

Corso di Geochimica e Laboratorio per Scienze Geologiche

CFU: 9 (frontali) + 3 (laboratorio)

Orlando Vaselli: orlando.vaselli@unifi.it

Franco Tassi: franco.tassi@unifi.it



Orario del Corso di Geochimica con Lab

- Lunedì, Aula 4 (Capponi): 10.30-13.30
- Martedì, Aula D (Pira): 11.30-13.30
- Giovedì, Aula 2 (Laura): 8.30-10.30 – Aula D (Pira): 14.30-17.30

Laboratorio?

Mercoledì mattina?

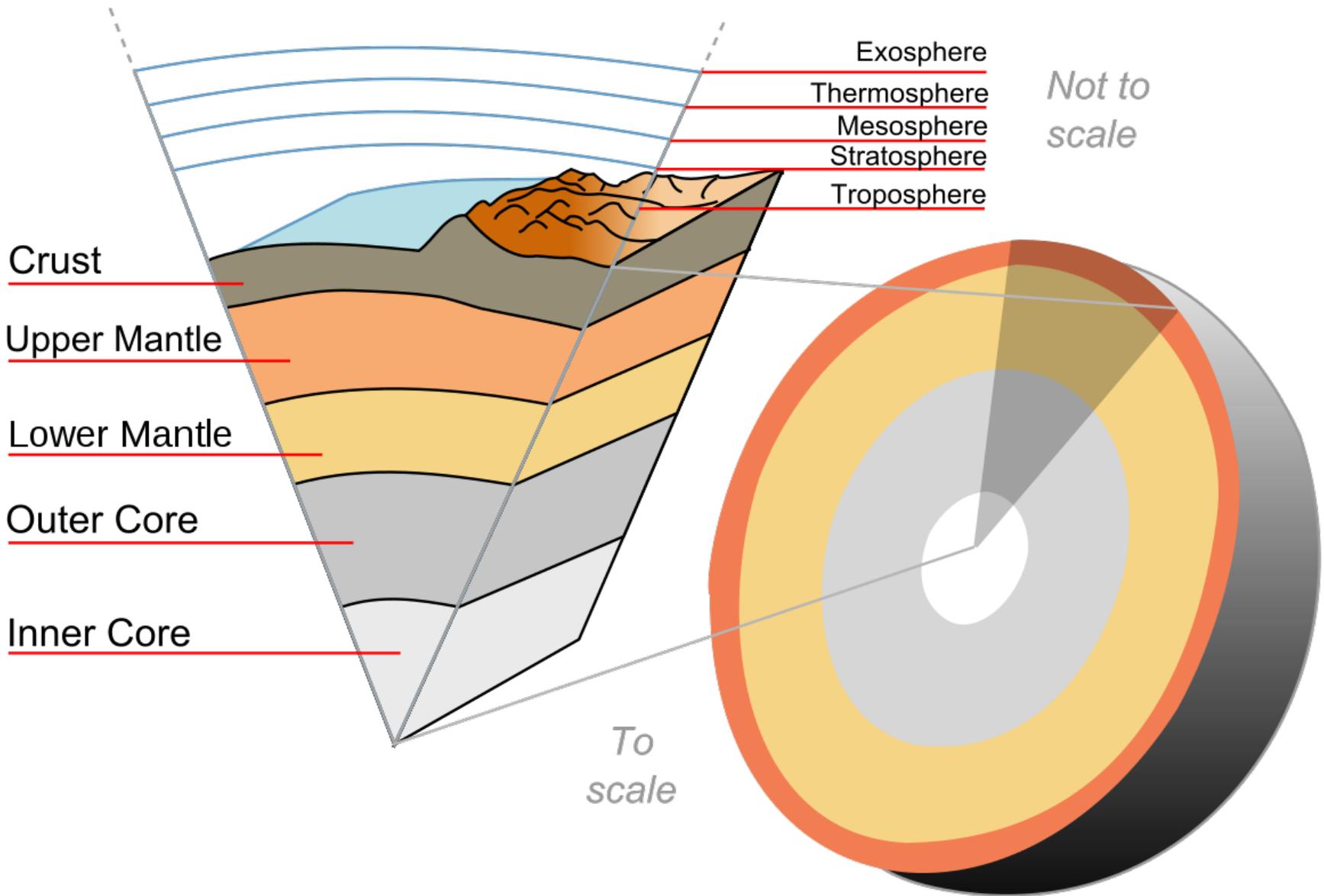


Perchè un geologo dovrebbe sapere
di Geochimica?



Perchè è importante la Geochimica





Victor Goldschmidt defined the study of geochemistry as: "the laws governing the distribution of the chemical elements and their isotopes throughout the earth"



Vernadski, Vladimir Ivanovich (1863-1945),
scienziato sovietico e pioniere della
geochimica e biogeochimica: "L'Uomo
diventerà un fattore importante nella
modifica dei sistemi geochimici in quanto
ELEMENTO destabilizzante".

Si consumano prodotti di scarto che
inquinano... bisogna ripulire (rimediare) ed
evitare o minimizzare che elementi tossici
vengano introdotti nel ciclo vitale



Viene in pratica ad introdursi il concetto di **ANTROPOSFERA**: la sfera umana, i.e. la parte del sistema naturale che è stata modificata dagli esseri umani.

L'influenza dell'uomo ha portato alla definizione di sfere ancora più specifiche come la **TECNOSFERA**.

L'**astisfera** comprende le parti della terra influenzate dai sistemi urbani. Questi sono in grado di agire come un network influenzandosi l'un con l'altro e capaci di alterare l'ambiente terrestre.

Urban Geochemistry



Ciclo Geochimico

La sequenza di stadi (fasi) nella migrazione degli elementi durante cambiamenti di natura geologica. Rankama e Sahama distinguono un **CICLO MAGGIORE** o **ENDOGENO** (dal magma alle rocce ignee alle rocce sedimentarie, metamorfiche e migmatitiche fino a ritornare al magma) ed un **CICLO ESOGENO** (dai sedimenti al materiale di alterazione per ritornare ai sedimenti).

Effetti dell'uomo (ANTROPOSFERA)



Gli inquinanti/contaminanti sono derivanti da un'azione antropica. Essi non sono altro che il riarrangiamento forzato di atomi per la produzione, ad esempio, di molecole sintetiche. Inoltre, l'azione umana consente la distribuzione (arricchimento) di elementi/composti da un posto ad un altro.



- **Contaminante:** sostanza presente in un dato ambiente al di sopra della concentrazione normale attesa e non ha effetti negativi sull'ambiente e sulla salute dell'uomo.
- **Inquinante:** sostanza presente in quantità maggiore di quella attesa in natura a causa dell'attività umana e che ha un impatto negativo sull'ambiente e sulla salute dell'uomo.



Geochemica versus Geologia?

- La geologia è la diretta osservazione ed interpretazione delle relazioni di terreno per la capire la storia e lo stato attuale (e.g. rischi e risorse) della Terra solida e delle sue regioni
- Include: geologia strutturale, geomorfologia, stratigrafia, paleontologia, petrologia, mineralogia, vulcanologia, etc.

- La **GEOCHIMICA** è l'applicazione dei principi della **CHIMICA** per capire la **TERRA** (solida, liquida e gassosa)
 - Principi fondamentali come il decadimento radioattivo, la conservazione della massa isotopica ed elementare, la termodinamica e la cinetica portano rigore e certezze all'interpretazione geologica

- Le altre scienze sono necessarie per limitare le speculazioni dei geologi nel campo della plausibilità. Tuttavia, la **GEOLOGIA** è il cardine centrale di tutte le Scienze della Terra: provvede ai problemi che devono essere risolti, alla struttura per correlare i vari problemi e al record degli eventi attuali.

Mediante la Geochimica

- Si quantifica il tempo geologico;
- Si determinano le profondità e le temperature delle camere magmatiche;
- Si riconoscono i "plume" mantellici;
- Si comprendono i processi di subduzione ed il coinvolgimento dei sedimenti;
- Si calcolano le temperature di formazione delle rocce metamorfiche;
- Si stimano i tassi di risalita e di erosione delle catene montuose;
- Si studia come e quando la Terra si sia formata;
- Si ipotizza come sia formata e come sia evoluta l'atmosfera;
- Si investigano le età glaciali e le loro cause;
- Si teorizzano gli effetti dei gas serra;
- Si valutano gli inquinamenti delle falde, dei suoli e dell'aria;
- Si scoprono le risorse economiche quali petrolio, depositi minerali, ecc.



La Geochimica è scritta nella TAVOLA PERIODICA

Periodo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
	I A	II A	III B	IV B	V B	VI B	VII B	VIII B	VIII B	VIII B	IB	IIB	III A	IV A	V A	VI A	VII A	
1	H																	He
2	Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
3	Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
6	Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
7	Fr	Ra	Ac	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn						

- Metalli Alcalini
- Metalli Alcalino-Terrosi
- Lantanidi
- Attinidi
- Elementi di Transizione
- Metalloidi / Non Metalli
- Alogeni
- Gas Nobili

Numero Atomico: 1
 Peso Atomico: 1,0079
 Valenza: -1
 Densità (g/cm³): 0,0000999
 Temp. Fusione (°C): -253
 Temp. Ebollizione (°C): -253
 Numero di Ossidazione: +1
 Simbolo: H
 Nome: Idrogeno

STATI di AGGREGAZIONE a 20 °C

- SOLIDI
- LIQUIDI
- GASSOSI
- ARTIFICIALI

6	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
	Cerio	Praseodimio	Neodimio	Promezio	Samario	Europio	Gadolinio	Terbio	Disprozio	Olmio	Erbio	Tulio	Itterbio	Lutezio
7	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103
	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr
	Torio	Protattinio	Uranio	Neptunio	Plutonio	Americio	Curcio	Berkelio	Californio	Einsteinio	Fermio	Mendelevio	Nobelio	Lutetio

Serie dei Lantanidi

Serie degli Attinidi

Quello che ci resta da capire è il loro comportamento!

Dmitri Mendeleev

Nel 1869 pubblicò la tavola degli elementi, organizzati in funzione dell'aumento della massa atomica.



1834 - 1907

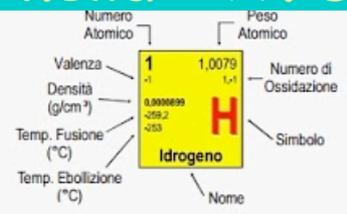


*Geografia della Tavola
Periodica*

La Geochimica è scritta nella TAVOLA PERIODICA

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1 1,00794 -103 H Idrogeno	2 4,002602 -9003 He Elio	3 6,941 -102 Li Litio	4 9,0122 -9004 Be Berillio	5 11 -101 B Boro	6 12 -100 C Carbonio	7 14,0067 -100 N Azoto	8 15,9994 -100 O Ossigeno	9 18,9984 -100 F Fluoro	10 20,179 -100 Ne Neon	11 22,9898 -100 Na Sodio	12 24,305 -100 Mg Magnesio	13 26,9815 -100 Al Alluminio	14 28,0855 -100 Si Silicio	15 30,9738 -100 P Fosforo	16 32,06 -100 S Zolfo	17 35,453 -100 Cl Cloro	18 39,948 -100 Ar Argon
19 39,0983 -100 K Potassio	20 40,08 -100 Ca Calcio	21 44,9559 -100 Sc Scandio	22 47,9 -100 Ti Titanio	23 50,9415 -100 V Vanadio	24 51,996 -100 Cr Cromo	25 54,938 -100 Mn Manganese	26 55,847 -100 Fe Ferro	27 58,9332 -100 Co Cobalto	28 58,7 -100 Ni Nichel	29 63,546 -100 Cu Rame	30 65,38 -100 Zn Zinco	31 69,72 -100 Ga Gallio	32 72,59 -100 Ge Germanio	33 74,9216 -100 As Arsenico	34 78,96 -100 Se Selenio	35 79,904 -100 Br Bromo	36 83,8 -100 Kr Kriptone
37 85,4678 -100 Rb Rubidio	38 87,62 -100 Sr Stronzio	39 88,9059 -100 Y Ittrio	40 91,224 -100 Zr Zirconio	41 92,9064 -100 Nb Niobio	42 95,94 -100 Mo Molibdeno	43 98 -100 Tc Tecnecio	44 101,07 -100 Ru Rutenio	45 102,9055 -100 Rh Rodio	46 106,4 -100 Pd Palladio	47 107,868 -100 Ag Argento	48 112,41 -100 Cd Cadmio	49 114,82 -100 In Indio	50 118,69 -100 Sn Stagno	51 121,75 -100 Sb Antimonio	52 127,6 -100 Te Tellurio	53 126,9045 -100 I Iodio	54 131,3 -100 Xe Xenone
55 132,9054 -100 Cs Cesio	56 137,33 -100 Ba Bario	57 138,9055 -100 La Lantanio	58 178,49 -100 Ce Cerio	59 180,9479 -100 Pr Praseodimio	60 183,85 -100 Nd Neodimio	61 186,207 -100 Pm Promezio	62 190,2 -100 Sm Samario	63 192,22 -100 Eu Europio	64 195,09 -100 Gd Gadolinio	65 196,9665 -100 Tb Terbio	66 200,59 -100 Dy Disprosio	67 200,59 -100 Ho Olmio	68 200,59 -100 Er Erbio	69 208,9804 -100 Tm Tulio	70 208,9804 -100 Yb Itterbio	71 208,9804 -100 Lu Lutezio	72 208,9804 -100 Hf Hafnio
87 223 -100 Fr Francio	88 226,025 -100 Ra Radio	89 227,028 -100 Ac Attinio	90 232,0375 -100 Th Torio	91 232,0375 -100 Pa Protattinio	92 238,0289 -100 U Uranio	93 238,0289 -100 Np Neptunio	94 244 -100 Pu Plutonio	95 244 -100 Am Americio	96 244 -100 Cm Curcio	97 244 -100 Bk Berkelio	98 244 -100 Cf Californio	99 244 -100 Es Einsteinio	100 244 -100 Fm Fermio	101 244 -100 Md Mendelevio	102 244 -100 No Nobelio	103 244 -100 Lr Lawrencio	104 244 -100 Rf Rutherfordio
105 262 -100 Db Dubnio	106 266 -100 Sg Seaborgio	107 266 -100 Bh Bohrio	108 277 -100 Hs Hassio	109 277 -100 Mt Meitnerio	110 277 -100 Ds Darmstadtio	111 277 -100 Rg Roentgenio	112 285 -100 Cn Copernicio	113 285 -100 Nh Nihonio	114 285 -100 Fl Flerovio	115 285 -100 Mc Moscovio	116 285 -100 Lv Livermorio	117 285 -100 Ts Tennessio	118 285 -100 Og Oganesson	119 285 -100 Nh Nihonio	120 285 -100 Fl Flerovio	121 285 -100 Mc Moscovio	122 285 -100 Lv Livermorio

- Metalli Alcalini
- Metalli Alcalino-Terrosi
- Lantanidi
- Attinidi
- Elementi di Transizione
- Metalloidi / Non Metalli
- Alogeni
- Gas Nobili



58 140,12 -4 Ce Cerio	59 140,9077 -4 Pr Praseodimio	60 144,24 -3 Nd Neodimio	61 145 -3 Pm Promezio	62 150,4 -3 Sm Samario	63 151,96 -3 Eu Europio	64 157,25 -3 Gd Gadolinio	65 158,9254 -3 Tb Terbio	66 162,5 -3 Dy Disprosio	67 164,9304 -3 Ho Olmio	68 167,26 -3 Er Erbio	69 168,9342 -3 Tm Tulio	70 173,04 -3 Yb Itterbio	71 174,967 -3 Lu Lutezio
90 232,0375 -4 Th Torio	91 232,0375 -4 Pa Protattinio	92 238,0289 -4 U Uranio	93 238,0289 -4 Np Neptunio	94 244 -4 Pu Plutonio	95 244 -4 Am Americio	96 244 -4 Cm Curcio	97 244 -4 Bk Berkelio	98 244 -4 Cf Californio	99 244 -4 Es Einsteinio	100 244 -4 Fm Fermio	101 244 -4 Md Mendelevio	102 244 -4 No Nobelio	103 244 -4 Lr Lawrencio



Le righe orizzontali si chiamano **PERIODI**.
 Le colonne verticali della tavola periodica sono chiamate **GRUPPI o FAMIGLIE**

Halogens

Alkaline Earth

Alkali metals

Transition Metals

Noble gases

Boron Family	Carbon Family	Nitrogen Family	Oxygen Family
--------------	---------------	-----------------	---------------

1	H	Atomic Number
1	H	Symbol
Hydrogen		Name
Nonmetal		Chemical Group Block

1 H Hydrogen Nonmetal																	2 He Helium Noble Gas		
3 Li Lithium Alkali Metal	4 Be Beryllium Alkaline Earth Metal																	9 F Fluorine Halogen	10 Ne Neon Noble Gas
11 Na Sodium Alkali Metal	12 Mg Magnesium Alkaline Earth Metal																	17 Cl Chlorine Halogen	18 Ar Argon Noble Gas
19 K Potassium Alkali Metal	20 Ca Calcium Alkaline Earth Metal	21 Sc Scandium Transition Metal	22 Ti Titanium Transition Metal	23 V Vanadium Transition Metal	24 Cr Chromium Transition Metal	25 Mn Manganese Transition Metal	26 Fe Iron Transition Metal	27 Co Cobalt Transition Metal	28 Ni Nickel Transition Metal	29 Cu Copper Transition Metal	30 Zn Zinc Transition Metal	35 Br Bromine Halogen	36 Kr Krypton Noble Gas						
37 Rb Rubidium Alkali Metal	38 Sr Strontium Alkaline Earth Metal	39 Y Yttrium Transition Metal	40 Zr Zirconium Transition Metal	41 Nb Niobium Transition Metal	42 Mo Molybdenum Transition Metal	43 Tc Technetium Transition Metal	44 Ru Ruthenium Transition Metal	45 Rh Rhodium Transition Metal	46 Pd Palladium Transition Metal	47 Ag Silver Transition Metal	48 Cd Cadmium Transition Metal	53 I Iodine Halogen	54 Xe Xenon Noble Gas						
55 Cs Cesium Alkali Metal	56 Ba Barium Alkaline Earth Metal	*	72 Hf Hafnium Transition Metal	73 Ta Tantalum Transition Metal	74 W Tungsten Transition Metal	75 Re Rhenium Transition Metal	76 Os Osmium Transition Metal	77 Ir Iridium Transition Metal	78 Pt Platinum Transition Metal	79 Au Gold Transition Metal	80 Hg Mercury Transition Metal	85 At Astatine Halogen	86 Rn Radon Noble Gas						
87 Fr Francium Alkali Metal	88 Ra Radium Alkaline Earth Metal	**	104 Rf Rutherfordium Transition Metal	105 Db Dubnium Transition Metal	106 Sg Seaborgium Transition Metal	107 Bh Bohrium Transition Metal	108 Hs Hassium Transition Metal	109 Mt Meitnerium Transition Metal	110 Ds Darmstadtium Transition Metal	111 Rg Roentgenium Transition Metal	112 Cn Copernicium Transition Metal	117 Ts Tennessine Halogen	118 Og Oganesson Noble Gas						

Lantanides *

Actinides **

57 La Lanthanum Lanthanide	58 Ce Cerium Lanthanide	59 Pr Praseodymium Lanthanide	60 Nd Neodymium Lanthanide	61 Pm Promethium Lanthanide	62 Sm Samarium Lanthanide	63 Eu Europium Lanthanide	64 Gd Gadolinium Lanthanide	65 Tb Terbium Lanthanide	66 Dy Dysprosium Lanthanide	67 Ho Holmium Lanthanide	68 Er Erbium Lanthanide	69 Tm Thulium Lanthanide	70 Yb Ytterbium Lanthanide	71 Lu Lutetium Lanthanide
89 Ac Actinium Actinide	90 Th Thorium Actinide	91 Pa Protactinium Actinide	92 U Uranium Actinide	93 Np Neptunium Actinide	94 Pu Plutonium Actinide	95 Am Americium Actinide	96 Cm Curium Actinide	97 Bk Berkelium Actinide	98 Cf Californium Actinide	99 Es Einsteinium Actinide	100 Fm Fermium Actinide	101 Md Mendelevium Actinide	102 No Nobelium Actinide	103 Lr Lawrencium Actinide

Metalloids or semi-metals

The periodic table below highlights metalloids in green. A red line is drawn around the elements Boron (B), Silicon (Si), Germanium (Ge), and Antimony (Sb), which are also highlighted in green. The rest of the table is in yellow.

1A 1																	2 18
1 H Hydrogen 1.00794	2A 2											3A 13	4A 14	5A 15	6A 16	7A 17	2 He Helium 4.00260
2 Li Lithium 6.941	Be Beryllium 9.01218											B Boron 10.811	C Carbon 12.01	N Nitrogen 14.0067	O Oxygen 15.9994	F Fluorine 18.998403	Ne Neon 20.1797
3 Na Sodium 22.98977	Mg Magnesium 24.305	3B 3	4B 4	5B 5	6B 6	7B 7	8B 8 9 10			1B 11	2B 12	Al Aluminum 26.98154	Si Silicon 28.0855	P Phosphorus 30.97376	S Sulfur 32.066	Cl Chlorine 35.4527	Ar Argon 39.948
4 K Potassium 39.0983	Ca Calcium 40.078	Sc Scandium 44.9559	Ti Titanium 47.88	V Vanadium 50.9415	Cr Chromium 51.9961	Mn Manganese 54.9380	Fe Iron 55.847	Co Cobalt 58.9332	Ni Nickel 58.6934	Cu Copper 63.546	Zn Zinc 65.39	Ga Gallium 69.72	Ge Germanium 72.61	As Arsenic 74.9216	Se Selenium 78.96	Br Bromine 79.904	Kr Krypton 83.80
5 Rb Rubidium 85.4678	Sr Strontium 87.62	Y Yttrium 88.9059	Zr Zirconium 91.224	Nb Niobium 92.9064	Mo Molybdenum 95.94	Tc Technetium (98)	Ru Ruthenium 101.07	Rh Rhodium 100.9055	Pd Palladium 106.42	Ag Silver 107.8682	Cd Cadmium 112.411	In Indium 114.82	Sn Tin 118.710	Sb Antimony 121.757	Te Tellurium 127.60	I Iodine 126.905	Xe Xenon 131.29
6 Cs Cesium 132.9054	Ba Barium 137.327	La Lanthanum 138.9055	Hf Hafnium 178.49	Ta Tantalum 180.9479	W Tungsten 183.85	Re Rhenium 186.207	Os Osmium 190.2	Ir Iridium 192.22	Pt Platinum 195.08	Au Gold 196.9665	Hg Mercury 200.59	Tl Thallium 204.3833	Pb Lead 207.2	Bi Bismuth 208.980	Po Polonium (209)	At Astatine (210)	Rn Radon (222)
7 Fr Francium (223)	Ra Radium 226.0254	Ac Actinium 227.0278	Rf Rutherfordium (261)	Db Dubnium (262)	Sg Seaborgium (263)	Bh Bohrium (264)	Hs Hassium (265)	Mt Meitnerium (266)	110 (269)	111 (272)	112 (277)						
Lanthanide Series			Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	

La tavola periodica

✦ Proprietà chimiche dei gruppi

- Gruppo 1A → *metalli alcalini* (elettropositivi)
 - ◆ Valenza +1
- Gruppo 2A → *metalli alcalino-terrosi* (elettropositivo)
 - ◆ Valenza +2
- Gruppi 1B-7B e 8 → *metalli di transizione*;
 - ◆ Proprietà chimiche più complesse (riempimento degli orbitali più interni)
 - ◆ Valenze differenti, i.e. Fe^{+2} e Fe^{+3}
- Gruppo 3A → *metalloidi* (elettropositivi)
 - ◆ Valenza +3
- Gruppo 4A → *gruppo del silicio-carbonio* (composti minerali e organici importanti; elettropositivi)
 - ◆ Valenza +4



La tavola periodica

✦ Proprietà chimiche dei gruppi (cont)

- Gruppo 5A → *gruppo dell'azoto-fosforo* (elettropositivi)
 - ◆ Valenza +5
- Gruppo 6A → *gruppo dell'ossigeno* (non-metalli, elettronegativi)
 - ◆ Valenza -2
- Gruppo 7A → *gruppo degli alogeni* (non-metalli, elettronegativi)
 - ◆ Valenza -1
- Gruppo 8A → Gas nobili (inerti, non-reattivi)



Cosa studia la **GEOCHIMICA**?



