



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ

Εθνικόν και Καποδιστριακόν
Πανεπιστήμιον Αθηνών

— ΙΔΡΥΘΕΝ ΤΟ 1837 —

ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΦΥΣΙΚΗ

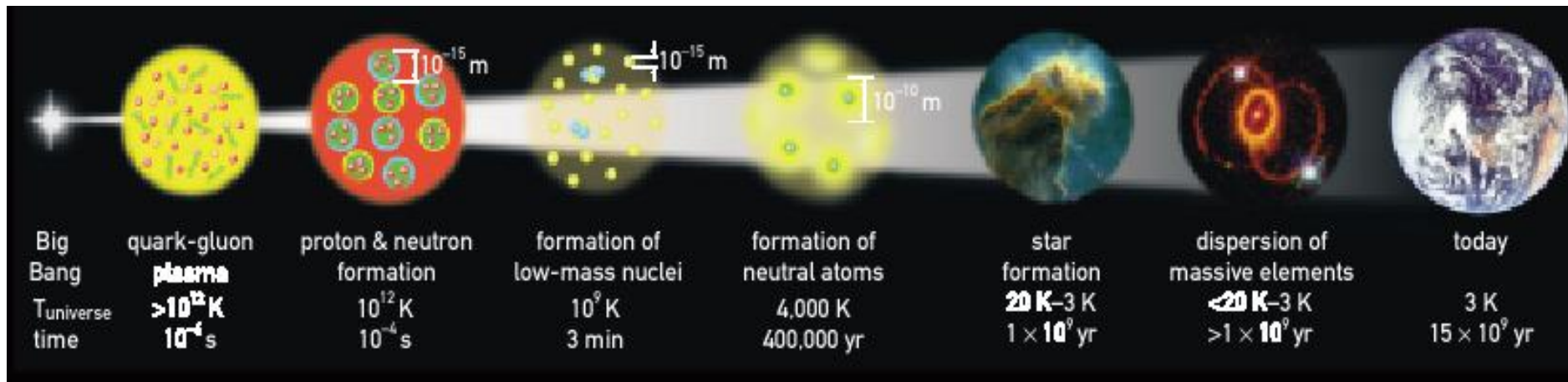
Ακαδημαϊκό Έτος 2021-2022

Ευστάθιος Στυλιάρης – Κ.Ν. Παπανικόλας

Δευτέρα 14:00-16:00



Η πυρηνική φυσική της εξέλιξης του Σύμπαντος



Έχουμε πειραματικά επιβεβαιωμένη θεωρητική κατανόηση των φαινομένων μέχρι και την δημιουργία του quark – gluon plasma. Για μικρότερους χρόνους η πειραματική μαρτυρία είναι ελλιπής ή ανύπαρκτη. Το ευρύτερο θεωρητικό πλαίσιο βρίσκεται επίσης υπό διερεύνηση.

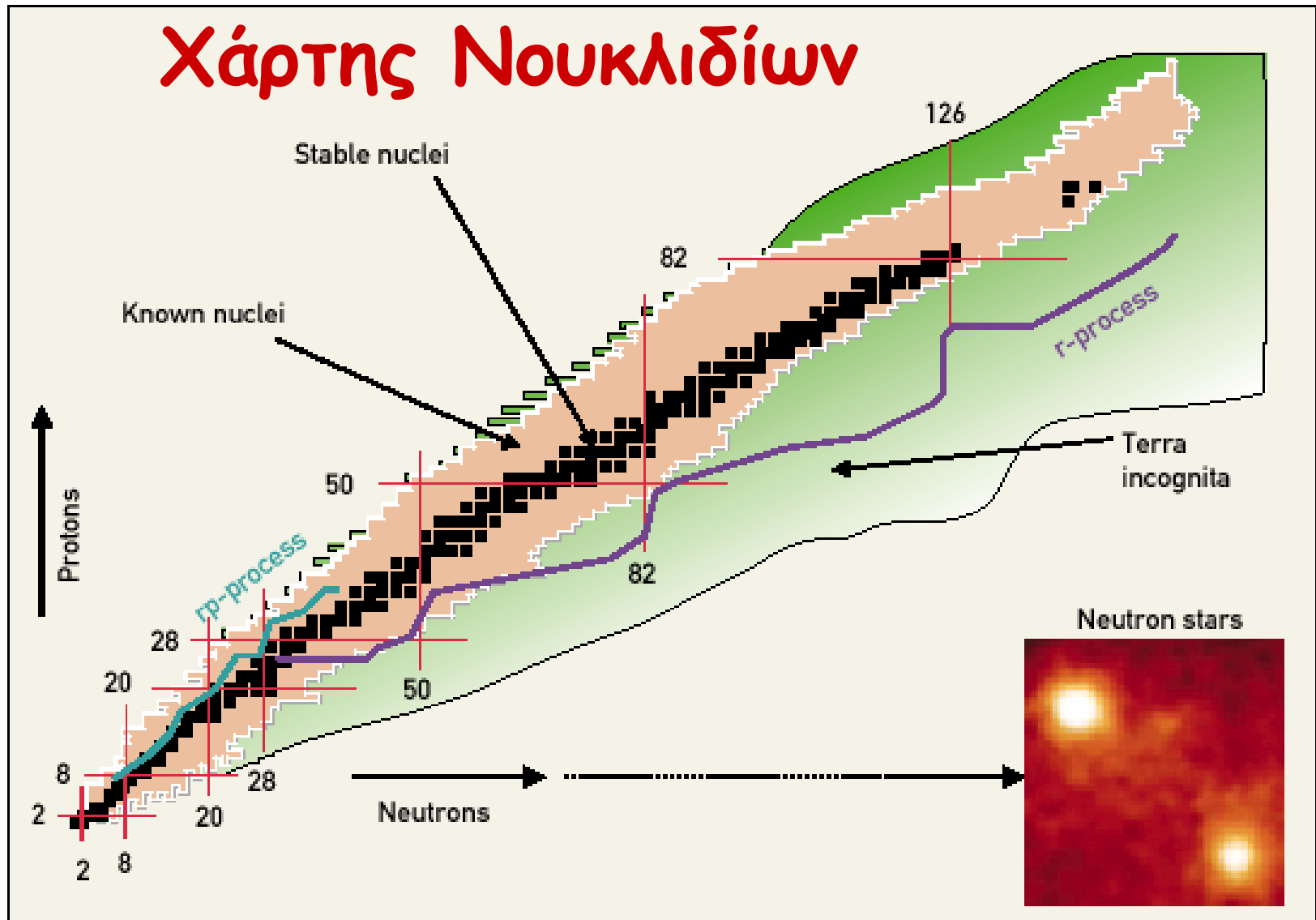
Πυρήνες στο Σύμπαν

- Προέλευση των ατομικών Πυρήνων
 - Χαρτογράφησή τους (ποσότητα και τοποθεσία)
 - Κατανόηση των μηχανισμών παραγωγής τους (πού και πότε)
- Ένα από τα πιο σημαντικά και ενεργά μέτωπα έρευνας στην σύγχρονη φυσική (Αστροφυσική & Πυρηνική), τόσο παρατηρησιακά, όσο και θεωρητικά.

