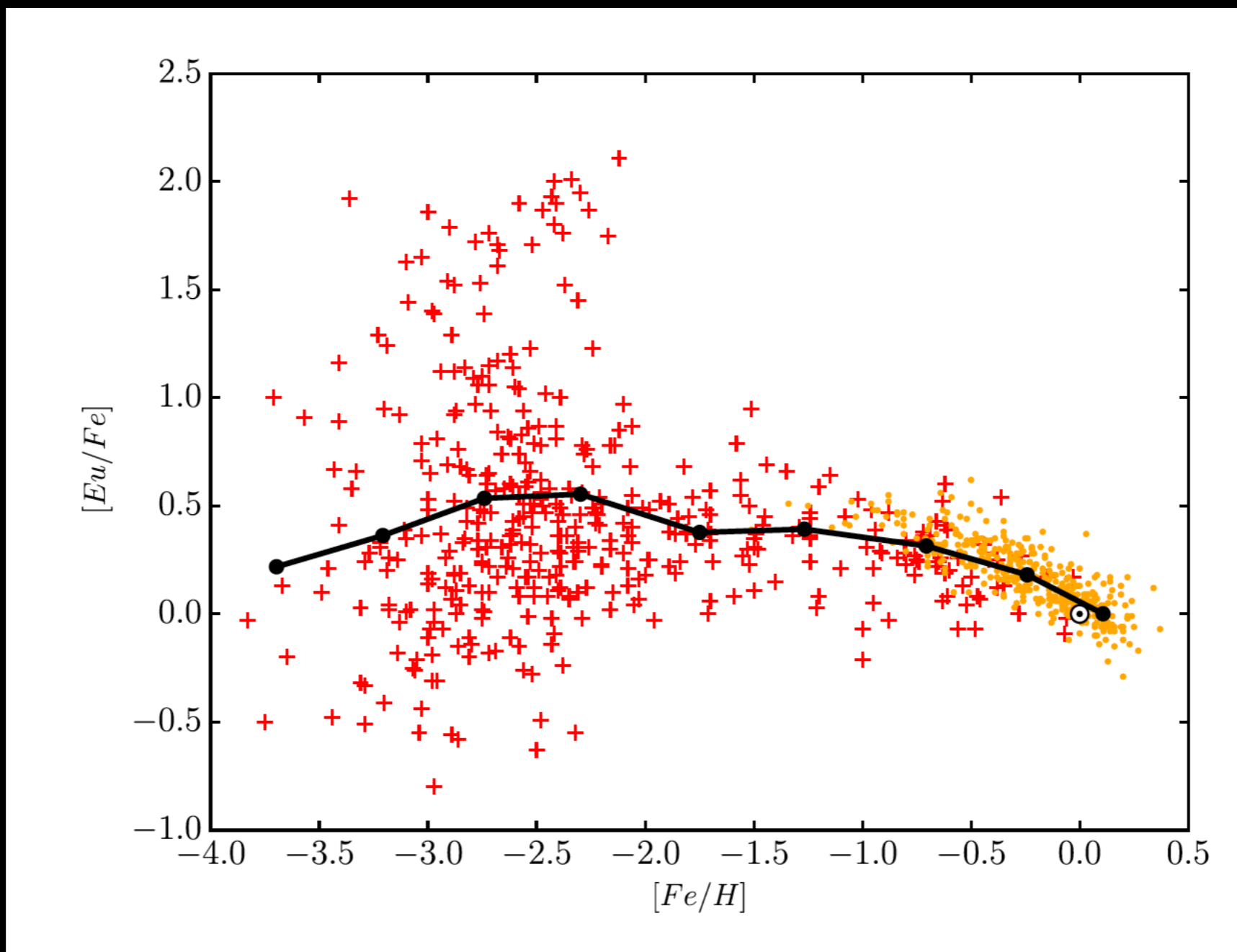
Lanfranchi+07,Cescutti07

[Ba/Eu] in Sculptor galaxy



Eu/Fe in the Galactic halo

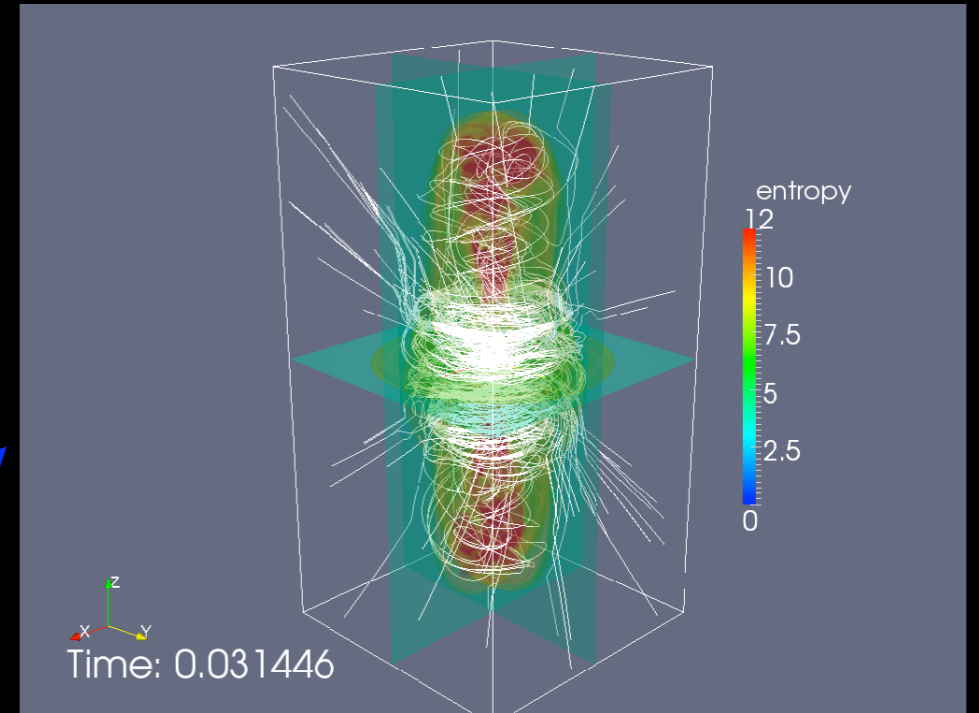
Europium only r-process...
Since McWilliam98 idea of rare events



Electron Capture SNe (Wanajo+11)



Magnetorotat. driven SNe (Winteler+12)



Site(s) of the r-process?

Neutron star mergers (Rosswog+13)

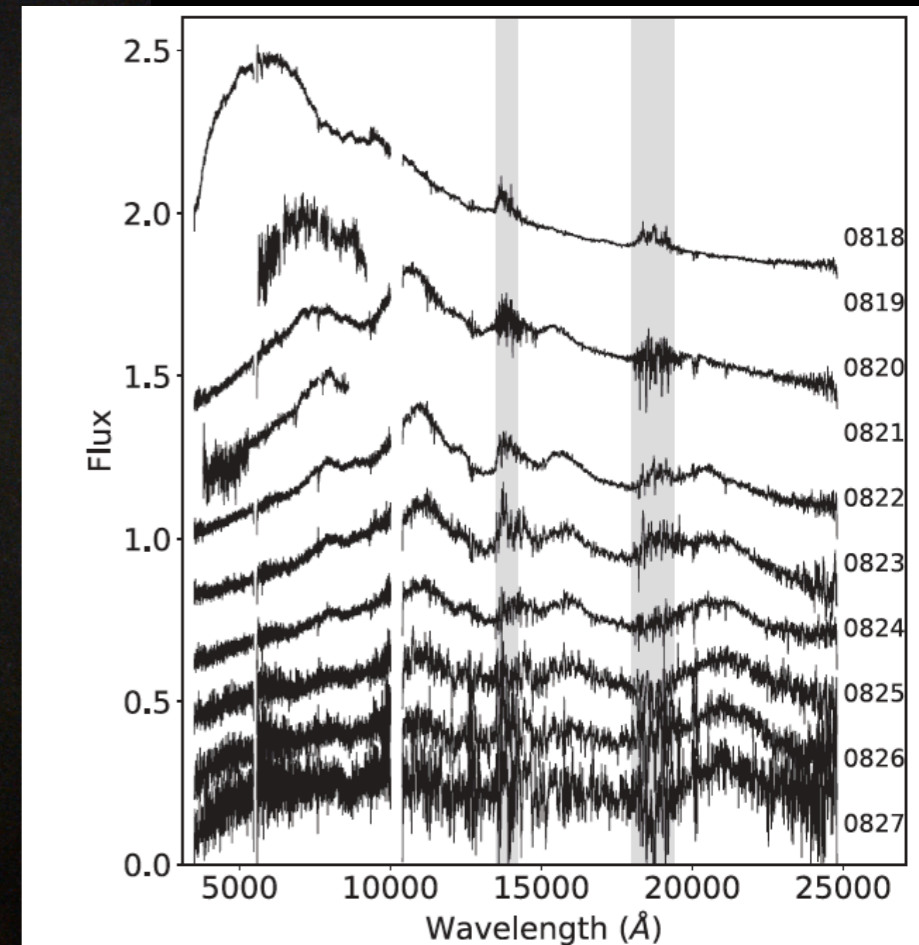
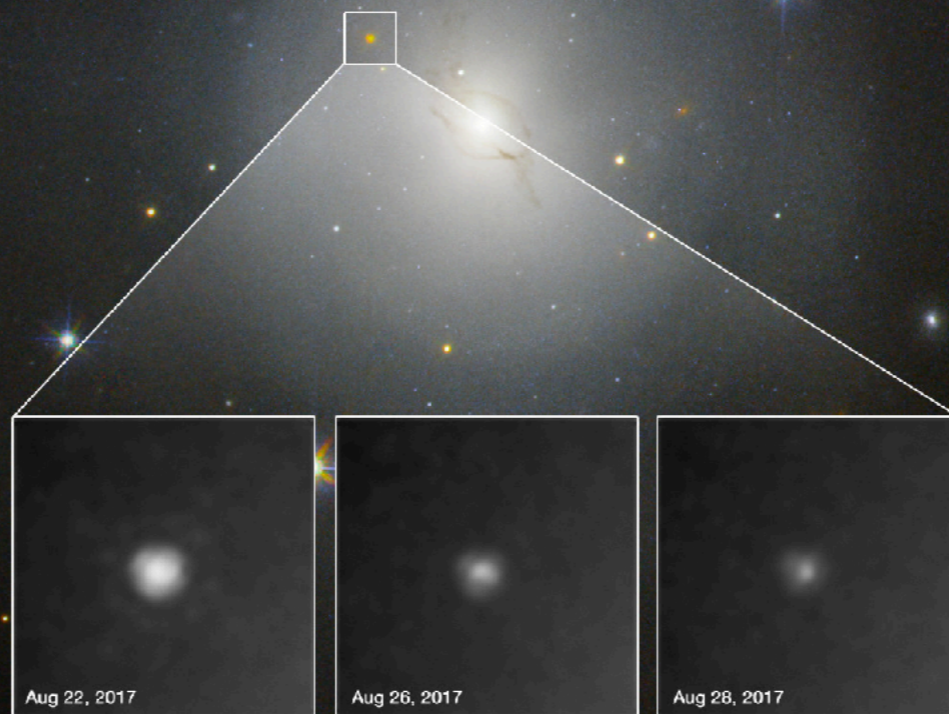
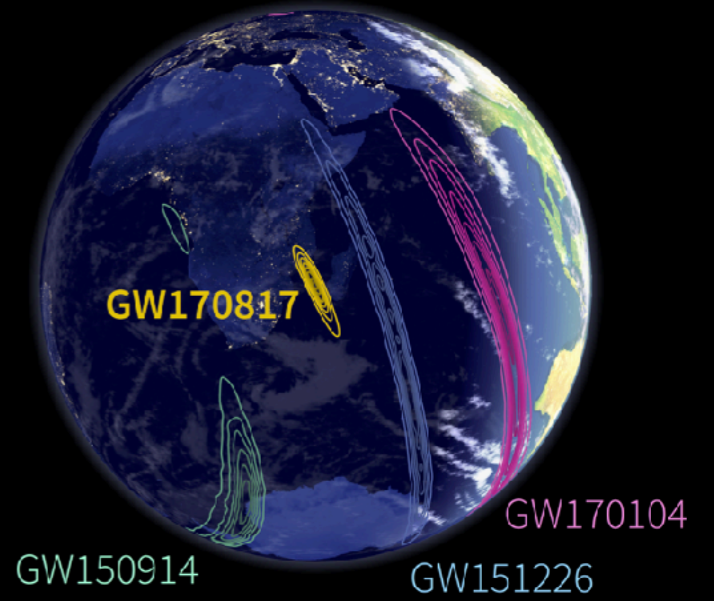
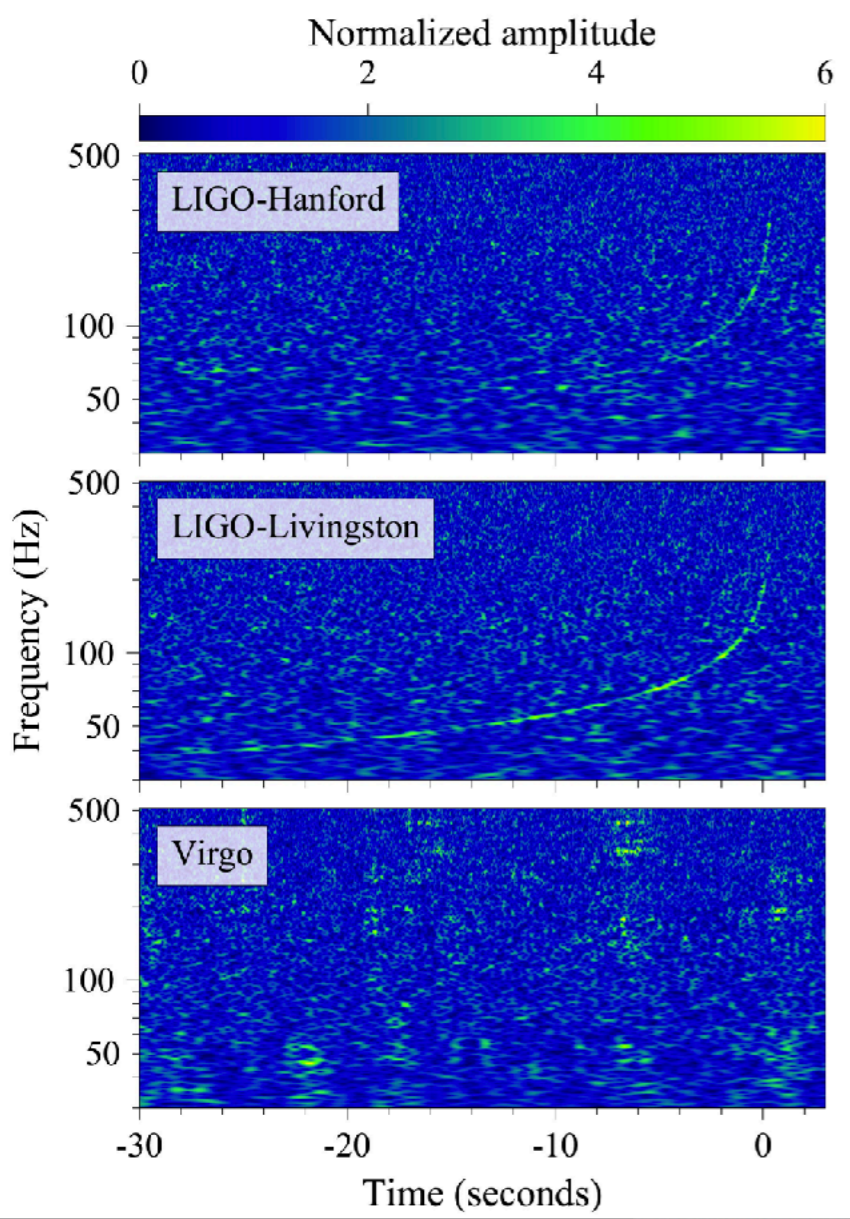


Neutrino winds SNe (Arcones+07, Wanajo 13)



other possible sites?

After GW170817...



Neutron stars mergers

Progenitors are rare:
only few percent of the massive stars are
formed in binary system which can
produce a NS merger.

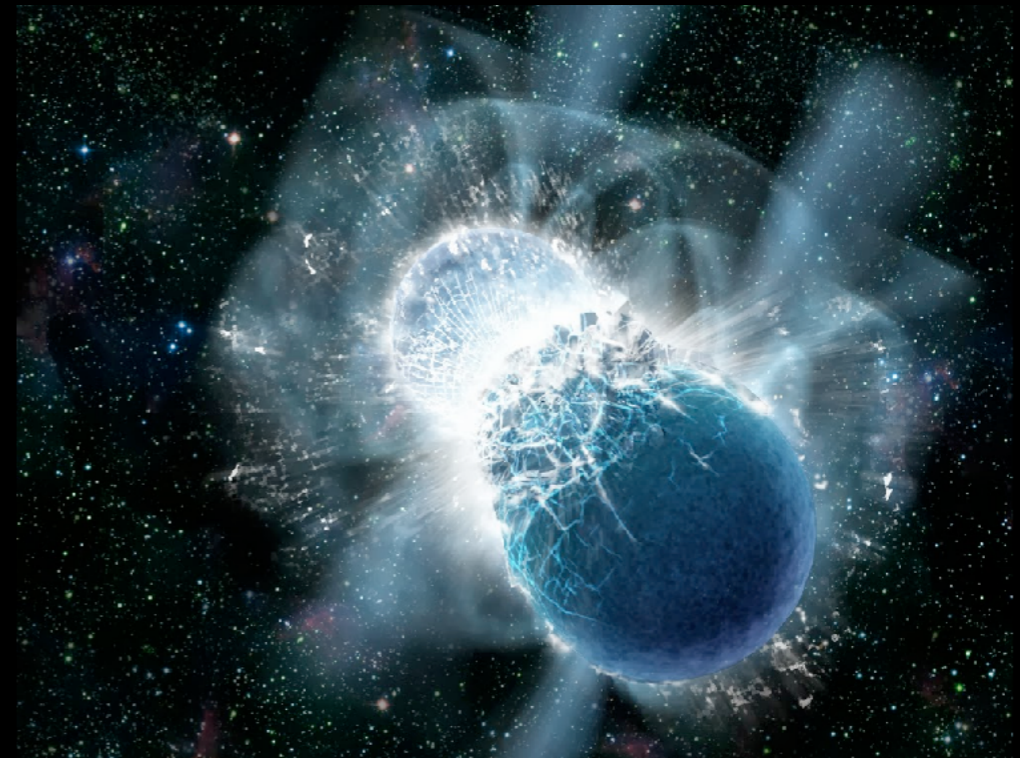
This fraction (NSM/SNell)
is defined as **alpha**

This fraction is not constrained at all the
times, the rate can be constrained only at
the present time.

