

# Métodos e discussões sobre a estimativa das abundâncias dos elementos químicos em Astrofísica

Vladimir Jearim P. Suárez

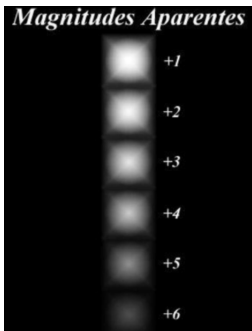
Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas CBPF

XIV Ciclo de Atividades Formativas de Verão - 03/02/2016

- Alguns referentes
- Elementos da análise espectral de abundâncias químicas em Astrofísica
- Discussões sobre abundâncias químicas em Astrofísica
- Algumas discussões abertas em Astrofísica
- Breviário muito breve

- Classificação estelar baseada nas cores (Hiparco) se traduz em forma quantitativa (Pogson, sec. XIX), através da relação entre o conceitos de magnitude e fluxo radiativo  
( $m - n = -2.5 \log \frac{F_m}{F_n}$ )
- Conceitos como o Índice de cor entre duas magnitudes A e B do mesmo objeto ( $B - A$ ) e Magnitude absoluta  $M$  permitem fazer estudos comparativos das estrelas
- Sistemas fotométricos: Filtragem das bandas visíveis da luz estelar (Sistema Johnson é o mais “padrão”)

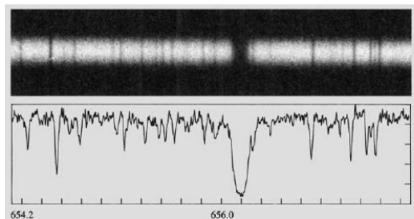
# Alguns referentes II



Magnitude	Band width [nm]	Effective wavelength [nm]
U ultraviolet	66	367
B blue	94	436
V visual	88	545
R red	138	638
I infrared	149	797

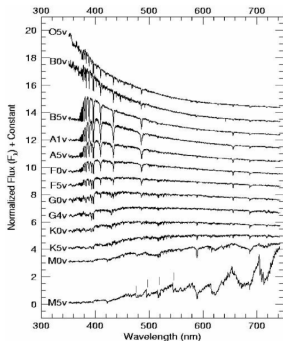
- A Astrofísica surge com o advento da análise dos espectros das estrelas à luz da Física Moderna. Começa a classificação espectral
- O modelo ideal de uma estrela é um corpo negro e da análise da radiação emitida por um corpo negro através da Óptica e da Teoria Eletromagnética surgem as primeiras correlações entre a luz observada das estrelas e suas características intrínsecas

# Alguns referentes IV



- Classificação espectral no seu início (girl power!) começava com as estrelas A, que possuem as linhas mais fortes de H.
- Oh Be A Fine Girl Kiss Me...

# Alguns referentes V

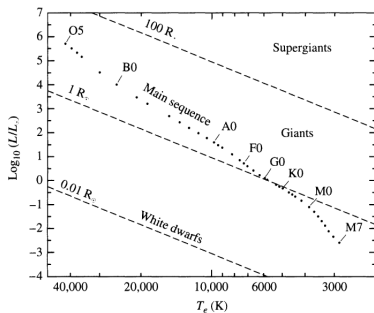
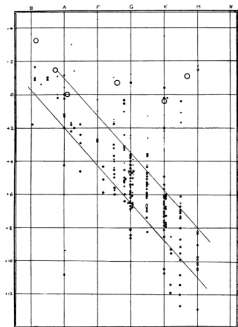


Tipo	Cor	T(K)	Linhas proeminentes de absorção	Exemplos
O	Azul	30000	He ionizado (fortes), elementos pesados ionizados (OIII, NIII, SiIV), fracas linhas de H	
B	Azulada	20000	He neutro (moderadas), elementos pesados 1 vez ionizados	Rigel (B8)
A	Branca	10000	He neutro (muito fracas), H (fortes)	Vega (A0) Sirius (A1)
F	Amarelada	7000	elementos pesados 1 vez ionizados, metais neutros (FeI, CaI), H (moderadas)	Canopus (F0)
G	Amarela	6000	elementos pesados 1 vez ionizados, metais neutros, H (relativamente fracas)	Sol (G2) Alfa Cen (G2)
K	Laranja	4000	elementos pesados 1 vez ionizados, metais neutros, H (fracas)	Aldebaran (K5) Arcturus (K2)
M	Vermelha	3000	Átomos neutros (fortes), moleculares (moderadas), H (muito fracas)	Betelgeuse (M2)

- 1913. Hertzsprung & Russell: Diagrama da classificação estelar *versus* magnitude absoluta