Διακρίνονται σε δύο «Ιστορικές Φάσεις»

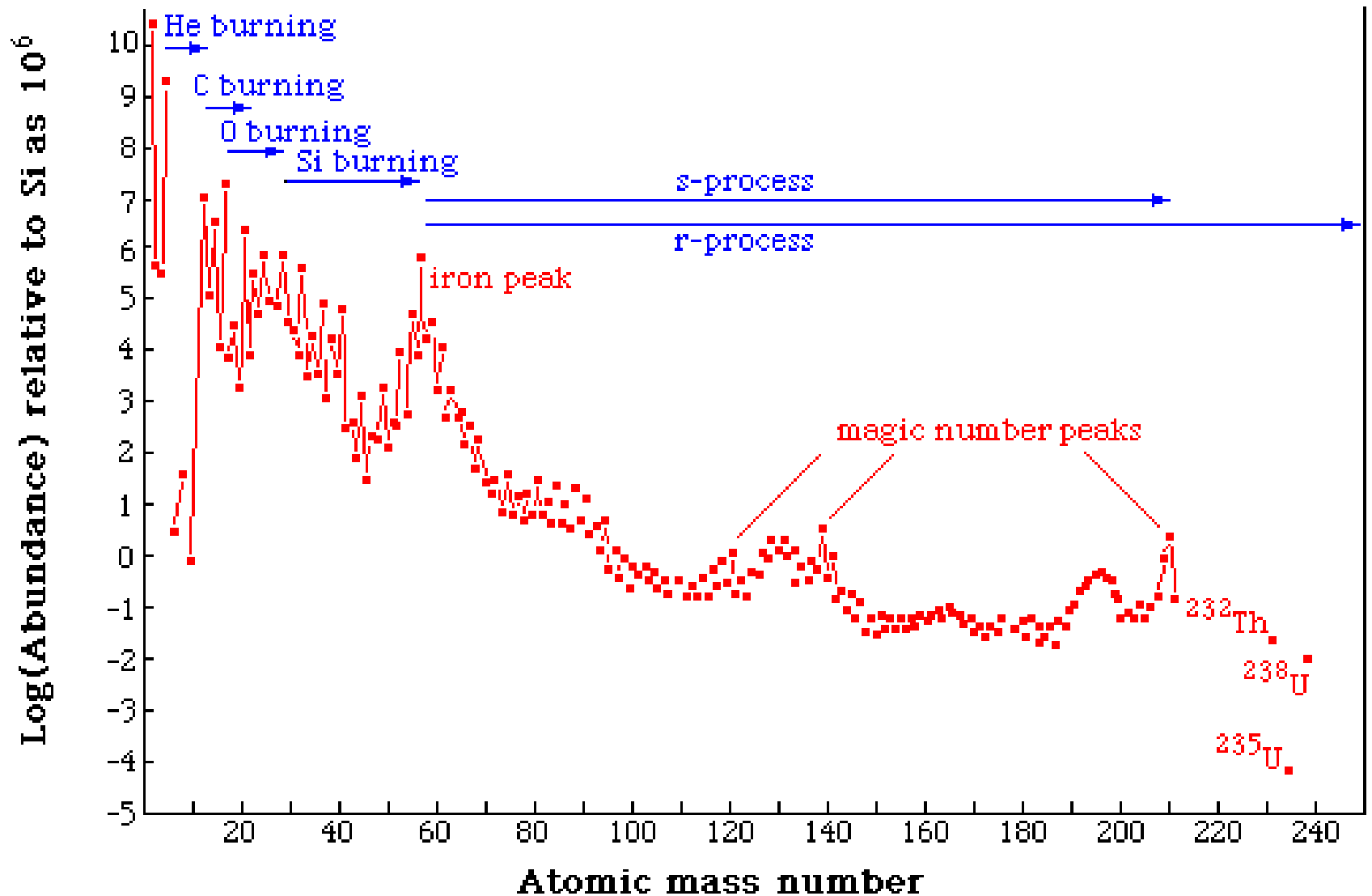
- Αρχέγονη Πυρηνογένεση (Big Bang Nucleosynthesis: BBN)
 - Παραγωγή Αδρονίων, H, D, He, Li
- Αστρική Πυρηνογένεση
 - Παραγωγή D, He, Li και όλων των υπόλοιπων στοιχείων

Χάρτης Νουκλιδίων



Ο χάρτης Νουκλιδίων καταγράφει και ταξινομεί ιδιαίτερα οικονομικά όλα τα δέσμια πυρηνικά συστήματα. Δέν καταγράφει, ούτε ερμηνεύει τον πληθυσμό των νουκλιδίων στη γή, στο Γαλαξία, στο Σύμπαν.

Universal Abundances

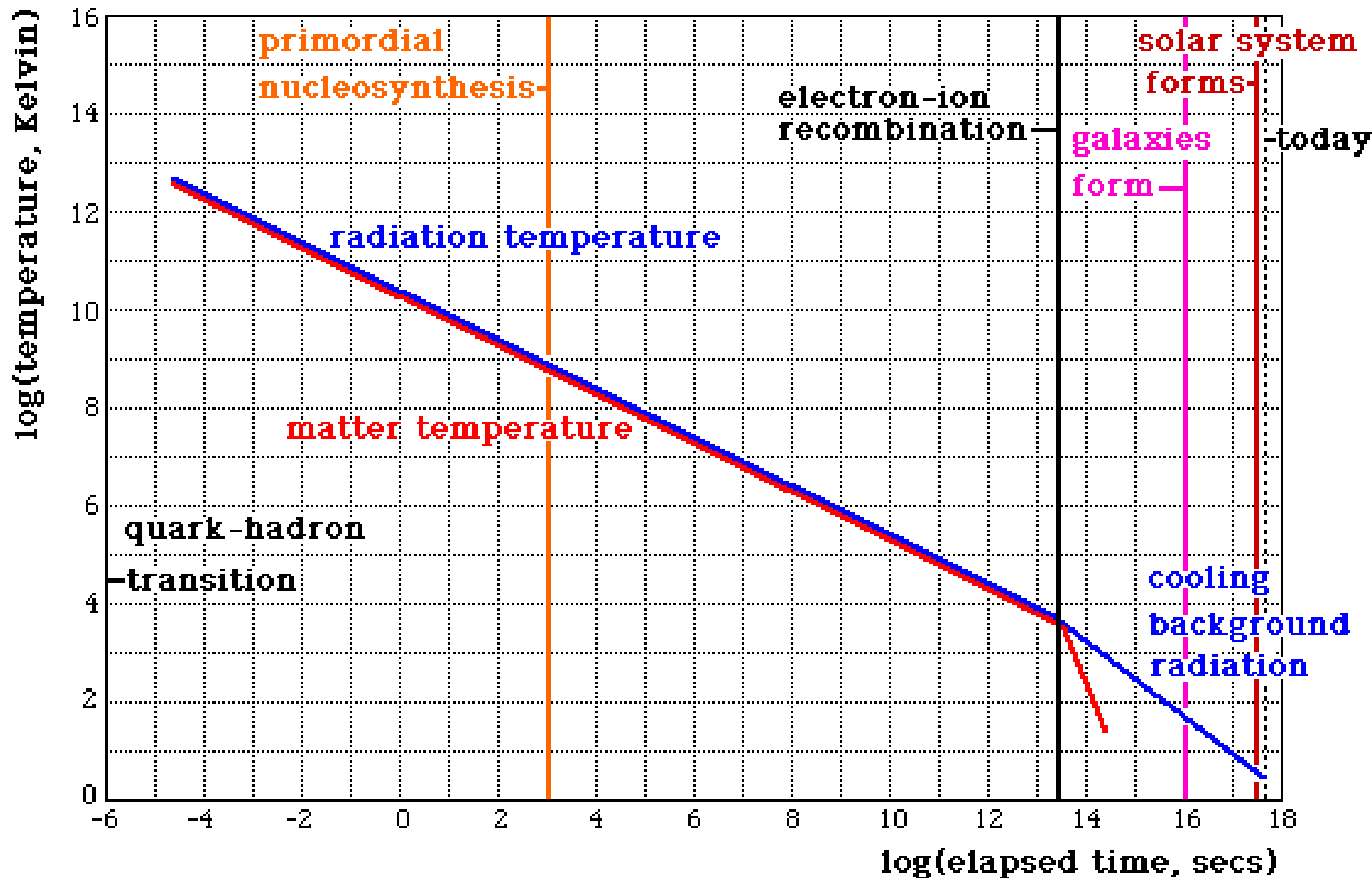


Universal Abundances

The main features can be summarized as follows.