Another key feature of NS merger is the
delay between the formation of the binary
system of neutron stars and the merging
event.

We investigate delay of 1, 10 and 100Myr.

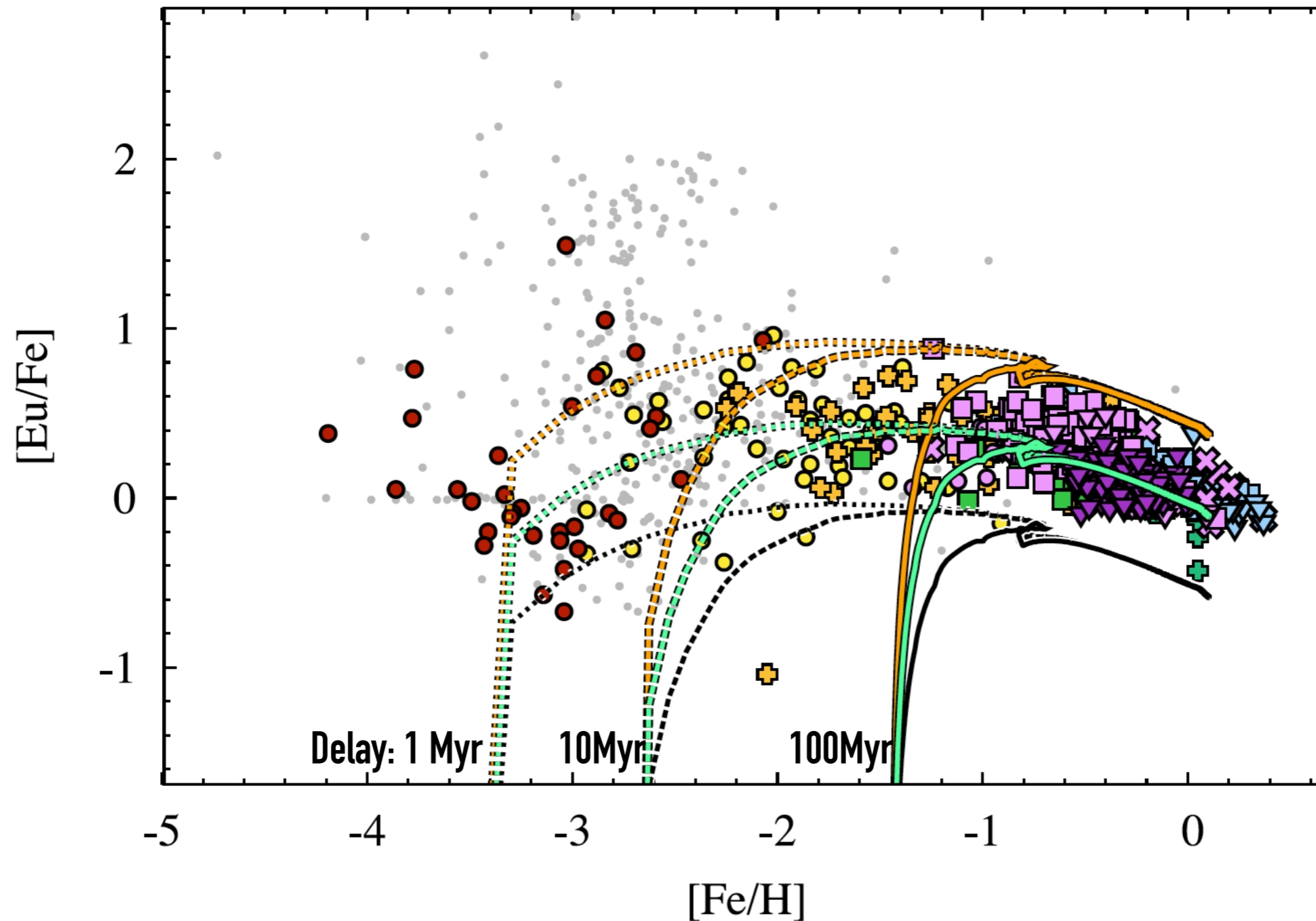
Neutron star mergers (Rosswog+13)



GCE for Europium with NSM with fixed delay

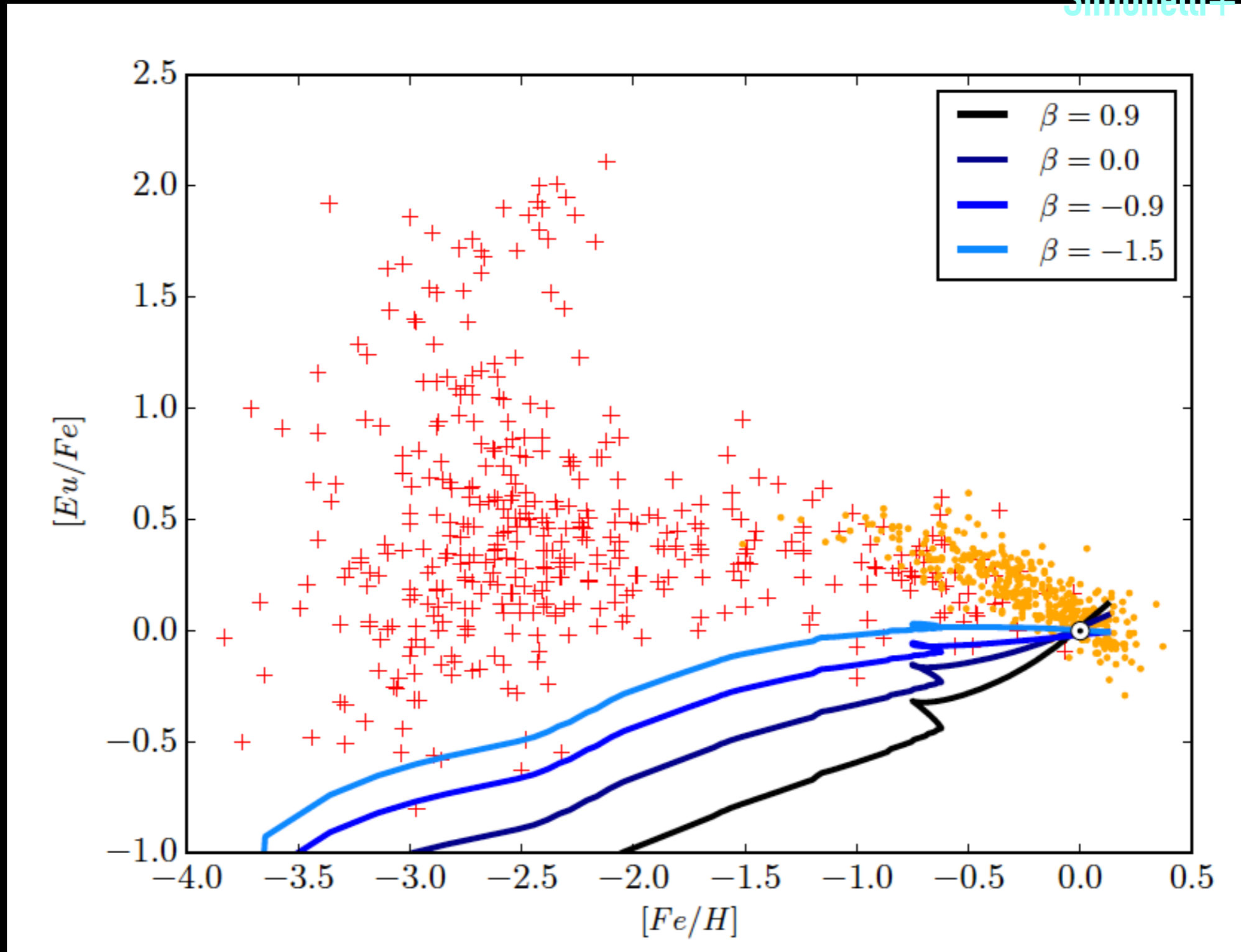
Eu yields (green): $3 \cdot 10^{-7} M_{\text{sun}}$

$\alpha : 0.018$



Detailed DTD for NSM

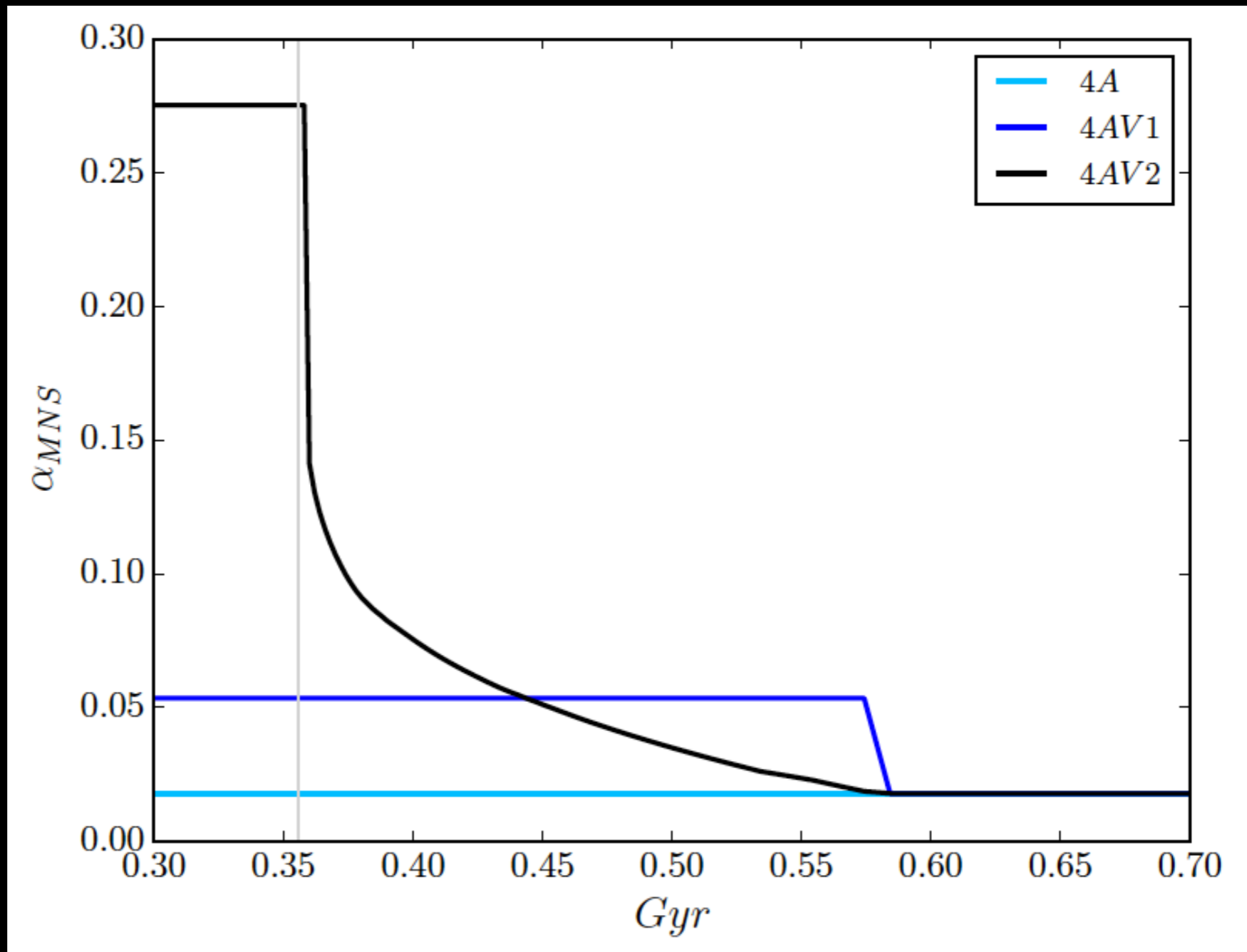
Simonetti+19



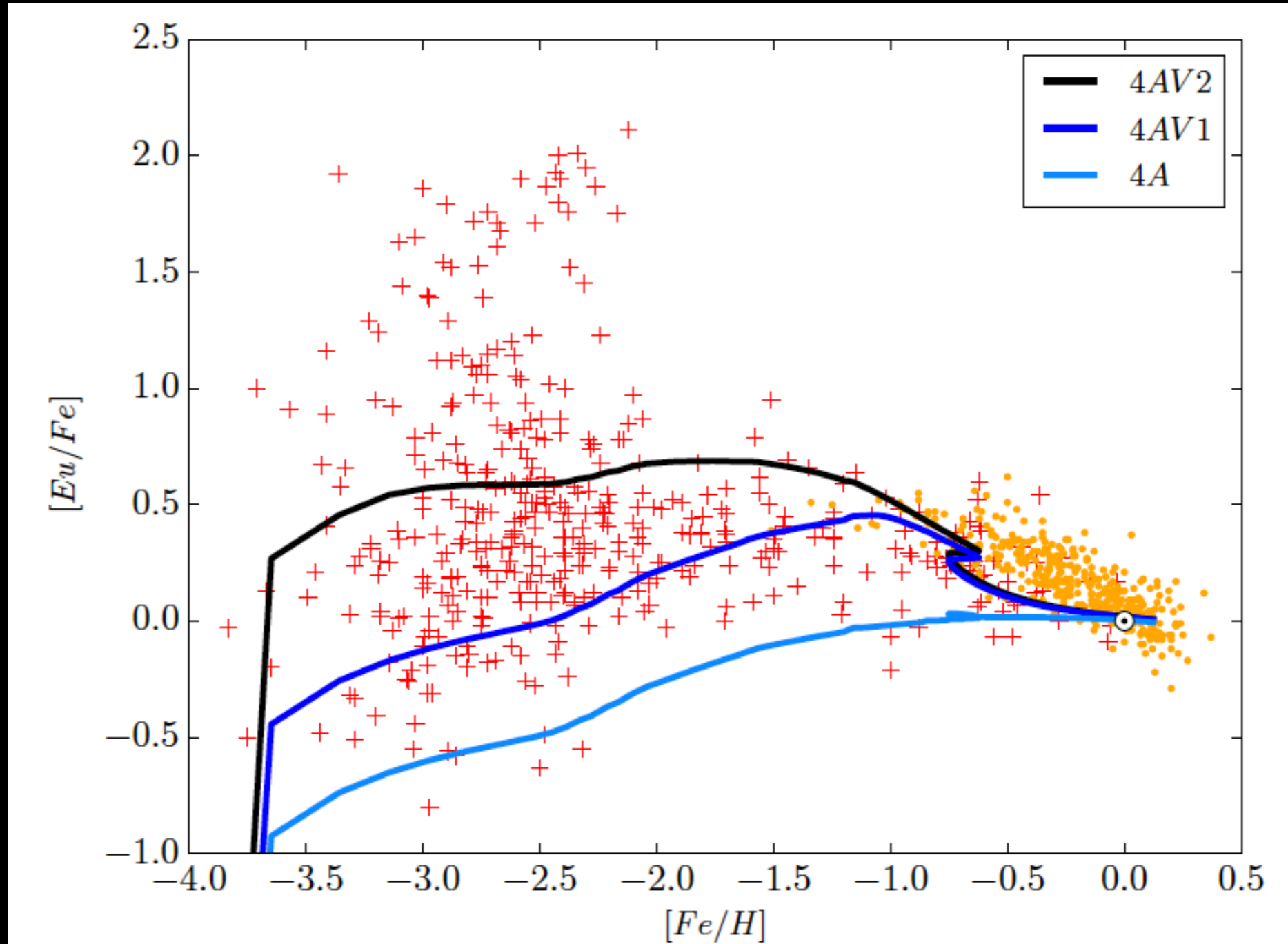
see also Cotè+19

Models with detailed DTD for NSM

variation of the alpha (fraction NSM/SNe)



Models with detailed DTD for NSM

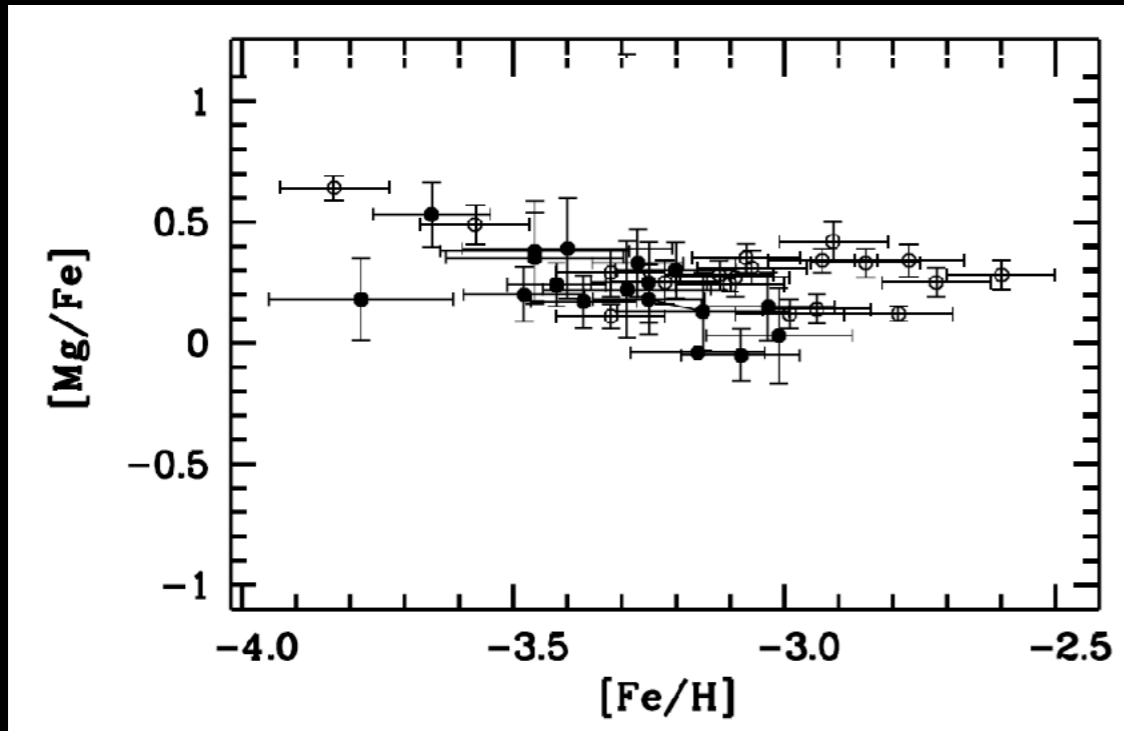


variation of alpha, possible solution!