# Alguns referentes VI

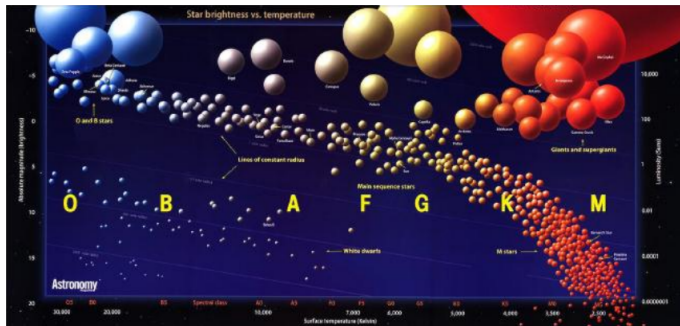
- Classe espectral  $\rightarrow$  índice de cor  $\rightarrow$  Temperatura; Magnitude  $\rightarrow$  Luminosidade





# Alguns referentes VII

- No diagrama H-R (cor-magnitude) podem ser vistas diferentes “tipos” de estrela: Fases evolutivas das estrelas



## Alguns referentes VIII

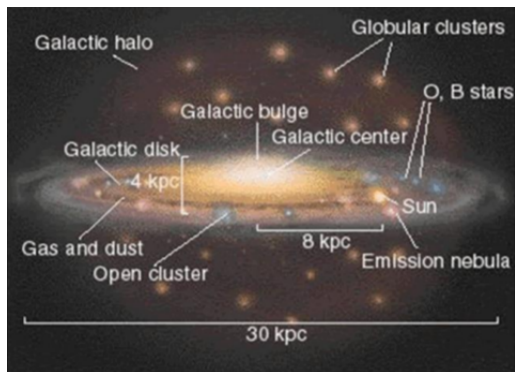
- A variável principal da evolução estelar é a massa. Estrelas massivas tem massas superiores a  $8M_{\odot}$  e podem ter até  $100-120M_{\odot}$ . Estrelas de menor massa podem ter até  $0.5M_{\odot}$ .
- Os modelos mais simplificados das estrelas (Schwarzschild, 1920s) assumem elas em equilíbrio hidrostático, homogêneas, compostas de gás ideal e com propriedades de corpo negro
- Os espectros de estrelas em diferentes fases evolutivas diferem em tipos de linhas encontradas, temperatura e até mesmo nas formas das linhas



# Alguns referentes X

- Mais estrelas massivas ou mais estrelas leves?: Estudos de distribuição de estrelas em função da massa → Função de Massa Inicial IMF
- Distribuição das estrelas na galáxia não corresponde a um padrão geométrico precisamente... Componentes da galáxia
- Propriedades do meio interestelar estão atreladas à distribuição das estrelas → Taxa de Formação Estelar SFR
- Estrelas se encontram aglomeradas ou espalhadas no campo da galáxia: Aglomerados abertos e globulares

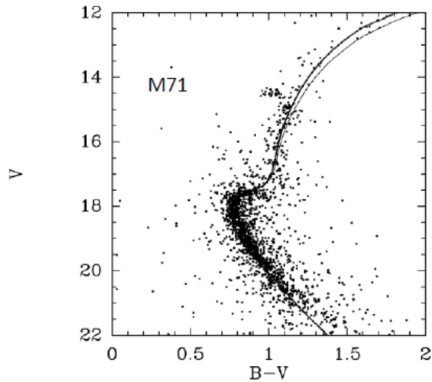
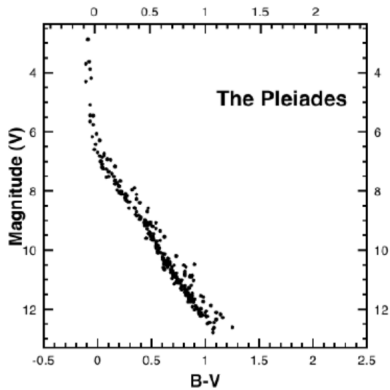
# Alguns referentes XI



## Alguns referentes XII

- Aglomerados abertos: Agrupamentos de estrelas do disco da galáxia em um meio rico em gás e poeira. Há estrelas de diferentes estágios evolutivos. Possuem um padrão de velocidade radial fácil de determinar
- Aglomerados globulares: Agrupamentos do halo, pobres em gás e poeira. A maioria das suas estrelas se encontram em uma fase evolutiva semelhante. Padrão de velocidades varia de um aglomerado para outro
- Diagramas cor-magnitude de abertos e globulares possuem marcantes diferenças. Seus espectros também...