- Most stars are about **98% hydrogen and helium** (by mass).
- There is a **deep minimum** in the abundance curve corresponding to **lithium, beryllium and boron**.
- This is followed by a **peak** around **carbon, nitrogen, oxygen and neon**.
- Then there is a further decline until the next **peak** at **iron**.
- Abundances generally **diminish until $A=100$ and $Z=45$** beyond which the curve flattens out.
- Some stars have considerably less content of heavier elements (**population II** - formed long ago from largely **unprocessed material** : **population I** - young stars formed from interstellar gas which has been **enriched** with material from **exploding stars**). This is particularly true of **globular clusters** found out of the galactic plane but within the galactic halo. In all cases the deficient stars are old stars but not all old stars are so deficient.
- The place of origin in the galaxy also seems to affect the Hydrogen/heavy element ratio - it varies by a factor of 2 with a clear indication that **heavier elements** are **more abundant** near to the **galactic centre**.
- The **interstellar medium** is mostly **hydrogen** at low density either neutral (**H I** at about **100K**) or ionised (**H II** at about **10⁴ K**). The cold regions are detected via 21cm radiation. Emission lines from nebulae are consistent with the idea that young stars are formed from the interstellar medium.
- Evidence from other galaxies is slight but what there is indicates that the composition of those nearby is similar to that of our own including the high heavy element content near the centre.

Αρχέγονη Πυρηνογένεση



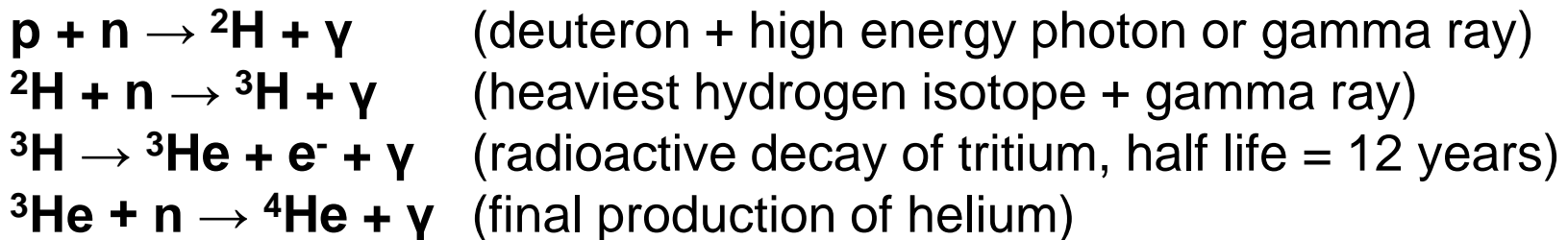
Φωτόνια από Πυρηνογένεση

- Η όλη διαδικασία της BBN πυρηνογένεσης διάρκεσε 20 λεπτά. Μετά από αυτό ο αριθμός των φωτονίων και βαρυονίων έμεινε σταθερός.
 - Λόγος φωτονίων:νουκλεονίων = 10^{10}
- Η θερμοκρασία των φωτονίων αποδεσμεύτηκε απο την θερμοκρασία της ύλης όταν τα ηλεκτρόνια δεσμεύτηκαν στα άτομα. Αυτό συνέβηκε 380 000 χρόνια αργότερα

Αρχέγονη Πυρηνογένεση

Ήδη το 1948, πριν η θεωρία της μεγάλης έκρηξης είχε εμπεδωθεί και πριν να είναι γνωστό ότι η σύνθεση των αστέρων διαφέρει οι **Alpher, Herman** και **Gamov** προσπάθησαν με την «**α,β,γ**» θεωρία τους να εξηγήσουν την παρουσία των στοιχείων και τον πληθυσμό τους.

Σύμφωνα με την θεωρία αυτή τα νουκλίδια προέκυψαν στα πρώτα στάδια της δημιουργίας του Σύμπαντος με διαδοχικές συλλήψεις νετρονίων, τα οποία υπήρχαν σε αφθονία όταν η θερμοκρασία ήταν 10^9 K. Οι αντιδράσεις ήταν



Η τολμηρή αλλά και πρωτόγονη αυτή προσέγγιση έδειξε ότι η σύλληψη νετρονίων δεν οδηγούσε σε δημιουργία βαρειών πυρήνων σε ικανοποιητική ποσότητα, εξ αιτίας της έλλειψης πυρήνων με $A=5$ και $A=8$.

Έτσι πολύ νωρίς έγινε φανερό ότι η αρχέγονη πυρηνοσύνθεση μπορεί να εξηγήσει μόνο την παρουσία των ελαφριών πυρήνων (${}^2\text{H}$, ${}^3\text{He}$, ${}^4\text{He}$, και ${}^7\text{Li}$).

Βαρυογένεση

•ΕΡΩΤΗΜΑΤΑ

- Που οφείλεται το γεγονός ότι το Σύμπαν φαίνεται να κυριαρχείται από ύλη, ενώ η αντιύλη είναι εξαιρετικά σπάνια;
- Τι καθορίζει τον λόγο βαρυονίων προς φωτόνια, $\eta = N_B/N_\gamma$

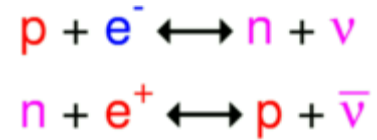
ΣΥΝΘΗΚΕΣ Sakharov

- Διαφορετικές αντιδράσεις για ύλη και αντιύλη (Παραβίαση της συμμετρίας CP)
- Αντιδράσεις που αλλάζουν τον Βαρυονικό αριθμό
- Αποκλίσεις από την Θερμοδυναμική ισορροπία (λ.χ. Κατά την διάρκεια αλλαγής φάσεων)

Η βαρυογένεση, προηγείται χρονικά της πυρηνογένεσης. Έχει την θεμελίωση της στην Αδρονική Φυσική, με τον ίδιο τρόπο που η πυρηνογένεση θεμελιώνεται στην Πυρηνική Φυσική.

Τα πρώτα 100 s

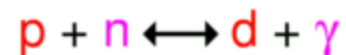
Κατά την διάρκεια του πρώτου δευτερολέπτου ο πληθυσμός πρωτονίων και νετρονίων είναι σε θερμική ισορροπία. Στο 1s ($T \sim$) ο ρυθμός των ασθενών αλληλεπιδράσεων υστερεί του ρυθμού της διαστολής του Σύμπαντος και ο λόγος πρωτονίων νετρονίων «παγώνει» στο 1:6



Μετά το πρώτο δευτερόλεπτο η μόνη ενεργός αντίδραση είναι η αποσύνθεση των νετρονίων ($T_{1/2} = 885.7$ s). Αν δεν υπήρχαν άλλες αντιδράσεις, στο σύμπαν θα συναντούσαμε μόνο υδρογόνο.



Η δημιουργία δευτερίου «σώζει» τα νετρόνια. Η αντίδραση είναι εξωθερμική ($Q = 2.2$ MeV), δεν προχωρά όμως εξ αιτίας της πληθώρας των φωτονίων ($\eta = N_\gamma/N_b = 10^9$ μέχρι η θερμοκρασία του σύμπαντος φτάσει τους 10^9 K ή $kT = 0.1$ MeV, 100s μετά την μεγάλη έκρηξη. Ο λόγος πρωτονίων νετρονίων είναι 1:7



Λόγος νετρονίων πρωτονίων

- protons and neutrons form when $kT \sim 1 \text{ GeV}$
- afterwards, protons and neutrons interconvert through weak interactions, e.g.



