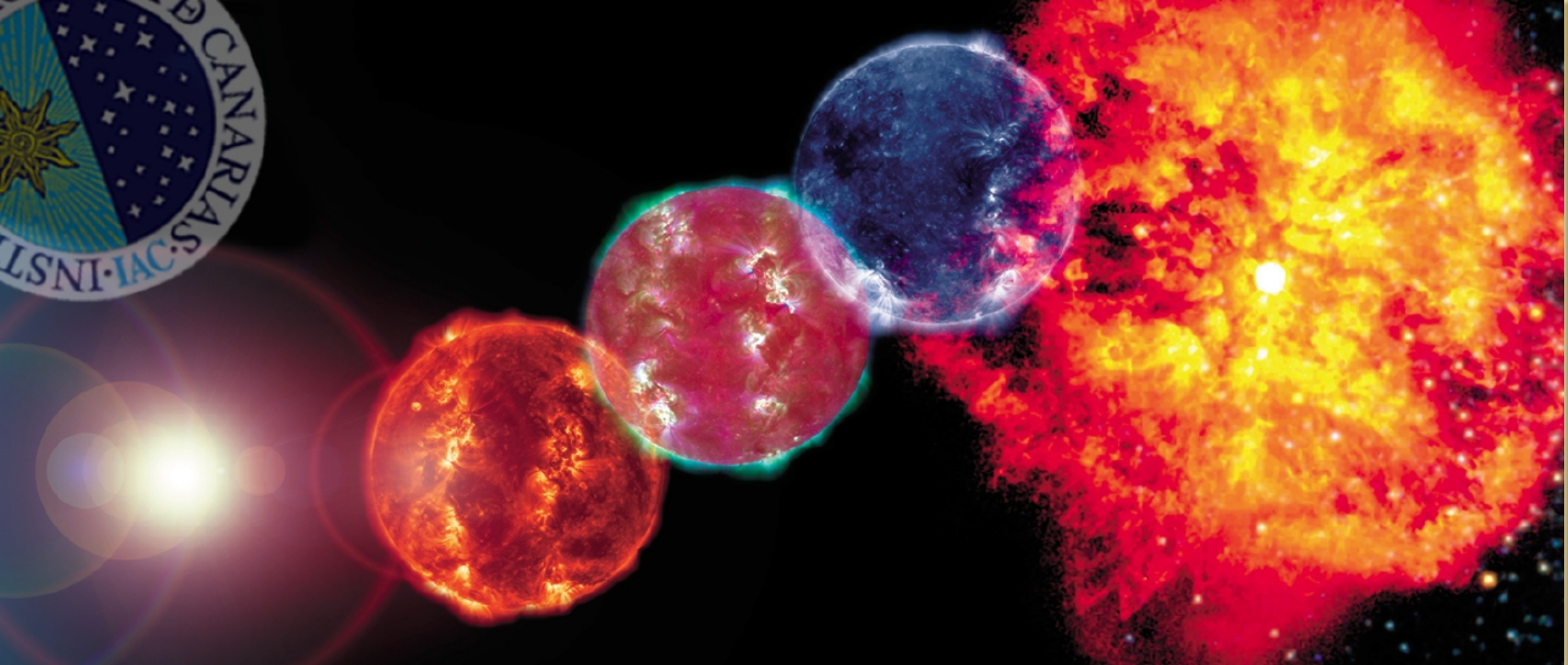




A magfizika helyzete és jövője:

Nukleáris asztrofizika

MTA KFKI RMKI, Budapest, 2010. március 29.

Gergely Gábor Barnaföldi

MTA KFKI RMKI



Tartalom

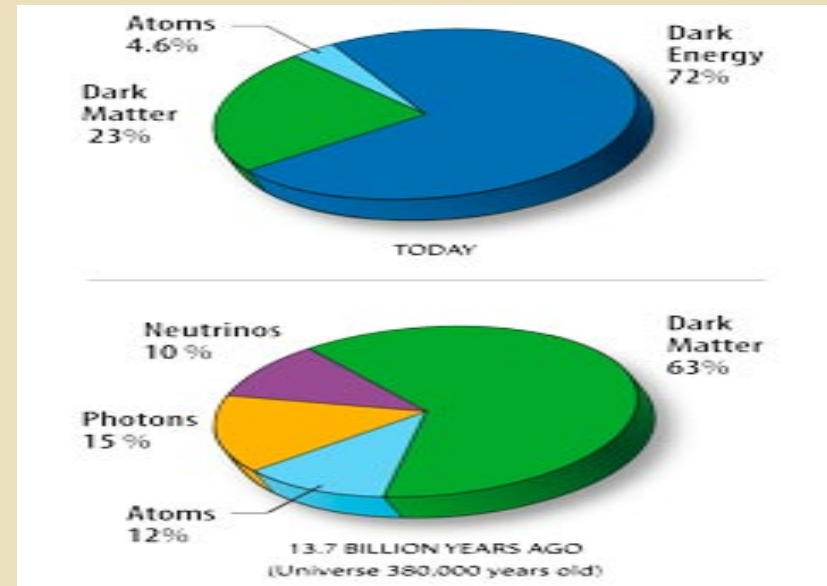
- A nukleáris asztrofizika tárgya, alapkérdései
- Ősrobbanás kori nukleonszintézis
- Nukleonszintézis csillagokban, óriásokban, nóvákban
- Extrém állapotok kompakt csillagokban
- Nagyberendezések, projektek

Nukleáris asztrofizika tárgya

- A barionok + leptonok

Ma ez közel $\sim 4 - 5 \%$

Ősrobbanáskor $\sim 22\%$



- Tudományterületek szempontjából:

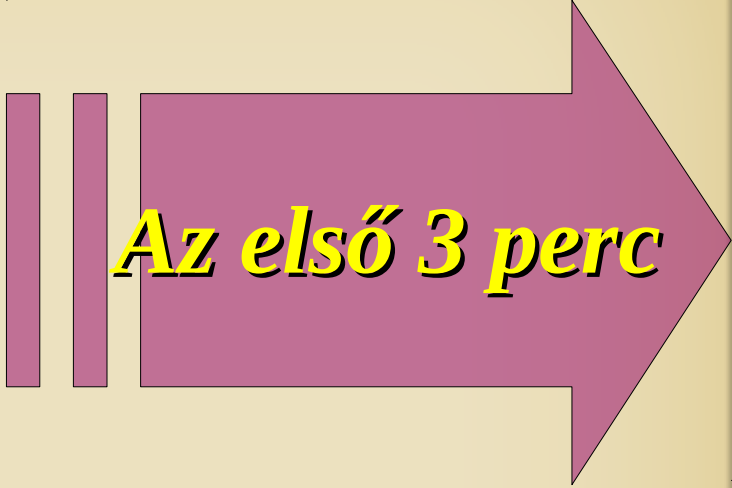
Nukleáris asztrofizika =	magfizika + kozmológia + asztrofizika + csillagászat + O(etc.)
--------------------------	--

Alapkérdések

- Hogyan és hol zajlik az elemszintézis?
- Megérthetjük-e és reprodukálhatjuk-e földi laboratóriumokban a csillagokban végbemenő energiatermelő folyamatokat ill. elemszintézist?
- Hogyan függ a csillagok fejlődése és halála a bennük végbemenő nukleáris folyamatoktól?
- Milyen tulajdonságú a kompakt csillagokban (neutroncsillag, kvarkcsillag) szuper-sűrű anyaga?