# Alguns referentes XIII



# Elementos da análise espectral I

- Os espectros das estrelas correspondem às evidências dos processos de absorção da luz da estrela na sua fotosfera
- A análise espectral permite estimativas rigorosas da Temperatura efetiva da estrela e de parâmetros como sua gravidade superficial ( $\log g$ ), a turbulência da sua atmosfera ( $\mu$  km/s) e sua metalicidade, comparada com o conteúdo de Hidrogênio.
- A análise espectral (visível) é baseada na hipótese de que a atmosfera estelar está em equilíbrio hidrostático e não possui uma excessiva absorção, permitindo uma forma linearizada da equação de transferência radiativa



# Elementos da análise espectral II

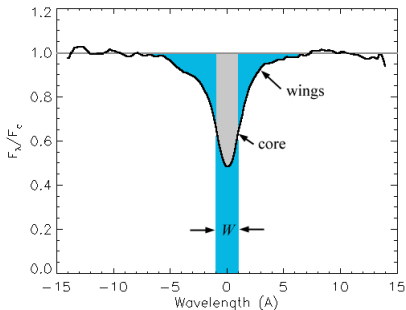
$$-\frac{1}{\kappa_{\lambda}\rho} \frac{dI_{\lambda}}{ds} = I_{\lambda} - S_{\lambda}$$

- Nos últimos anos a qualidade dos espectros observados tem melhorado significativamente. UVES, HARPS, FEROS são dispositivos terrestres capazes de resoluções superiores a 50000 e relações sinal-ruído superiores a 100
- A largura do perfil das linhas espectrais é a superposição de efeitos: Princípio de incerteza de Heisenberg + movimentos da atmosfera + ...

$$\gamma = \frac{\Delta E_i + \Delta E_f}{\hbar} = \frac{1}{T_i} + \frac{1}{T_f} \quad I_{\nu} = \frac{\gamma}{2\pi} \frac{I_0}{(\nu - \nu_0)^2 + \gamma^2/4}$$

# Elementos da análise espectral III

- Informação nos espectros: FWHM e Largura equivalente
- Largura equivalente depende da abundância da espécie química em particular



# Elementos da análise espectral IV

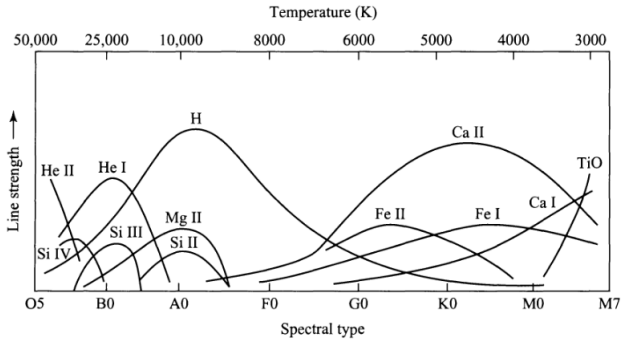
$$W_\lambda = \int \left( \frac{F_c - F_\lambda}{F_c} \right) d\lambda \quad W_\lambda \propto \int \kappa_l d\lambda \sim \int N_{rs} \alpha_l d\lambda \quad W_\lambda \propto \lambda^2 N_{rs} f_{rs}$$

- Os parâmetros  $N_{rs}$  e  $f_{rs}$  correspondem a propriedades de distribuição das partículas da espécie química e suas propriedades atômicas/moleculares
- Em uma atmosfera ideal a interação entre radiação e matéria pode ser analisada desde o ponto de vista do equilíbrio nos estados de excitação das espécies químicas (Lei de Boltzmann) e do equilíbrio nos seus estados de ionização (Lei de Saha) → Equilíbrio Termodinâmico Local ETL

- O ETL é sustentado também nas hipóteses de se ter uma fonte-corpo-negro, uma propagação da radiação de acordo com a Lei de Kirchhoff e uma distribuição de velocidades de Maxwell nas partículas

$$N_i = \frac{N_{i1}}{g_{i1}} \sum_{j=1}^{\infty} g_{ij} e^{\frac{-E_j - E_1}{kT}} \quad N(v_x) dv_x = N \left( \frac{m}{2\pi kT} \right)^{1/2} e^{\frac{-mv_x^2}{2kT}} dv_x \quad \frac{N_{i+1}}{N_i} = \left( \frac{2\pi m kT}{h^2} \right)^{3/2} \frac{e^{-I_i/kT}}{N_e} 2 \frac{U_{i+1}}{U_i}$$

# Elementos da análise espectral VI



# Elementos da análise espectral VII

- O imperativo do ETL permite construir modelos de atmosferas para diferentes valores de temperaturas, opacidades,  $\log g$  e regimes de turbulência, assim como diferentes composições químicas.
- Os modelos de Kurucz (1993) em regime 1D são ferramentas usuais na análise de abundâncias e obtenção de parâmetros atmosféricos das estrelas, principalmente frias ou de massa intermediária estáveis
- Para estrelas frias (G, K) é possível determinar o conteúdo de Ferro  $[Fe/H]$  como medida de metalicidade das estrelas.