La distribuzione degli elementi chimici nella Terra e nel Sistema Solare



Le cause che chimicamente diversificano i materiali terrestri ed extra-terrestri



Le reazioni chimiche nel sistema solare e sulla superficie terrestre e nel suo interno



Assemblare queste informazioni per capire come i processi geochimici abbiano operato nel passato e come opereranno nel futuro



Investigare i cicli geochimici degli elementi e le modifiche avvenute nel passato e (presente e futuro) capire gli effetti antropici



Materiali Geologici:



Soil Horizons

A layer of soil, approximately parallel to the surface, having distinct characteristics produced by processes forming horizons.

Used to classify the soil and make interpretations.

A Soil Profile

Horizon O
A
B
C

Materiali Antropici



Metodi analitici

Code No.	KT-16	KT-17	KT-18	KT-19	KT-20	KT-21	KT-22	KT-23
Sample No.	U-1	U-2	(46/181)	(46/710)	P-1	Pe	(48/409)	(46/53)
SiO ₂	42.51	47.453	41.24	43.20	39.32	46.25	40.43	43.46
TiO ₂	1.07	0.854	3.36	1.33	<0.01	0.01	<0.01	0.68
Al ₂ O ₃	17.29	16.233	13.22	16.51	0.03	0.33	0.63	15.63
Fe ₂ O _{3(T)}	12.28	10.357	11.24	11.19	8.67	7.44	7.29	8.66
MnO	0.18	0.295	0.22	0.30	0.11	0.11	0.24	0.32
MgO	10.23	9.330	2.52	11.05	48.49	42.88	48.46	10.18
CaO	12.73	14.718	16.60	12.79	0.000	0.13	0.11	12.60
Na ₂ O	2.03	ND	6.21	1.90	<0.03	<0.03	0.54	1.82
K ₂ O	0.51	0.556	1.42	0.64	<0.01	0.000	0.22	2.56
P ₂ O ₅	0.19	ND	0.93	0.20	<0.01	0.000	0.01	0.74
Loss inc. S-	0.87	-	-	-	2.96	2.58	-	-
S	0.21	-	ND	0.06	0.03	<0.01	0.01	1.42
Total	99.89	89.796	100.13	99.63	99.58	99.73	99.83	100.21

Determinazioni qualitative e quantitative di composti ed elementi in materiali geologici

Fe²⁺ e Fe³⁺

Ce³⁺ e Ce⁴⁺

Cr³⁺ e Cr⁶⁺

N³⁻, N⁴⁺, N⁵⁺

Rocce

Acque

Isotopi stabili e radioattivi

C⁴⁻, C²⁺, C⁴⁺

S²⁻, S⁰, S⁴⁺

Gas

Element	Rio Loa	River water (Lit)	Seawater ^d
Ca (µg/ml)	112 - 430 ^c	4 - 30 ^a	412
Mg (µg/ml)	63 - 230 ^c	1.5 - 5.6 ^a	1290
Na (µg/ml)	240 - 1770 ^c	2.9 - 11 ^a	10 770
Cl (µg/ml)	650 - 4120 ^c	4.9 - 12.1 ^a	19 354
K (µg/ml)	17 - 115 ^c	1.4 - 2.3 ^a	399
Li (µg/ml)	1.35 - 13.3 ^c	0.0 - 0.037 ^a	-
Rb (µg/ml)	0.07 - 0.60 ^c	0.0 - 0.008 ^a	-
Sr (µg/ml)	0.79 - 5.60 ^c	0.006 - 0.802 ^a	-
Cu (ng/ml)	80 - 140	7 ^a	0.25
Zn (ng/ml)	10 - 70	10 ^a	0.6
Cd (ng/ml)	0.01-2	<1 ^b	0.1
Pb (ng/ml)	0.5-15	3 ^a	0.01



Light → photochemical rxns, phototrophic organisms.

O₂ diffusion



Bacteria/ archea → Fe oxidizers, S oxidizers

Fe²⁺ Oxidation to form Fe³⁺



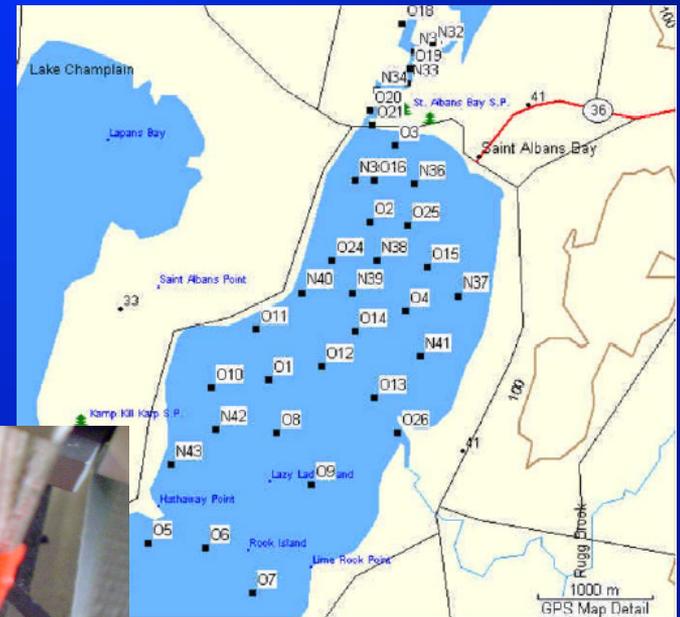
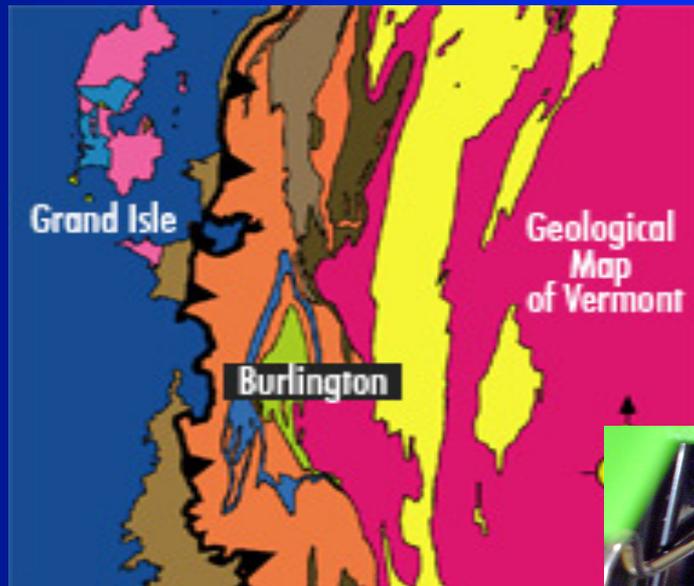
Fe³⁺ reduction with OM to form → Fe²⁺ and CO₂

SO₄²⁻ reduction with OM to form HS⁻ + CO₂

BIOGEOCHEMISTRY

Field geochemistry

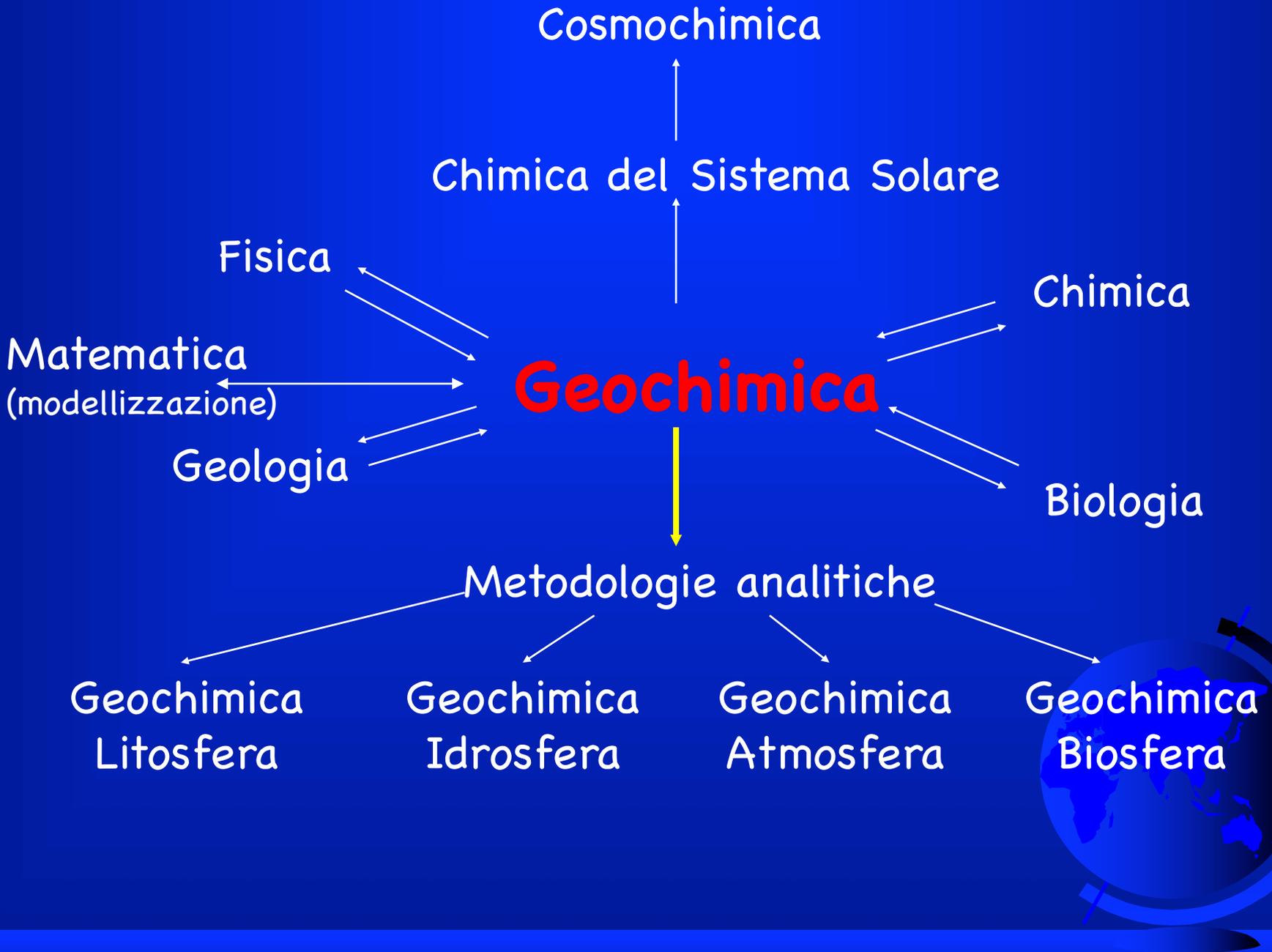
- ✦ Where, how and when collect a sample – At which scale?



Settori della Scienze della Terra che utilizzano la Geochimica

- Geologia
- Mineralogia
- Petrologia ignea, metamorfica e sedimentaria
- Scienze Ambientali
- Vulcanologia
- Esplorazione del sottosuolo
- Sedimentologia
- Geocronologia
- Depositi minerali
- Scienze planetarie
- Paleontologia
- Idrogeologia
- Archeometallurgia







**Geochimica
Sperimentale**

Cenni di Geochimica Storica



C. F. Schöbein, 1838 conia il termine di Geochimica

Assenza di metodologie analitiche per determinare la composizione dei materiali geologici



F. W. Clarke, 1908 pubblica "The Data of Geochemistry"

V. I. Vernadsky, 1923 pubblica "La Geochemie"



A. Fersman, prof. Mineralogia a 27 anni, 1934-39: "Geochemistry"



Victor M. Goldschmidt (1888-1947), tedesco di origine ebrea, è sicuramente il padre della Geochimica moderna

Studies of Geochemistry ... convert idle speculation into ...understanding K.O. Emery & J.M. Hunt, 1974



Programma di Geochimica (9+3 CFU)

L'origine degli elementi

Il sistema solare

La costituzione della Terra

Le abbondanze degli elementi

Le leggi principali della Geochimica

La classificazione geochimica degli elementi

Il decadimento radioattivo

Litosfera - Idrosfera - Atmosfera

Geochimica in fase acquosa e stabilità dei minerali

L'alterazione chimica e la composizione delle acque

Cicli geochimici

Geochimica delle acque

Cenni di Geochimica Organica

Gas vulcanici

Esempi di applicazione

Geochimica isotopica

Geochimica ambientale

Geotermia

Geochimica e Vulcanologia

Geochimica e Paleoclimatologia

**Laboratorio per le
analisi delle acque
e delle rocce**



Testi consigliati:

- ☀ Faure G., Principles and application of Geochemistry, 1998. Prentice Hall Inc.
- ☀ Krauskopf K.B. & Bird, D. K., Introduction to Geochemistry, 1995. McGraw-Hill International Editions.
- ☀ Appunti di Lezione
(anche via e-mail e piattaforma Moodle)

Password: Geochimica

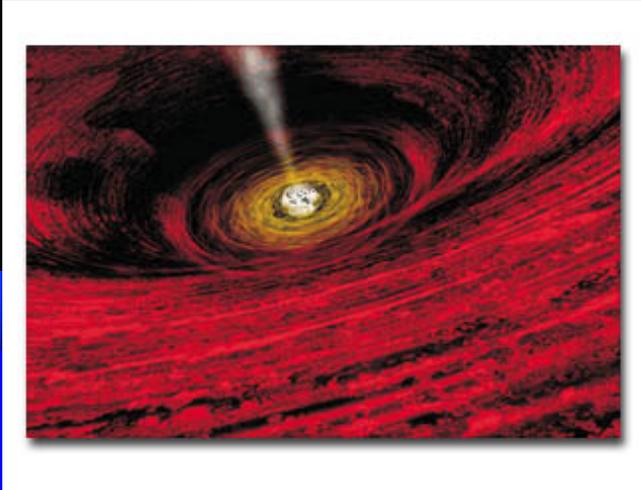
Le lezioni saranno inserite alla fine di ogni settimana



L'Universo e il Sistema solare



Big Bang



Se l'Universo ha avuto un inizio ed è in espansione, allora non è infinito

Il "bordo" dell'Universo non può essere osservato con i telescopi perché la luce impiega troppo tempo per tornare

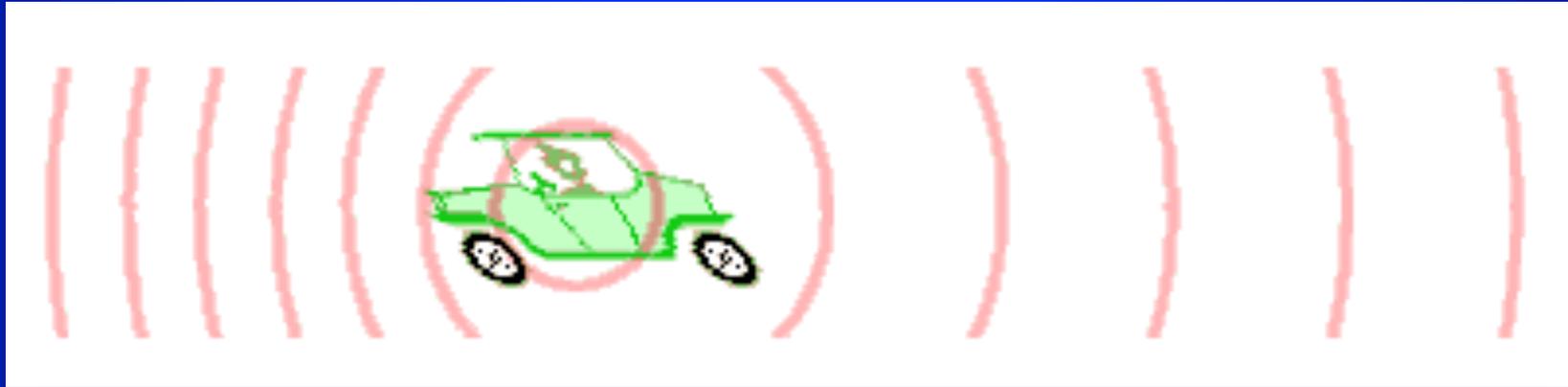
Siamo intrappolati nella nostra bolla in espansione e, quindi, se esistono altri universi non possiamo comunicare con loro

- ➔ 10^{-32} sec. Alta P e T: "quark soup"
- ➔ 13.8 sec., $T=3 \cdot 10^9$ K; 0 K = -273.15 ° C e formazione di H e He
- ➔ 700,000 y, $T=3 \cdot 10^3$ K; gli e- si attaccano a H e He
- ➔ Organizzazione in stelle, galassie, nuclei galattici
- ➔ Visivamente "Red-shift" delle linee spettrali e acusticamente dalla radiazione cosmica a micro-onde.

Espansione

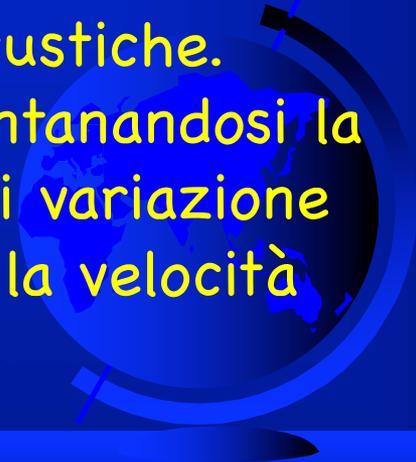
Effetto Doppler

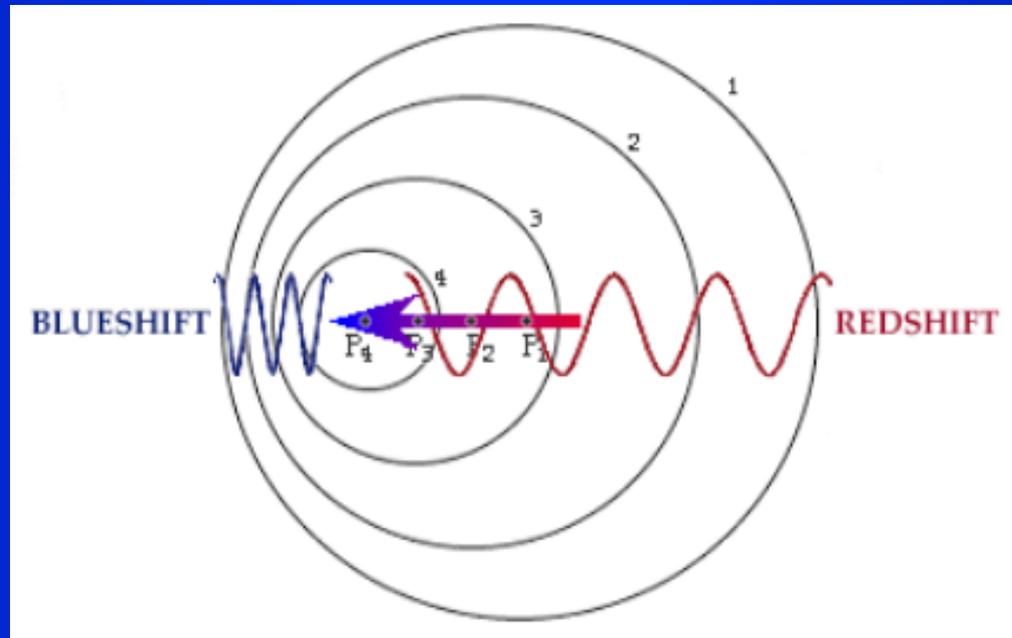
(matematico e fisico austriaco, 1803-1853)



Esempio della sirena dell'ambulanza o del clacson dell'auto:
c'è uno shift nella frequenza delle onde acustiche.

Avvicinandosi la frequenza aumenta mentre allontanandosi la
frequenza diminuisce. Se misurassimo il tasso di variazione
nella frequenza dell'onda potremmo calcolare la velocità
dell'ambulanza o dell'auto.





