

Kémiai elemszintézis csillagokban

01

Takács Roxána
Fizika BSc 3. évfolyam
2020.11.19.

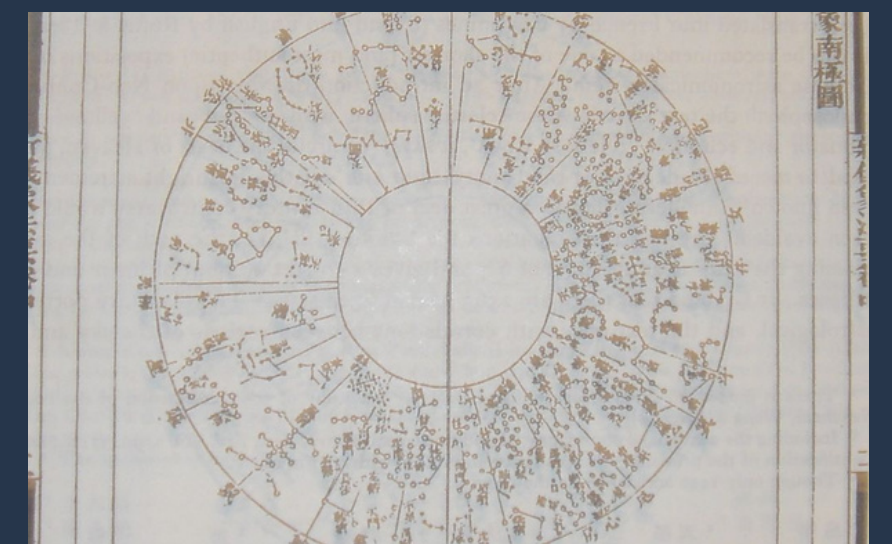
„A csillagok sem élnek örökké,
éppúgy, mint az emberek.
Születnek, élnek, idővel
változnak és fejlődnek, majd
meghalnak. Csupán a csillagok
ezt sokkal látványosabban
teszik, mint az emberek!”

Történeti áttekintő

- Ősi kultúrák: A csillagok Istenek
- 1900-as évek eleje: Gravitációs összehúzódnás
→ A Nap 10-20 millió éves
- 1905: Radioaktív kormeghatározási módszerek
→ A Föld 1-2 milliárd éves

02

Kérdés: A Föld 100-szor idősebb volna, mint a Nap?



- 1920: Arthur Eddington - első felvetés
- 1928: George Gamow- alagúteffektus
- 1939: Hans Bethe: „A csillagok energiatermelése”
- 1938: Carl Friedrich von Weizsäcker (CNO)

03

A csillagfejlődés kiindulási oka: nukleáris egyensúlyi állapot elérésére



Magok keletkezése

Hidrogénégés
(p-p ciklus, CNO
ciklus)

Hélium-
égés

C- , O -, Ne-
égés

Szilícium-
égés

s-folyamatok

r-folyamatok

p-folyamatok

e-folyamatok

Magok keletkezése

Hidrogénégés
(p-p ciklus, CNO
ciklus)

Hélium-
égés

C- , O -, Ne-
égés

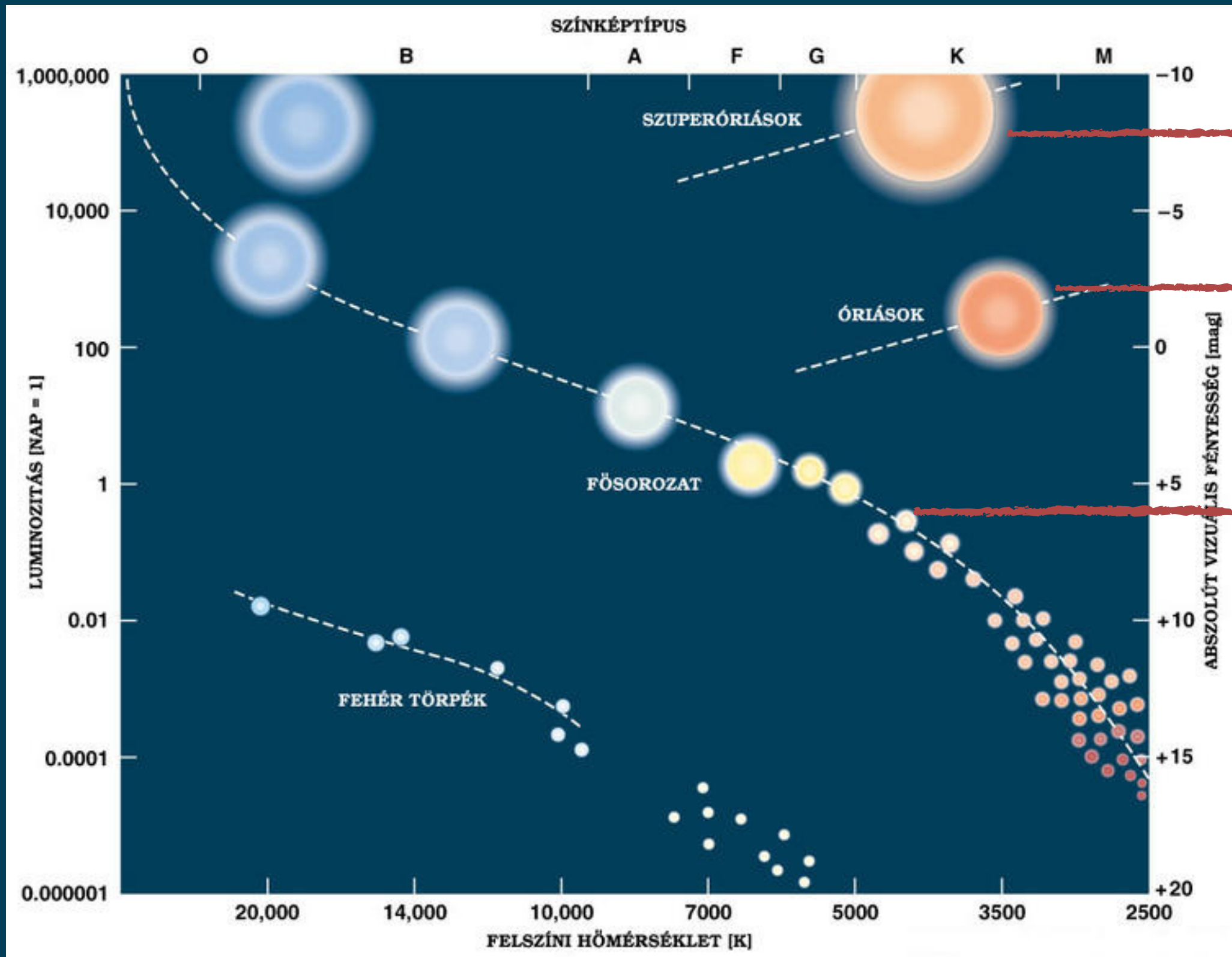
Szilícium-
égés

s-folyamatok

r-folyamatok

p-folyamatok

e-folyamatok



C-,O-,Ne-égés
Szilíciumégés

Héliumégés

Hidrogénégés

Magok keletkezése

Hidrogénégés
(p-p ciklus, CNO
ciklus)

Hélium-
égés

C- , O -, Ne-
égés

Szilícium-
égés

s-folyamatok

r-folyamatok

p-folyamatok

e-folyamatok

Hidrogénégés

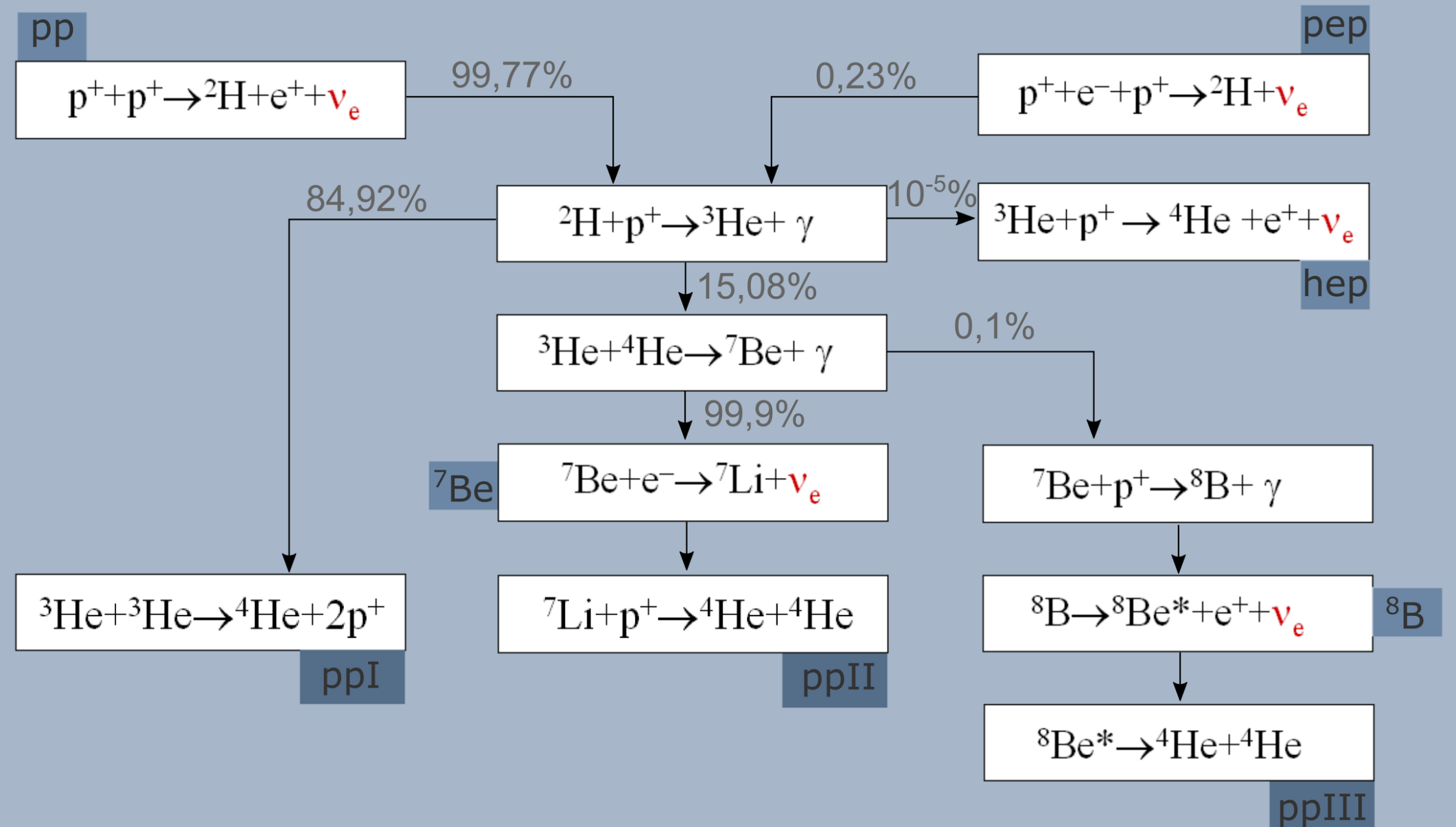
Proton-proton ciklus

- 0,08 és 1,5 naptömegű fősorozati csillagok
- Hidrogén atommagokból hélium atommagok
- Energiafelszabadulás: gamma-fotonok
- Másodpercenként $6 \cdot 10^{14}$ g hidrogén alakul héliummá