- remain in thermal equilibrium until...
- ... weak interactions freeze out at $kT \sim 800 \text{ keV}$

- at this point, neutron-to-proton number-density ratio was

$$\frac{n_n}{n_p} = \exp\left(-\frac{\Delta mc^2}{kT}\right)$$

- mass difference is $\Delta mc^2 = 1.4 \text{ MeV}$, thus

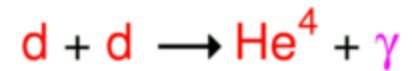
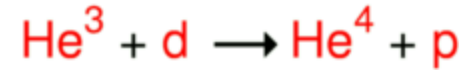
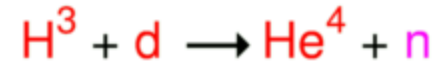
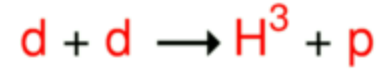
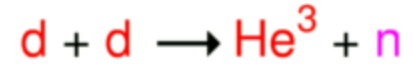
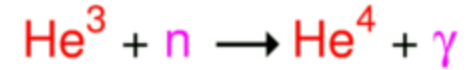
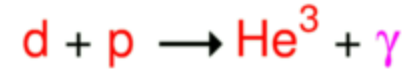
$$\frac{n_n}{n_p} = \frac{1}{6}$$

when weak interaction freezes out

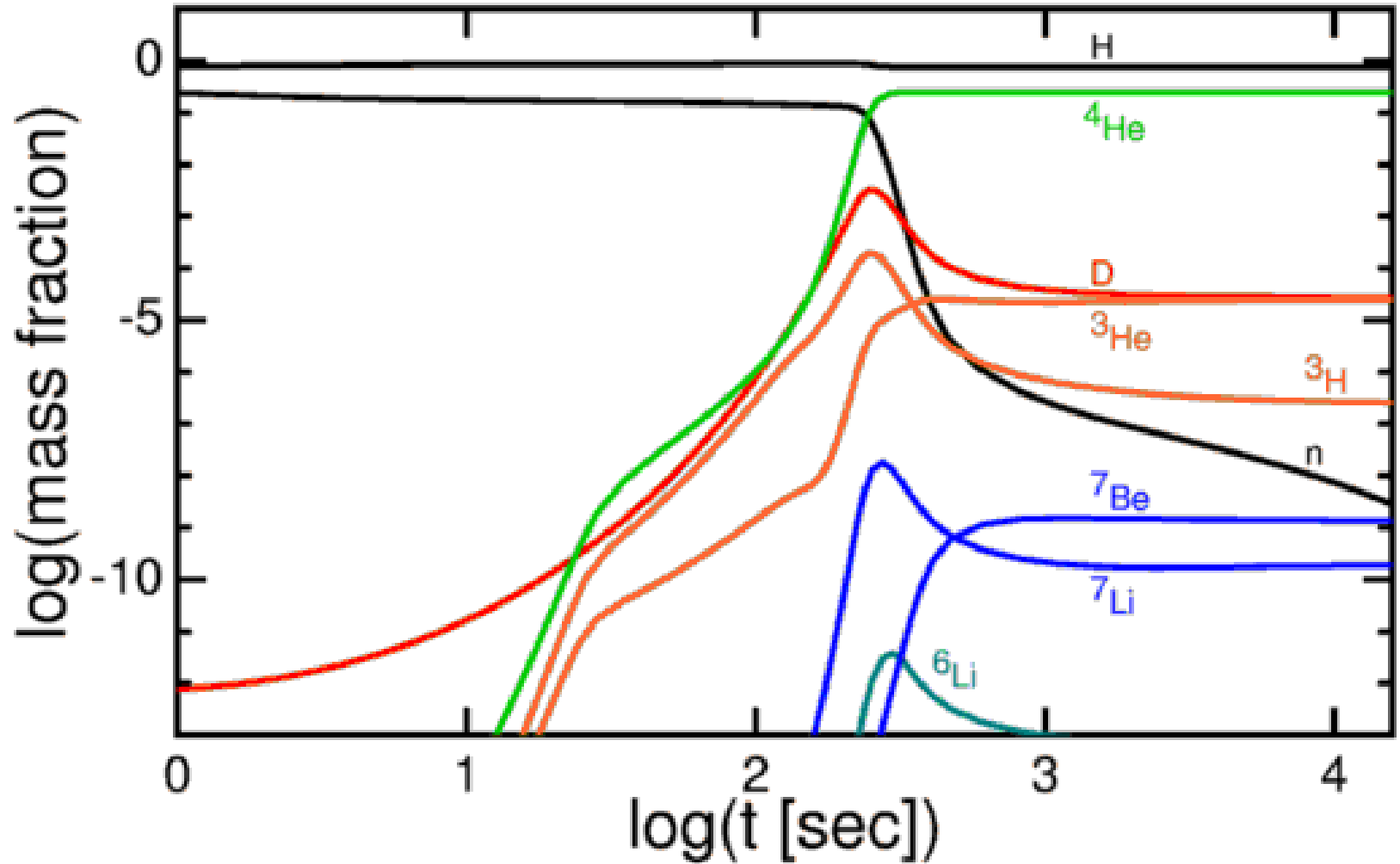
Τα πρώτα 3 λεπτά

Μετά την δημιουργία του δευτερίου, άλλες αντιδράσεις προχωρούν και δημιουργούν τρίτιο και Ηλιο (^3He και ^4He). Οι αντιδράσεις είναι μη αναστρέψιμες μιά και η θερμοκρασία έχεις ήδη «πέσει» στους $kT = 0.1 \text{ MeV}$.

Το τελικό αποτέλεσμα είναι η δημιουργία Ηλίου (^4He). Όταν η θερμοκρασία χαμηλώσει αρκετά η ηλεκτροστατική άπωση των d προκαλεί σβέση της σύντηξης. Με αρχικό λόγο πρωτονίων νετρονίων 1:7, 25% της μάζας του σύμπαντος καταλήγει σε Ήλιο.



BBN: Χρονική εξέλιξη



Βαρυονικές και φωτονικές πυκνότητες

(BBN astro/phys 0601514 B.D. Fields and S. Sarkar)

The rates of these reactions depend on the density of baryons (strictly speaking, nucleons), which is usually expressed normalized to the relic blackbody photon density as $\eta \equiv n_B/n_\gamma$. As we shall see, all the light-element abundances can be explained with