see also Schoenrich&Weinberg19

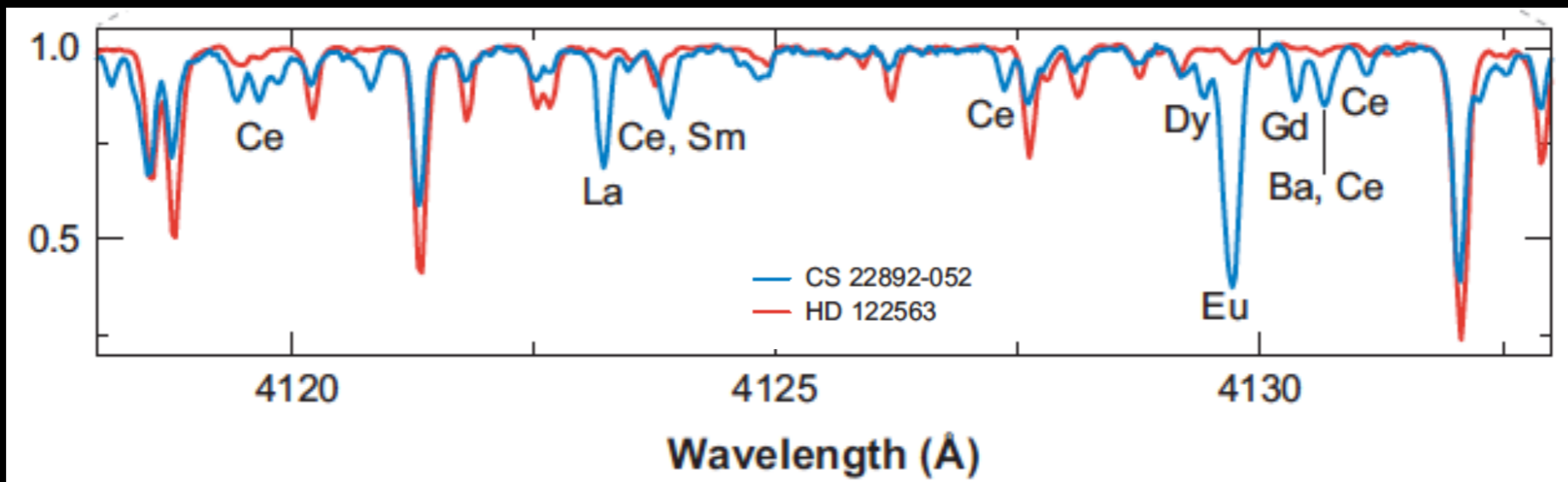
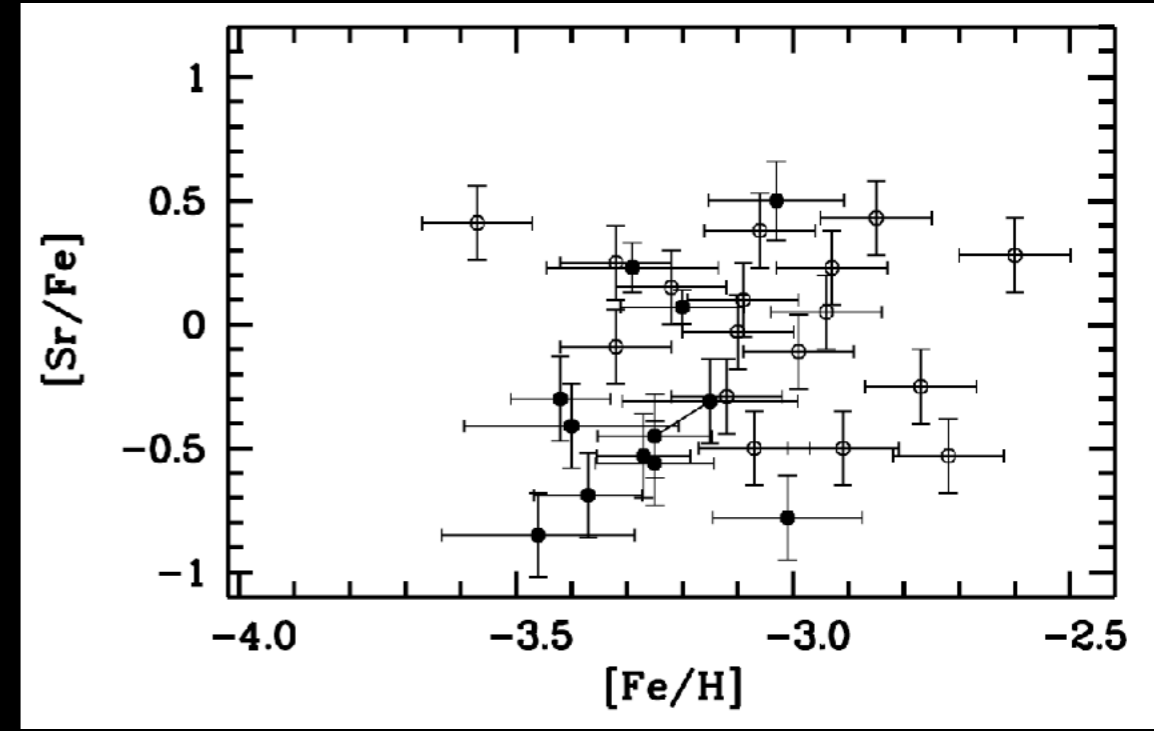
Spread in the neutron capture elements!

Mg: alpha-element



Bonifacio+12

Sr: neutron capture element



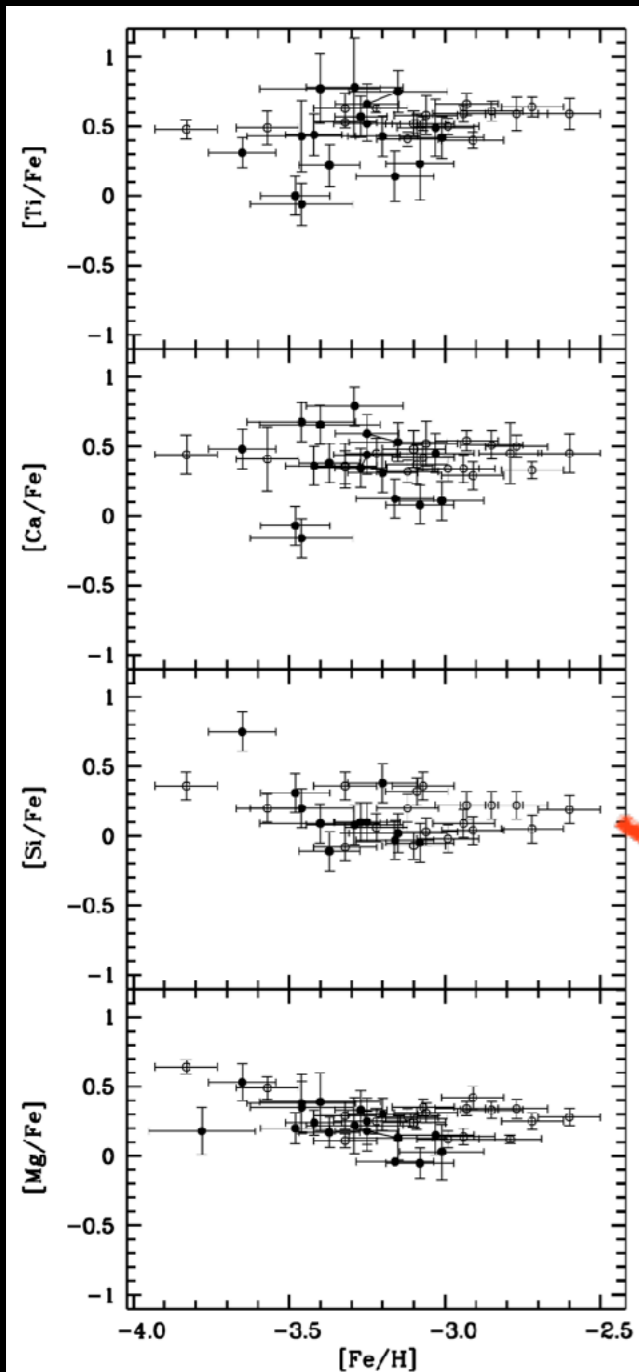
Sneden+08

Stochastic chemical evolution models

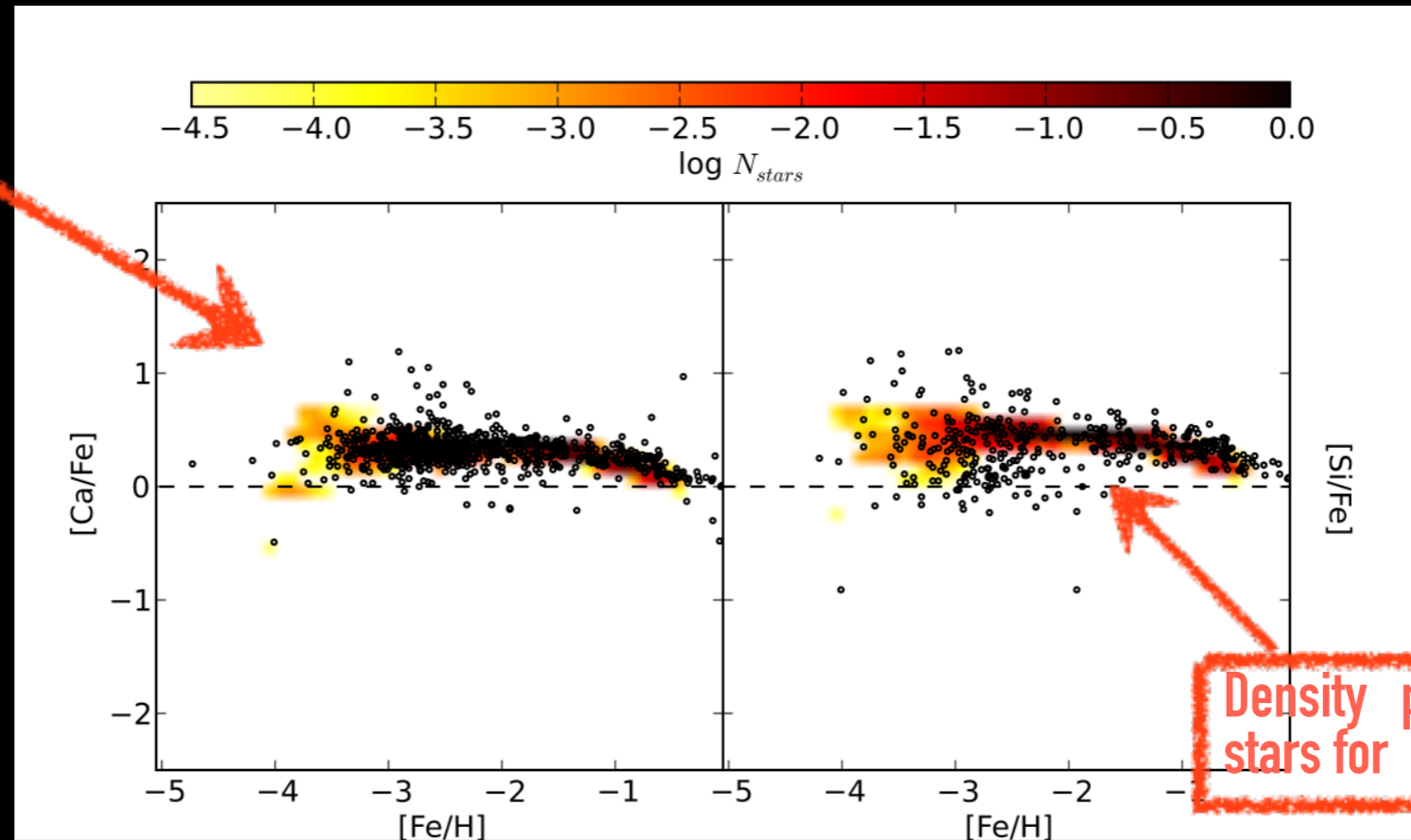
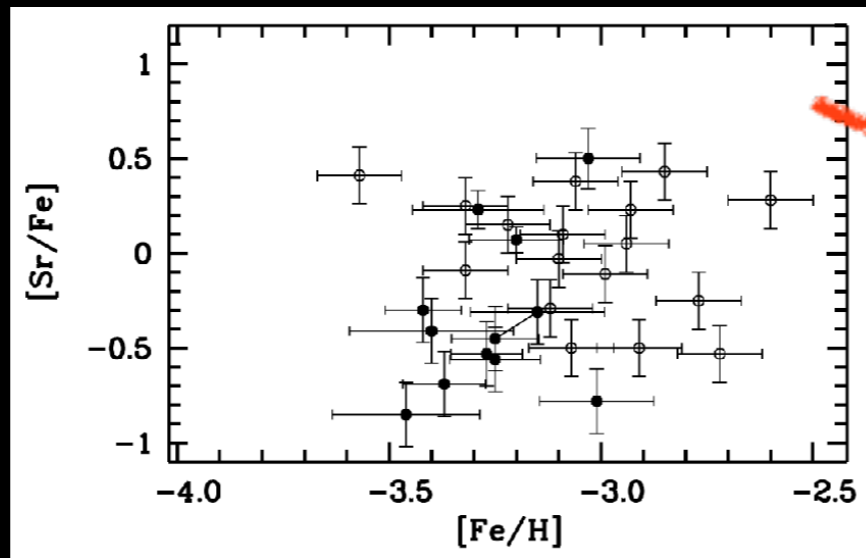
Problem:
Neutron capture elements present
a spread alpha elements do not

Solution:

The volumes in which the ISM is well mixed are discrete. Assuming a SNe bubble as typical volume with a low regime of star formation the IMF is not fully sampled. This promotes spread among different volumes if nucleosynthesis of the element is different among different SNe,



Bonifacio+12



Density plot of long living stars for stochastic model

Cescutti 2008
Cescutti et al. 2013

data collected in
Frebel 2010

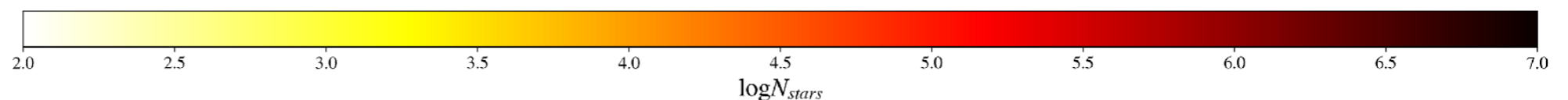
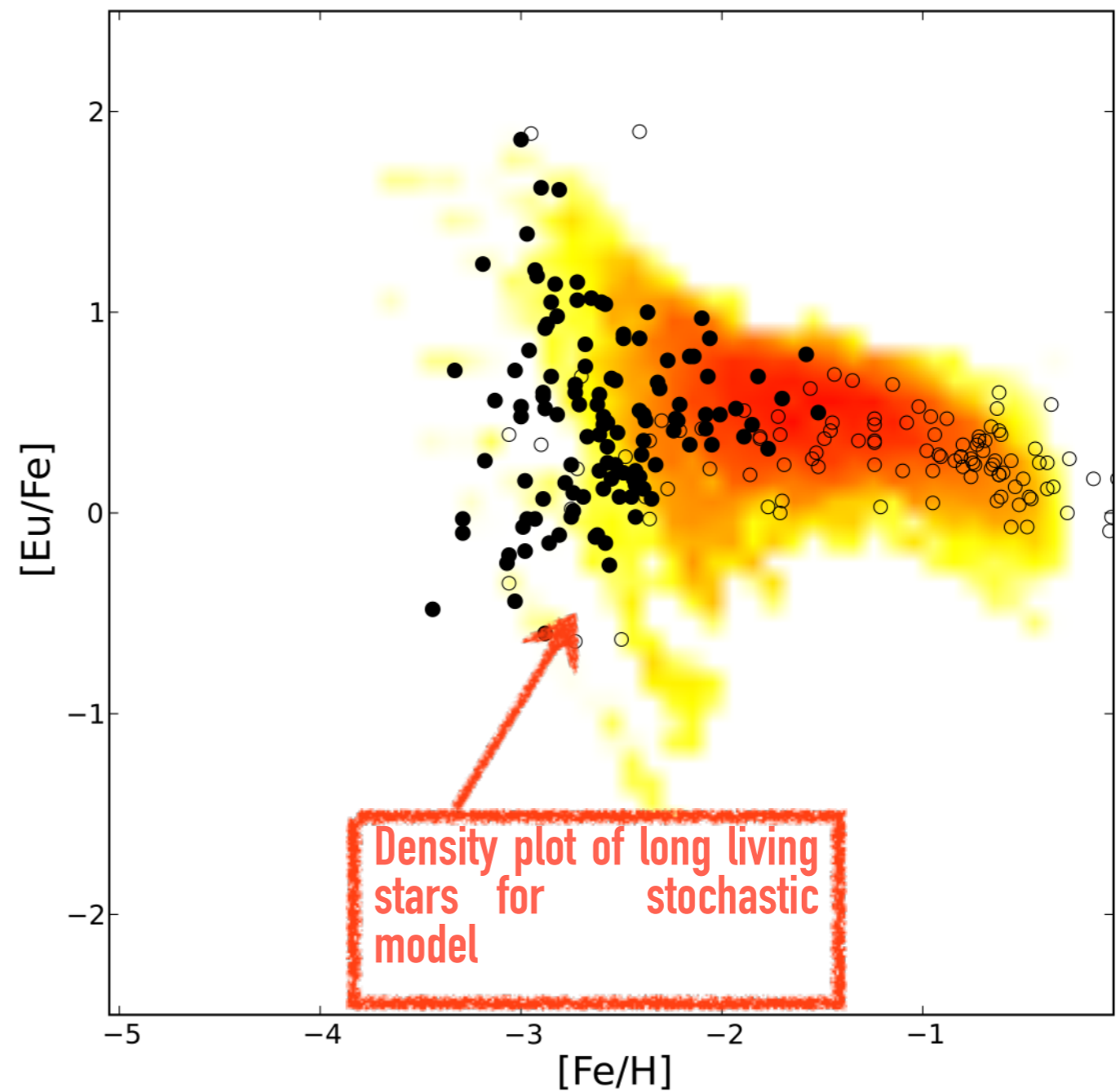
Neutron stars mergers

delay for the merging 1 Myr

Cescutti, Romano, Matteucci,
Chiappini and Hirschi 2015

Results with $\alpha=0.02$
(NSM/SNe)
Eu yields $5 \cdot 10^{-6} M_{\text{sun}}$

What about the impact of
increasing the delay for the
merging?