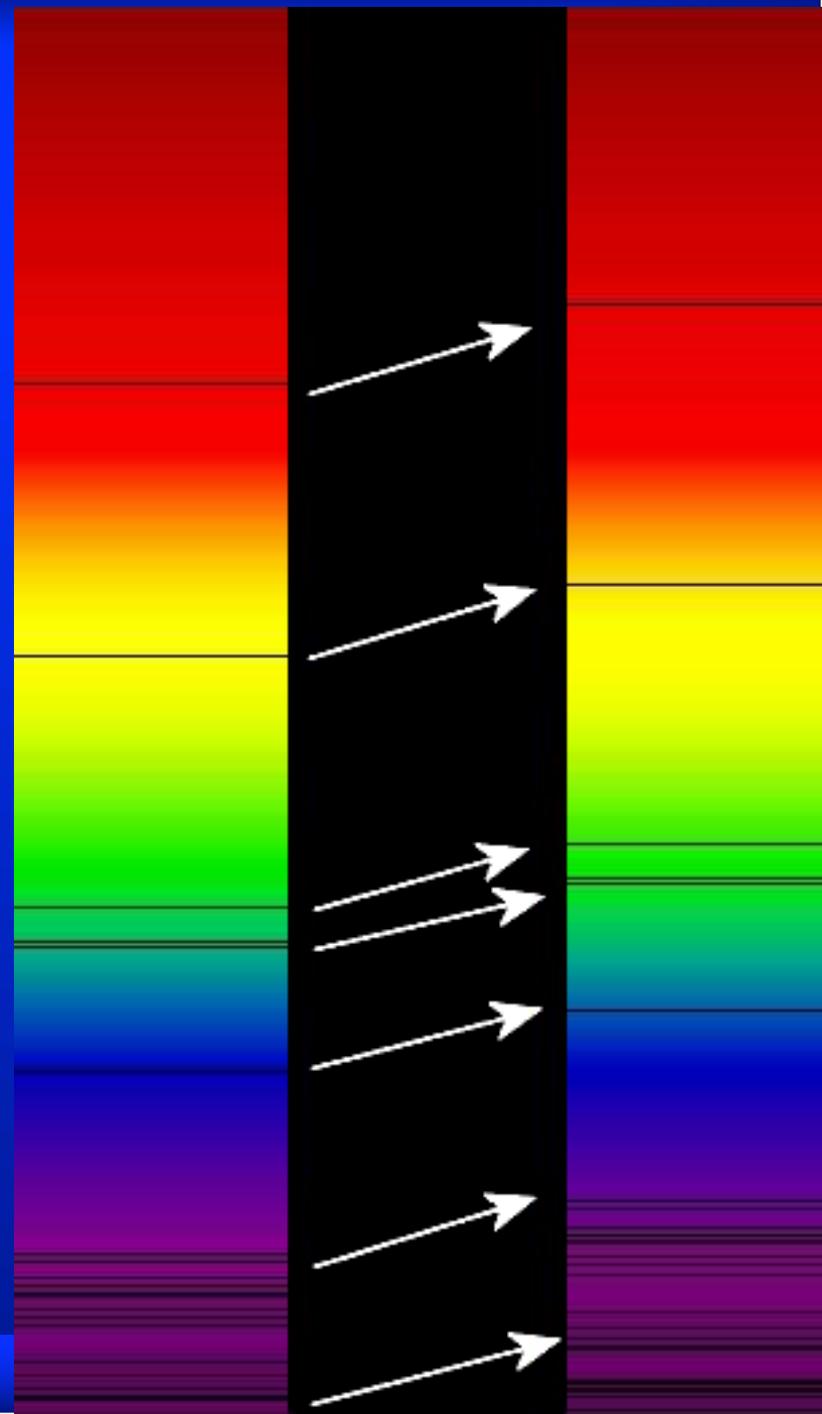
Per analogia, questo si può applicare alla radiazione elettromagnetica emessa da un oggetto in movimento.

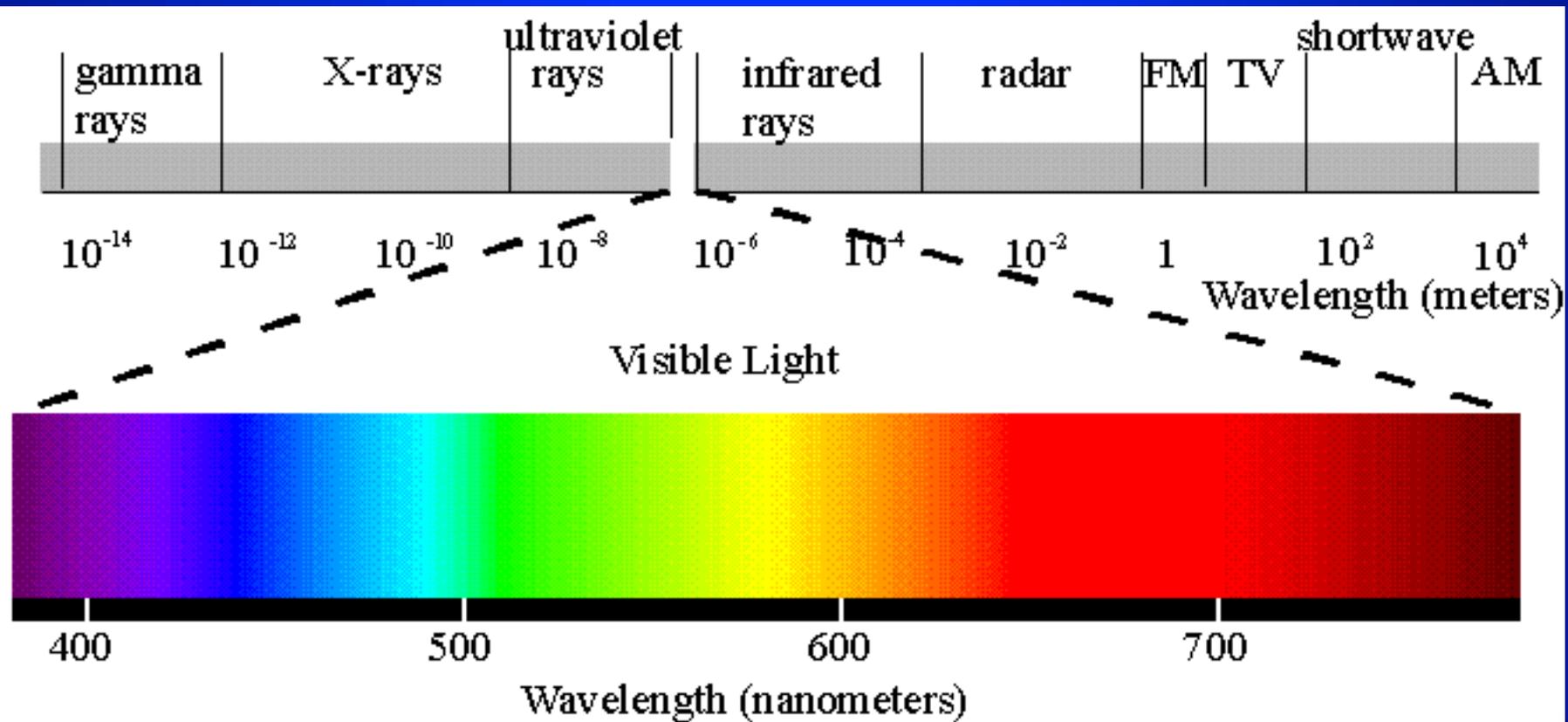
Avvicinandosi la frequenza aumenta (blue-shift), allontanandosi la frequenza diminuisce (red-shift).



Spostamento verso il rosso

- Un stella in avvicinamento presenta uno spostamento della sua luce verso lunghezze d'onda più corte (blue-shift)
- Una stella in allontanamento presenta uno spostamento della sua luce verso lunghezze d'onda più elevate (red-shift)
- La maggior parte delle galassie sfugge dalla Via Lattea





[Table of Contents](#)

[Visual Stimulus](#)

Il red-shift delle stelle

La lunghezza d'onda (λ) delle onde emesse da una sorgente in movimento sono più lunghe o più corte a seconda che la sorgente si allontani o si avvicini all'osservatore.

Lunghezza d'onda

$$z = \frac{\lambda_{\text{obsv}} - \lambda_{\text{emit}}}{\lambda_{\text{emit}}}$$

Frequenza

$$z = \frac{f_{\text{emit}} - f_{\text{obsv}}}{f_{\text{obsv}}}$$

$$1 + z = \frac{\lambda_{\text{obsv}}}{\lambda_{\text{emit}}}$$

$$1 + z = \frac{f_{\text{emit}}}{f_{\text{obsv}}}$$

$\lambda f = c$, con c = velocità della luce



$$z = \frac{\lambda_{\text{obsv}} - \lambda_{\text{emit}}}{\lambda_{\text{emit}}}$$

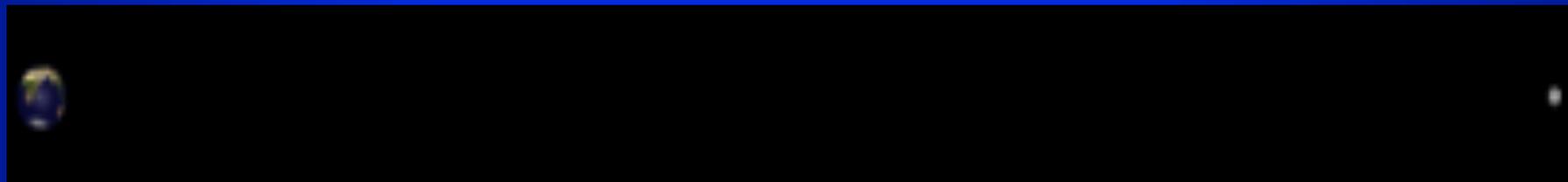
Se $z < 0$, la sorgente si avvicina. Se $z > 0$ la sorgente si allontana

Hubble E. P. (1889-1953, USA):
notò che le linee spettrali subivano
un red-shift.



Hubble E. P. (1889-1953, USA):

- dall'intensità apparente delle stelle si può misurare la distanza;
- conoscendo la composizione delle stelle (He e H), possiamo sapere la lunghezza d'onda di emissione;
- il red-shift aumenta con la distanza: le stelle più lontane si muovono ad una velocità superiore.



L'equazione di Hubble: $v = Hd$

V: velocità di recessione (km/sec)

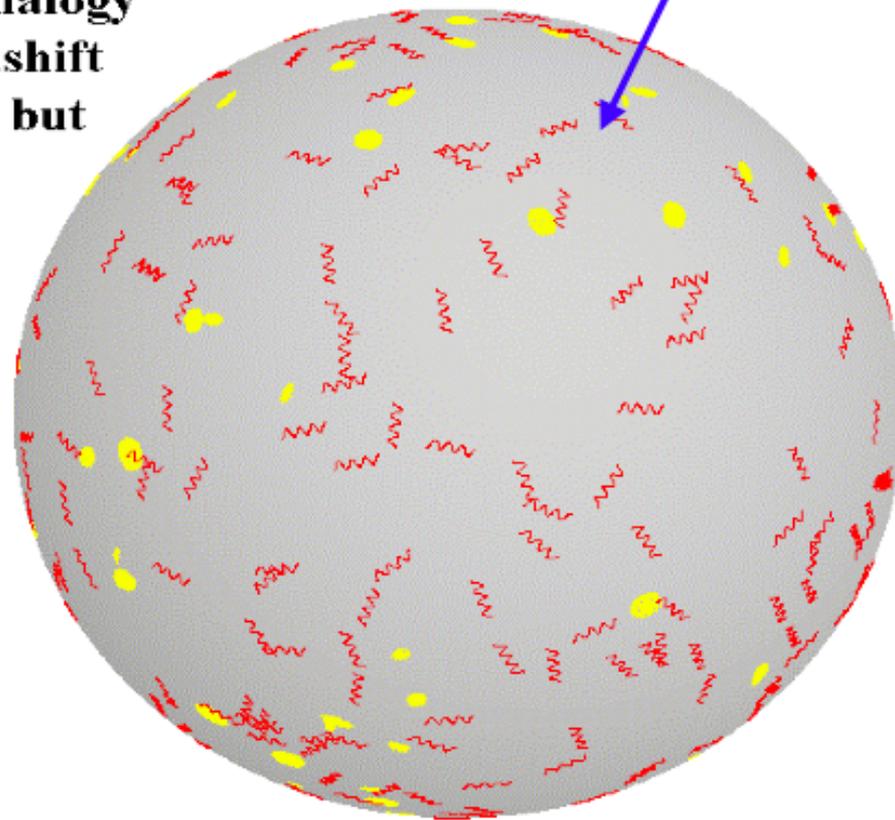
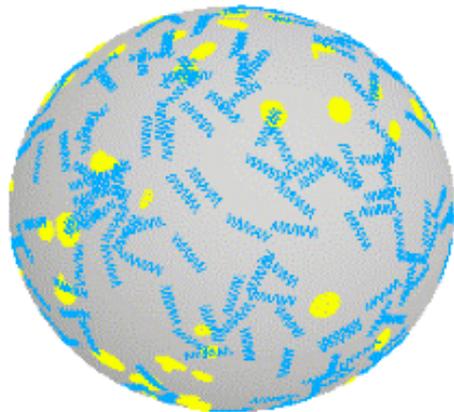
d: distanza (mega parsec, 1 parsec=31.10⁹ km)

H: costante di Hubble, 20-15 km/sec/10⁶ anni luce

Anno luce: distanza che la luce compie in un anno (v=299.792,458 km/sec), i.e. 9461 miliardi km.



Expanding Balloon Analogy
Photons move and redshift
Galaxies spread apart but
stay the same size



Più esterni,
più veloci

$$v = Hd$$

$$v = d/t$$

Quindi: $t = d/v \rightarrow t = \cancel{d/Hd}$

$$t = 1/H$$

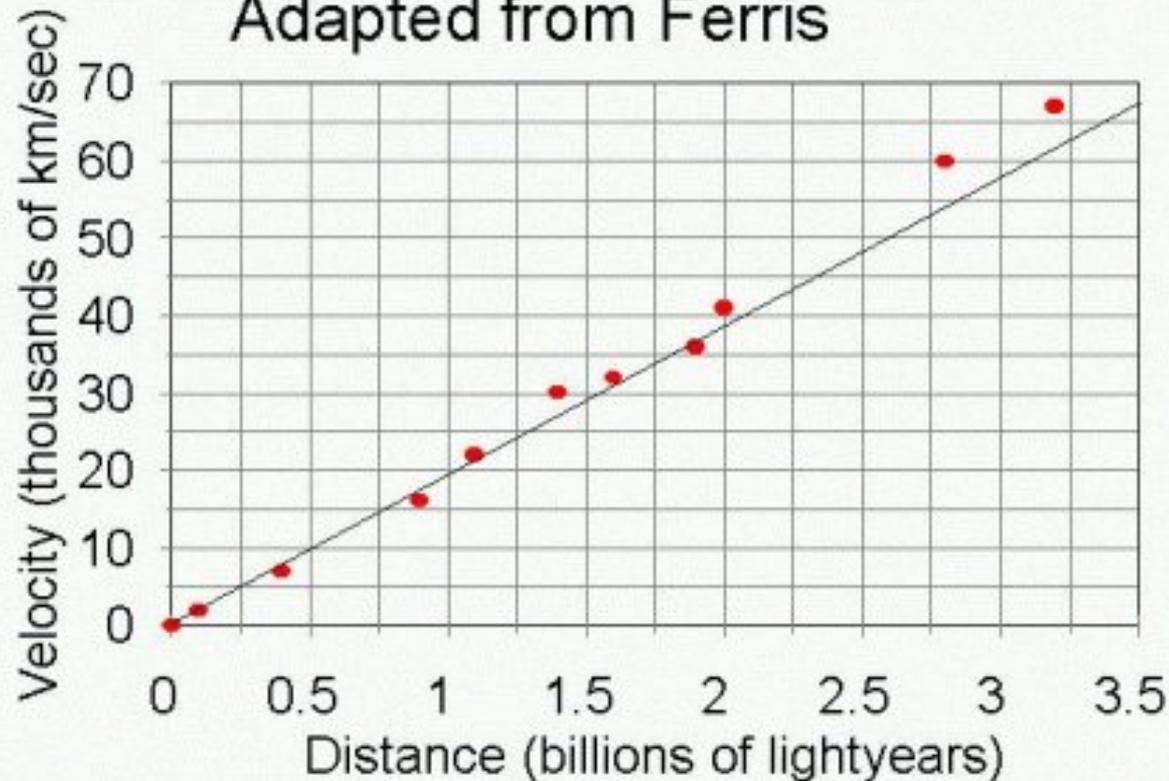


La Costante di Hubble secondo W. Baade è di $15 \text{ km/sec}/10^6$ anni luce: velocità di espansione dell'Universo, con un tempo di espansione calcolato da Hainebach et al. (1978) di: $14.5 \times 10^9 \text{ y}$

Più recentemente l'età è stata stimata essere $13.7 \pm 0.2 \text{ Ga}$

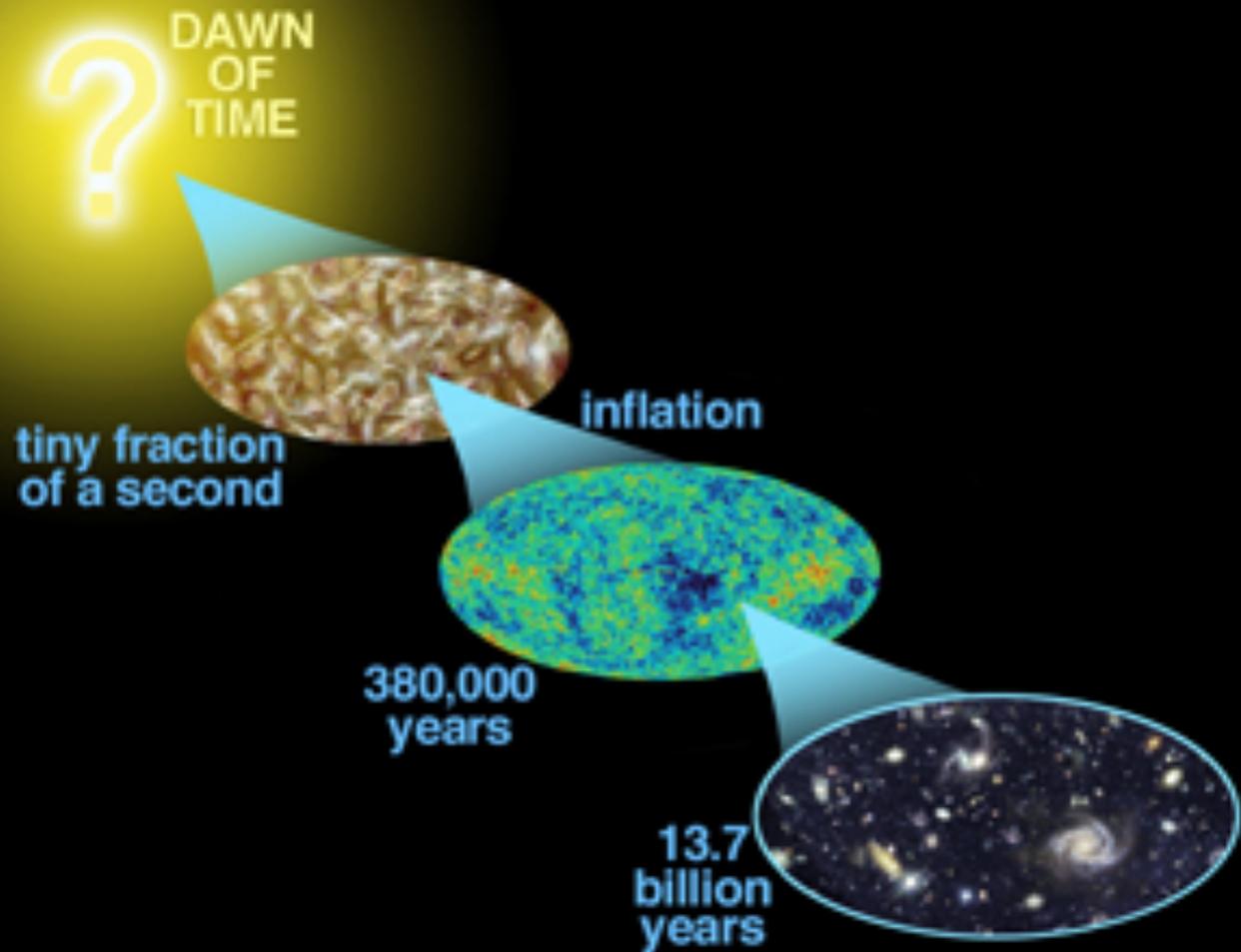
Galactic Red-Shifts

Adapted from Ferris



• La relazione fra distanza e il red-shift dimostra l'espansione uniforme. Questo implica un "punto sorgente" di origine.

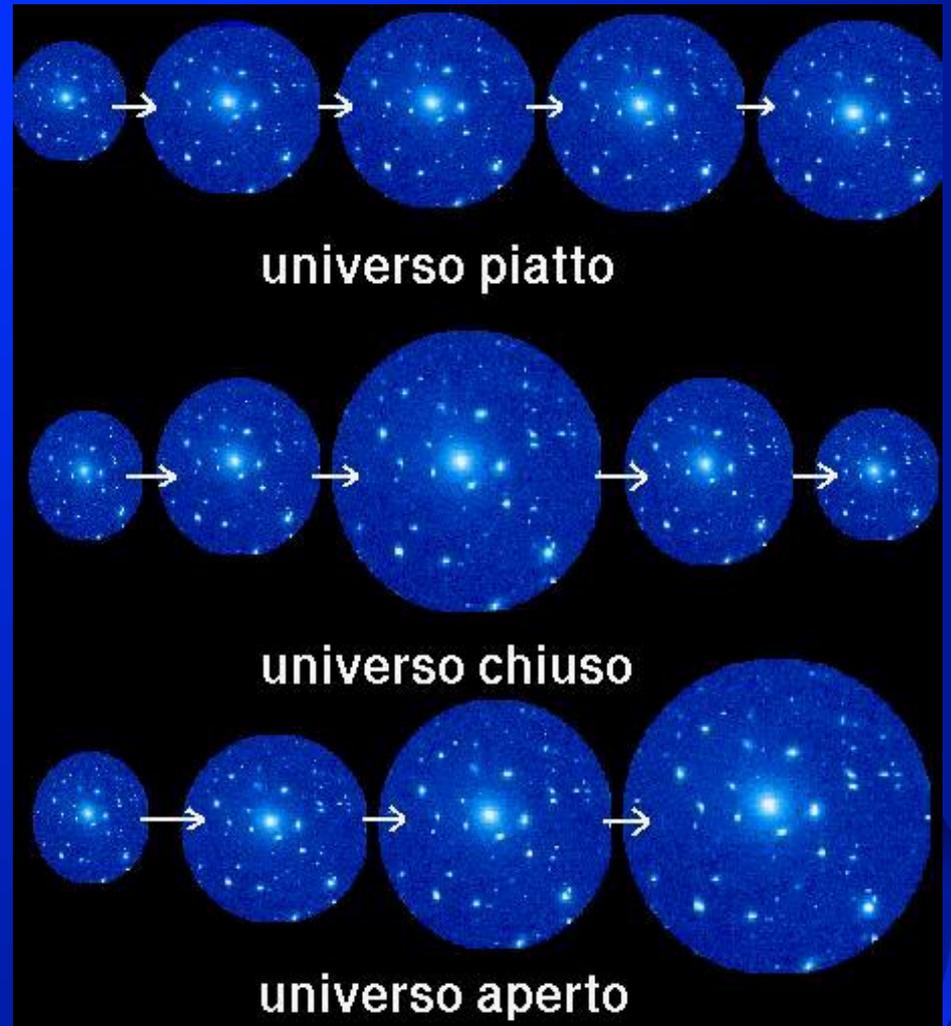
La Teoria del Big Bang



I possibili destini dell'Universo

Che cosa accadrà nei prossimi miliardi di anni?

