

Γιατί φωτίζουνε τα αστέρια;

Κωνσταντίνος Αναγνωστόπουλος

Τομέας Φυσικής

Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Γιατί φωτίζουνε τα αστέρια;

Φαίνεται ερώτηση μόνο για μικρά παιδιά ...

- ... ναι, αλλά η απάντηση δεν είναι τόσο απλή...
- ... δηλαδή, ξέρουμε καλά **πώς** φωτίζουνε τα αστέρια...
- ... αλλά το ότι φωτίζουνε μέσα στο σύμπαν που ζούμε...
- ... βασίζεται σε μια σειρά από εκπληκτικές διεργασίες και ... συμπτώσεις

Για να τις καταλάβουμε, πρέπει να μπούμε βαθιά στα άδυτα της θεμελιώδους φυσικής:

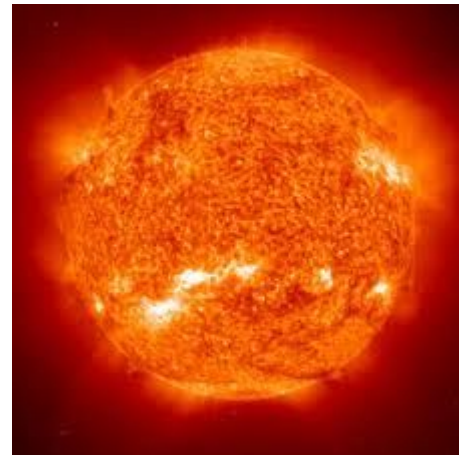
Καθιερωμένο πρότυπο: στοιχειώδη σωμάτια και οι αλληλεπιδράσεις τους

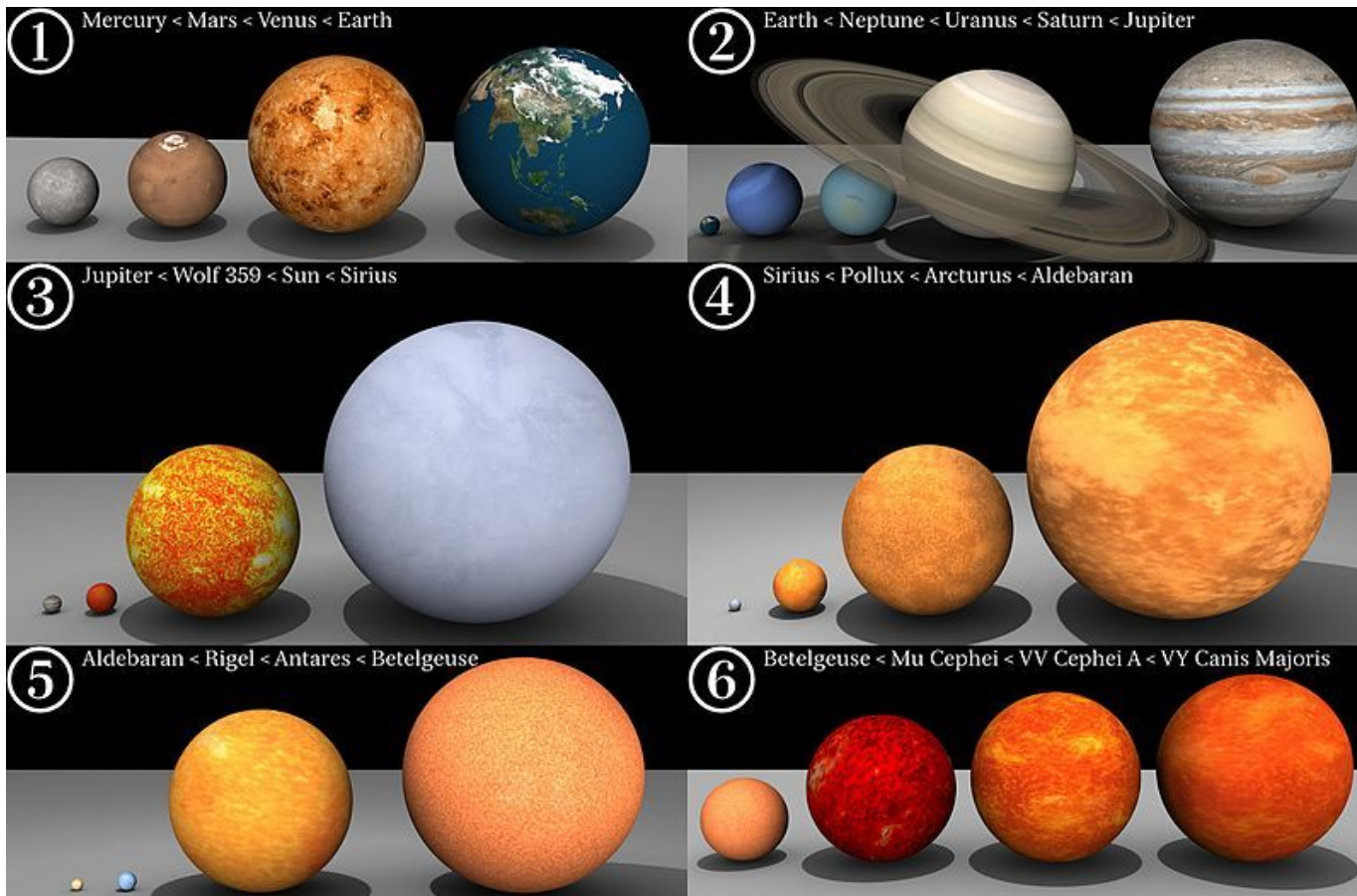
Κοσμολογία-αστροφυσική: Βαρύτητα



Πώς φωτίζουνε τα αστέρια;

- Τα αστέρια είναι μικροί ή μεγαλύτεροι ήλιοι
- Παράγουν ενέργεια (θερμότητα, φως, ακτίνες X και γ) με θερμοπυρηνικές αντιδράσεις
- Είναι καυτά:
 - Στο εσωτερικό μέχρι 10 δισεκατομμύρια βαθμούς C (ο ήλιος 15 εκατομμύρια)
 - Στην επιφάνεια μέχρι 55000 βαθμούς C (ο ήλιος 5600)
- Μας έρχονται σε πολύ διαφορετικά μεγέθη!





ήλιος: ακτίνα ~ 700.000 χλμ

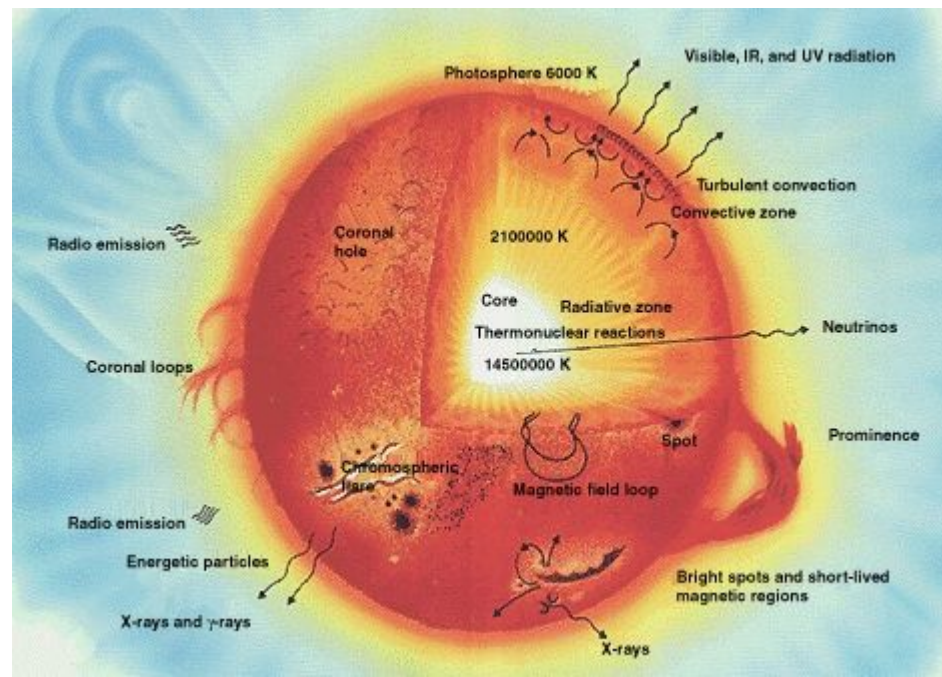
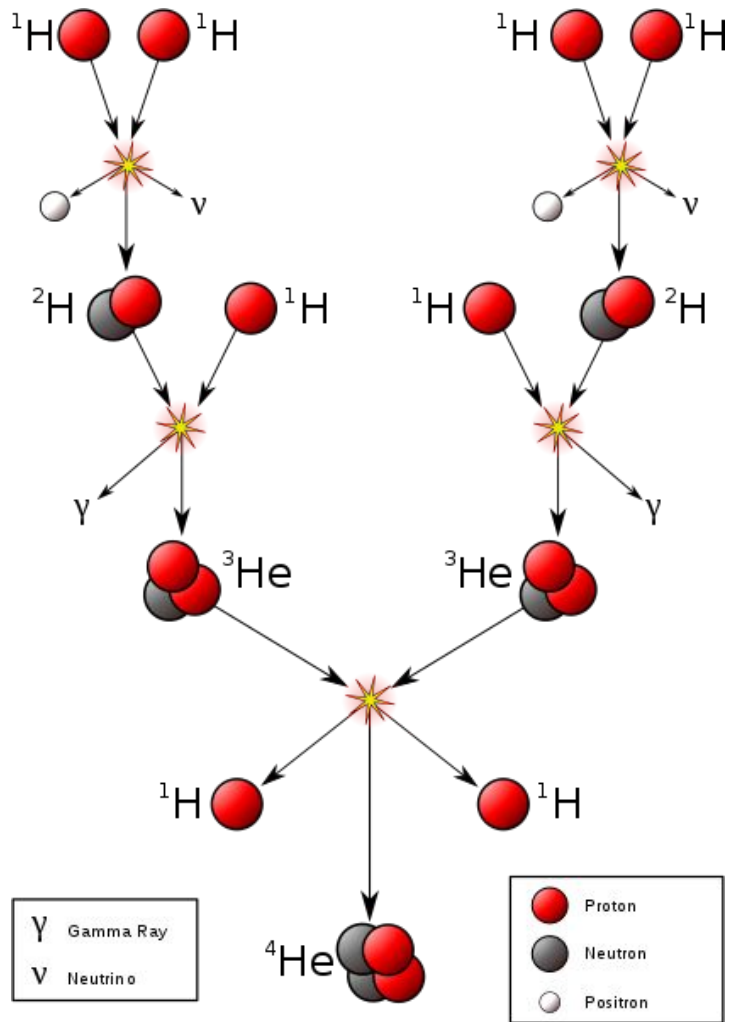
μεγαλύτερα γνωστά αστέρια ~ 2.000 x (ακτίνα ήλιου)