Neutron star mergers

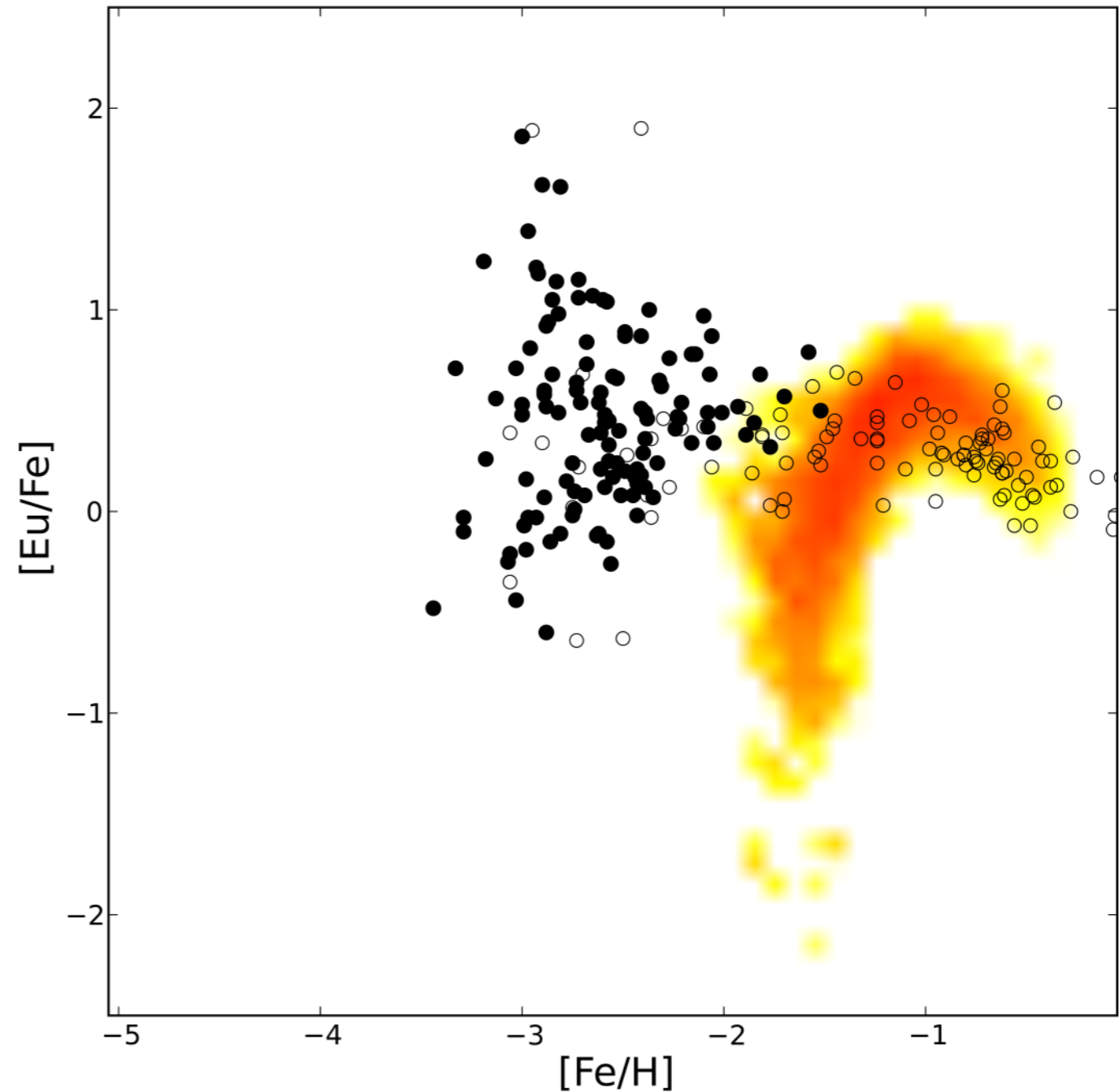
delay for the merging 100 Myr

Cescutti+15

For a delay of 100 Myr the model results are not compatible to the observational data.

Therefore, only if most of the NS mergers enriches in timescale < 10 Myr, the scenario can be supported.

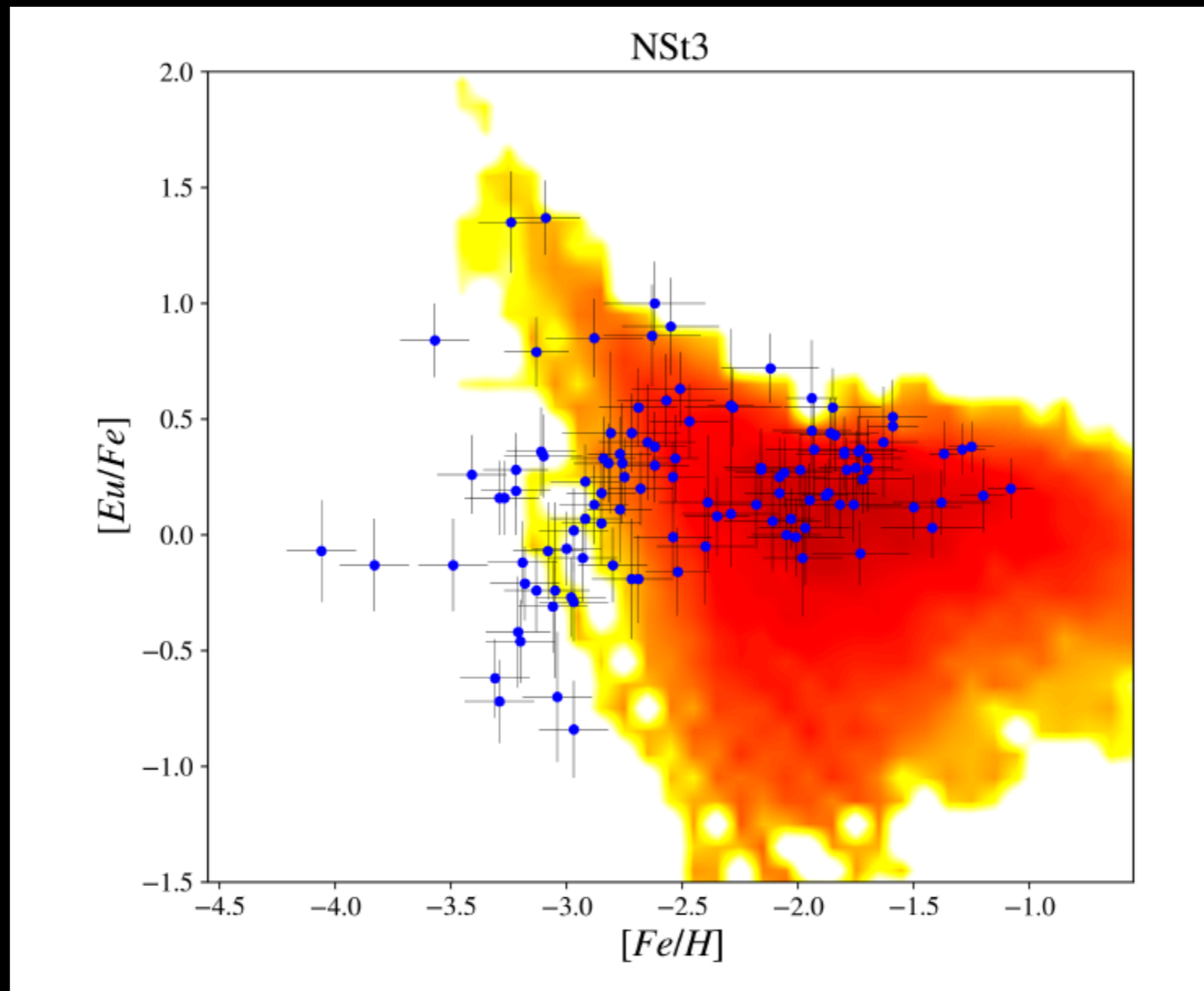
What about a distribution of delays?



This result has been shown by Argast+ 2004,
Matteucci+2014, Komiya+2014... just an exception the Shen+2014

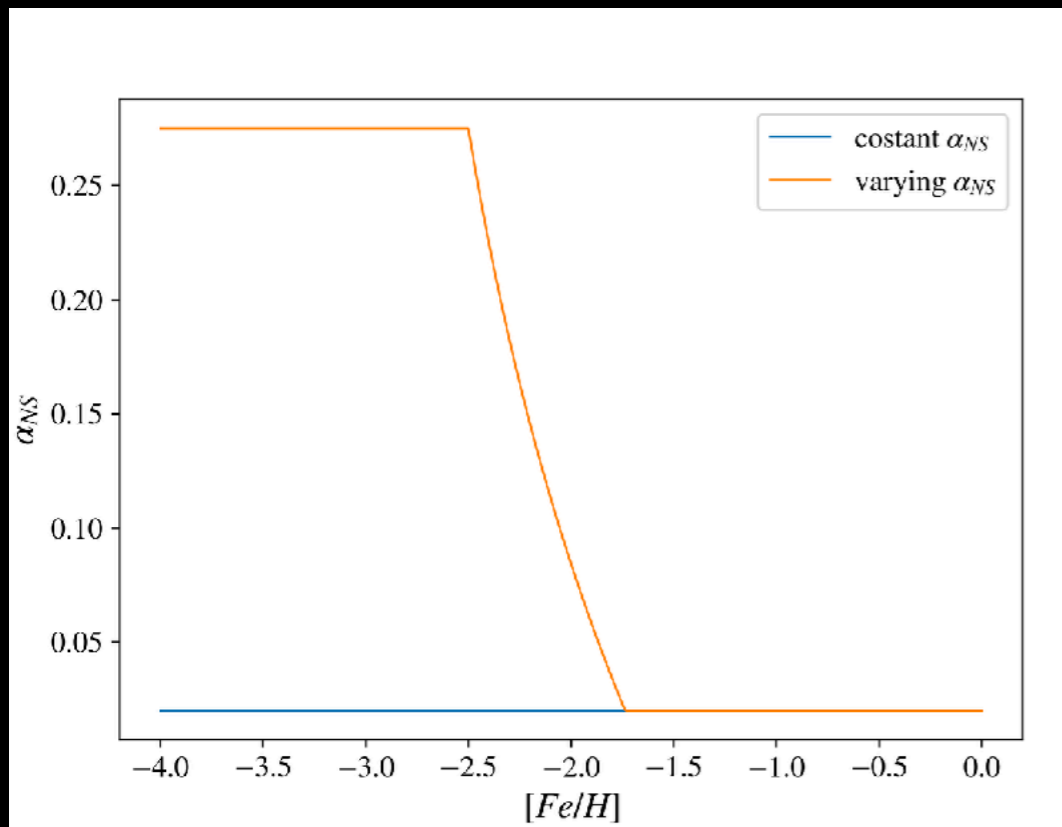
Stochastic model

with a delay time distribution: $t^{-1.5}$

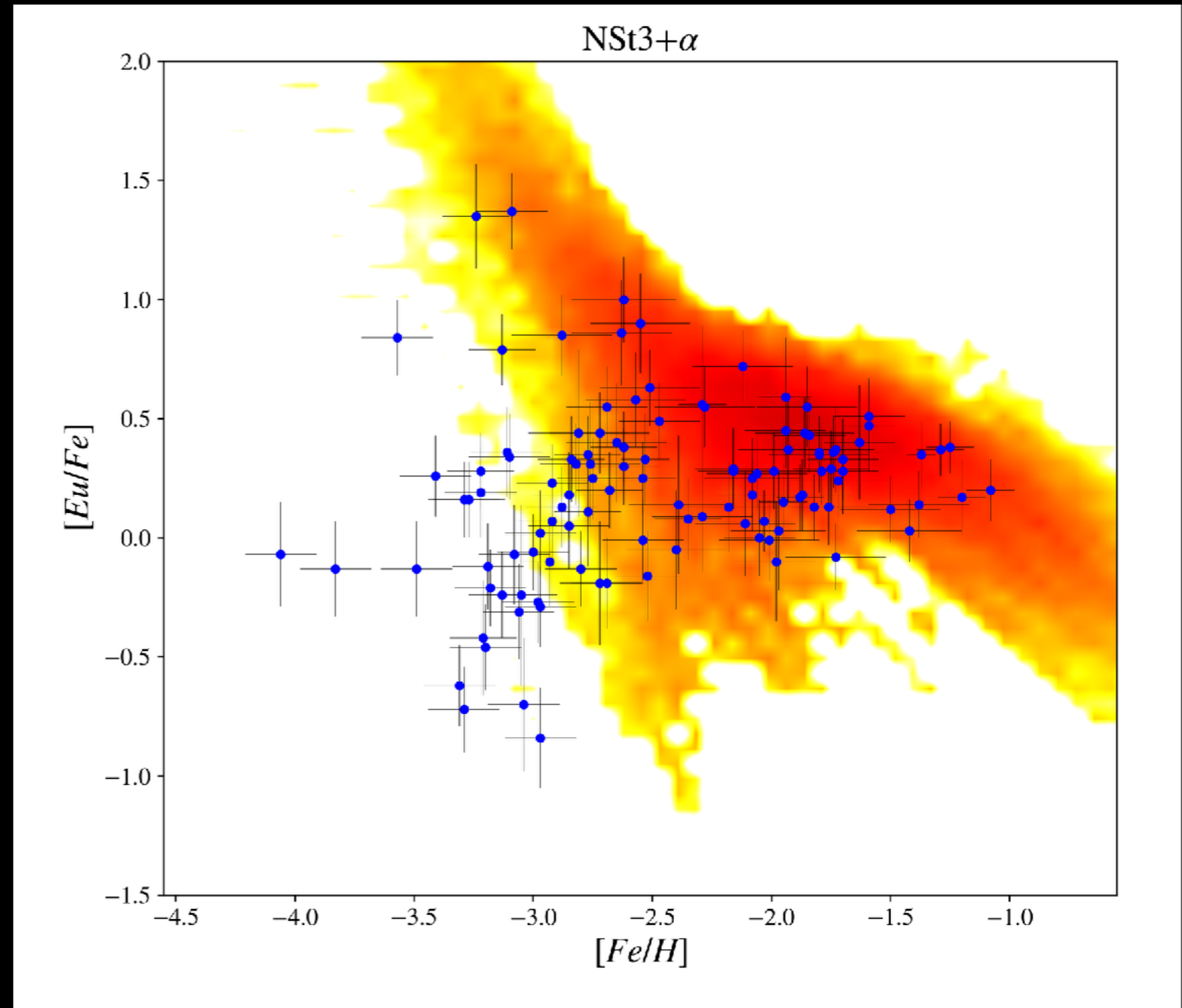


NSM with alpha variations

a delay time distribution: $t^{-1.5}$



similar to Simonetti+19



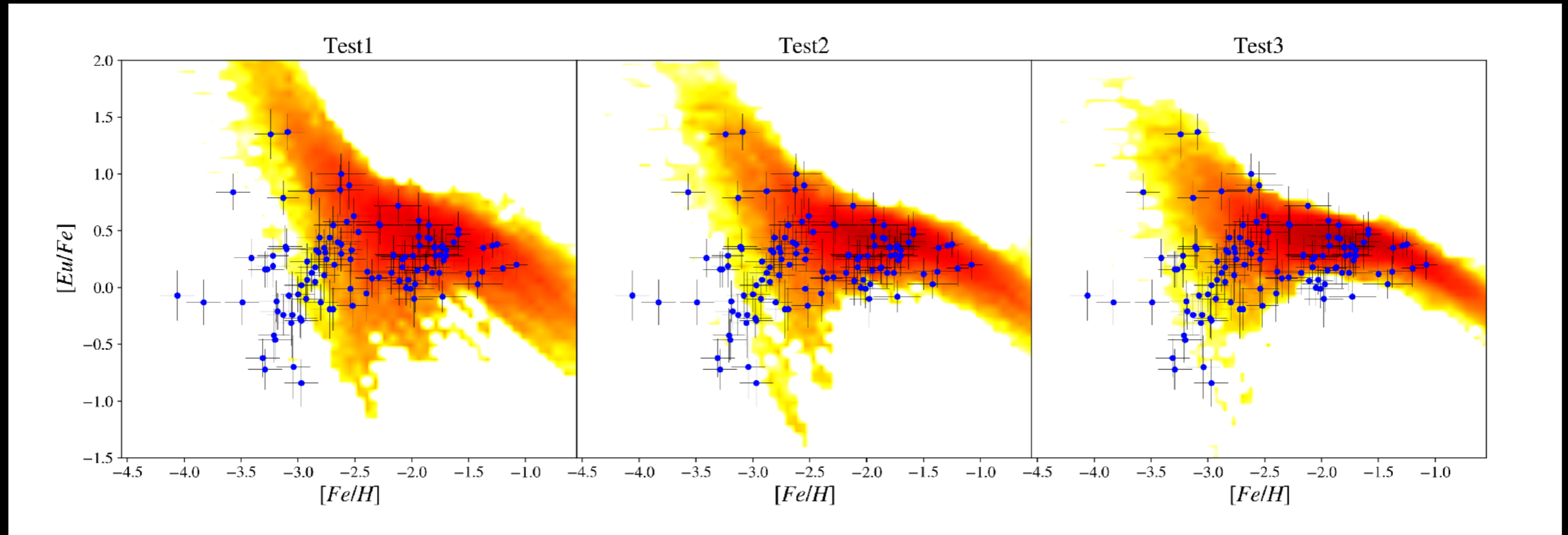
Cavallo+21

How to constrain the fraction of NSM?

alpha=0.02

alpha=0.06

alpha=0.1



[Fe/H] (dex)	Test1		Test2		Test3	
	mean [Eu/Fe] (dex)	sigma(dex)	mean [Eu/Fe] (dex)	sigma(dex)	mean [Eu/Fe] (dex)	sigma(dex)
-3.00	1.42	0.22	1.05	0.23	0.84	0.22
-1.00	0.15	0.15	0.16	0.10	0.17	0.08

Weave and 4MOST !!

Other solutions?