Hidrogénégés

Proton-proton ciklus

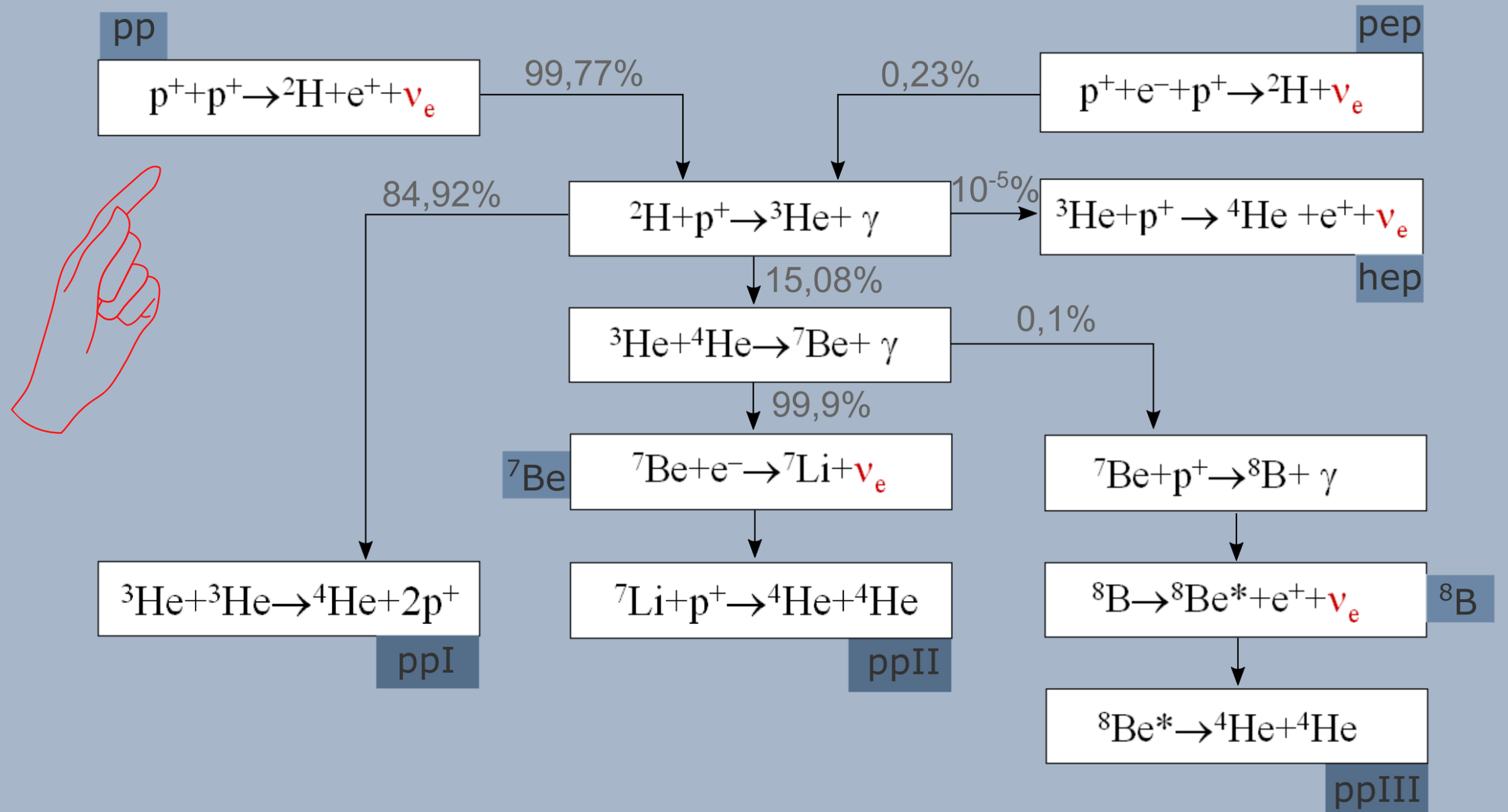
	Arány:	Hőmérséklet:
PPI:	90%	10–14 Millió K
PPII:	10%	14–23 Millió K
PPIII:	0,01%.	23- Millió K



Hidrogénégés

Proton-proton ciklus

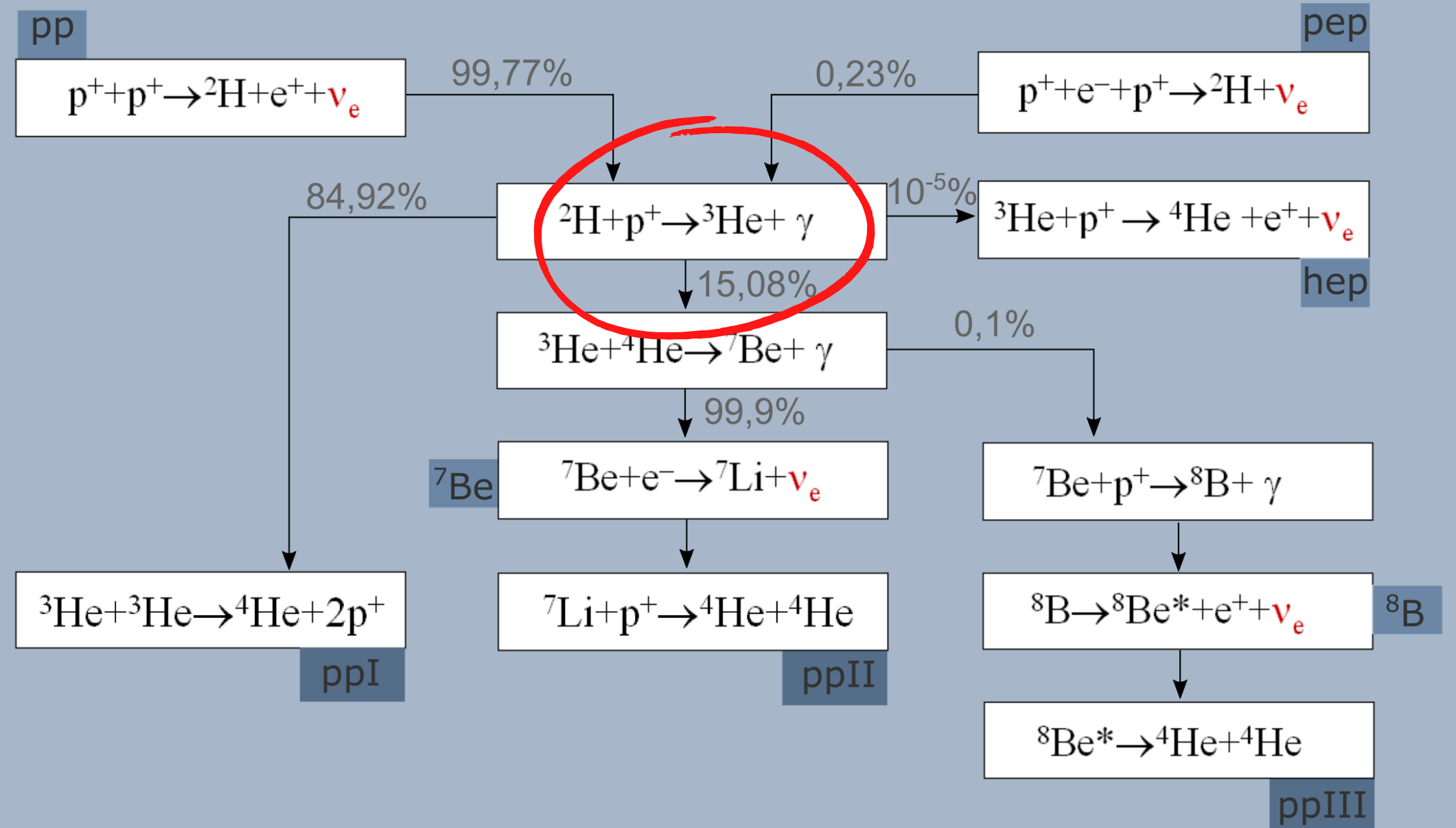
	Arány:	Hőmérséklet:
PPI:	90%	10–14 Millió K
PPII:	10%	14–23 Millió K
PPIII:	0,01%.	23- Millió K



