

SideroGRUPPO

Infinitamente lontano LE STELLE

dalla nascita al loro oblio
un breve viaggio nel tempo e nello spazio...
...alla ricerca dei mattoncini della vita

Foto di John A. T. Balser, NASA, Hubble Space Telescope

Nascita
Evoluzione
Trasformazione
Stelle doppie
Insiemi di stelle

Una stella è una sfera di gas caldissimo
che produce nuovi elementi ed energia
attraverso un processo di fusione nucleare

La nascita di una stella

Il cosmo... un vuoto ingannevole

04/04/2015 Paolo Botton - Bergamo di San Pietro (AT) 3

Lo spazio non è "vuoto"

Esistono

- Zone fredde con alta densità di gas e polveri chiamate *nubi molecolari* (H, silicati, grafite e carbonio)
- Alta densità di gas e polveri = pochi atomi/cm³

04/04/2015 Paolo Botton - Bergamo di San Pietro (AT) 4

Primi passi nella genesi stellare

↳ Perturbazioni e instabilità gravitazionale

- esplosione di una supernova o un vento stellare intenso
- le molecole in equilibrio si addensano (*Globuli di Bok*)
- ammassi scuri nella nebulosa luminosa

04/04/2015 Paolo Botton - Bergamo di San Pietro (AT) 5

Globuli di Bok

Nebulosa Testa di Cavallo (Orione)

M16, Nebulosa Aquila

04/04/2015 Paolo Botton - Bergamo di San Pietro (AT) 6

Primi passi nella genesi stellare

↳ Pressione interna o di radiazione insufficiente

- Collasso gravitazionale e contrazione
- L'energia gravitazionale → energia termica

↳ Protostella

04/04/2015 Paolo Botton - Bergamo di San Pietro (AT) 7

Questioni di massa...

- 0,08 Ms < M < 100 Ms → fase di stabilità
- M < 0,08 Ms → nane brune, nessuna reazione nucleare
- M > 100 Ms → ipernovae

GRB (Gamma Ray Burst)
consente di poter ricavare
i dati di quello che rimane
dell'esplosione (Afterglow)

04/04/2015 Paolo Botton - Bergamo di San Pietro (AT) 8

Dove nascono le stelle...

M42 - Nebulosa di Orione - Diametro: 30 A.L., densità media = 10000 atomi/cm³
Massa: 10⁵ - 10⁶ masse solari → possono nascere stelle

04/04/2015 Paolo Botton - Bergamo di San Pietro (AT) 9

La giovinezza di una stella

La fusione dell'idrogeno

04/04/2015 Paolo Botton - Bergamo di San Pietro (AT) 10

La fase di stabilità

- Produce energia (nucleosintesi dell'elio)
- Equilibrio idrostatico interno (pressione radiativa)

Quali condizioni?

- Temperatura centrale di circa 10 milioni di gradi
 - necessari alcune decine di milioni di anni.
- Repulsione Coulombiana
 - Altissime pressioni e temperature (una grande energia cinetica), per poter vincere la repulsione dei nuclei e riuscire a fondersi.
 - Più grandi sono i nuclei atomici e maggiore è la repulsione elettrica, quindi la temperatura necessaria alla fusione.

04/04/2015 Paolo Botton - Bergamo di San Pietro (AT) 11

Nucleosintesi dell'Elio (da H)

Masse solari
Tipo di fusione

0.4-2 p-p
2-8 p-p
8-100 CNO
8-100 CNO

● Protone γ Gamma Ray
● Neutrone ν Neutrino
○ Positrone

04/04/2015 Paolo Botton - Bergamo di San Pietro (AT) 12

Avviato il ciclo di fusione

Protostella → STELLA

Inserimento nella sequenza principale

H-RD cataloga le stelle in funzione della luminosità e della classe spettrale/temperatura