- ❑ Teoria dell'espansione all'infinito: l'Universo continuerà ad espandersi finché tutte le stelle non si spegneranno;
- ❑ L'Universo oscillante: la velocità di espansione si dovrebbe arrestare per poi cambiare e provocare una contrazione;
- ❑ Teoria dello stato stazionario: l'Universo è sempre esistito e non avrà mai fine. Questa teoria è oggi ritenuta superata.



Gerarchicamente, la Materia dell'Universo può essere suddivisa in:

Agglomerati galattici

Galassie

Lo spazio fra stelle e galassie è occupato da raggi cosmici (particelle nucleari energetiche) e fotoni (luce)

Stelle, pulsar e buchi neri

Dimensione

Pianeti

Satelliti

Comete

Asteroidi

decrescente

Meteoriti

Polvere cosmica

Molecole

Atomi di H e He

Gas e particelle sono nello spazio fra le stelle ove si trovano: i) H e He originari; ii) elementi più pesanti per nucleosintesi nelle stelle prima della loro esplosione

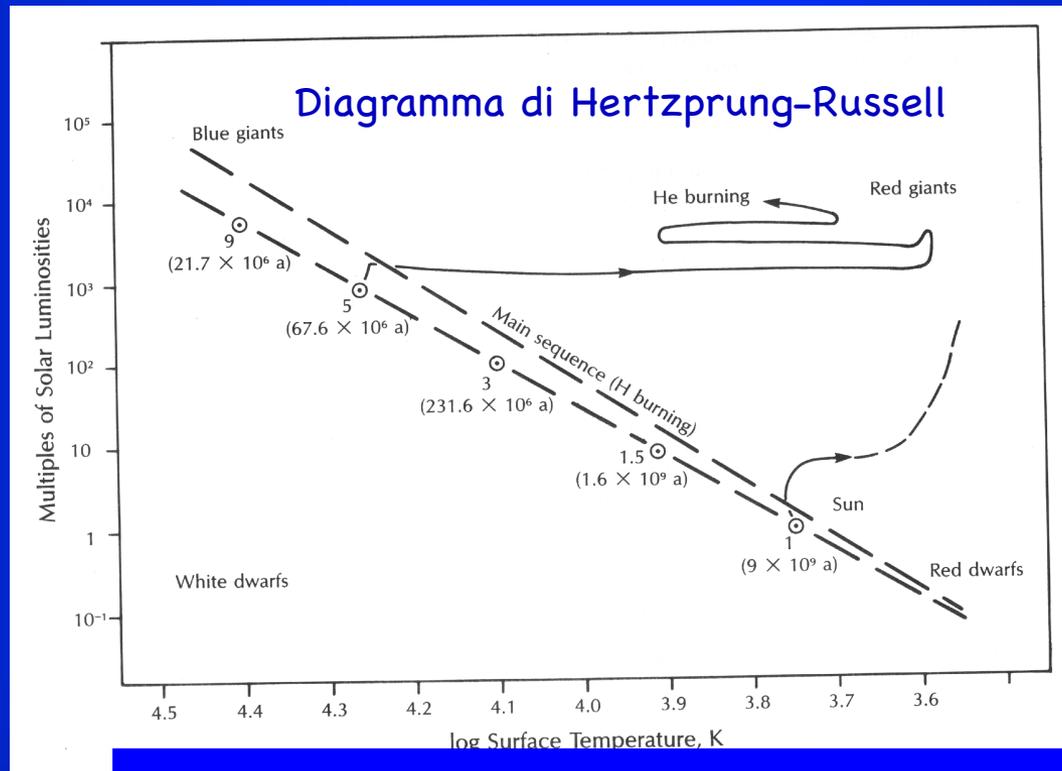


EVOLUZIONE DELLE STELLE

- ◆ L'evoluzione delle stelle è descritta da:
 - Luminosità \propto massa
 - Temperatura della superficie \propto volume
- Φ Le stelle si formano dalla contrazione del gas interstellare. Come la contrazione procede, la temperatura aumenta e vengono emessi IR e radiazioni sul visibile.
- Φ Quando $T \sim 20 \times 10^6$ K, la fusione di H è possibile. La maggior parte delle stelle derivano la propria energia dalla fusione di H e cadono nella sequenza principale del diagramma di Hertzsprung-Russell.



L'origine degli elementi



0 ° C = -273.15 K



Il diagramma è per masse solari da 1 a 9. Quando l'idrogeno è consumato nell'interno di una stella, questa evolve verso le "giganti rosse" che generano energia per fusione di He.



Una stella con massa superiore di 5 volte il Sole è circa 1000 volte più luminosa con T di 18.000 K, rispetto ai 5800 K del Sole. E rimane nella traiettoria principale per circa 68×10^6 anni.

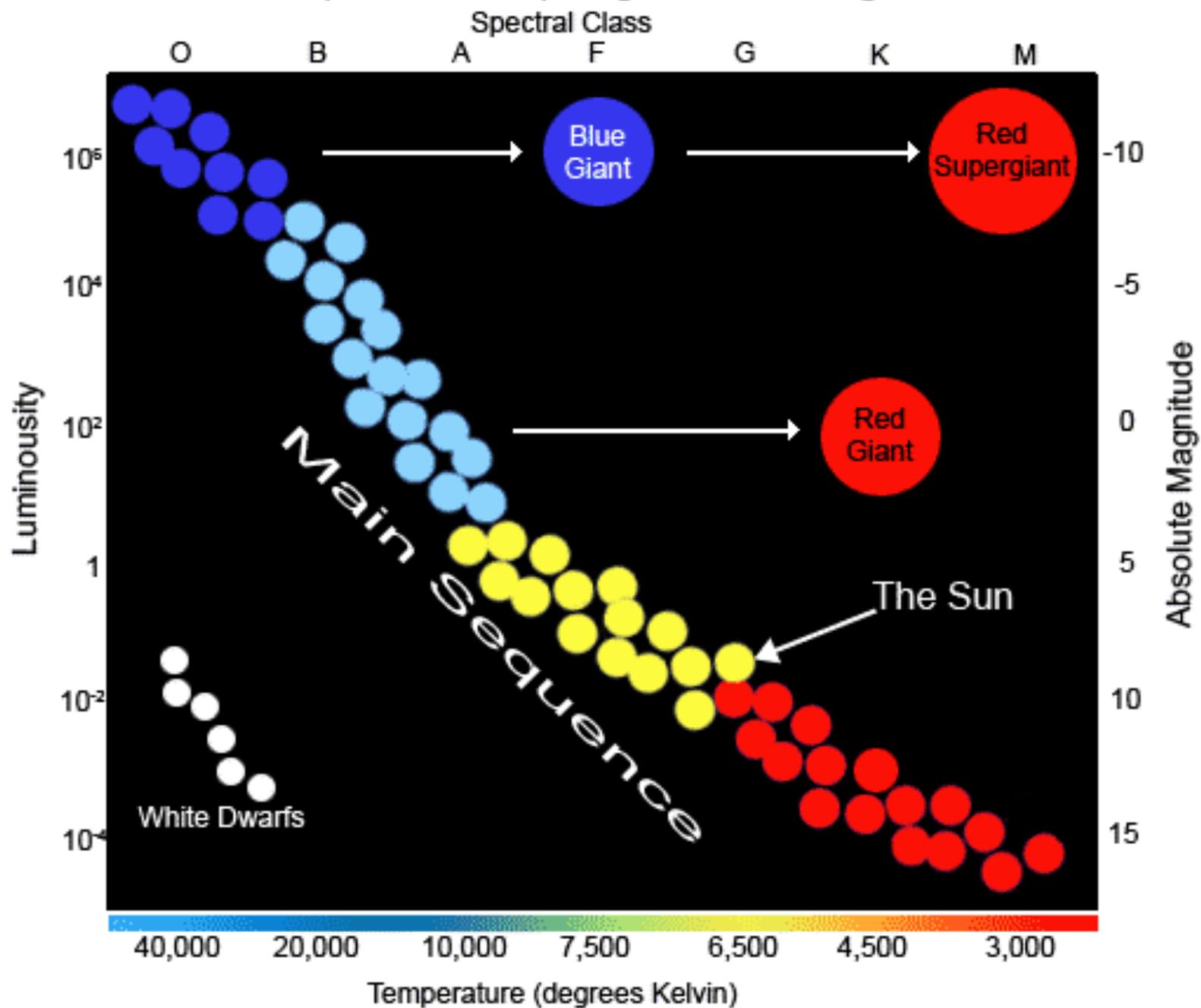


Il tempo per cui una stella sta nella sequenza principale dipende da:

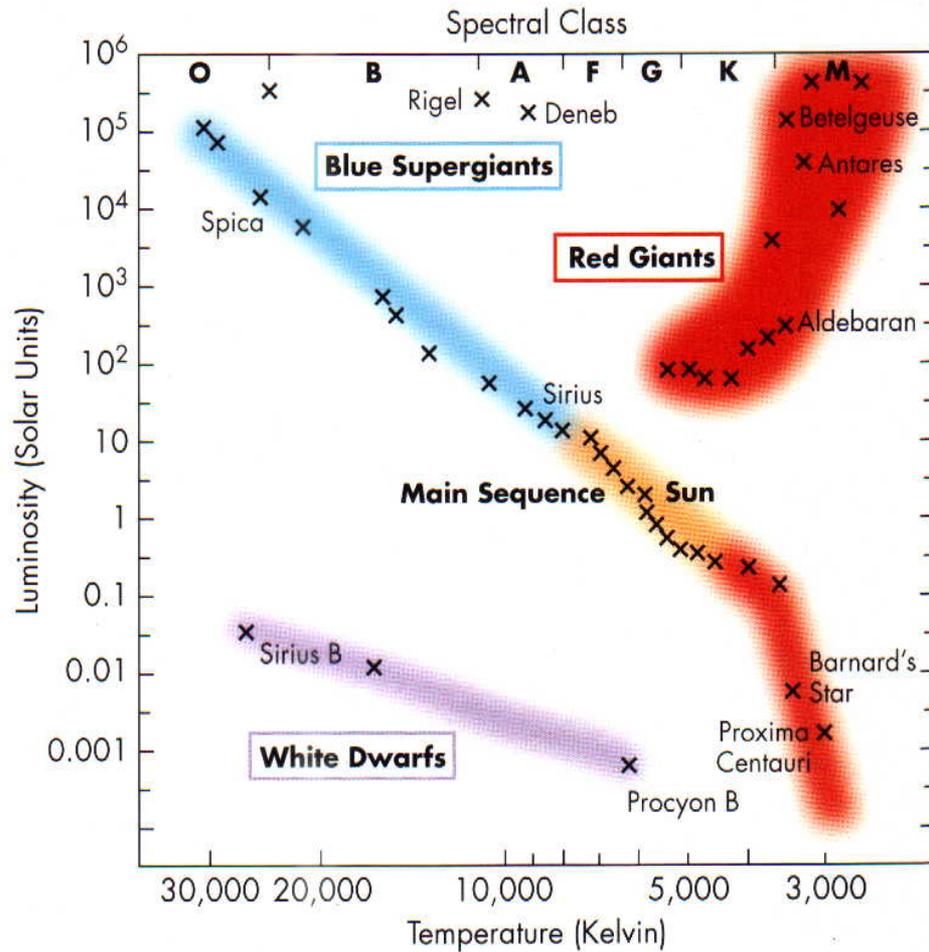
- massa
- rapporto iniziale H/He nella nebula gassosa



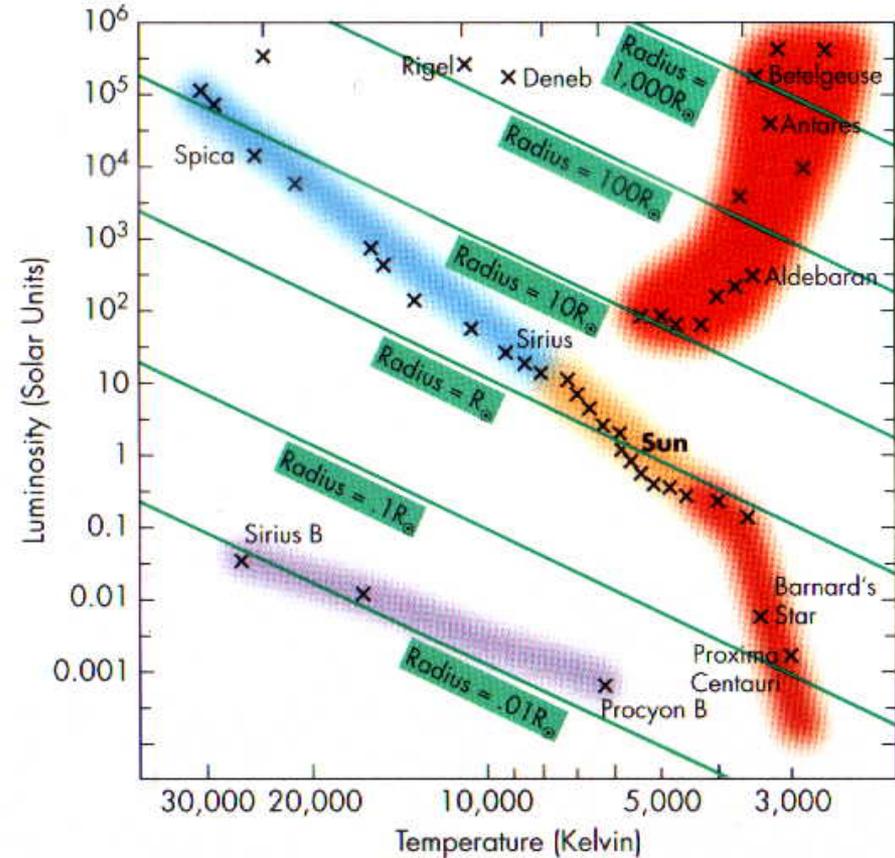
Simplified Hertzsprung - Russell Diagram



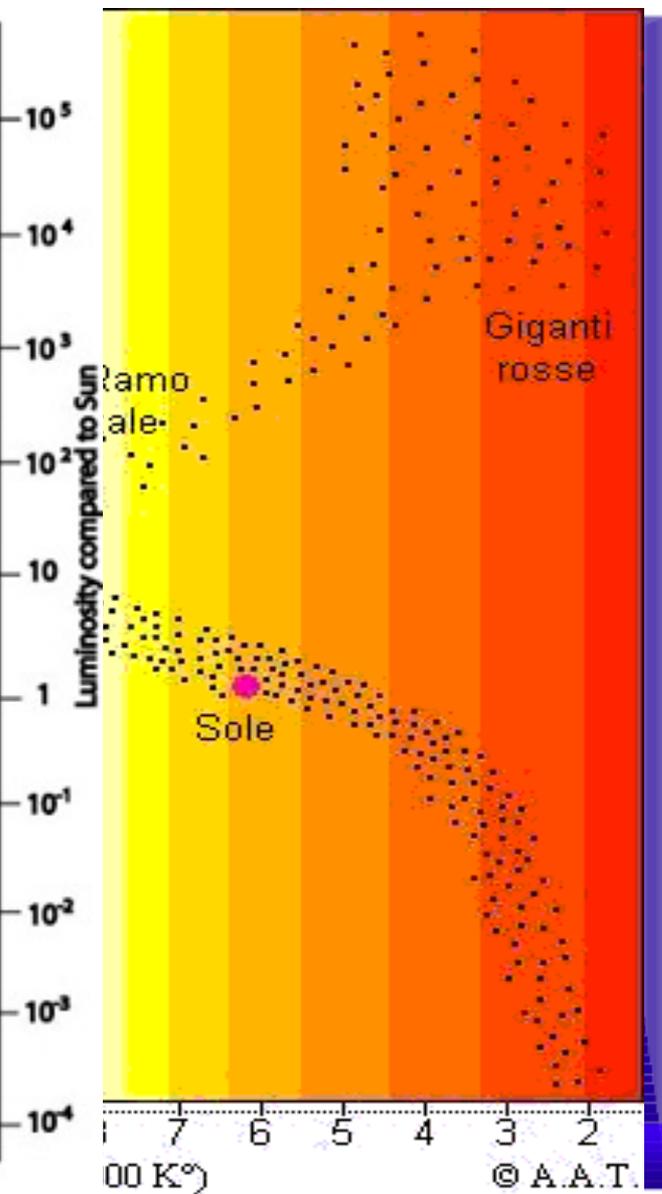
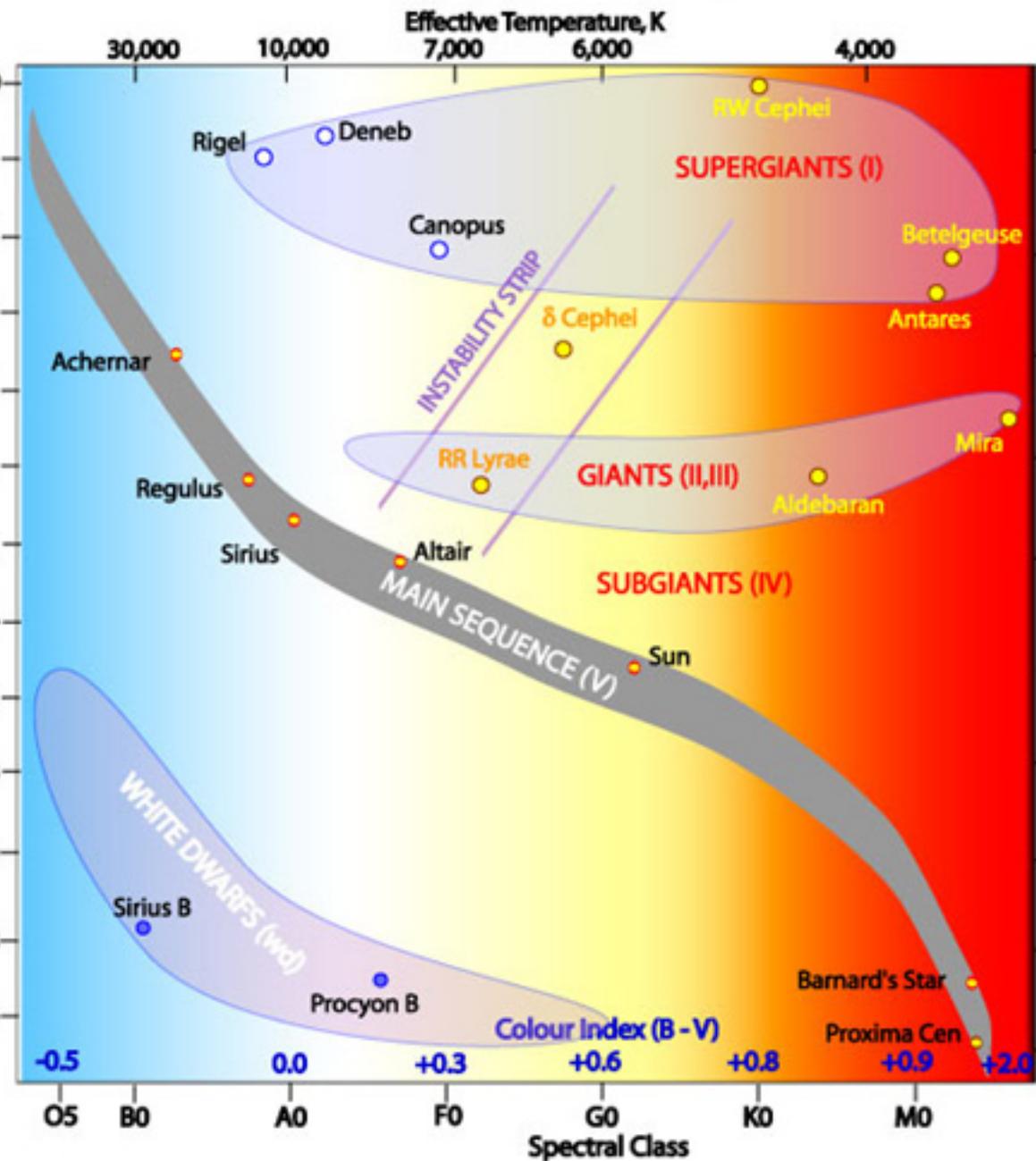
Masses on the Main Sequence



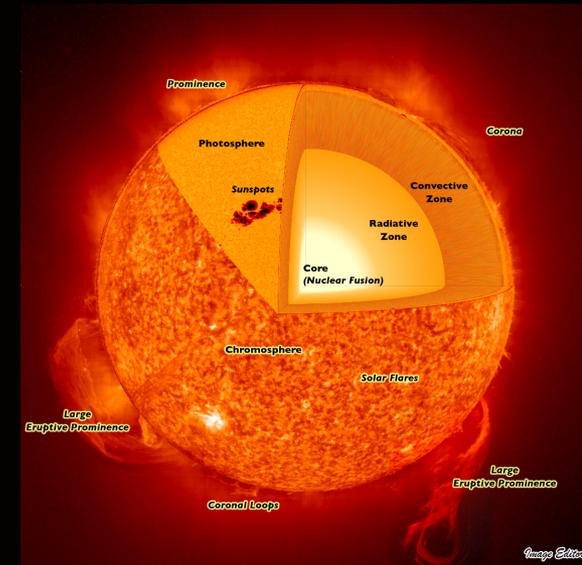
Stellar Sizes



Hertzprung-Russell Diagram



The Sun

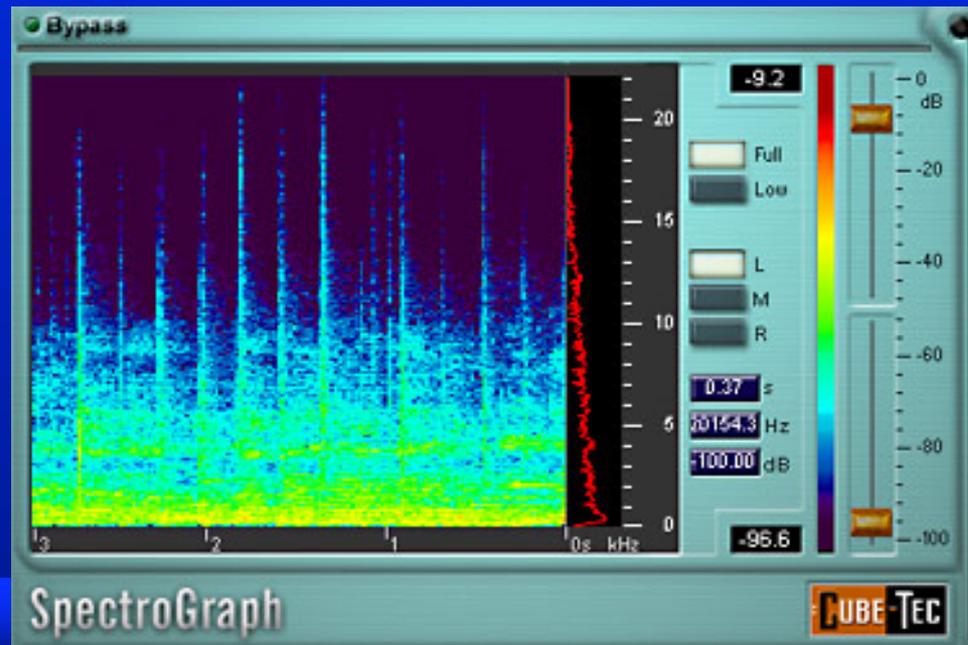


The energy output of the Sun is 4×10^{33} erg/s = 4×10^{20} megawatts

If the Sun were burning coal or gasoline, it could last a few thousand years.