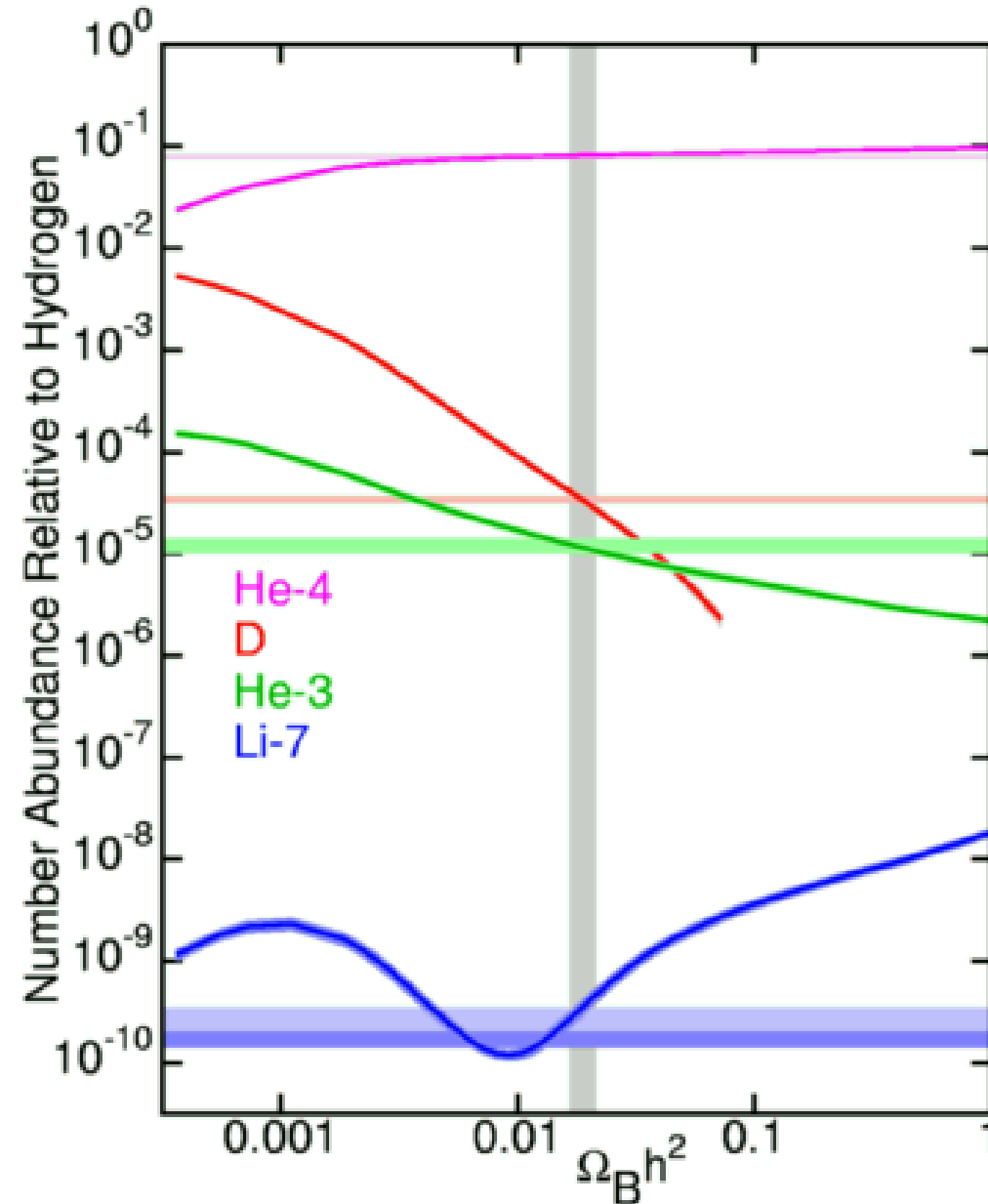
$$\eta_{10} \equiv \eta \times 10^{10} \text{ in the range } 4.7\text{--}6.5 \text{ (95\% CL).}$$

With n_γ fixed by the present CMB temperature 2.725 K this can be stated as the allowed range for the baryon mass density today, $B = (3.2\text{--}4.5) \times 10^{-31} \text{ g cm}^{-3}$, or as the baryonic fraction of the critical density,

$$B = B/\text{crit} \simeq 10h^{-2} / 274 = (0.017\text{--}0.024)h^{-2}, \text{ where}$$

$h \equiv H_0/100 \text{ kms}^{-1} \text{ Mpc}^{-1} = 0.72 \pm 0.08$ is the present Hubble parameter.

Πυρηνικοί Πληθυσμοί και Βαρυονική Ύλη



•Ο πληθυσμός των 2H , 3He , 4He και 7Li , εξαρτάται από την πυκνότητα της βαρυονικής ύλης.

•Η BBN πυρηνογένεση, προβλέπει τις καμπύλες του σχήματος, σαν συνάρτηση της βαρυονικής ύλης

•Οι παρατηρούμενοι πληθυσμοί παρουσιάζονται σαν οριζόντιες μπάντες.

•Μόνο μια τιμή μπορεί να αναπαραγάγει και τις τέσσερις τιμές ταυτόχρονα!

Αστρική Πυρηνογένεση

Η κατανόηση της πυρηνικής υφής της καύσης των αστέρων (H.Bethe) έδωσε το πρώτο έναυσμα για την πιο απλή και προφανή μορφή (σύντηξη) και τον προσδιορισμό των διαφόρων «αλυσίδων» καύσης.

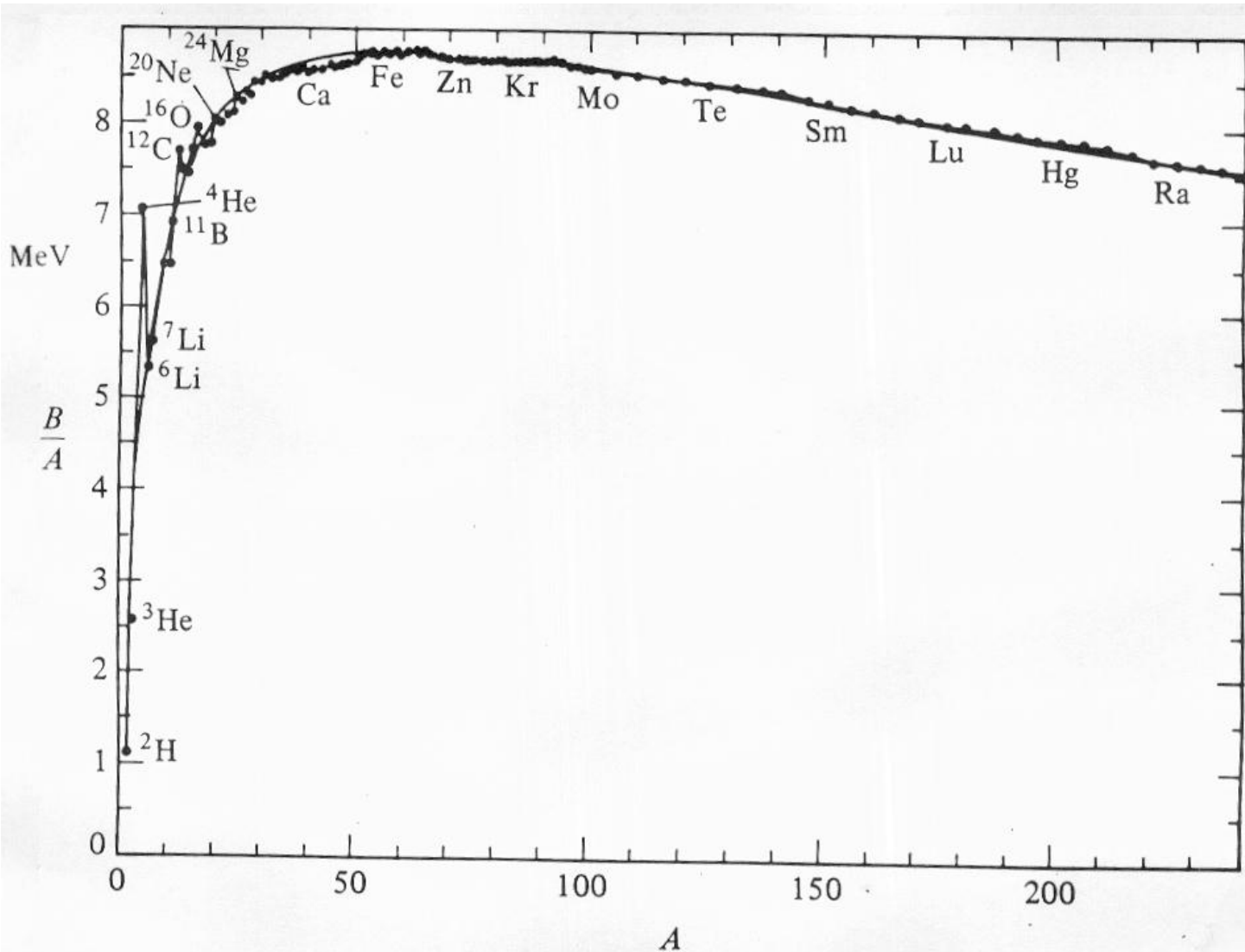
- Αλυσίδα PPI, PPII, PPIII ...
- Αλυσίδα («κύκλος») CNO
- Αλυσίδα ...
- Κατανόηση του μηχανισμού σύντηξης, όπως και του χάρτη νουκλιδίων, μας οδηγεί στο συμπέρασμα, ότι η καύση των αστέρων (σύντηξη) δεν οδηγεί σε παραγωγή στοιχείων βαρύτερων του Γερμανίου.
- Αργότερα (1957) έγινε κατανοητό ότι η παραγωγή βαρειών στοιχείων αξιοποιεί τον μηχανισμό σύλληψης νετρονίων (neutron capture), απαιτεί όμως αστροφυσικές διαδικασίες που να δίνουν πλούσιες πηγές νετρονίων.