DIAGRAMMA H-R

04/04/2015 Paolo Botton - Bergamo di San Pietro (AT) 13

Le popolazioni stellari

Una questione di sostanza

04/04/2015 Paolo Botton - Bergamo di San Pietro (AT) 14

Popolazioni stellari

- Popolazione I (il Sole)**
 - 70% idrogeno
 - 28% elio
 - 1.5% carbonio, ossigeno, neon e silicio
 - 0.5% ferro, cobalto, nichel ed altri elementi pesanti.
- Popolazione II (stelle di ammassi globulari)**
 - bassa metallicità, ossia sono carenti in elementi pesanti.
 - Stelle molto vecchie

In astronomia i metalli sono tutti gli elementi più pesanti dell'elio, dunque anche quelle in chimica non sono considerati tali, come il litio e il carbonio.

04/04/2015 Paolo Botton - Bergamo di San Pietro (AT) 15

I colori di una stella

Temperatura, colore e classi spettrali

04/04/2015 Paolo Botton - Bergamo di San Pietro (AT) 16

Classe Temperatura (K)/Colore

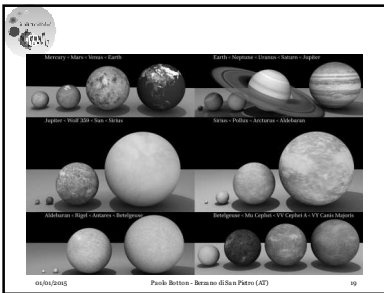
| | | |
|---|-----------------|----------------|
| O | 28.000 - 50.000 | Rosso-azzurro |
| B | 9.600 - 28.000 | Bianco-azzurro |
| A | 7.500 - 9.600 | Bianco |
| F | 6.700 - 7.500 | Bianco-giallo |
| G | 5.400 - 6.700 | Giallo |
| K | 3.900 - 5.400 | Arancione |
| M | 2.300 - 3.900 | Rosso |

04/04/2015 Paolo Botton - Bergamo di San Pietro (AT) 17

Le dimensioni delle stelle

I cicli del cosmo

04/04/2015 Paolo Botton - Bergamo di San Pietro (AT) 18



Le distanze delle stelle

Una questione di metodo

Il "Parsec"

- Parallasse per secondo d'arco
- La parallasse è l'angolo alla stella nel triangolo Terra-Sole-Stella
- L'angolo considerato per il calcolo del parsec è l'arco
- 1 pc = 3,261 47 086 anni luce

Qualche calcolo

$$1 \text{ pc} = d \cdot \cos 1''$$

$$1 \text{ UA} = d \cdot \sin 1'' \rightarrow d = \frac{1 \text{ UA}}{\sin 1''}$$

$$1 \text{ pc} = 1 \text{ UA} \frac{\cos 1''}{\sin 1''} = 1 \text{ UA} \frac{1}{\tan 1''}$$

$$1 \text{ pc} = 1 \text{ UA} \frac{1}{\tan \frac{1}{3600}} = 3.085678 \cdot 10^{16} \text{ m}$$

Per ogni giorno Solari, il Sole e la Terra descrivono, per il Sole, un'orbita con la parallasse apparente di 483000" d'arco. Un raddoppiamento del diametro del Sole, a parità di distanza, raddoppia il diametro apparente a 966000" d'arco.

1 pc = 3,261 47 086 a.l.
1 pc = 3,085 67 8 10¹⁶ m
1 pc = 3,261 47 086 a.l.

Un esempio

- Proxima Centauri
 - ha una parallasse di 0,750"
 - una stella con la parallasse di un 1" d'arco o dista 1 parsec
 - Proxima dista 1 / 0,750 = 1,33 pc
 - = 4,3 anni luce

Prima misura di parallasse stellare: 1838
Friedrich Wilhelm Bessel su 61 Cygni.

