

Το σύμπαν για... αρχάριους

Μια βασική εισαγωγή στη νέα κοσμολογία

Στέφανος Τραχανάς
Ίδρυμα Τεχνολογίας & Έρευνας
Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης

www.cup.gr

Π Ε Ρ Ι Ε Χ Ο Μ Ε Ν Α

I

Τα τρία βασικά παρατηρησιακά δεδομένα
της σύγχρονης κοσμολογίας

II

Η εξίσωση “Αϊνστάιν-Νεύτωνα”:
Η βασική κοσμολογική εξίσωση

III

... και οι συνέπειές της για τον κόσμο μας:
Πέντε εύκολες ασκήσεις.

I

Τα τρία βασικά παρατηρησιακά δεδομένα
της σύγχρονης κοσμολογίας

ΔΕΔΟΜΕΝΟ 1. Οι μακρυνοί γαλαξίες απομακρύνονται από εμάς με ταχύτητες ανάλογες της απόστασής τους. Δηλαδή

$$v = H R$$

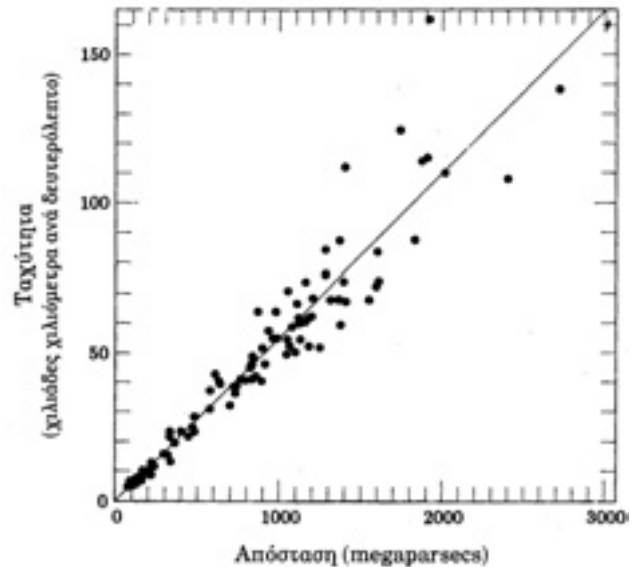
Νόμος του Hubble

Η σταθερά H του Hubble είναι η ίδια σ' όλο το σύμπαν (δηλαδή ανεξάρτητη του χώρου), αλλά μεταβάλλεται με τον χρόνο. Για τυχόν t θα είναι

$$H = \frac{v}{R} = \frac{\dot{R}}{R}$$

με σημερινή παρατηρούμενη τιμή την

$$H_0 = H(t_0) = \left. \frac{\dot{R}}{R} \right|_{t=t_0} = 71 \text{ km/s/Mpc}$$

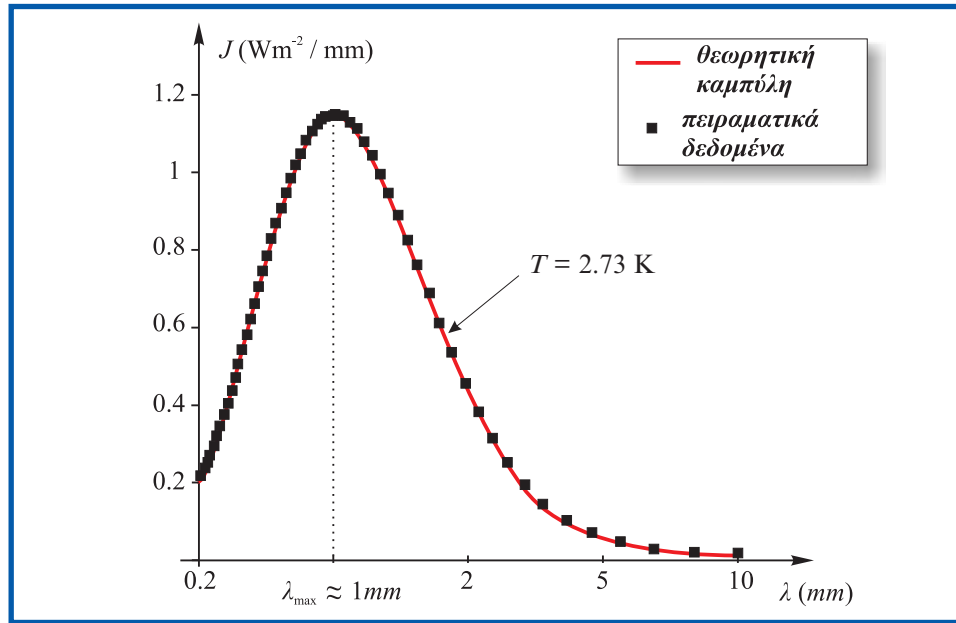


... και τα εξ αυτού συμπεράσματα:

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ 1: (προφανές) Το σύμπαν διαστέλλεται.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ 2: (ουσιώδες) H διαστολή του σύμπαντος είναι διαστολή το χώρου.

ΔΕΔΟΜΕΝΟ 2. Η κοσμική ακτινοβολία υποβάθρου είναι ακτινοβολία μέλανος σώματος με θερμοκρασία $T = 2,73 \text{ K}$.