Πώς γίνονται τα αστέρια;

- Στην αρχή όλα είναι ένα σύννεφο...
- ... μία βαρυτική αστάθεια οδηγεί σε κατάρρευση...
- ... η πυκνότητα και η θερμοκρασία αυξάνουν: η ενέργεια της βαρύτητας γίνεται θερμότητα...
- ... θερμοκρασία μεγαλύτερη από 4 εκατομμύρια βαθμούς C...
- ... ξεκινούν οι πυρηνικές αντιδράσεις σύντηξης



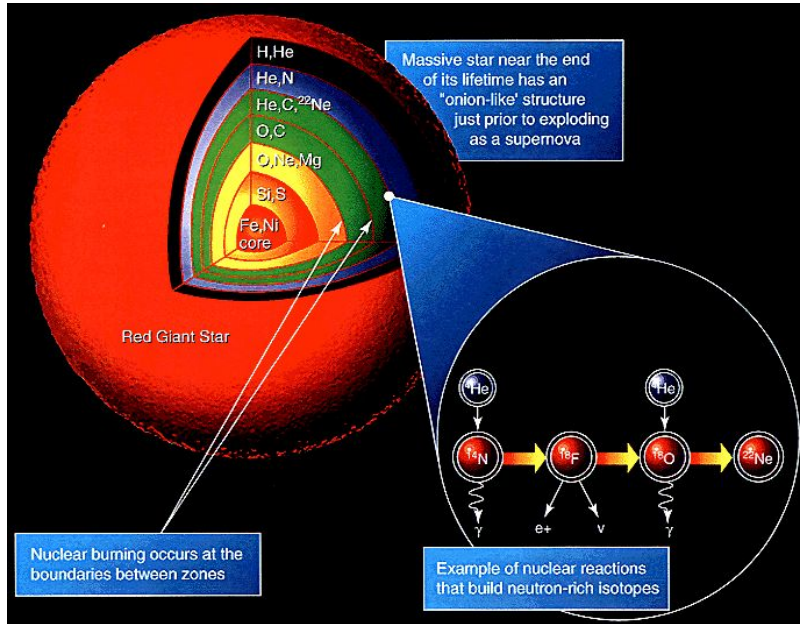
Εικόνα από το τηλεσκόπιο Hubble
Απόσταση: 20.000 έτη φωτός
(στο γαλαξία μας)



Σύντηξη:

Ηδρογόνο γίνεται Ήλιο και απελευθερώνει ΠΟΛΛΗ ενέργεια...
 ...η πίεση, όσο διαρκούν οι αντιδράσεις, εμποδίζει τη βαρυτική κατάρρευση του αστεριού.

Αστρική Σύνθεση Πυρήνων



Καύσιμο	Τελικό Προϊόν	Ελάχιστη Θερμοκρασία	Ελάχιστη μάζα αστεριού
H	He	$0.4 \times 10^7 \text{ K}$	0.1 ηλ. μάζες
He	C, O	$12 \times 10^7 \text{ K}$	0.4 ηλ. μάζες
C	Ne, Na, Mg, O	$60 \times 10^7 \text{ K}$	4 ηλ. μάζες
Si	Ni έως Fe	$300 \times 10^7 \text{ K}$	8 ηλ. μάζες

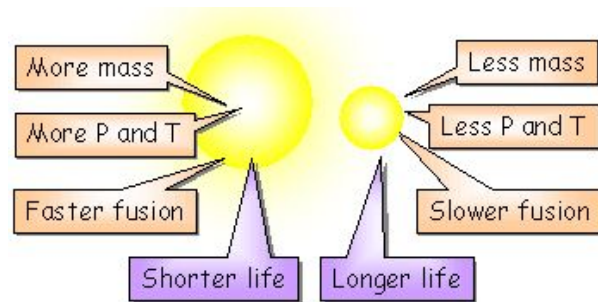
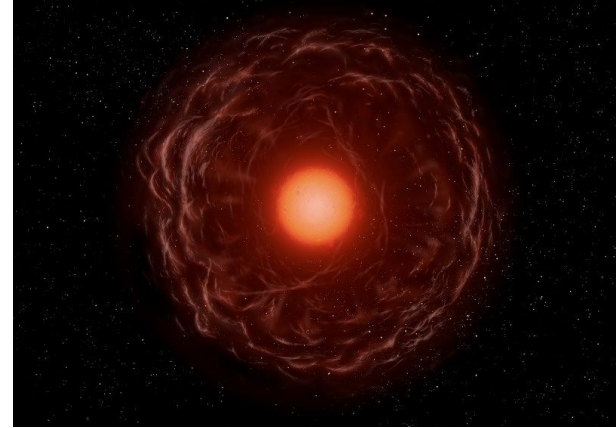
Γερνάνε τα αστέρια;

