

# Μαύρες Τρύπες και Βαρυτικά Κύματα:

## Το νέο παράθυρο στο Σύμπαν!

Εμμανουήλ Ν. Σαριδάκης

Τμήμα Φυσικής, ΣΕΜΦΕ, ΕΜΠ  
Physics Department, Baylor University, Texas, USA  
Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών





# Νέο παράθυρο

---

- Η ανίχνευση βαρυτικών κυμάτων ανοίγει μια **νέα εποχή** στην μελέτη του **Σύμπαντος**
- Η **αστροφυσική** και η **κοσμολογία** έχουν κάνει **ραγδαία πρόοδο** τις τελευταίες δεκαετίες



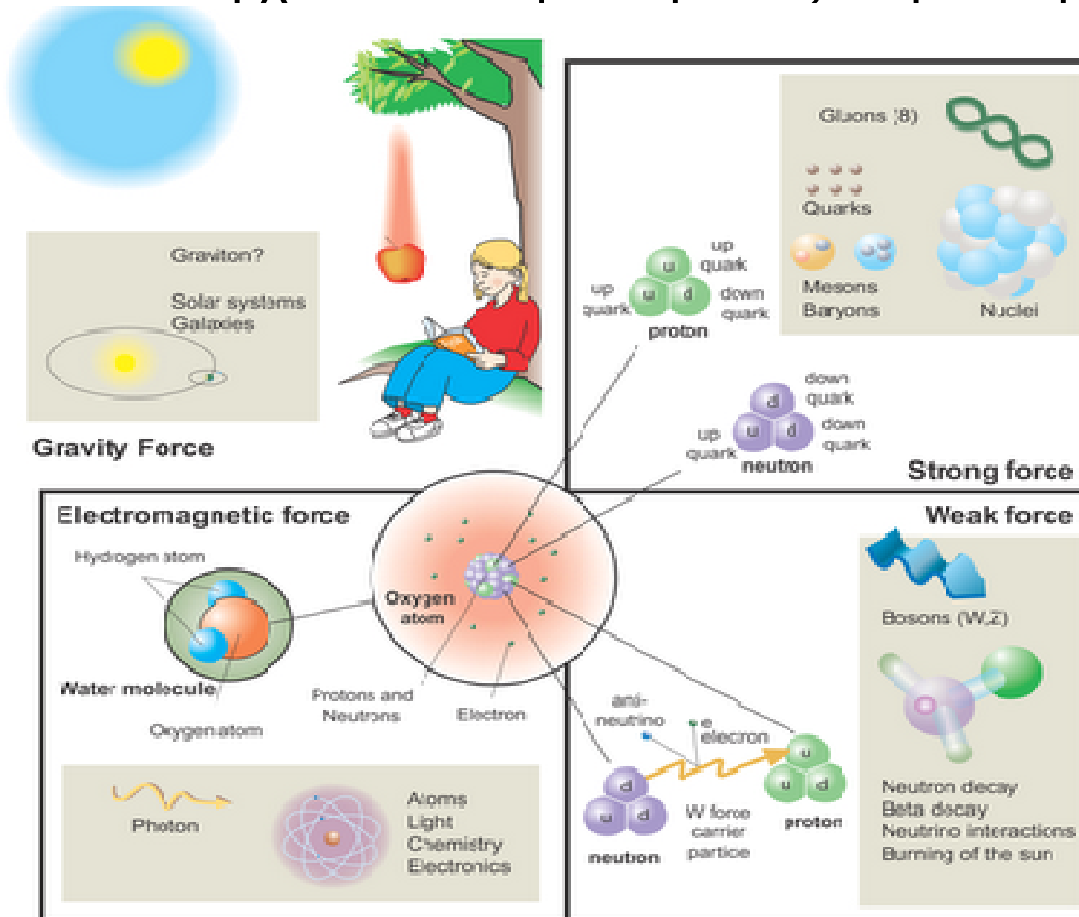
# Βαρύτητα

---

- Η Βαρύτητα είναι η περισσότερο ενδιαφέρουσα αλληλεπίδραση στη Φύση, και αυτή για την οποία ξέρουμε τα λιγότερα
- Η Βαρύτητα καθορίζει την εξέλιξη του Σύμπαντος: Κοσμολογία

# Αλληλεπιδράσεις στη Φύση

- Υπάρχουν 4 αλληλεπιδράσεις στη Φύση:



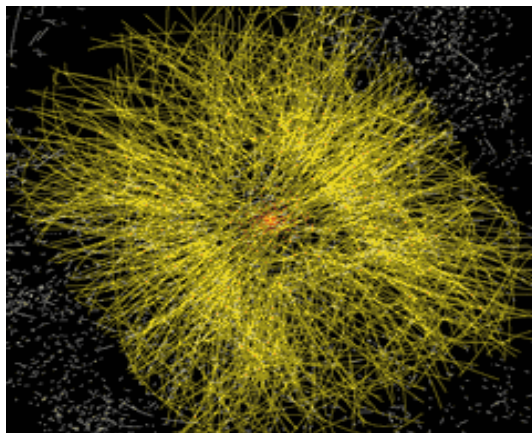
- Ξέρουμε πολύ καλά 3 από αυτές:

Ηλεκτρομαγνητικές  
 Ισχυρές Πυρηνικές  
 Ασθενείς Πυρηνικές

- Η Βαρύτητα** ακόμα λείπει!

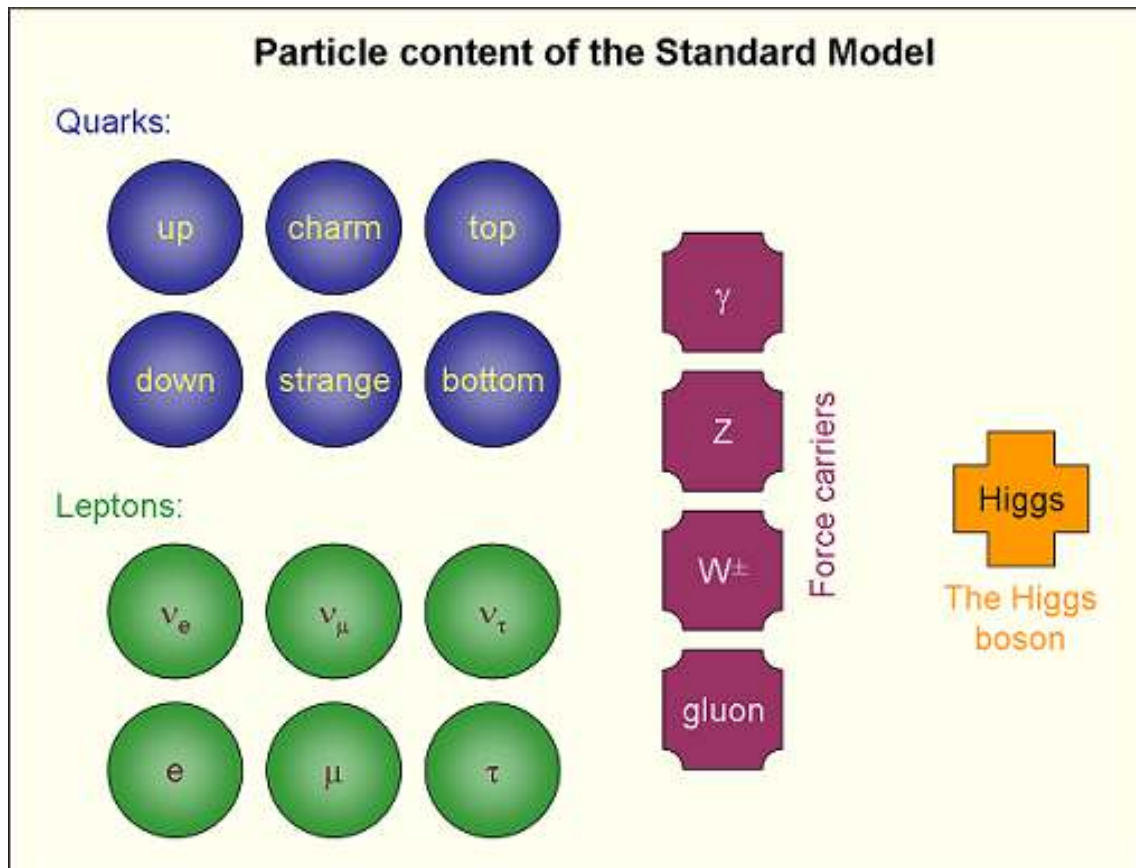
# Επιταχυντές: CERN

- Μελετούμε τις αλληλεπιδράσεις στους **επιταχυντές**: το **CERN** είναι ο μεγαλύτερος επιταχυντής του κόσμου



# Περιεχόμενο του Σύμπαντος: Καθιερωμένο Πρότυπο Σωματίων

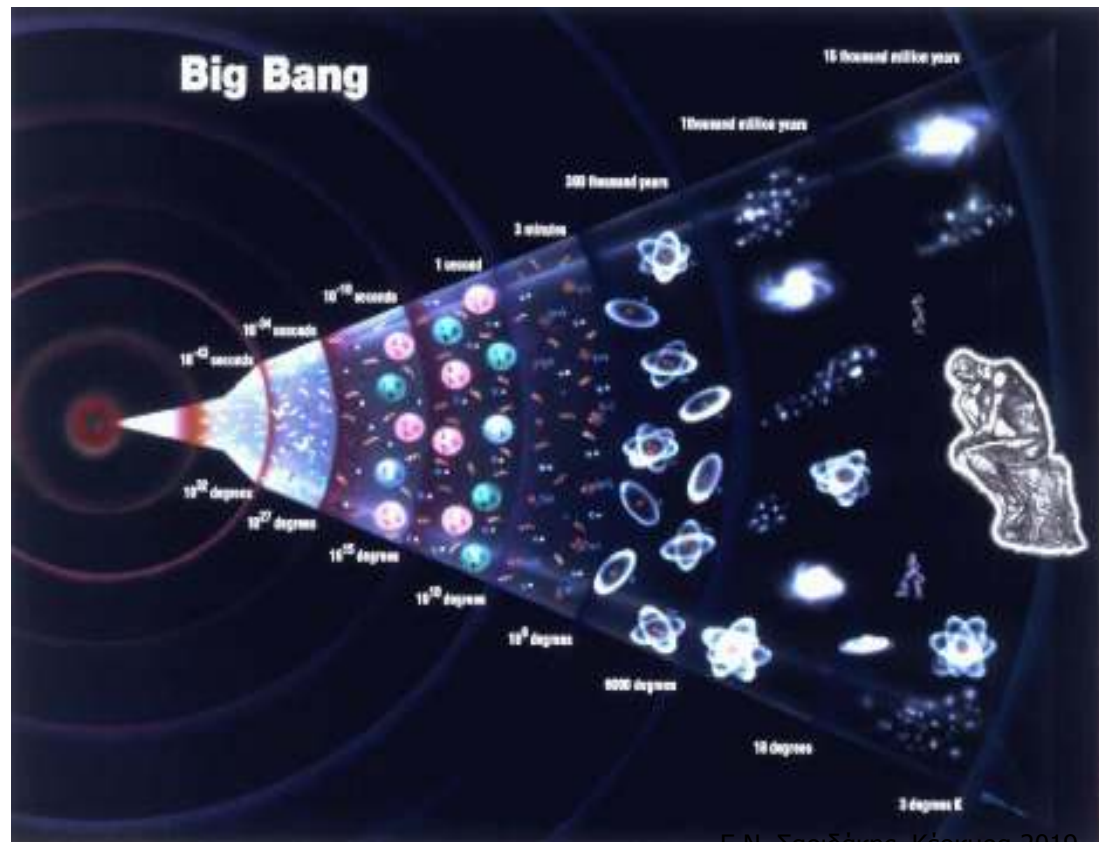
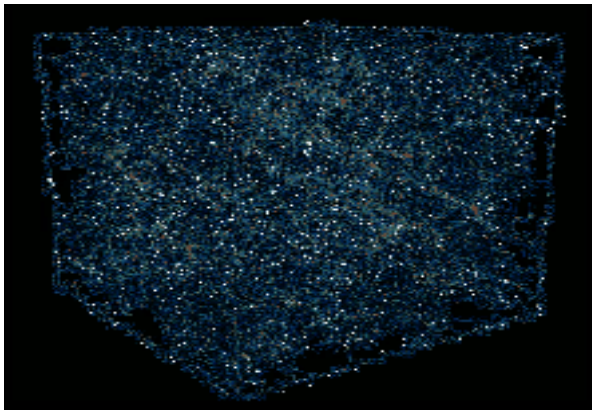
- **Βαρυονική Ύλη.** Τα πάντα που «βλέπουμε»:

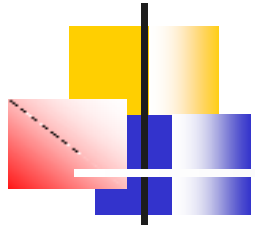


Από αυτήν αποτελούνται  
οι **γαλαξίες, τα άστρα, οι  
πλανήτες, εσείς, κλπ**

# Κοσμολογία: Το εργαστήριο της Βαρύτητας

- Η Βαρύτητα δεν μπορεί να μελετηθεί στους επιταχυντές. Επομένως πρέπει να την παρατηρήσουμε στο Σύμπαν: Κοσμολογία





# Αριστοτέλης - 350 πΧ

- Κατά τον **Αριστοτέλη** τα **βαρύτερα σώματα** πέφτουν **γρηγορότερα**.
- Τα σώματα **πέφτουν** για να γυρίσουν στην «**αρχική τους κατάσταση**».