... και το συμπέρασμα:

Δεν υπάρχει κανένας τρόπος να έχει δημιουργηθεί και να πληροί το σύμπαν μια ακτινοβολία μέλανος σώματος –δηλαδή μια θερμική ακτινοβολία– παρά μόνον εάν έχει εκπεμφθεί από την ίδια την ύλη του σύμπαντος σε μια υπέρθερμη αρχική κατάσταση και έχει έκτοτε ψυχθεί λόγω της κοσμικής διαστολής.

Η ακτινοβολία υποβάθρου είναι η αναμφίβολη απόδειξη –ο αδιάψευστος μάρτυρας– της Μεγάλης Έκρηξης.

A. (υπενθύμιση) ΟΙ ΔΥΟ ΒΑΣΙΚΟΙ ΝΟΜΟΙ ΤΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

1. Ο νόμος του Wien: Το μήκος κύματος μέγιστης εκπομπής μιας θερμικής ακτινοβολίας μετακινείται αντιστρόφως ανάλογα με την θερμοκρασία. Δηλαδή

$$\lambda_{\max} \text{ (cm)} = 0,3/T.$$

2. Ο νόμος των Stefan-Boltzman: Η πυκνότητα HM ενέργειας u –ή η πυκνότητα ισοδύναμης μάζας $\rho = u/c^2$ – σε έναν χώρο «γεμάτο» από θερμική ακτινοβολία αυξάνεται με την τέταρτη δύναμη της θερμοκρασίας. Δηλαδή

$$u \sim T^4, \quad \rho \sim T^4$$

και αριθμητικά, $\rho = 0,85 \times 10^{-32} T^4 \text{ (kg/m}^3\text{)}$

B. ΠΩΣ Η ΚΟΣΜΙΚΗ ΔΙΑΣΤΟΛΗ ΕΠΗΡΕΑΖΕΙ ΤΗΝ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΥΠΟΒΑΘΡΟΥ

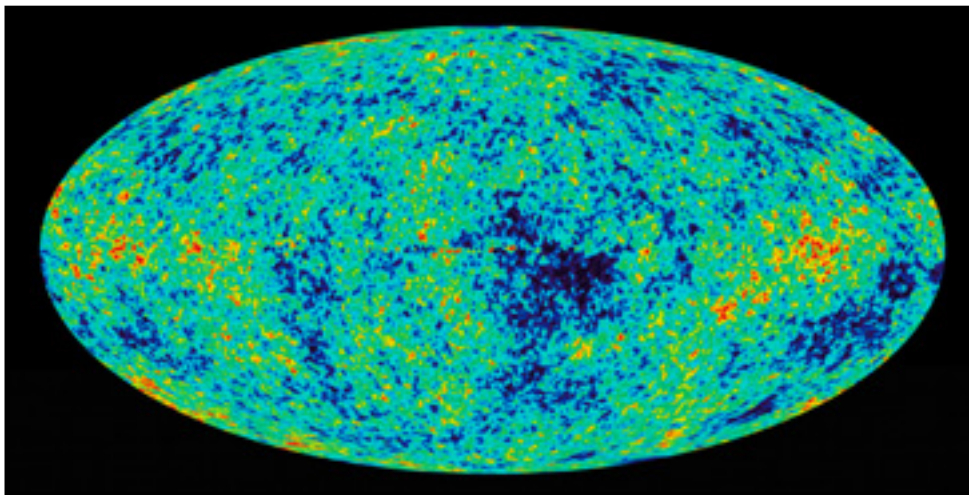
Ο Βασικός νόμος: Το μήκος κύματος των φωτονίων της ακτινοβολίας υποβάθρου ακολουθεί τη διαστολή του χώρου –μεγαλώνει μαζί με τον χώρο– αφού η απόσταση μεταξύ των κόμβων του υπόκειται σ' αυτή τη διαστολή. Θα είναι δηλαδή

$$\lambda \sim R \quad (\text{λόγω Wien}) \Rightarrow T \sim 1/R$$

ενώ για την πυκνότητα ισοδύναμης μάζας ρ θα είναι

$$\rho \sim T^4 \sim 1/R^4.$$

ΔΕΔΟΜΕΝΟ 3. Η κοσμική ακτινοβολία υποβάθρου δεν είναι ακριβώς η ίδια προς όλες τις κατευθύνσεις του ουρανού. Εμφανίζει θερμοκρασιακές διακυμάνσεις (ή ανισοτροπίες) της τάξης των 10^{-4} έως 10^{-5} βαθμών Κέλβιν και μέσο γωνιακό εύρος της τάξεως της μιας μοίρας.