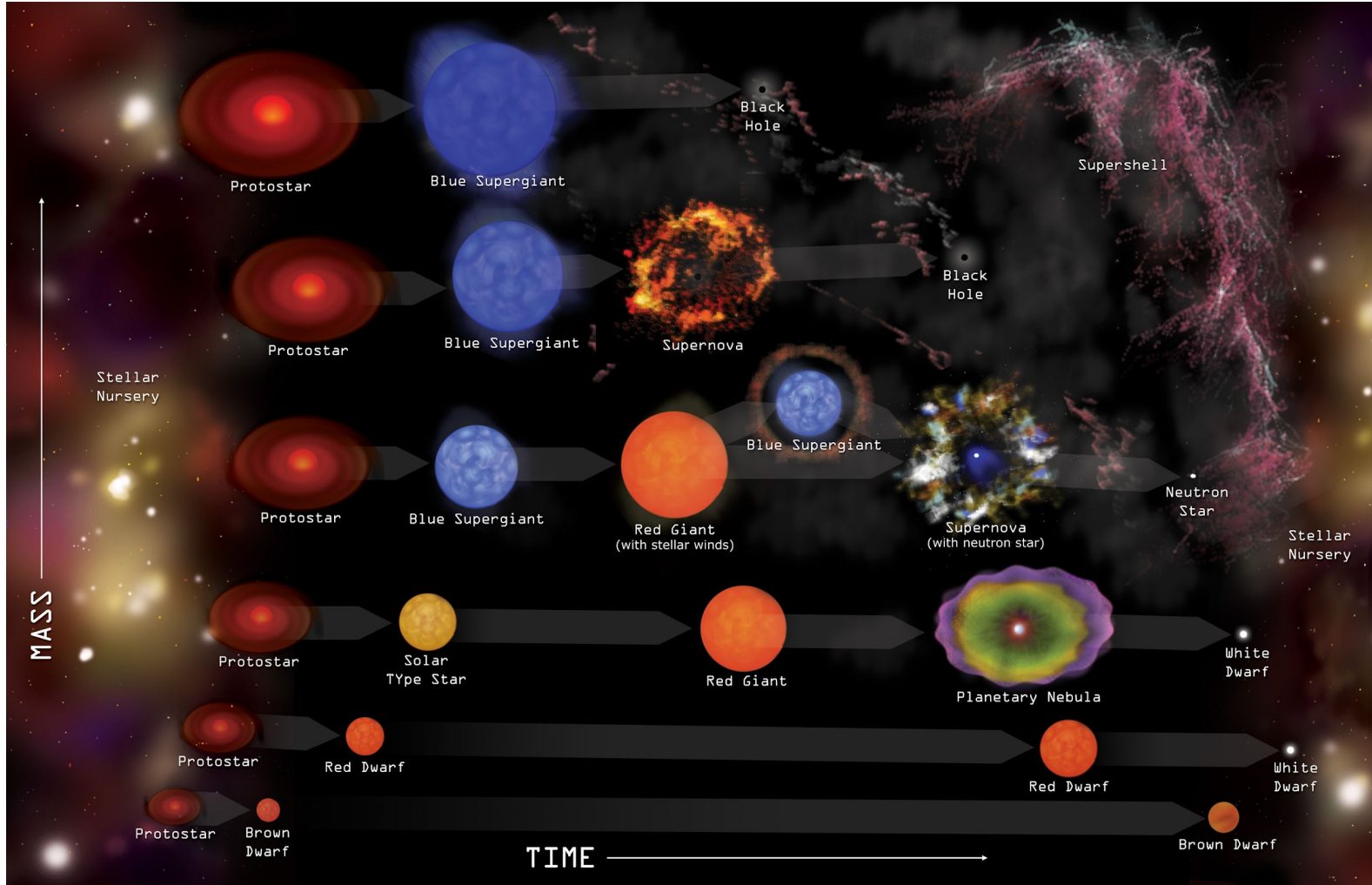
...όλα υπόκεινται στη φθορά, ΚΑΙ τα αστέρια...

Ζουν όμως πολύ περισσότερο από εμάς!

- Ο χρόνος ζωής των αστεριών εξαρτάται από το μέγεθος τους!
- ... όσο πιο *μεγάλο* το αστέρι, τόσο *λιγότερο* ζει...
 - ο ήλιος μας: 10 δισεκατομμύρια χρόνια
 - τα μεγαλύτερα αστέρια: 0.1 - 10 εκατομμύρια χρόνια
 - τα μικρότερα αστέρια: 10 τρισεκατομμύρια χρόνια

Αλλά και η (κακή τους) τύχη εξαρτάται από το μέγεθος:





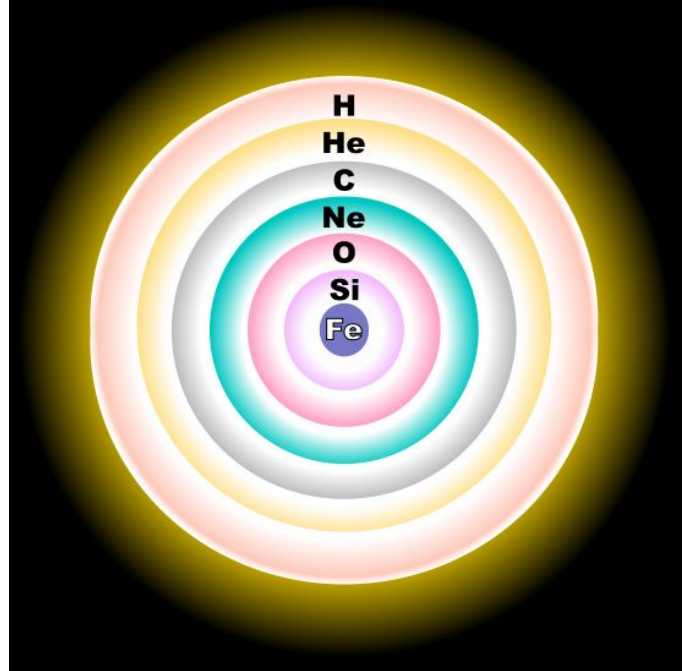
Γιατί γερνάνε τα αστέρια;

Γιατί καίνε το καύσιμο των πυρηνικών αντιδράσεων:

- η σύντηξη παράγει βαρύτερα στοιχεία
- ...η αλυσίδα των οποίων σταματάει στον σίδηρο (Fe)

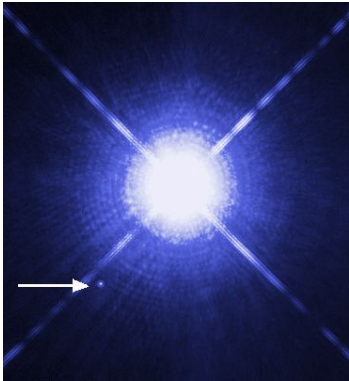
Όταν δεν έχει απομείνει τίποτα να καεί, το άστρο καταρρέει από τη βαρύτητα.

Τι θα σταματήσει τώρα την κατάρρευση;

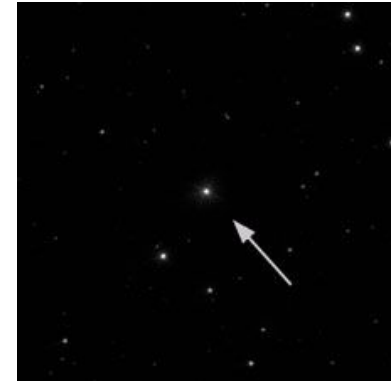
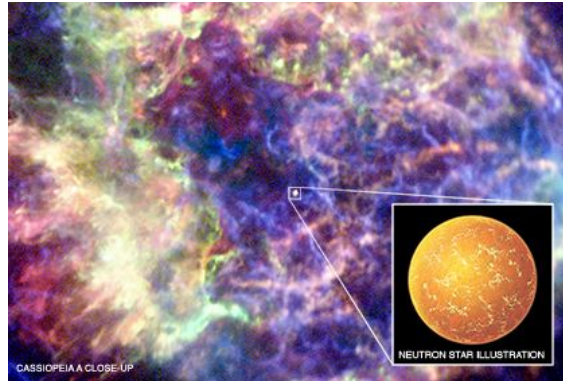


Τι θα σταματήσει τώρα την κατάρρευση;

- η πίεση των εκφυλισμένων ηλεκτρονίων: λευκός νάνος
- η πίεση των εκφυλισμένων νετρονίων: αστέρας νετρονίων
- τίποτα: μαύρη τρύπα



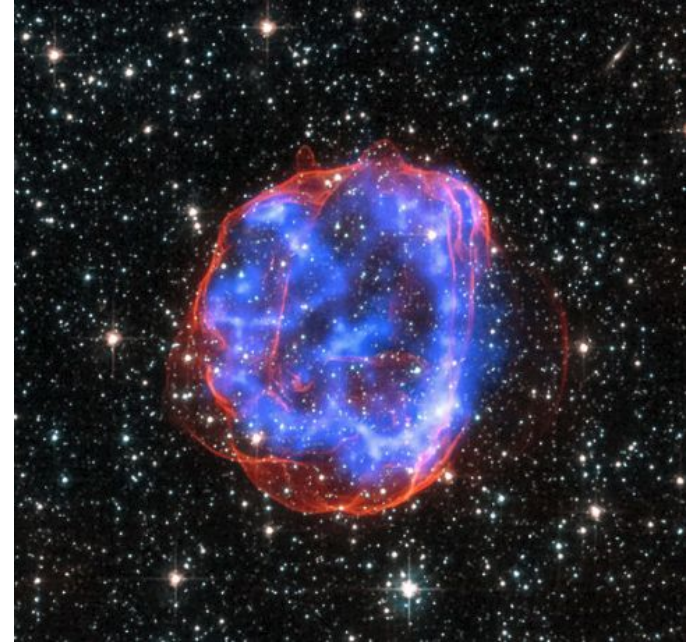
Λευκός νάνος



Από πού ήρθαμε;