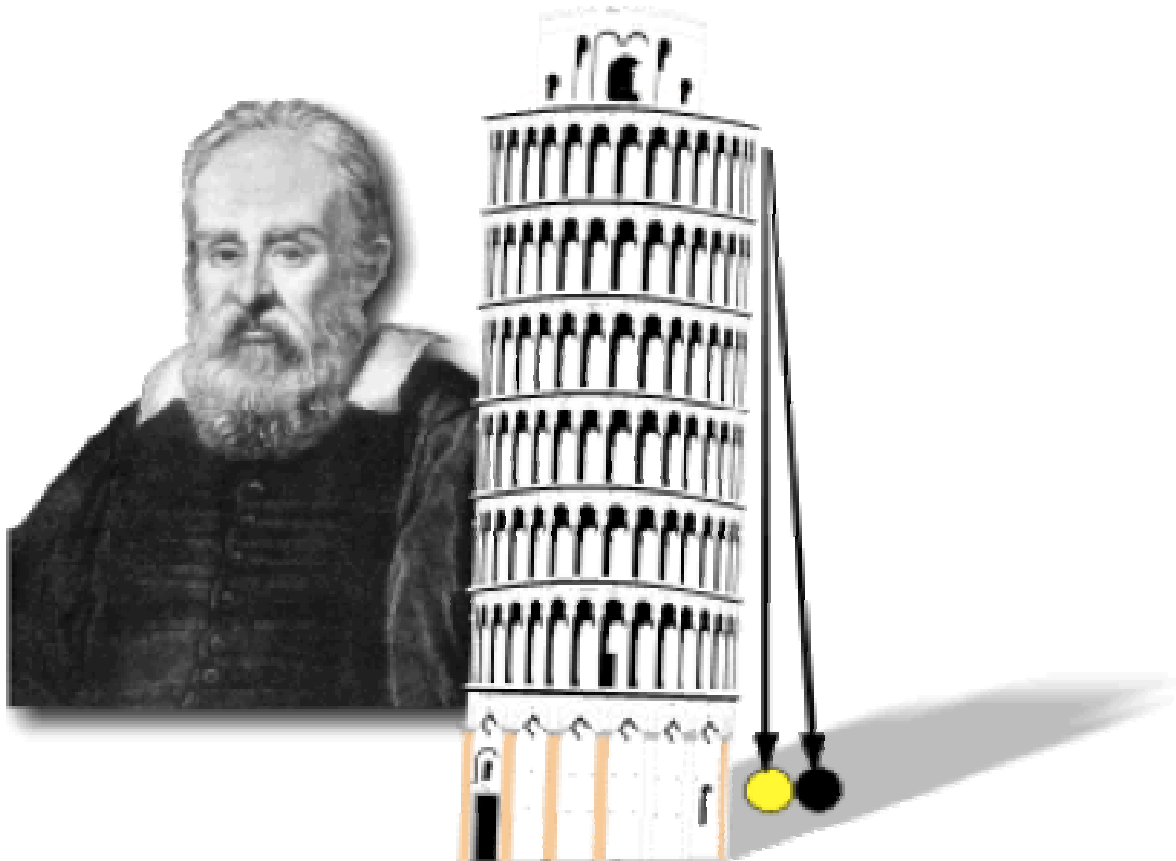




# Γαλιλαίος - 1600

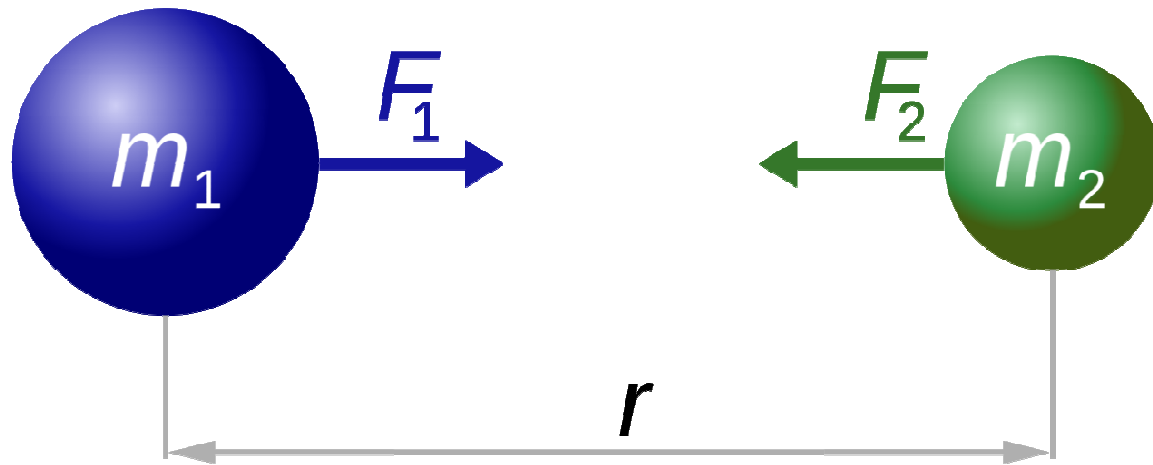
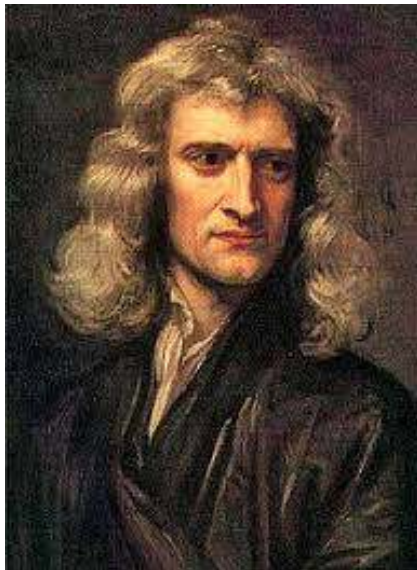
---

- Τα σώματα πέφτουν με την **ίδια ταχύτητα**, **ανεξάρτητα** από το **βάρος** τους.

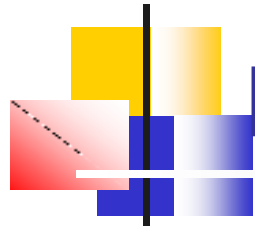


# Νεύτωνας - 1700

- Νόμος της Παγκόσμια Έλξης:  
Όλα τα σώματα (είτε μήλα είτε πλανήτες) **έλκονται αμοιβαία**.



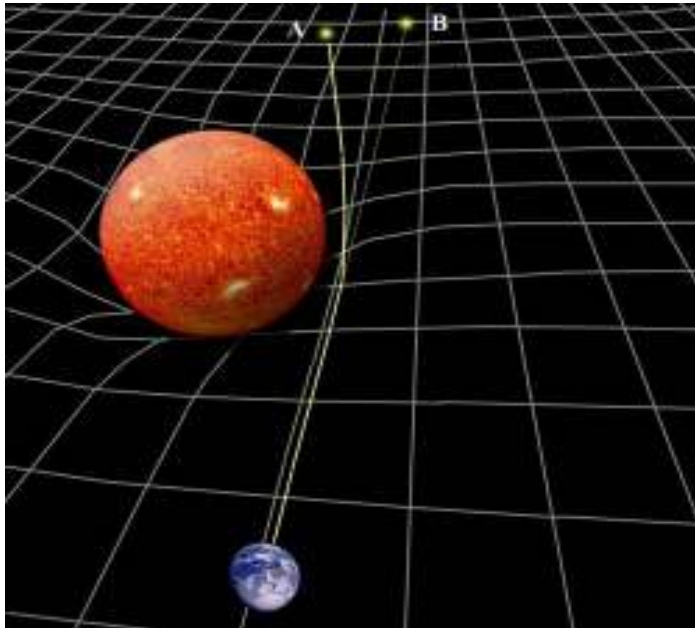
$$F_1 = F_2 = G \frac{m_1 \times m_2}{r^2}$$



# Einstein 1915: Γενική Σχετικότητα

---

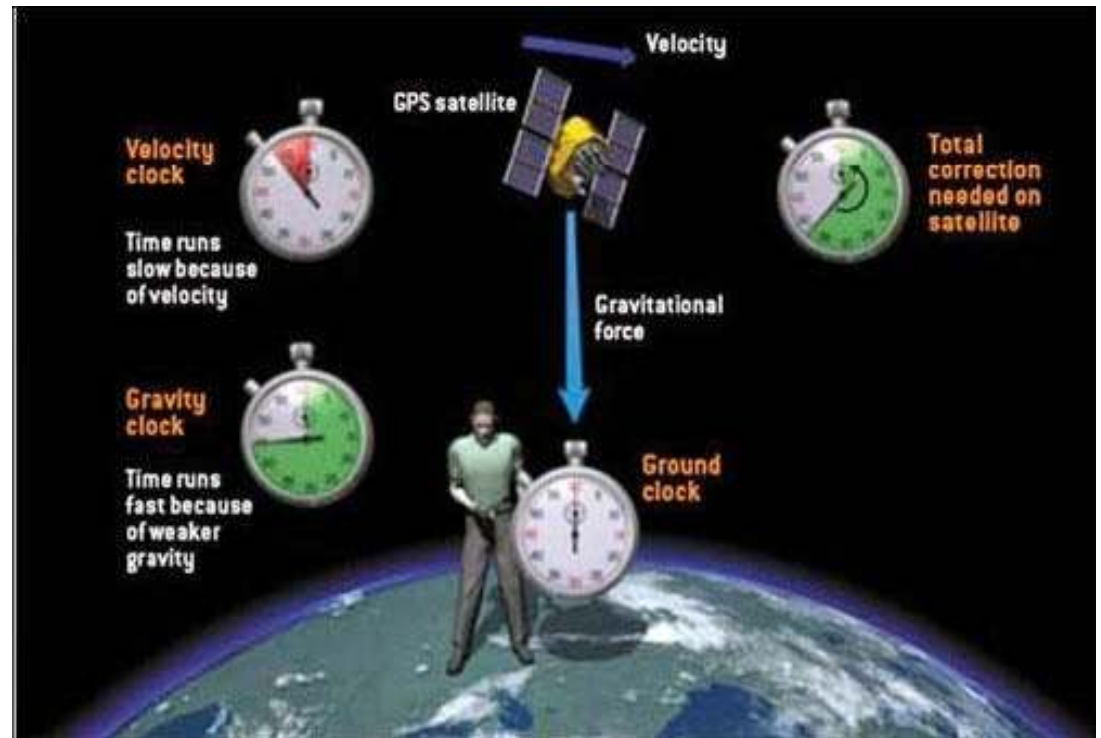
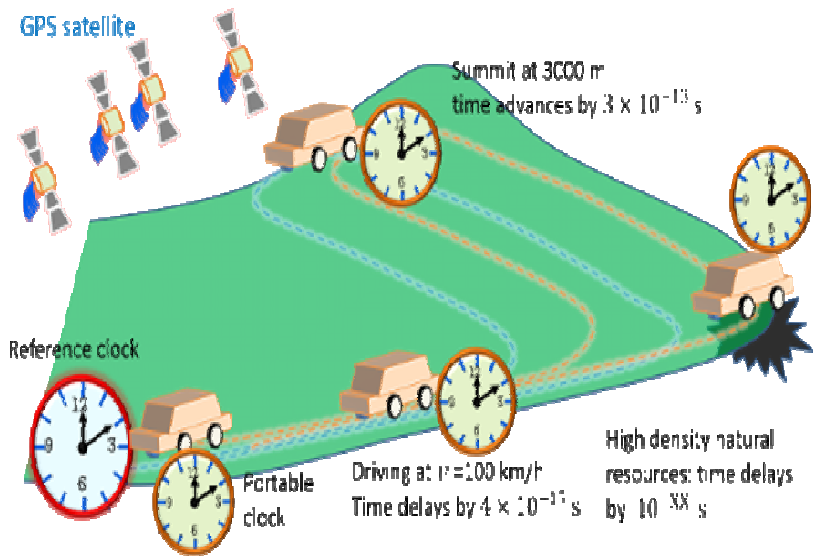
- **Γενική Θεωρία της Σχετικότητας, Einstein 1915:**  
Η ύλη λέει στο χωρόχρονο πώς να **καμπυλωθεί**  
Ο καμπυλομένος χωρόχρονος λέει **στην ύλη** πως να **κινηθεί**