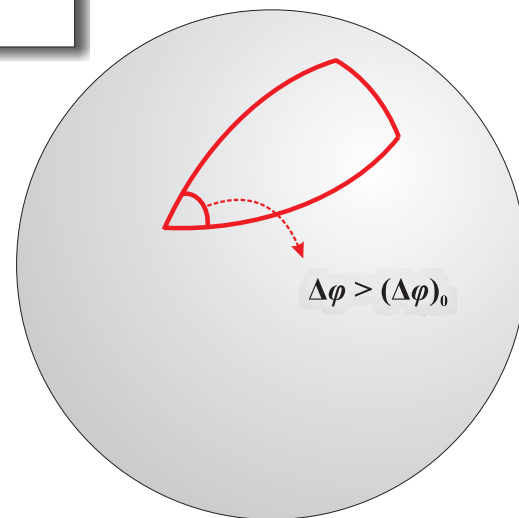
... και το εξ αυτού συμπέρασμα*

Τ ο σ ύ μ π α ν ε ί ν α ι ε π ί π ε δ ο

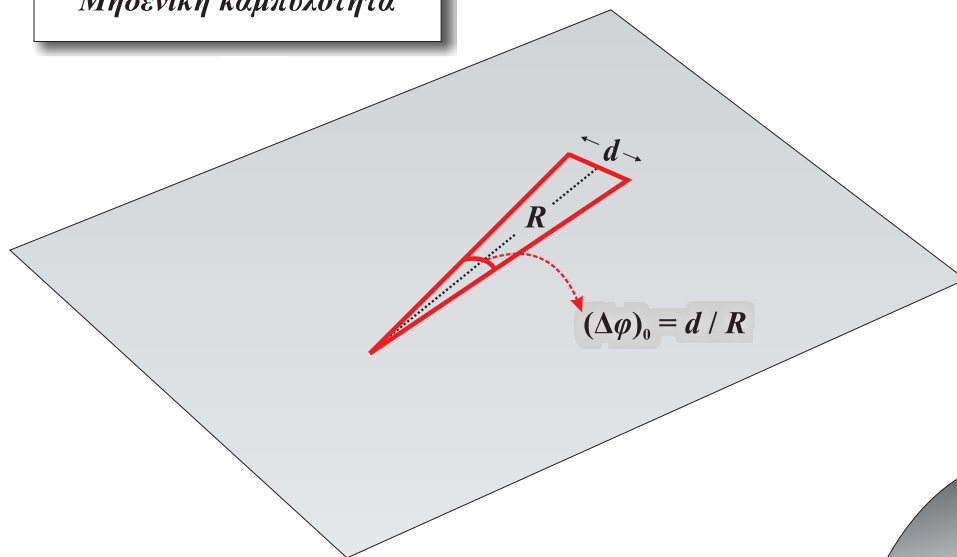
(Η γεωμετρία του τριδιάστατου χώρου είναι ευκλείδεια)

- (*) το οποίο προκύπτει γνωρίζοντας την απόσταση από εμάς αυτών των διακυμάνσεων –δημιουργήθηκαν ~380.000 χρόνια μετά τη Μεγάλη Έκρηξη– καθώς και το μέσο αντικειμενικό τους μέγεθος – όπως συνάγεται από πολύ αξιόπιστους θεωρητικούς υπολογισμούς. Και το παρατηρούμενο γωνιακό τους μέγεθος είναι αυτό ακριβώς που αναμένεται όταν η γεωμετρία του χώρου είναι ευκλείδεια. (Εικόνα)

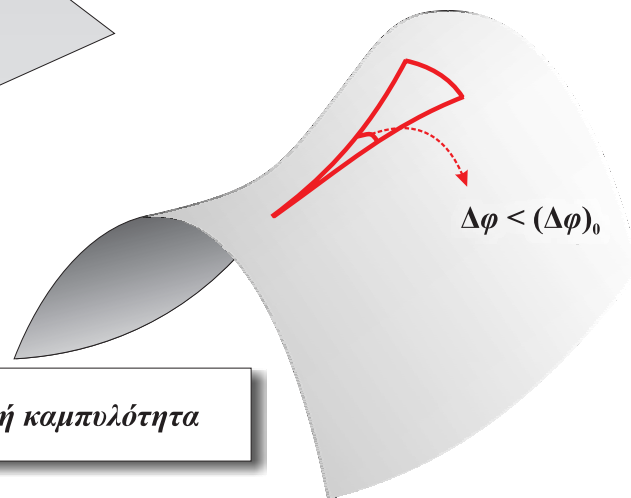
Θετική καμπυλότητα



Μηδενική καμπυλότητα



Αρνητική καμπυλότητα



II

Η εξίσωση “Αϊνστάιν-Νεύτωνα”:
Η βασική εξίσωση της κοσμικής διαστολής

Η εξίσωση

$$\frac{1}{2} \dot{R}^2 - \frac{GM}{R} = 0$$

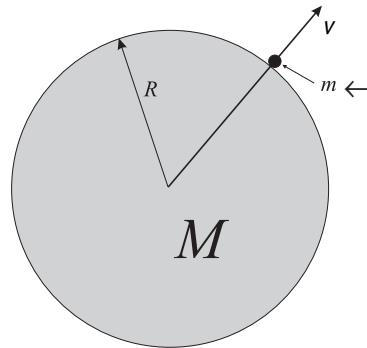
όπου:

$R = R(t)$: Μια τυχούσα απόσταση ανάμεσα σε δύο μακρινά αντικείμενα. Αφού ο κοσμικός χώρος διαστέλλεται ομοιόμορφα σε όλο το σύμπαν, δεν έχει σημασία ποια θα είναι αυτή η απόσταση.

$M = M(R)$: Η μάζα-ενέργεια που εγκλείεται μέσα στη σφαίρα ακτίνας R . (Για κοινή, μη σχετικιστική, ύλη είναι $M = \text{σταθερά}$, για φωτόνια υποβάθρου $M \sim 1/R$ –γιατί;– και για την περίφημη **σκοτεινή ύλη** θα δούμε σε λίγο ότι $M \sim R^3$).