Αστρική Πυρηνογένεση

Η κατανόηση της πυρηνικής υφής της καύσης των αστέρων (H.Bethe) έδωσε το πρώτο έναυσμα για την πιο απλή και προφανή μορφή (σύντηξη) και τον προσδιορισμό των διαφόρων «αλυσίδων» καύσης.

- Αλυσίδα PPI, PPII, PPIII ...
- Αλυσίδα («κύκλος») CNO
- Αλυσίδα ...
- Κατανόηση του μηχανισμού σύντηξης, όπως και του χάρτη νουκλιδίων, μας οδηγεί στο συμπέρασμα, ότι η καύση των αστέρων (σύντηξη) δεν οδηγεί σε παραγωγή στοιχείων βαρύτερων του Γερμανίου.
- Αργότερα (1957) έγινε κατανοητό ότι η παραγωγή βαρειών στοιχείων αξιοποιεί τον μηχανισμό σύλληψης νετρονίων (neutron capture), απαιτεί όμως αστροφυσικές διαδικασίες που να δίνουν πλούσιες πηγές νετρονίων.

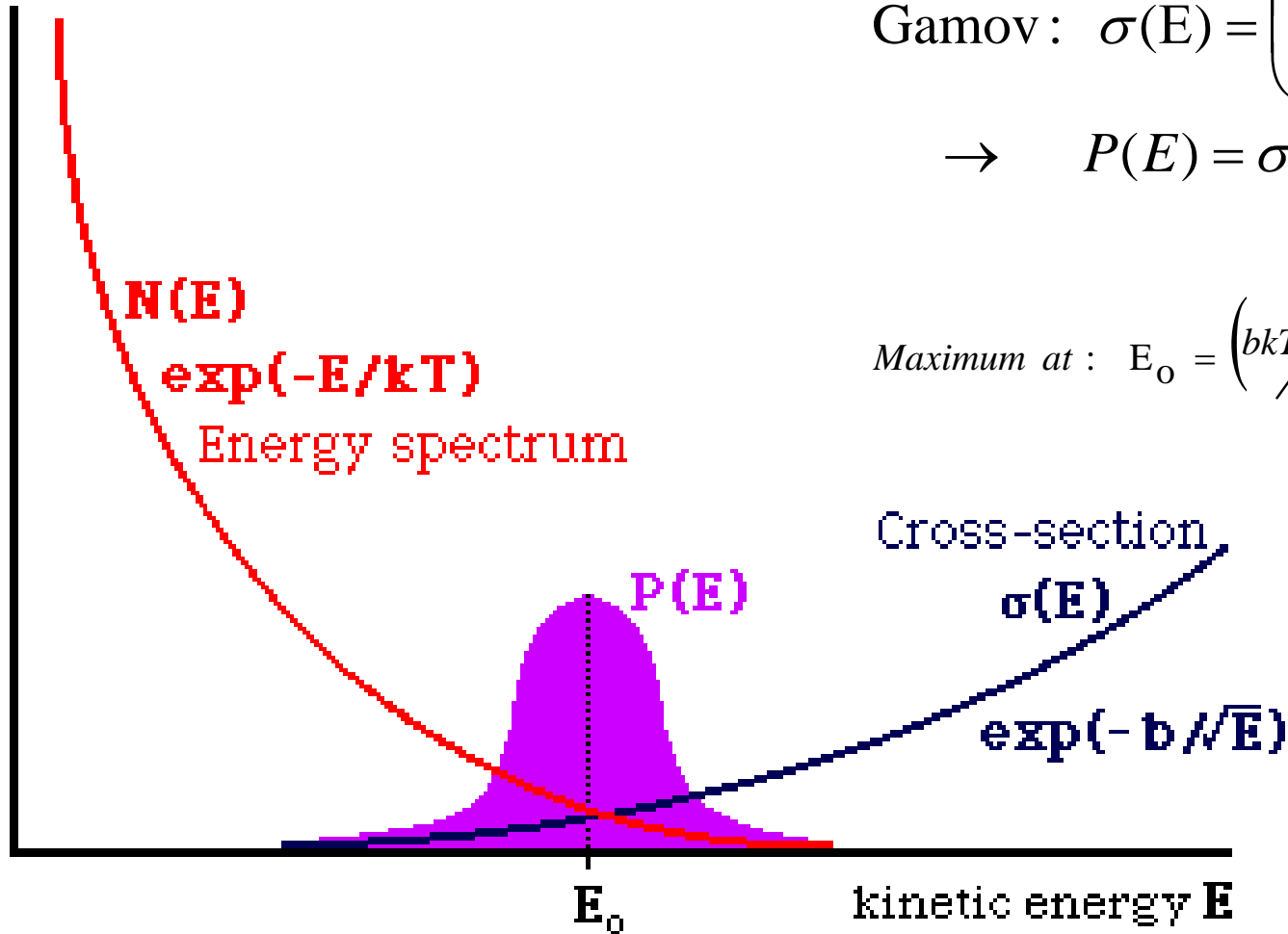
Ενέργεια Σύνδεσης ανά Νουκλεόνιο



Πιθανότητα Πυρηνικής Αντίδρασης σε Αέρια Αστρική Μάζα

$$\text{Gamov: } \sigma(E) = \left(\frac{S}{E} \right) \exp \left\{ -b/\sqrt{E} \right\}$$

$$\rightarrow P(E) = \sigma(E) \cdot N(E)$$

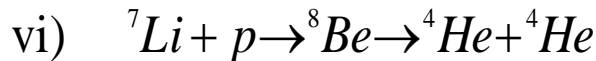
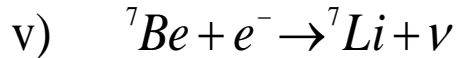
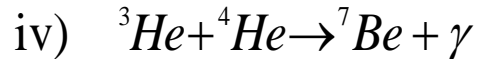


$$\text{Maximum at: } E_0 = \left(\frac{bkT}{2} \right)^{2/3}$$

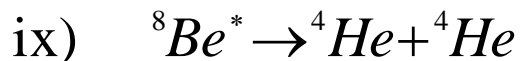
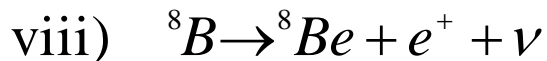
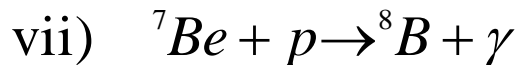
Καύση Υδρογόνου, Αλυσίδα pp

pp I	Αντίδραση	Απελευθερούμενη Ενέργεια	Μέσος Χρόνος Αντίδρασης
i)	$p + p \rightarrow {}^2\text{H} + e^+ + \nu$	$\sim 0.42 \text{ MeV}$	$14 \times 10^9 \text{ years}$
ii)	$p + {}^2\text{H} \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma$	5.49 MeV	1.6 sec
iii)	${}^3\text{He} + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + p + p$	12.86 MeV	$9 \times 10^5 \text{ years}$

pp II i) και ii) ακολουθούνται από:



pp III i) και ii) και iv) ακολουθούνται από:



Οι χρόνοι αντίδρασης αναφέρονται στις Ηλιακές συνθήκες, θερμοκρασία $1.5 \times 10^7 \text{ K}$ και πυκνότητα $1.5 \times 10^5 \text{ kg m}^{-3}$

Αποτέλεσμα:

Τέσσερα πρωτόνια συνθέτουν ένα ${}^4\text{He}$ αποδίδοντας $\sim 26 \text{ MeV}$.