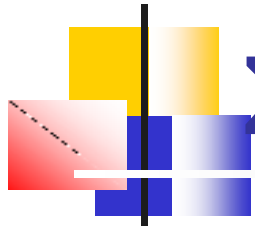


- Φαίνεται **περίεργο** αλλά έχει **επαληθευτεί** παντού (δορυφόροι, κλπ)

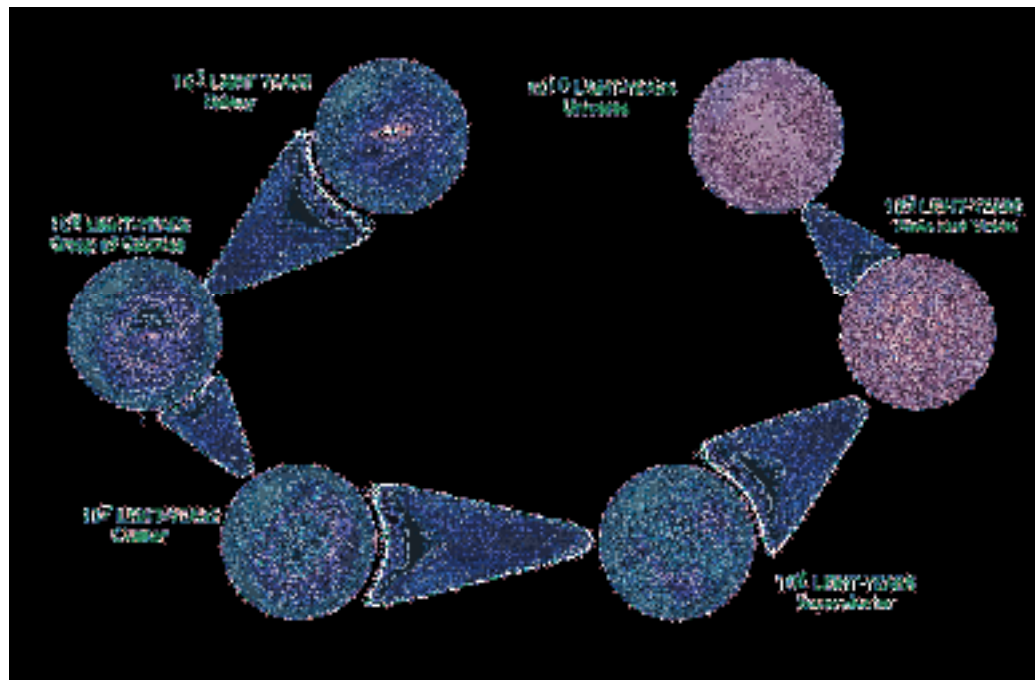
# Γενική Σχετικότητα

## ■ Πχ GPS





# Σύμπαν: Ομογενές και Ισότροπο



- Hubble 1924: Υπάρχουν κι άλλοι **γαλαξίες**.
- **Ομάδες Γαλαξιών**: **ολιγομελείς** ~100 γαλαξίες, **βαρυτικά χαλαρές** συγκεντρώσεις. Π.χ η τοπική μας ομάδα γαλαξιών.
- **Σμήνη Γαλαξιών**: **Πολυπληθείς** (ως 10.000), **βαρυτικά συνεκτικές** συγκεντρώσεις
- **Υπερσμήνη γαλαξιών**.

# Διαστολή του Σύμπαντος

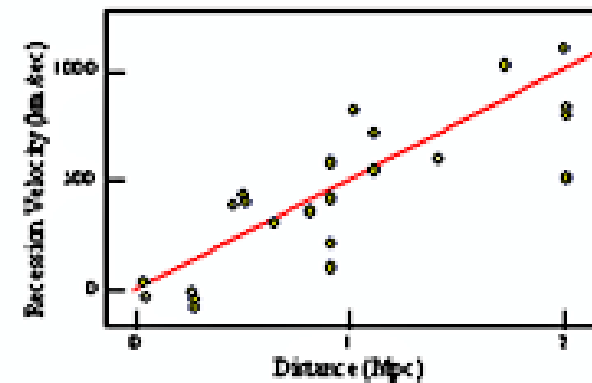
- Hubble 1929: Κάθε παρατηρητής παρατηρεί τους μακρινούς γαλαξίες να απομακρύνονται με **ταχύτητες ανάλογες της απόστασης**.



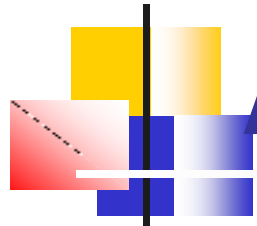
Hubble excelled in every course at school [except spelling], but was better known for his athletic prowess. He was a star player in football, baseball, and basketball, and ran track in high school and at the University of Chicago, where he earned a Bachelor of Science in 1910.



Hubble's Data (1929)

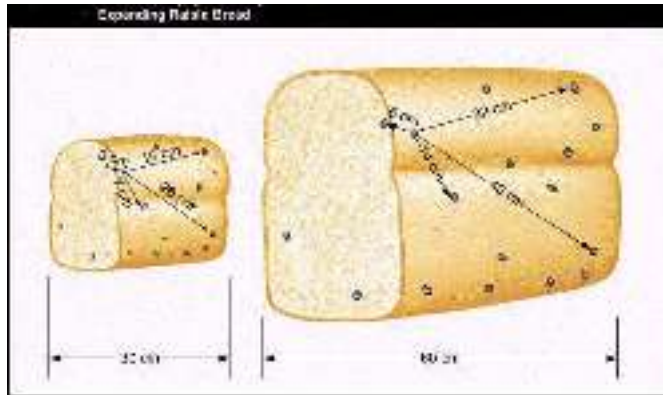


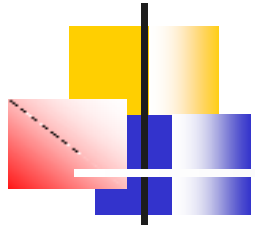
$$v = H r$$



# Διαστολή του Σύμπαντος

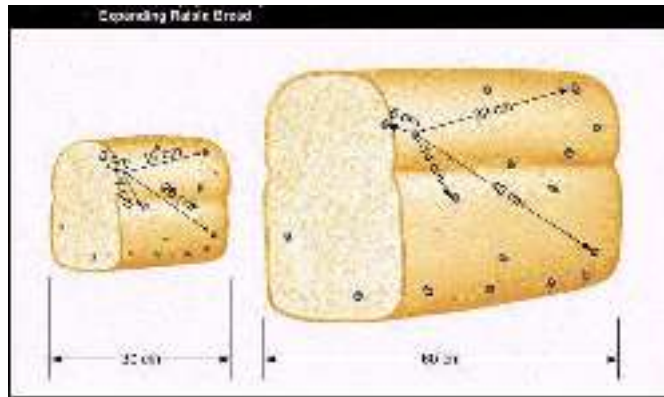
- 1) Ο νόμος του Hubble ισχύει για **κάθε σημείο παρατήρησης**:



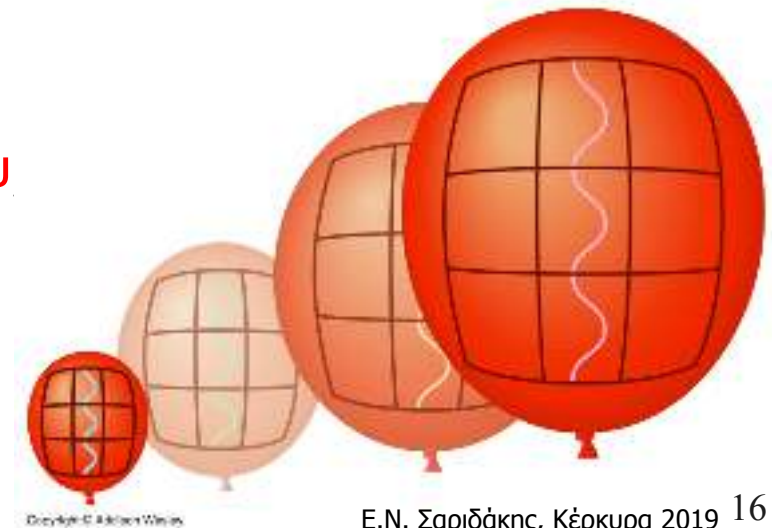


# Διαστολή του Σύμπαντος

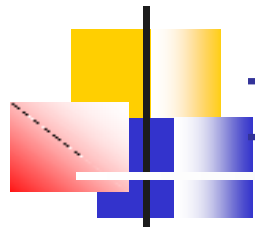
- 1) Ο νόμος του Hubble ισχύει για **κάθε σημείο παρατήρησης**:



- 2) Είναι **διαστολή του ίδιου του χώρου**  
όχι διαστολή μέσα σε έναν  
απόλυτο χώρο.