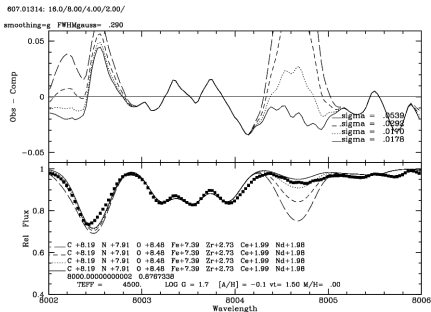
# Elementos da análise espectral VIII

- A análise de abundâncias é feita através de modelos sintéticos de laboratório (MOOG de Sneden, 1973), em função da atmosfera adotada e da lista de parâmetros atômicos/moleculares isotópicos de cada espécie química. Há diversas listas de parâmetros  $f_{rs}$  para cada espécie química

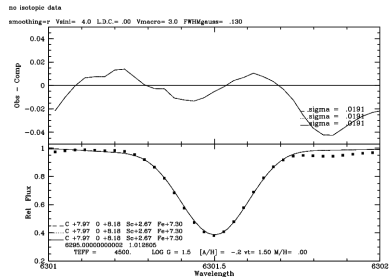
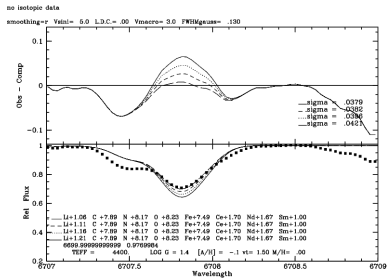
```
Abundance Results for Species Y II (input abundance = 2.24)
wavelength EP logGF EW logRW abund del avg
4883.68 1.88 -.670 107.0 -4.66 2.48 .19
5087.43 1.08 -.170 90.0 -4.75 2.21 -.08
5208.41 .99 -.570 85.0 -4.79 2.34 -.05
5289.01 1.03 -1.850 25.0 -5.33 2.24 -.05
5402.78 1.84 -.440 43.0 -5.10 2.18 -.11
average abundance = 2.29 std. deviation = .12 #lines = 5
No statistics done for E.P. trends
R.W. correlation: slope = .267 Intercept = 3.083 corr. coeff. = .621
wav. correl.: slope = -4.797E-04 Intercept = 4.771 corr. coeff. = -.798
```

```
Abundance Results for Species Zr I (input abundance = 2.68)
wavelength EP logGF EW logRW abund del avg
4772.38 .62 -.660 38.0 -5.10 2.52 .08
4815.63 .60 -.270 23.0 -5.32 2.37 -.07
5385.13 .52 -.640 20.0 -5.43 2.50 .06
6127.46 .15 -1.060 22.0 -5.44 2.45 .01
6134.57 .00 -1.280 19.0 -5.51 2.39 -.05
6143.18 .07 -1.100 23.0 -5.43 2.41 -.03
average abundance = 2.44 std. deviation = .06 #lines = 6
No statistics done for E.P. trends
No statistics done for R.W. trends
wav. correl.: slope = -3.041E-05 Intercept = 2.089 corr. coeff. = -.325
```

```
Abundance Results for Species La II (input abundance = 1.22)
wavelength EP logGF EW logRW abund del avg
5122.99 .32 -.930 45.0 -5.06 1.25 -.10
5880.63 .23 -1.830 20.0 -5.47 1.40 .05
6328.43 .17 -1.520 37.0 -5.23 1.40 .05
6398.48 .32 -1.410 34.0 -5.27 1.40 .05
6774.33 .12 -1.700 28.0 -5.38 1.30 -.05
average abundance = 1.35 std. deviation = .07 #lines = 5
No statistics done for E.P. trends
No statistics done for R.W. trends
kev. correl.: slope = 4.647E-05 Intercept = 1.067 corr. coeff. = .424
```



# Elementos da análise espectral IX

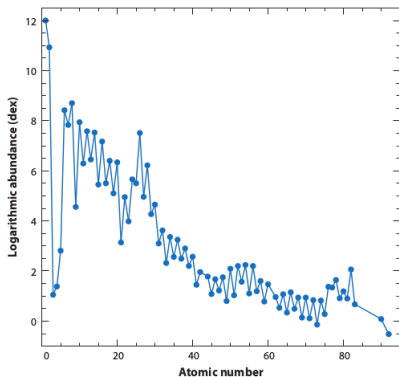




- As primeiras abundâncias químicas do Sol foram tiradas dos meteoritos condrites. Permanentemente estão sendo testadas quando há novos eventos meteoríticos relevantes
- As primeiras tentativas de medir abundâncias químicas de estrelas focaram principalmente no estudo das transições de moléculas diatômicas: TiO, CN, OH
- As primeiras medidas permitiram fazer correlações empíricas entre parâmetros como T,  $\log g$  e abundâncias como OH.
- A comparação de abundâncias meteoríticas/fostoféricas solares é importante para estabelecer as diferenças entre as abundancias iniciais do Sol e as observadas atualmente.