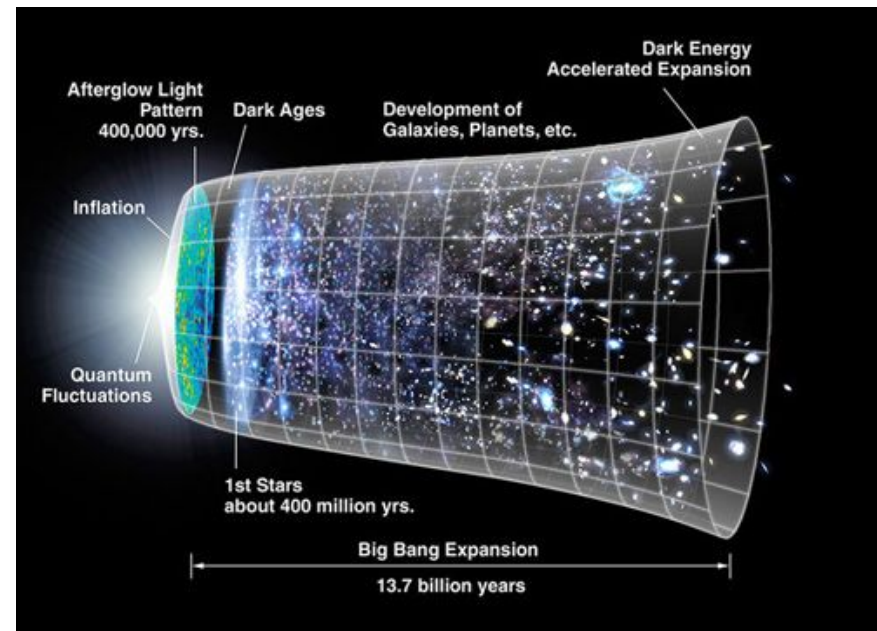
Μεγάλη ιστορία, αλλά τα υλικά που αποτελούμαστε φτιάχτηκαν στην καρδιά ενός αστεριού...

- Ο πυρήνας των αστεριών που είναι > 8 φορές τη μάζα του ήλιου καταρρέει και οδηγεί σε μία τεράστια έκρηξη (υπερκαινοφανής αστέρας)
- λαμπρότεροι από ολόκληρο γαλαξία
- σκορπίζουν βαριά στοιχεία στη γειτονιά τους



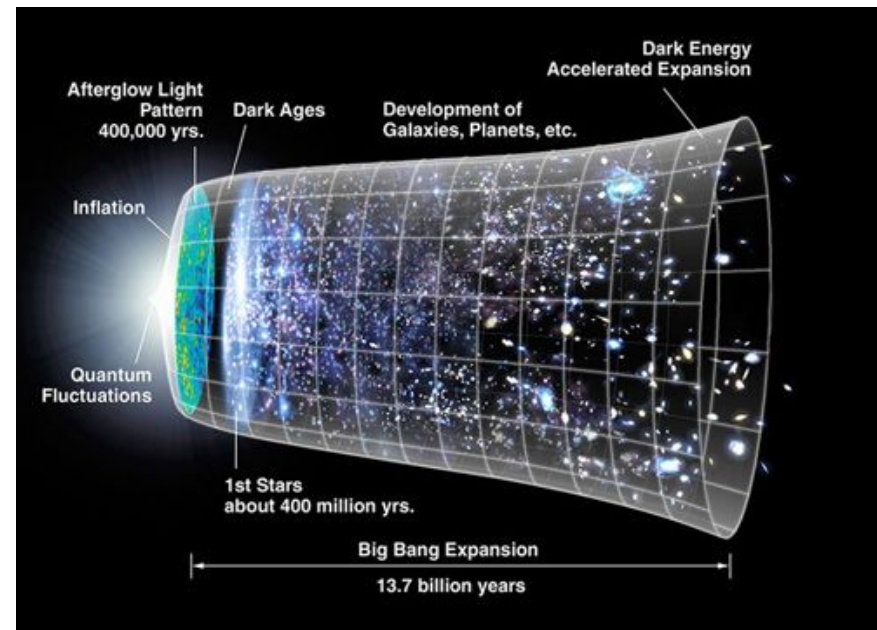
Πότε έγιναν τα αστέρια;

Όλα άρχισαν πριν από 13,7
δισεκατομμύρια χρόνια με μια
μεγάλη έκρηξη...



Η αρχή του χρόνου...

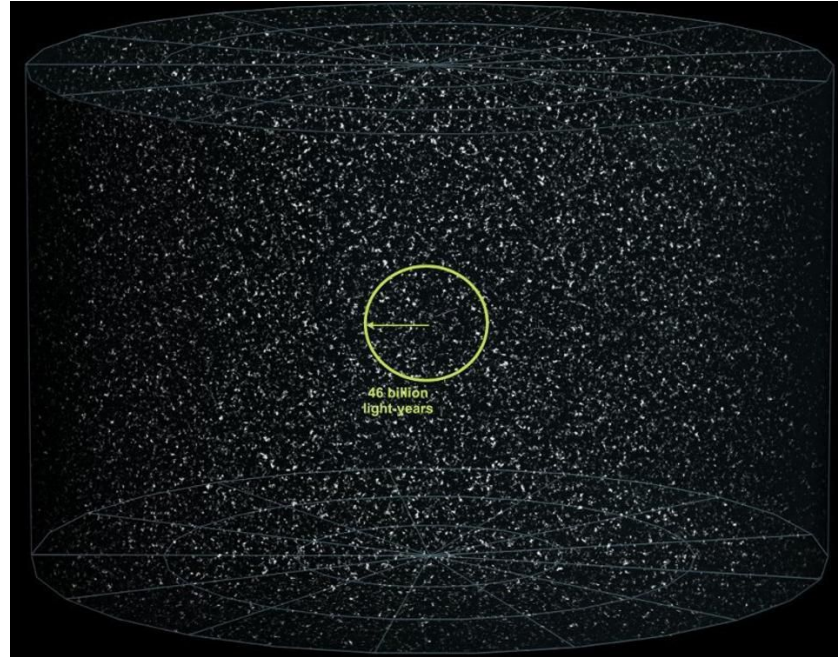
- όλο το σύμπαν ξεκίνησε από $1/1.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000$ (10^{-33}) εκατοστά
- στα πρώτα 10^{-34} δευτερόλεπτα της ζωής του μεγάλωσε απότομα
- στα 3 πρώτα λεπτά έγιναν τα βαρύτερα στοιχεία (Δευτέριο, He, Li)
- στα 100.000 χρόνια έγιναν τα πρώτα άτομα
- στα 400 εκατομμύρια χρόνια έγιναν οι πρώτοι γαλαξίες και αστέρια
- στα 2 δισεκατομμύρια χρόνια έγιναν αστέρια δεύτερης γενιάς
- στα 8 δισεκατομμύρια χρόνια έγινε το ηλιακό μας σύστημα
- στα 13,7 δισεκατομμύρια χρόνια ήρθαμε και εμείς!



... και πού βρισκόμαστε τώρα;

- Το σύμπαν έχει ηλικία: 13.7 δις έτη (η γη ~ 4.6 δις έτη)
- Το σύμπαν είναι μεγάλο: Το παρατηρήσιμο σήμερα ~ 46 δις έτη φωτός. Είναι άπειρο; Δεν ξέρουμε
- Είναι κρύο: $T = 2.725 \text{ K}$
- Τουλάχιστον 2,000 δις γαλαξίες με 100-100,000 δις άστρα έκαστος (ο δικός μας 100-400 δις)
- Είναι ομογενές, ισότροπο και επίπεδο

Φεγγάρι	~ 1	δευτ φωτός
Ήλιος	~ 8	λεπτά φωτός
Ηλιακό σύστημα	~ 8	ώρες φωτός
Κοντινότερο αστέρι	~ 4	έτη φωτός
Γαλαξίας	~ 100.000	έτη φωτός
Ανδρομέδα	~ 2.500.000	έτη φωτός



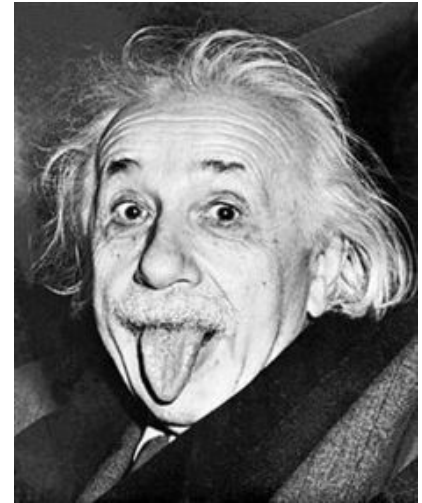
Αυτό είναι τρελό, μπορεί να μεγαλώνει ο χώρος;

Ναι, και δεν είναι μόνο αυτό:

- μπορεί να μεγαλώνει και να μικραίνει
- μπορεί να παραμορφώνεται
- μπορεί, όχι μόνο ο χώρος, αλλά και ο χρόνος, να διαστέλλεται, συστέλλεται και να παραμορφώνεται...