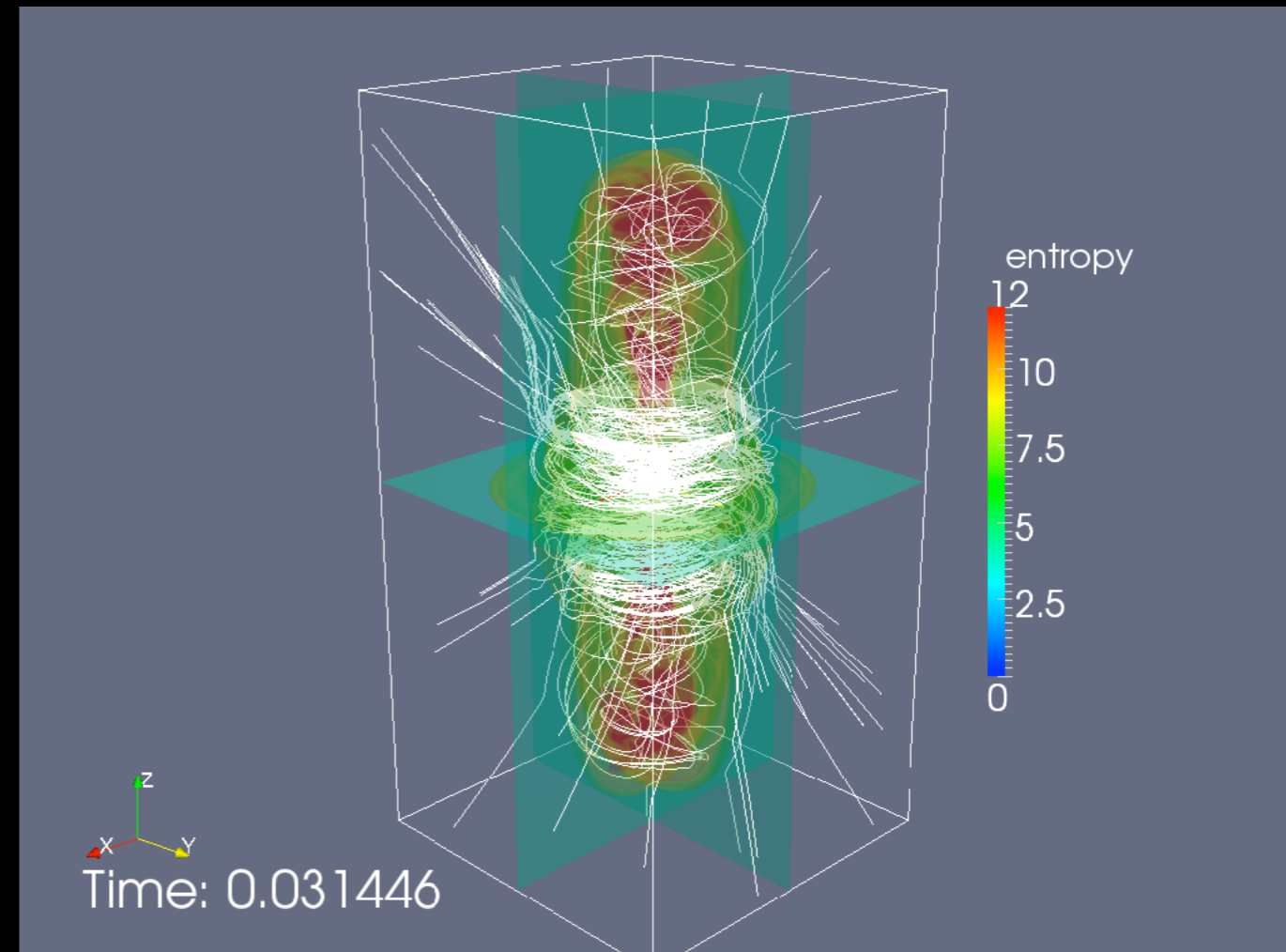
Magneto Rotationally Driven SN scenario (MRD)

(Winteler+12, Nishimura+15)

The progenitors of MRD SNe are believed to be rare and possibly connected to long GRBs. Only a small percentage of the massive stars ($\sim 1-5\%$)

Our results use an higher value (10%), but this percentage is not well constrained, in particular for the early Universe.

Therefore in the stochastic model not all the massive stars produce neutron capture elements.

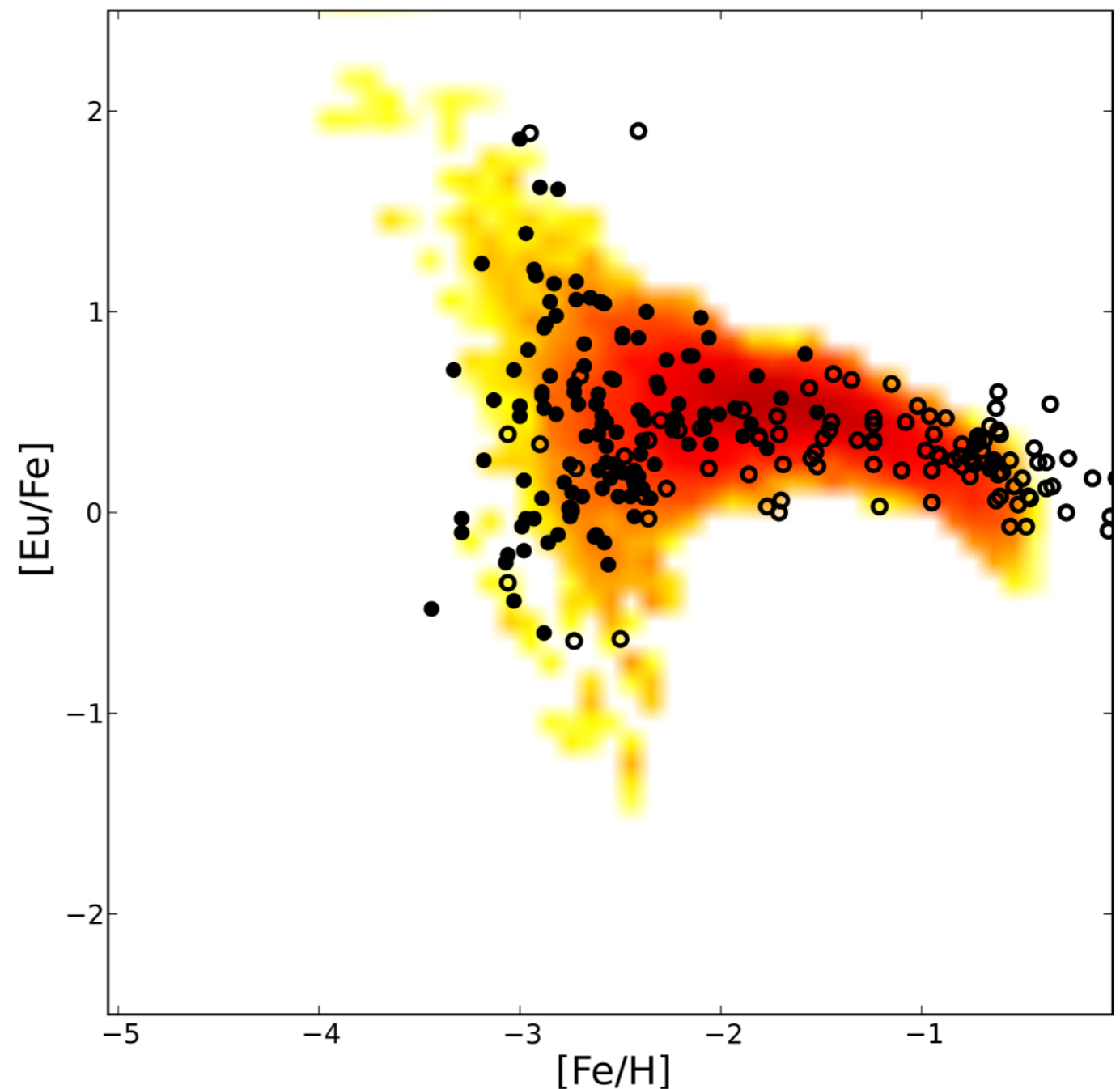


Magneto Rotationally Driven SN scenario (MRD) 10%

Cescutti+14

In the best model shown here the amount of r-process in each event is about 2 times the one assumed in NSM scenario

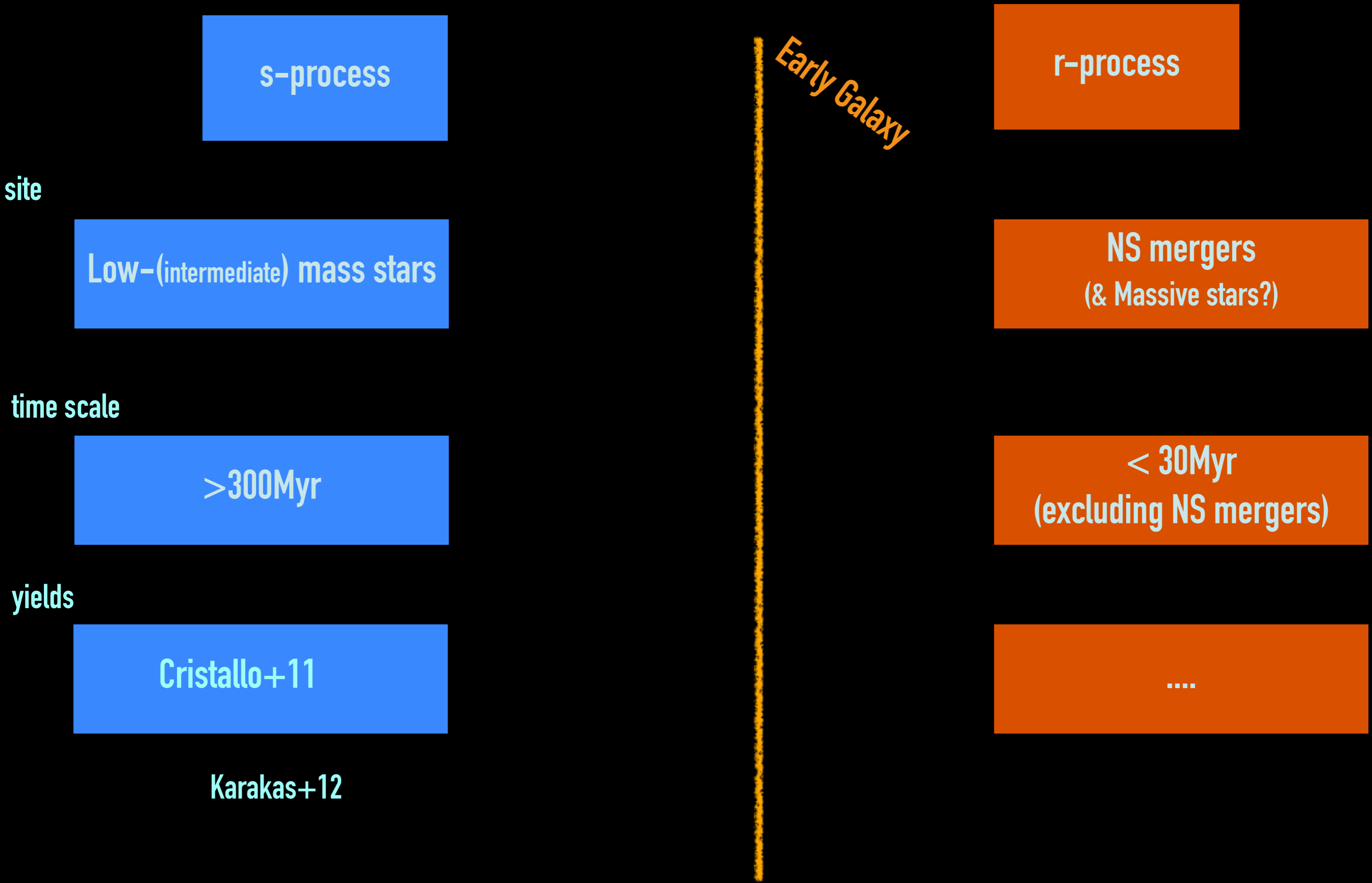
The assumed percentage of events in massive stars is higher than expected (at least at the solar metallicity), but it is reasonable to increase toward the metal poor regime
(Woosley and Heger 2006)



**What about
other neutron capture elements?**

Neutron capture elements

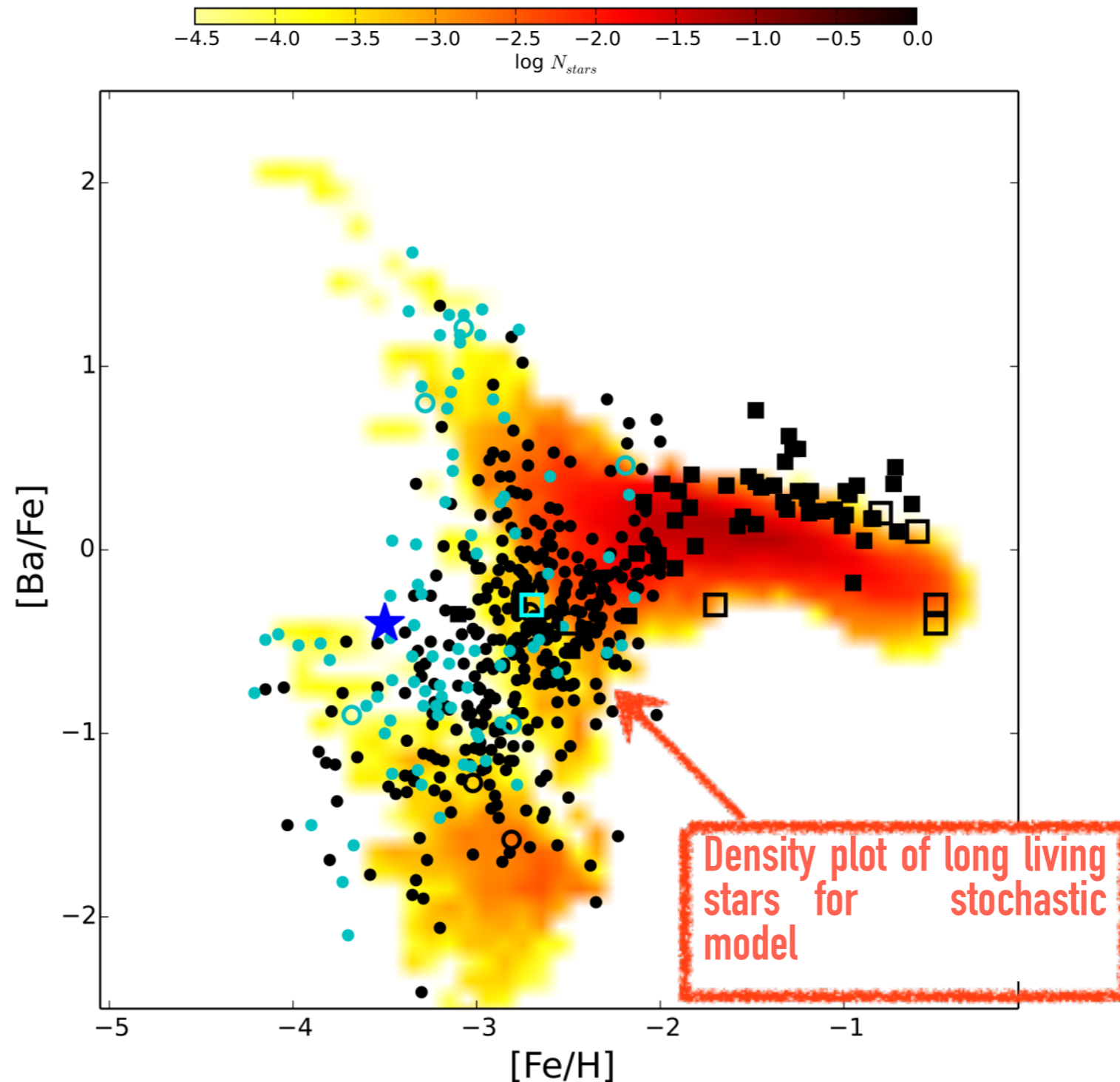
(~until 10 years ago)



Stochastic model for Ba in the Galactic halo

We run the stochastic
model (based on
Cescutti '08)
with these yields
for the Ba production:

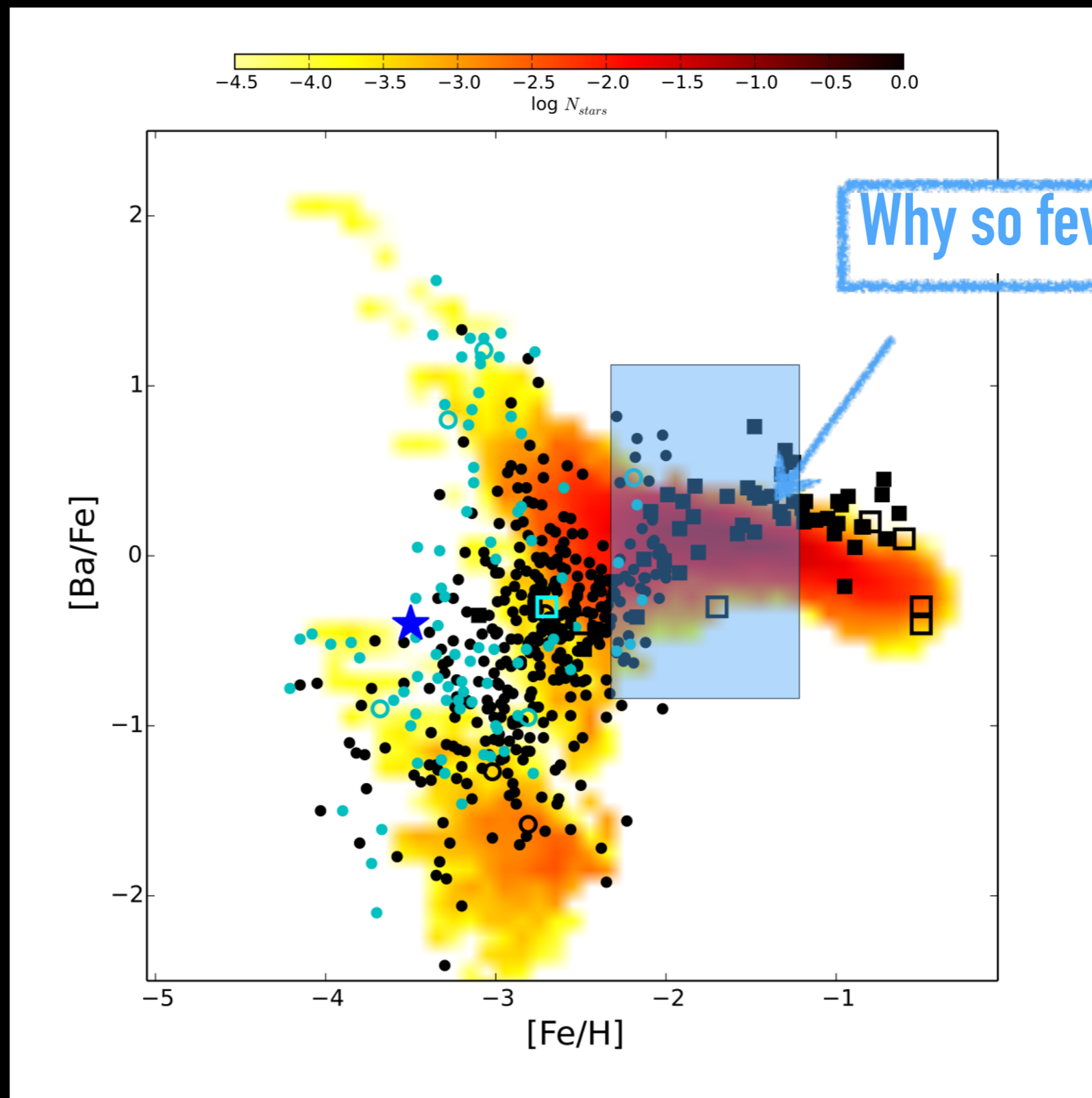
10% of all the
massive stars produce
 $8 \cdot 10^{-6} M_{\text{sun}}$ of Ba