# Discussões sobre abundâncias químicas em Astrofísica II

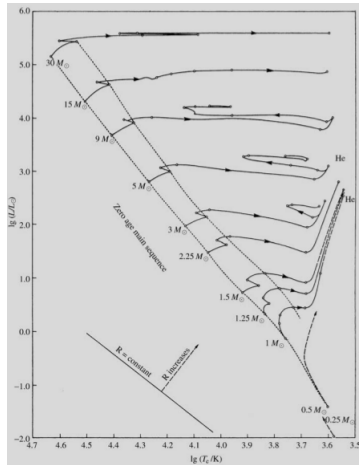
- Modelos de atmosfera solar 3D tem permitido aprimorar medida de abundâncias e compreender fenômenos da convecção solar como a granulação (Asplund et al. 2009)



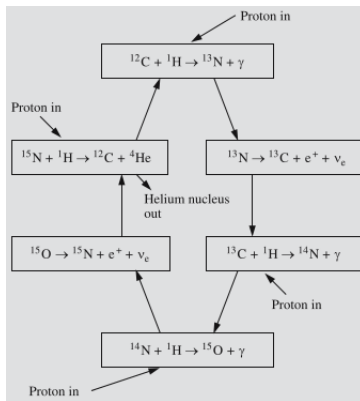
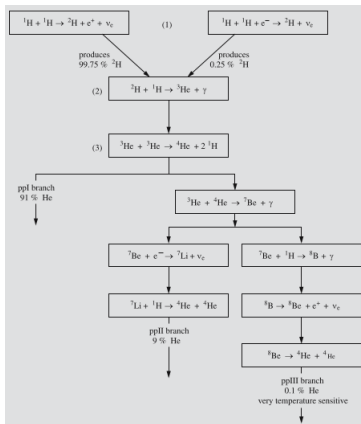
Z	Element	Photosphere	Meteorites	Z	Element	Photosphere	Meteorites
1	H	12.00	8.22 ± 0.04	44	Ru	1.75 ± 0.08	1.76 ± 0.03
2	He	[10.93 ± 0.01]	1.29	45	Rh	0.91 ± 0.10	1.06 ± 0.04
3	Li	1.05 ± 0.10	3.26 ± 0.05	46	Pd	1.57 ± 0.10	1.65 ± 0.02
4	Be	1.38 ± 0.09	1.30 ± 0.03	47	Ag	0.94 ± 0.10	1.20 ± 0.02
5	B	2.70 ± 0.20	2.79 ± 0.04	48	Cd		1.71 ± 0.03
6	C	8.43 ± 0.05	7.39 ± 0.04	49	In	0.80 ± 0.20	0.76 ± 0.03
7	N	7.83 ± 0.05	6.26 ± 0.06	50	Sn	2.04 ± 0.10	2.07 ± 0.06
8	O	8.69 ± 0.05	8.40 ± 0.04	51	Sb		1.01 ± 0.06
9	F	4.56 ± 0.30	4.42 ± 0.06	52	Te		2.18 ± 0.03
10	Ne	[7.93 ± 0.10]	-1.12	53	I		1.55 ± 0.08
11	Na	6.24 ± 0.04	6.27 ± 0.02	54	Xe	[2.24 ± 0.06]	-1.95
12	Mg	7.60 ± 0.04	7.53 ± 0.01	55	Cs		1.08 ± 0.02
13	Al	6.45 ± 0.03	6.43 ± 0.01	56	Ba	2.18 ± 0.09	2.18 ± 0.03
14	Si	7.51 ± 0.03	7.51 ± 0.01	57	La	1.10 ± 0.04	1.17 ± 0.02
15	P	5.41 ± 0.03	5.43 ± 0.04	58	Ce	1.58 ± 0.04	1.58 ± 0.02
16	S	7.12 ± 0.03	7.15 ± 0.02	59	Pr	0.72 ± 0.04	0.76 ± 0.03
17	Cl	5.50 ± 0.30	5.23 ± 0.06	60	Nd	1.42 ± 0.04	1.45 ± 0.02
18	Ar	[6.40 ± 0.13]	-0.50	62	Sm	0.96 ± 0.04	0.94 ± 0.02
19	K	5.03 ± 0.09	5.08 ± 0.02	63	Eu	0.52 ± 0.04	0.51 ± 0.02
20	Ca	6.34 ± 0.04	6.29 ± 0.02	64	Gd	1.07 ± 0.04	1.05 ± 0.02
21	Sc	3.15 ± 0.04	3.05 ± 0.02	65	Tb	0.30 ± 0.10	0.32 ± 0.03
22	Ti	4.95 ± 0.05	4.91 ± 0.03	66	Dy	1.10 ± 0.04	1.13 ± 0.02
23	V	3.93 ± 0.08	3.96 ± 0.02	67	Ho	0.48 ± 0.11	0.47 ± 0.03
24	Cr	5.64 ± 0.04	5.64 ± 0.01	68	Er	0.92 ± 0.05	0.92 ± 0.02
25	Mn	5.43 ± 0.04	5.48 ± 0.01	69	Tm	0.10 ± 0.04	0.12 ± 0.03
26	Fe	7.50 ± 0.04	7.45 ± 0.01	70	Yb	0.84 ± 0.11	0.92 ± 0.02