Affidabile per distanze stellari in più grandi di circa 100 parsec (1 centesimo di secondod'arco)

??? Metodi fotometrici e candele standard

La maturità di una stella

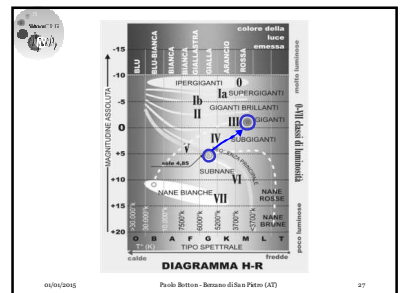
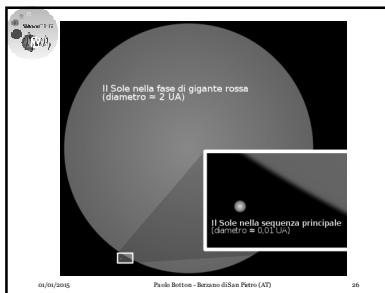
La fase della Gigante Rossa

La Gigante Rossa

- Idrogeno nel nucleo in esaurimento
- Fusione dell'idrogeno negli strati superiori al nucleo
 - Espansione dell'inviluppo
 - cause dissipazione dell'energia di fusione.
- La temperatura superficiale della stella diminuisce
- il colore si fa via via più rosso

Gigante Rossa

La stella esce dalla sequenza principale del diagramma di Hertzsprung-Russell per entrare nel ramo laterale delle giganti



La trasformazione di una stella

Nucleosintesi degli elementi pesanti
...e oblio di un'astro

04/04/2015 Paolo Botton - Bergamo di San Pietro (AT) 28

La fusione dell'elio

- Rottura dell'equilibrio idrostatico
- Fusione di elio in carbonio (*Flash de l'elio*)

$T \approx 100 \times 10^6 \text{ K}$

→ compressione di berillio e elio

→ fusione di elio e berillio = carbonio

04/04/2015 Paolo Botton - Bergamo di San Pietro (AT) 29

Nane bianche

Se $M_{\text{stella}} < 2 M_{\text{sole}}$

- Flash dell'elio e produzione di carbonio
 - instabilità e pulsazioni termiche
 - espulsione dell'involuppo
- Massa piccola: fusione del carbonio prodotto impossibile
 - nucleo caldo e denso (C e O) della stella scoperta...
- nana bianca
 - Massiccia (densità: ~1 tonnellata a cm³)
 - Caldissima (superficiale 8000-40000 K)
 - Si estinguerà in circa 15 miliardi di anni.
- nebulosa planetaria
 - stella centrale e nuvole di gas espulso

04/04/2015 Paolo Botton - Bergamo di San Pietro (AT) 30

DIAGRAMMA H-R

04/04/2015 Paolo Botton - Bergamo di San Pietro (AT) 31

Nebulose planetarie

M57 Nebulosa Anello (Lira)

M27 Nebulosa Manubrio (Volpetta)

04/04/2015 Paolo Botton - Bergamo di San Pietro (AT) 32

Nebulose planetarie

M27 Nebulosa Manubrio (Volpetta)

04/04/2015 Paolo Botton - Bergamo di San Pietro (AT) 33

Parallasse d'espansione

Dati misurabili:

- Dimensioni apparenti:
 - $\theta = 8,67 \times 10^{-5} \text{ rad} (5,00'') = (5,7/60)''$
 - quasi $0,133 \text{ }'' = 0,095 \text{ }''$
- Velocità d'espansione del gas
 - $V_{\text{exp}} = 31 \text{ km/sec}$ (analisi spettro)
 - $\theta =$ dimensione angolare del gas dopo Δt

$d = 1249 \text{ al}$

$R_1 = d \times \sin(\theta/2) = 1249 \times \sin(8,67 \times 10^{-5}/2) = 1249 \times \sin(0,04335) = 1,41 \text{ al}$

$R_2 = d \times \sin(\theta/2) = 1249 \times \sin(0,04335/2) = 1249 \times \sin(0,021675) = 1,027 \text{ al}$