«0» : Μια από τις τρεις δυνατές επιλογές (0, >0, και <0) που αντιστοιχούν σε επίπεδο σύμπαν, σε σύμπαν με αρνητική και σε σύμπαν με θετική καμπυλότητα αντίστοιχα.

... και ένας τρόπος να την «σκεπτόμαστε»
στο πλαίσιο της Νευτώνειας Μηχανικής



Σωματίδιο –π.χ. ένας γαλαξίας– που
«προσπαθεί» να διαφύγει από τη βα-
ρυτική έλξη μιας σφαιρικής μάζας M ,
ακτίνας R .

Από διατήρηση ενέργειας θα έχουμε

$$\frac{1}{2} m v^2 - GmM/R = E \quad (v=\dot{R}) \quad \Rightarrow \quad \frac{1}{2} \dot{R}^2 - GM/R = E/m = \epsilon = \begin{cases} >0: \text{απεριόριστη κίνηση} \\ \text{οριακή διαφυγή στο } \infty \\ <0: \text{Δέσμια κίνηση} \end{cases}$$

Συμπέρασμα: Η κοσμολογική εξίσωση του επίπεδου σύμπαντος αντιστοιχεί τυπικά στην περίπτωση **οριακής διαφυγής στο άπειρο**, υπό την επίδραση της βαρυτικής έλξης μιας μάζας M εγκλεισμένης σε μια σφαίρα ακτίνας R , όση και η θεωρούμενη κοσμική απόσταση.

Οι περιπτώσεις δέσμιας ή απεριορίστης κίνησης αντιστοιχούν σε σύμπαντα με θετική και αρνητική καμπυλότητα, αντίστοιχα.

... και μια ακόμη «μηχανική εικόνα» για την κοσμολογική εξίσωση Αϊνστάιν-Νεύτωνα $1/2 \dot{R}^2 - GM/R = 0$:

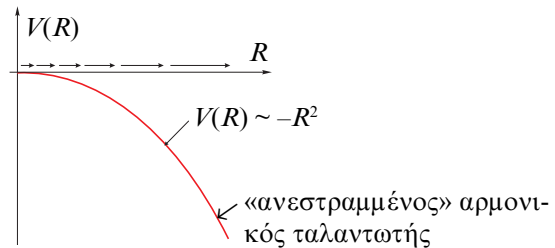
Δεν είναι παρά η εξίσωση κίνησης –σε «ενεργειακή» μορφή– ενός σωματιδίου μη-δενικής ενέργειας που κινείται στον άξονα των θετικών R υπό την επίδραση του δυναμικού

$$V(R) = - \frac{GM(R)}{R}$$

όπου το M –πέραν του να είναι σταθερό– μπορεί και να εξαρτάται από το R με διάφορους τρόπους, όπως υποδείξαμε πριν.

Παράδειγμα: (Σκοτεινή ενέργεια $\equiv$ ενέργεια του κενού χώρου – π.χ. λόγω κβαντικών διακυμάνσεων– με βασικό χαρακτηριστικό τη σταθερή πυκνότητα ανεξαρτήτως διαστολής του χώρου): Θα είναι τότε

$$V(R) = - \frac{G(4/3\pi R^3 \rho_\Lambda)}{R} = - \frac{4\pi G \rho_\Lambda}{3} R^2 \quad \Rightarrow$$



Συμπέρασμα: Η κοσμολογική εξίσωση οδηγεί στο άκρως **αντινευτώνειο συμπέρασμα** ότι μια μάζα με σταθερή πυκνότητα στον διαστελλόμενο χώρο ($\equiv$ σκοτεινή ενέργεια) προκαλεί άπωση –και άρα επιταχυνόμενη διαστολή– παρ' ότι εμφανίζεται στο νευτώνειο βαρυτικό δυναμικό ακριβώς όπως οι άλλες μάζες.

III

... και οι συνέπειές της για τον κόσμο μας:
Πέντε εύκολες ασκήσεις

Άσκηση 1: Υπολογισμός της πυκνότητας μάζας-ενέργειας του σύμπαντος

Με δεδομένη την παρούσα τιμή της σταθεράς του Hubble

$$H_0 = 71 \text{ km/s/Mpc} = 2,34 \times 10^{-18} \text{ s}^{-1} \quad (1)$$

και το γεγονός ότι το σύμπαν είναι επίπεδο – μια παραδοχή που θα θεωρείται στο εξής δεδομένη – υπολογίστε την πυκνότητα (ισοδύναμης) μάζας του σύμπαντος.