- O estudo dos processos de nucleossíntese no interior das estrelas foi consolidado no famoso paper  $B^2FH$  do *Reviews of Modern Physics* de 1957, em que os autores apresentam a articulação entre a teoria da evolução estelar e a análise dos processos nucleares envolvidos na produção de energia das estrelas, que leva consigo as mudanças das suas abundâncias químicas
- A evolução estelar não é um processo uniforme nem de gases ideais homogêneos. Na evolução estelar variam os modos de transferência energética e o peso molecular do gás
- Os produtos da nucleossíntese dependerão da massa da estrela e da eventual perda de massa através de ventos

# Discussões sobre abundâncias químicas em Astrofísica IV



# Discussões sobre abundâncias químicas em Astrofísica V



- Além da nucleossíntese estelar, determinada pela possibilidade da estrela queimar um núcleo pesado na sua etapa evoluida, existem as nucleossínteses explosivas que dependem do tipo de processo de expansão sofrido pela estrela no seu estágio final.
- Em estrelas de baixa massa estes processos podem conduzir à geração de uma *nebulosa planetária* e uma remanescente de anã branca e nas estrelas massivas pode conduzir à explosão de SNII com uma remanescente que pode ser uma estrela de nêutrons ou um buraco negro

- A disponibilidade de  $^{13}\text{C}$  nuclear nas estrelas de massa inferior a  $8M_{\odot}$  determina que tenham uma grande liberação de nêutrons na sua explosão e reações de captura lenta destes nêutrons  $\rightarrow$  elementos de *processo-s*
- Nas estrelas massivas o núcleo chega a ter uma composição de Ferro e Silício e há uma grande densidade de nêutrons livres  $\rightarrow$  elementos de *processo-r*

# Discussões sobre abundâncias químicas em Astrofísica VIII

## DE ONDE OS ELEMENTOS VÊM?

H B																	He B		
Li C	Be C													B C	C S L	N S L	O S L	F L	Ne S L
Na L	Mg L													Al S L	Si S L	P L	S S L	Cl L	Ar L
K L	Ca L	Sc L	Ti L S L	V L S L	Cr L S L	Mn L S L	Fe L S S	Co L S S	Ni L S S	Cu L	Zn L	Ga L S	Ge L S	As L S	Se L S	Br L S	Kr L S		
Rb S	Sr L	Y L	Zr L S L	Nb L S L	Mo L S L	Tc L S L	Ru L S S	Rh L S S	Pd L S S	Ag L S L	Cd L S L	In L S L	Sn L S L	Sb L S L	Te L S S	I L S S	Xe L S		
Cs S	Ba L	Hf L S L	Ta L S L	W L S L	Re L S S	Os L S S	Ir L S S	Pt L S S	Au L S S	Hg L S L	Tl L S L	Pb L S S	Bi L S S	Po L S S	At L S S	Rn L S			
Fr S	Ra S																		
		La L	Ce L	Pr L S L	Nd L S L	Pm L S L	Sm L S S	Eu L S S	Gd L S S	Tb L S S	Dy L S S	Ho L S S	Er L S S	Tm L S L	Yb L S L	Lu L S			
		Ac L	Th L	Pa L	U L	Np L	Pu L	Am L M	Cm L M	Bk L M	Cf L M	Es L M	Fm L M	Md L M	No L M	Lr L M			

**BIG BANG**

**RAIOS COSMICOS**

**ESTRELAS MASSIVAS**

**PEQUENAS ESTRELAS**

**SUPERNOVA**

**ARTIFICIAL OU SINTÉTICO**

Beyond Our Sight



## Planets around evolved intermediate-mass stars

### I. Two substellar companions in the open clusters NGC 2423 and NGC 4349<sup>\*,\*\*</sup>

C. Lovis and M. Mayor

Geneva Observatory, University of Geneva, 51 Ch. des Maillettes, 1290 Sauverny, Switzerland  
e-mail: christophe.loviss@obs.unige.ch

Received 28 February 2007 / Accepted 21 June 2007

#### GALACTIC CHEMICAL EVOLUTION OF HEAVY ELEMENTS: FROM BARIUM TO EUROPIUM

CLAUDIA TRAVAGLIO,<sup>1</sup> DANIELE GALLI,<sup>2</sup> ROBERTO GALLINO,<sup>3</sup> MAURIZIO BUSO,<sup>4</sup>  
FEDERICO FERRINI,<sup>5</sup> AND OSCAR STRANIERO<sup>6</sup>

