

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΥΡΗΝΟΣΥΝΘΕΣΗΣ

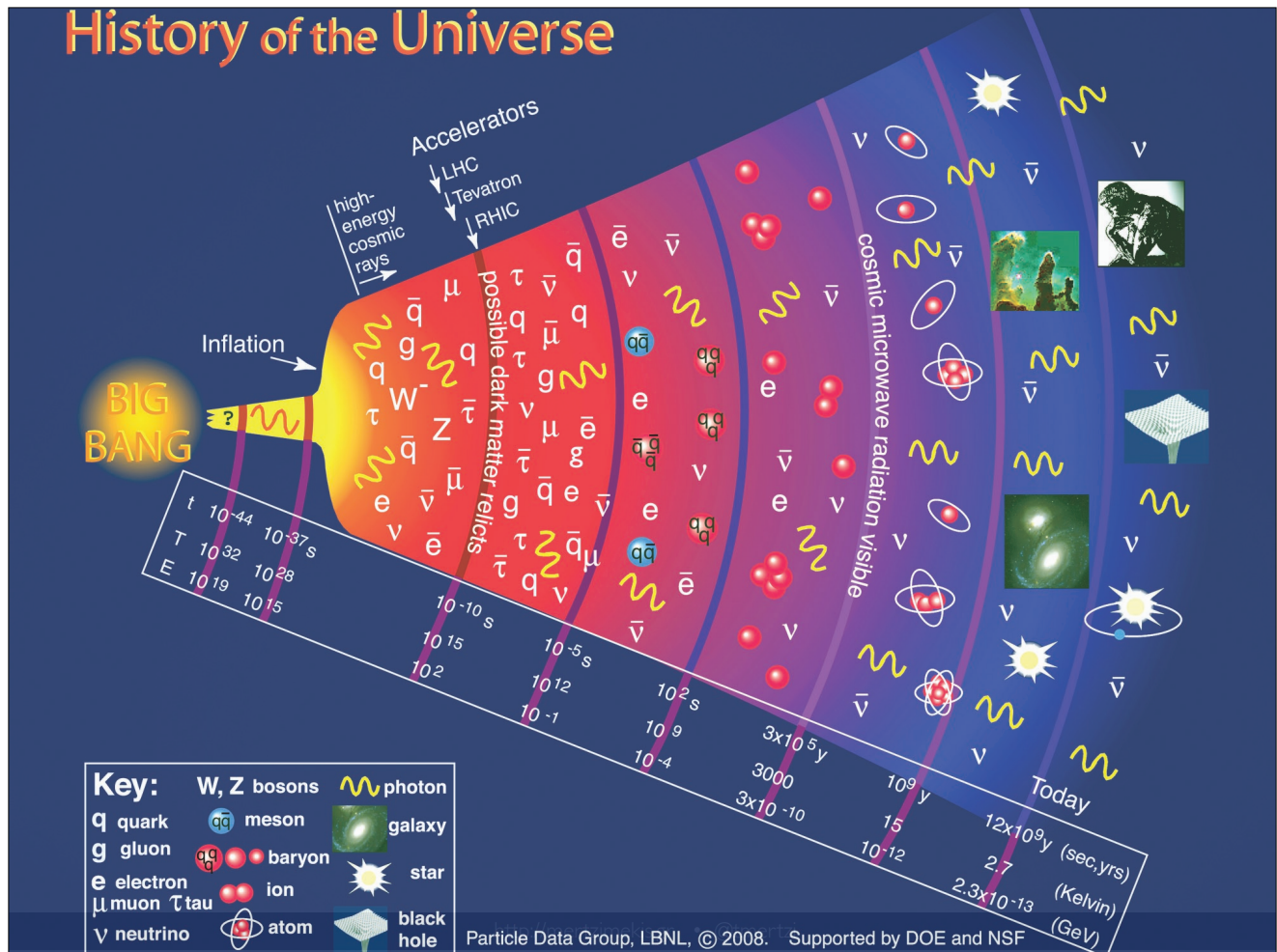
<http://mertzimekis.gr> • @tmertzi

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΥΡΗΝΟΣΥΝΘΕΣΗΣ

- **Θεμελιώδες ερώτημα:** πώς προέκυψαν τα χημικά στοιχεία και τα ισότοπά τους;
- Πρόσφατα (τα τελευταία 5 δις έτη!!!), οι ατομικοί πυρήνες του ηλιακού συστήματος δημιουργήθηκαν στο εσωτερικό κάποιου νεκρού αστεριού
- Η πυρηνοσύνθεση μπορεί να διακριθεί σε δύο μεγάλα (ιστορικά) κεφάλαια:
 - πυρηνοσύνθεση στη Μεγάλη Εκρηξη
 - αστρική πυρηνοσύνθεση

<http://mertzimekis.gr> • @tmertzi

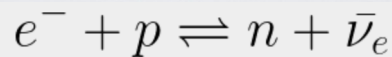
History of the Universe



ΤΑ ΠΡΩΤΑ ΝΟΥΚΛΕΟΝΙΑ

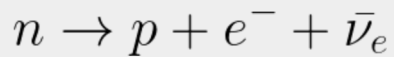
- Στο πρώτο στάδιο μετά την Εκρηξη, δημιουργήθηκαν τα quarks και τα γλοιόνια μέσα σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες (QGP)
- Σε $\sim 10^{-2}$ sec λόγω ψύξης, δημιουργήθηκαν οι πρώτοι “παγωμένοι” σχηματισμοί, τα νουκλεόνια
- Η πυκνότητα ενέργειας και ύλης εξακολουθούσε να είναι υψηλή

ΟΙ ΠΡΩΤΟΙ ΠΥΡΗΝΕΣ