A nukleáris asztrofizika fő területei

- Ősrobbanáskori nukleonszintézis
- Elméleti magfizikai és asztrofizika



Az első 3 perc

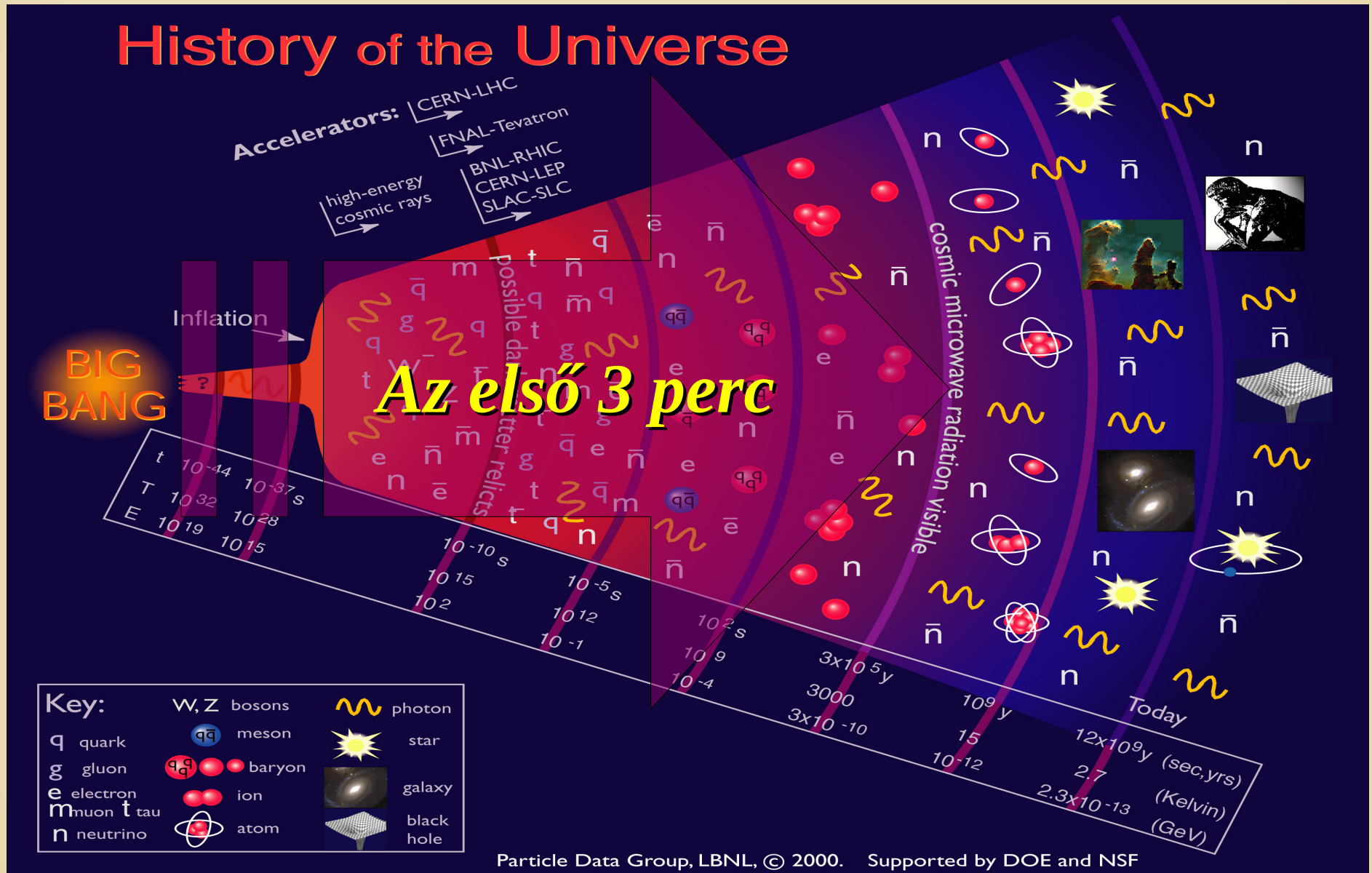
- Hidrosztatikus égés csillagokban
- Katakлизмikus események
- Klasszikus novák
- I. típusú röntgen burst-ök
- Kompakt (neutron, kvark) csillag



13,6 Mrd év

Az Univerzum fejlődése

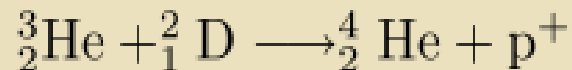
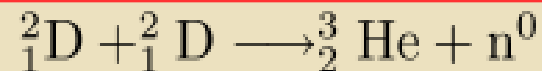
History of the Universe



Particle Data Group, LBNL, © 2000. Supported by DOE and NSF

Ősrobbanás kori nukleonszintézis

- Az első 3 percben nukleonszintézise (BBN, vagy primodriális)
- ^1H , ^2D , ^3He és ^4He izotópok kozmikus eloszlását adja
- ^2H , ^3H , ^3He , ^4He , ^7Li , ^7Be , ^8B könnyű atommagok



T csökken

$$kT = 10\text{MeV}$$

$$\frac{3}{2}kT > M_n c^2 - M_p c^2$$

- BBN végeredmény: 25% He, 0,001% D, <0,001% Li

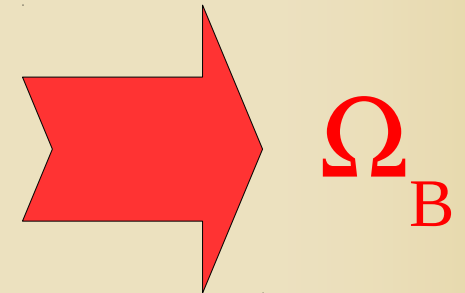
Ősrobbanás kori nukleonszintézis

- Ősrobbanás – megfigyelhető jelenségek

Az Univerzum tágulása

Kozmikus háttérsugárzás (CMB)

Ősrobbanás kori nukleonszintézis (BBN)



- BBN tesztje: izotópeloszlás

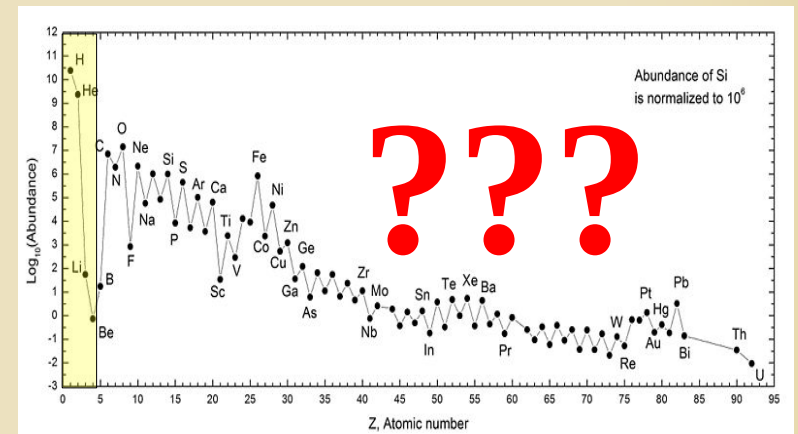
^4He , D, ^3He , ^7Li eloszlás független

^4He and D jól egyezik a méréssel

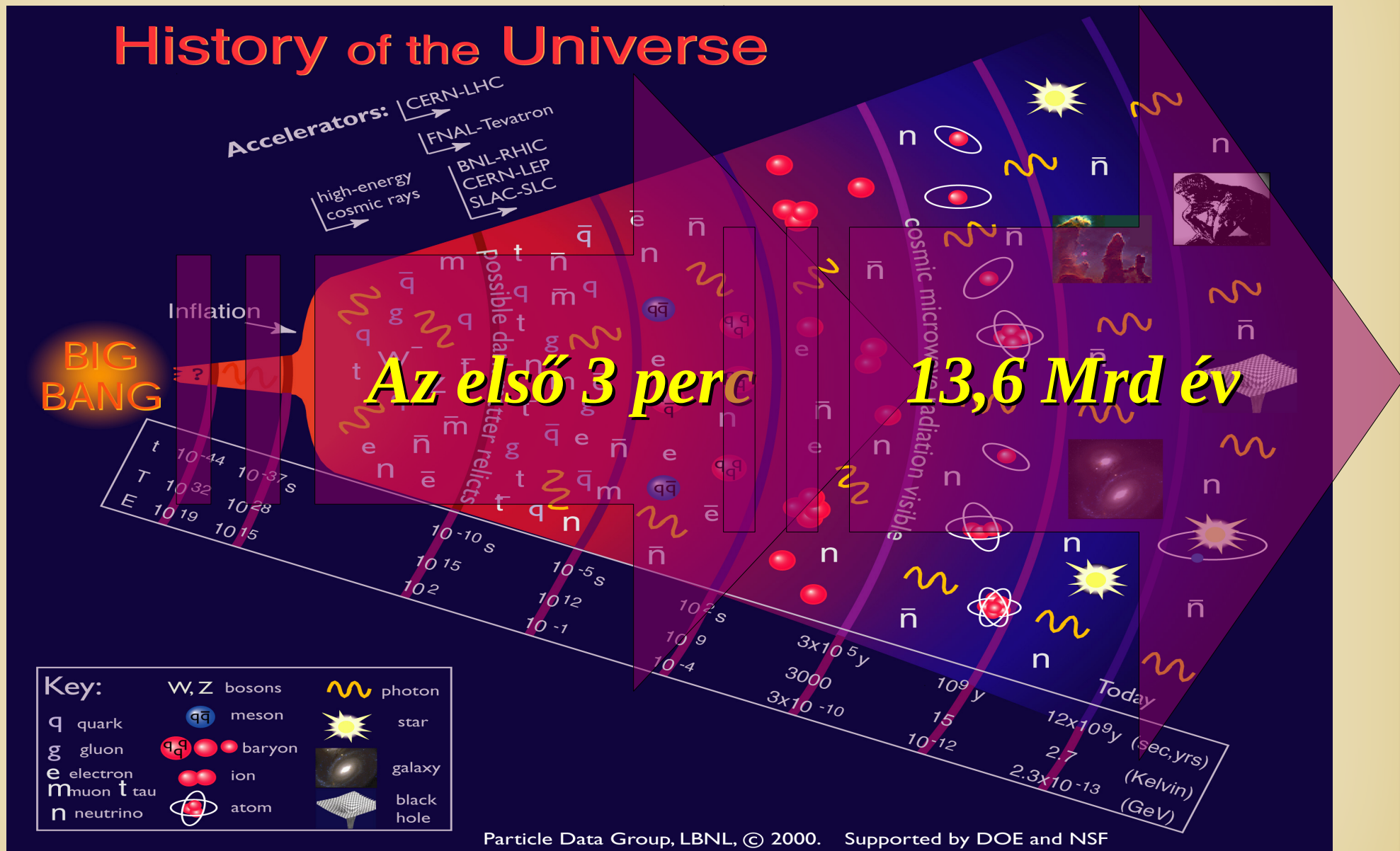
^7Li esetén 5-szörösen túlbecsült

$^2\text{H}(p,\gamma)^3\text{He}$ és $^2\text{He}(p,\gamma)^7\text{Be}$ pontos mérése hiányzik (EURISOL)