Η Αλυσίδα pp, είναι η μόνη διαθέσιμη διαδικασία πυρηνογένεσης στο αρχέγονο μείγμα Υδρογόνου-Ηλίου.

Αλυσίδα CNO

- Σε πολλά αστρικά συστήματα, το αρχικό αέριο μείγμα περιέχει πιο βαρειούς πυρήνες. Λ.χ. στον ήλιο έχουμε τους ακόλουθους λόγους ως προς τον C:

C:H= 2400, C:He=162, C:N=0.21, C:O=1.66

- Αυτό επιτρέπει άλλες αλυσίδες καύσης, η πιο γνωστή είναι η “CNO”. Είναι εξαιρετικά ευαίσθητη σε θερμοκρασία –στον ήλιο συνεισφέρει 3% στην καύση υδρογόνου στον ήλιο. Σε θερμότερα αστέρια η “CNO” μπορεί και να επικρατήσει.

Αλυσίδα CNO

Αντίδραση

- i) $^{12}\text{C} + p \rightarrow ^{13}\text{N} + \gamma$
- ii) $^{13}\text{N} \rightarrow ^{13}\text{C} + e^+ + \nu$
- iii) $^{13}\text{C} + p \rightarrow ^{14}\text{N} + \gamma$
- iv) $^{14}\text{N} + p \rightarrow ^{15}\text{O} + \gamma$
- v) $^{15}\text{O} \rightarrow ^{15}\text{N} + e^+ + \nu$
- vi) $^{15}\text{N} + p \rightarrow ^{12}\text{C} + ^4\text{He}$

Μέσος Χρόνος Αντίδρασης

10^6 years

7 mins

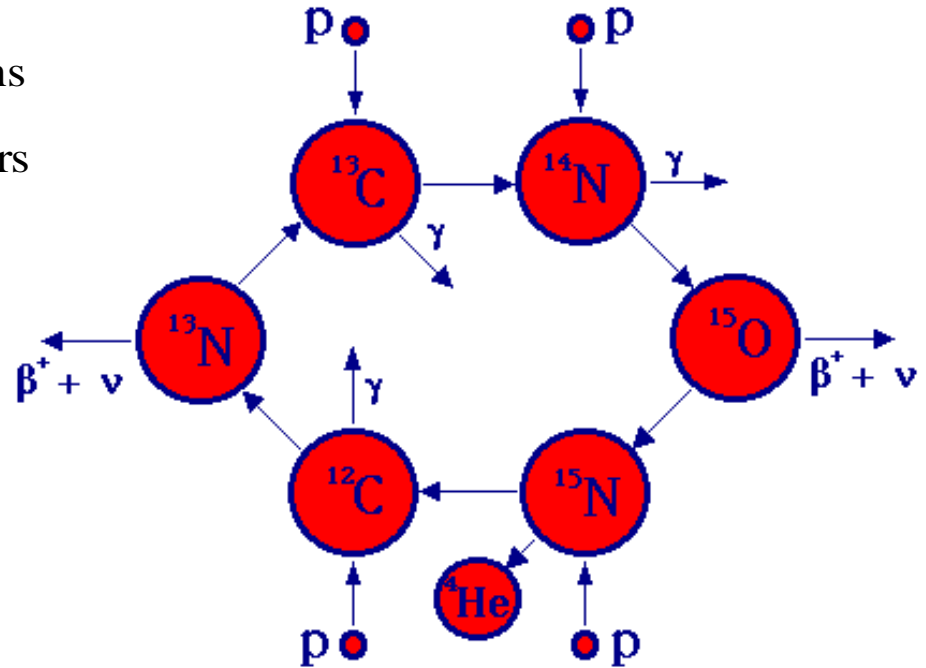
2×10^5 years

3×10^7 years

2 mins

10 years

- vii) $^{15}\text{N} + p \rightarrow ^{16}\text{O} + \gamma$
- $^{16}\text{O} + p \rightarrow ^{17}\text{F} + \gamma$
- $^{17}\text{F} \rightarrow ^{17}\text{O} + e^+ + \nu$
- $^{17}\text{O} + p \rightarrow ^{14}\text{N} + ^4\text{He}$
- $^{14}\text{N} + p \rightarrow ^{15}\text{O} + \gamma$
- $^{15}\text{O} \rightarrow ^{15}\text{N} + e^+ + \nu$
- $^{15}\text{N} + p \rightarrow ^{12}\text{C} + ^4\text{He}$ etc



Αστρική Πυρηνογένεση

S & R Processes

Εαν έχουμε ένα απόθεμα πυρήνων, λ.χ. Fe, και πηγής νετρονίων μπορούμε με διαδοχικές συλλήψεις νετρονίων να δημιουργήσουμε όλο και βαρύτερους πυρήνες. Μπορούμε να διακρίνουμε δύο περιοχές, ανάλογα με τον ρυθμό των διαδοχικών συλλήψεων.

- **S process** , όπου οι διαδοχικές συλλήψεις είναι αραιές, χαρακτηριζόμενες από χρονική σταθερά πολύ μεγαλύτερη του χρόνου β διασπάσεων.
- **R process** , όπου ο ρυθμός διαδοχικών συλλήψεων είναι ταχύς, με χρονική σταθερά πολύ μικρότερη του χρόνου β διασπάσεων.
- Κατανόηση του μηχανισμού σύντηξης, όπως και του χάρτη νουκλιδίων, μας οδηγεί στο συμπέρασμα, ότι η καύση των αστέρων (σύντηξη) δεν οδηγεί σε παραγωγή στοιχείων βαρύτερων το Νικελίου ή Γερμανίου.

Αστρική Πυρηνογένεση: S Process

Εαν έχουμε ένα απόθεμα πυρήνων, λ.χ. ^{56}Fe , και πηγής νετρονίων μπορούμε με διαδοχικές συλλήψεις νετρονίων να δημιουργήσουμε όλο και βαρύτερους πυρήνες. Στην **S process**, οι διαδοχικές συλλήψεις είναι αραιές (τυπ. εκατοντάδες έως χιλιάδες χρόνια ([Pagel 1997](#))) χαρακτηριζόμενες από χρονική σταθερά πολύ μεγαλύτερη του χρόνου β διασπάσεων.

- $^{56}\text{Fe} \rightarrow ^{57}\text{Fe} \rightarrow ^{58}\text{Fe} \rightarrow ^{59}\text{Fe}$, που στην συνέχεια διασπάται
- $^{59}\text{Fe} \rightarrow ^{59}\text{Co}$

• Με τον τρόπο αυτό μπορούμε να αναρριχηθούμε την κοιλάδα της β σταθερότητας παράγοντας πλειάδα νουκλιδίων.

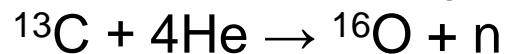
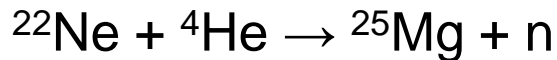
• Η διαδικασία αυτή, σταματά στην περιοχή του ^{208}Pb , ^{209}Bi , καθότι πέραν των πυρήνων αυτών δεν μπορούν να δημιουργηθούν «μακρόβιοι» πυρήνες οι οποίοι να υποστούν περαιτέρω συλλήψεις. Έπεται ότι βαρύτεροι πυρήνες (ακτινίδες), δεν μπορούν να δημιουργηθούν με την S process.