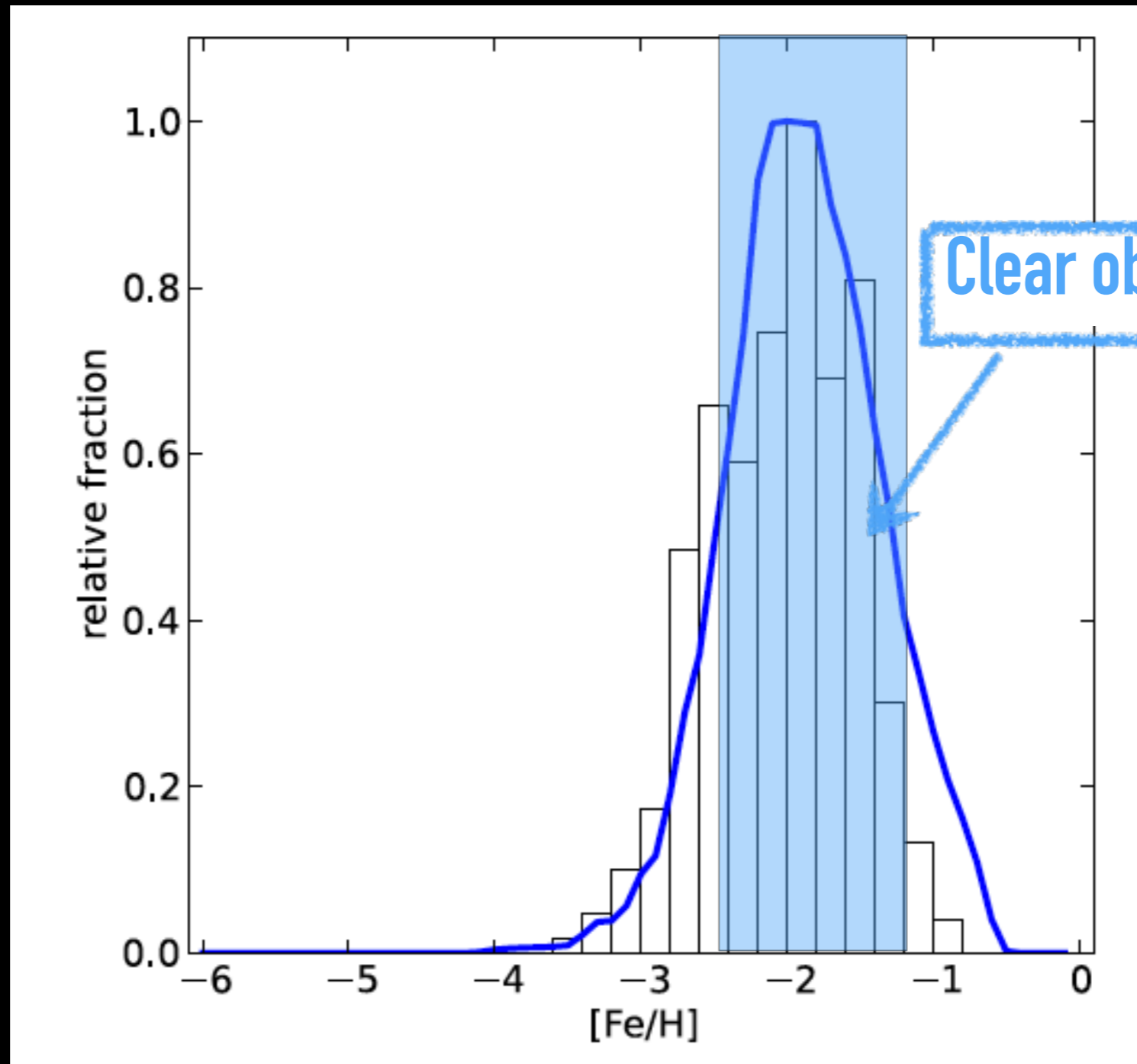
We can
reproduce the
 $[\text{Ba}/\text{Fe}]$ spread...

data from in		
Placco+14	●	●
Hansen+12	■	
Hansen+16	□	□
Cescutti+16	★	

Stochastic model for Ba in the Galactic halo



Metallicity distribution function of the Galactic halo



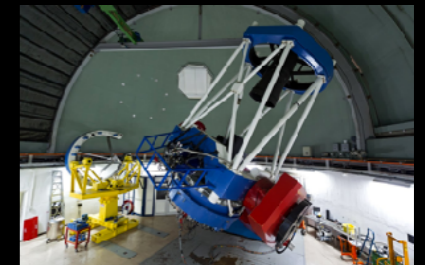
Li et al. (2010): main-sequence turnoff stars in the HESS (Hamburg ESO)

MINCE Survey

Measuring at Intermediate Metallicity
Neutron Capture Elements

High resolution $>50'000$
high $S/N >70$
on going

9 facilities used



PI Cescutti

P. Bonifacio, C. Hansen, M. Franchini, L. Monaco,
E. Spitoni, A. Kučinskas, E. Kolomicas, L. Lombardo,
A. Mucciarelli, P. Di Marcantonio, V. S. Cristallo, P.
Molaro, F. Matteucci, D. Carollo, M. Valentini, J. Klevas,
M. F. Andersen, M. Hanke, A.M. Matas Pinto, E. Caffau,
Dobrovolskas, P. François, M. Spite, F. Spite, L. Sbrodone,

...





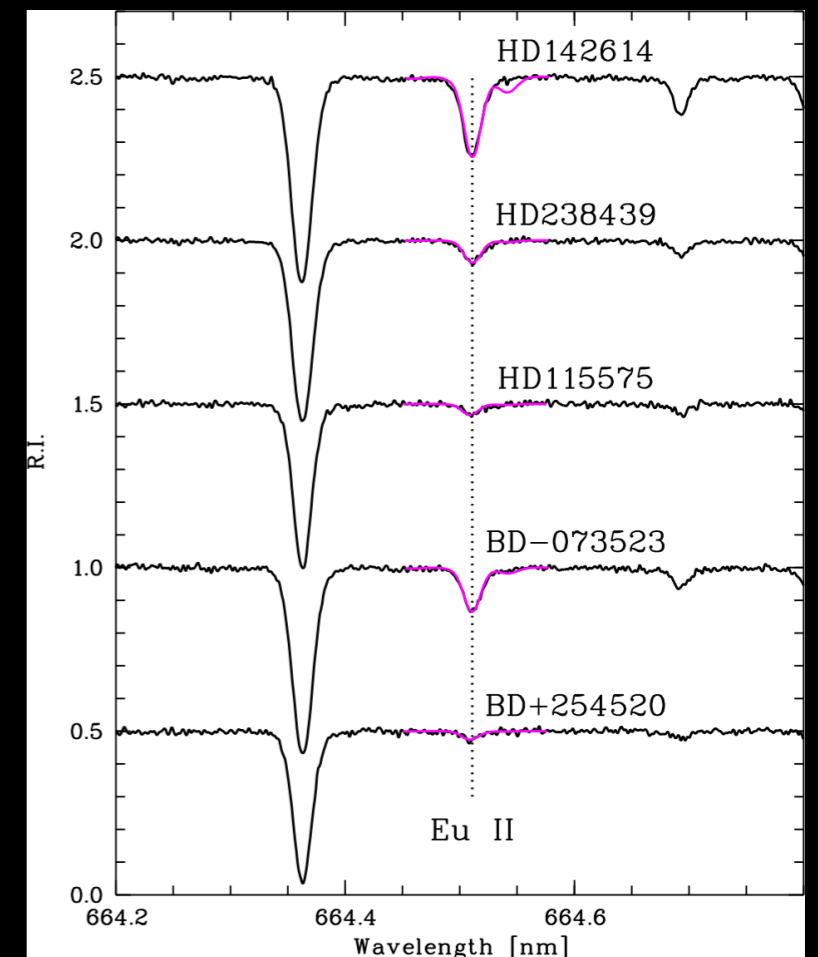
MINCE Survey

up to now ~400 stellar spectra

20 proposal accepted ~ 50n (excluding Moletai)

**First paper (Cescutti+22) is out
data are available at**

<http://archives.ia2.inaf.it/mince/>



MINCE

Name resolver: Object name

RA Dec Radius (arcmin)

Object

Instrument

T_{eff} Min Max

$\log g$ Min Max

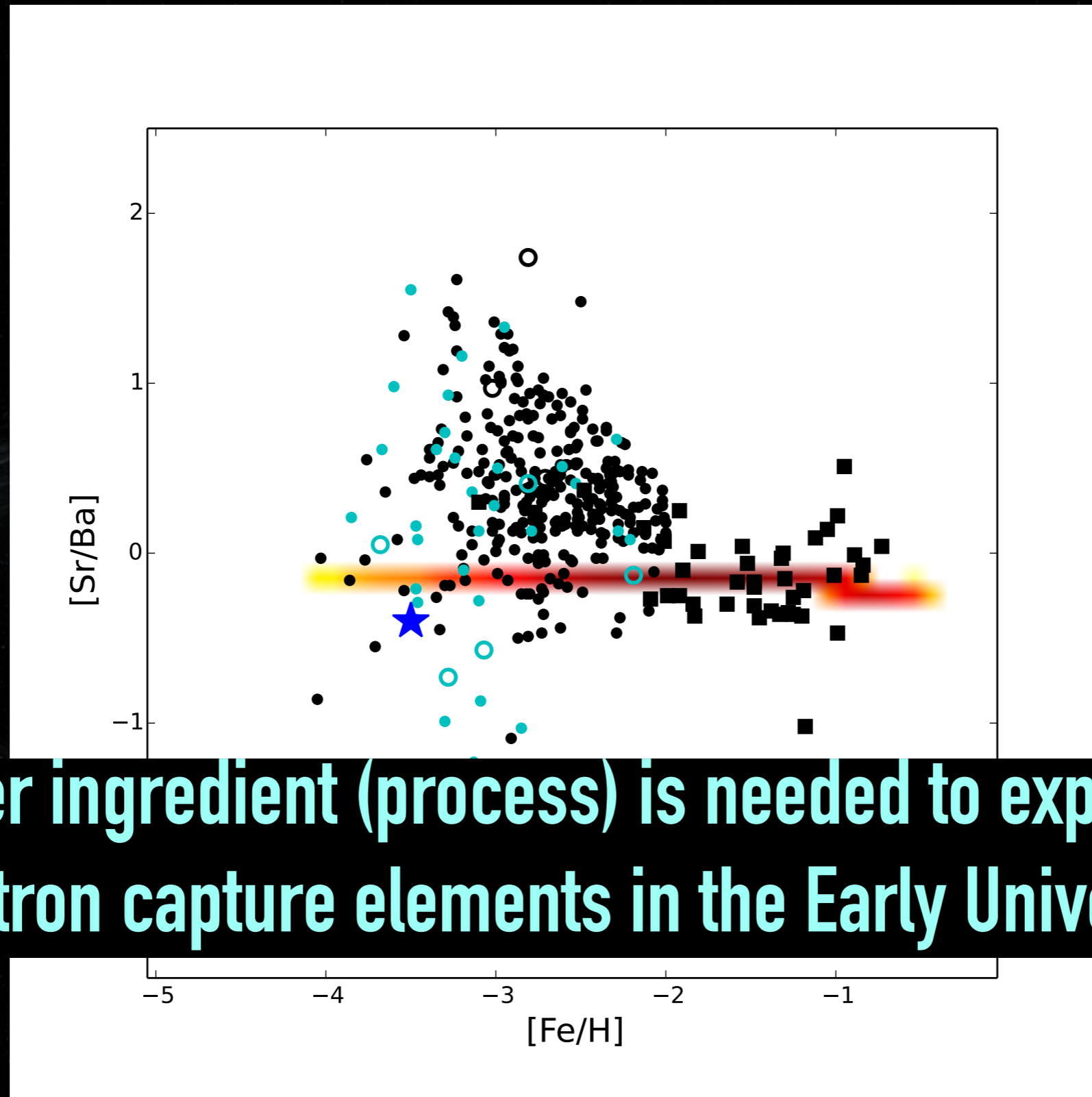
[Fe/H] Min Max

Chemical Abundance Min Max



Puzzling result for the “heavy to light” n.c. element ratio

For Sr yields:
scaled Ba yields
according to the
r-process signature of the
solar system
(Sneden et al '08)



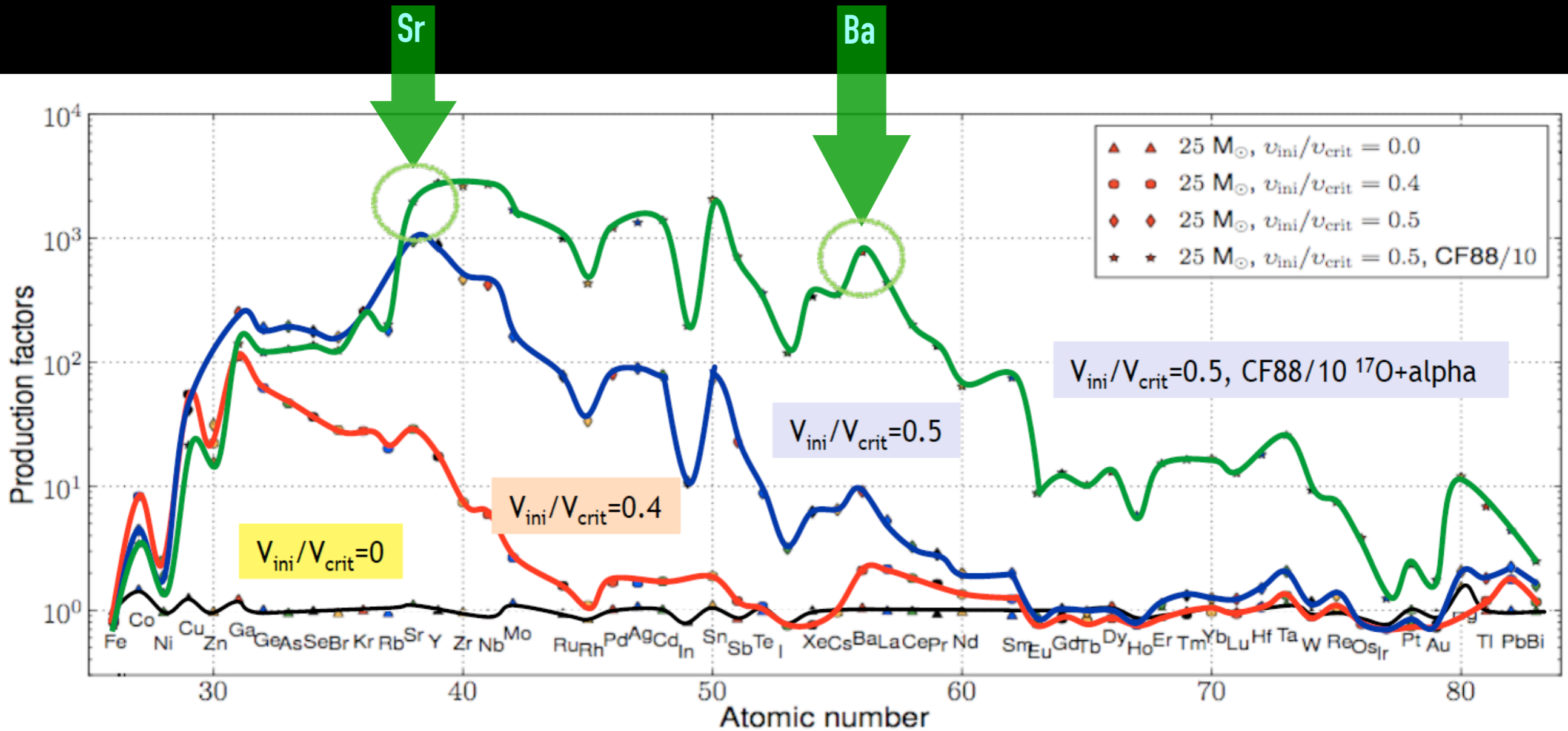
It is impossible to
reproduce the data,
assuming only the
r-process component,
enriching at low
metallicity.
(see Sneden+ 03,
François+07,
Montes+07)

Another ingredient (process) is needed to explain the neutron capture elements in the Early Universe!