Età cinematica = $R / V_{\text{exp}} = 1,027 \text{ al} / 31 \text{ km/s} = 9,56 \times 10^{-12} \text{ km} / 31 \text{ km/s} = 3,1 \times 10^{-12} \text{ s} = 99,98 \text{ anni}$

04/04/2015 Paolo Botton - Bergamo di San Pietro (AT) 34

Nebulose planetarie

NGC 6543 Nebulosa Occhio di Gatto (Drago)

04/04/2015 Paolo Botton - Bergamo di San Pietro (AT) 35

Nebulose planetarie

Nebulosa Eskimo NGC 239 2

Gemini

10000 anni

1/3 al

3000 al

04/04/2015 Paolo Botton - Bergamo di San Pietro (AT) 36

Novae

Origine

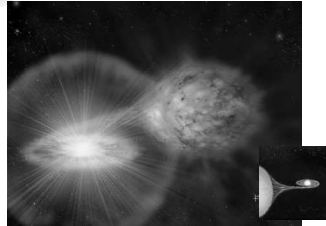
- **Nana bianca** in un sistema binario
- Acquisizione di materia della compagna
- Aumento della densità e temperatura
- Bruciamento esplosivo dell'idrogeno (*cataclisma*)
- Improvviso aumento della luminosità



white dwarf
normal star

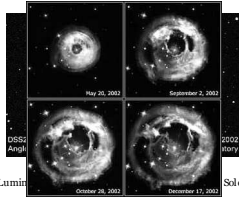
04/04/2005 Paolo Botton - Bergamo di San Pietro (AT) 37

Novae



04/04/2005 Paolo Botton - Bergamo di San Pietro (AT) 38

Novae



May 20, 2002 September 2, 2002
October 20, 2002 December 17, 2002

Luminosità

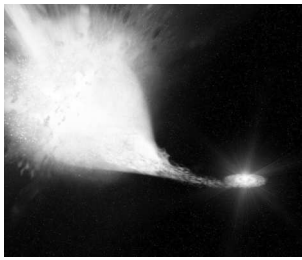
04/04/2005 Paolo Botton - Bergamo di San Pietro (AT) 39

Supernovae di Tipo Ia

Origine - prima possibilità:

- **Nana bianca** in sistema binario o compatto
 - Le due stelle sono così vicine che l'inviluppo esterno della stella dominante (tipicamente gigante o supergigante) cade nel campo gravitazionale della compagna
 - Soglia d'innesco pari a 1,44 masse solari
 - *Limite di Chandrasekhar*
- Implosione del nucleo
- Esplosione distruttiva
 - vaporizzazione del sistema binario
- Evento di **Supernova di Tipo Ia**.

04/04/2005 Paolo Botton - Bergamo di San Pietro (AT) 40



04/04/2005 Paolo Botton - Bergamo di San Pietro (AT) 41

Supernovae di Tipo Ia

Origine - seconda possibilità:

- **Proccesi di merging** in sistema binario o compatto
 - Le due stelle sono così vicine che si fondono

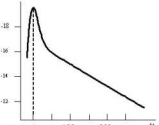


04/04/2005 Paolo Botton - Bergamo di San Pietro (AT) 42

Supernovae di Tipo Ia

Importanza:

- Curva della luminosità costante → *candela standard*



È possibile stimare quanto ci stiano dal nostro pianeta

04/04/2005 Paolo Botton - Bergamo di San Pietro (AT) 43

Il destino delle stelle massicce

Se $M_{stella} > 2 M_{sole}$

- La pressione permette successivi processi di fusione
- Spostamento verso la sequenza principale.
- Ripetizione del ciclo di contrazione ed espansione



- Innesco della fusione di un elemento sempre più pesante
- Struttura a cipolla
- Ogni strato è interessato alla fusione di un elemento.
- Temperatura, pressione e densità elevate crescono con la profondità.