Hidrogénégés

Proton-proton ciklus

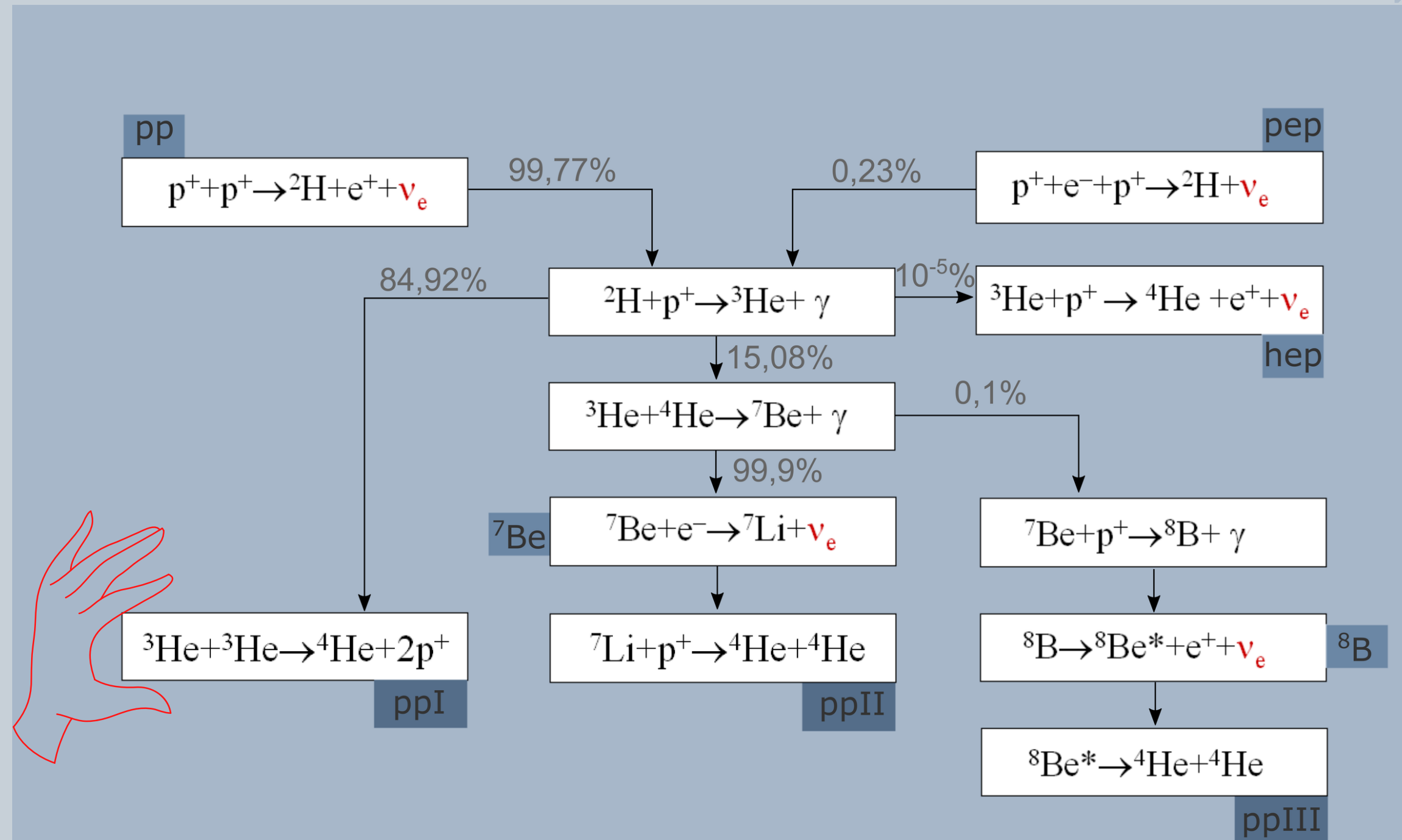
	Arány:	Hőmérséklet:
PPI:	90%	10–14 Millió K
PPII:	10%	14–23 Millió K
PPIII:	0,01%.	23- Millió K



Hidrogénégés

Proton-proton ciklus

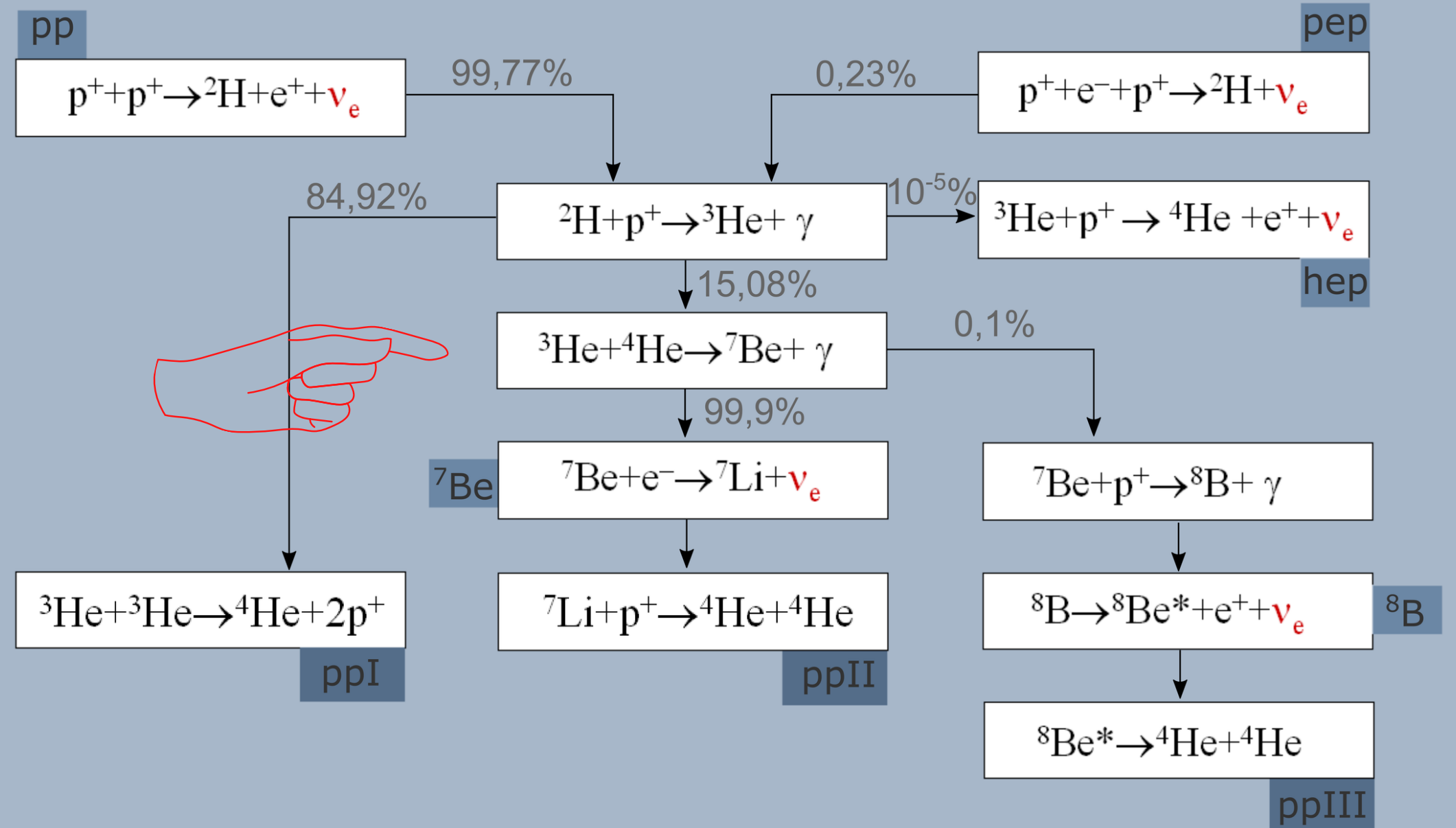
	Arány:	Hőmérséklet:
PPI:	90%	10–14 Millió K
PPII:	10%	14–23 Millió K
PPIII:	0,01%.	23- Millió K



Hidrogénégés

Proton-proton ciklus

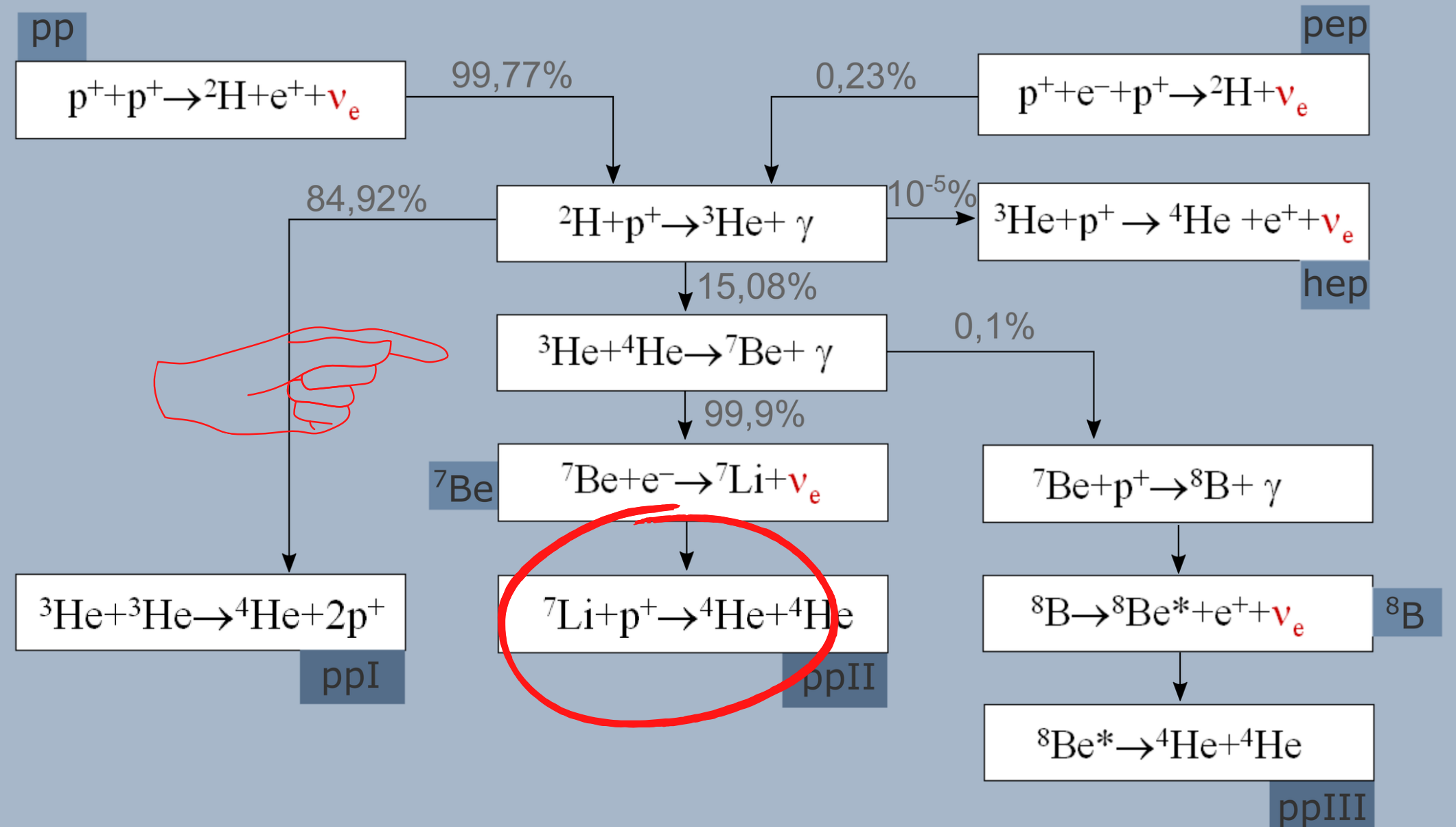
	Arány:	Hőmérséklet:
PPI:	90%	10–14 Millió K
PPII:	10%	14–23 Millió K
PPIII:	0,01%.	23- Millió K