- Οι αντιδράσεις αυτές για κάποιο σύντομο χρονικό διάστημα μπορούσαν να είναι αμφίδρομες, παρά το ότι $m_p < m_n$ (και $t_{1/2}(n) \sim 10 \text{ min}$)

- Λόγω συνεχιζόμενης ψύξης, η αμφίδρομη κατάσταση σταματά και επιζεί πλέον μόνο η διάσπαση β του



- Σε 3 min, τα περισσότερα νετρόνια σχηματίζουν με τα πρωτόνια τους πρώτους (σταθερούς) πυρήνες, πχ ${}^4\text{He}$

ΔΕΥΤΕΡΙΟ

- Ο σχηματισμός του δευτερίου, εξασφαλίζει σταθερότητα στο νετρόνιο και ουσιαστικά καθορίζει μια εποχή όπου η πυρηνοσύνθεση συμβαίνει πολύ παρόμοια με αυτό που συμβαίνει σήμερα στον ήλιο.
- Δημιουργούνται οι προϋποθέσεις για τη σύνθεση των πρώτων ελαφρών ισοτόπων, καθώς τα νετρόνια είτε συνδέονται με πρωτόνια, είτε διασπώνται.
- Τα νετρίνα είναι πλέον τα μόνα πλήρως ελεύθερα σωμάτια σε αυτές τις διαδικασίες (απολιθώματα πρώιμου σύμπαντος)

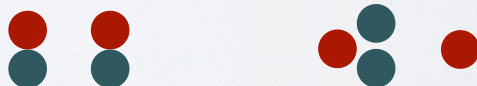
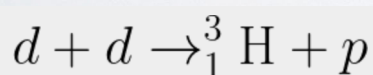
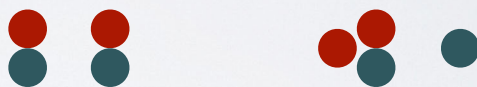
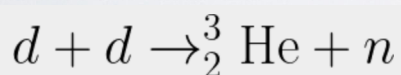
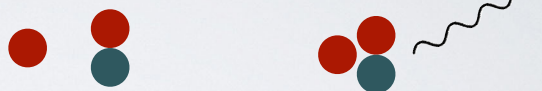
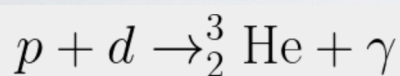
ORIGINS OF THE ELEMENTS