(Elméleti input: esetleg valamilyen elnyomási folyamat)

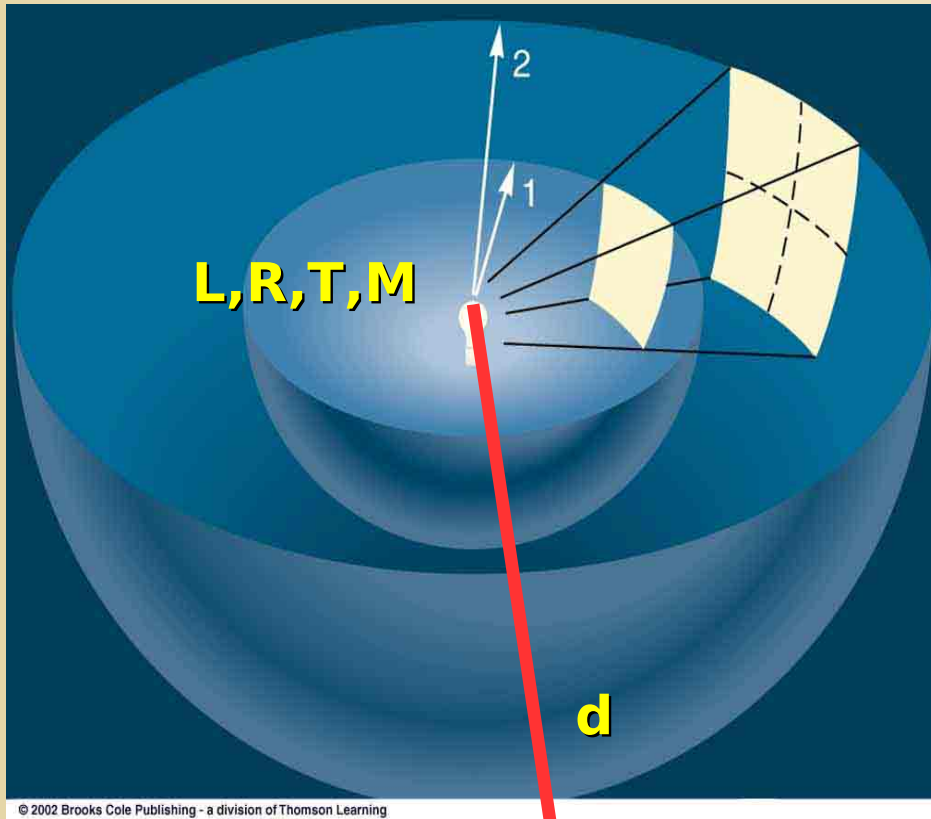


Az Univerzum fejlődése, tovább...



Particle Data Group, LBNL, © 2000. Supported by DOE and NSF

Csillagok fényessége, hőmérséklete



Luminozitás,: kisugárzott energia
(minden frekvencia tartományban):

$$b = L/(4\pi d^2)$$

Feketetest sugárzás:

$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4$$

**A luminozítás a méret és a felületi
hőmérséklet kapcsolata:**

$$L/L_{Np} = (R/R_{Np})^2 (T/T_{Np})^4$$

Nap típusú csillagokra:

$$L/L_{Np} = (M/M_{Np})^{39}$$

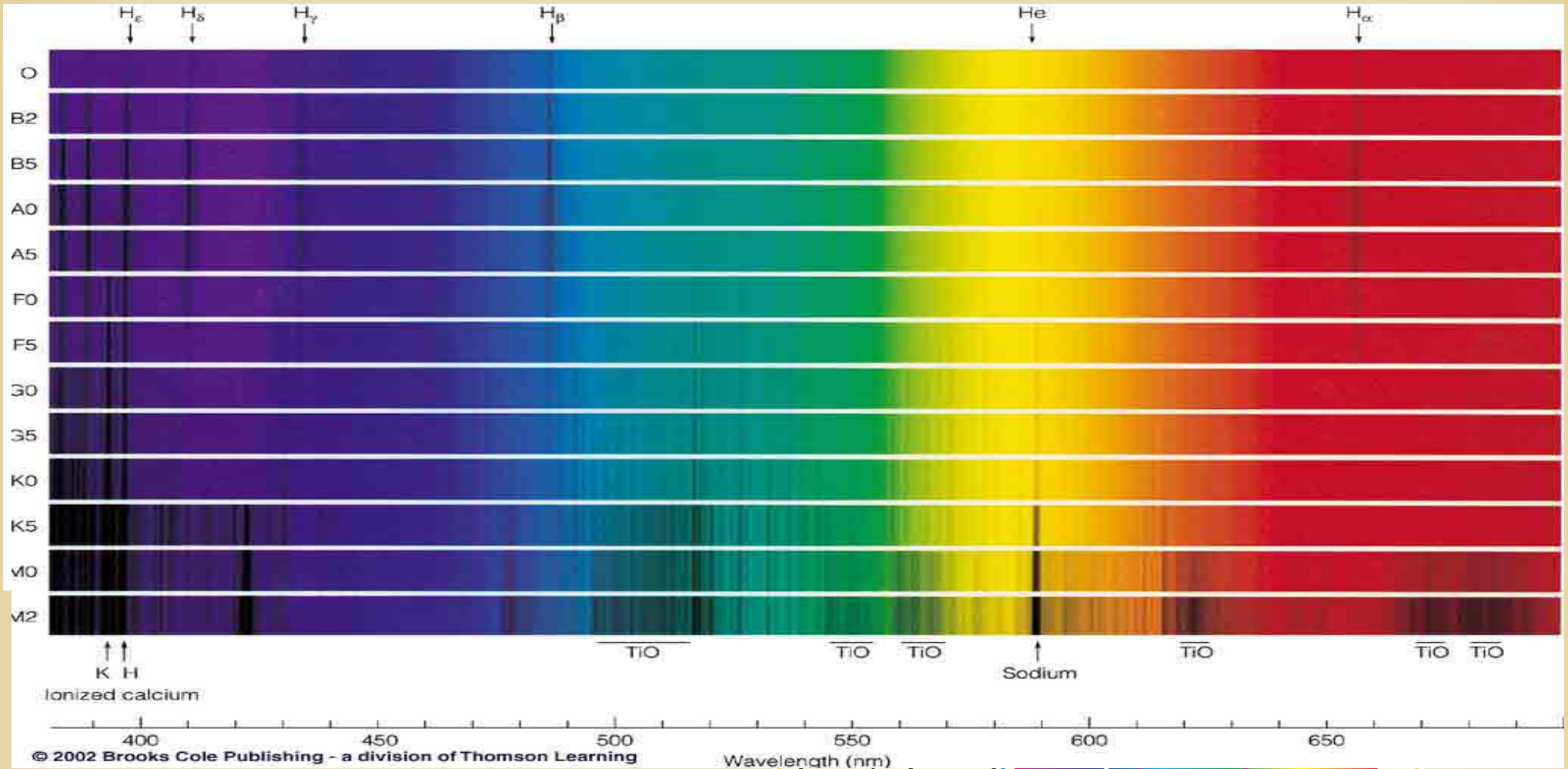
Látszó magnitúdó:

$$m = m_{Np} - 2,5 \log_{10} [(L/L_{Np}) (d_{Np}/d)^2]$$

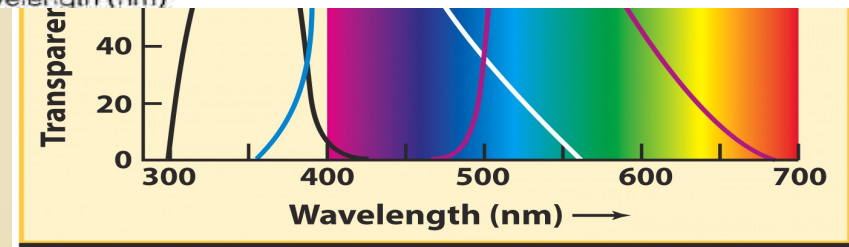
Látszó fényesség, b



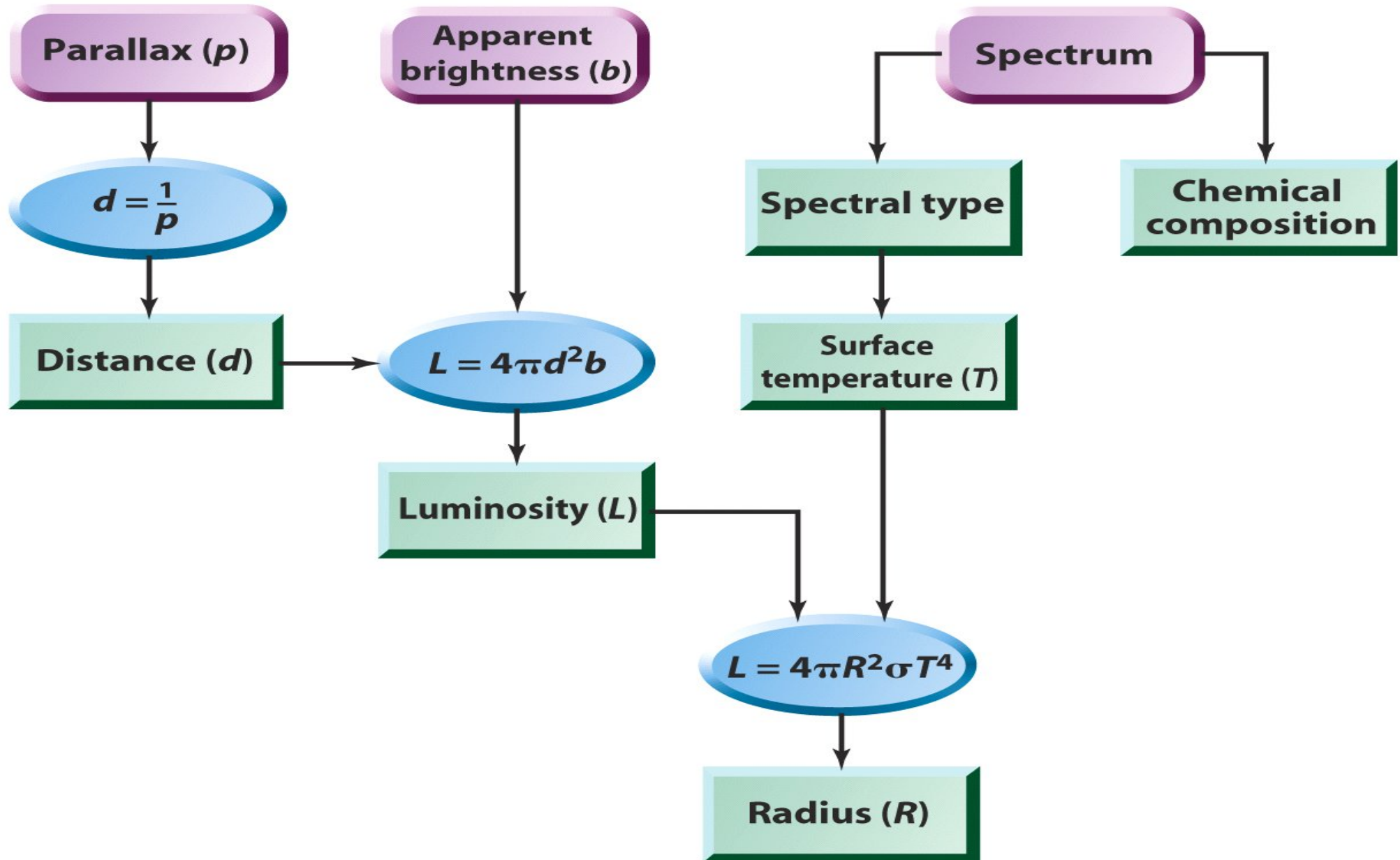
Csillagok színeképe, osztályozása



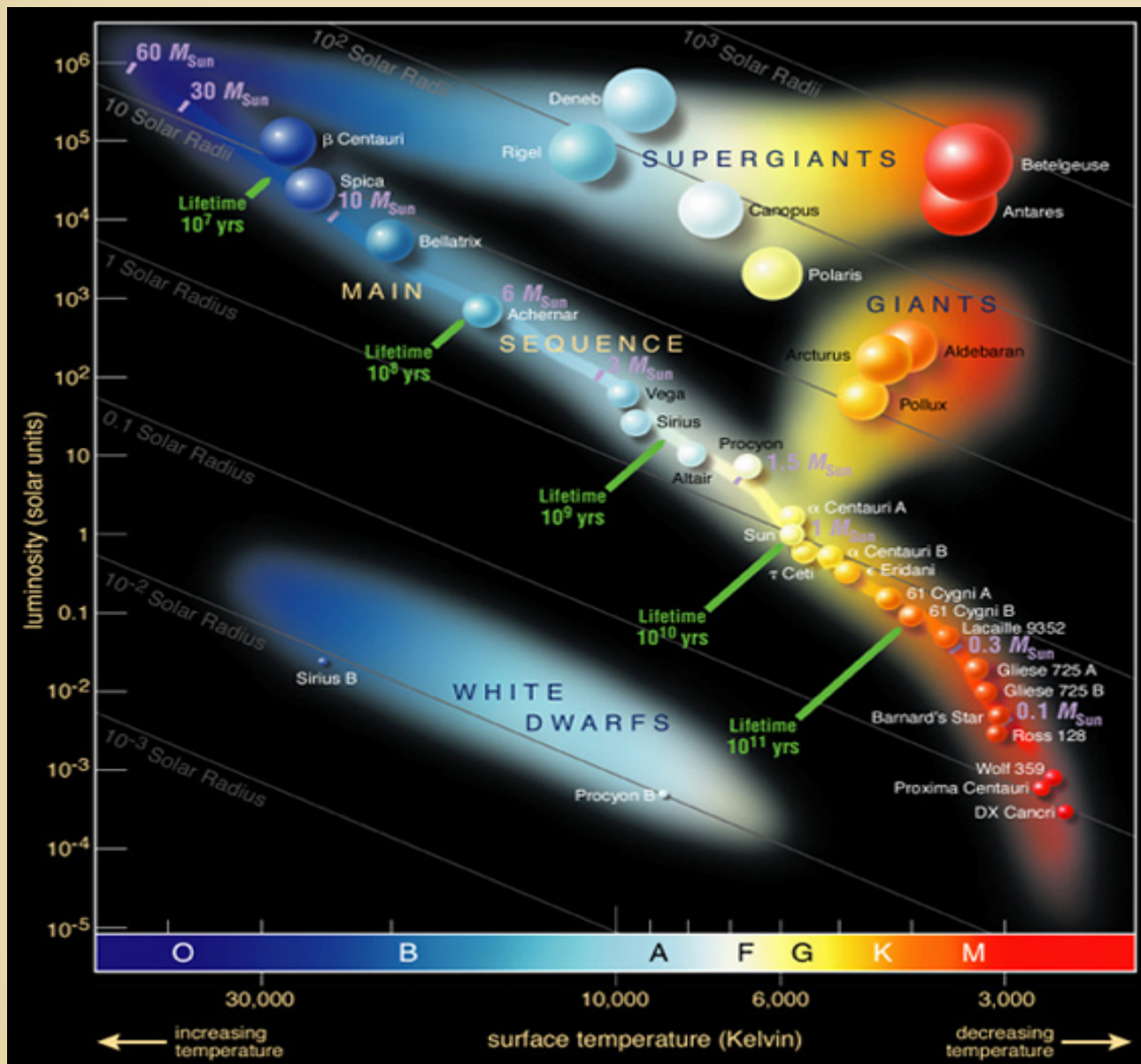
Csillagok spektrál-osztályai:
O-B-A-F-G-K-M a jellemző
 színeképvonalak alapján.