Hidrogénégés

Proton-proton ciklus

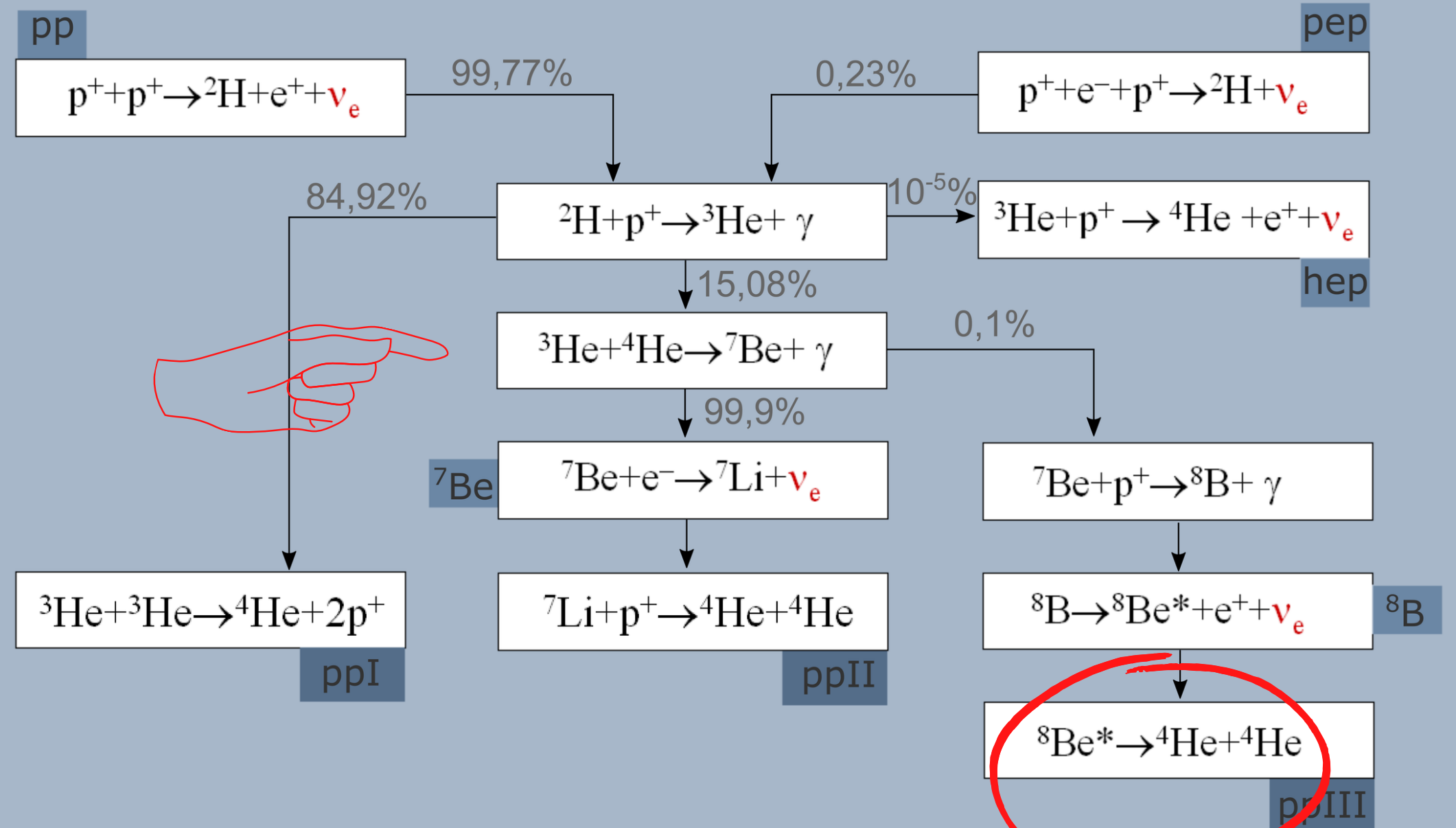
	Arány:	Hőmérséklet:
PPI:	90%	10–14 Millió K
PPII:	10%	14–23 Millió K
PPIII:	0,01%.	23- Millió K



Hidrogénégés

Proton-proton ciklus

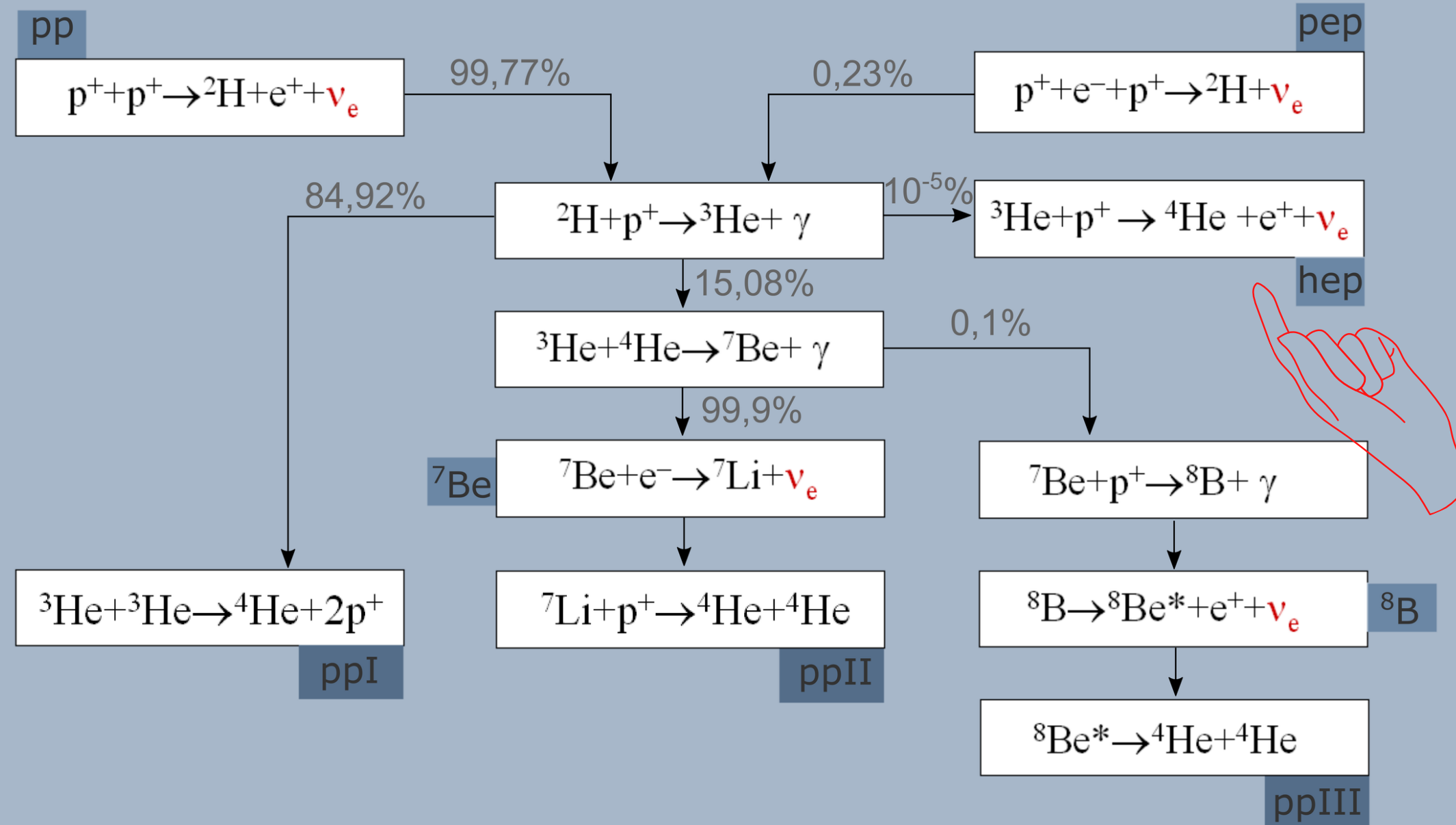
	Arány:	Hőmérséklet:
PPI:	90%	10–14 Millió K
PPII:	10%	14–23 Millió K
PPIII:	0,01%.	23- Millió K