*Received 1998 September 28; accepted 1999 April 2*

#### ABSTRACT

We follow the chemical evolution of the Galaxy for elements from Ba to Eu, using an evolutionary model suitable for reproducing a large set of Galactic (local and nonlocal) and extragalactic constraints. Input stellar yields for neutron-rich nuclei have been separated into their *s*-process and *r*-process components. The production of *s*-process elements in thermally pulsing asymptotic giant branch stars of low mass proceeds from the combined operation of two neutron sources: the dominant reaction  $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ , which releases neutrons in radiative conditions during the interpulse phase, and the reaction  $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$ , marginally activated during thermal instabilities. The resulting *s*-process distribu-

## AGES OF GLOBULAR CLUSTERS AND HELIUM DIFFUSION

BRIAN CHABOYER, ATA SARAJEDINI, AND PIERRE DEMARQUE<sup>1</sup>

Center for Solar and Space Research, Department of Astronomy, Yale University, Box 6666, New Haven, CT 06511

*Received 1991 December 23; accepted 1992 February 7*

### ABSTRACT

We have calculated evolutionary tracks with  $\alpha$ -enhanced compositions which cover the entire globular cluster metallicity range and have constructed isochrones which include the effects of microscopic diffusion of helium. The turnoff magnitudes from the isochrones were combined with the theoretical RR Lyrae magnitudes [ $M_V(\text{RR})$ ] from Lee to determine the ages of 32 Galactic globular clusters using the magnitude difference between the turnoff and horizontal branch. We find that including the effects of helium diffusion has a negligible effect on the derived ages of globular clusters. Regardless of the inclusion of helium diffusion, we find a significant age spread of 5 Gyr among the globular clusters. The oldest globular clusters studied here are  $17 \pm 2$  Gyr old.

## WHERE IS POPULATION III?

HOWARD E. BOND

Department of Physics and Astronomy, Louisiana State University

*Received 1980 December 1; accepted 1981 March 18*

### ABSTRACT

A simple one-zone model of chemical evolution in the galactic halo predicts that the halo should contain appreciable numbers of "Population III" stars (roughly defined as stars with  $[\text{Fe}/\text{H}] < -3$ ). However, unbiased samples of halo globular clusters, dwarf spheroidal systems, and high-velocity subdwarfs all show a statistically significant lack of objects with Population III metallicity. Even extensive special searches for field stars of ultralow metallicity made by the writer and others have failed to reveal more than a very small number of objects that may have  $[\text{Fe}/\text{H}] < -3$ .

## THE EVOLUTION OF DUST MASS IN THE EJECTA OF SN 1987A

ELI DWEK<sup>1</sup> AND RICHARD G. ARENDT<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Observational Cosmology Lab, Code 665, NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD 20771, USA; [eli.dwek@nasa.gov](mailto:eli.dwek@nasa.gov)

<sup>2</sup>CRESST, University of Maryland Baltimore County, Baltimore, MD 21250, USA

Received 2015 April 24; accepted 2015 July 20; published 2015 September 1

### ABSTRACT

We present a new analysis of the infrared (IR) emission from the ejecta of SN 1987A covering days 615, 775, 1144, 8515, and 9090 after the explosion. We show that the observations are consistent with the rapid formation of about  $0.4 M_{\odot}$  of dust, consisting of mostly silicates ( $\text{MgSiO}_3$ ), near day 615, and evolving to about  $0.45 M_{\odot}$  of composite dust grains consisting of  $\sim 0.4 M_{\odot}$  of silicates and  $\sim 0.05 M_{\odot}$  of amorphous carbon after day  $\sim 8500$ . The proposed scenario challenges previous claims that dust in supernova (SN) ejecta is predominantly carbon, and that it grew from an initial mass of  $\sim 10^{-3} M_{\odot}$ , to over  $0.5 M_{\odot}$  by cold accretion. It alleviates several problems with

MNRAS **442**, 2963–2992 (2014)

doi:10.1093/mnras/stu1022

## Possible indirect confirmation of the existence of Pop III massive stars by gravitational wave

Tomoya Kinugawa,<sup>\*</sup> Kohei Inayoshi, Kenta Hotokezaka, Daisuke Nakauchi and Takashi Nakamura

*Department of Physics, Graduate School of Science, Kyoto University, Kyoto 606-8502, Japan*

## s-PROCESSING IN THE GALACTIC DISK. I. SUPER-SOLAR ABUNDANCES OF Y, Zr, La, AND Ce IN YOUNG OPEN CLUSTERS

E. MAIORCA<sup>1,2,3</sup>, S. RANDICH<sup>3</sup>, M. BUSO<sup>1,2</sup>, L. MAGRINI<sup>3</sup>, AND S. PALMERINI<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Dipartimento di Fisica, Università di Perugia, Via A. Pascoli, 06123 Perugia, Italy; [emaiorca@gmail.com](mailto:emaiorca@gmail.com)