Λύση:

$$\frac{1}{2} \dot{R}^2 - \frac{GM}{R} = 0 \quad \left(M = \frac{4}{3}\pi R^3 \rho \right) \Rightarrow \frac{1}{2} \dot{R}^2 - \frac{4\pi G \rho}{3} R^2 = 0 \quad (2)$$

Αλλά $H = v/R = \dot{R}/R$ οπότε η (2) δίνει

$$\rho \equiv \rho_0 = \frac{3H_0^2}{8\pi G}$$

με αριθμητική τιμή – για H_0 όπως στην (1) και $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ mks}$ –

$$\rho_0 = 0,94 \times 10^{-26} \text{ Kg/m}^3$$

Δηλαδή (ως μνημονικό κανόνα)

$$\rho_0 \sim \text{μερικά πρωτόνια ανά } \text{m}^3 \text{ συμπαντικού χώρου}$$

ΣΧΟΛΙΟ: Δεδομένου ότι $\rho_\gamma(T) = 0,837 \times 10^{-32} T^4 \text{ (Kg/m}^3) \Rightarrow \rho_\gamma(\approx 3\text{K}) \approx 0,7 \times 10^{-30} \text{ Kg/m}^3$, η συμβολή της ακτινοβολίας υποβάθρου στο ρ_0 είναι σήμερα αμελητέα. Άρα, η μόνη εύλογη υπόθεση για τη σύσταση της ρ_0 είναι ότι αποτελείται από **υλικά σωματίδια** γνωστά ή άγνωστα.

Άσκηση 2: Χρονολόγηση της Μεγάλης Έκρηξης. Με την εύλογη –βάσει των προηγούμενων– παραδοχή ότι η σημερινή πυκνότητα μάζας-ενέργειας του σύμπαντος οφείλεται (πρακτικά κατά 100%) σε υλικά σωματίδια, υπολογίστε την ηλικία του σύμπαντος. Δηλαδή, πόσα χρόνια πριν έγινε η Μεγάλη Έκρηξη;

Λύση: Για υλικά σωματίδια –που κινούνται με μη σχετικιστικές ταχύτητες– η εγκλειόμενη, μέσα σε ένα διαστελλόμενο όγκο, μάζα M είναι σταθερή και επομένως θα είναι

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \dot{R}^2 - \overset{\text{σταθερά ανεξάρτητη του } R}{\frac{GM}{R}} &= 0 \Rightarrow \dot{R} = \frac{\sqrt{2GM}}{\sqrt{R}} = \frac{\alpha}{\sqrt{R}} \quad (\alpha = \sqrt{2GM}) \\ \Rightarrow \frac{dR}{dt} &= \frac{\alpha}{\sqrt{R}} \Rightarrow \int \sqrt{R} dR = \alpha \int dt \Rightarrow \frac{R^{3/2}}{3/2} = \alpha t \\ \Rightarrow \boxed{R(t) \sim t^{2/3}} &\Rightarrow \boxed{H(t) = \frac{\dot{R}}{R} = \frac{2}{3t}} \end{aligned}$$

οπότε, για $t = t_0$ –όπου $t_0 \equiv$ σήμερα– θα έχουμε

$$H_0 = \frac{2}{3t_0} \Rightarrow t_0 = \frac{2}{3} H_0^{-1} = \frac{2}{3} \tau_0$$

όπου $\tau_0 \equiv H_0^{-1} = 13,7$ δις χρόνια ($\equiv$ Χρόνος του Hubble)

$$\Rightarrow t_0 = (2/3)13,7 = \mathbf{9,1 \text{ δις χρόνια.}}$$

Το αποτέλεσμα είναι σίγουρα **λάθος** αφού υπάρχουν αστρικά σμήνη ηλικίας τουλάχιστον 11,5 δις χρόνων. Και βέβαια δεν μπορεί να υπάρχουν άστρα «γνηριότερα» από το ίδιο το σύμπαν!

- **Πού είναι το λάθος;** Προφανώς στην παραδοχή ότι όλο το ρ_0 αποτελείται από «ύλη» ($\equiv$ μη σχετικιστικά σωματίδια). Αυτό συνεπάγεται ότι η διαστολή του σύμπαντος συνεχώς επιβραδύνεται και επομένως η ηλικία του, t_0 , θα είναι σίγουρα μικρότερη από τον χρόνο Hubble

$$\tau_0 = H_0^{-1} = \frac{R_0}{V_0} \leftarrow \text{τωρινή ταχύτητα διαστολής}$$

ο οποίος «μετράει» τον χρόνο «αναστροφής της διαστολής» με βάση την σημερινή παρατηρούμενη ταχύτητα απομάκρυνσης των γαλαξιών v_0 . Η οποία –λόγω της επιβράδυνσης– είναι **μικρότερη της μέσης ταχύτητας**, και επομένως δίνει ηλικία μεγαλύτερη απ' ό,τι θά 'πρεπε αν όντως υπήρχε μόνον επιβράδυνση σ' όλη την ιστορία του σύμπαντος.

- **... και το αναγκαίο συμπέρασμα:** Η διαστολή του σύμπαντος θα πρέπει να περιλαμβάνει και μια **επιταχυνόμενη φάση**, και ο καλύτερος υποψήφιος για να την προκαλέσει είναι η **ενέργεια του κενού χώρου** (η λεγόμενη *σκοτεινή ενέργεια*).
- **Πράγματι.** Σύμφωνα με τα τελευταία δεδομένα, το σημερινό σύμπαν συνίσταται κατά 27% από **ύλη** (ορατή και «αόρατη») και κατά το υπόλοιπο 73% από σκοτεινή ενέργεια. Η δε ηλικία του είναι **13,7 δις χρόνια** ($\pm 0,2$) = H_0^{-1} .