Και μάλιστα όλα αυτά σχετίζονται με αυτό που λέμε βαρύτητα:

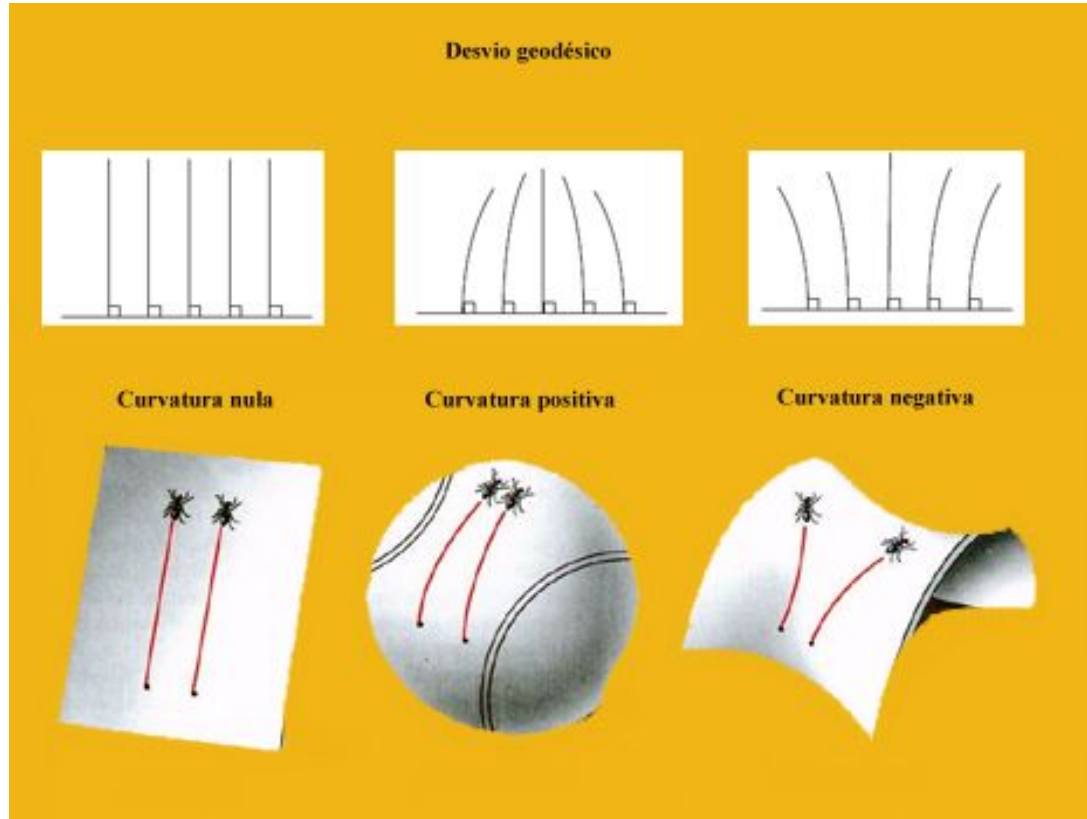
Η βαρύτητα δεν είναι δύναμη, είναι η στρέβλωση του χώρου και του χρόνου



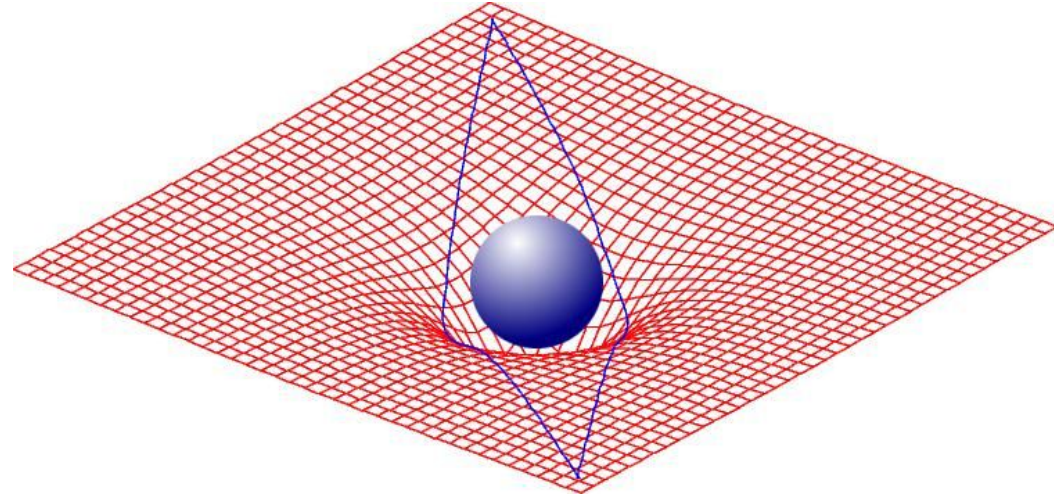
Δύναμη βαρύτητας = καμπυλότητα χωρόχρονου!