Megfigyelhető csillagtulajdonságok



Hertzsprung – Russel Diagram (1905-13)

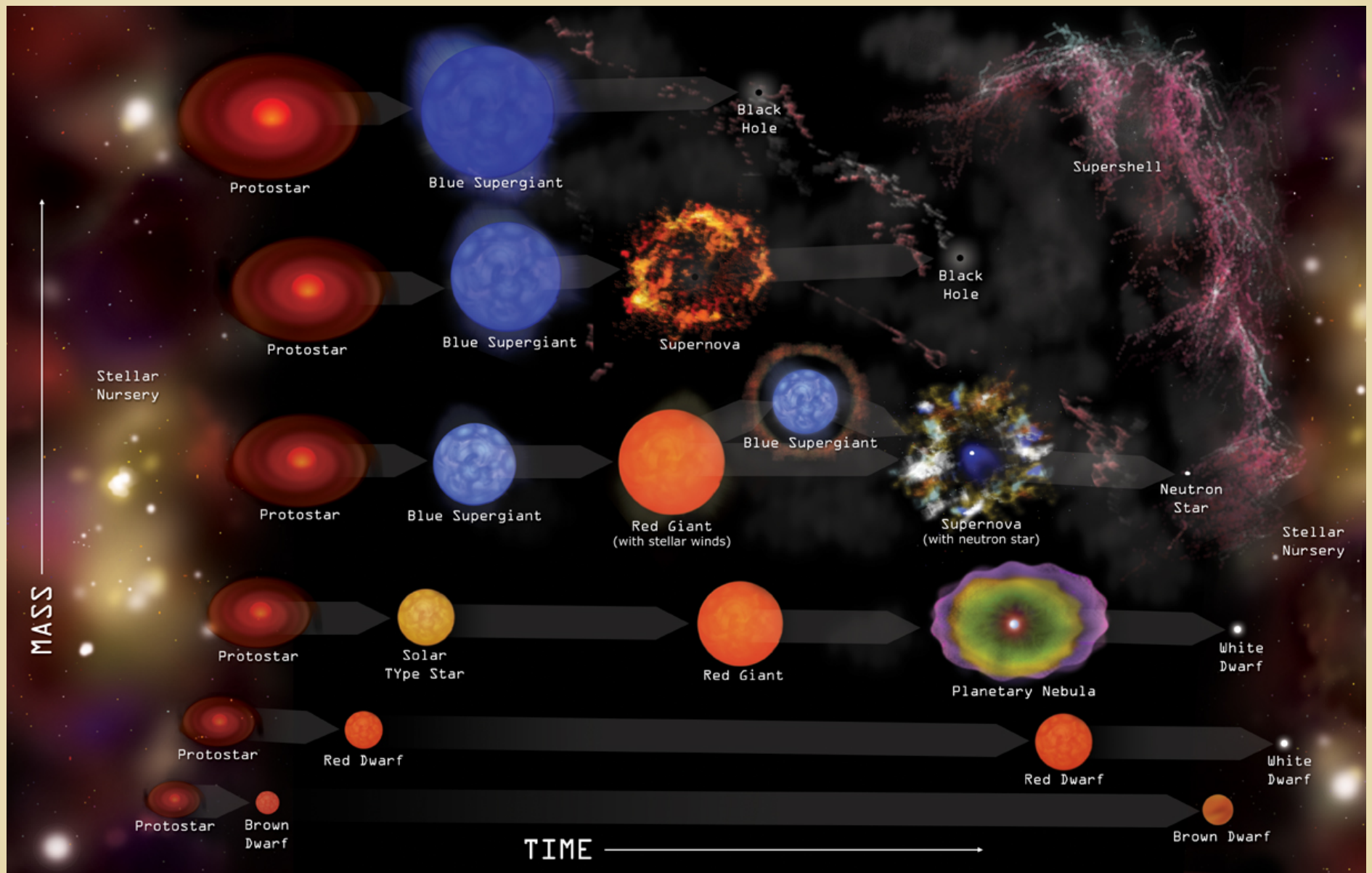


Einar Hertzsprung
Dánia (1877-1967)

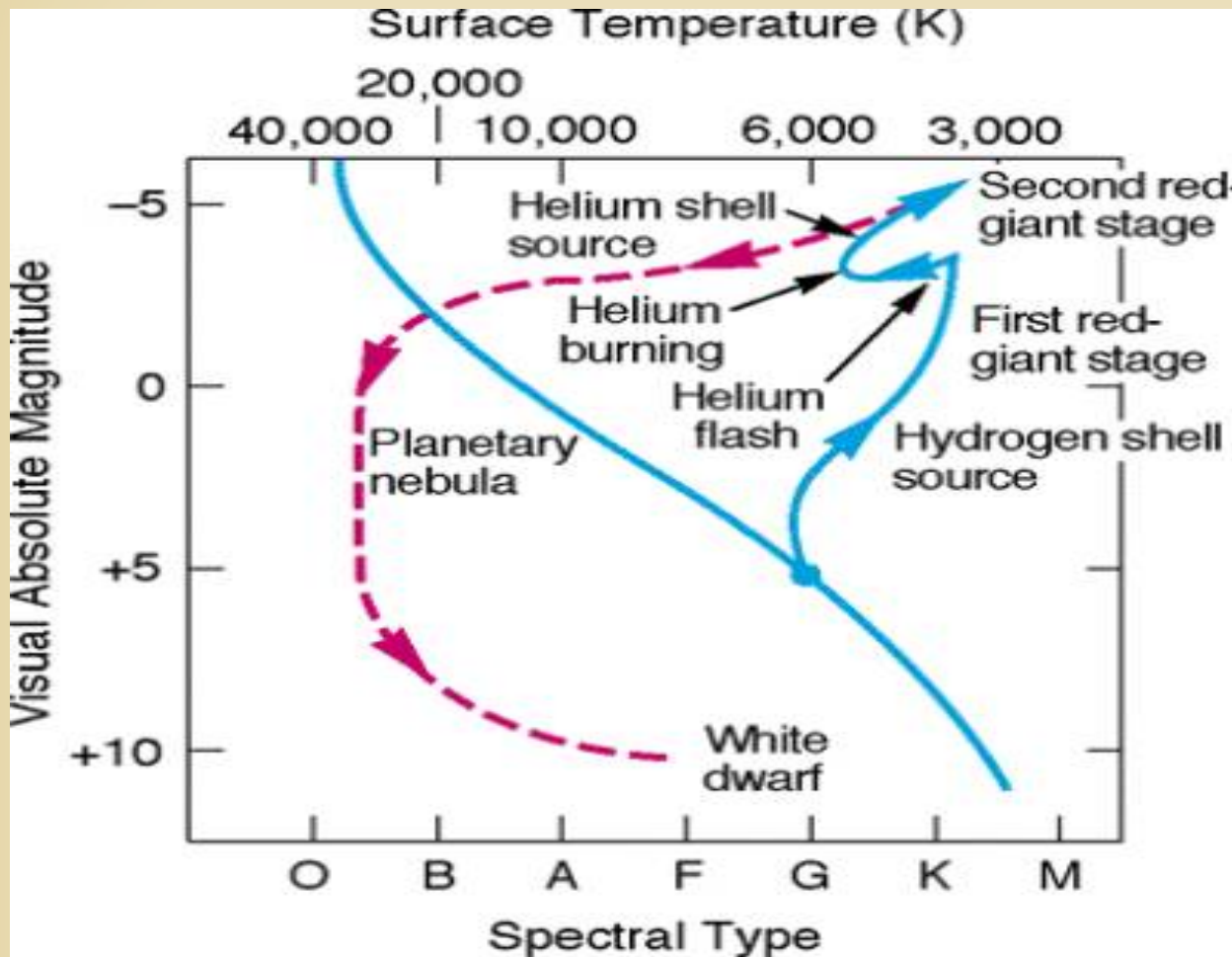


Henry N. Russell
USA (1877-1957)

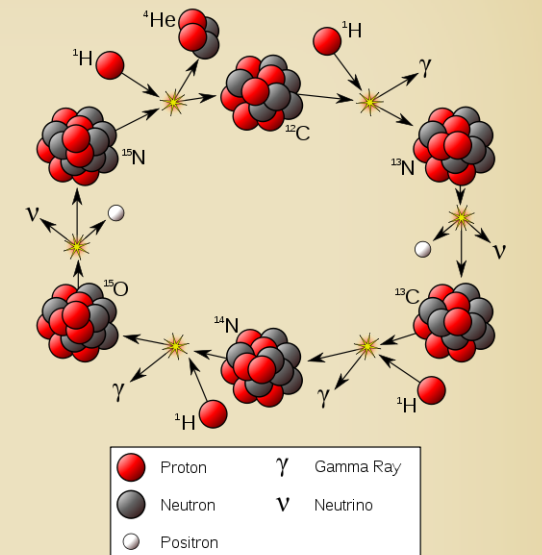
Csillagok fejlődése, halála



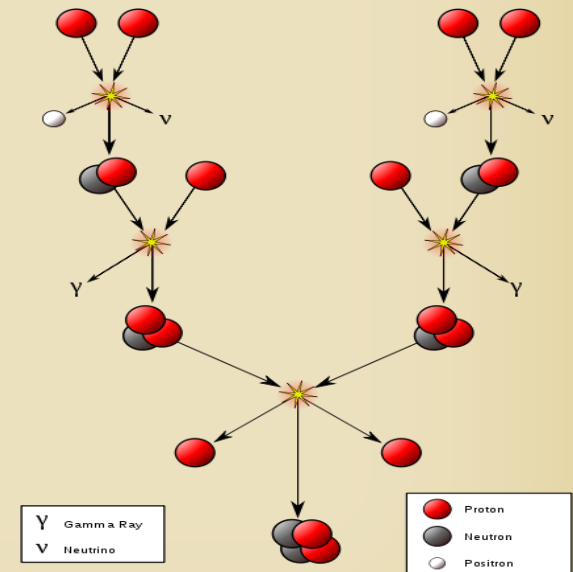
Csillagfejlődés a HRDn = nukleonszintézis