Άσκηση 3: Χρονολόγηση του «μεγάλου διαζυγίου»: Πότε σχηματίστηκαν ουδέτερα άτομα και «χώρισε» η ύλη από το φως;

Υπολογίστε σε ποια ηλικία του σύμπαντος έγινε δυνατός ο σχηματισμός ουδέτερων ατόμων, κάνοντας την εύλογη παραδοχή –που δεν είναι δύσκολο να δικαιολογηθεί– ότι η ενέργεια των φωτονίων στο $\lambda_{\max}$ θα πρέπει να είναι περίπου δέκα φορές μικρότερη από το έργο ιοντισμού του υδρογόνου, ώστε να ληφθεί πρόνοια και για την «υπεριώδη ουρά» της σχετικής κατανομής ($\lambda < \lambda_{\max}$), όπου τα φωτόνια είναι πολύ ενεργητικότερα. Θεωρήστε επίσης γνωστή την παραδεκτή σήμερα τιμή της ηλικίας του σύμπαντος που είναι 13,7 δις χρόνια.

Λύση: Αν «1»=σήμερα και «2»= τότε, θα είναι διαδοχικά

$$R(t) \sim t^{2/3} \Rightarrow R_1/R_2 = (t_1/t_2)^{2/3}$$
$$\Rightarrow t_2 = \frac{t_1}{(R_1/R_2)^{3/2}} \quad \text{αφού } \lambda \sim R \Rightarrow t_2 = \frac{t_1}{(\lambda_1/\lambda_2)^{3/2}}$$

Εδώ: $t_1 = 13,7$ δις χρόνια, λ_1 (cm) = $0,3/(T \approx 3\text{K}) = 0,1$ cm και λ_2 το μήκος κύματος φωτονίων ενέργειας γύρω στις 10 φορές μικρότερη από το έργο ιοντισμού (13,6 eV) του υδρογόνου. Δηλαδή, $\epsilon_{\text{φωτονίων}} \approx 1-1,5$ eV. Θα είναι λοιπόν

$$\epsilon = hf = hc/\lambda \Rightarrow \lambda(\text{\AA}) \approx 12000/E \text{ (eV)} \Rightarrow \lambda_2 \Big|_{\text{για } \epsilon = 1,2 \text{ eV}} = 12000/1,2 = 10^4 \text{\AA}$$

$$\Rightarrow \lambda_2 = 10^{-4} \text{ cm} = 10^{-3} \lambda_1$$

$$\Rightarrow t_2 = \frac{13,7 \times 10^9 \text{ χρόνια}}{(10^3)^{3/2}} \approx \mathbf{400.000 \text{ χρόνια}}$$

ΣΧΟΛΙΑ

- Όταν έγινε ο χωρισμός, το σύμπαν ήταν **χίλιες φορές μικρότερο** απ' ό,τι σήμερα, και είχε θερμοκρασία χίλιες φορές μεγαλύτερη, δηλαδή ~ 3000 K.
- Στη συνολική ζωή του σύμπαντος –που εκτιμάται σήμερα στα 13,7 δις χρόνια– η εποχή της **φωτοκρατίας** ($t < 380.000$ χρόνια) είναι πρακτικά αμελητέα. Αντιστοιχεί στα τρία περίπου πρώτα δευτερόλεπτα ενός 24ώρου!

Άσκηση 4: Χρονολόγηση της πρώτης πυρηνοσύνθεσης

Με δεδομένο ότι οι ενέργειες σύνδεσης των πυρήνων είναι της τάξης των μερικών MeV και ότι –όπως πριν– τα φωτόνια υποβάθρου στο $\lambda_{\max}$ πρέπει να έχουν γύρω στις δέκα φορές μικρότερη ενέργεια (δηλαδή εδώ $\epsilon \sim 100.000 \text{ eV}$) ώστε να μην τους διασπούν εκ νέου, υπολογίστε πότε έγινε για πρώτη φορά δυνατός ο σχηματισμός πυρήνων στο σύμπαν.

Λύση: (χωρίς λόγια)

$$\frac{1}{2} \dot{R}^2 - \frac{GM}{R} = 0 \quad \Rightarrow \quad \dot{R}^2 \approx \frac{1}{R^2} \Rightarrow \dot{R} = \frac{1}{R} \Rightarrow \int R dR = \int dt$$

$$\Rightarrow \boxed{R(t) \sim t^{1/2}}$$

$$\Rightarrow \frac{R_1}{R_2} = \left(\frac{t_1}{t_2} \right)^{1/2} \Rightarrow \boxed{t_2 = \frac{t_1}{(R_1/R_2)^2}}$$

Με «1»=χρόνος διαζυγίου, «2»=χρόνος πυρηνοσύνθεσης, θα είναι

$$t_2 = t_1 / (R_1/R_2)^2 = t_1 / (\lambda_1/\lambda_2)^2 = t_1 / (\epsilon_2/\epsilon_1)^2,$$

και δεδομένου ότι $\epsilon_2 \sim 100.000 \text{ eV}$ και $\epsilon_1 \sim 1 \text{ eV}$ θα είναι

$$\Rightarrow t_2 = \frac{400.000 \times (3 \times 10^7 \text{ s})}{(10^5)^2} \approx 1000 \text{ s}$$

Η πρώτη πυρηνοσύνθεση έγινε στα λίγα πρώτα λεπτά της ηλικίας του σύμπαντος.