Spectrographs

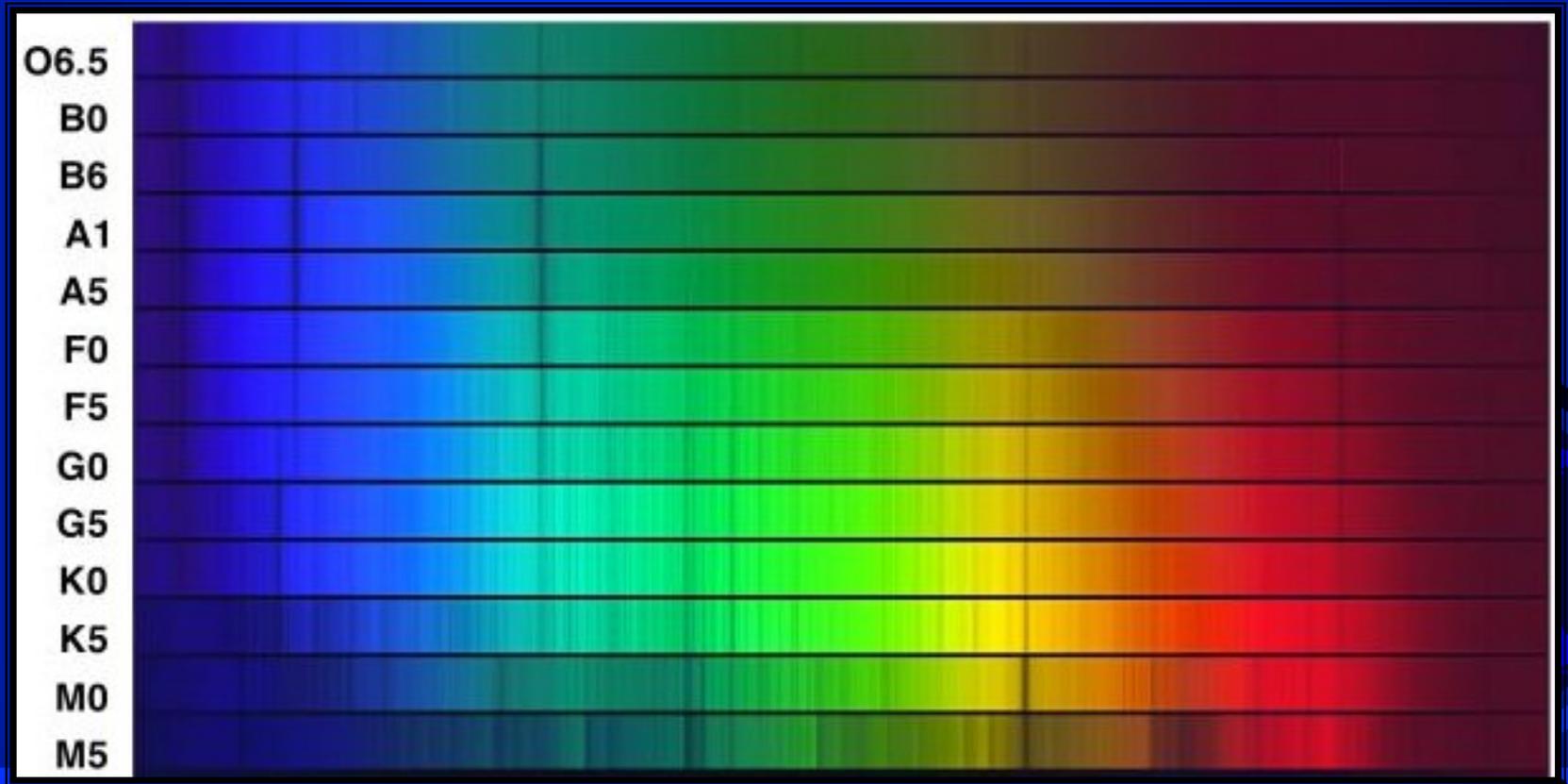
- ✦ Spectrograph: Breaks the light from an object into colors and photographs the resulting spectrum.
- ✦ Astronomers use spectrographs to get information about stars, including their chemical compositions and temperatures.



Spectral types

Classification according to spectrum (ex: strength of hydrogen lines)

→ **O B A F G K M** sequence (*Oh be a fine girl, kiss me...*)



Chemical Composition and Temperature of Stars

- ✦ Chemical elements in a star's atmosphere absorb light from the star. Each element absorbs light at different wavelengths. Thus, the comparison with known spectrums of different elements, astronomers can infer which elements are found in a star.
- ✦ Chemical composition of stars are about 73% hydrogen, 25% helium, and 2% other elements. By comparing a star's spectrum with the known spectrums of elements at different temperatures, astronomers can infer how hot the star is.



In Geochimica gli elementi vengono espressi in vari modi

- *Per origine nucleosintetica e proprietà nucleari*
 - primordiale, H-burning, processi di giganti rosse, cattura neutronica
 - stabili, radioattivi a lunga vita, radioattivi a vita breve (estinti?)
- *Per volatilità in equilibri gas-solido, i.e. per temperature di condensazione*
 - refrattari, moderatamente volatili, altamente volatili
- *Per affinità durante la differenziazione chimica della Terra*
 - siderofili, litofili, atmofili
- *Per compatibilità (rapporto di concentrazione solido/fuso) nelle rocce ignee*
 - compatibili, incompatibili, molto incompatibili; generalmente in funzione del raggio ionico e della carica (posizione nella tavola periodica)
- *Per abbondanza, maggiore di, minore di, ecc.*



How do we know the abundances of the elements in the solar system?

Spectroscopic investigations of the Sun and other stars

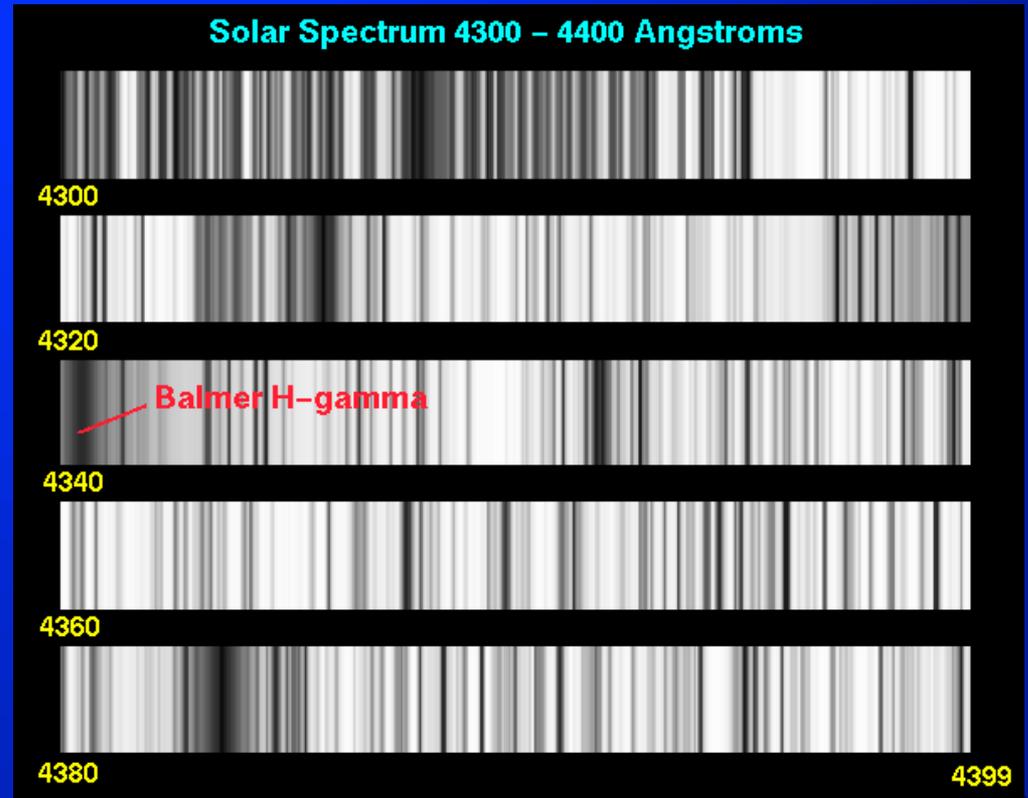
Meteorites, terrestrial and extra-terrestrial rocks

Indirect measurements based on physical properties



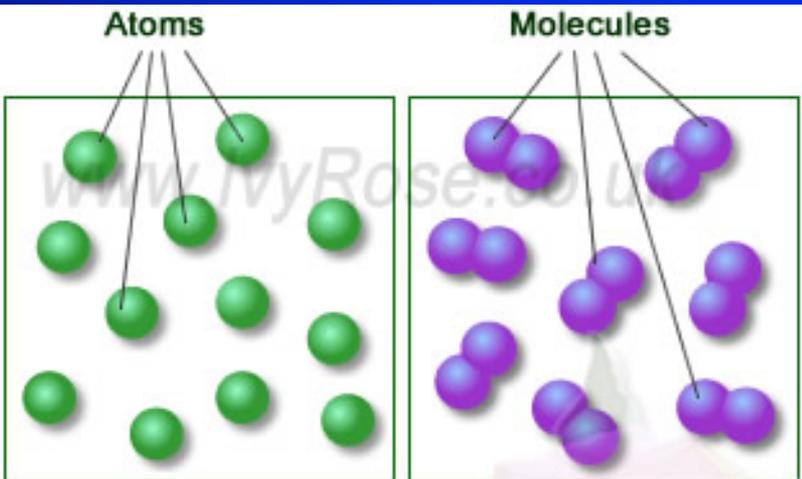
The Solar Atmosphere

- ✓ The solar spectrum has *thousands of absorption lines*
- More than 67 different elements are present!
- *Hydrogen* is the most abundant element followed by *Helium* (1st discovered in the Sun!)



Spectral lines only tell us about the part of the Sun that forms them (photosphere and chromosphere) but these elements are likely representative of the entire Sun.

Elements



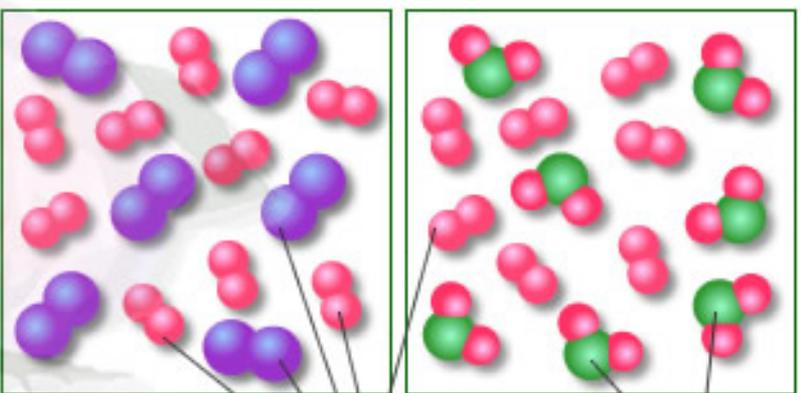
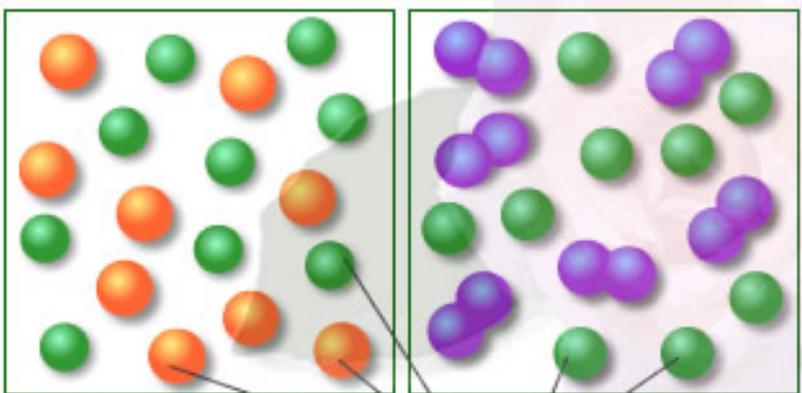
Atoms are represented by single spheres.
Spheres of the same size and colour represent atoms of the same element.

Molecules are represented by two or more spheres joined together.

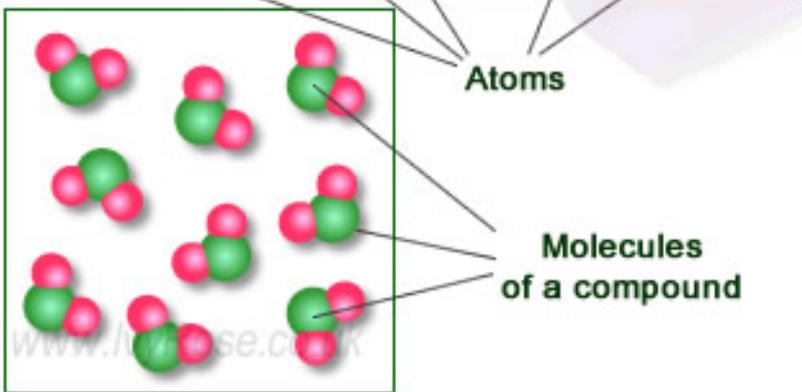
Molecules of Elements are represented by two or more spheres of the same size and colour joined together.

Molecules of Compounds are represented by two or more spheres of different sizes and colours joined together.

Mixtures

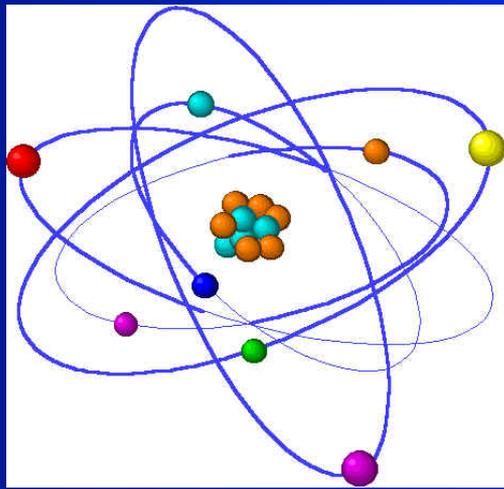


Compounds

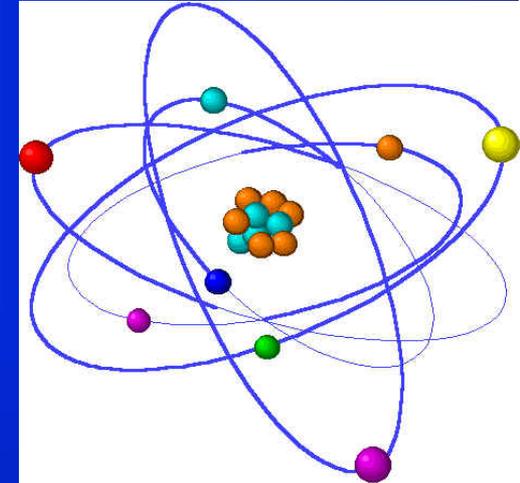


Molecules of an element

Molecules of a compound

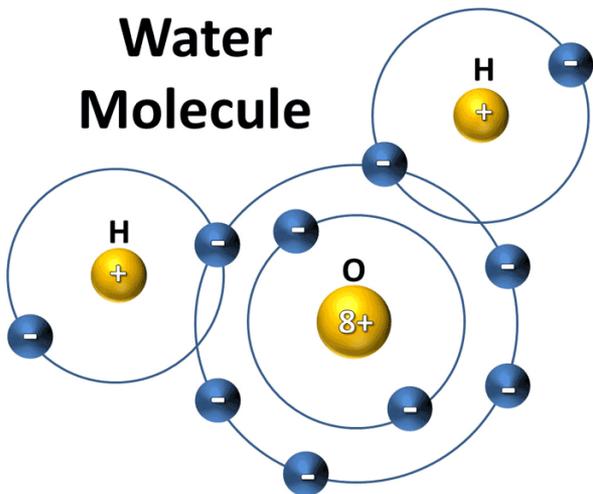


Un elemento è una sostanza che non può trasformarsi in un'altra per mezzo di reazioni chimiche ORDINARIE



Un atomo è la più piccola unità di sostanza che contiene le proprietà di quell'elemento

Water Molecule



La molecola è la più piccola unità di un composto che contiene le proprietà di quella sostanza



Struttura atomica

Protoni e neutroni formano il nucleo di un atomo

Il nucleo rappresenta una piccola frazione del volume ma praticamente tutta la massa

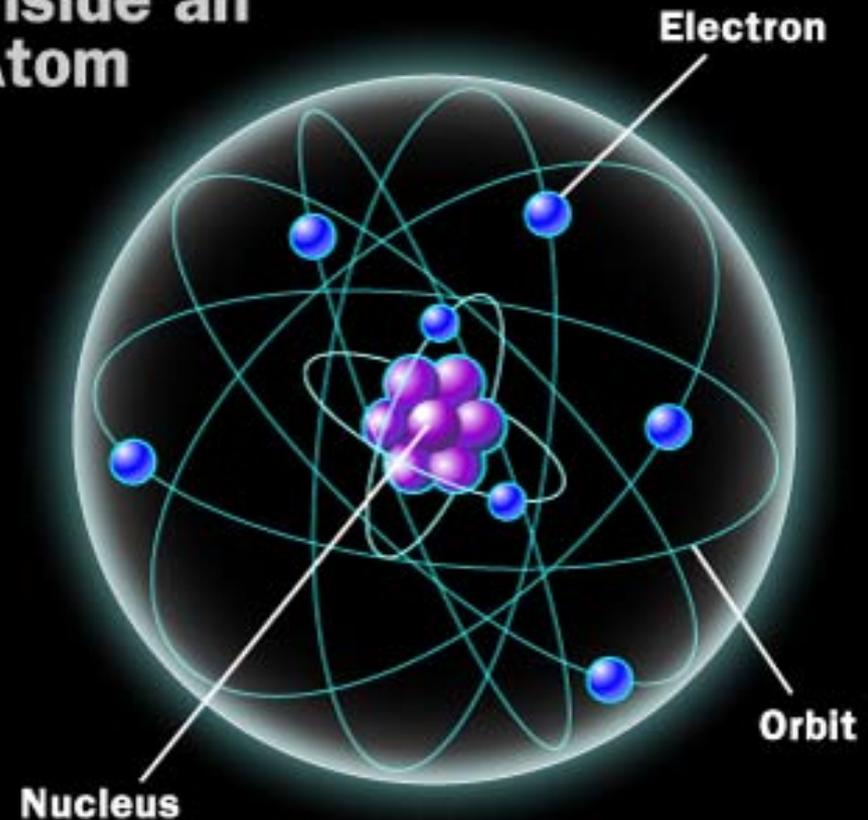
Gli elettroni gravitano attorno al nucleo in orbite discrete o livelli di energia

Le orbite rappresentano quasi tutto il volume di un atomo ma solo una frazione della massa

Elettroni e protoni sono uguali in un atomo neutro

Le reazioni chimiche ORDINARIE coinvolgono solamente gli elettroni più esterni (valenza)

Inside an Atom



©2003 HowStuffWorks



The origin of the elements

The process that allows the creation of the elements (nucleus), e.g. (synthesized) is named **Nucleosynthesis**

Nucleosynthesis is occurring since the formation of the Universe

The elements tend to be associated each other to form any kind of material, including the human beings



Un nucleo atomico lo possiamo descrivere secondo questa semplice equazione

$$A = Z + N$$

A: Numero di Massa

Z: Numero Atomico (o di protoni)

N: Numero di neutroni



NUCLIDE: Un tipo di nucleo specificato dal suo numero atomico, dalla sua massa atomica e dal suo stato di energia.

NUCLEONE: un protone o un neutrone, come parte di un nucleo atomico.