04/04/2005 Paolo Botton - Bergamo di San Pietro (AT) 44

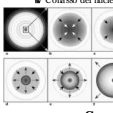
La serie della sintesi

- **COMBUSTIONE DEL CARBONIO** (200-800 milioni di gradi)
 - produzione di ossigeno, magnesio, sodio e neon.
 - prodotti secondari: idrogeno, elio, neutroni e raggi gamma
- **COMBUSTIONE DEL NEON** (1,2 miliardi di gradi)
 - produzione di ossigeno e magnesio.
 - prodotti secondari: particelle alfa, neutroni elio e neodimio
- **COMBUSTIONE DELL'OSSIGENO** (1,4 miliardi di gradi)
 - formando silicio, zolfo, fosforo.
 - prodotti secondari - magnesio, idrogeno, elio, neutroni e raggi gamma
- **COMBUSTIONE DEL SILICIO** (oltre i 2,7-3 miliardi di gradi)
 - forma nichel che decade prima in cobalto che decade in ferro che è stabile.
 - Processo di decadimento sono rilasciati positroni (e^+), e neutrini (ν_e)

04/04/2005 Paolo Botton - Bergamo di San Pietro (AT) 45

Supernovae di Tipo II

- Il nucleo non può produrre ulteriore energia - si raffredda
 - Contazione gravitazionale non più compensata
 - Collasso del nucleo in 8,1 secondi



La pressione degenera dei neutroni crolla...

... si generano onde d'urto in 34,8ms

Esplosioni di Supernova di tipo II in 0,1-10 secondi

- Le supernovae rappresentano il principale meccanismo di arricchimento chimico delle galassie.
- La supernova rilascia una enorme quantità di energia che rende possibile la formazione di nuclei più pesanti del ferro entro pochi secondi dalla esplosione. Carbonio, ossigeno, silicio, zolfo, zirconio, niobio, cromo, manganese, ferro.

04/04/2015 Paolo Botton - Berardo di San Pietro (AT) 46

Supernovae di Tipo II

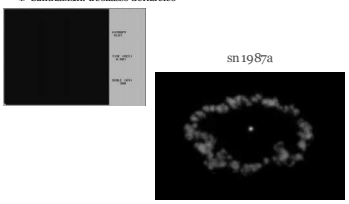
- Simulazioni: eventi di Supernova di Tipo II



04/04/2015 Paolo Botton - Berardo di San Pietro (AT) 47

Supernovae di Tipo II

- Simulazioni: il collasso del nucleo

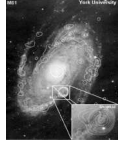


sn 1987a

04/04/2015 Paolo Botton - Berardo di San Pietro (AT) 48

Supernovae di Tipo II

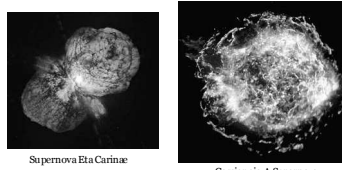
- Nel 1993 una supernova (SN1993j) è esplosa nella galassia M81
- Fenomeno studiato a tutte le frequenze dello spettro elettromagnetico con grande dettaglio.
- M81 a lunghezze d'onda radio sovrapposta all'immagine ottica.
- Espansione di SN1993j in falsi colori



(Credit: Cortesia di Bartel, Bietenholz, Rupen et al.)

04/04/2015 Paolo Botton - Berardo di San Pietro (AT) 49

Supernovae di Tipo II

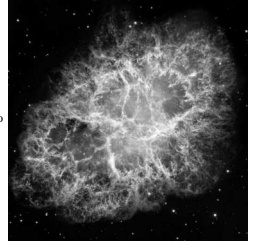


Supernova Eta Carinae

Cassiopeia A Supernova

04/04/2015 Paolo Botton - Berardo di San Pietro (AT) 50

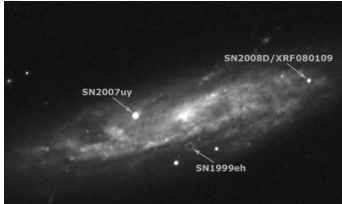
Supernovae di Tipo II



M1
Nebulosa Granchio
1054 D.C.