Άσκηση 5: Χρονολογώντας το ...μέλλον.

Θεωρώντας ότι από εδώ και πέρα το σύμπαν θα κυριαρχείται από τη σκοτεινή ενέργεια ($\Omega_\Lambda = 0,73$ σήμερα), βρείτε τον νόμο της κοσμικής διαστολής $R = R(t)$ και υπολογίστε πότε θα «διπλασιαστεί» το σύμπαν.

Λύση:

$$\frac{1}{2} \dot{R}^2 - \frac{G}{R} \left(\frac{4}{3} \pi R^3 \rho_\Lambda \right) = 0 \Rightarrow \dot{R}^2 = H_0^2 \Omega_\Lambda \cdot R^2$$

$$\Rightarrow \dot{R} = H_0 \sqrt{\Omega_\Lambda} R \Rightarrow R(t) = R_0 e^{H_0 \sqrt{\Omega_\Lambda} t}$$

ή

$$R(t) = R_0 e^{t/\tau_\Lambda} \quad (t = 0 \equiv \text{σήμερα})$$

όπου

$$\tau_\Lambda = \frac{\tau_0}{\sqrt{\Omega_\Lambda}} = \frac{H_0^{-1}}{\sqrt{\Omega_\Lambda}} = 16,1 \text{ δις χρόνια}$$

$$\Rightarrow \text{Χρόνος διπλασιασμού : } t_* = \ln 2 \cdot \tau_\Lambda = \mathbf{11,6 \text{ δις χρόνια}}$$

και μερικά έτοιμα αποτελέσματα

- Η εξίσωση της κοσμικής διαστολής

$$\dot{a}^2 = H_0^2 \left(\frac{\Omega_m}{a} + \Omega_\Lambda a^2 \right)$$

όπου $a(t) = R(t)/R_0$ ο **παράγοντας κλίμακας**.

- ... και η λύση της

$$a(t) = \sqrt[3]{\frac{\Omega_m}{\Omega_\Lambda}} \sinh^{2/3} \left(\frac{3\sqrt{\Omega_\Lambda} H_0 t}{2} \right) \quad \text{ή} \quad t = \frac{2}{3\sqrt{\Omega_\Lambda} H_0} \operatorname{arcsinh} \left(\sqrt{\frac{\Omega_\Lambda}{\Omega_m}} a^{3/2} \right)$$

Συνέπειες των παραπάνω

- Ηλικία του σύμπαντος

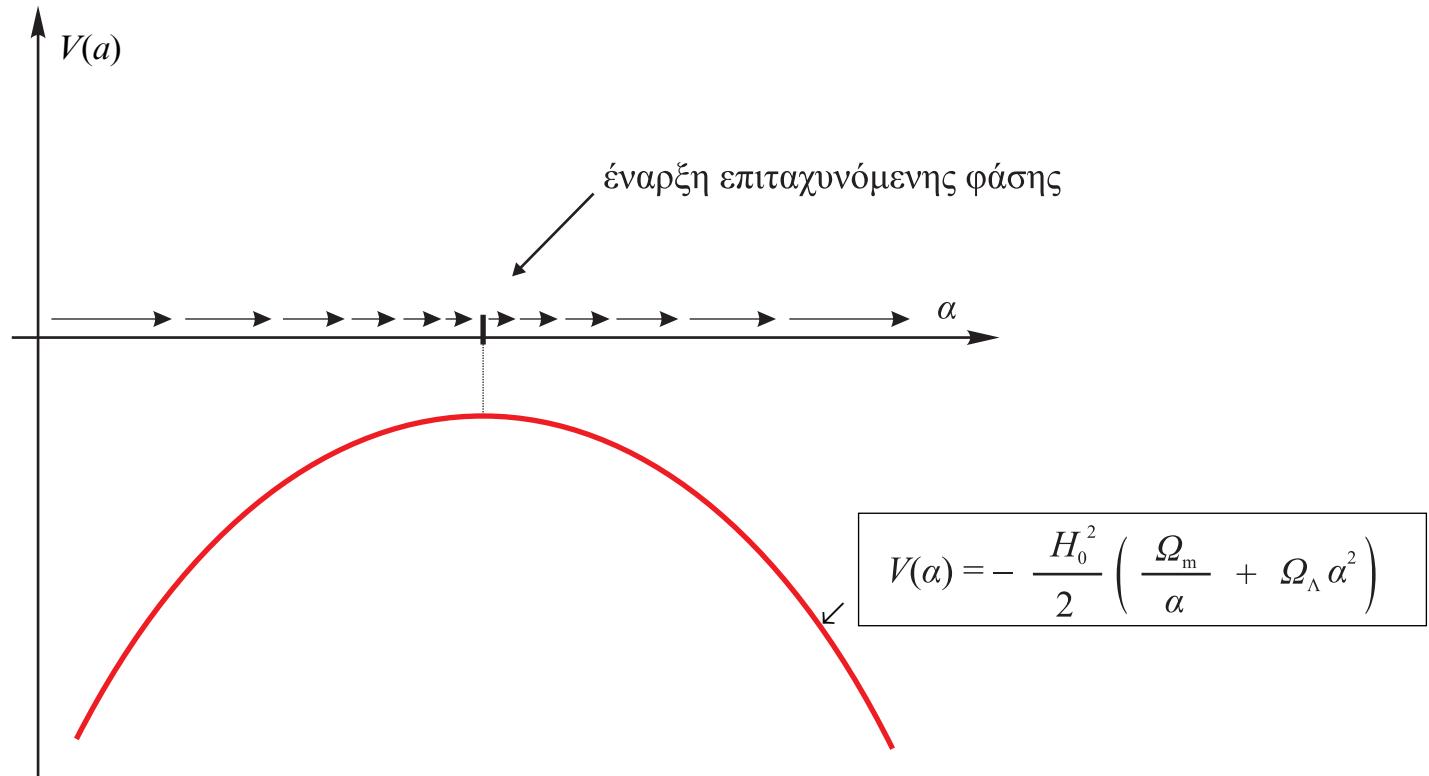
$$t_0 = \frac{2\tau_0}{3\sqrt{\Omega_\Lambda}} \operatorname{arcsinh} \left(\sqrt{\frac{\Omega_\Lambda}{\Omega_m}} \right) \quad (\tau_0 = H_0^{-1}) \Rightarrow t_0 = 0,99 \tau_0 \approx \tau_0 = 13,7 \text{ δις χρόνια.}$$