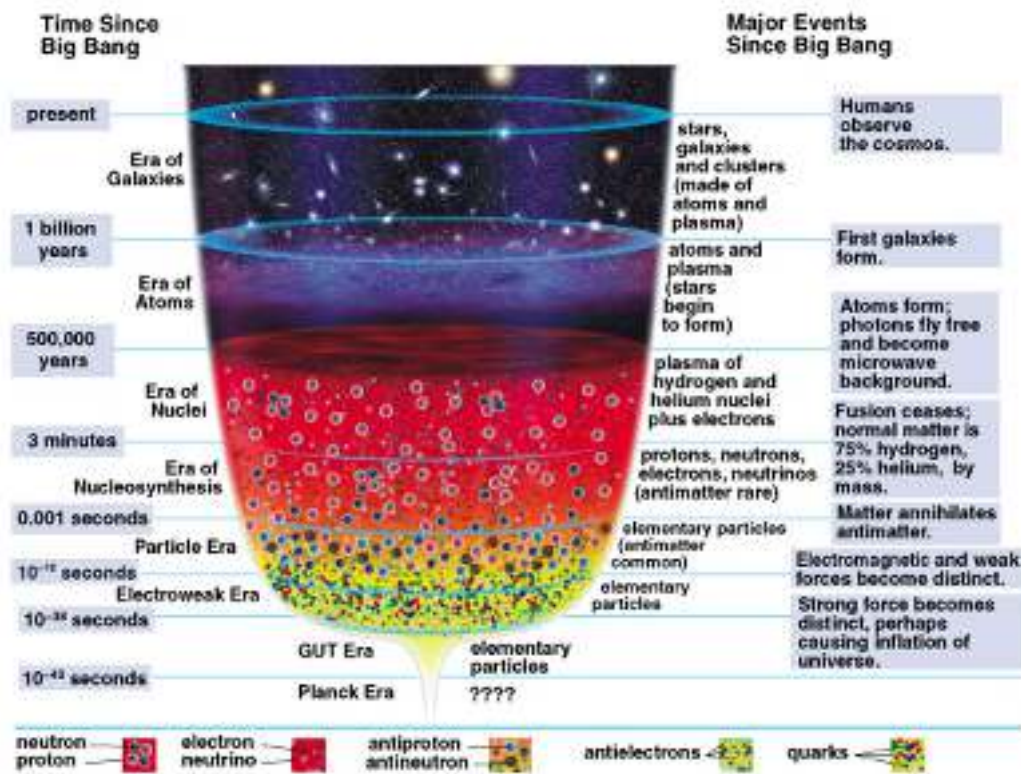




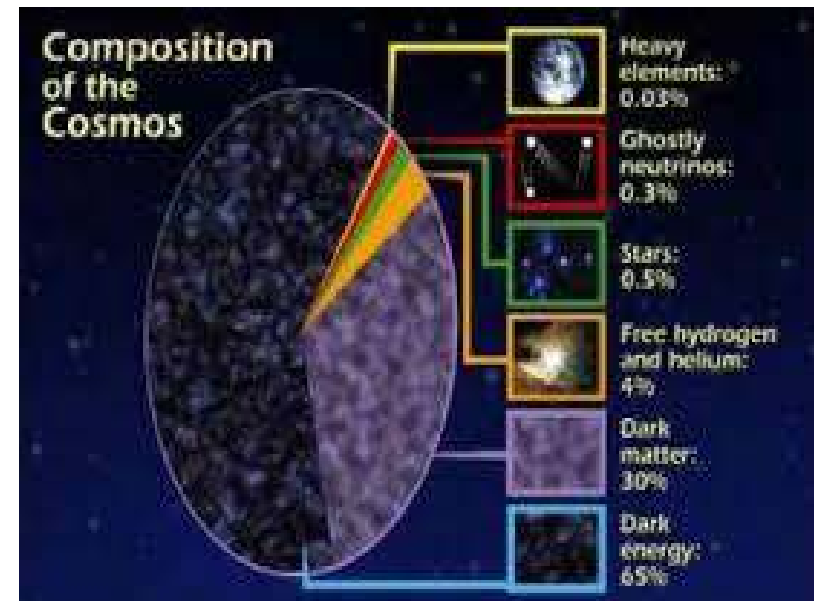


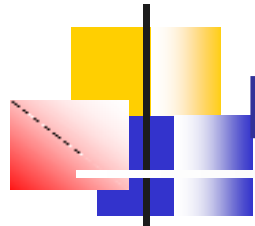
# Ιστορία και Δομή του Σύμπαντος

- Από τη **Μεγάλη Έκρηξη** στην εποχή της **Σκοτεινής Ενέργειας**:



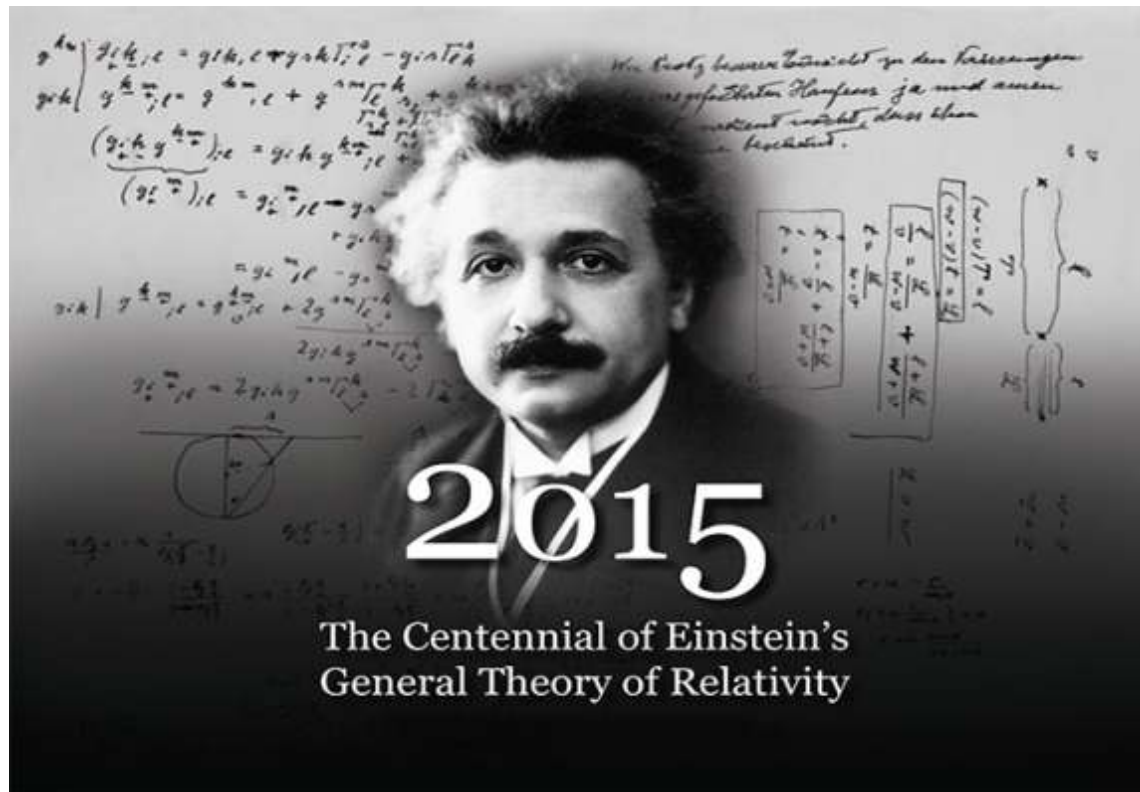
Copyright © Addison Wesley.



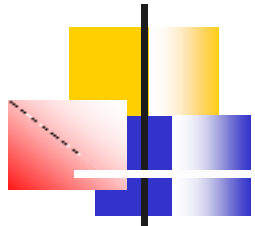


# Περιγραφή Διαστελλόμενου Σύμπαντος

- **Γενική Σχετικότητα**: Η εξέλιξη του τετραδιάστατου χωρόχρονου καθορίζεται από την κατανομή της ύλης

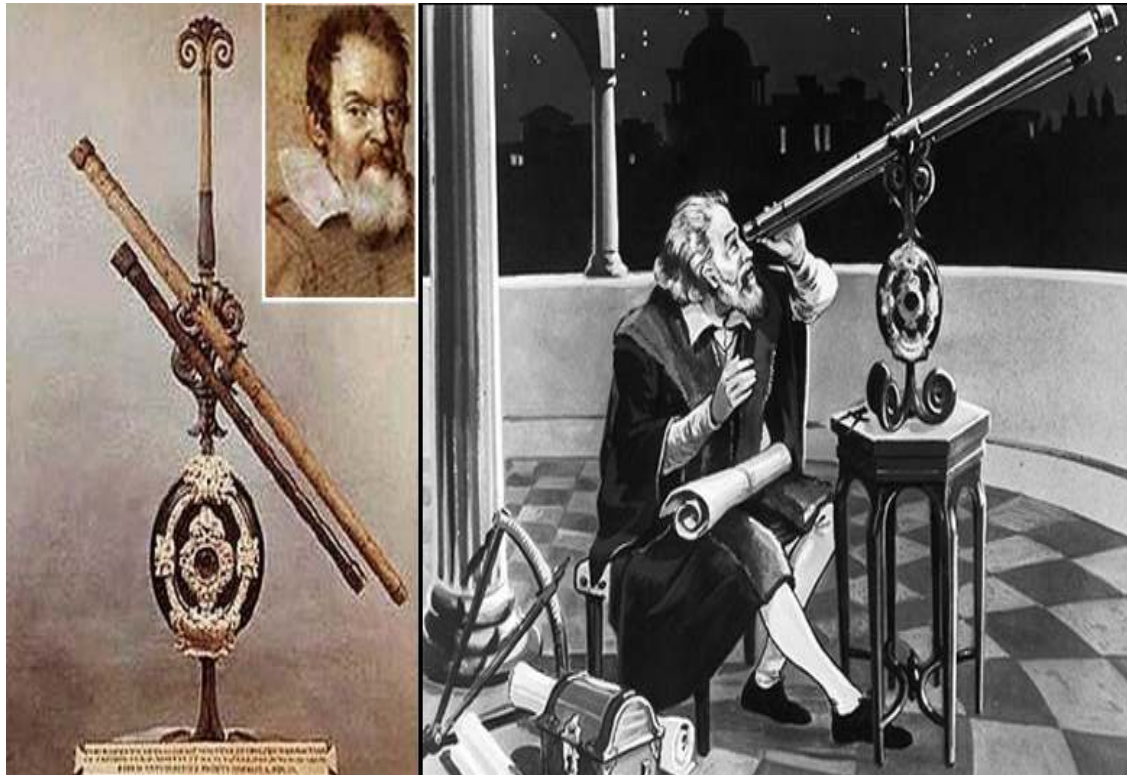


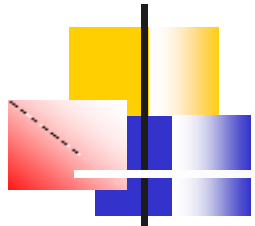




## Κοσμολογία: Ηλεκτρομαγνητικές Παρατηρήσεις

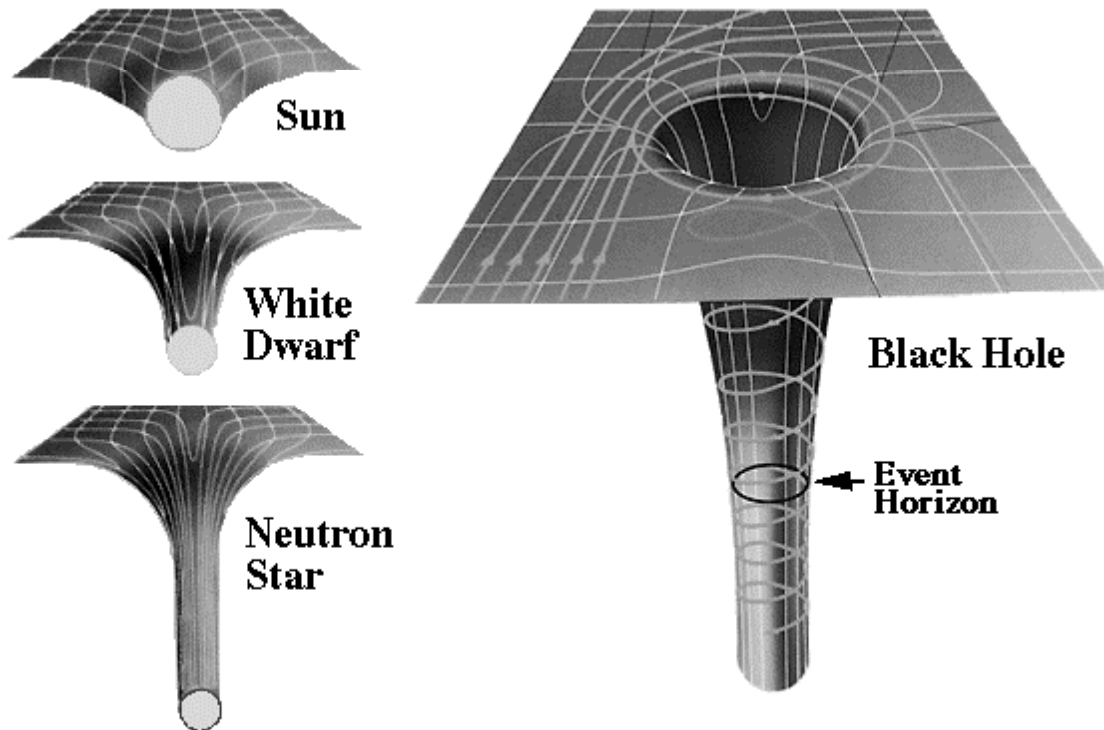
- Όλη η ιστορία της **Αστρονομίας**, **Αστροφυσικής** και **Κοσμολογίας**:  
**Ηλεκτρομαγνητικές παρατηρήσεις**