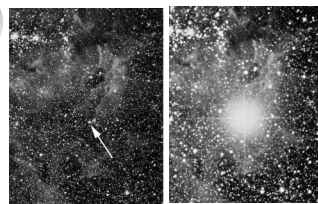
04/04/2015 Paolo Botton - Berardo di San Pietro (AT) 51

NGC 2770, fabbrica di supernovae



04/04/2015 Paolo Botton - Berardo di San Pietro (AT) 53


Supernova SN1987A



23 Feb 1987 - Grande Nebula di Magellano (LMC)
Distanza ~ 50 kpc (~163000 A.L.)
Stella progenitrice: Sanduleak-69° 202a (Sk-69 202), supergigante blu, M ~ 18 M_{sol}

04/04/2015 Paolo Botton - Berardo di San Pietro (AT) 53

Supernova SN1987A



Betelgeuse, Alpha Orionis
Candidata a diventare una supernova
Supergigante rossa variabile pulsante semiregolare. Dista dal Sole 600-640 A.L.
Raggio medio 990-1000 R_{sol}, massa 15-20 M_{sol}, età stimata 8,5 - 10⁷ anni

04/04/2015 Paolo Botton - Berardo di San Pietro (AT) 54

Metodi d'indagine: esempio

04/04/2015 Paolo Botton - Bergamo di San Pietro (AT) 55

Elementi prodotti ed espulsi

Isotopo
 Diverso numero di neutroni parità di numero atomico
 (NA = numero di protoni contenuti in un nucleo).
 Stesso comportamento chimico
 Comportamenti fisici differenti (uno più pesante dell'altro)

Pure della stella espulsa

| | | |
|---------------------------------|--|-----------------------------|
| $\rho = 10^9 \text{ g/cm}^3$ | $^{12}\text{C}, ^{16}\text{O}, ^{22}\text{Ne}$ | $2 \times 10^9 \text{ K}$ |
| $\rho = 10^{10} \text{ g/cm}^3$ | Si, S, Cl, Ar, K, Ca | $3 \times 10^9 \text{ K}$ |
| $\rho = 10^{11} \text{ g/cm}^3$ | Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni | $> 5 \times 10^9 \text{ K}$ |
| $\rho = 10^{14} \text{ g/cm}^3$ | | 10^{10} K |

Nucleo residuo: stella di neutroni

Siamo tutti figli delle stelle

04/04/2015 Paolo Botton - Bergamo di San Pietro (AT) 56

L'oblio di una stella

- Il nucleo collassa sotto la propria spinta gravitazionale
- Forma un oggetto estremamente denso e compatto...
- $M_{\text{nucleo}} < 3.2 M_{\text{solari}}$
 - Limite di Volkoff-Oppenheimer
 - I nuclei si fondono con gli elettroni
 - Stella compatta e densissima di neutroni
- $M_{\text{nucleo}} > \text{Limite di Volkoff-Oppenheimer}$
 - Collasso inarrestabile e irreversibile.
 - Buco Nero