Hidrogénégés

Proton-proton ciklus

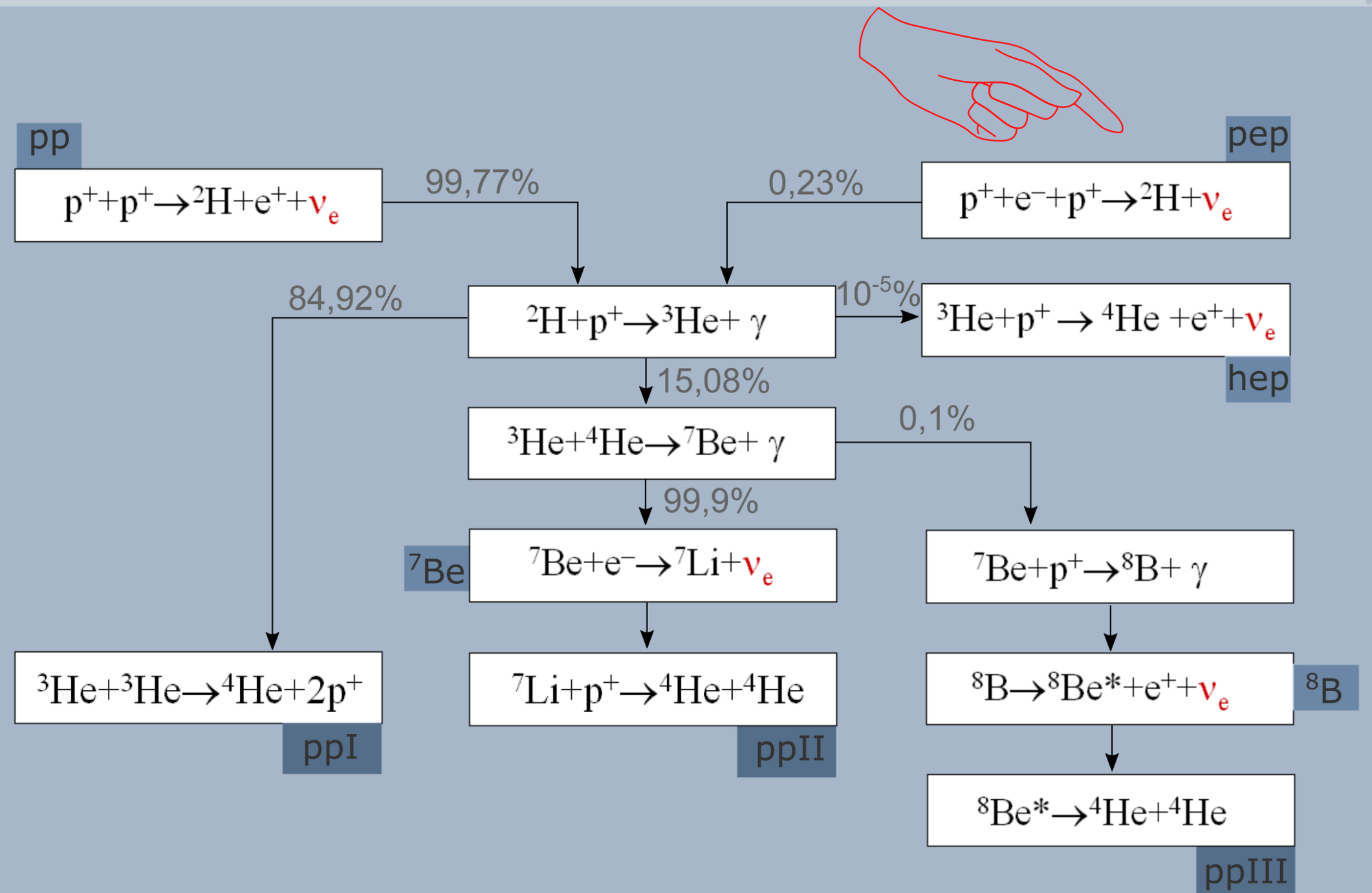
	Arány:	Hőmérséklet:
PPI:	90%	10–14 Millió K
PPII:	10%	14–23 Millió K
PPIII:	0,01%.	23- Millió K



Hidrogénégés

Proton-proton ciklus

	Arány:	Hőmérséklet:
PPI:	90%	10–14 Millió K
PPII:	10%	14–23 Millió K
PPIII:	0,01%.	23- Millió K



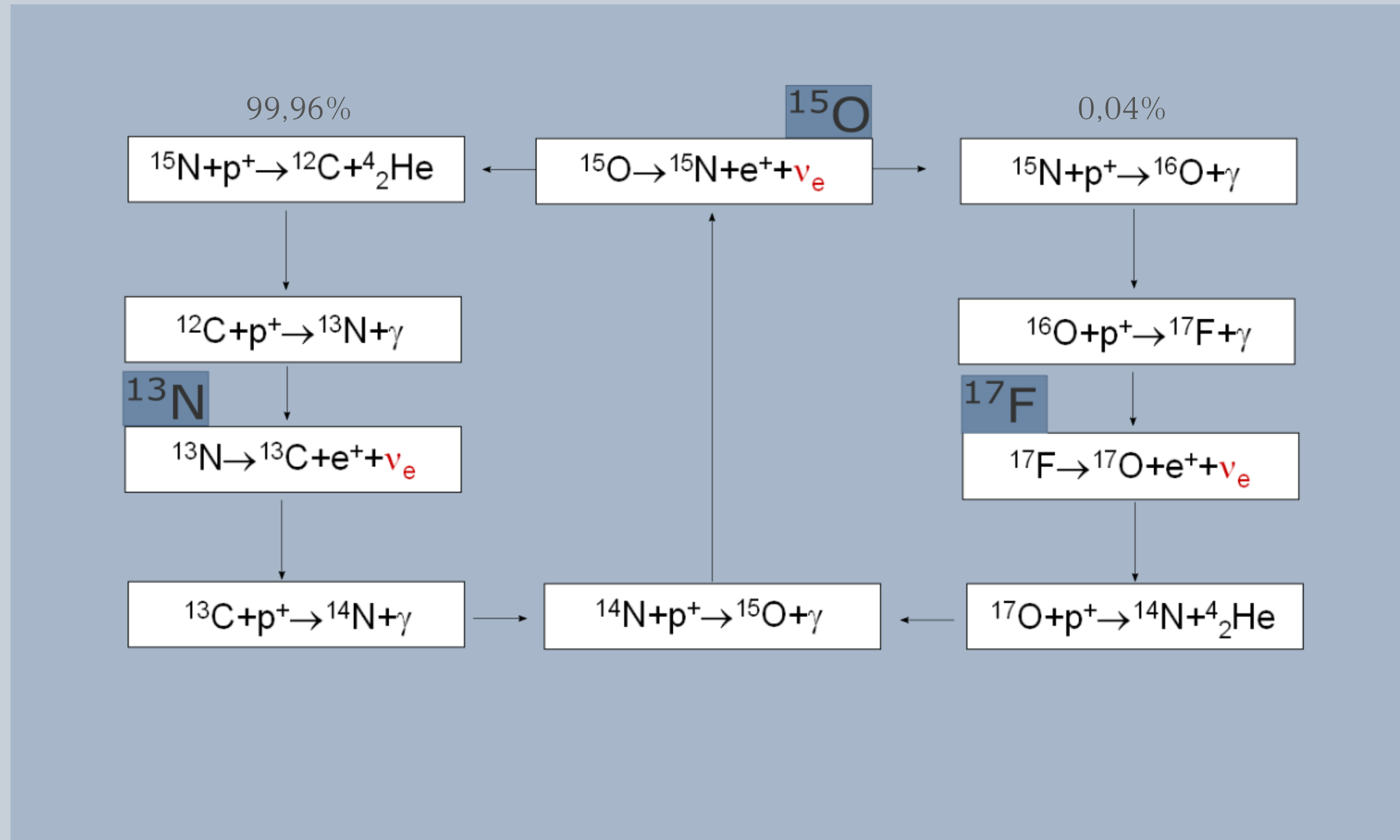
Hidrogénégés

CNO-ciklus

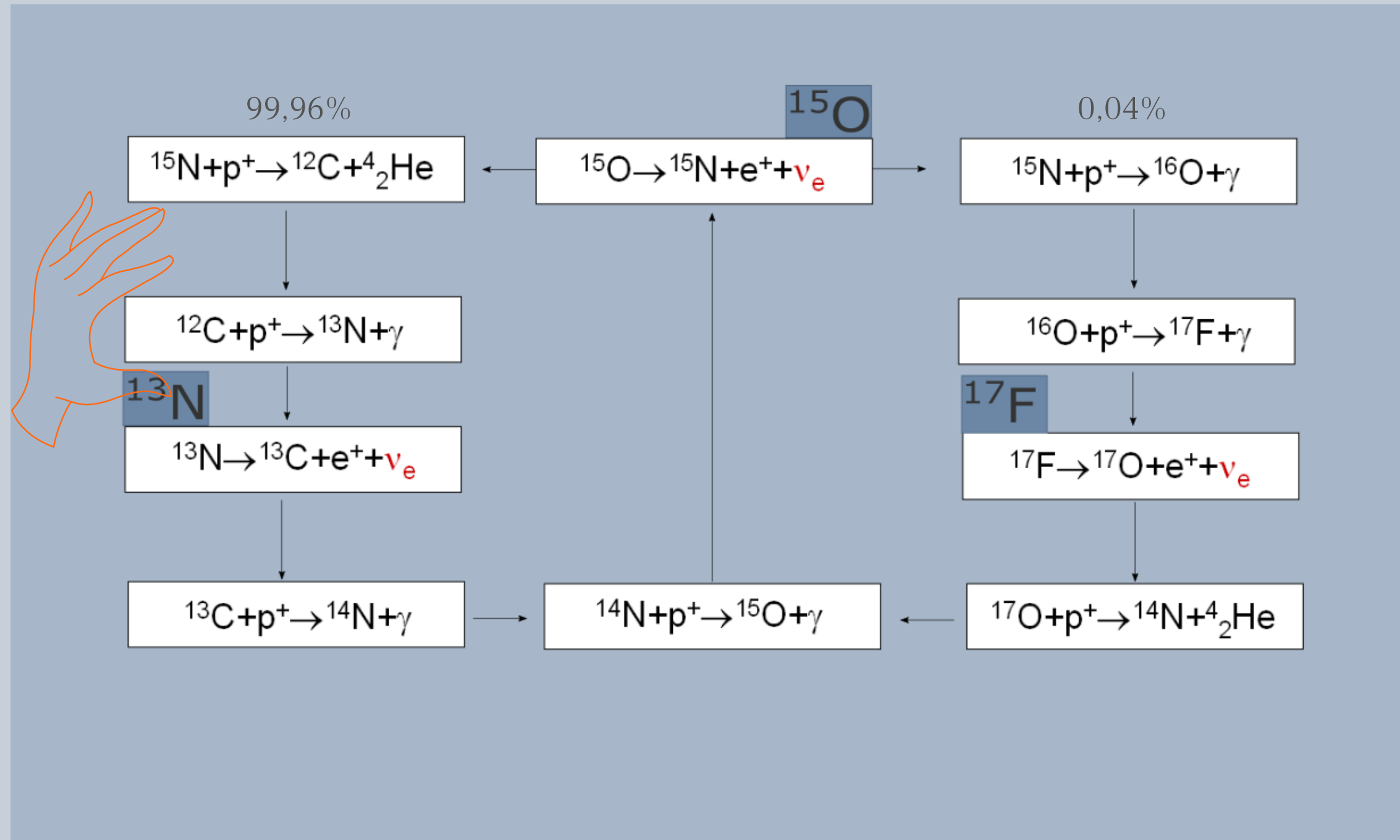
(Bethe-Weizsäcker-féle szén-nitrogén ciklus)