“Δύναμη”: σχετική επιτάχυνση

ΔΕΝ χρειάζεται να βγούμε
“έξω από την επιφάνεια” για
να δούμε την καμπυλότητα

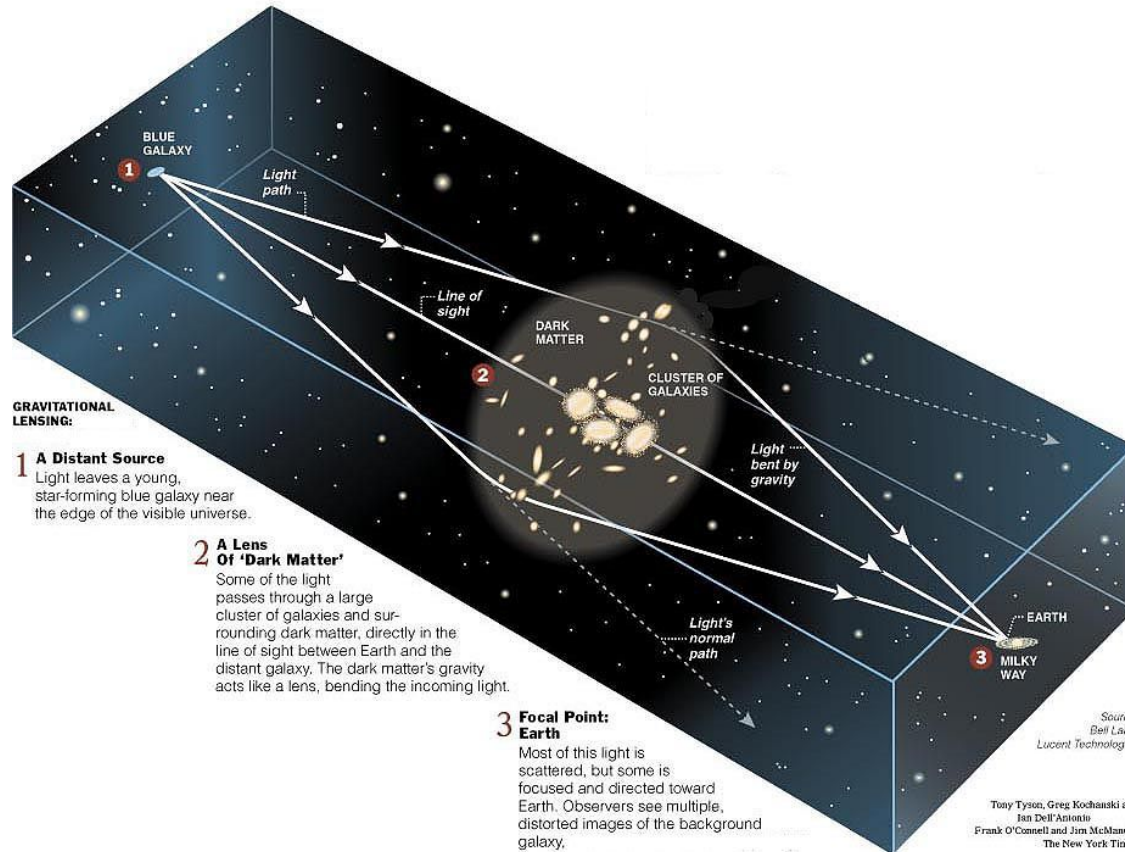


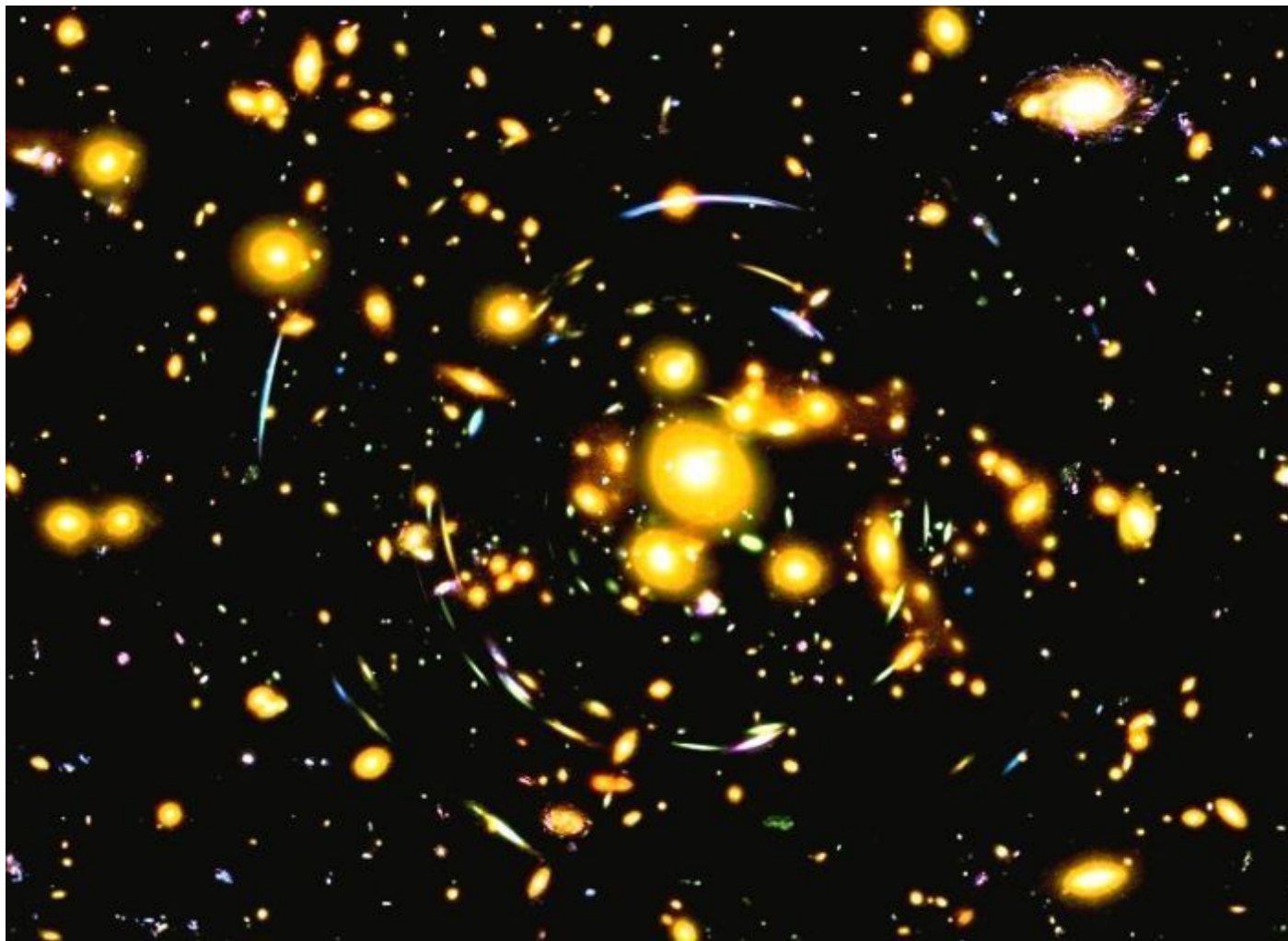
Καμπυλότητα \rightarrow Κίνηση Ύλης



- Ελεύθεροι Παρατηρητές = Ελεύθερη Πτώση
- Ελεύθερη Πτώση = Κίνηση Πάνω στις πιο “ισιες” καμπύλες
- Καμπυλότητα \Rightarrow Σχετική Επιτάχυνση \Rightarrow “Βαρύτητα”

Καμπύλωση Τροχιάς Φωτός





Καμπυλότητα στον Χρόνο

$$\Delta\tau \propto \sqrt{1 - \frac{r_S}{R_\Gamma + h}}$$

Κοντά στην επιφάνεια της γης: πιο αργά

Ψηλά από την επιφάνεια της γης: πιο γρήγορα

(στη γη γερνάμε ... πιο αργά από κάποιον στο διάστημα)



$$r_{S, \Gamma\eta_S} = 9 \text{ mm}$$

$$\frac{r_{S, \Gamma\eta_S}}{R_\Gamma} \approx 10^{-9}$$

Καμπυλότητα στον Χρόνο

GPS:

Αρχικά 24 δορυφόροι, τώρα 31

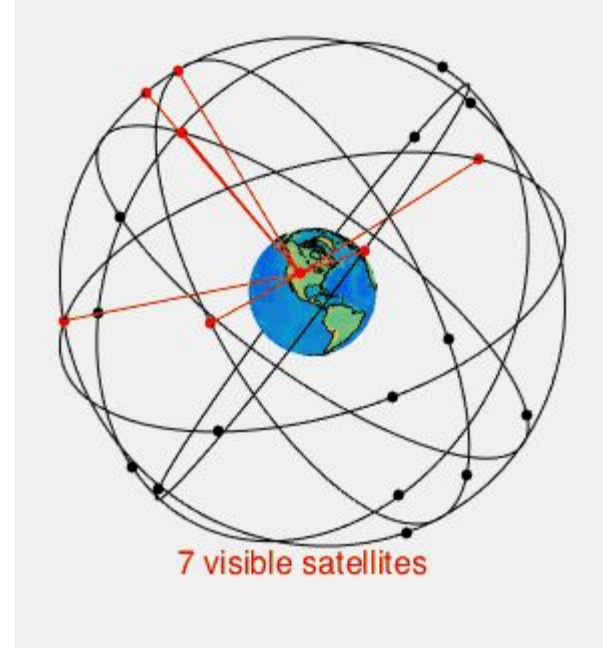
20.000 km ύψος, 14.000 km/hr ταχύτητα

Χρόνος απαιτείται με ακρίβεια 20-30ns

Χ-Γεωμετρία: 7.000ns/day πιο αργά από επιφάνεια γης

Βαρύτητα: 45.000ns/day πιο γρήγορα από επιφάνεια γης

Αν αγνοηθούν, προστίθεται σφάλμα 10km/day



$$r_{S, \Gamma_{\eta S}} = 9 \text{ mm}$$

$$\frac{r_{S, \Gamma_{\eta S}}}{R_{\Gamma}} \approx 10^{-9}$$

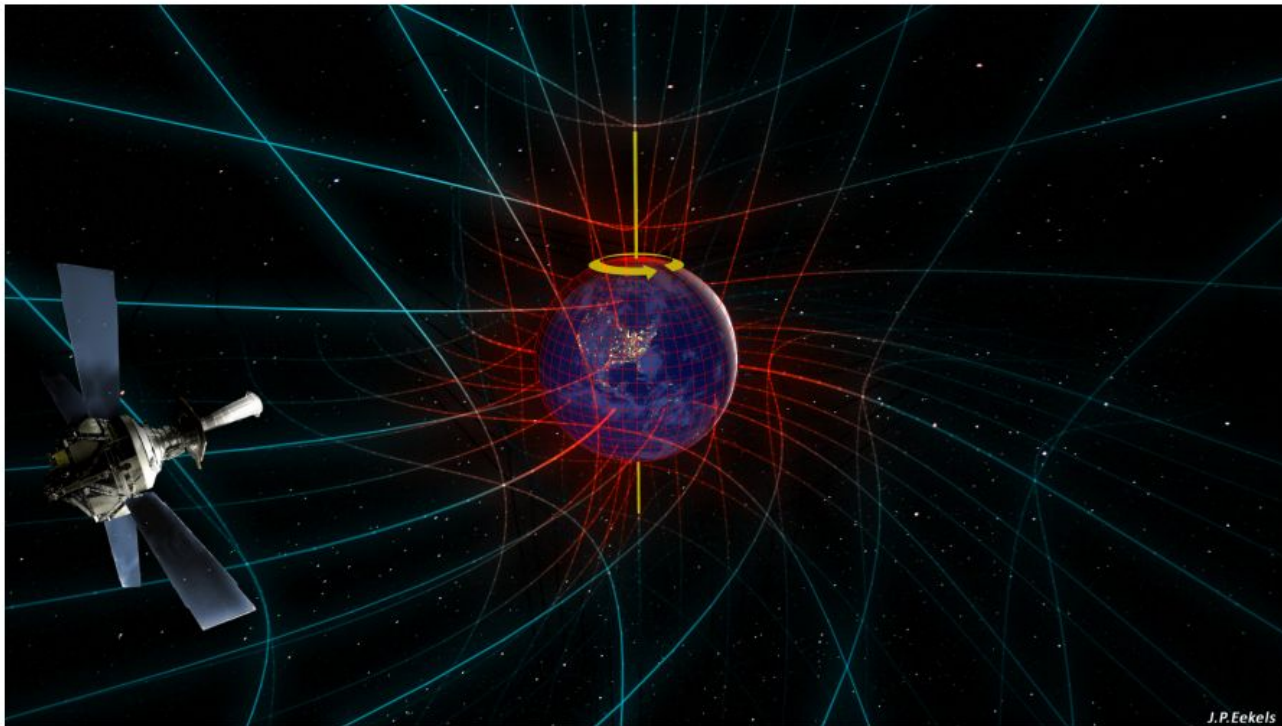


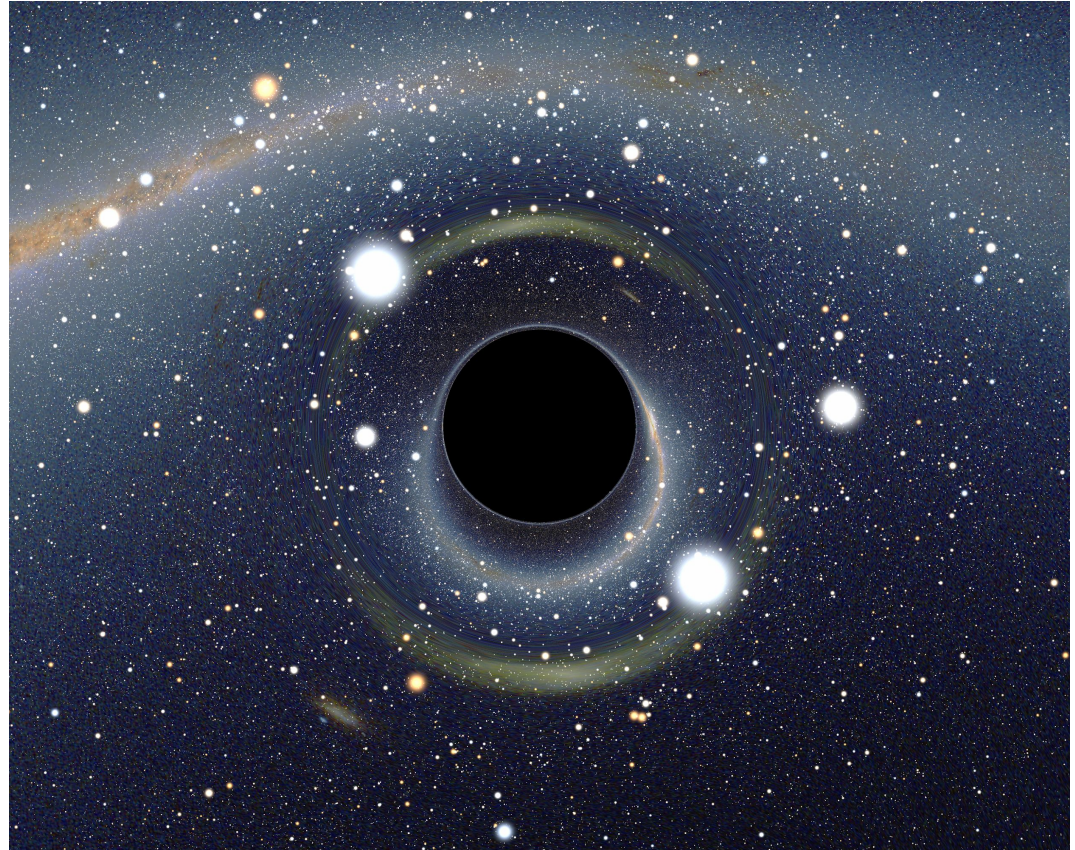
Figure 1. Attempt at a schematic illustration of the differences between spacetime in Newtonian (top) and Einstein gravity (bottom) in the field of a massive, rotating body. The warping of time (gravitational redshift) and space (geodetic effect) are represented respectively by the change in color and radial contraction of gridlines near the Earth, while the twisting of spacetime (frame-dragging effect) is represented by the spiral shape of these gridlines in the Earth's equatorial plane. Effects not shown to scale! [Figures courtesy J P Eekels, © 2015]

Μελανές οπές: η ύστατη στρέβλωση

$$r_S = \frac{2Gm}{c^2}$$

- Περιοχή του χώρου όπου ό,τι μπει δεν μπορεί να ξαναβγεί - ακόμα και το φως
- Δημιουργείται όταν όλη η ύλη μάζας m καταρρεύσει στην περιοχή με

$$r < r_S$$



Μελανές οπές

$$r_S = \frac{2Gm}{c^2}$$



$$r_{S, \Gamma\eta\varsigma} = 9\text{mm}$$

$$r_{S, \text{Ηλίου}} = 3\text{km}$$

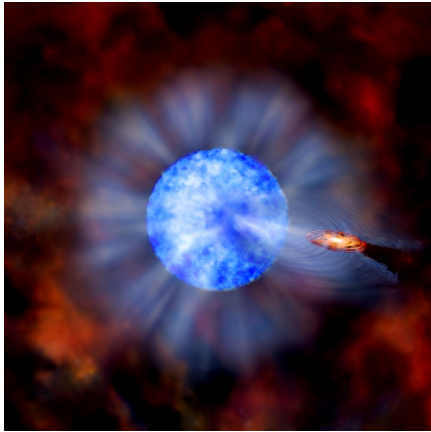
$$r_{S, \text{Γαλαξία}} = 0.2 \text{ light years}$$

Ισχυρή στρέβλωση χωρόχρονου

- Μπορεί κάποιος να μπει στη μαύρη τρύπα σε πεπερασμένο ιδιόχρονο
- Για αυτόν που τον κοιτάει περνάει άπειρος χρόνος μέχρι να φτάσει στον ορίζοντα
- Στο κέντρο της μαύρης τρύπας συγκεντρώνεται όλη η μάζα σε ένα σημείο: Ιδιάζον σημείο, το ΤΕΛΟΣ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ!
- Οποιοσδήποτε μπει στη μαύρη τρύπα έχει μαύρη μοίρα: καταλήγει στο ιδιάζον σημείο

Μαύρη τρύπα \longrightarrow Ο χρόνος έχει τέλος

Υπάρχουν μαύρες τρύπες; ΝΑΙ!



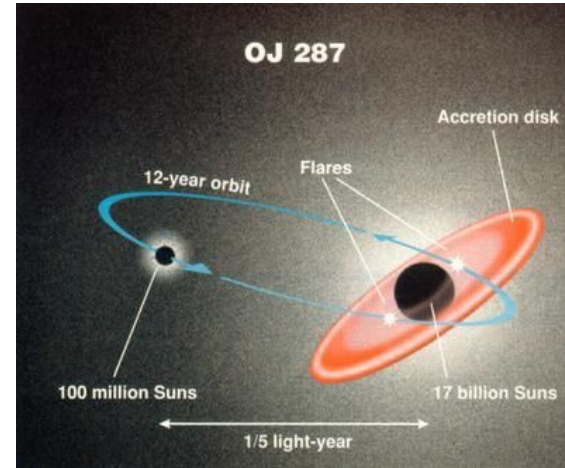
- Αστρικές μαύρες τρύπες: (5-80 Ηλ.Μ.)