04/04/2015 Paolo Botton - Bergamo di San Pietro (AT) 57

04/04/2015 Paolo Botton - Bergamo di San Pietro (AT) 58

Il buco nero

04/04/2015 Paolo Botton - Bergamo di San Pietro (AT) 59

Il buco nero: cuore delle galassie

04/04/2015 Paolo Botton - Bergamo di San Pietro (AT) 60

Pulsar

04/04/2015 Paolo Botton - Bergamo di San Pietro (AT) 61

Stelle doppie

L'eterno girotondo cosmico

04/04/2015 Paolo Botton - Bergamo di San Pietro (AT) 62

Stelle doppie – Sistemi binari

- ~ 50% delle stelle è costituito da coppie di stelle doppie
 - stelle legate tra loro dalla forza di gravità.
 - stelle triple e stelle multiple.
- Tendono unirsi a coppie
 - Le triadi e quaterne non durano
- Problema dei tre corpi
 - Orbite caotiche, instabili e imprevedibili
 - Variazioni orbitali → configurazioni stabili
 - Centro di massa
 - Stelle multiple stabili e sistone come e coppie gerarchiche

04/04/2015 Paolo Botton - Bergamo di San Pietro (AT) 63

Stelle doppie – orbite

$AB : BC = m_2 : m_1$

B = baricentro m = massa

04/04/2015 Paolo Botton - Bergamo di San Pietro (AT) 64

Doppie ottiche: prospettive o visuali

04/04/2015 Paolo Botton - Bergamo di San Pietro (AT) 65

Lo spostamento sulle righe di assorbimento dei loro spettri ci rivelerà il moto orbitale delle due componenti attorno al baricentro del sistema

Doppie fisiche

04/04/2015 Paolo Botton - Bergamo di San Pietro (AT) 66

04/04/2015 Paolo Botton - Bergamo di San Pietro (AT) 67

Artist's View of Sirius A and Sirius B

MESA, ESA, and IS Science (STScI) - STScI/STScI/STScI

04/04/2015 Paolo Botton - Bergamo di San Pietro (AT) 68

04/04/2015 Paolo Botton - Bergamo di San Pietro (AT) 69

Gli insiemi di stelle

**Ammassi Globulari
e Ammassi Aperti**

04/04/2015 Paolo Botton - Bergamo di San Pietro (AT) 70

Ammassi Globulari

- **Ammasso chiuso o ammasso di alone**
 - ❑ Insieme sferoidale di stelle che orbita come un satellite intorno al centro di una galassia.
 - dal latino *globus*, che significa "globo", "sfera"
 - ❑ Sorretti al loro interno da una forte gravità
 - ❑ Densità di stelle molto elevata
 - ❑ Centinaia di migliaia di stelle vecchie confinate in pochi parsec cubici

04/04/2015 Paolo Botton - Bergamo di San Pietro (AT) 71


L'Ammasso Globulare di Ercole
M13 o NGC 6205

04/04/2015 Paolo Botton - Bergamo di San Pietro (AT) 72

Ammassi aperti

- Detti anche *Ammassi Galattici*
 - si trovano solo all'interno del disco galattico
- **Stelle nate insieme da una nube molecolare gigante**
 - Stella età e composizione chimica, massa differente
 - Unite dalla reciproca attrazione gravitazionale
- Sono oggetti giovani
 - Contengono quindi molte stelle calde e luminose
 - Visibili da grandi distanze, con piccoli strumenti.
- La nube molecolare *genitrice* è a volte ancora associata all'ammasso, che ne illumina alcune parti che diventano visibili come una o più nebulose


04/04/2015 Paolo Botton - Bergamo di San Pietro (AT) 73



NGC 2344
Nebulosa Pelliccia di Volpe

04/04/2015 Paolo Botton - Bergamo di San Pietro (AT) 74

Le Pleiadi - M45 - Tau



04/04/2015 Paolo Botton - Bergamo di San Pietro (AT) 75

Le stelle... Solo puntini immobili?

Studio dei fenomeni transitori:
- *Novae*
- *Supernovae*
Studio delle Stelle Variabili - A.A.V.S.O.



04/04/2015 Paolo Botton - Bergamo di San Pietro (AT) 76

Grande

Venite alle
Osservazioni Astronomiche
gratuite

Informazioni e date su
<http://astroinmaco.me.co.it/>



04/04/2015 Paolo Botton - Bergamo di San Pietro (AT) 77