H1 Hydrogen	The big bang  Dying low-mass stars  White dwarf supernovae  Radioactive decay 																He2 Helium																
Li3 Lithium	Be4 Beryllium																	B5 Boron	C6 Carbon	N7 Nitrogen	O8 Oxygen	F9 Fluorine	Ne10 Neon										
Na11 Sodium	Mg12 Magnesium																	Al13 Aluminum	Si14 Silicon	P15 Phosphorus	S16 Sulfur	Cl17 Chlorine	Ar18 Argon										
K19 Potassium	Ca20 Calcium	Sc21 Scandium	Ti22 Titanium	V23 Vanadium	Cr24 Chromium	Mn25 Manganese	Fe26 Iron	Co27 Cobalt	Ni28 Nickel	Cu29 Copper	Zn30 Zinc	Ga31 Gallium	Ge32 Germanium	As33 Arsenic	Se34 Selenium	Br35 Bromine	Kr36 Krypton																
Rb37 Rubidium	Sr38 Strontium	Y39 Yttrium	Zr40 Zirconium	Nb41 Niobium	Mo42 Molybdenum	Tc43 Technetium	Ru44 Ruthenium	Rh45 Rhodium	Pd46 Palladium	Ag47 Silver	Cd48 Cadmium	In49 Indium	Sn50 Tin	Sb51 Antimony	Te52 Tellurium	I53 Iodine	Xe54 Xenon																
Cs55 Cesium	Ba56 Barium																	Hf72 Hafnium	Ta73 Tantalum	W74 Tungsten	Re75 Rhenium	Os76 Osmium	Ir77 Iridium	Pt78 Platinum	Au79 Gold	Hg80 Mercury	Tl81 Thallium	Pb82 Lead	Bi83 Bismuth	Po84 Polonium	At85 Astatine	Rn86 Radon	
Fr87 Francium	Ra88 Radium																	Rf104 Rutherfordium	Db105 Dubnium	Sg106 Seaborgium	Bh107 Bohrium	Hs108 Hassium	Mt109 Meitnerium	Ds110 Darmstadtium	Rg111 Roentgenium	Cn112 Copernicium	Nh113 Nihonium	Fl114 Flerovium	Mc115 Moscovium	Lv116 Livermorium	Ts117 Tennessine	Og118 Oganesson	
		La57 Lanthanum	Ce58 Cerium	Pr59 Praseodymium	Nd60 Neodymium	Pm61 Promethium	Sm62 Samarium	Eu63 Europium	Gd64 Gadolinium	Tb65 Terbium	Dy66 Dysprosium	Ho67 Holmium	Er68 Erbium	Tm69 Thulium	Yb70 Ytterbium	Lu71 Lutetium																	
		Ac89 Actinium	Th90 Thorium	Pa91 Protactinium	U92 Uranium	Np93 Neptunium	Pu94 Plutonium	Am95 Americium	Cm96 Curium	Bk97 Berkelium	Cf98 Californium	Es99 Einsteinium	Fm100 Fermium	Md101 Mendelevium	No102 Nobelium	Lr103 Lawrencium																	

<http://mertzimekis.gr> • @tmertzi

ΕΛΑΦΡΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ-I

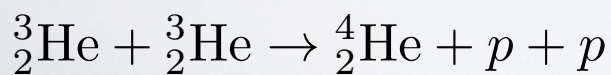
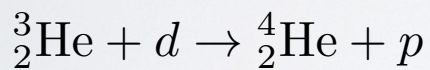
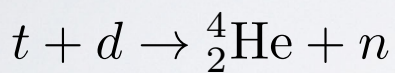
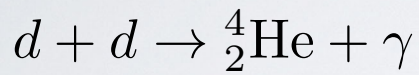
- Ο σχηματισμός των ελαφρότερων ισοτόπων βασίζεται στο δευτέριο και το υδρογόνο:



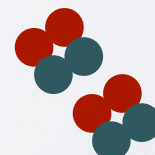
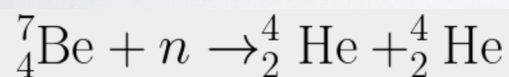
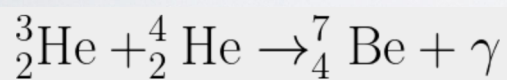
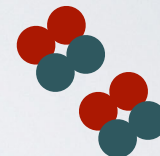
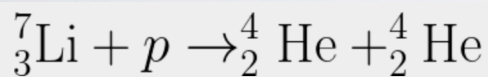
<http://mertzimekis.gr> • @tmertzi

ΕΛΑΦΡΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ-II

► Η συμμετοχή των $A=3$ ισοτόπων παίζει επίσης ρόλο:



ΕΛΑΦΡΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ-III



ΤΑ ΠΡΩΤΑ ΟΥΔΕΤΕΡΑ ΑΤΟΜΑ

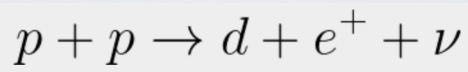
- ▶ 3 min μετά την έκρηξη: 75% p, 24% ^4He , 1% d/ίχνη Li, B, Be
- ▶ Θα χρειαστούν περίπου 300'000 έτη για να μπορέσει να ψυχθεί και να επεκταθεί χωρικά το Σύμπαν ώστε τα πολύ ενεργητικά ηλεκτρόνια να μπορέσουν να συλληφθούν από τους πυρήνες (~10'000 K)
- ▶ Η δέσμευση των e οδηγεί του Σύμπαν σε διαφανή μορφή με μόνο τα φωτόνια γ να μπορούν να ταξιδεύουν μακρινές αποστάσεις.
- ▶ Στην πρώιμη πυρηνοσύνθεση, **δεν υπάρχει** σύνθεση άνθρακα

ΑΣΤΡΙΚΗ ΠΥΡΗΝΟΣΥΝΘΕΣΗ

- ▶ Σε ενεργητικά αστρικά περιβάλλοντα (όπως ο ήλιος) τα πρωτόνια έχουν κυρίαρχο ρόλο, όπως και στην πρώιμη πυρηνοσύνθεση
- ▶ Βασική διαφορά: το τρίτο (που είναι ασταθές ισότοπο) πλέον μπορεί να διασπασθεί στις χρονικές κλίμακες ζωής του άστρου και παίζει λιγότερο σημαντικό ρόλο.
- ▶ Αντίθετα, το ήλιο-3 παίζει σημαντικό ρόλο στον κύκλο.

ΣΥΝΘΕΣΗ ΗΛΙΟΥ-4

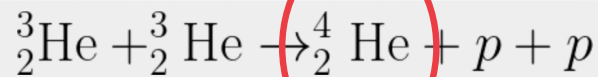
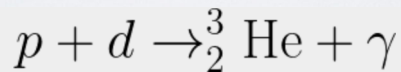
σύντηξη



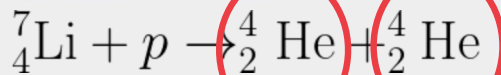
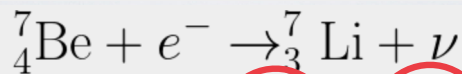
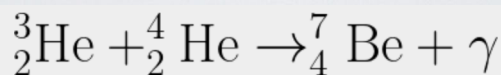
καθορίζει
χρονική κλίμακα



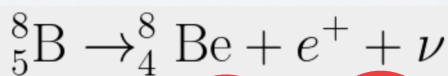
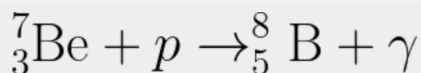
αντιύλη