**CNO
ciklus**



**PP
ciklus**



PP: $T_c < 2 \cdot 10^7 \text{K}$, $M < 1,5 M_{\text{si}}$, $\epsilon_{\text{PP}} \sim \rho T^4$, $\tau \sim 7 \cdot 10^9 \text{ év}$

CNO: $T_c > 2 \cdot 10^7 \text{K}$, $M > 1,5 M_{\text{si}}$, $\epsilon_{\text{CNO}} \sim \rho T^{17}$, $\tau \sim 3 \cdot 10^8 \text{ év}$

Nukleonszintézis csillagokban

- Fősorozati csillagok („hidrosztatikus égés”)

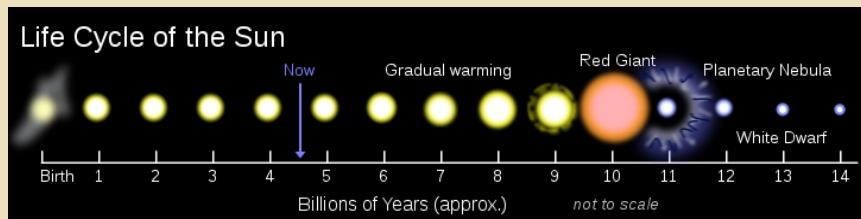
hidrosztatikus egyensúly: gravity vs. nyomás (nukleáris foly.)

H égés tömegfüggően PP vagy CNO ciklus

Li,, Fe stabil állapotig

nagy csillag: hagymaszerkezet

akár több héjban is éghet

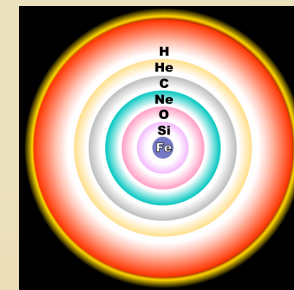


Termonukleáris fúzió lépései ($25 M_{\odot}$)		
Állomás	$T_{\text{kit}} \text{ [K]}$	Időtartam
H fúzió	$4 \cdot 10^7$	$7 \cdot 10^6$ év
He fúzió	$2 \cdot 10^8$	$5 \cdot 10^5$ év
C fúzió	$6 \cdot 10^8$	600 év
Ne fúzió	$1,2 \cdot 10^9$	1 év
O fúzió	$1,5 \cdot 10^9$	6 hónap
Si fúzió	$2,7 \cdot 10^9$	1 nap

- Nehézelemek szintézise: növőák, XRB

Fe lenne a minimális energiájú állapot

nem egyensúlyi, kataklizmikus folyamatok



Nukleonszintézis csillagokban

- PP ciklus $4 {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + e^+ + e^+ + \bar{\nu}_e + \bar{\nu}_e + 5pJ$

nagyon kicsi a σ (bezavar a CB)

Gran Sasso: ${}^3\text{He}({}^3\text{He}, 2p){}^4\text{He}$; ${}^2\text{H}(p, \gamma){}^3\text{He}$;

${}^3\text{He}(\alpha, \gamma){}^7\text{Be}$; ${}^{14}\text{N}(p, \gamma){}^{15}\text{O}$

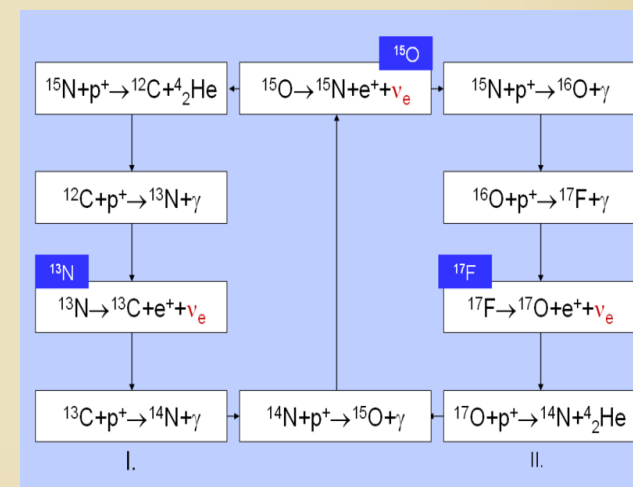
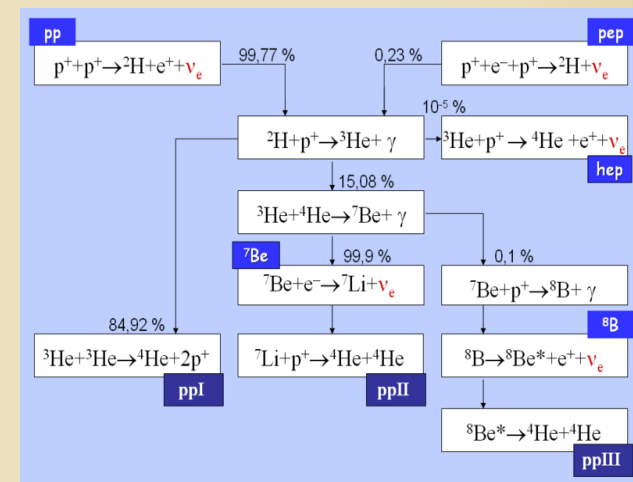
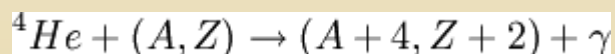
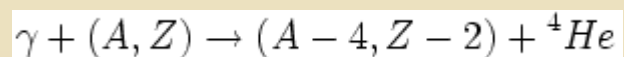
Pontosítani: ${}^7\text{Be}(p, \gamma){}^8\text{B}$;

- CNO ciklus

Pontosítani: ${}^{12}\text{C}(\alpha, \gamma){}^{16}\text{O}$;

- Alfaciklus:

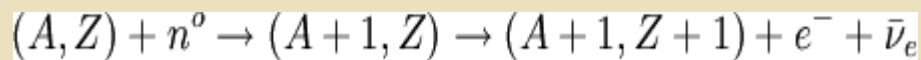
$A \sim 20\text{-}50$ rendszámú elemek keletkezése



Nehéz elemek szintézise – nóvák, XRB

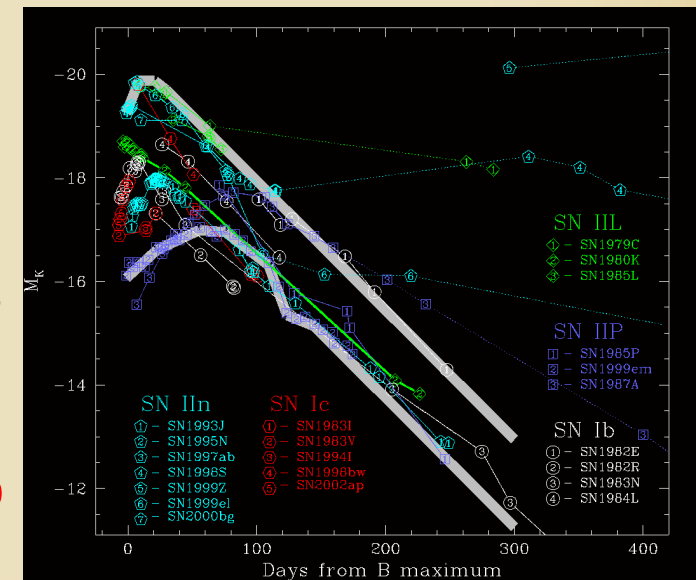
- Szupernóva robbanás

- központi mag kiég, összeomlik $\sim 1\text{-}2\text{ km}$ -es „NS” jön létre
behulló anyag felmelegszik, lökéshullámot kelt
- s-folyamat: instabil izotópok bomlási ideje rövidebb, mint a neutronbefogás ideje. $T > 10^7\text{K}$, n^0 többlet ($^{56}\text{Fe} \rightarrow 13\text{He} + 4n^0$)



lassú, folyamat $Z < 100$ -ig, $A < 250$ -ig

- r-folyamat: ha az instabil izotópok bomlási ideje rövidebb, mint a n-befogás ideje. Nagy neutronfluxusra, $T \sim 10^9\text{ K}$
- Ilyen folyamatok σ mérésére ritka izotóp nyalábos gyorsítókban lehetséges