Low metallicity and rotating massive stars

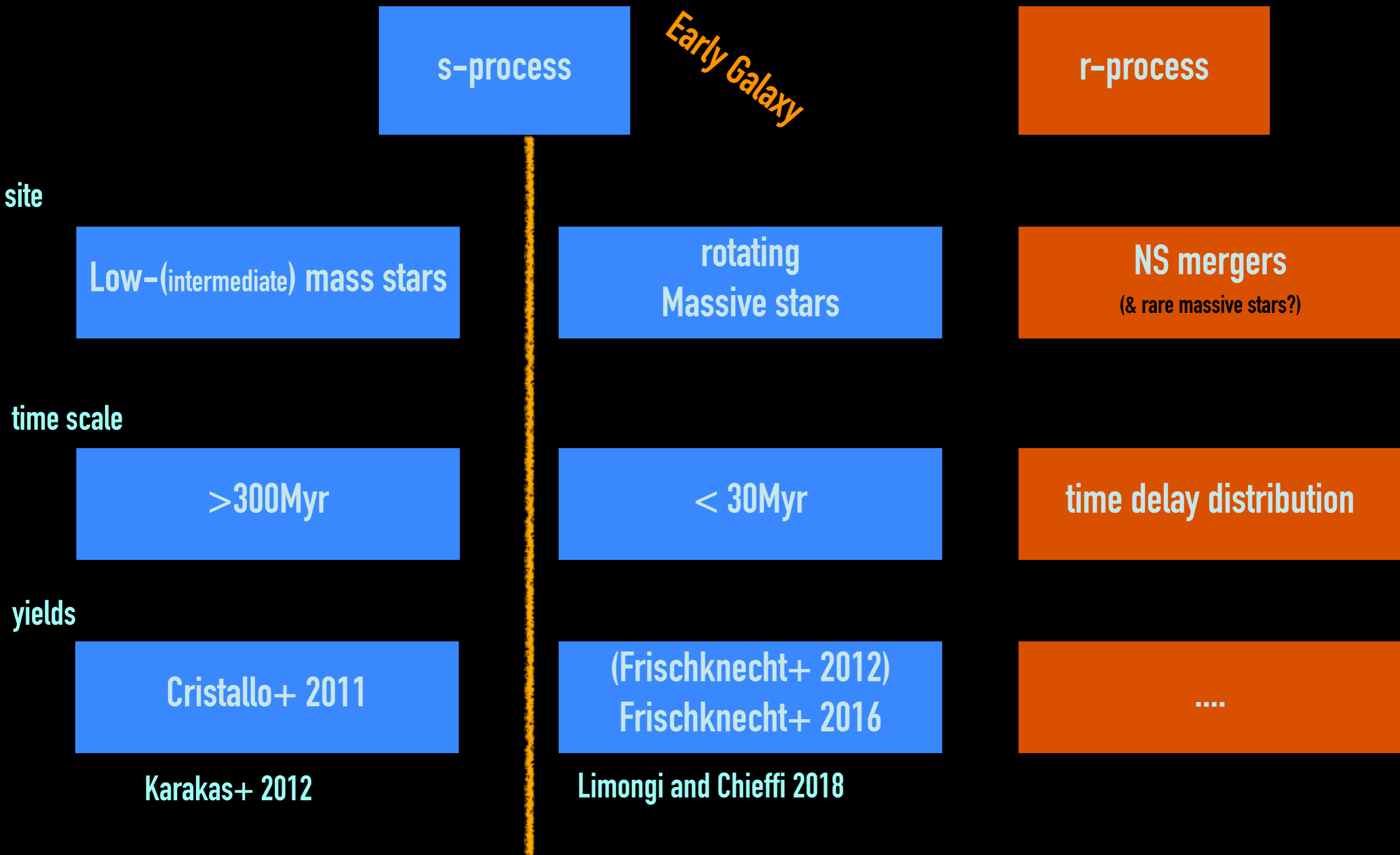
Frischknecht et al. 2016 (See also Limongi and Chieffi 2018)

Rotating massive stars can contribute to s-process elements!



Can they explain the puzzles for Sr and Ba in halo?

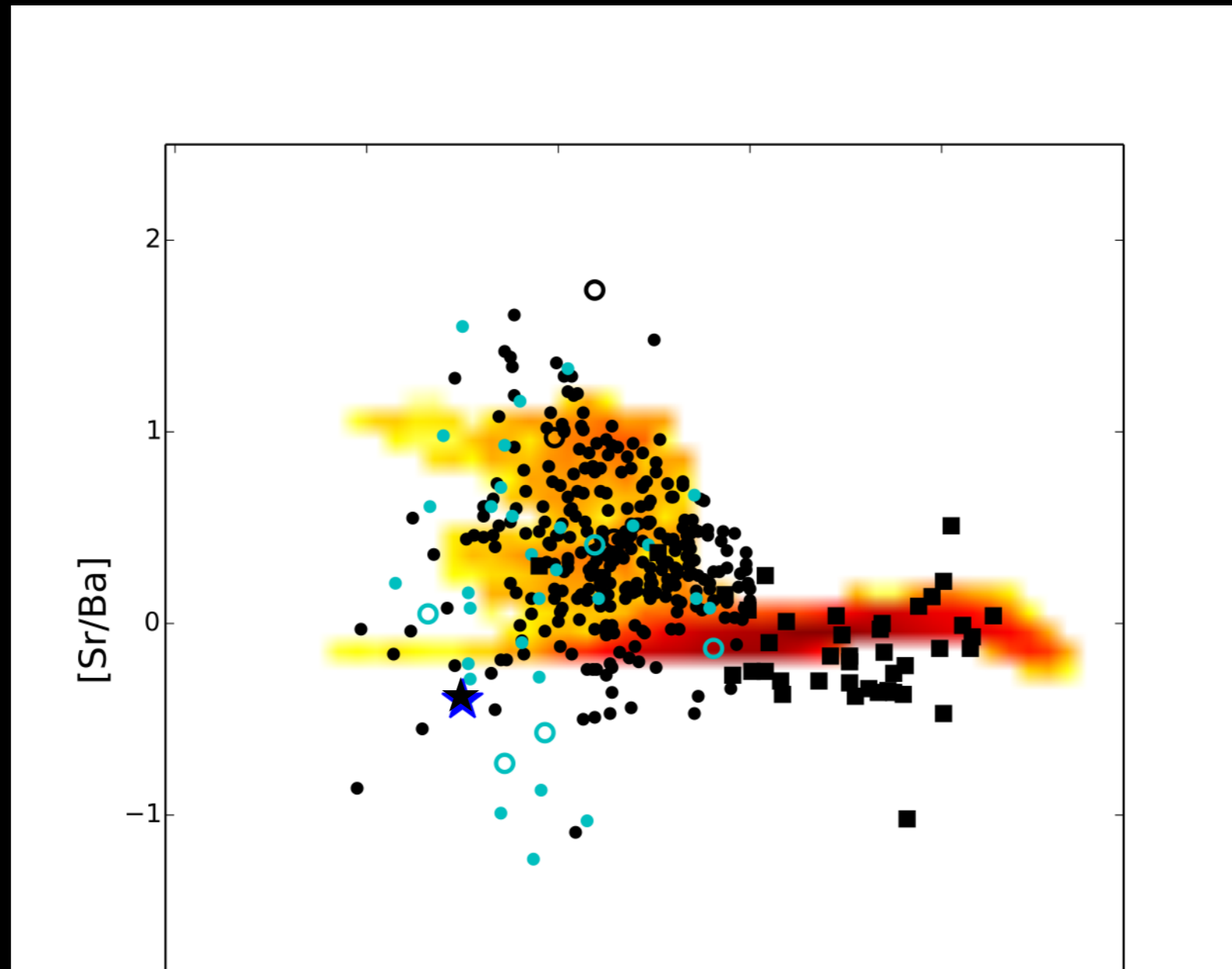
Neutron capture elements



s-process from rotating massive stars

+ an r-process site (the 2 productions are not coupled!)

Cescutti et al. (2013)
Cescutti & Chiappini (2014)

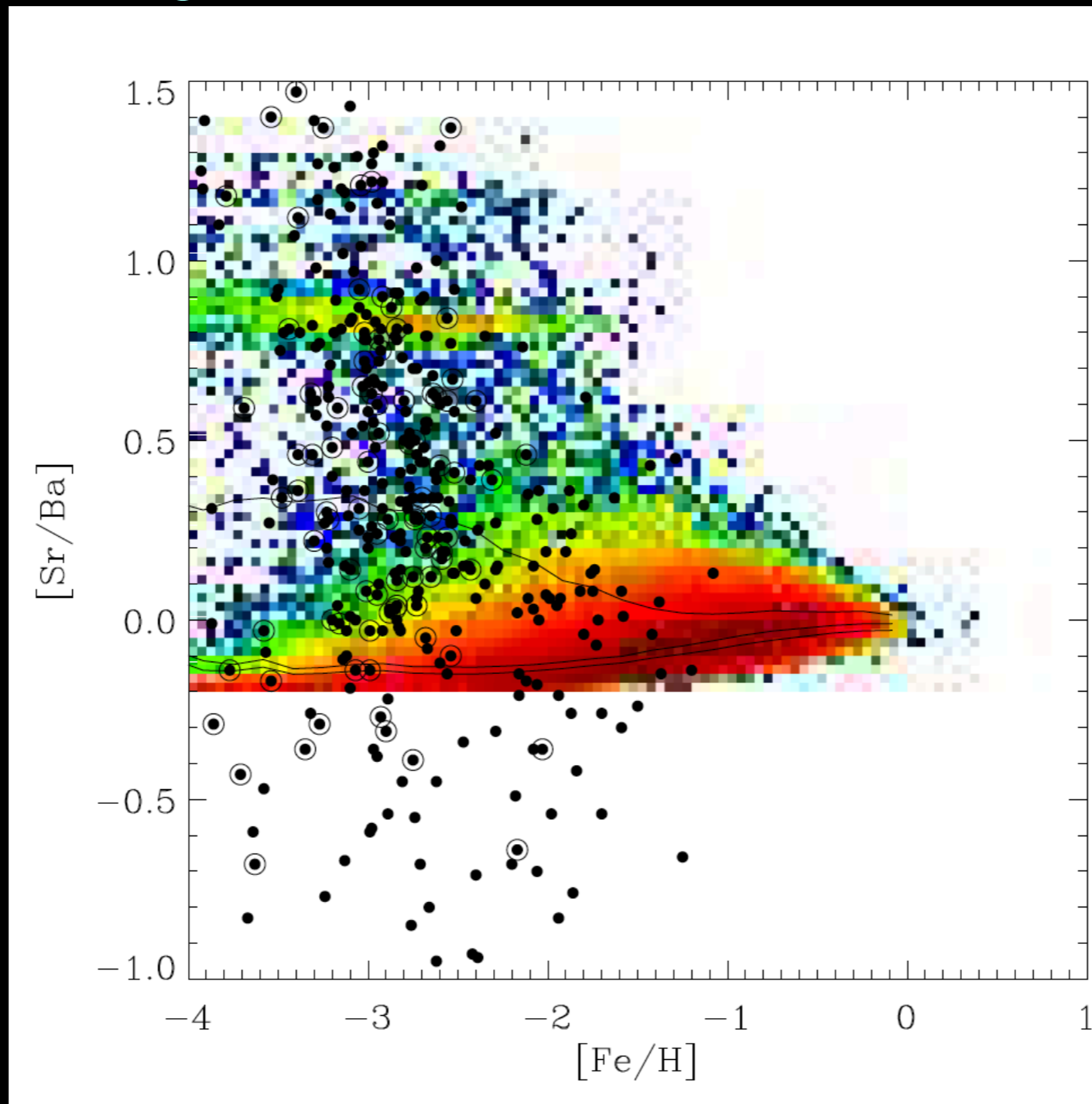


A s-process (from rotating massive stars)
and an r-process (from rare events)

can reproduce the neutron capture elements in the Early Universe



Different model cosmological simulation of the Galaxy

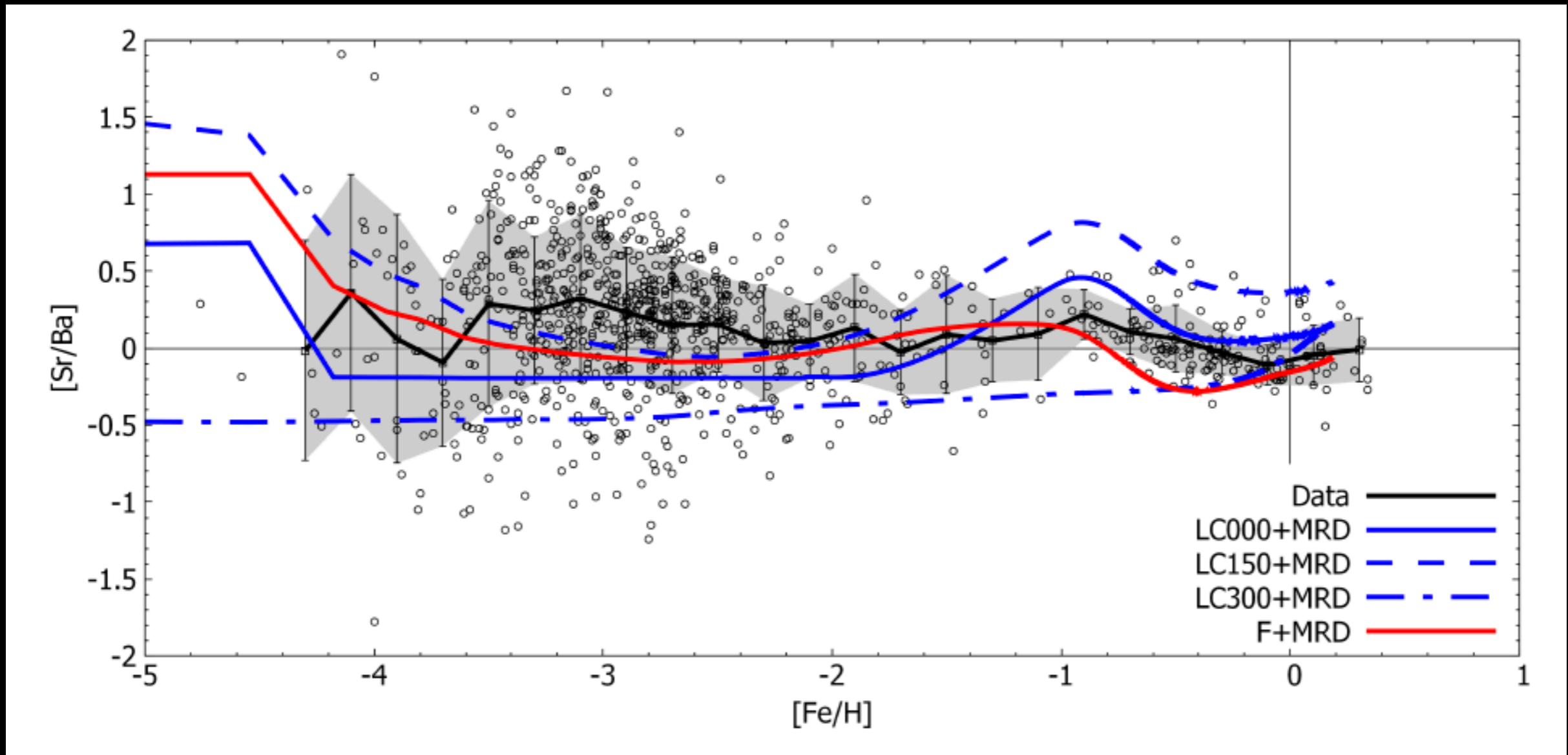


Scannapieco, Cescutti & Chiappini (2022)

Confirmed in Rizzuti et al. (2019)

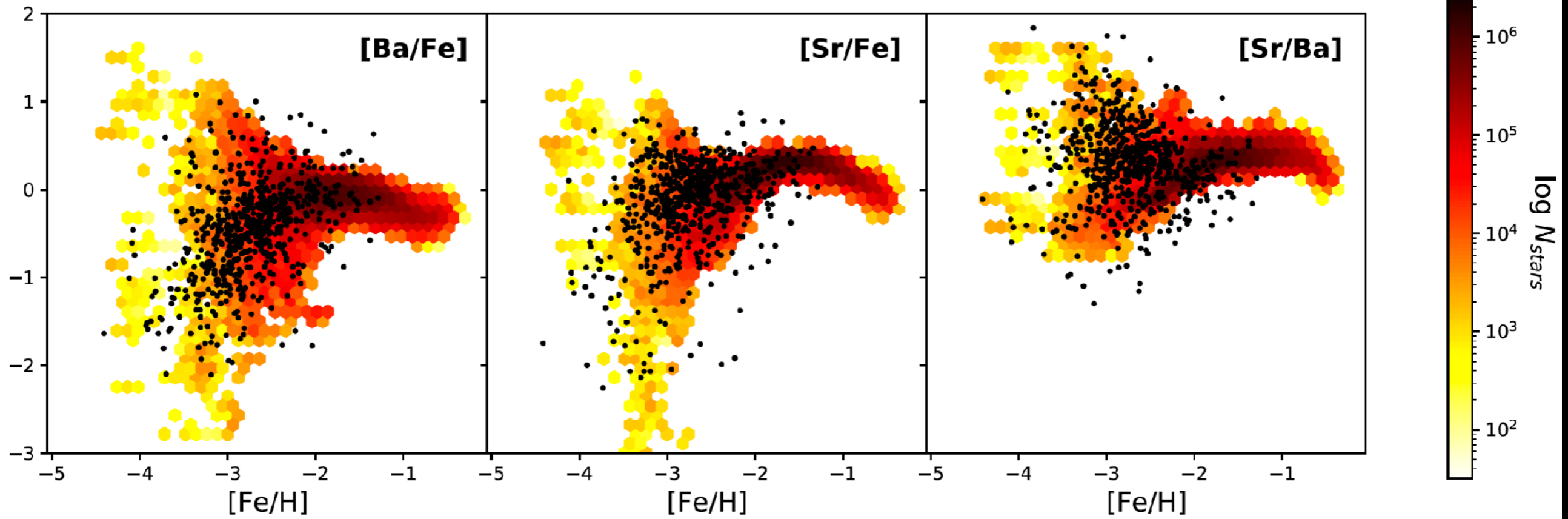
adopting Limongi&Chieffi18

see also Prantzos et al. 2018!