ΣΥΝΘΕΣΗ ΗΛΙΟΥ-4



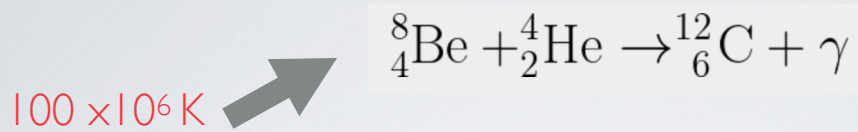
$10^{-23} \times 10^6 \text{ K}$



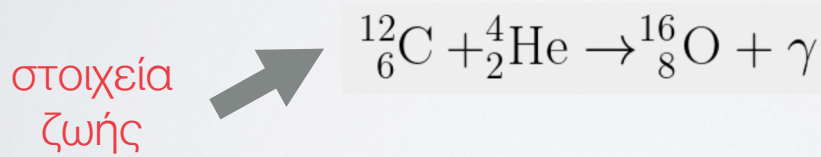
σύνθεση $A > 5$
σταματά



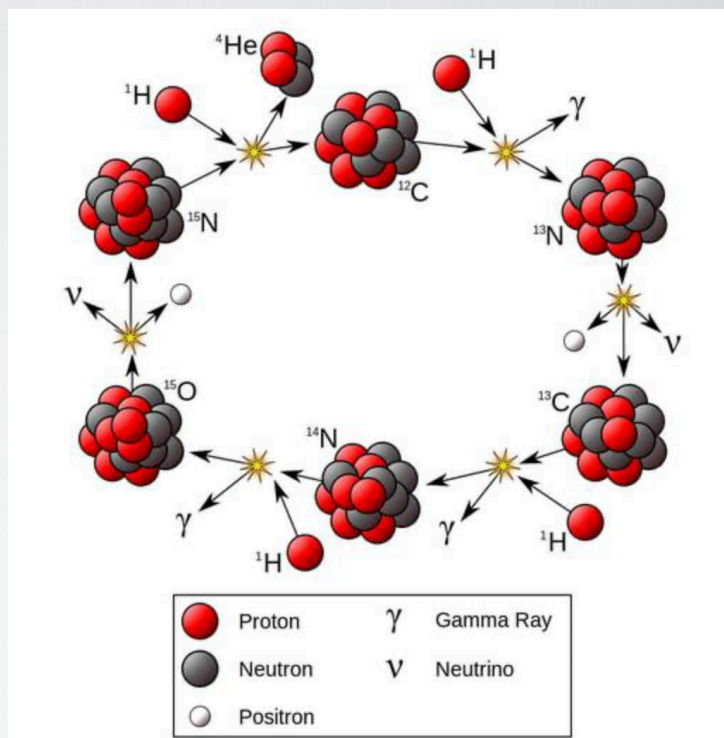
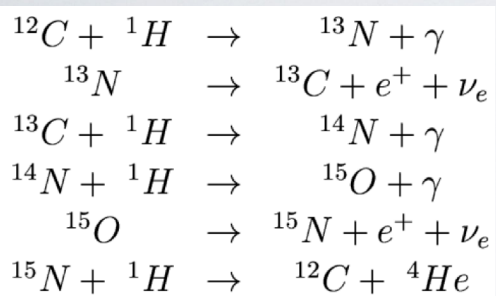
ΣΥΝΘΕΣΗ C-12