• Νουκλίδια με μαγικούς αριθμούς, χαρακτηρίζονται από μικρή ενεργό διατομή για σύλληψη νετρονίων. Έτσι προβλέπουμε ότι οι πυρήνες αυτοί θα παρουσιάζουν συγκριτικά μεγαλύτερο πληθυσμό, όπως και παρατηρείται λ.χ. ^{88}Sr , ^{138}Ba , and ^{208}Pb .

Αστρική Πυρηνογένεση

S Process

Λεπτομερείς υπολογισμοί για την ύπαρξη ροής νετρονίων σε περιβάλλον όπου υπάρχουν βαρείς πυρήνες, όπου η θερμοκρασία, πυκνότητα και γενικά οι αναγκαίες συνθήκες πρέπει να υπάρχουν, ώστε να είναι δυνατή η πραγμάτωση της **S process**, δείχνουν ότι τέτοιες συνθήκες επικρατούν στους αστέρες τύπου Asymptotic Giant Branch (AGB). Τα αστέρια αυτά είναι γερασμένα, με εκφυλισμένο πυρήνα άνθρακα -certain οξυγόνου. Συντηρούνται με καύση Ηλίου σε ένα φλοιό που περιβάλλει τον αστρικό πυρήνα . Στο φλοιό αυτό οι ακόλουθες αντιδράσεις δημιουργούν ροή νετρονίων:



Μετά την δημιουργία των νουκλιδίων της s-process τα AGB αστέρια τα διαχέουν στην επιφάνεια τους όπου απελευθερώνονται είτε με την διαδικασία του αστρικού ανέμου, είτε με έκρηξη supernova.

Αστρική Πυρηνογένεση

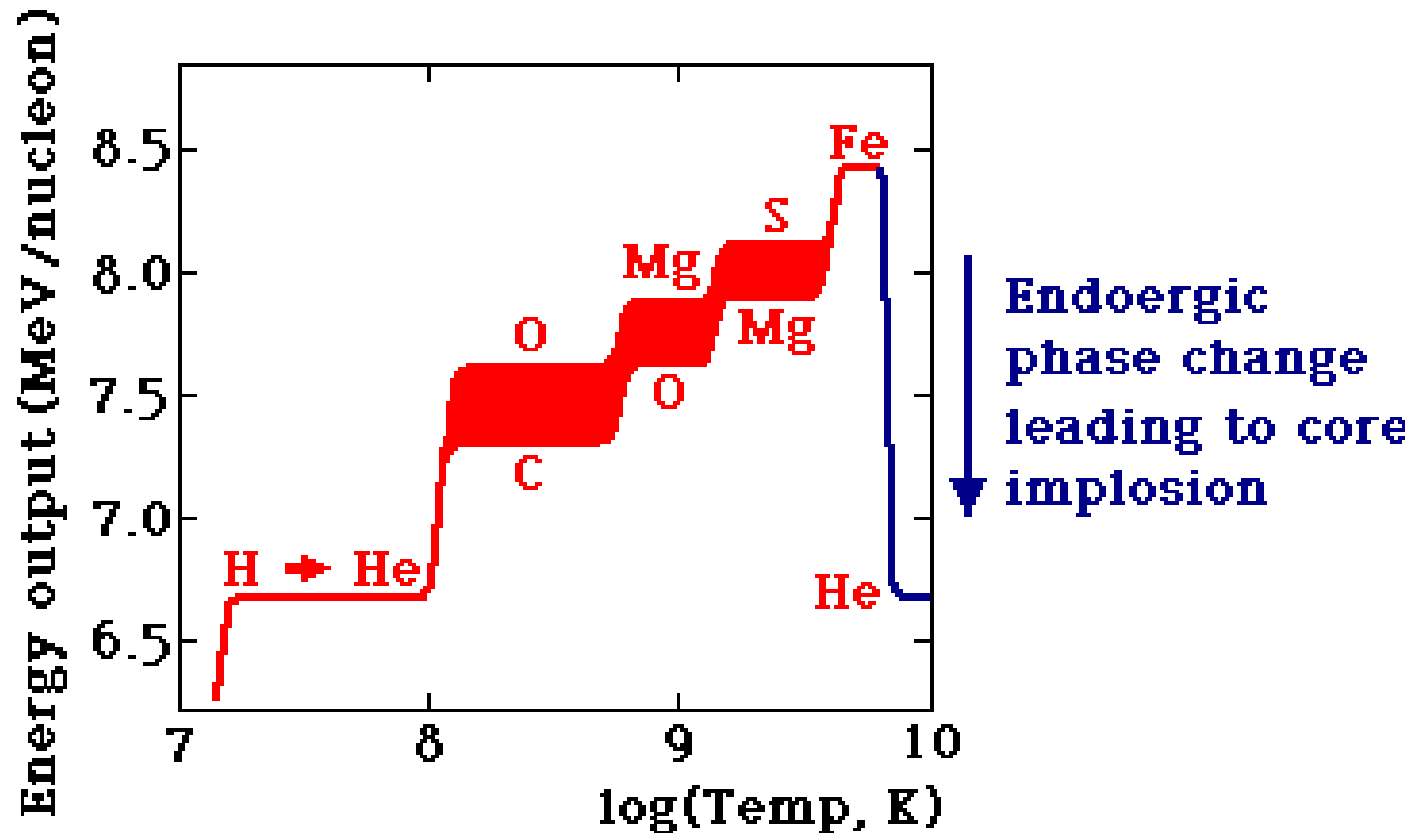
R Process

Στην r-process, η διαδοχική σύλληψη νετρονίων χαρακτηρίζεται από χρόνους βραχύτερους από αυτούς της β διάσπασης (της τάξης των δευτερολέπτων). Σε αυτές τις συνθήκες τα νουκλίδια απορροφούν νετρόνια με τον ίδιο ρυθμό με τον οποίο τα αποβάλλουν εξ αιτίας της απορρόφησης των φωτονίων που επίσης τα περιβάλλουν. Η κατάσταση αυτή είναι γνωστή ως η $(n,\gamma) \leftrightarrow (\gamma,n)$ ισορροπία.

Οι μαγικοί αριθμοί και σε αυτήν την διαδικασία λειτουργούν περιοριστικά. Μόνο που σε αυτή την διαδικασία τα οι πυρήνες αυτοί είναι ασταθείς, «εξωτικοί», πλούσιοι σε νετρόνια, όπως λ.χ. το ^{130}Cd με $N = 82$ «μαγικό» αριθμό, άγκαι το πιο βαρύ σταθερό ισότοπο του καδμίου είναι το ^{116}Cd με 14 λιγότερα νετρόνια. Αν η διαδικασία αυτή διαρκέσει για λίγο χρονικό διάστημα, τότε οι ασταθείς αυτοί μαγικοί πυρήνες θα είναι πολυπληθείς. Όπως είναι φυσικό θα αποσυντεθούν προς το πλησιέστερο σταθερό νουκλίδιο. Στο παράδειγμα μας, το ^{130}Cd θα αποσυντεθεί στο ^{130}Te , το πιο κοινό ισότοπο του Τελλουρίου.

Η r-process είναι αρκετά γρήγορη ώστε να ξεπεράσει το φράγμα που δημιουργεί η σχάση α , για πυρήνες βαρύτερους του μόλυβδο. Οι σταθερές ακτινίδες παράγονται από ένα νετρονικά πλούσιο ασταθή γεννήτορα που είτε υφίσταται α σχάση, είτε β αποσύνθεση.

Εκρηκτική Πυρηνοσύνθεση



Οι διάφορες “αλυσίδες” σύντηξης μπορούν να οδηγήσουν σε παραγωγή νουκλιδίων έως και $A \approx 60$. Μπορούν να οδηγήσουν σε καταστροφικές εκρήξεις, στις οποίες συντελείται και η γοργή διαδικασία (r-process).