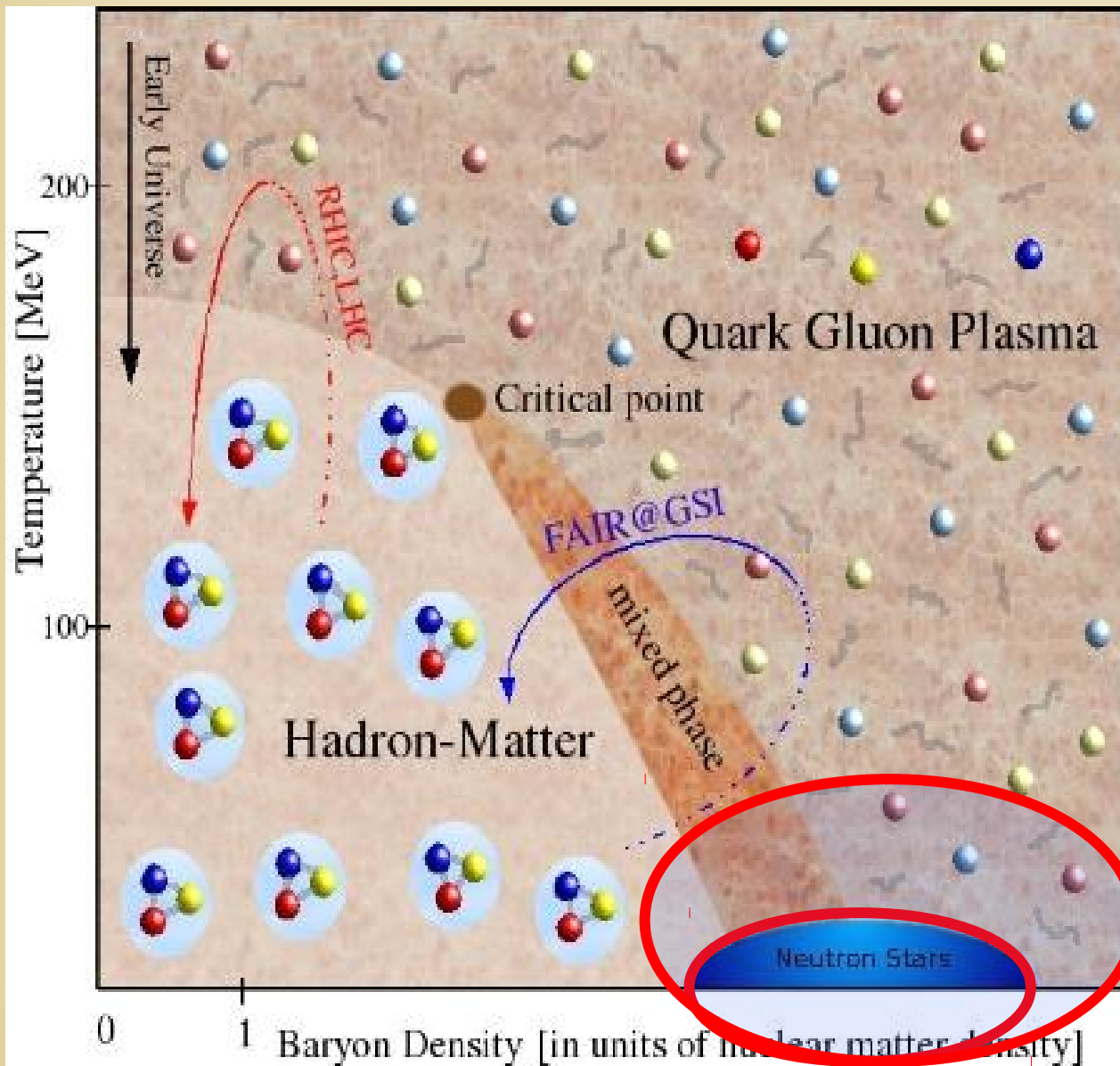
Szupernóva maradványok: kompakt csillagok



A fényes csillagokat látjuk, de a (halott)
kompakt csillagok nem láthatóak az
égbolton.

Mégis hogyan láthatjuk és vizsgálhatjuk
a „fekete tehenet a sötétben”?

Az erősen kölcsönható anyag fázisai

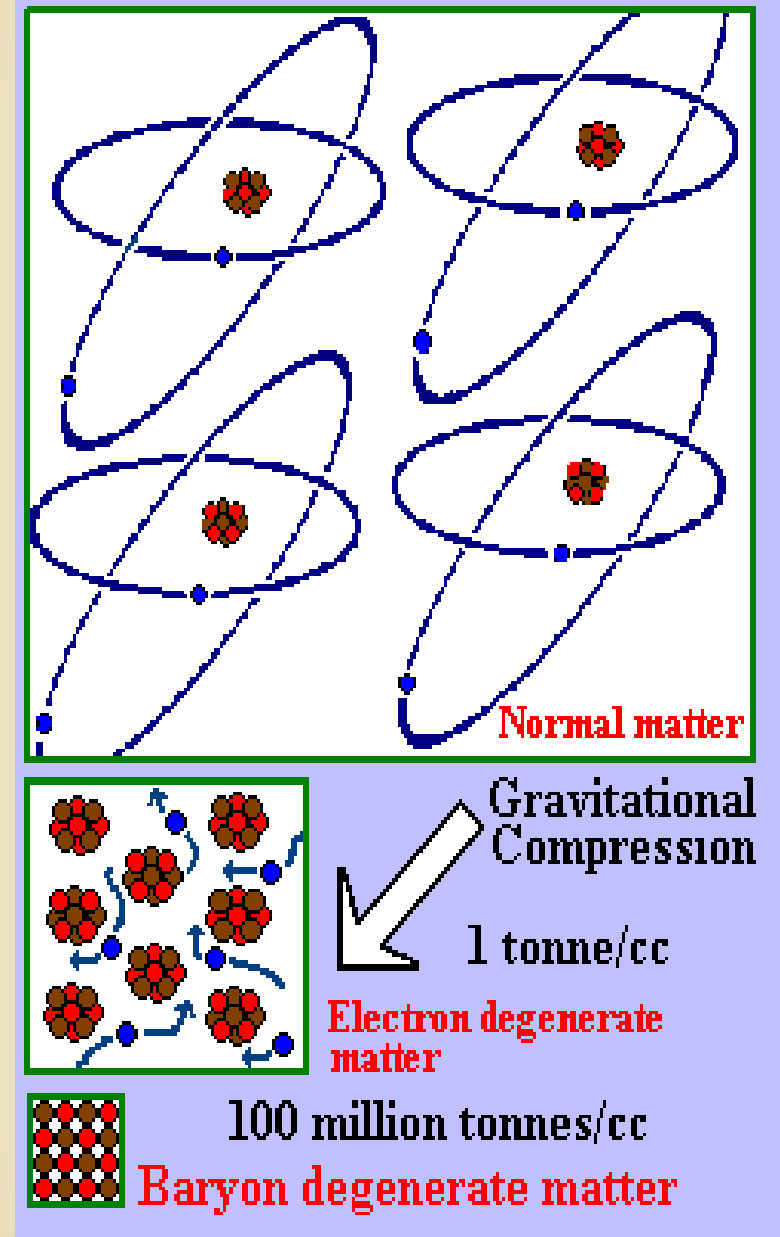
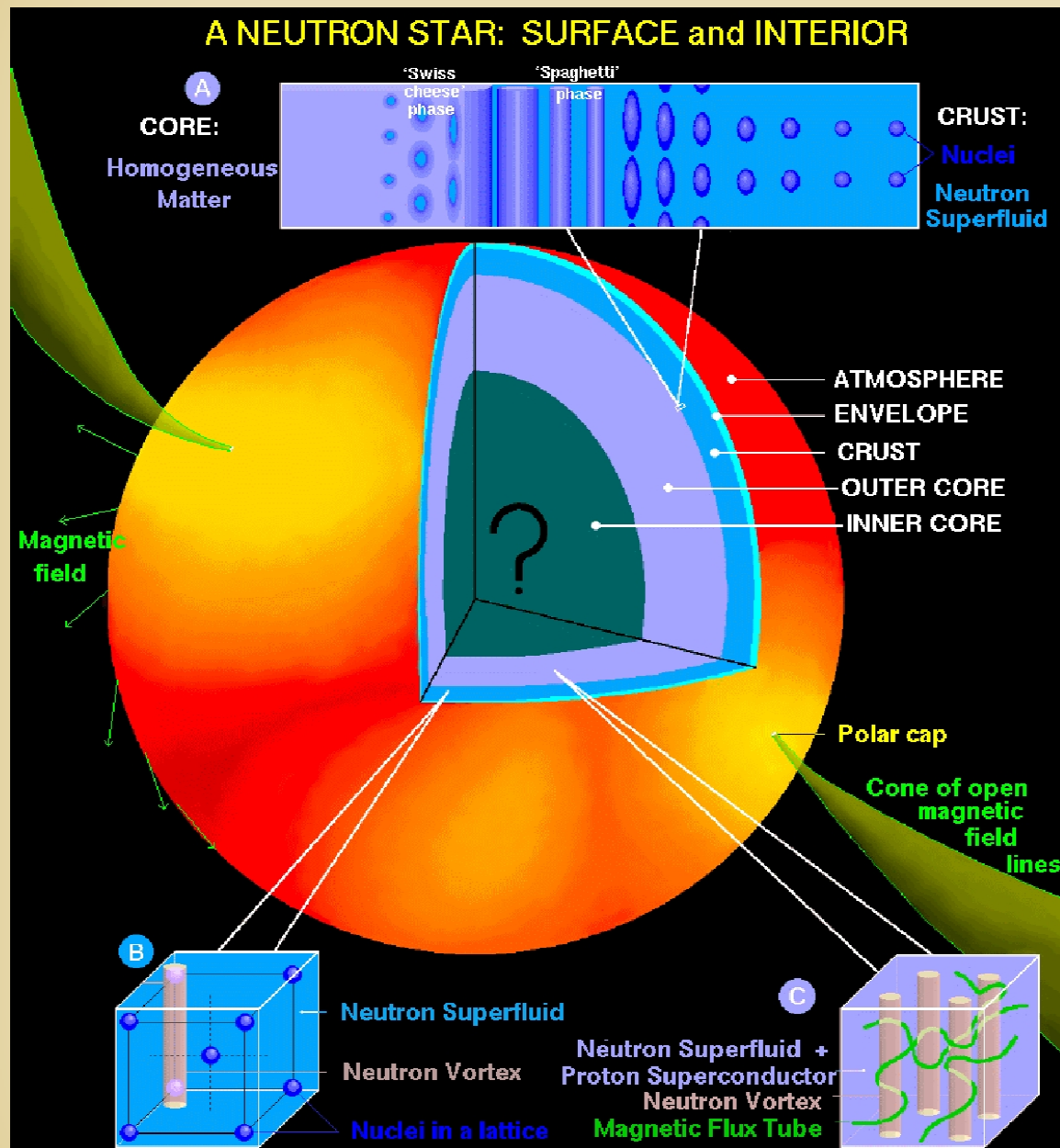