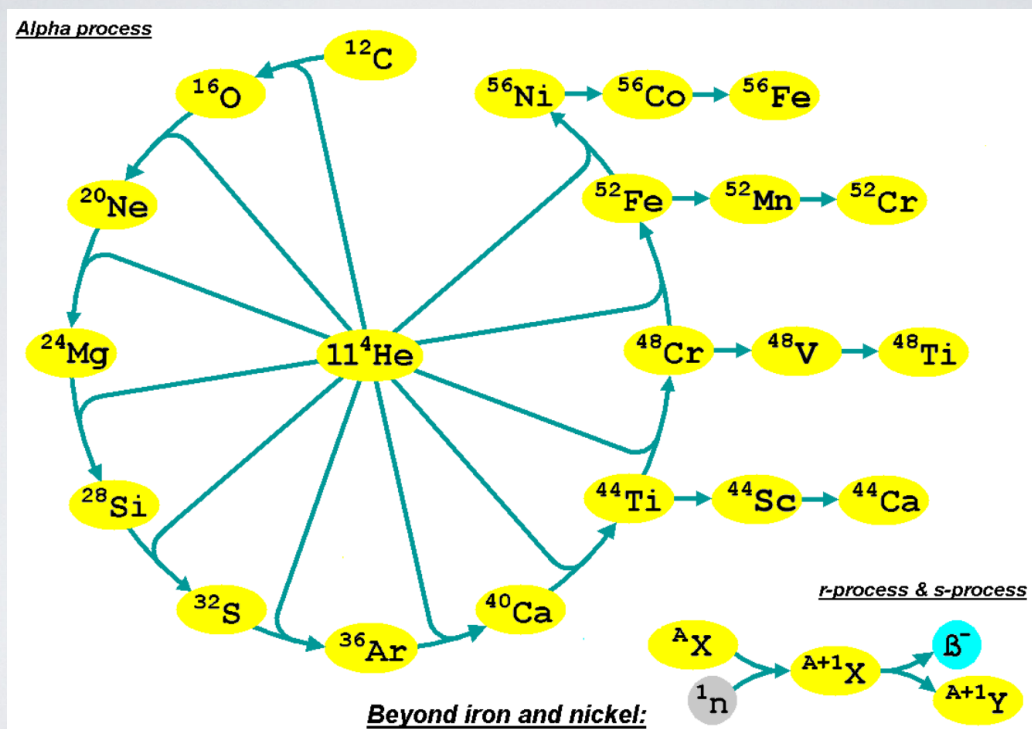
ΣΥΝΘΕΣΗ O-16



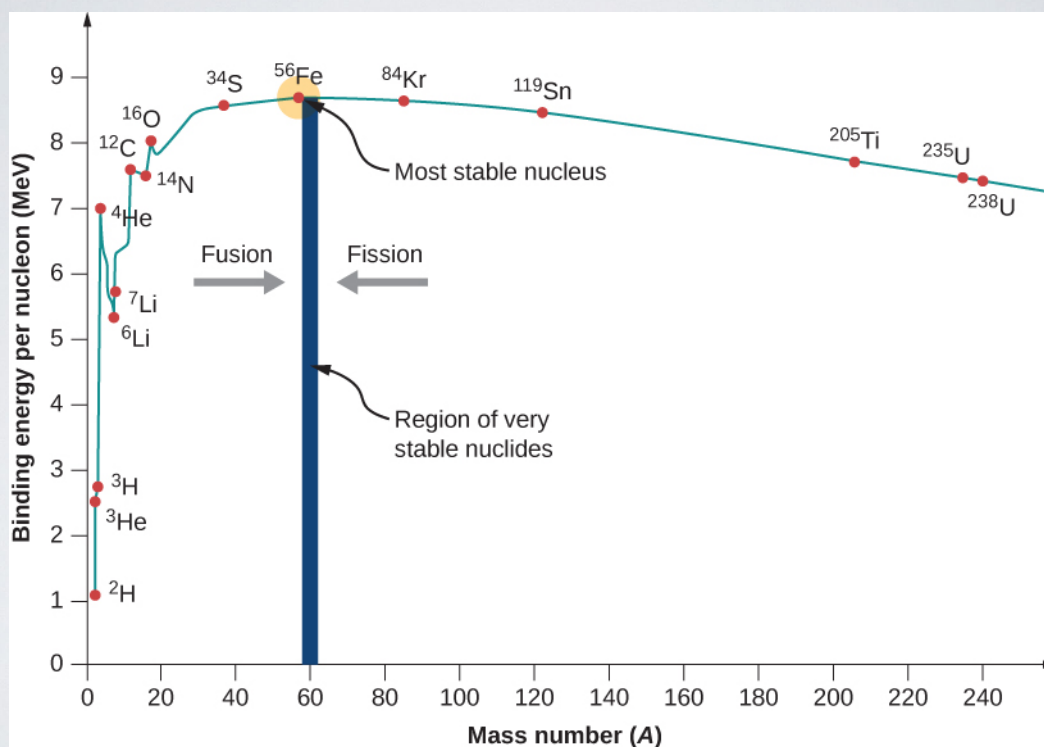
ΚΥΚΛΟΣ CNO



ΩΣ ΤΟ ΣΙΔΗΡΟ

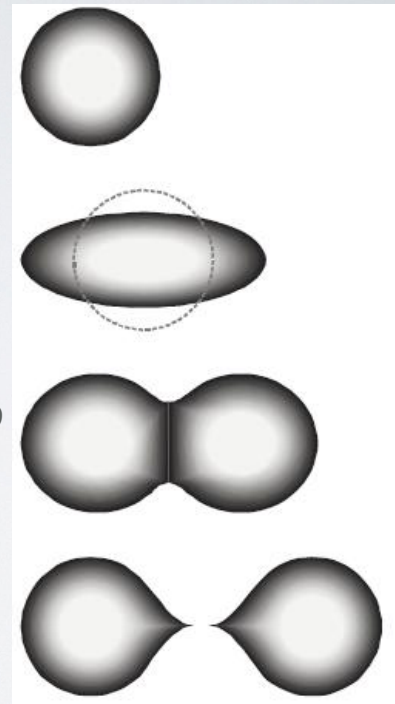


ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΣΥΝΔΕΣΗΣ



ΚΑΙ ΔΥΟ ΛΟΓΙΑ ΓΙΑ ΤΗ ΣΧΑΣΗ

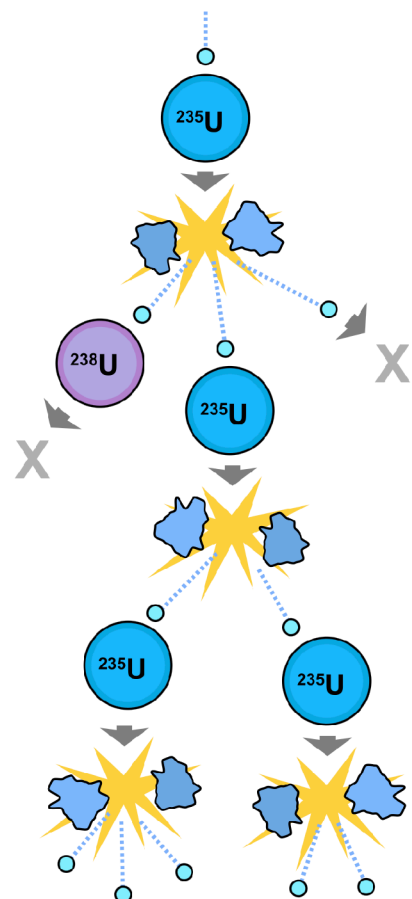
- ▶ Είναι φαινόμενο συλλογικής κίνησης μέσα σε βαριά ισότοπα
- ▶ Ο βαρύς πυρήνας οδηγείται (μέσω φαινομένου σήραγγας ή υπέρβασης φραγμού) σε μια νέα κατάσταση όπου η σταθερότητα αυξάνεται λόγω χωρισμού σε δύο ή τρία (ελαφρύτερα ισότοπα)



<http://mertzimekis.gr> • @tmertzi

ΕΞΑΝΑΓΚΑΣΜΕΝΗ ΣΧΑΣΗ

- ▶ Η παροχή ενέργειας σε αντιδράσεις με νετρόνια οδηγεί ένα σύστημα που είναι έτοιμο προς σχάση (στάσιμο υλικό) να διαχωρισθεί
- ▶ Εκπέμπονται πολλαπλάσια νετρόνια ανά διάσπαση, τα οποία εξαναγκάζουν περισσότερους πυρήνες να σχισθούν
- ▶ Η έκλυση ενέργειας είναι βίαια και εκθετικά αυξανόμενη
- ▶ Δημιουργείται αλυσίδα διάσπασης



<http://mertzimekis.gr> • @tmertzi