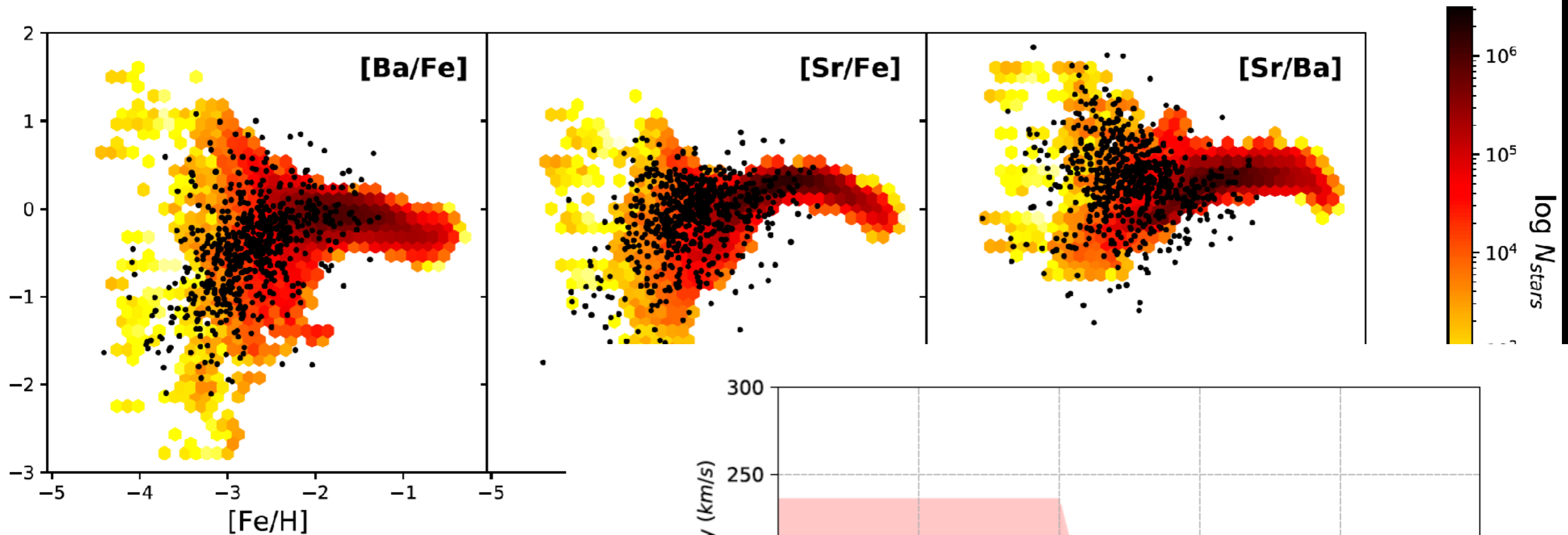
Rizzuti et al. (2021)

adopting Limongi&Chieffi18

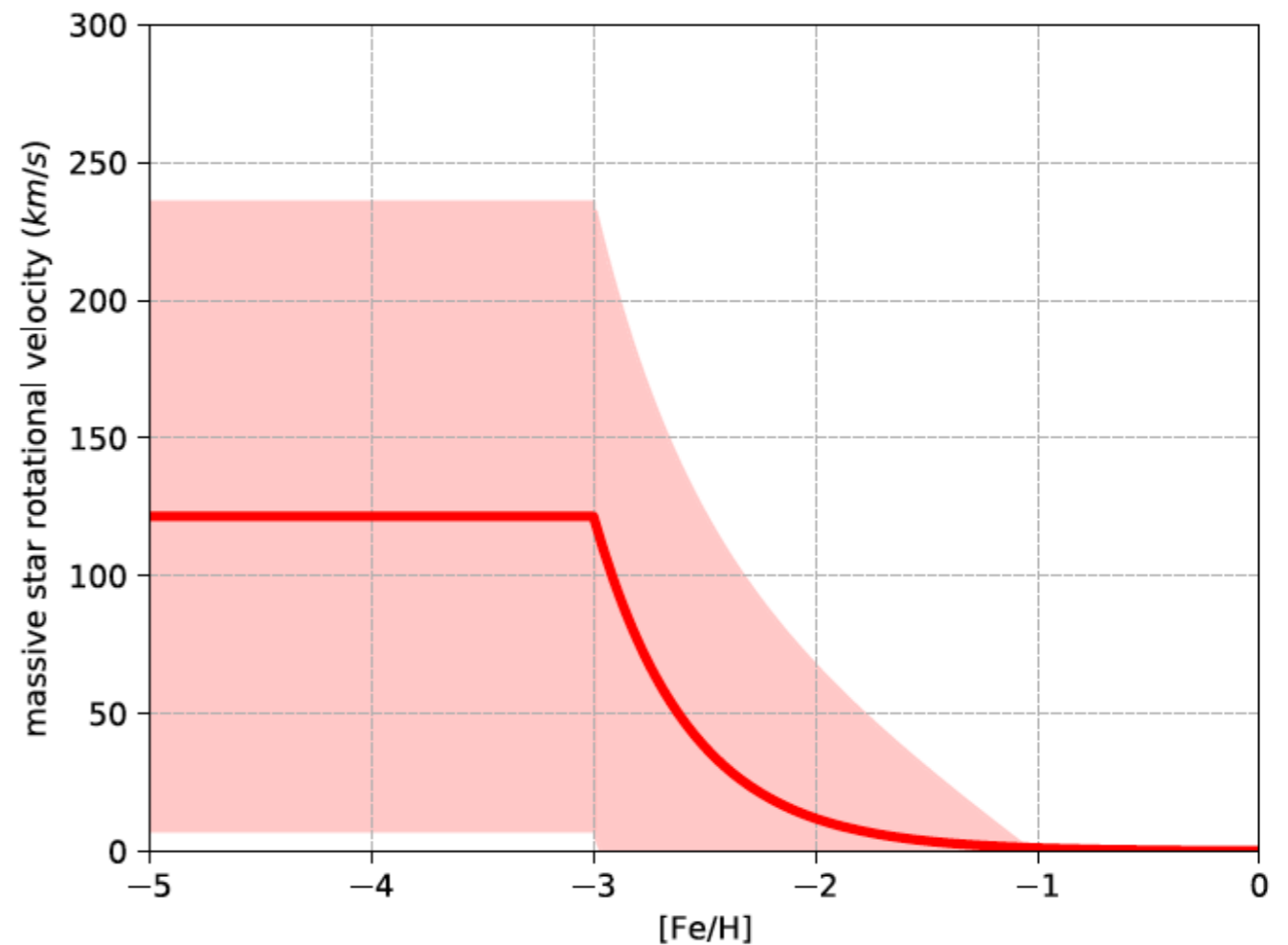


Data+stochastic modelling

—> constrain stellar velocity distribution at $[\text{Fe}/\text{H}] \sim -3$!!



Rizzuti et al. (2021)
adopting Limongi&Chieffi18



Conclusions

Chemical evolution models have shown that neutron capture elements in the Galactic halo have been produced by (at least) 2 different processes:

A (main) r-process, rare and able to produce all the elements up to Th with a pattern as the one observed in r-process rich stars.

NSM are certainly the best candidate to play this role if they have a very short time scale, or if their frequency was higher at extremely low metallicity. Other sources like **MRD SNe or Collapsar** can also play this role.

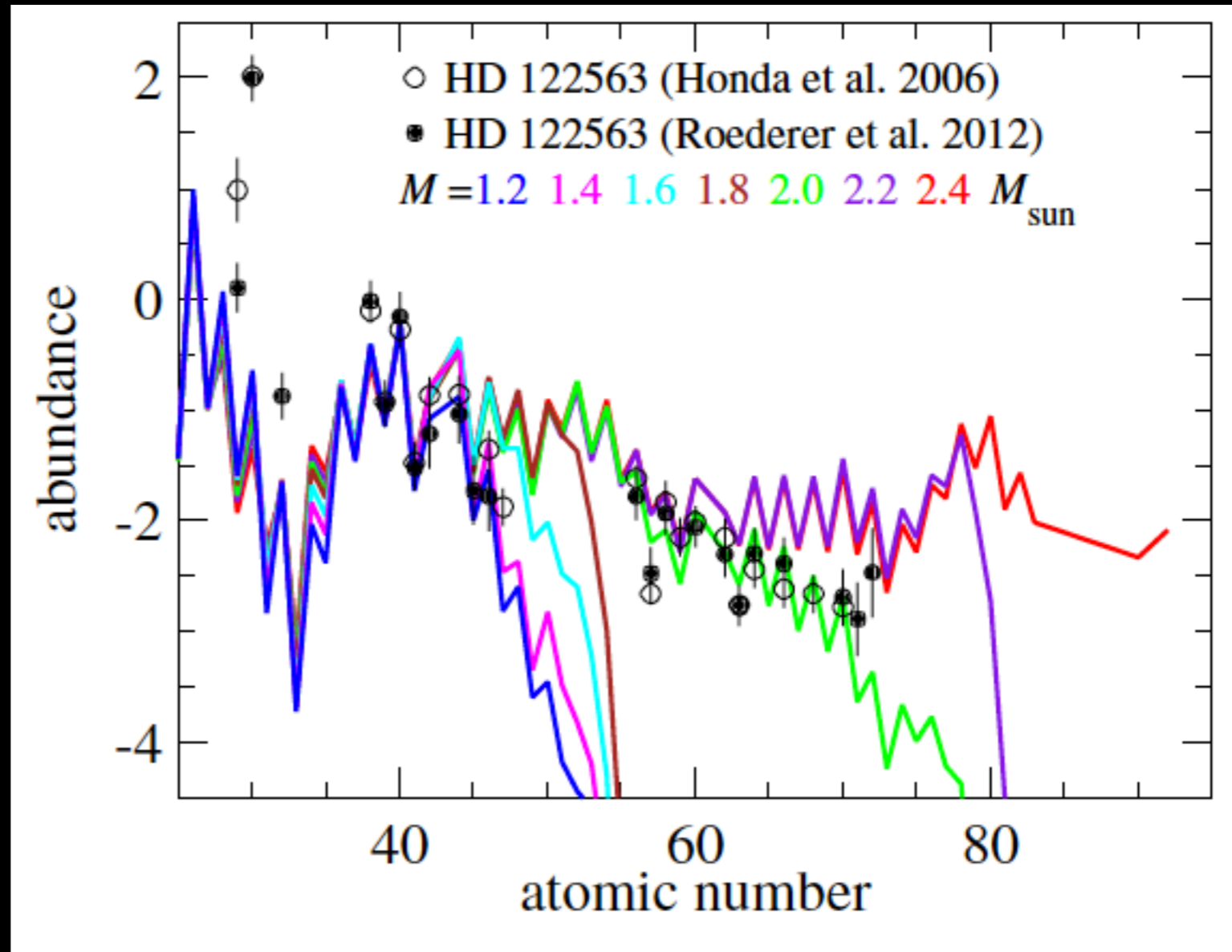
Another process more frequent and that can produce both Sr and Ba (and $[Sr/Ba] > 0$) with a production that is compatible with the **s-process by rotating massive stars**. We can use this to constrain the velocity distribution of the massive stars.

CAVEAT

The only possible answer?

see also Hansen+14

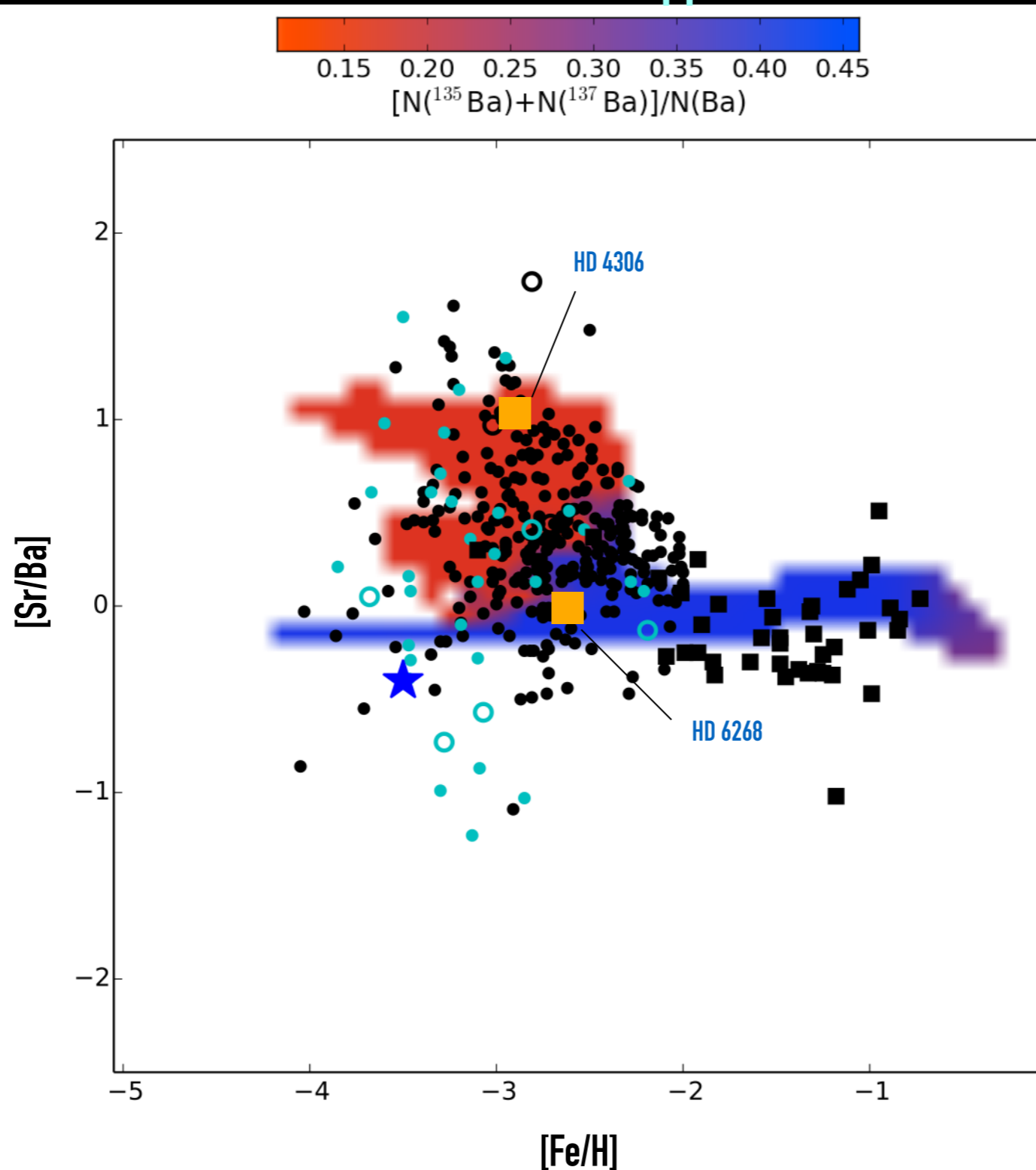
Another possible solution is the production of
+ a weak r-process
(not able to produce all the elements up to thorium)
+ a main r-process



Wanajo 2013, r-process production in proto neutron star wind

Isotopic ratio for Ba

Cescutti and Chiappini (2014)



2 stars
with a $R \sim 100'000$ &
 $S/N \sim 500$
with UVES at VLT



“normal” value
high $R \sim 30'000$
high $S/N \sim 80-100$

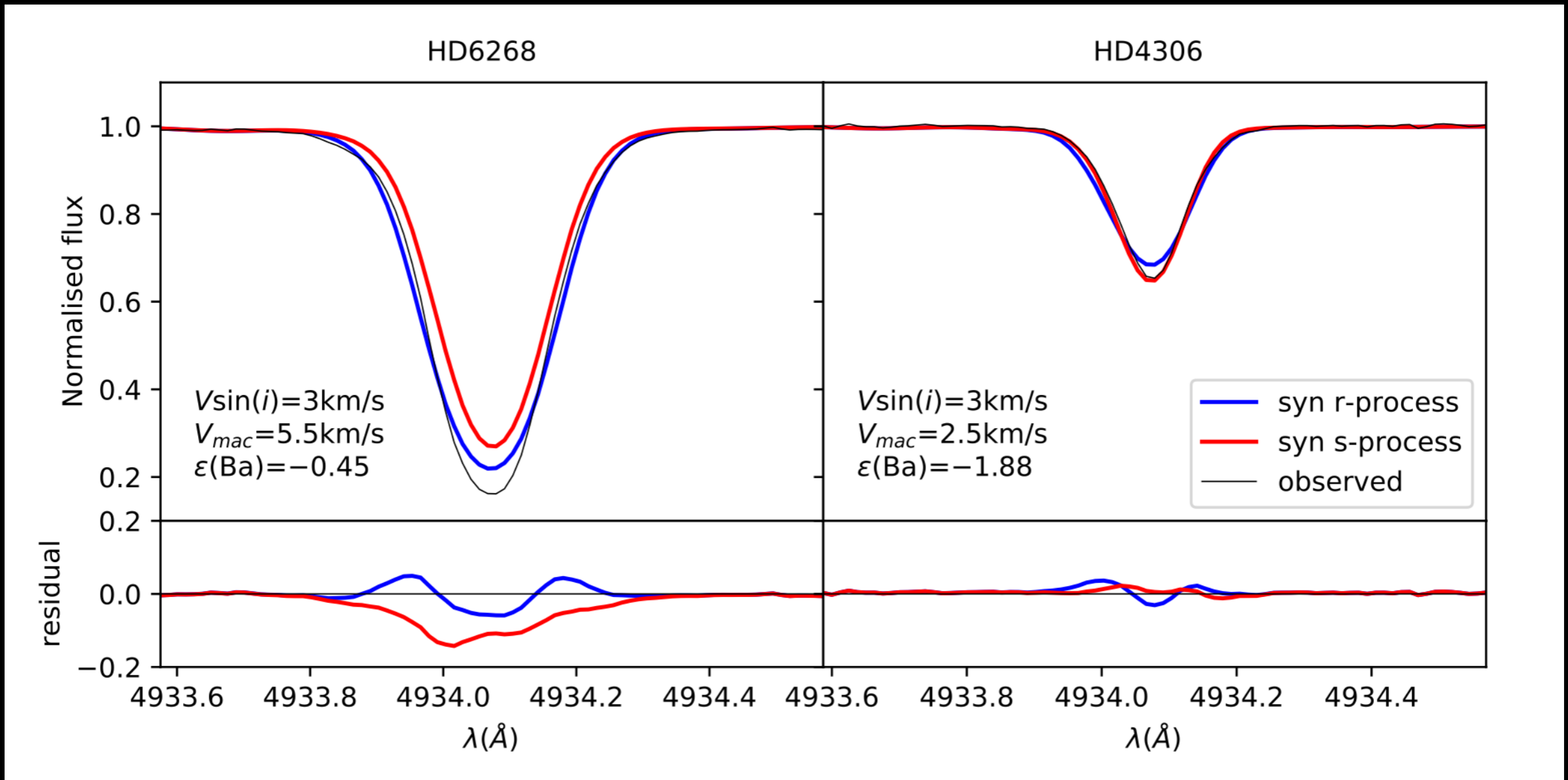
The rotating massive stars scenario naturally predicts different Ba isotopic ratios in halo stars.

This prediction can be used to test our scenario.

Challenging to check these predictions

See results on HD 140283 from Magain (1995) to Gallagher+(2015)

Synthesis of barium lines with hyperfine splitting effects



Cescutti +21

Conclusions

Our inspection of the barium lines has found that the profiles of the lines (suffering hfs) are different in the 2 stars.

The most likely explanation is that:

HD 6268 has been polluted by an r-process source
&
HD 4306 by and s-process source,

validating Cescutti&Chiappini14 results

HR and high S/N still provide fundamental information to Galactic Archaeology, fully complementary to the amazing results coming from present and future Multiobjects spectrographs.