- Főszorozatbeli csillagok (1,5 naptömegnél nagyobb)
- Hidrogén atommagokból hélium atommagok
- Energiafelszabadulás: gamma-fotonok
- A szén, nitrogén és oxigén atommagok katalizátorok

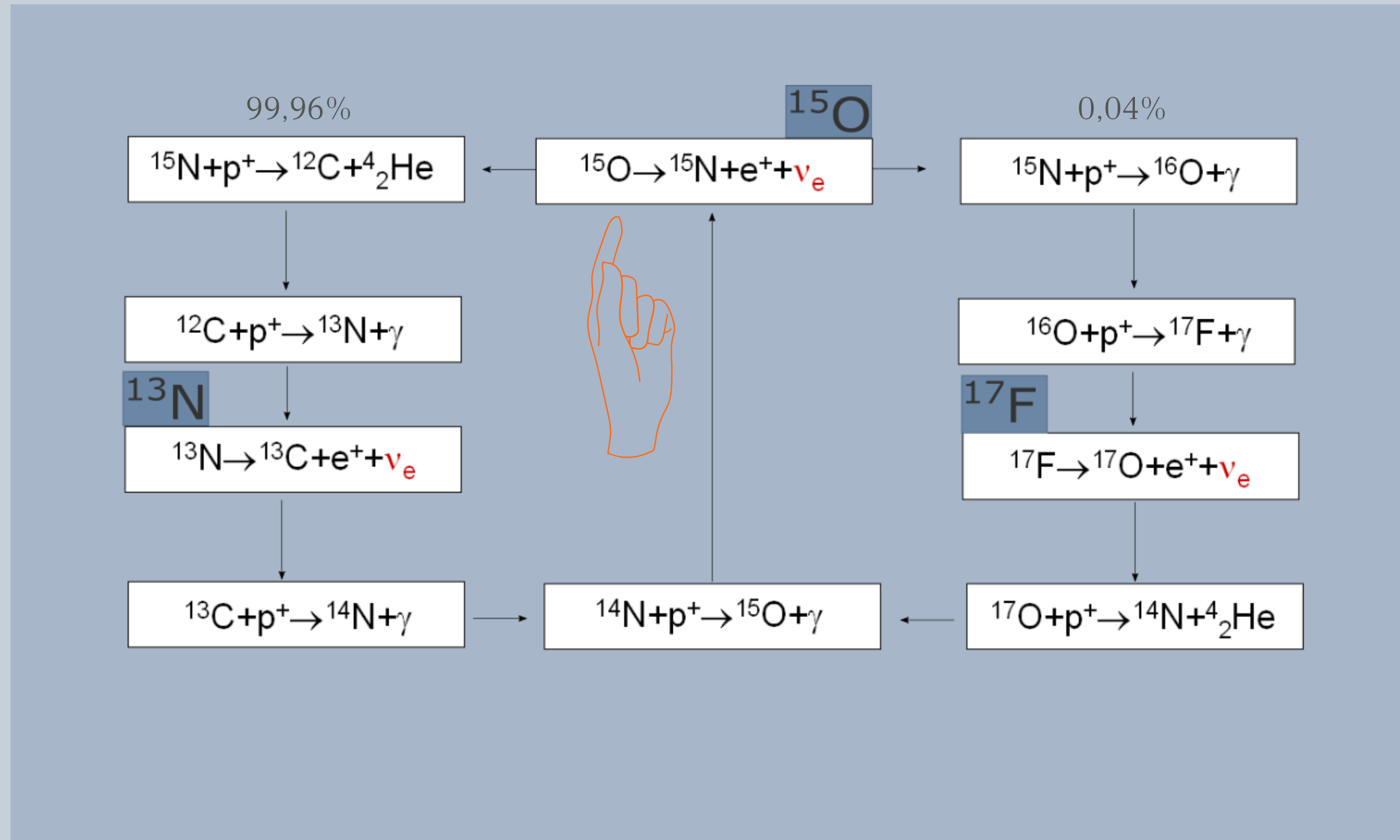
Hidrogénégés CNO-ciklus



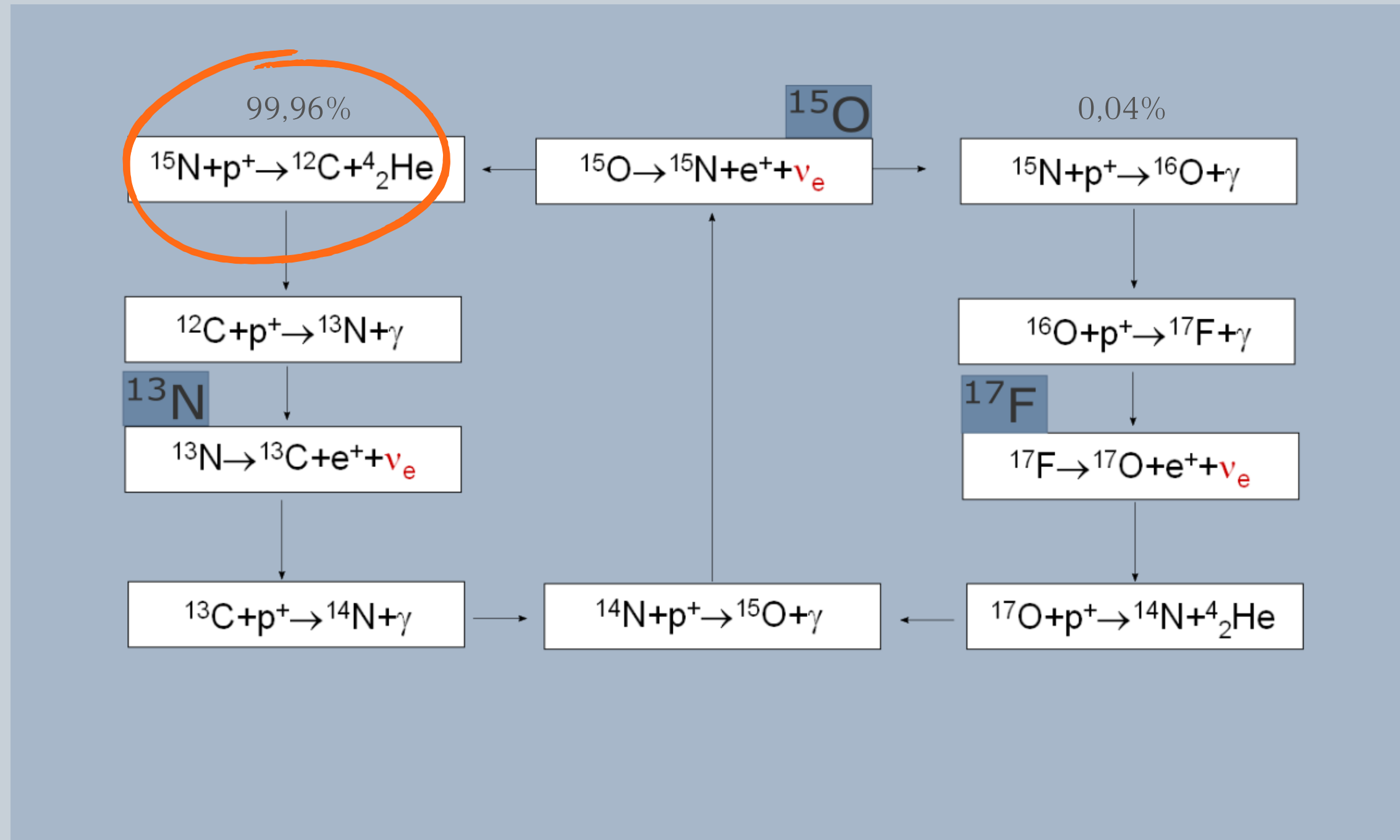
Hidrogénégés CNO-ciklus



Hidrogénégés CNO-ciklus



Hidrogénégés CNO-ciklus



Héliumégés

Vörös óriások:

- külső részben: Hidrogén égetés

- belső részében: $1 \cdot 10^8$ - $5 \cdot 10^8$ K

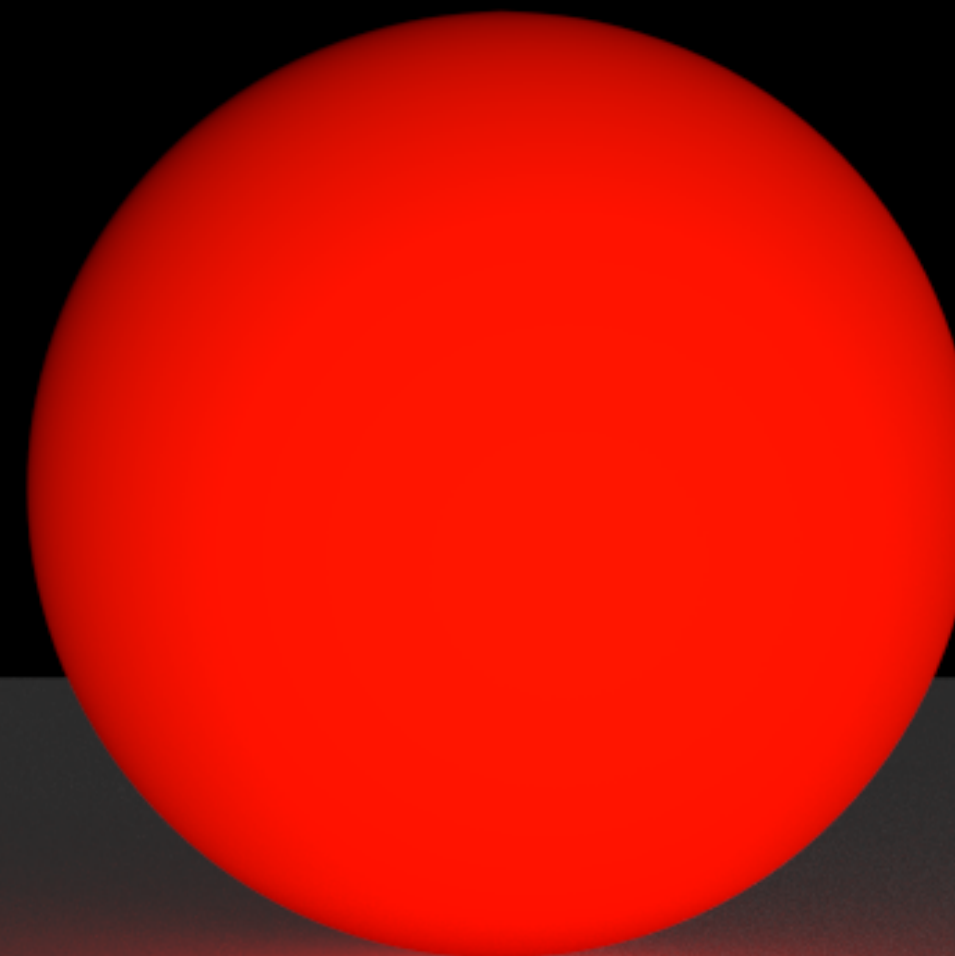
Hélium égetés →

Hármas α -folyamat

> 0,5 naptömeg

10

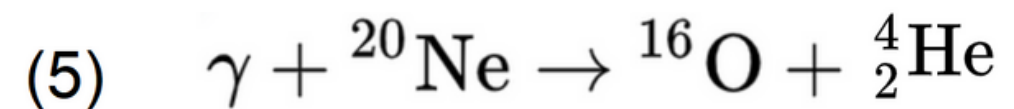
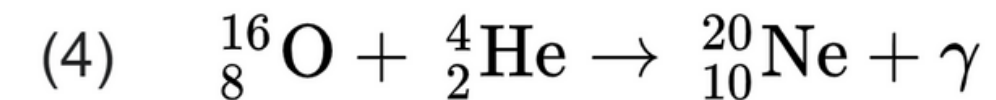
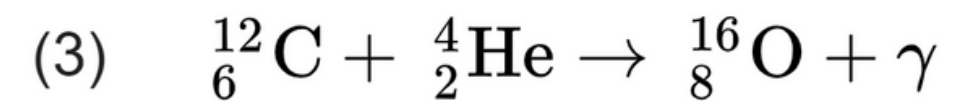
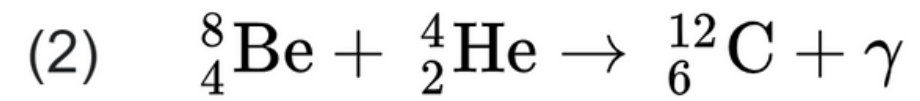
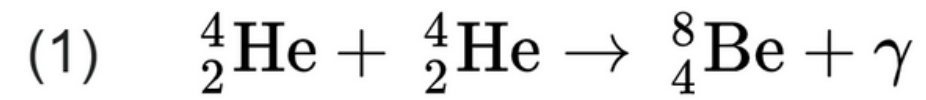
Vörös óriás



Nap



Vörös óriások



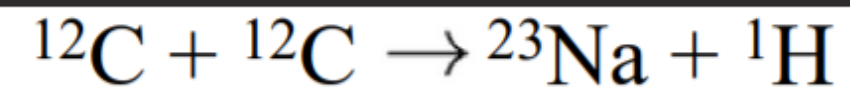
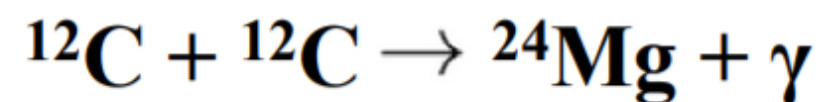
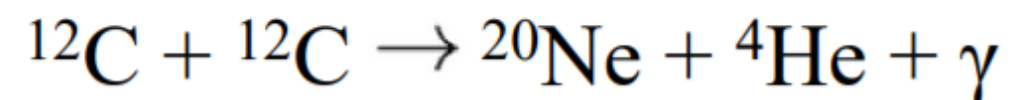
→ Hármass α-folyamat



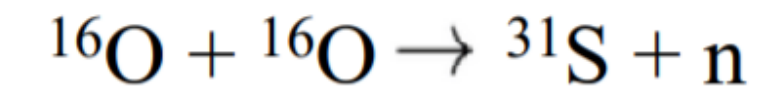
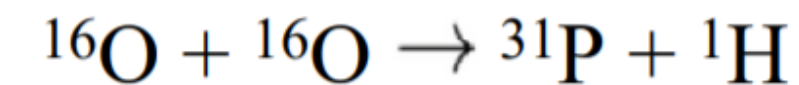
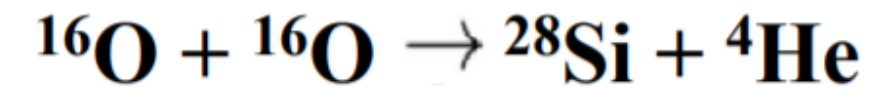
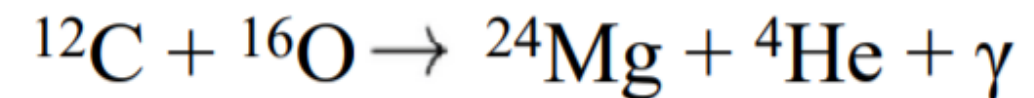
C-,O-,Ne-égés (fúzió)

- Szuper óriások
- $> 5 \cdot 10^8$ K
- Lehet a vörös óriások végső fázisában is

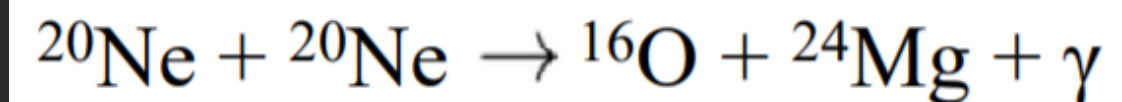
Szénégés (fúzió)



Oxigénégés (fúzió)

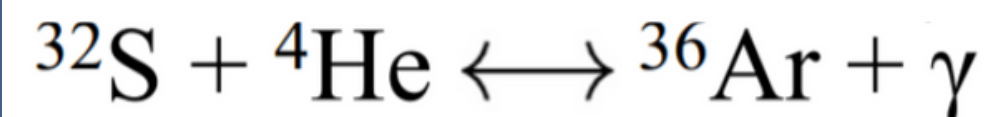
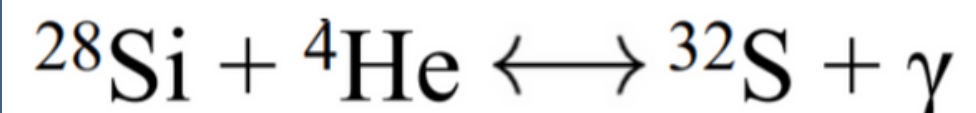


Neonégés (fúzió)

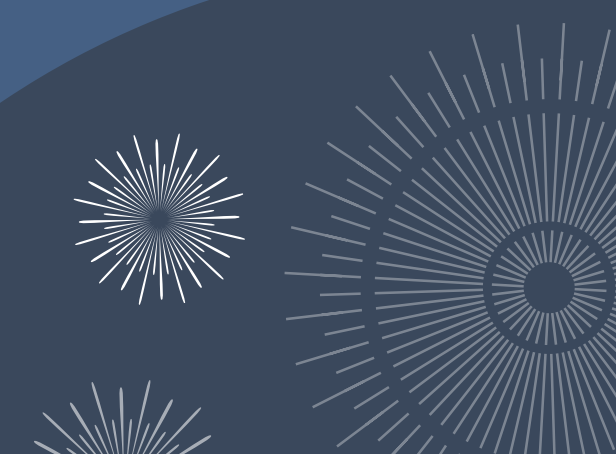


Szilíciumégés

- Csillagok utolsó nagy volumenű energiatermelési fázisa
- $3 \cdot 10^9$ K fölötti hőmérsékleten
- Szilícium-magok (alfa részecske hatására) fotobomlás \rightarrow más magok és fotonok



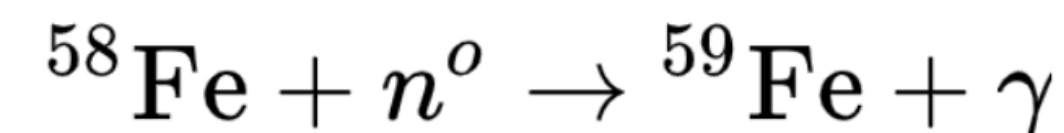
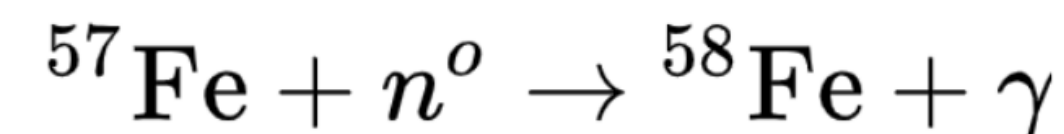
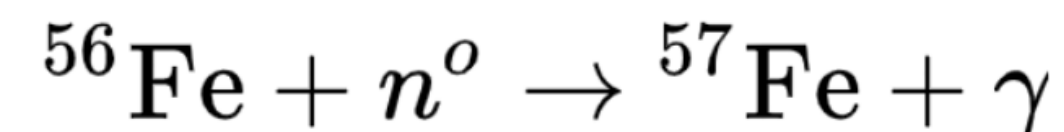
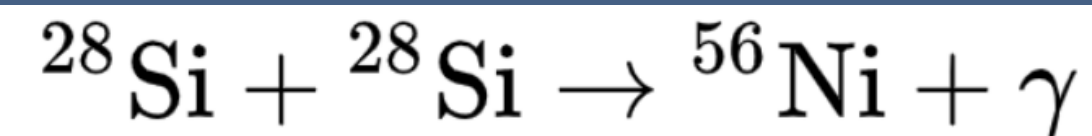
- Egyre nagyobb stabilitású magok, végül vas és nikkel



Szilíciumégés

- Ha elég nagy a hőmérséklet ($3,5 \cdot 10^9$ K): Szilícium-magok direkt fúziója is lezajlik