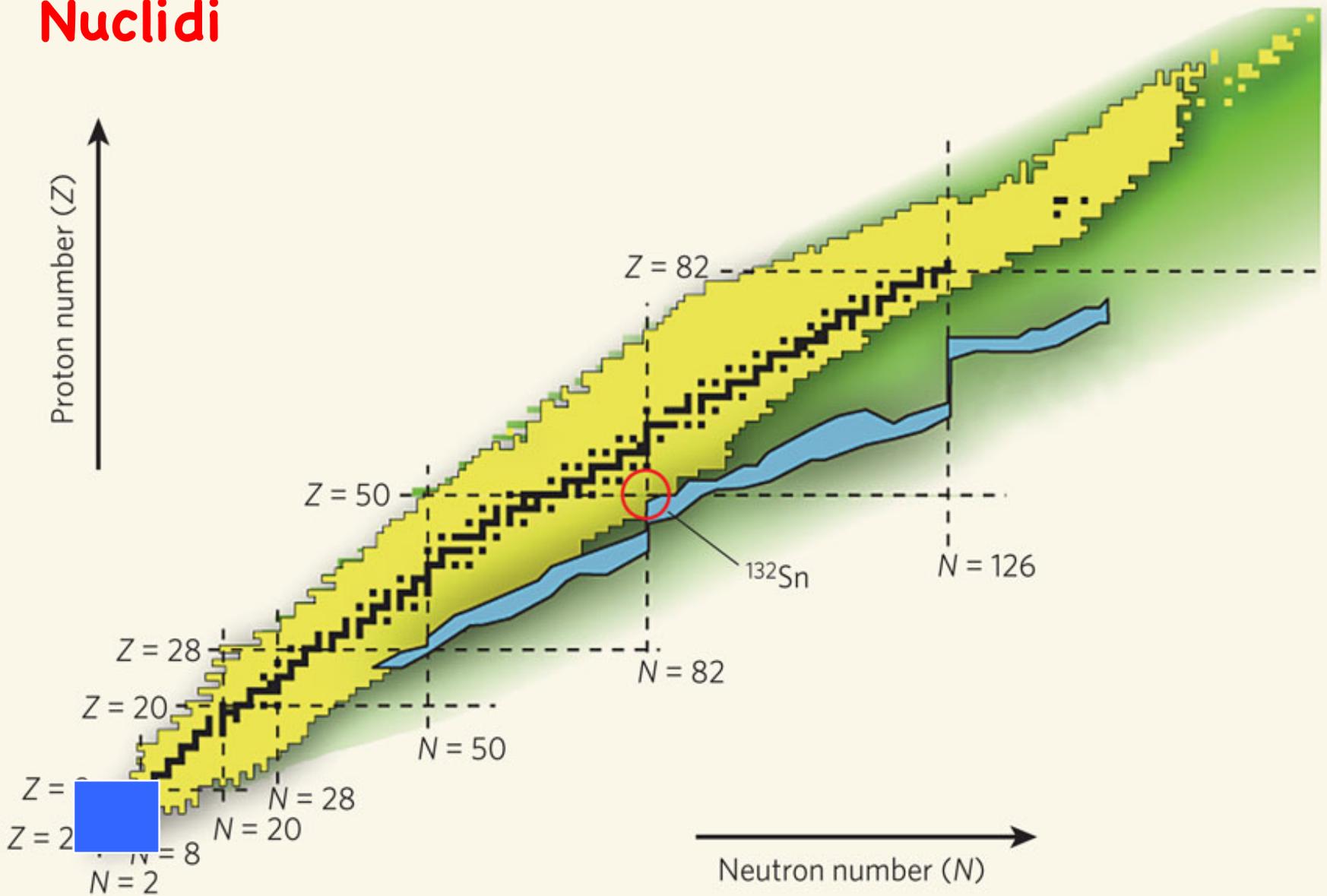
NUCLIDE: Un tipo di nucleo specificato dal suo numero atomico, dalla sua massa atomica e dal suo stato di energia.

Questo significa che possiamo avere dei nuclei con differenti quantità di neutroni e protoni. Il numero di neutroni e di protoni "dettano" la stabilità o meno di un nucleo che può essere:

STABILE o RADIOATTIVO



Carta dei Nuclidi

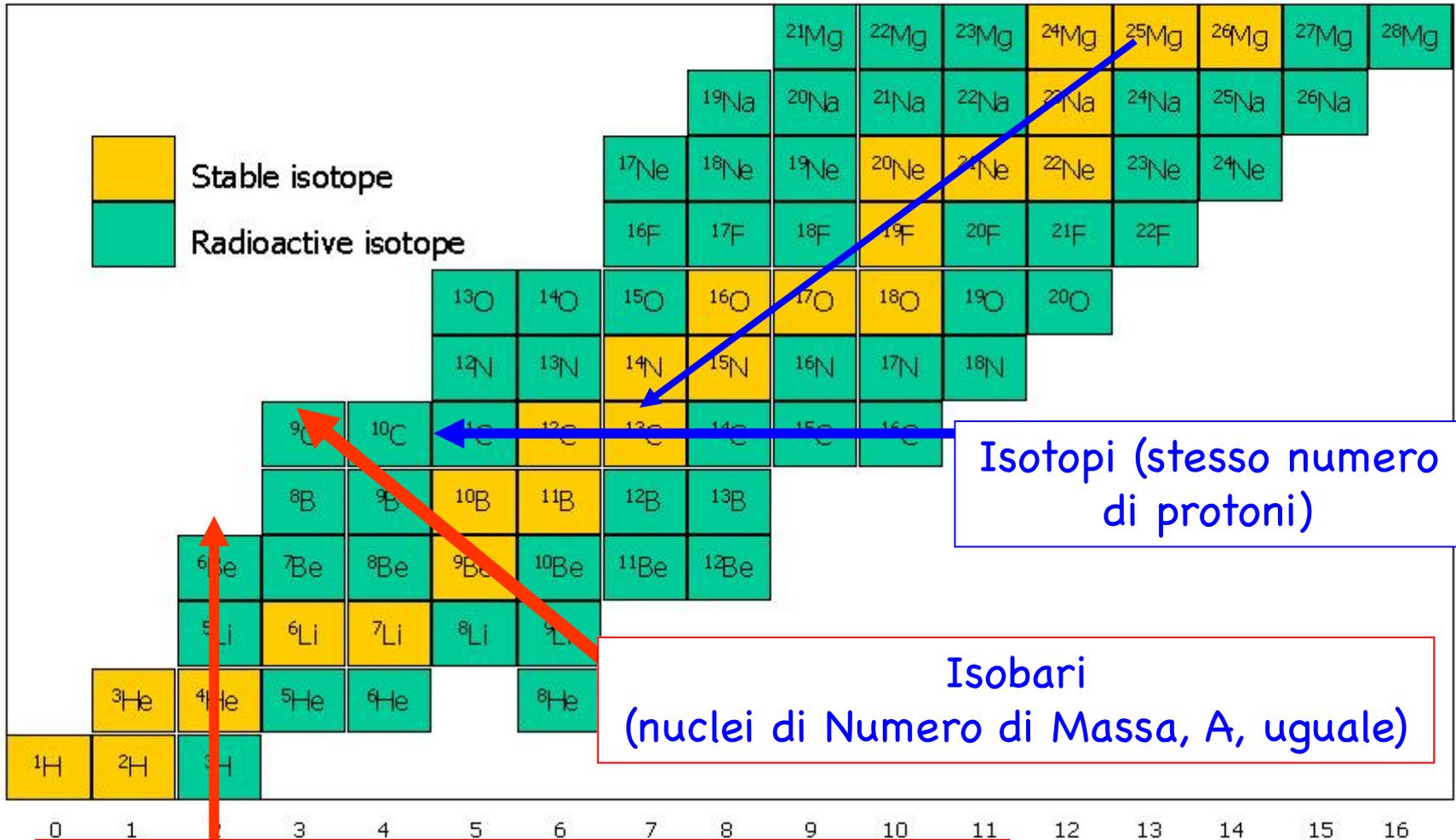


Difetto neutroni

$$Z/N \approx 1$$

Eccesso neutroni

Proton number(Z)

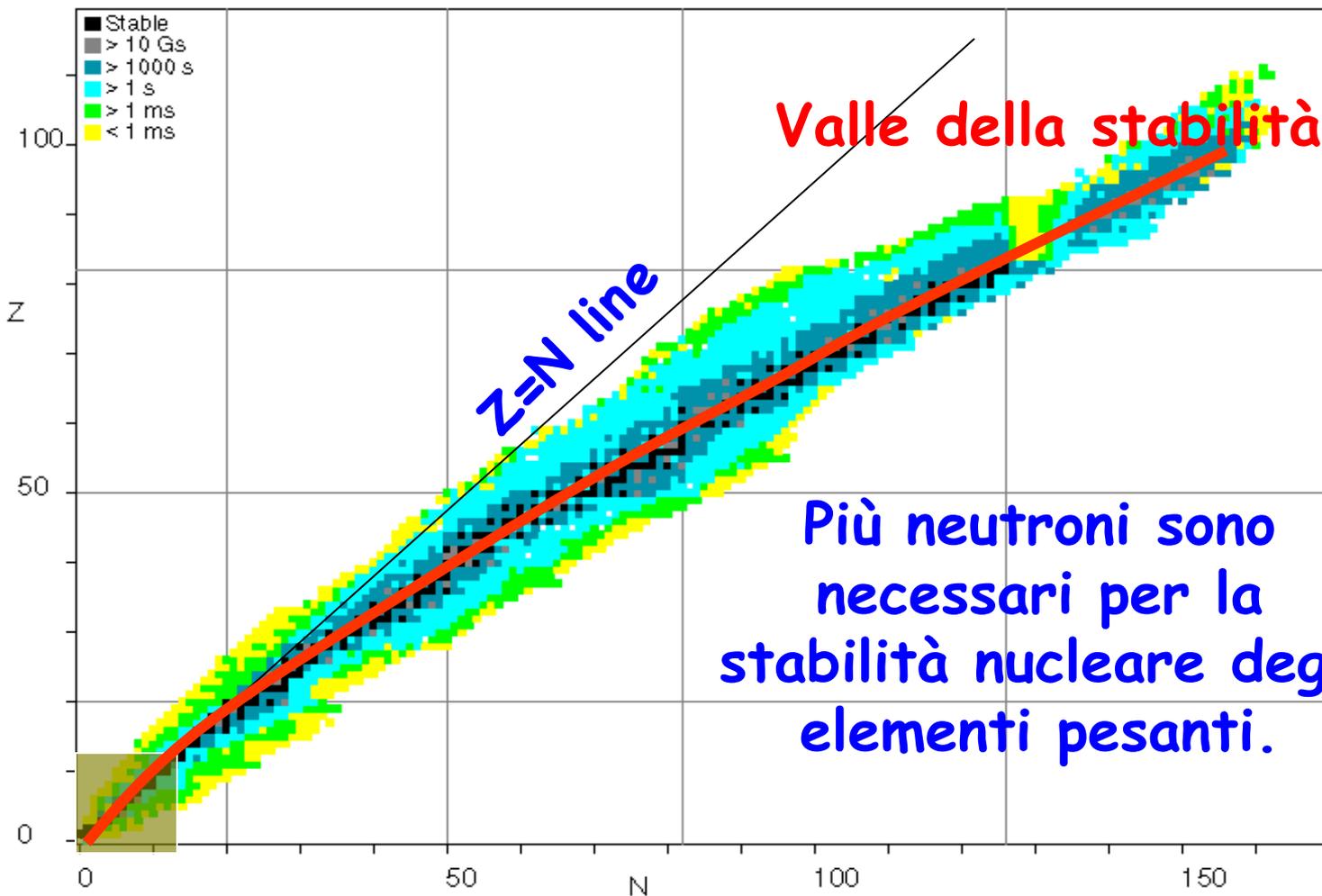


Isotopi (stesso numero di protoni)

Isobari (nuclei di Numero di Massa, A, uguale)

Isotoni (nuclei con stesso numero di neutroni)

Numero di protoni



Numero di neutroni

Gli isotopi che sono lontani dalla linea di stabilità tendono ad approssimarsi a questa tramite il decadimento radioattivo!!

ISOTOPI

Nuclidi di un elemento con differente numero di neutroni sono chiamati ISOTOPI.

Gli isotopi possono essere STABILI o INSTABILI:

- STABILI mantengono le proprietà di tutti i loro protoni e neutroni inalterati nel tempo!
- INSTABILI O RADIOATTIVI: isotopi che spontaneamente perdono o modificano le proprie particelle sub-atomiche



Isotopi stabili e instabili

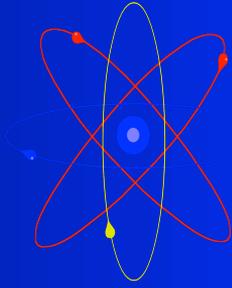
Isotopi stabili: Qualsiasi isotopo che non produce un prodotto di decadimento, e.g. ^{39}K

Isotopi radioattivi o instabili: Qualsiasi isotopo che produce con il tempo un prodotto di decadimento misurabile, e.g. ^{40}K con tempo di dimezzamento di 1.28×10^9 y

Il tempo di dimezzamento (o emivita) di un isotopo radioattivo si definisce come il tempo occorrente affinché la metà di tali isotopi decadano nell'isotopo di un altro elemento o in un altro isotopo dello stesso elemento. L'emivita misura la stabilità di un isotopo: più breve è l'emivita, meno stabile è l'atomo.



Particelle nucleari



Atomo: consiste di protoni, neutroni & elettroni

● **Protone, massa = 1.007277 amu**

● **Neutrone, massa = 1.008665 amu**

$1 \text{ amu} = 1.660 \times 10^{-27} \text{ kg.}$

● **Elettrone, massa = 0.000549 amu**

1 Atomic Mass Unit (amu) = 1/12 del ^{12}C



Particelle nucleari

- Beta (β^-), massa = 0.000549 amu
- Positrone (β^+), massa = 0.000549 amu



Alfa (α), mass = ~ 4 amu



γ ray, no massa



X ray, no massa



Classificazione delle Particelle Nucleari



alfa (α), 2p e 2n



Protone, carica +1



Elettrone, carica -1



Negatroni (β^-), carica -1



Positrone (β^+), carica +1



Neutrone



γ ray



X ray

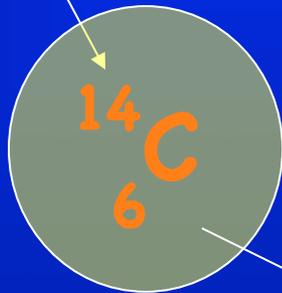


$$A = Z + N$$

Numero di
Massa

Numero Atomico
o di Protoni

Numero di
Neutroni

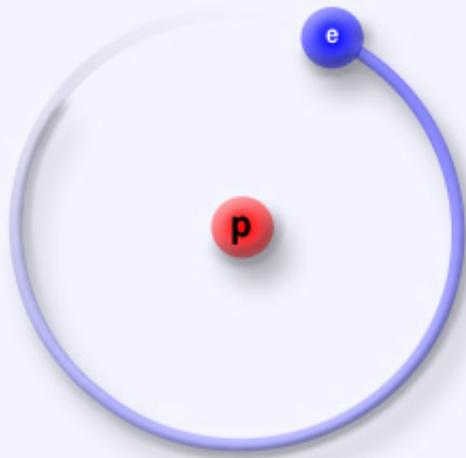


$$14 - 6 = 8$$

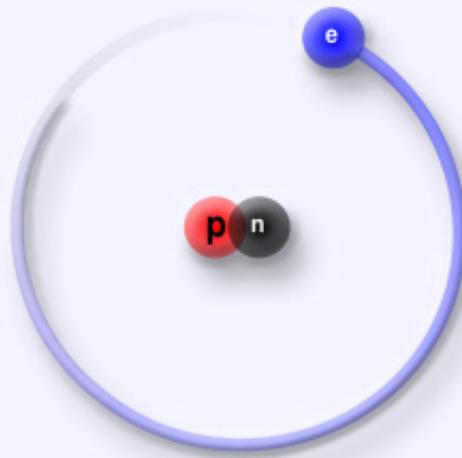
A Z N



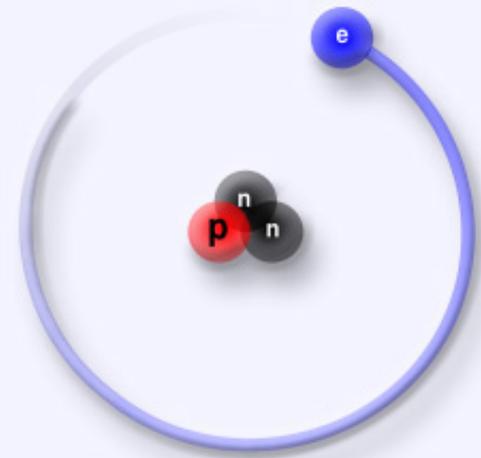
Gli isotopi dell'IDROGENO



Protium



Deuterium

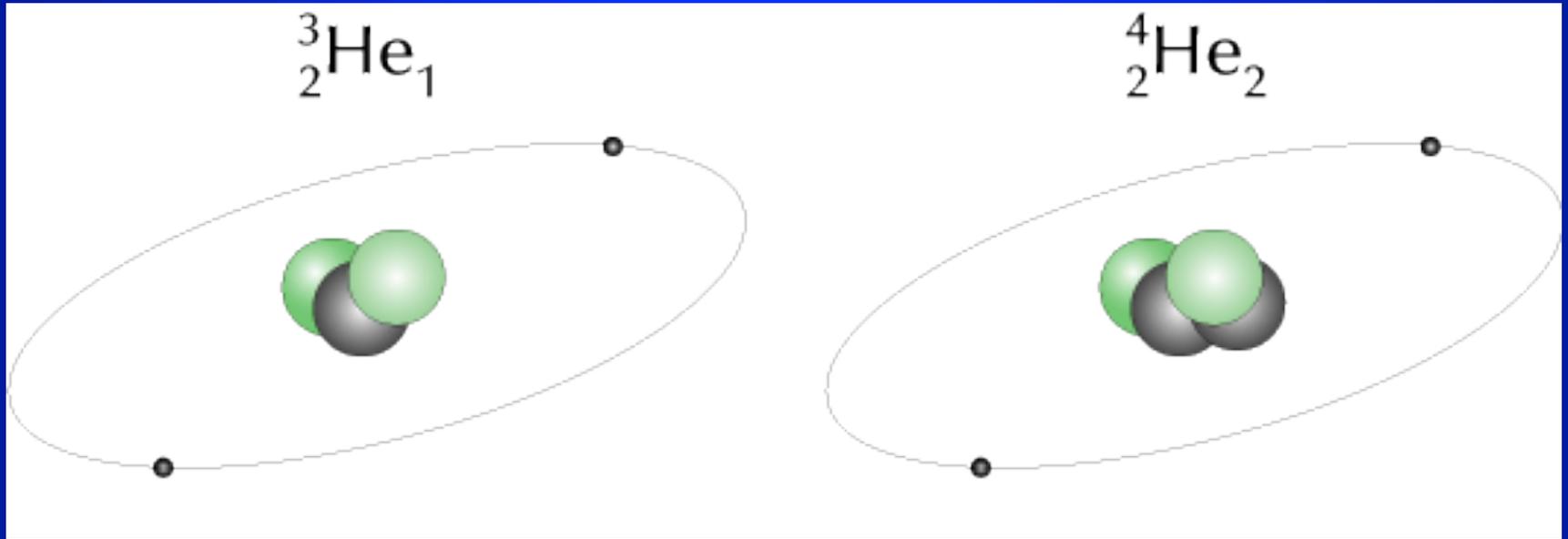


Tritium

Gli atomi di idrogeno contengono solamente un protone (prozio). Ognuno di questi atomi ha una massa di 1.008 amu. Esistono atomi di H che hanno sia 1 (deuterio) che 2 neutroni (trizio) oltre al singolo protone. Questi sono chiamati deuterio e trizio con masse di 2.014 e 3.016 amu

(amu: atomic mass unit riferita a ${}^{12}_6\text{C}$ che per definizione ha 12 amu)

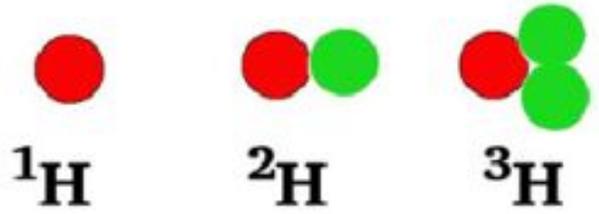
Gli isotopi dell'ELIO



Sono due gli isotopi dell'Elio: ${}^3_2\text{He}$ e ${}^4_2\text{He}$.
Quest'ultimo ha 2 protoni e 2 neutroni, i.e.
particella α !



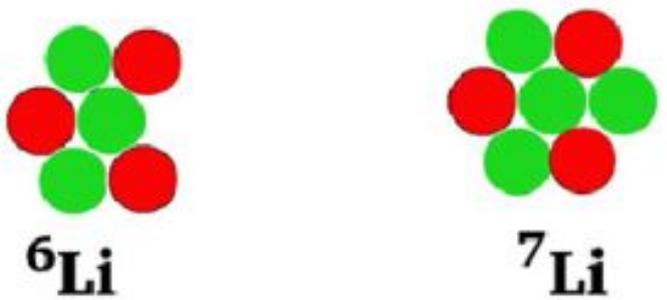
Hydrogen
1 proton



Helium
2 protons



Lithium
3 protons



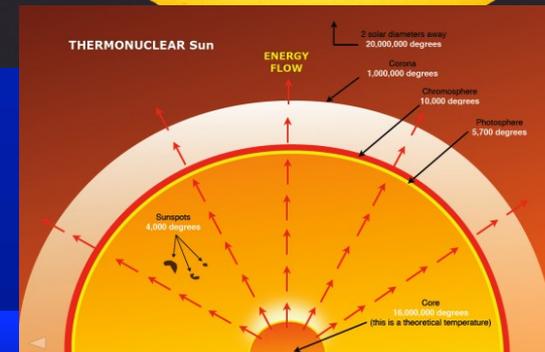
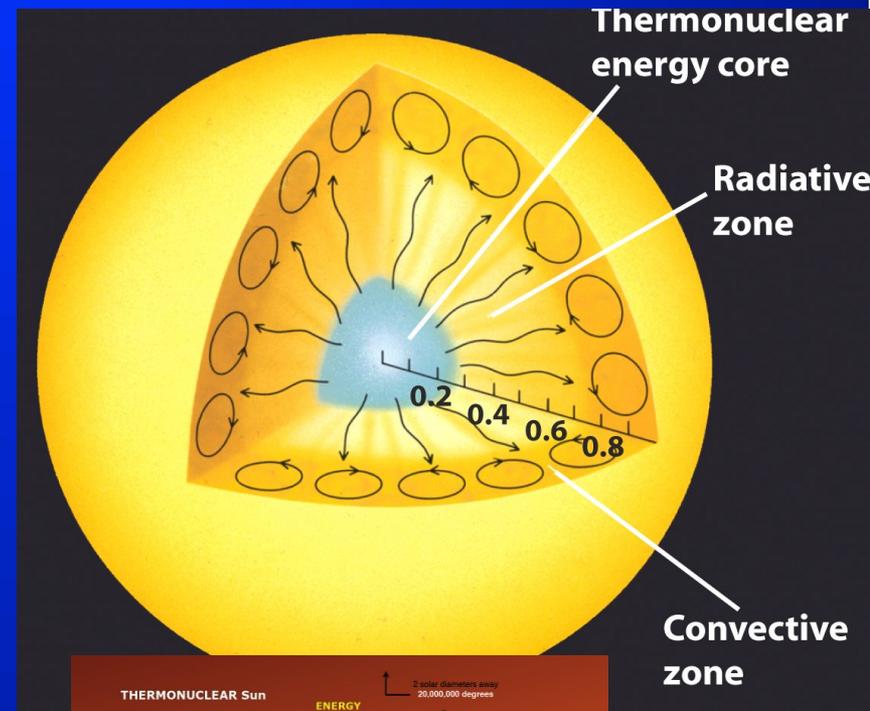
La sommatoria delle masse isotopiche in funzione della loro abbondanza darà il peso atomico