M33-x-7 binary system

μάζα ~ 16 Ηλιακές Μάζες

μάζα συνοδού ~ 70 Ηλιακές Μάζες

Milky Way: Sagittarius A* ~ 4.3 εκ ηλιακές μάζες



- Μαύρες τρύπες “τέρατα” στα κέντρα γαλαξιών

Quasar OJ287

απόσταση ~ 3.5 δις έτη φωτός

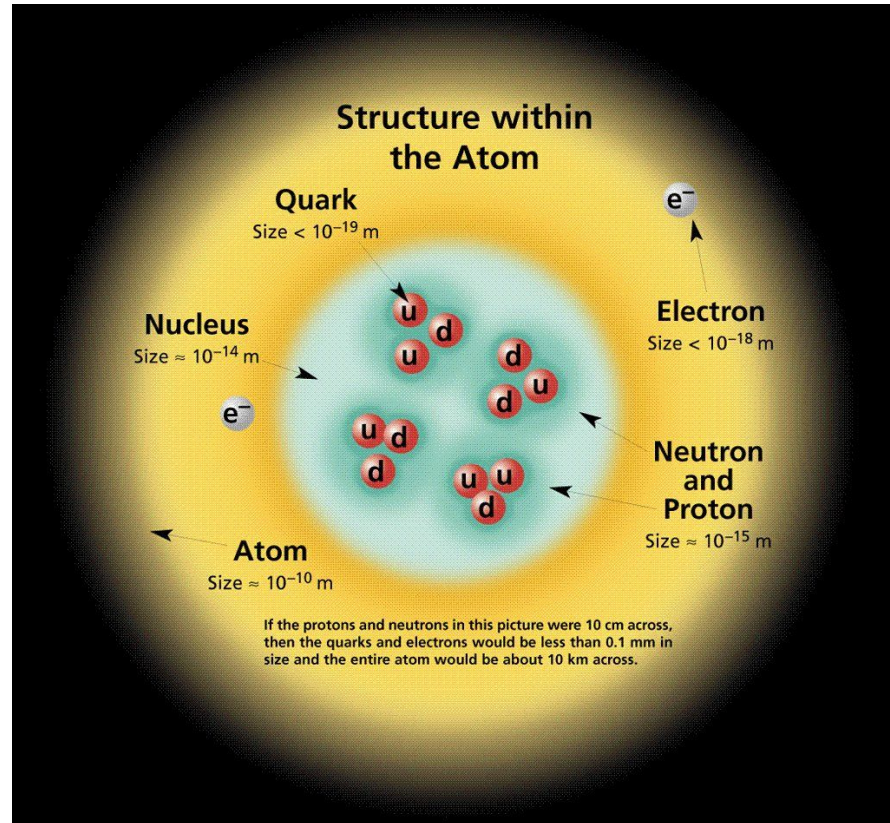
μάζα ~ 18 δις Ηλιακές Μάζες

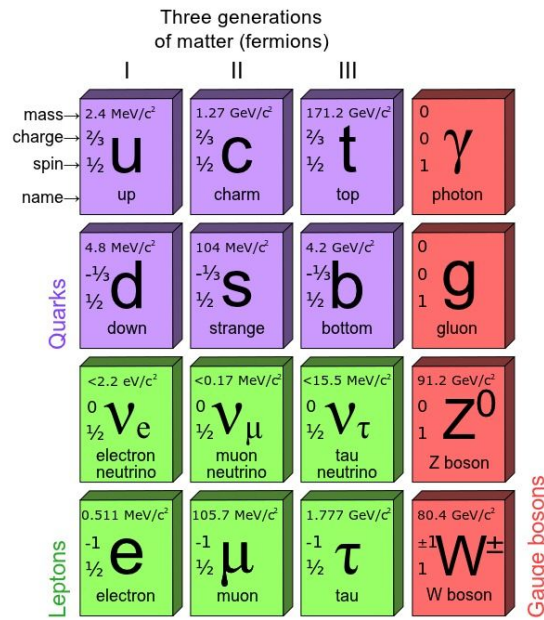
μάζα συνοδού ~ 100 εκ Ηλιακές Μάζες

TON618: 66 δις ηλιακές μάζες, 10.4 δις έτη φωτός

Από τι είναι φτιαγμένα τα αστέρια;

Μα από ότι και εμείς!





Και το σωματίο

Higgs!

PROPERTIES OF THE INTERACTIONS					
Property \ Interaction	Gravitational	Weak	Electromagnetic	Strong	
		(Electroweak)		Fundamental	Residual
Acts on:	Mass – Energy	Flavor	Electric Charge	Color Charge	See Residual Strong Interaction Note
Particles experiencing:	All	Quarks, Leptons	Electrically charged	Quarks, Gluons	Hadrons
Particles mediating:	Graviton (not yet observed)	W ⁺ W ⁻ Z ⁰	γ	Gluons	Mesons
Strength relative to electromag for two u quarks at:	10 ⁻⁴¹	0.8	1	25	Not applicable to quarks
for two protons in nucleus	10 ⁻⁴¹	10 ⁻⁴	1	60	
	10 ⁻³⁶	10 ⁻⁷	1	Not applicable to hadrons	20

Το ότι υπάρχουμε είναι θαύμα!

Ναι, είναι αλήθεια ότι ένα βιοφιλικό σύμπαν είναι κάτι ... σπάνιο!

- Ελάχιστες προϋποθέσεις:
 - Αρκετός χώρος και χρόνος (περισσότερος από 2+5 δις έτη)
 - Φώς/παροχή χρήσιμης ενέργειας
 - Αστέρια που να ζουν περισσότερο από μερικά δις έτη
 - Βαριά χημικά στοιχεία: άνθρακας, οξυγόνο, άζωτο, θείο, φώσφορος, , νερό!
 - Πολύπλοκη χημεία
- Και μόνο ο σχηματισμός αστεριών μεγάλης ζωής απαιτεί εξαιρετικά λεπτή ρύθμιση των νόμων της φύσης
- Όλες οι αλληλεπιδράσεις είναι αναγκαίες για ένα πολυποίκιλο και αρμονικό σύμπαν. Αφαιρούμε μία ή αλλάζουμε λίγο τις ιδιότητές της και έχουμε δραματικές αλλαγές

Λεπτές ρυθμίσεις

- Ενέργεια του κενού: Κοσμολογική σταθερά Λ
 - αν $\Lambda < 0$ και γίνει 10Λ , τότε έχουμε σύμπαν που έχει λίγη ζωή
 - αν $\Lambda > 0$ και γίνει 10Λ , τότε έχουμε καταστροφικό πληθωρισμό και δεν σχηματίζονται γαλαξίες

Ρύθμιση: 10 μέρη στα 10^{122}

Λεπτές Ρυθμίσεις Ασθενής Αλληλεπίδραση

- Υπερκαινοφανείς: (πηγή βαρέων στοιχείων)
 - ασθενέστερη 1% - ασθενής πίεση νετρίνων ΟΧΙ έκρηξη - ΟΧΙ β. στοιχεία
 - ισχυρότερη 1% - νετρίνα παραμένουν στον πυρήνα ΟΧΙ έκρηξη - ΟΧΙ β. στοιχεία

- Χρόνος ζωής νετρονίου: 611 δευτερόλεπτα
 - Καθορίζει τον λόγο αφθονίας H/He μετά τη μεγάλη έκρηξη ~ 3
 - ισχυρότερη - λιγότερο He - λιγότερος άνθρακας
 - ασθενέστερη - λιγότερο H - λιγότερα αστέρια μακράς ζωής, όχι νερό

Λεπτές Ρυθμίσεις: Ισχυρή αλληλεπίδραση

- Πυρηνικές αντιδράσεις στο κέντρο αστέρων παραγωγής C από Be είναι δυνατές μόνο εξαιτίας μία λεπτά ρυθμισμένης κατάστασης συντονισμού στον άνθρακα. Αν το σθένος διέφερε κατά 1%, η αντίδραση δεν θα γινόταν και δεν θα είχαμε βαρέα στοιχεία
- Αν το σθένος μειωθεί στο μισό, έχουμε ασταθείς πυρήνες, λ.χ. C, Fe
- Αν το σθένος μειωθεί 5% δεν έχουμε δευτέριο, άρα όχι αστέρια μεγάλης ζωής
- Αν το σθένος αυξηθεί 2% έχουμε εκρηκτική καύση του H και δεν έχουμε αστέρες μεγάλης ζωής

Λεπτές Ρυθμίσεις: Βαρύτητα

- Αν το σθένος αυξηθεί 10 φορές, ο Ήλιος θα ζούσε μόνο 10 εκατομμύρια έτη
- Κοσμική επιτάχυνση:
 - Παράμετρος επιβράδυνσης διαστολής σύμπαντος Q
 - Αν το Q δεκαπλασιαστεί: πυκνότεροι γαλαξίες δίνουν περισσότερες αστρικές συγκρούσεις: δεν σχηματίζονται πλανήτες
 - Αν το Q υποδεκαπλασιαστεί: πολύ γρήγορη διαστολή, δεν σχηματίζονται γαλαξίες και αστέρες
 - Αν το Q αρκετά μεγαλύτερο: το σύμπαν γίνεται μια γιγάντια μελανή οπή

Συμπεράσματα

- Απαιτούνται εξαιρετικά λεπτές ρυθμίσεις στις 29 παραμέτρους που καθορίζουν τις ιδιότητες του φυσικού νόμου και της κοσμολογίας προκειμένου να έχουμε ένα βιοφιλικό σύμπαν
- Γίνονται πολλές προσπάθειες να εξηγηθούν από ένα βαθύτερο, άγνωστο μηχανισμό (multiverse, string landscape, cosmological natural selection).
- Αυτές οι εξωτικές εικασίες, ακόμα και αν δώσουν εξήγηση για τις λεπτές ρυθμίσεις, θα αποκαλύψουν έναν θαυμαστό μηχανισμό ο οποίος θα τον επιβάλλει

The Unreasonable Effectiveness of Mathematics in the Natural Sciences

Eugene Wigner, 1960