- 14 • Vége: nikkell- és vas-atommagok képződése



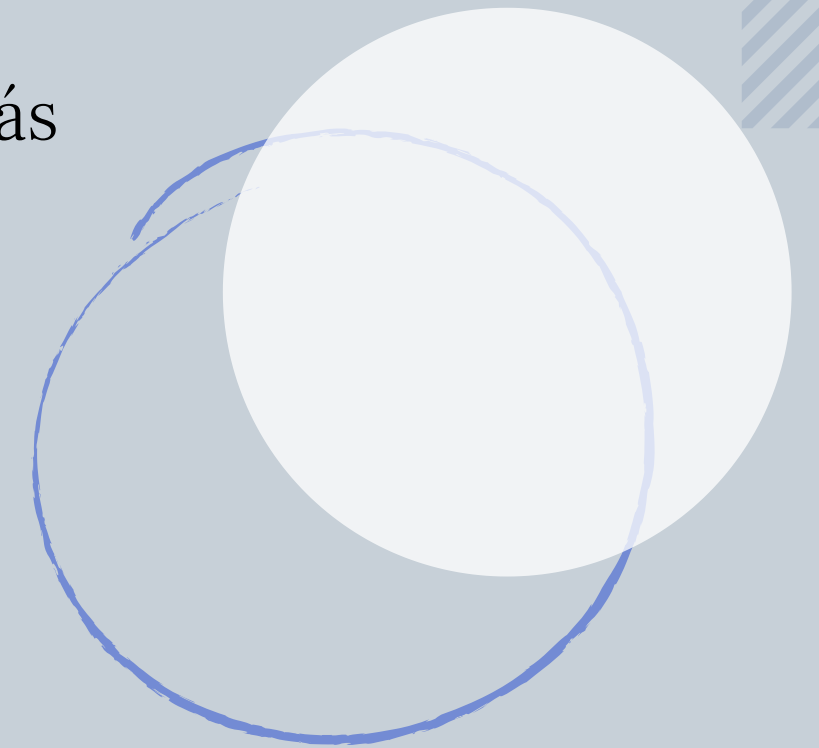
A csillagok halála

Vörös óriások:

- Hélium elfogy → leáll a héliumégés, megszűnik az energia kisugárzás
- Nem lesz „ellensúlya” a gravitációnak → Csillag összehúzódik
- Külső réteg "leválik" → planetáris köd
- Nagy sűrűségű fehér törpe → kialszik → Fekete törpe

Vörös szuperóriások:

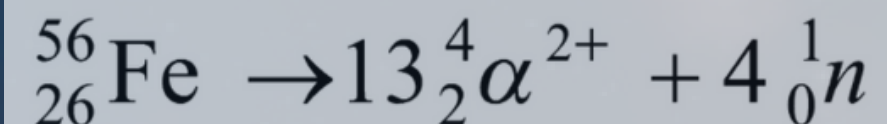
- Fúziós folyamat megáll a vasnál
- Tovább nő a hőmérséklet és nyomás
- A vasmag összeomlik egy neutroncsillaggá/feketelyukká
- A lökéshullám ledobja a felhevülő külső gágrétegeket → szupernóva



Szupernóvák

s-folyamatok

- Hőmérséklet emelkedése $\rightarrow 10^{10}\text{K} \rightarrow$ 'neutronpárolgás'
- Egyes atommagok szétesnek; pl. vas magja :

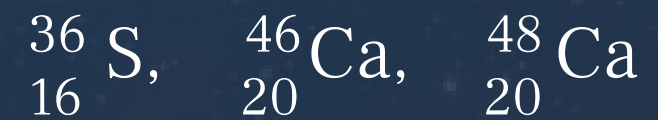


- A hatalmas neutronfluxus \rightarrow neutrontöbblet \rightarrow instabil; bennük negatív β -bomlások indulnak el
- neutronok alakulnak protonokká \rightarrow vasnál nagyobb rendszámú elemek képződése
- ${}^{208}\text{Pb}$ és ${}^{209}\text{Bi}$ izotópok zárják általában, de képződhet nagyobb rendszámú elem is (pl. 92-es rendszámú urán)

Szupernóvák

r-folyamatok

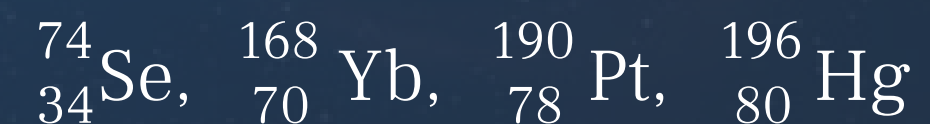
- Néhány pillanatig: gyors neutronok
- Hihetetlenül nagy neutronfluxus
- Nehéz, instabil és radioaktív magok keletkezése
- Transzurán elemek egyik természetes forrása
- Neutronban gazdag magok



Szupernóvák

p-folyamatok

- Néhány másodpercig tart
- Hőmérséklet hirtelen megemelkedik → megnöveli a protonok kinetikus energiáját → fokozott a befogódás
- Ritka, protonokban gazdag magok:



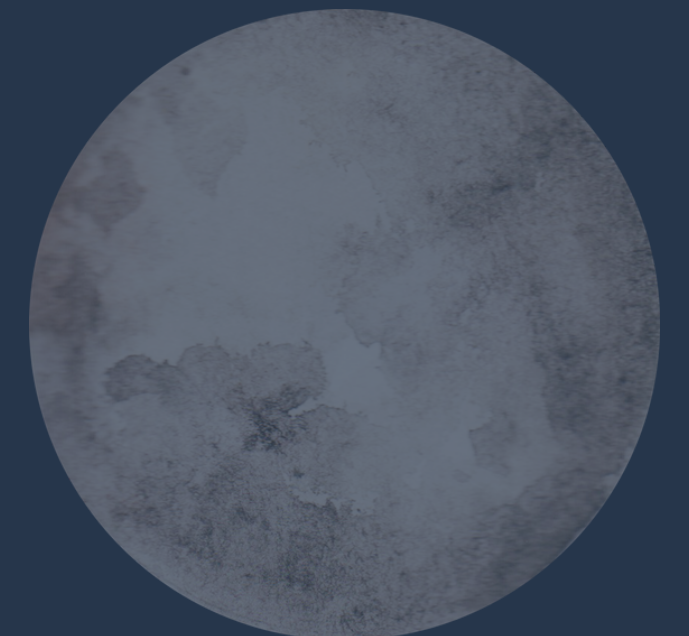
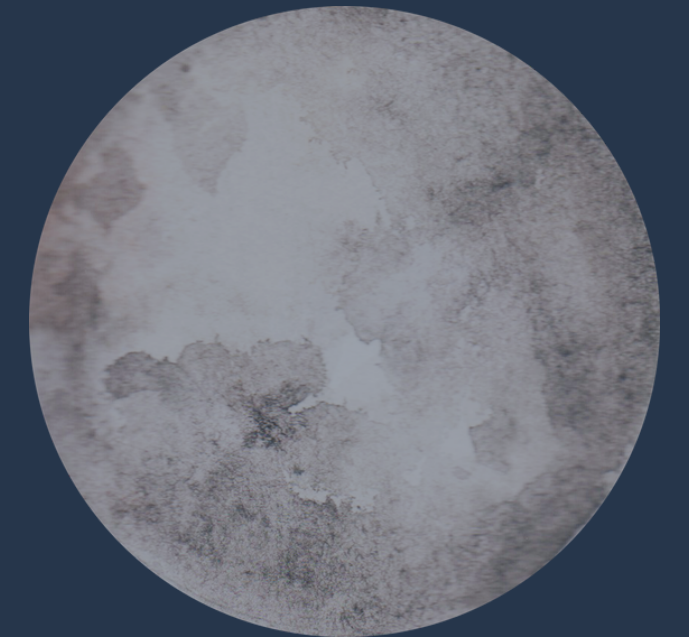
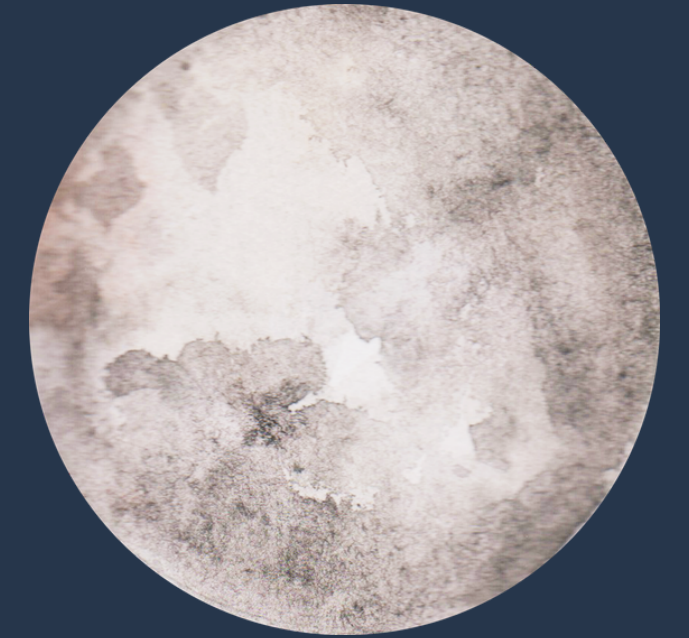
Szupernóvák

e-folyamatok

- Elemi részecskék kinetikus energiája nagy → reakciók az atommagokat alkotó elemi részecskék között, pl. elektronbefogás
- atommagok összetételét megváltozik és/vagy új magok jönnek létre
- ^{22}Ti és ^{29}Cu közti elemek keletkezése

Aktuális kutatási területek, problémák

- Kérdéses az egyes kémiai elemek gyakoriságarányának elméleti magyarázata.
- Anomális elemgyakoriságú csillagok.
- Számos ponton nincsenek összhangban a kísérleti eredmények a kémiai elemek világegyetembeli mért gyakoriságával.
- Kevés kísérleti eredmény áll rendelkezésre a p-folyamat reakcióinak hatáskeresztszeteiről





Felhasznált irodalom

- Nukleoszintézis
https://hu.wikipedia.org/wiki/Nukleoszint%C3%A9zis#Nukleoszint%C3%A9zis_a_csillagokban
- Pécsi Tudományegyetem-Magkémia jegyzet
- CNO-ciklus
<https://hu.wikipedia.org/wiki/CNO-ciklus>
- Stellar Nucleosynthesis
<https://www.youtube.com/watch?v=ZWL0whGjopU&t=175s>
- Dr. Sükösd Csaba- Kísérleti atommagfizika