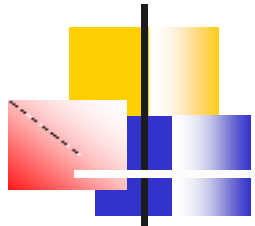




# Μαύρες Τρύπες

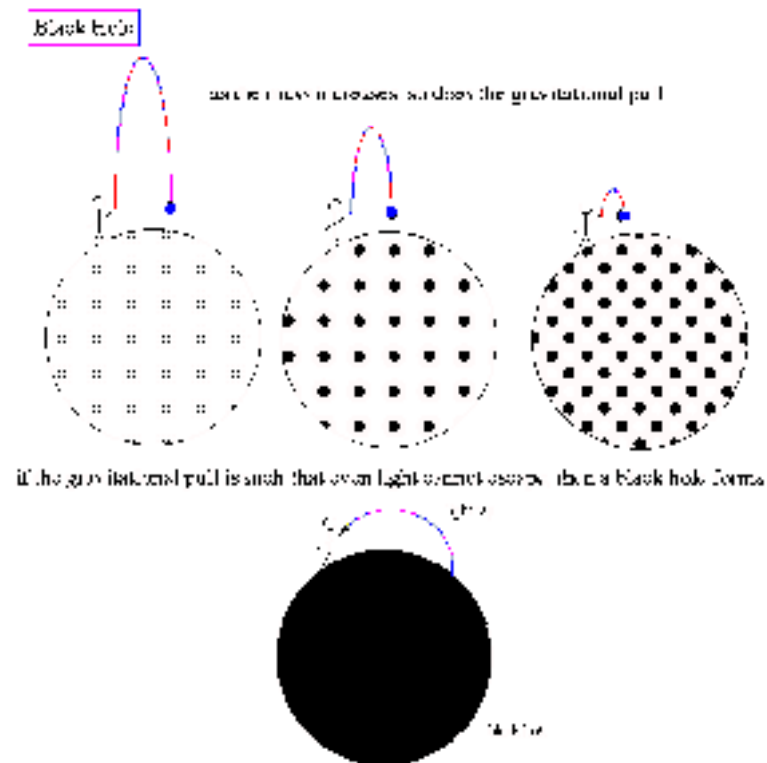
- Αν η μάζα ενός σώματος είναι **μεγαλύτερη από ένα όριο**, σχηματίζεται **μελανή οπή** (**μαύρη τρύπα**).

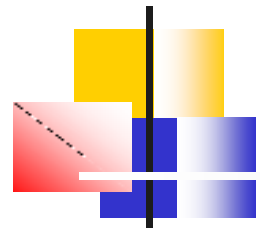




# Μαύρες Τρύπες

- Η **βαρύτητα** της είναι τόσο μεγάλη που ούτε το **φως** μπορεί να **διαφύγει**.

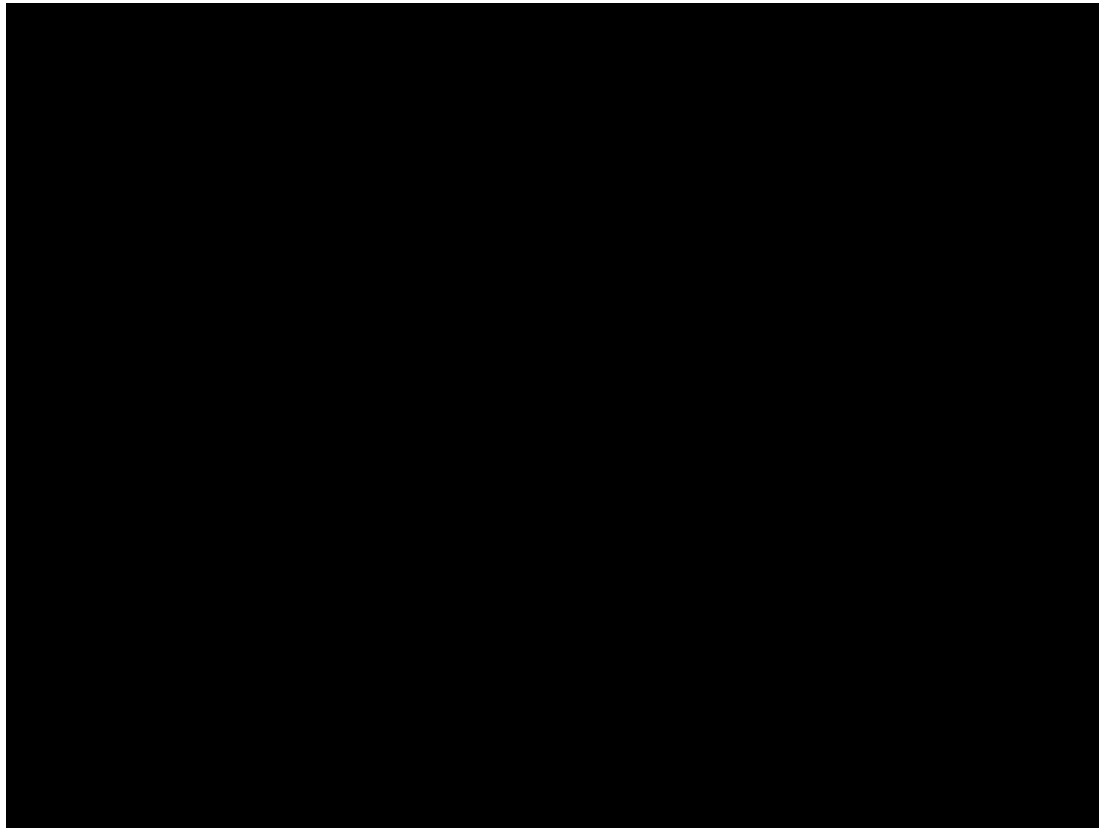


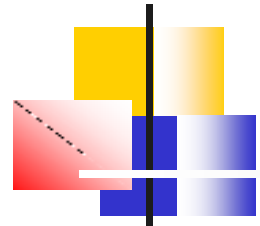


# Μαύρες Τρύπες

---

- Στο κέντρο του δικού μας Γαλαξία:

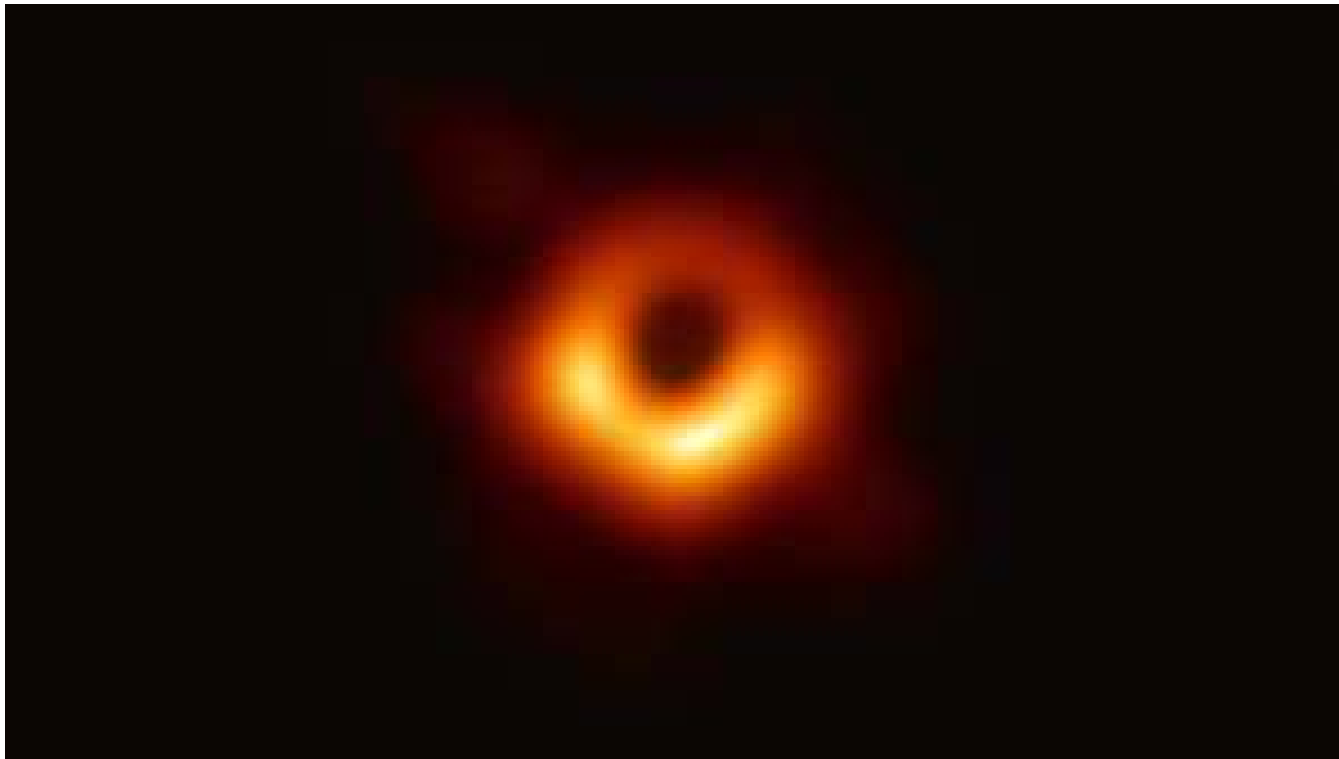




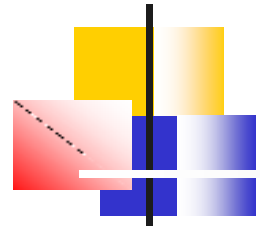
# Μαύρες Τρύπες

---

- Στο κέντρο του M87, μάζα 7.000.000.000 φορές τη μάζα του ήλιου



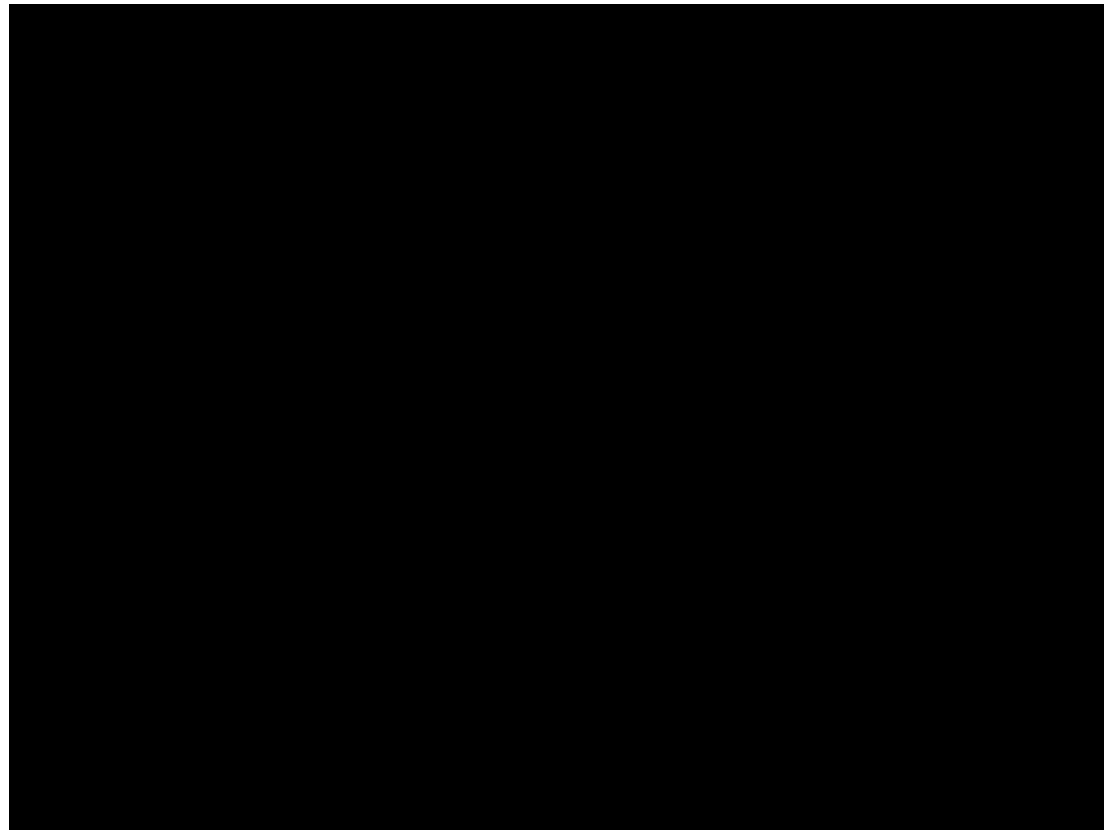


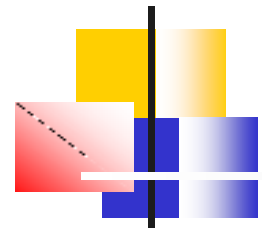


# Βαρυτικά Κύματα

---

- Τανυστικές **ταλαντώσεις του Χωροχρόνου**. Προβλέφθηκαν το 1915, παρατηρήθηκαν το 2015.



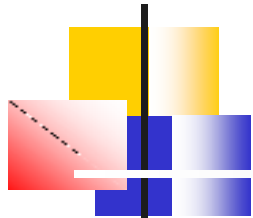


# Βαρυτικά Κύματα

---

- Πολλές πηγές: Αρχέγονα, **συγχωνεύσεις μελανών οπών:**

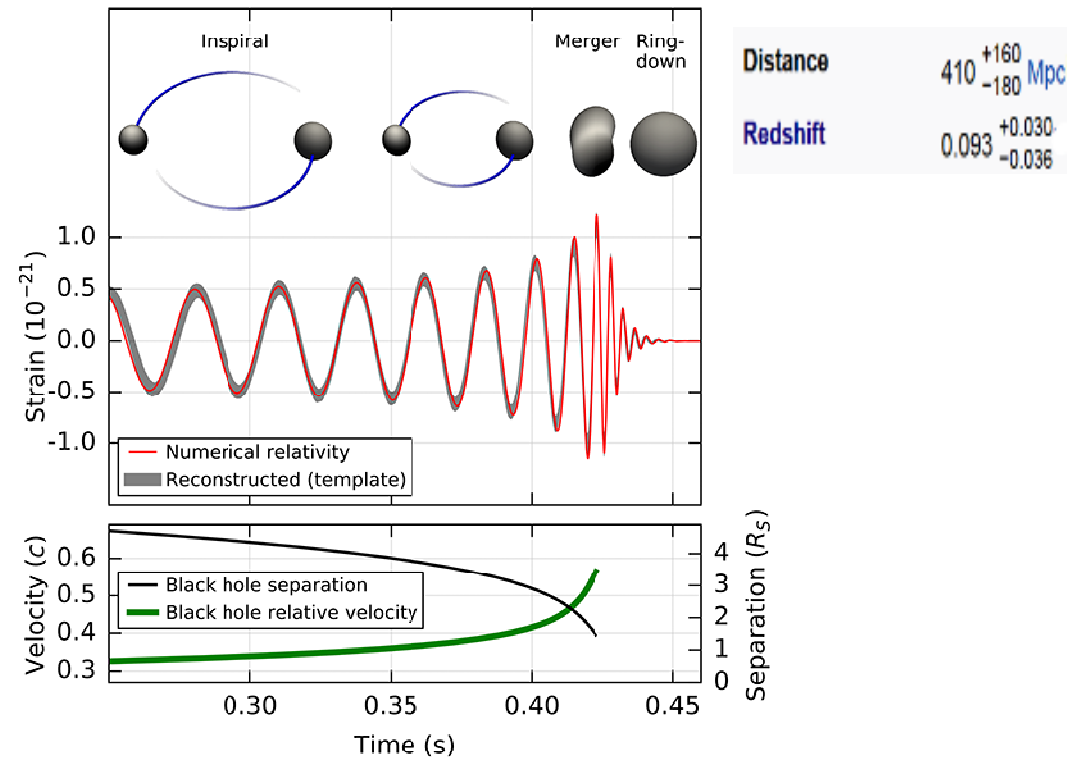
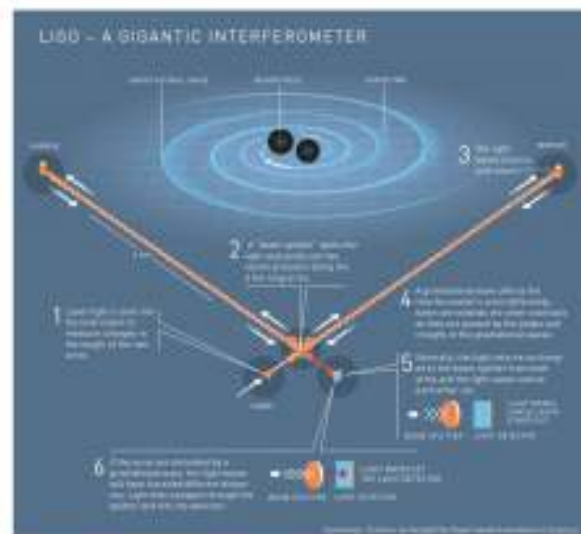




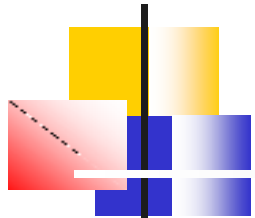
# Βαρυτικά Κύματα από μαύρες τρύπες

GW150914: Δύο μαύρες τρύπες με  $36^{+5}_{-4} M_{\odot}$  and  $29^{+4}_{-4} M_{\odot}$ , resulting in a  $62^{+4}_{-4} M_{\odot}$  black hole  
 1.000.000.000 χρόνια πριν

Louisiana.  
 Washington  
 ; 4km  
 $10^{-18} m$

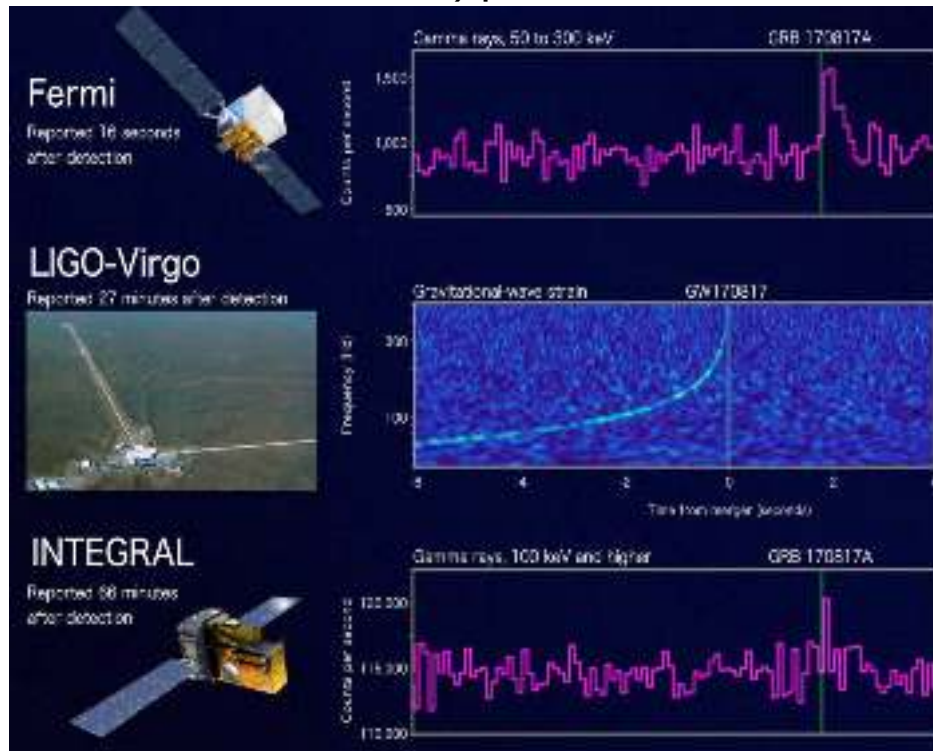


2017 Βραβείο Νόμπελ φυσικής

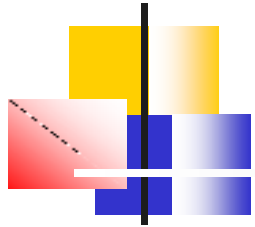


# Βαρυτικά Κύματα από αστέρες νετρονίων

- **GW170817**: Δύο αστέρες νετρονίων, απόσταση 40 Mpc
- **GRB170817A**: Ακτίνες γ.