- Έναρξη επιταχυνόμενης φάσης

$$t^* = \frac{2\tau_0}{3\sqrt{\Omega_\Lambda}} \operatorname{arcsinh} (1/\sqrt{2}) \approx \mathbf{7 \text{ δις χρόνια}}$$

$\Rightarrow$ **Η επιτάχυνση πρέπει να άρχισε $\approx 6,7$ δις χρόνια πριν.**

και ένα μηχανικό ανάλογο που τα συνοψίζει όλα



Με εξαίρεση την εποχή της φωτοκρατίας (αμελητέας διάρκειας έτσι κι αλλιώς), **το σύμπαν «κινείται» σαν ένα νευτώνειο σωματίδιο μηδενικής ενέργειας υπό την επίδραση του δυναμικού $V(a) = -H_0^2/2 (\Omega_\Lambda/a + \Omega_\Lambda a^2)$.**

Είναι όμως ο κόσμος πράγματι τόσο απλός; Ή μήπως η πολυπλοκότητα κρύβεται πίσω από τις δύο «αθώες» παραμέτρους Ω_m και Ω_Λ ;

ΤΑ ΜΕΓΑΛΑ ΑΝΟΙΚΤΑ ΕΡΩΤΗΜΑΤΑ

Ερώτημα 1: *Τί είδους σωματίδια αποτελούν τη σκοτεινή ύλη που είναι η κύρια συνιστώσα της ύλης του σύμπαντος;*

(Υπενθυμίζουμε ότι το 27%, που είναι η συμμετοχή της ύλης στο σημερινό σύμπαν, επιμερίζεται σ' ένα 4% κοινής **Βαρυτικής ύλης** –κυρίως πρωτόνια– και σ' ένα 23% **σκοτεινής ύλης** που δεν έχει ηλεκτρομαγνητικές αλληλεπιδράσεις, γι' αυτό και ανιχνεύεται μόνο μέσω της βαρυτικής δράσης της.)

Ερώτημα 2: (και σημαντικότερο) *Τί είναι τελικά η σκοτεινή ενέργεια, δηλαδή η ενέργεια του κενού χώρου;* Οφείλεται στις **κβαντικές διακυμάνσεις** των θεμελιωδών πεδίων, στην περίφημη **κοσμολογική σταθερά Λ** του Αϊνστάιν ή στην **ενέργεια κενού κάποιου βαθμωτού πεδίου** που διαπερνά το σύμπαν; Και γιατί να έχει την τιμή που παρατηρούμε $-\rho_\Lambda = 0,68 \times 10^{-26} \text{ kg/m}^3$ – και όχι κάποια άλλη; Μήπως πρόκειται για μια νέα παγκόσμια σταθερά, με ό,τι αυτό μπορεί να συνεπάγεται;

Κανείς δεν ξέρει...

Ένα όμως είναι σίγουρο:

ότι στην κοσμολογία βρίσκεται ήδη σε πλήρη εξέλιξη μια επιστημονική επανάσταση, πιθανότατα όχι μικρότερης σημασίας από τις μεγάλες επιστημονικές επαναστάσεις που σημάδεψαν την ανθρωπινή ιστορία στο παρελθόν. Τώρα το παρελθόν είναι ...εδώ! Ως «απειλή» και ως υπόσχεση. Ως υπόσχεση μιας πνευματικής περιπέτειας που μπορεί να προσφέρει σπάνια χαρά σε όσους θα είναι σε θέση να την παρακολουθήσουν και –πολύ περισσότερο– σε όσους θα συμμετάσχουν σ' αυτήν: Την *τυχερή νέα γενιά*. Αλλά και ως απειλή να αποδειχθούμε κατώτεροι των περιστάσεων. Ένας πολιτισμός που έχει πια ξεχάσει να αναμετριέται με το πραγματικά μεγάλο και υψηλό. Έτσι όμως είναι πάντα με τα μεγάλα γεγονότα. Δεν έχουν αυτά ανάγκη από εμάς· εμείς έχουμε ανάγκη από εκείνα. Για να σηκωθούμε λίγο ψηλότερα.