15.9994 g/mol

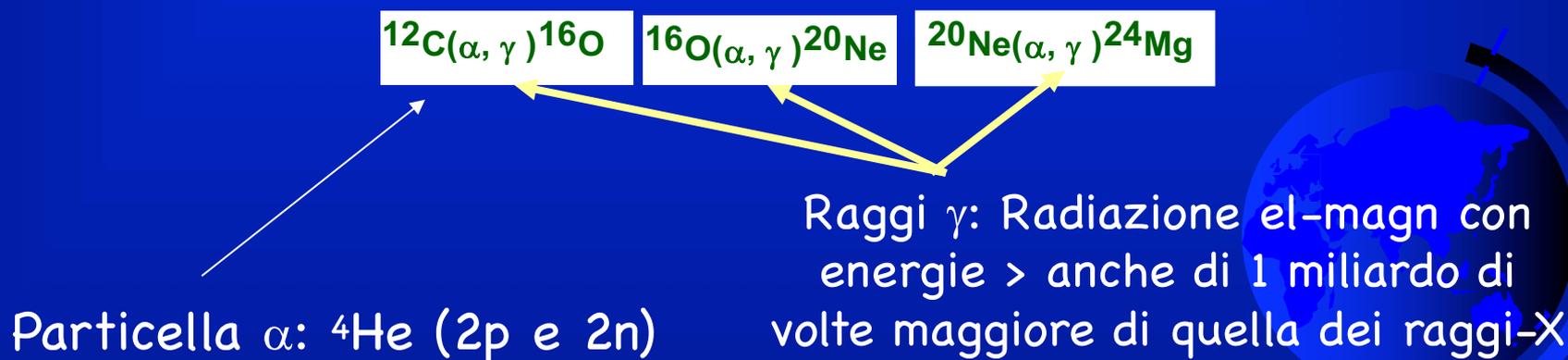
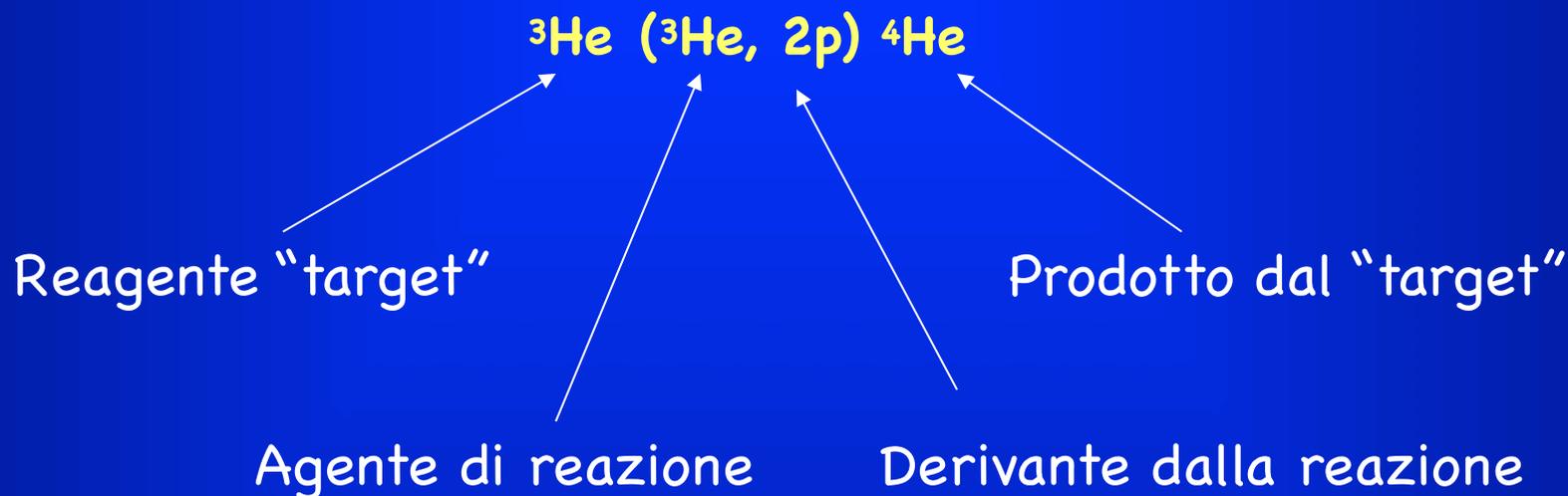
99.759% ${}^{16}\text{O}$;
 0.0374% ${}^{17}\text{O}$;
 0.2039% ${}^{18}\text{O}$.

A theoretical model of the Sun shows how energy gets from its center to its surface

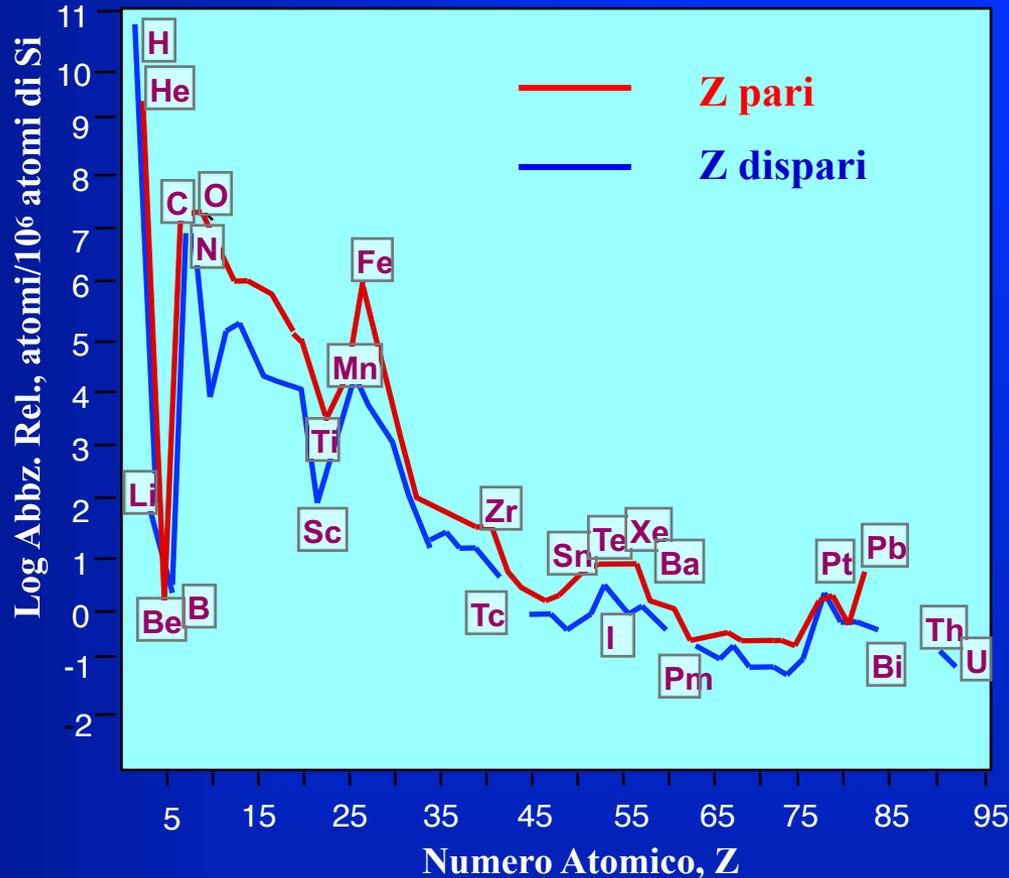
- ✦ Hydrogen fusion takes place in a core extending from the Sun's center to about 0.25 solar radius
(radius: 695,500 km vs. 6378 km – Earth)
- ✦ The core is surrounded by a radiative zone extending to about 0.71 solar radius
 - In this zone, energy travels outward through radiative diffusion
- ✦ The radiative zone is surrounded by a rather opaque convective zone of gas at relatively low temperature and pressure
 - In this zone, energy travels outward primarily through convection



Come si scrive e legge una reazione nucleare



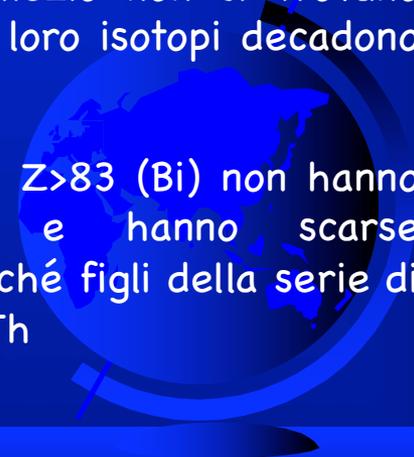
Abbondanza ed Origine degli Elementi nel Sistema Solare

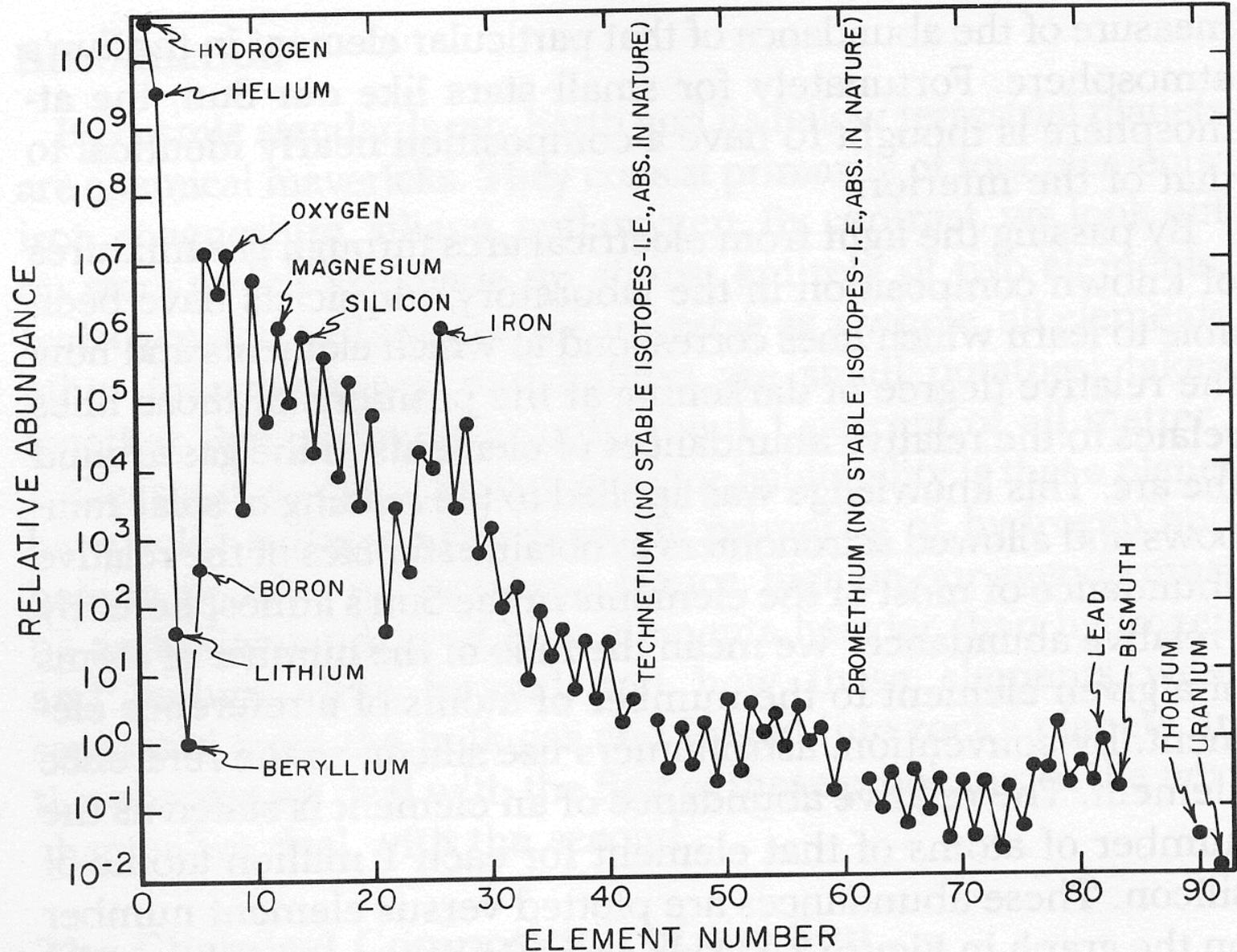


I valori sono normalizzati a 10⁶ atomi di Silicio

Come si possono spiegare queste abbondanze ed andamenti?

- ★ H e He sono i più abbondanti: H/He=12.5
- ★ Le abbondanze dei primi 50 elementi diminuiscono esponenzialmente
- ★ Le abbondanze degli elementi con Z>50 hanno decrementi bassi o nulli
- ★ Gli elementi con numero pari sono + abbondanti di quelli con numero dispari (regola di Oddo-Harkins)
- ★ Li, Be e B sono anomalmente bassi
- ★ Fe è anomalmente + alto
- ★ Tecnezio e Promezio non si trovano nel SS poiché i loro isotopi decadono velocemente
- ★ Gli elementi con Z>83 (Bi) non hanno isotopi stabili e hanno scarse abbondanze perché figli della serie di decadimento U-Th





La composizione delle stelle si basa sull'analisi spettrale di emissione dei vari elementi.

Hydrogen-burning

T: $5 \cdot 10^4 - 10^7$



T = Nucleo del
Sole: 10×10^6 K;
Superficie:
 5.74×10^3 K

Helium-burning

T: $1 \cdot 10^8$



C-burning

O-burning



Spallation process



C-Ne-O-SI-burning

O- e C-burning aumentano la T producendo foto-disintegrazione dei nuclei precedentemente formati. I p e n si saldano maggiormente originando più energia

L'aumento di T che si crea porta alla fusione delle particelle α con il carbonio:



Le repulsioni elettrostatiche tra i nuclei caricati positivamente e le particelle α limitano la grandezza degli atomi che si possono formare

Gli atomi più grandi che si possono formare per addizione di particelle α sono:

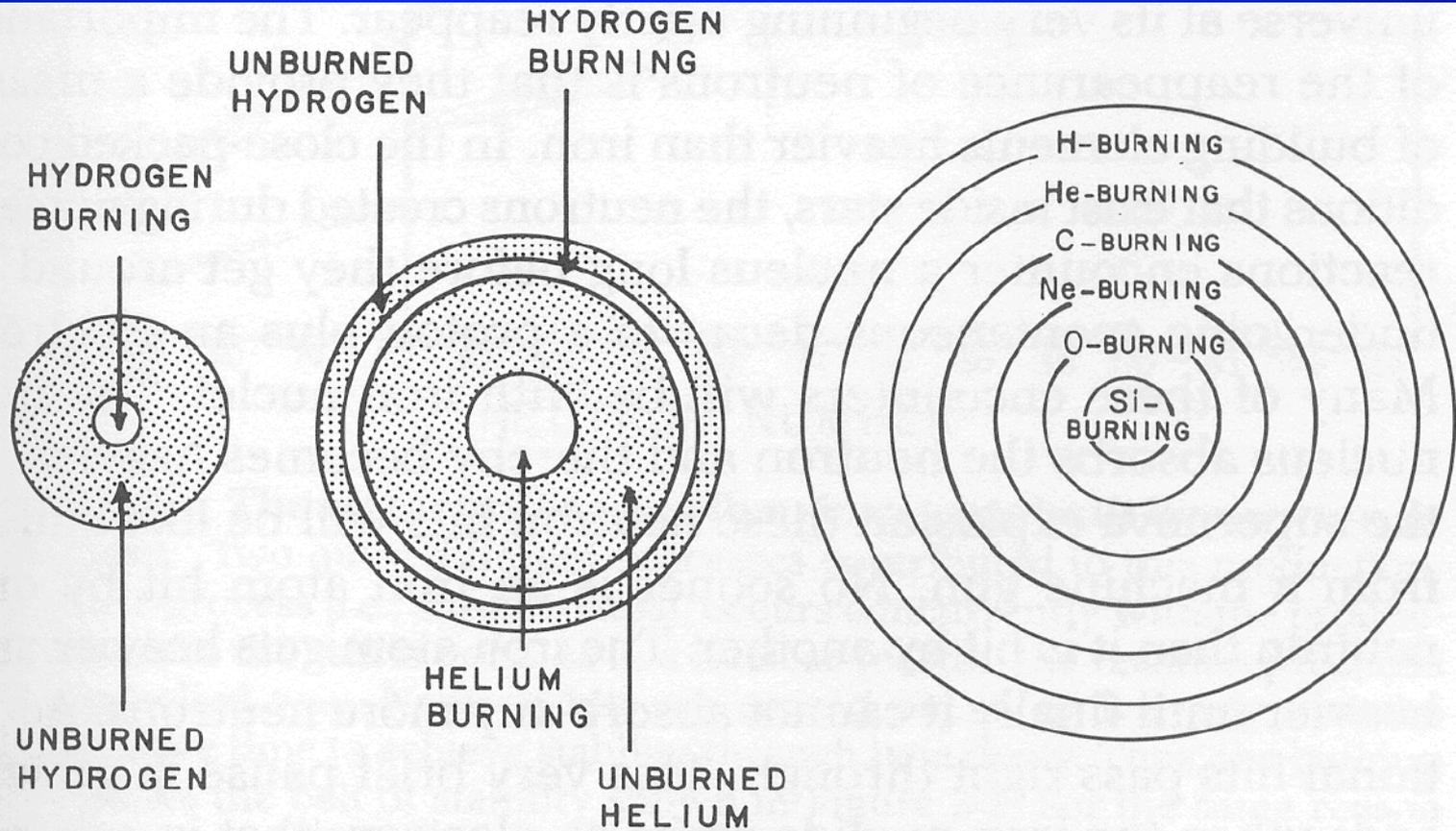


Questo spiega l'abbondanza degli elementi del gruppo del Ferro

The equilibrium process $>10^9 \text{ K}$

In questo stadio (ultimo nell'evoluzione di una stella) si producono elementi quali, Cr, Fe, Ni, Co e Mn. Processi di contrazione ed implosione portano alla distruzione della stella (supernova explosion)





Name of Process	Fuel	Products	Temperature
Hydrogen-Burning	H	He	60×10^6 K
Helium-Burning	He	C, O	200×10^6 K
Carbon-Burning	C	O, Ne, Na, Mg	800×10^6 K
Neon-Burning	Ne	O, Mg	1500×10^6 K
Oxygen-Burning	O	Mg to S	2000×10^6 K
Silicon-Burning	Mg to S	Elements near FE	3000×10^6 K