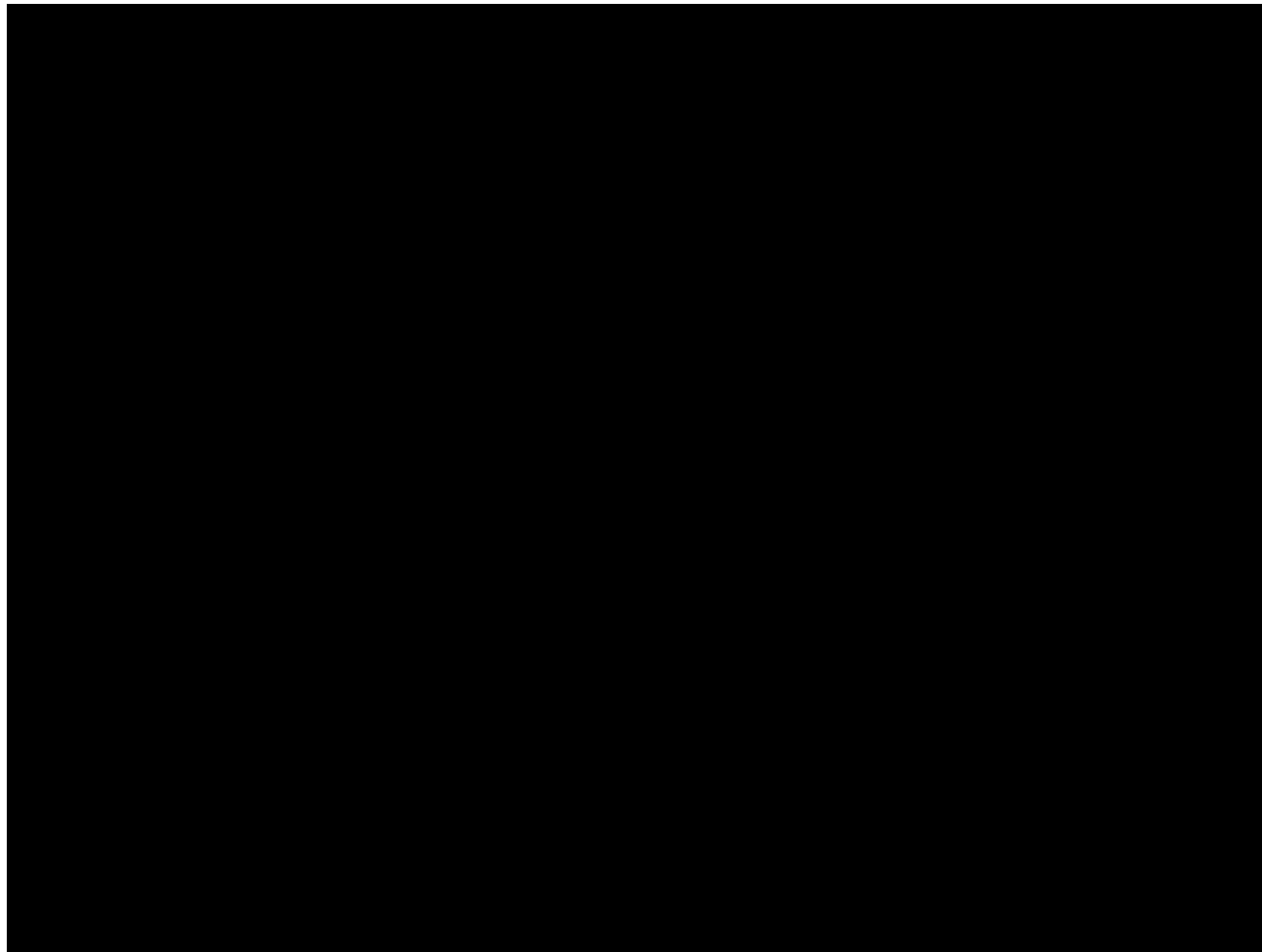


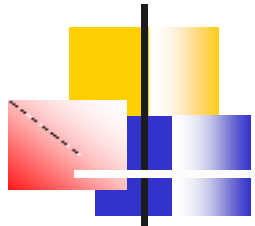
- Η εποχή της πολυ-μηνυματικής αστρονομίας αρχίζει!



## Βαρυτικά Κύματα από αστέρες νετρονίων

---

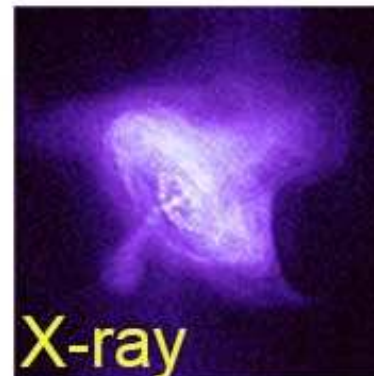
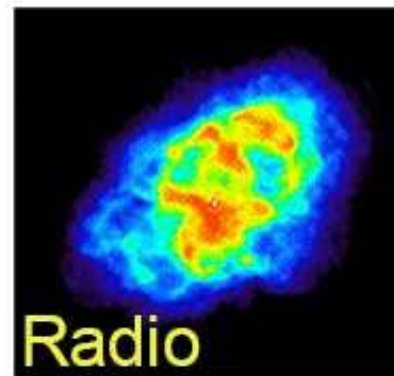


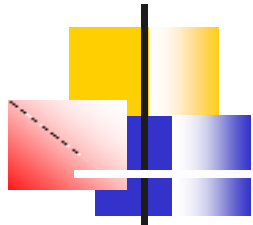


# Νέο παράθυρο στο Σύμπαν

---

- Μπορούμε να παρατηρήσουμε τα φαινόμενα από ένα άλλο παράθυρο.



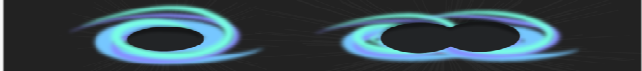


# Νέο παράθυρο στο Σύμπαν

- Μπορούμε να παρατηρήσουμε πλήθος νέων φαινομένων:

**THINGS YOU MIGHT 'HEAR' IN GRAVITATIONAL WAVES**

**BLACK HOLES**  
Corpses of giant, collapsed stars that can be as small as a city but pack the mass of many suns. Their gravity is so intense that even light can't escape their pull.




**PROOF THEY EXIST** Black holes absorb light, so we've only had indirect evidence of their existence.

**EVENT HORIZON** Gravitational waves are "the closest you can get" to black holes, so astronomers can now see if they have any structure at their surface.

**BIRTH** No one has detected a black hole forming when a big star implodes.

**MERGERS** Black holes can merge, release energy, and reform as a perfect (but larger) sphere.

**NEUTRON STARS**  
Ultra-dense dead stars that tried to become black holes but couldn't. A teaspoon of neutron star weighs about 10 million tons.




**SURFACE** Intense gravity should make neutron stars smooth — but they might have millimeter-tall mountains that weigh as much as a planet.

**COLLISIONS** We think we've seen the light from violent mergers of two neutron stars, but never what's happening inside.

**CRASHES INTO BLACK HOLES** The two could, in theory, collide into one another, but we don't know what that would do or look like.

**SUPERNOVAS**  
When a large star grows too big, it goes out in a fiery blaze. But the explosions are so dense that what happens below the surface is a mystery.




**PRE-EXPLOSIONS** Light can take hours to escape an exploding star. But gravitational waves go right through and could signal start of the explosion.

**CORE** The hearts of supernovas are hidden from view. But we can now hear them.

**TRIGGER** We're not certain what makes big stars blow up. Seeing inside the cataclysm might help.

**AND MORE**



**STRINGS** Everything in the universe might be made of vibrating, subatomic strings of energy. The first evidence may soon be at hand.

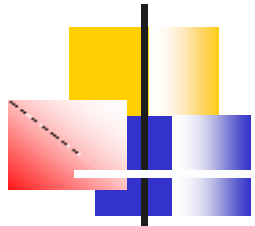
**UNIVERSE EXPANSION** Gravitational waves at the universe's edge could help us understand how quickly the cosmos is stretching outward.

**BIG BANG ECHOES** Gravitational waves might contain records of the event that started the universe.

**GRAVITONS** These theoretical particles might generate gravity itself. If they don't travel at light speed, we might prove their existence.

SOURCES: Scientific American; Cornell; Nature.com; NewScientist.com; NASA; Dallas News

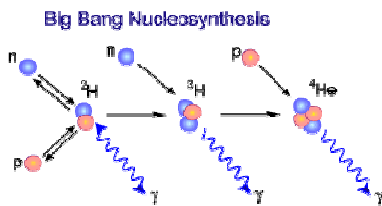
BUSINESS INSIDER



# Νέο παράθυρο στο Σύμπαν

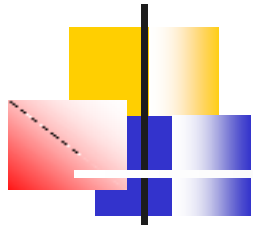
- Μπορούμε να πάμε πίσω από την **κουρτίνα** της **Εποχής Επανασύνδεσης** (380.000 χρόνια από τη Μεγάλη Έκρηξη):

- Το αρχέγονο Σύμπαν γέμισε με **φωτόνια υψηλής ενέργειας**:



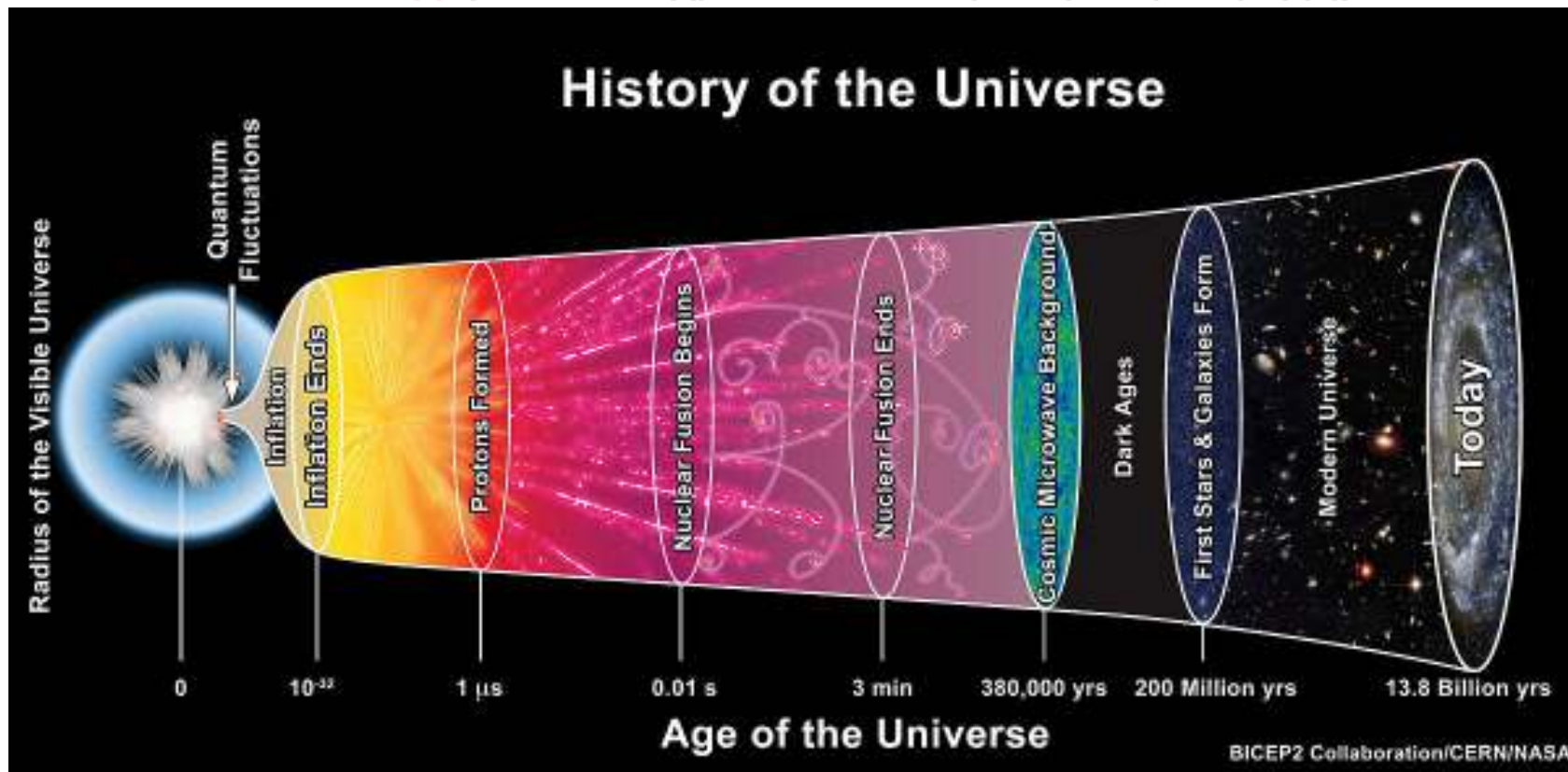
- Λόγω **διαστολής** το μήκος κύματος **επιμηκύνεται**: **380.000** μετά την Μεγάλη Έκρηξη (Θερμοκρασία  $\sim 3000\text{K}$ ) τα φωτόνια δεν μπορούν πια να ionίσουν το υδρογόνο, και κινούνται πια **ελεύθερα**.
- **Εποχή «Επανασύνδεσης»**: Το Σύμπαν γίνεται **διαφανές** και μια διάχυτη **ακτινοβολία μέλανος σώματος** απλώνεται παντού.