A nehézion ütközések magas hőmérsékletű tesztek, amelyek QGP-t ill. az Univerzum korai állapotait vizsgálják: SPS, RHIC, LHC.

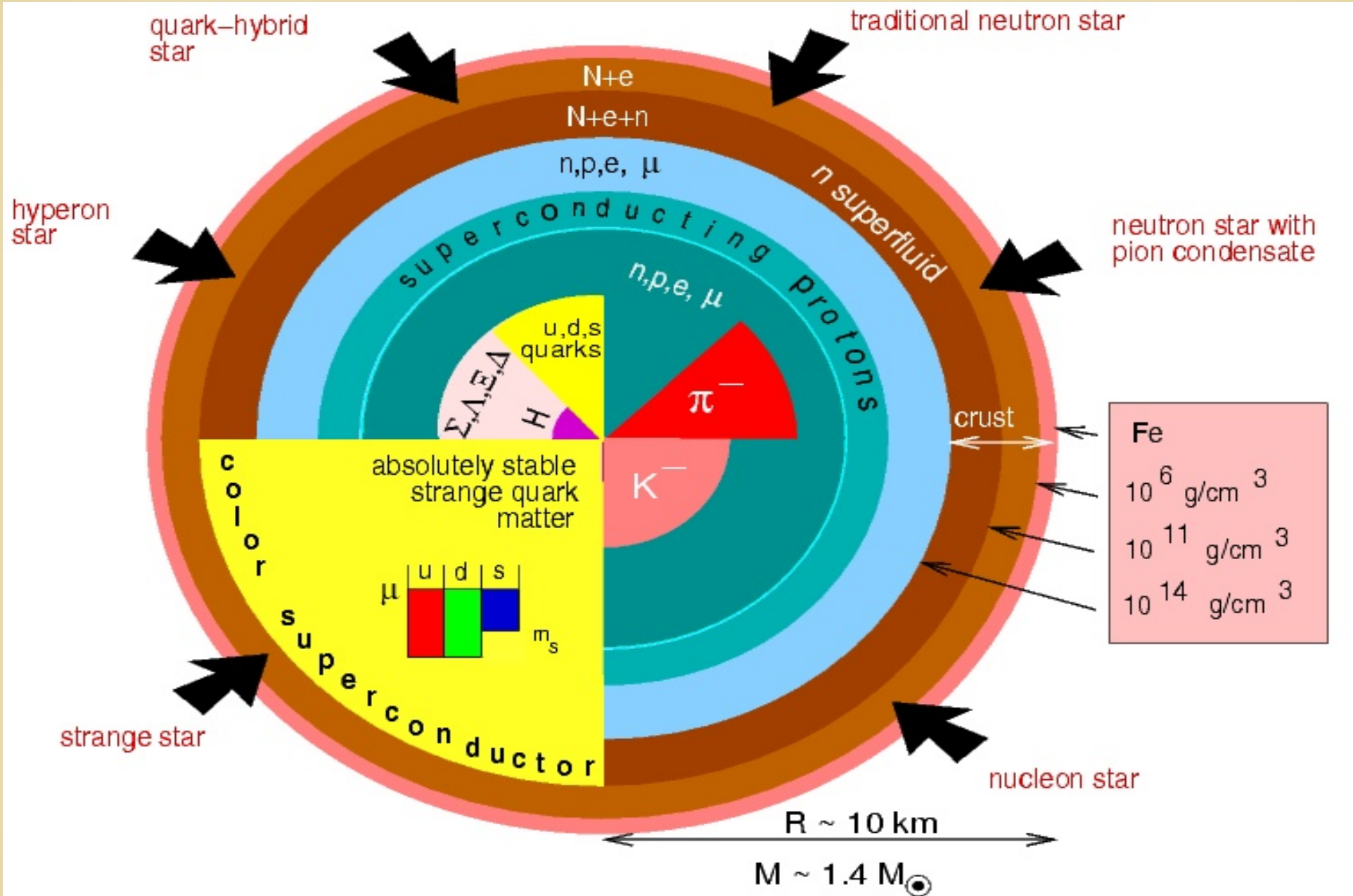
A FAIR a GSI-ben kisebb hőmérsékletű, de nagyobb sűrűségeket vizsgál majd.

Kompakt objektumok nagyon sűrűek. A sűrű, hideg ($T=0$) QCD anyagot vizsgálhatjuk bennük.

Neutroncsillag belső szerkezete



Kompakt csillagbelsők modelljei



Kompakt csillagok vizsgálata

- Megfigyelések

rádióteleszkópokkal,

infravörös (HSO, ISO), és UV

röntgen/ γ (INTEGRAL),

vizuális megfigyelés (néhány NS HST)

nagyenergiás folyamatok (CERN, BNL, FAIR)

gravitációs hullám detektorok

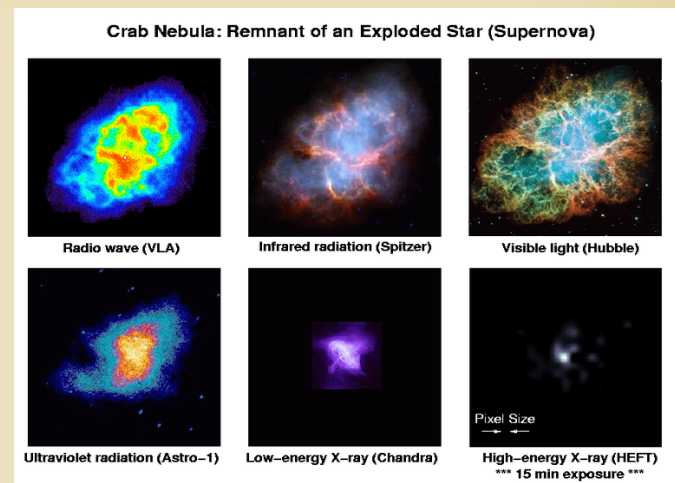
- Elméleti leírás

Min. feltétel: GR + EoS (degenerált Fermi gáz) + szimmetriák

Szimmetriák: gömb vagy hengerszimmetria

GR: statikus vagy forgó (pulzár)

EoS: maganyag vagy QCD állapotegyenlet



Nagyberendezések, Projektek

- GSI FAIR (HIE_ISOLDE)
- CERN + Gran Sasso
- European COllaboration on Stable ion beams (ECOS)
- Isotope Separator On-Line (ISOL, GSI)
- Nuclear Physics Network, NupNET (NuPECC)
- European Isotope Separation On-Line (EURISOL)
- Challenges and Advanced Research
In Nuclear Astrophysics (CARINA)
- CompStar (ESF, EU FP7)