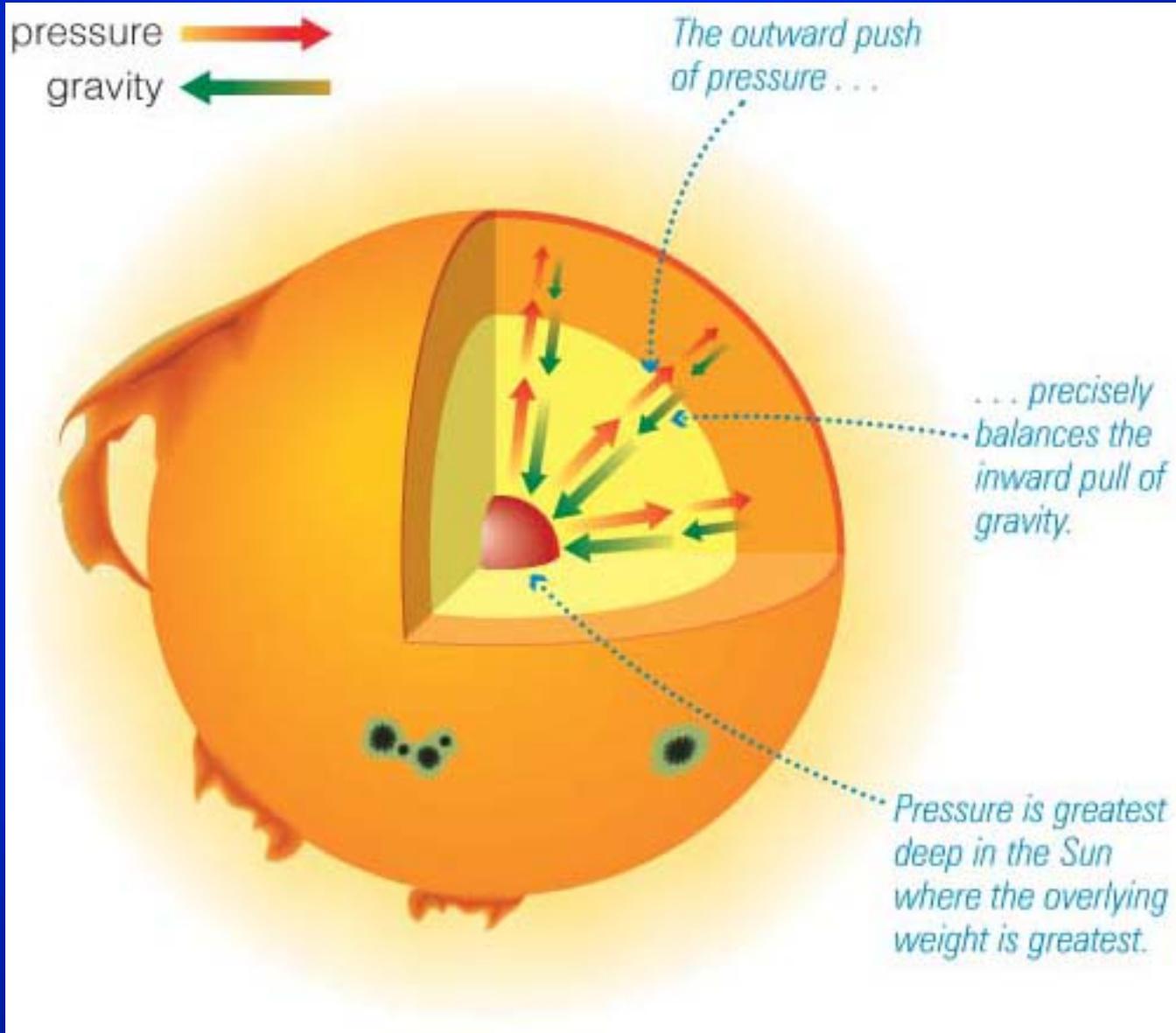


pressure →
gravity ←

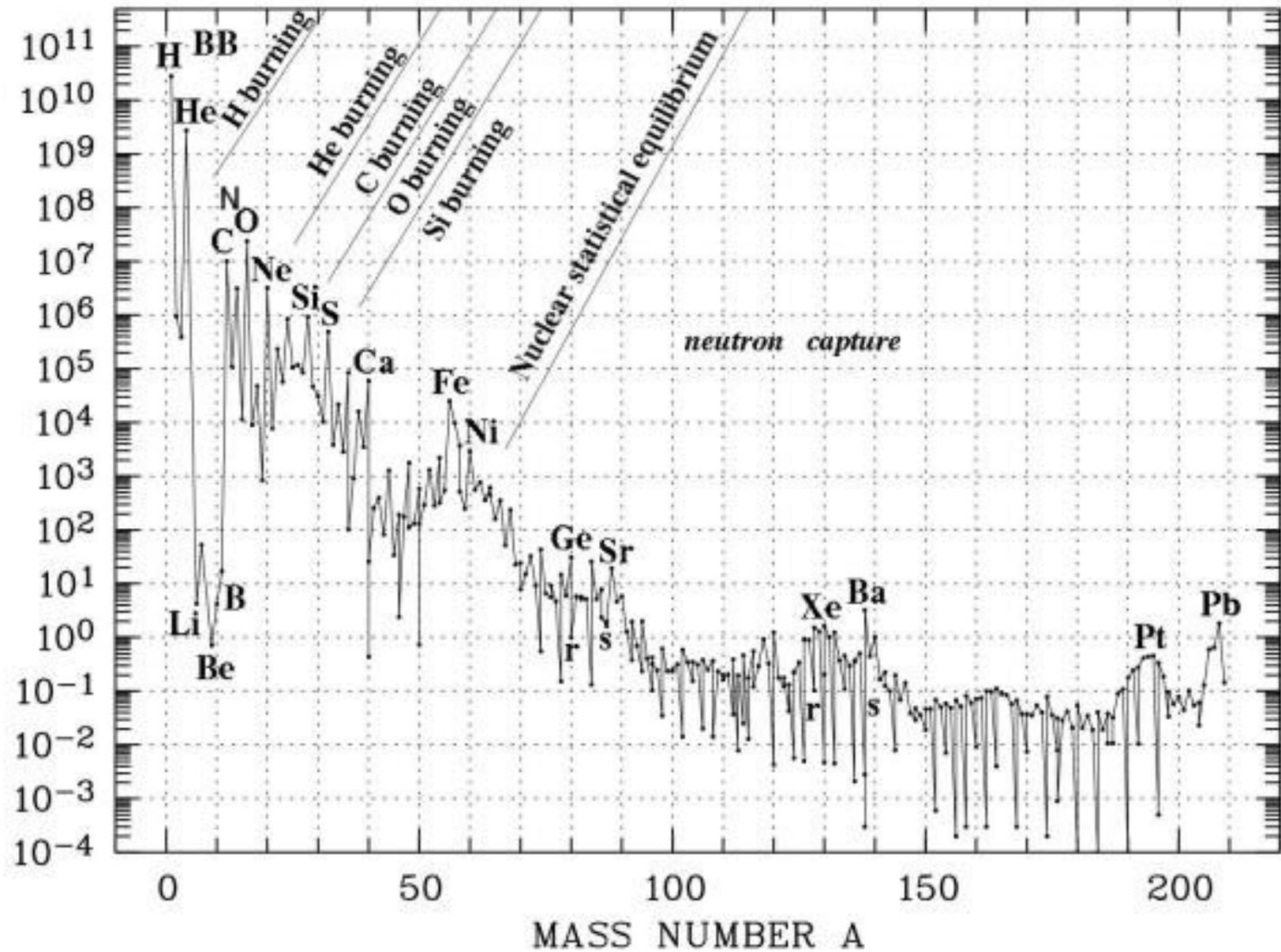
*The outward push
of pressure . . .*

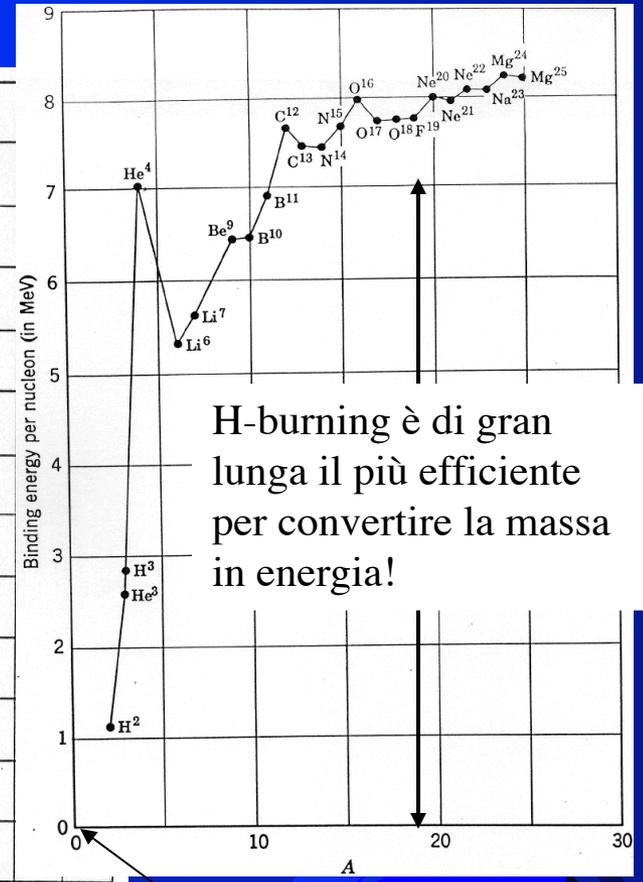
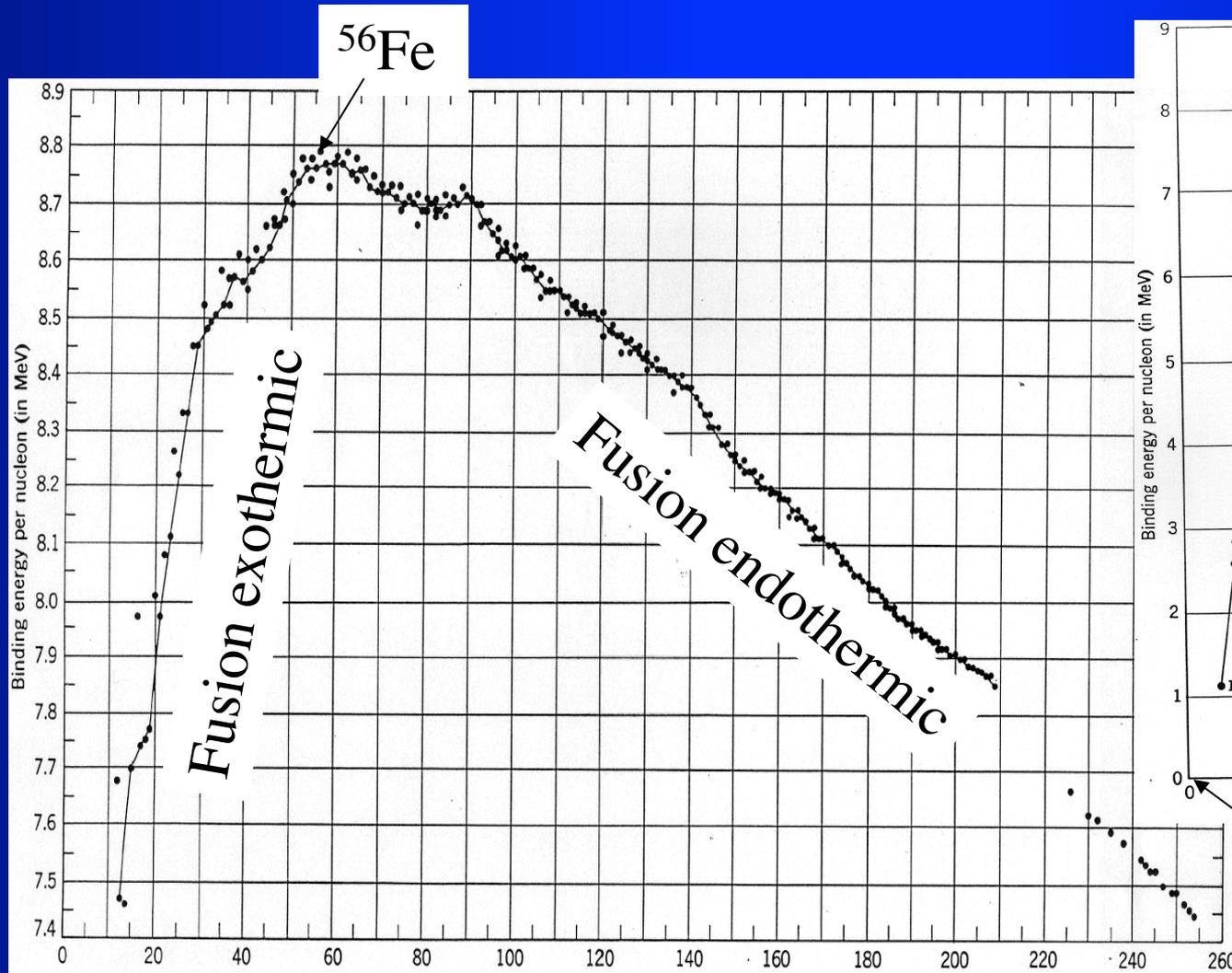
*. . . precisely
balances the
inward pull of
gravity.*

*Pressure is greatest
deep in the Sun
where the overlying
weight is greatest.*



ABUNDANCE RELATIVE TO SILICON = 10^6





H-burning è di gran lunga il più efficiente per convertire la massa in energia!

^1H

A

- In principio, il nuclear-burning per fusione può continuare solo fino a ^{56}Fe .

Elementi più pesanti del Ferro

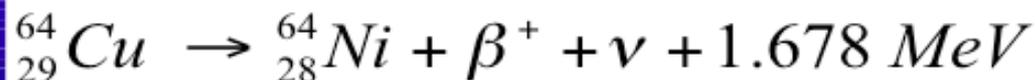
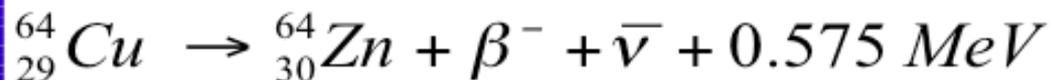
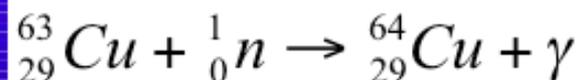
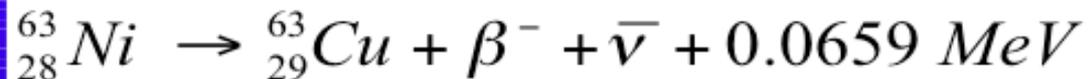
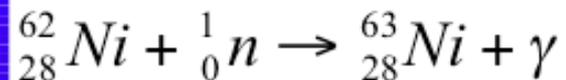
- ◆ Una volta formato Fe, *non è più possibile creare energia per fusione*
- ⇒ **Gli elementi più pesanti di Fe (numero atomico 26) non sono creati per fusione nucleare**
- ◆ Il nucleo più pesante in natura è l'Uranio (numero atomico 92). Come ci possiamo arrivare?

• Gli elementi più pesanti di Fe si creano per **neutron capture**

• Il neutrone è convertito in un protone e aggiunto al nucleo, aumentando il numero atomico per fare l'elemento successivo nella tavola periodica.

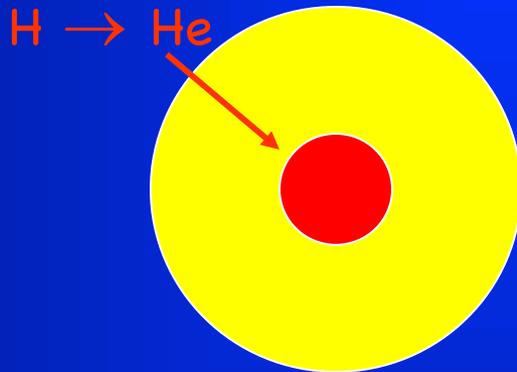
Reazioni NEUTRON-CAPTURE

Durante gli stadi finali dell'evoluzione di una gigante rossa, le reazioni neutron-capture producono atomi con $Z > 26$ (Fe). Il seguente esempio rappresenta lo slow process o *s*-process.



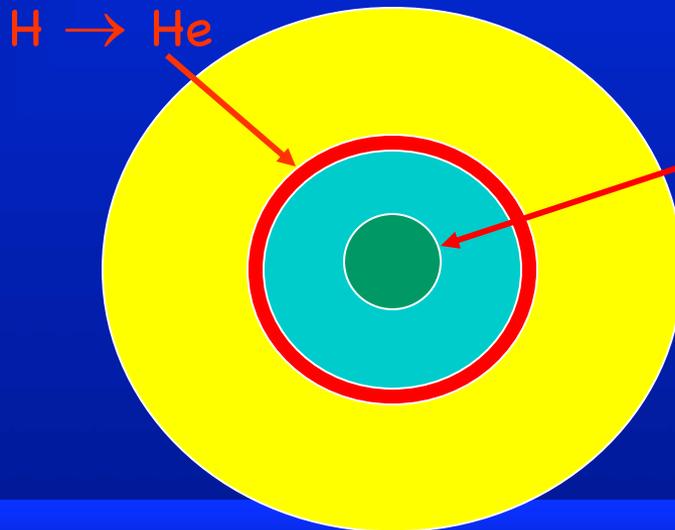
The Life "Clock" of a Massive Star ($> 8 M_{\text{sun}}$)

Let's compress a massive star's life into one day...



Life on the Main Sequence

+ Expansion to Red Giant: 22 h, 24 min.



H burning

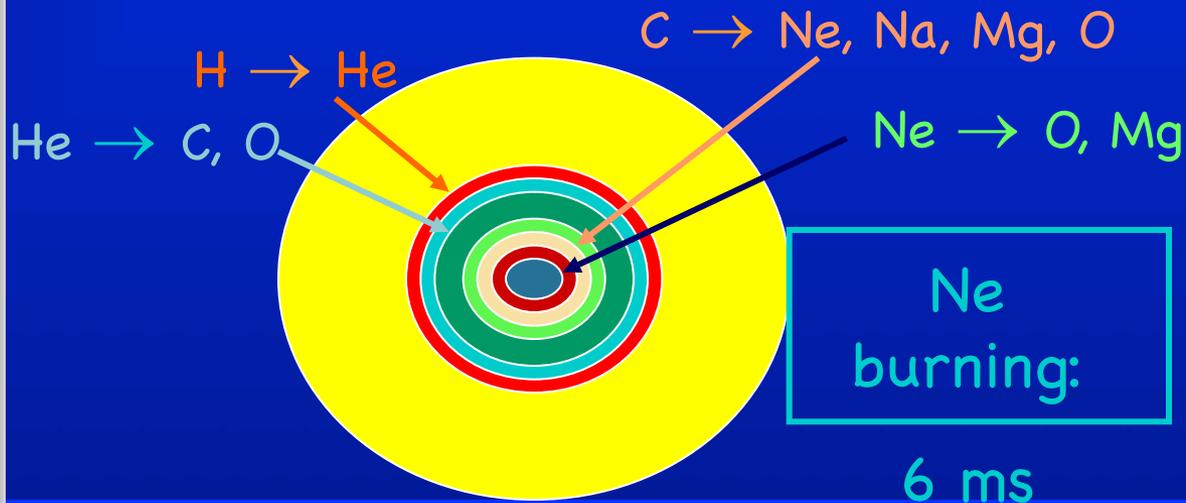
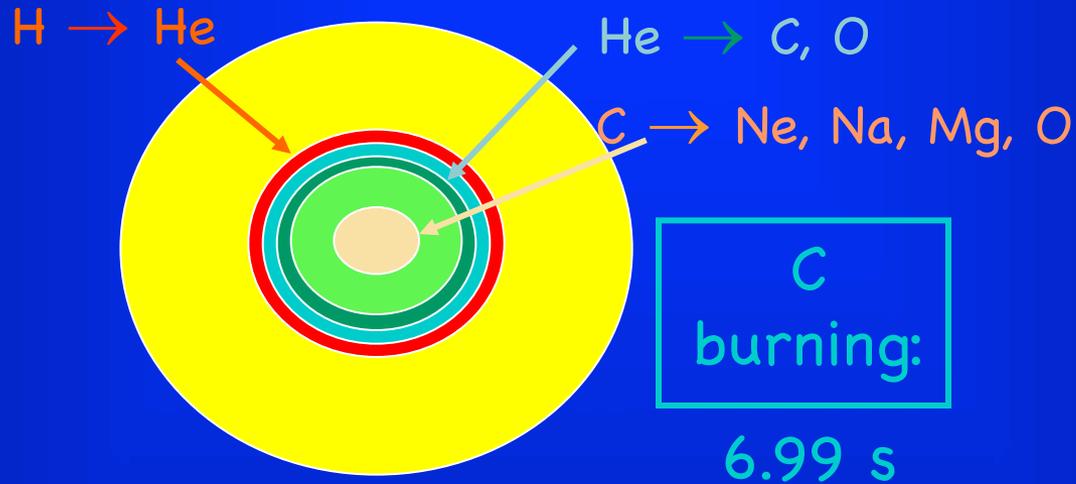
He burning:

(Red Giant Phase) 1 h, 35 min, 53 s

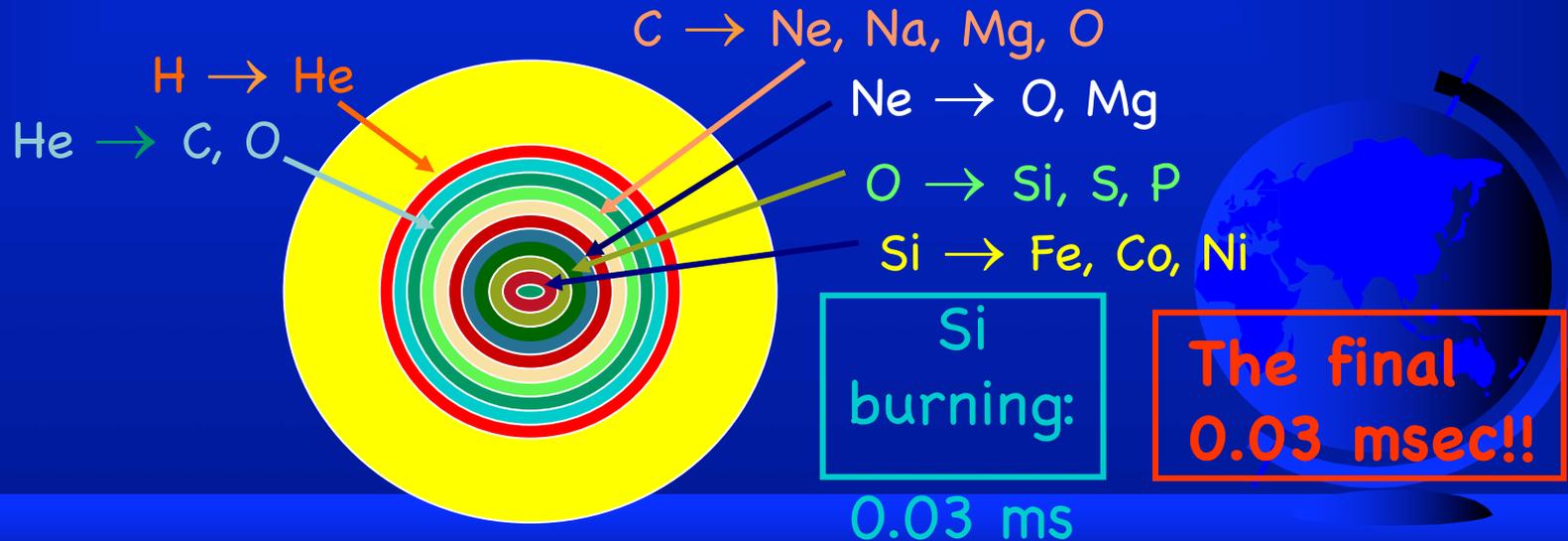
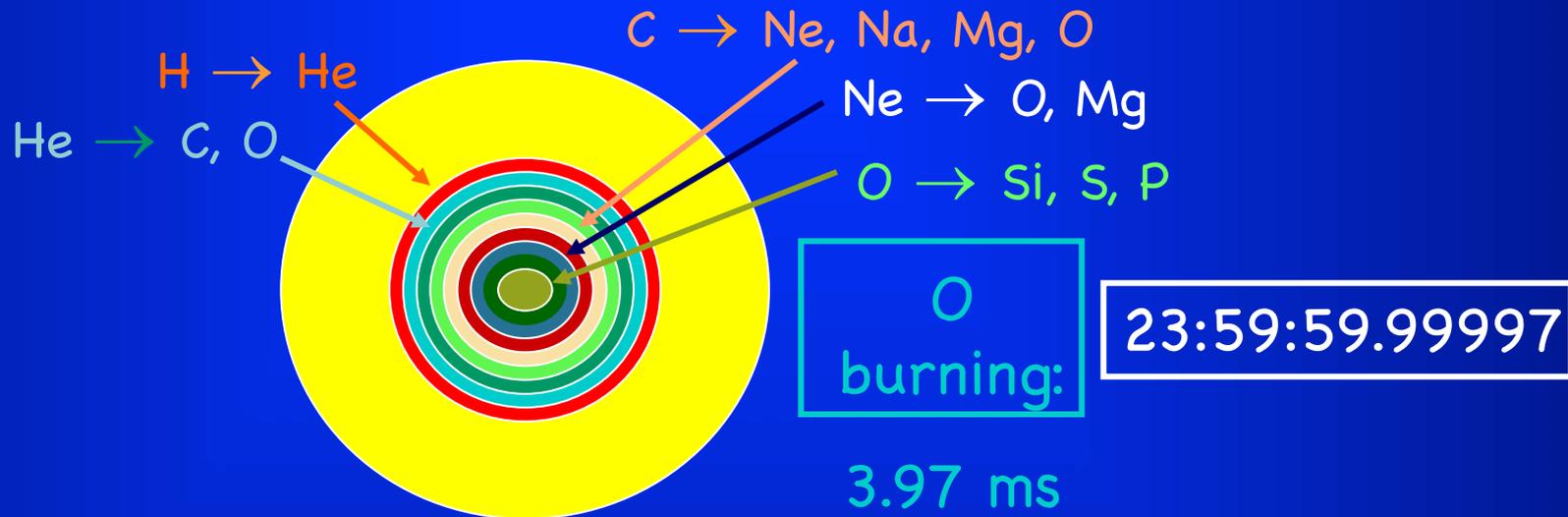
He → C, O



The Life "Clock" of a Massive Star



The Life "Clock" of a Massive Star



Nonostante tutti i processi di nucleosintesi che sono avvenuti sin dalla formazione dell'Universo, solamente il 2% della materia ordinaria è presente come elementi pesanti. La maggior parte è ancora rappresentata da idrogeno ed elio.