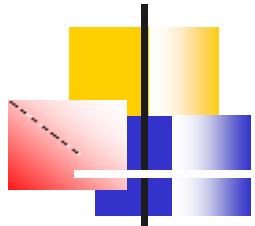




# Νέο παράθυρο στο Σύμπαν

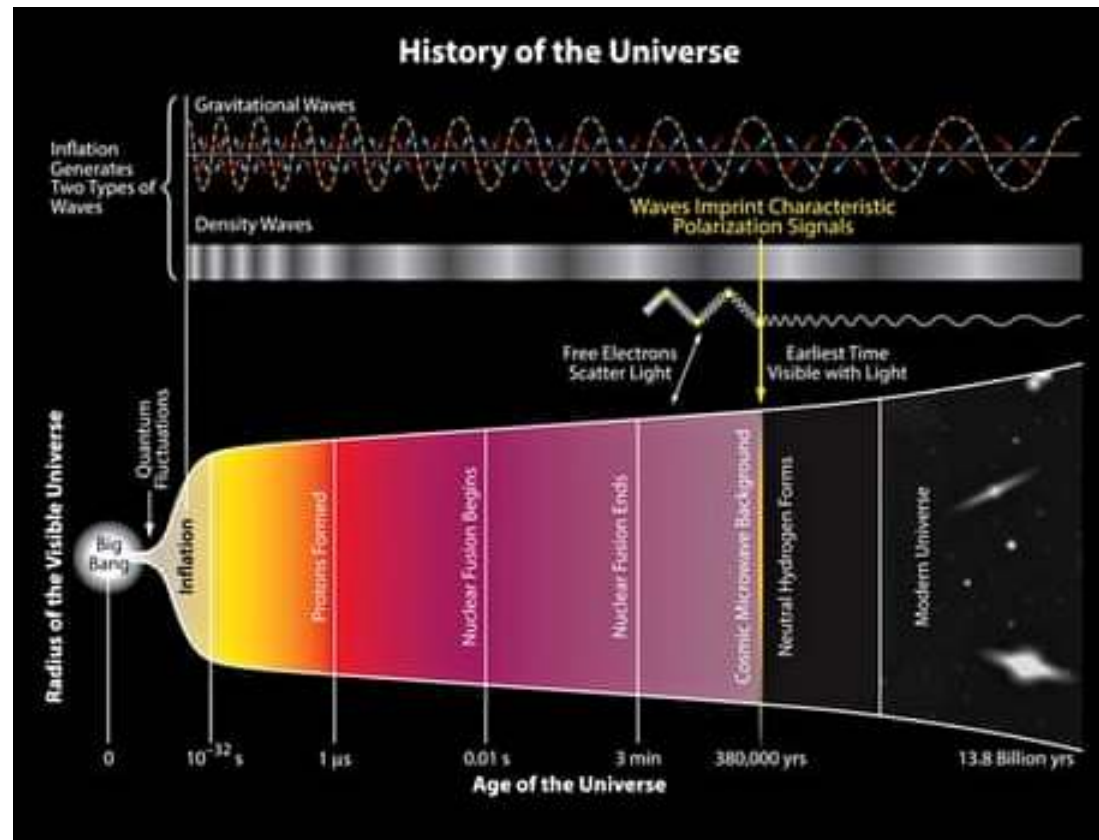
- Μπορούμε να πάμε πίσω από την **κουρτίνα** της **Εποχής Επανασύνδεσης** (380.000 χρόνια από τη Μεγάλη Έκρηξη):

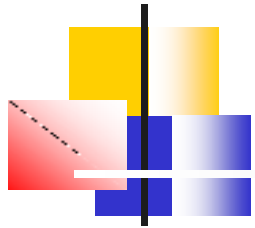




# Νέο παράθυρο στο Σύμπαν

- Μπορούμε να πάμε πίσω ως  $10^{-36}$  sec μετά τη Μεγάλη Έκρηξη!

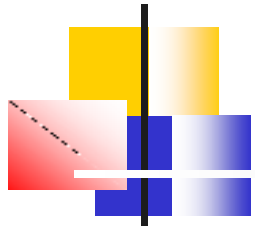




# Το νέο Παράθυρο στο Σύμπαν: Περίληψη

---

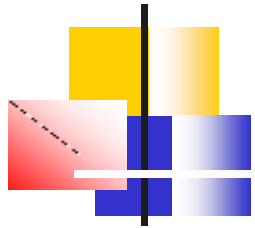
- **Κοσμολογία:** Η μελέτη του **Σύμπαντος** ως **όλον**.



# Το νέο Παράθυρο στο Σύμπαν: Περίληψη

---

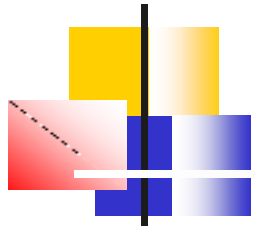
- **Κοσμολογία:** Η μελέτη του **Σύμπαντος** ως **όλον**.
- Το εργαστήριο μελέτης της **Βαρύτητας**



## Το νέο Παράθυρο στο Σύμπαν: Περίληψη

---

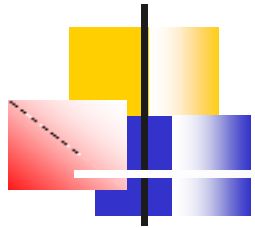
- **Κοσμολογία:** Η μελέτη του **Σύμπαντος** ως **όλον**.
- Το εργαστήριο μελέτης της **Βαρύτητας**
- **Γενική Θεωρία της Σχετικότητας**



## Το νέο Παράθυρο στο Σύμπαν: Περίληψη

---

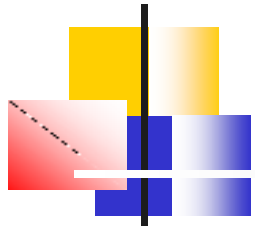
- **Κοσμολογία:** Η μελέτη του **Σύμπαντος** ως **όλον**.
- Το εργαστήριο μελέτης της **Βαρύτητας**
- **Γενική Θεωρία της Σχετικότητας**
- Θεωρία **Μεγάλης Έκρηξης** – **Διαστελόμενο Σύμπαν**



## Το νέο Παράθυρο στο Σύμπαν: Περίληψη

---

- **Κοσμολογία:** Η μελέτη του **Σύμπαντος** ως **όλον**.
- Το εργαστήριο μελέτης της **Βαρύτητας**
- **Γενική Θεωρία της Σχετικότητας**
- Θεωρία **Μεγάλης Έκρηξης** – **Διαστελόμενο Σύμπαν**
- **Μελανές Οπές:** Υπάρχουν!

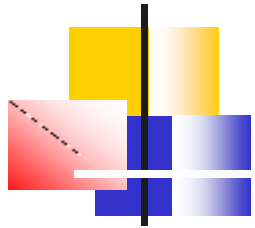


## Το νέο Παράθυρο στο Σύμπαν: Περίληψη

---

- **Κοσμολογία:** Η μελέτη του **Σύμπαντος** ως **όλον**.
- Το εργαστήριο μελέτης της **Βαρύτητας**
- **Γενική Θεωρία της Σχετικότητας**
- Θεωρία **Μεγάλης Έκρηξης** – **Διαστελόμενο Σύμπαν**
- **Μελανές Οπές:** Υπάρχουν!
- **Βαρυτικά Κύματα:** Από συγχώνευση **Μελανών Οπών** ή **Αστέρων Νετρονίων**.

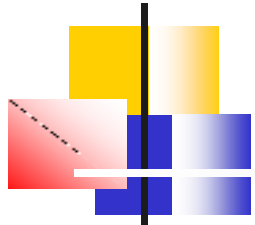




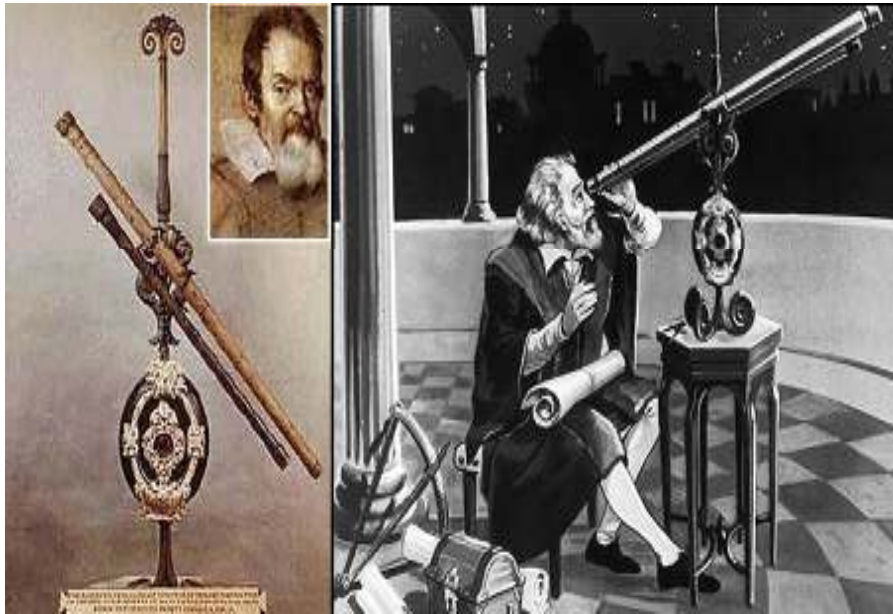
# Το νέο Παράθυρο στο Σύμπαν: Περίληψη

---

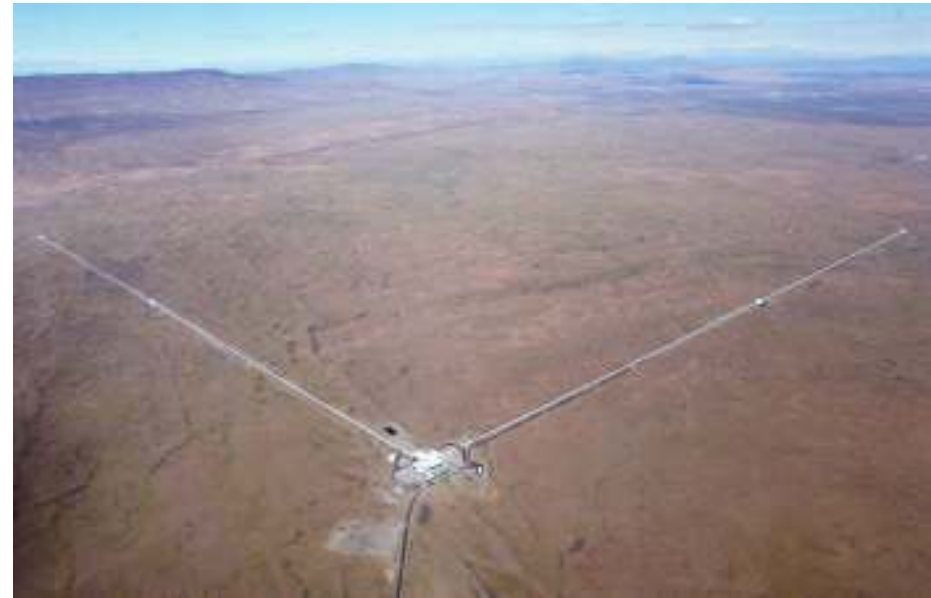
- **Κοσμολογία:** Η μελέτη του **Σύμπαντος** ως **όλον**.
- Το εργαστήριο μελέτης της **Βαρύτητας**
- **Γενική Θεωρία της Σχετικότητας**
- Θεωρία **Μεγάλης Έκρηξης** – **Διαστελόμενο Σύμπαν**
- **Μελανές Οπές:** Υπάρχουν!
- **Βαρυτικά Κύματα:** Από συγχώνευση **Μελανών Οπών** ή **Αστέρων Νετρονίων**.
- Το **Νέο Παράθυρο** στη **Σύμπαν!**



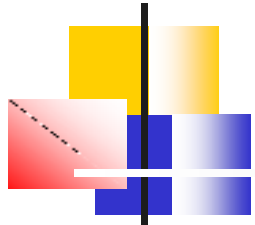
## Νέο παράθυρο στο Σύμπαν



ΗΜ παρατηρήσεις: 400 χρόνια



Παρατηρήσεις ΒΚ: 4 χρόνια



## Νέο παράθυρο στο Σύμπαν

---



ΗΜ παρατηρήσεις: 400 χρόνια



Παρατηρήσεις ΒΚ: 4 χρόνια

Σας Ευχαριστώ!