<sup>2</sup> INFN, Sezione di Perugia, Via A. Pascoli, 06123 Perugia, Italy

<sup>3</sup> INAF, Osservatorio Astrofisico di Arcetri, Largo E. Fermi 5, 50125 Firenze, Italy

*Received 2011 February 13; accepted 2011 May 10; published 2011 July 15*

### ABSTRACT

In a recent study based on homogeneous barium abundance measurements in open clusters (OCs), a trend of increasing [Ba/Fe] ratios for decreasing cluster age was reported. We present here further abundance determinations, relative to four other elements having important *s*-process contributions, with the aim of investigating whether or not the growth found for [Ba/Fe] is indicative of a general property, shared also by the other heavy elements formed by slow neutron captures. In particular, we derived abundances for yttrium, zirconium, lanthanum, and cerium, using equivalent width measurements and the MOOG code. Our sample includes 19 OCs of different ages, for which the spectra were obtained by the ESO Very Large Telescope using the UVES spectrometer. The growth previously suggested for Ba is confirmed for all the elements analyzed in our study. This fact implies significant changes in our views of the Galactic chemical evolution for elements beyond iron. Our results necessarily require that very low mass asymptotic giant branch stars ( $M \lesssim 1.5 M_{\odot}$ ) produce larger amounts of *s*-process elements (and hence activate the  $^{13}\text{C}$ -neutron source more effectively) than previously expected. Their role in producing neutron-rich elements in the Galactic disk has been so far underestimated, and their evolution and neutron-capture nucleosynthesis should now be reconsidered.

## THE UNIQUE Na:O ABUNDANCE DISTRIBUTION IN NGC 6791: THE FIRST OPEN(?) CLUSTER WITH MULTIPLE POPULATIONS

D. GEISLER<sup>1</sup>, S. VILLANOVA<sup>1</sup>, G. CARRARO<sup>2</sup>, C. PILACHOWSKI<sup>3</sup>, J. CUMMINGS<sup>1</sup>, C. I. JOHNSON<sup>4,6,7</sup>, AND F. BRESOLIN<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Astronomía, Universidad de Concepcion, Casilla 160-C, Chile; [dgeisler@astro-udec.cl](mailto:dgeisler@astro-udec.cl), [svillanova@astro-udec.cl](mailto:svillanova@astro-udec.cl), [jcumming@astro-udec.cl](mailto:jcumming@astro-udec.cl)

<sup>2</sup> European Southern Observatory, Alonso de Cordova 3107, Casilla 19001, Santiago 19, Chile; [gcarraro@eso.org](mailto:gcarraro@eso.org)

<sup>3</sup> Department of Astronomy, Indiana University, 727 East Third Street, Bloomington, IN 47405-7105, USA; [catyp@astro.indiana.edu](mailto:catyp@astro.indiana.edu)

<sup>4</sup> Department of Physics and Astronomy, UCLA, 430 Portola Plaza, Los Angeles, CA 90095-1547, USA; [cijohnson@astro.ucla.edu](mailto:cijohnson@astro.ucla.edu)

<sup>5</sup> Institute for Astronomy, University of Hawaii, 2680 Woodlawn Drive, Honolulu, HI 96822, USA; [bresolin@IfA.Hawaii.Edu](mailto:bresolin@IfA.Hawaii.Edu)

*Received 2012 April 26; accepted 2012 July 9; published 2012 August 24*

### ABSTRACT

Almost all globular clusters investigated exhibit a spread in their light element abundances, the most studied being an Na:O anticorrelation. In contrast, open clusters show a homogeneous composition and are still regarded as Simple Stellar Populations. The most probable reason for this difference is that globulars had an initial mass high enough to retain primordial gas and ejecta from the first stellar generation and thus formed a second generation with a distinct composition, an initial mass exceeding that of open clusters. NGC 6791 is a massive open cluster and warrants a detailed search for chemical inhomogeneities. We collected high-resolution, high signal-to-noise spectra of 21 members covering a wide range of evolutionary status and measured their Na, O, and Fe content. We found  $[\text{Fe}/\text{H}] = +0.42 \pm 0.01$ , in good agreement with previous values, and no evidence for a spread. However, the Na:O distribution is completely unprecedented. It becomes the first open cluster to show intrinsic abundance variations

- Os estudos de abundâncias químicas em Astrofísica permeiam todos os campos correlatos. Não se pode desligar o estudo de abundâncias associadas à nucleossíntese dos alcances da teoria sobre as abundâncias primordiais ou de elementos como LiBeB e com isso este tópico entra nas discussões da Cosmologia
- Não se pode desligar o estudo de abundâncias das considerações sobre a morfologia galáctica, pois esta depende da formação estelar, do enriquecimento do gás interestelar e dos processos de troca de gás entre as componentes da galáxia
- Estes estudos são um ponto de referência, um conjunto de constraints sobre a pesquisa de planetas extrasolares e outros estudos como a Exobiologia e a Exoquímica

Obrigado!

