

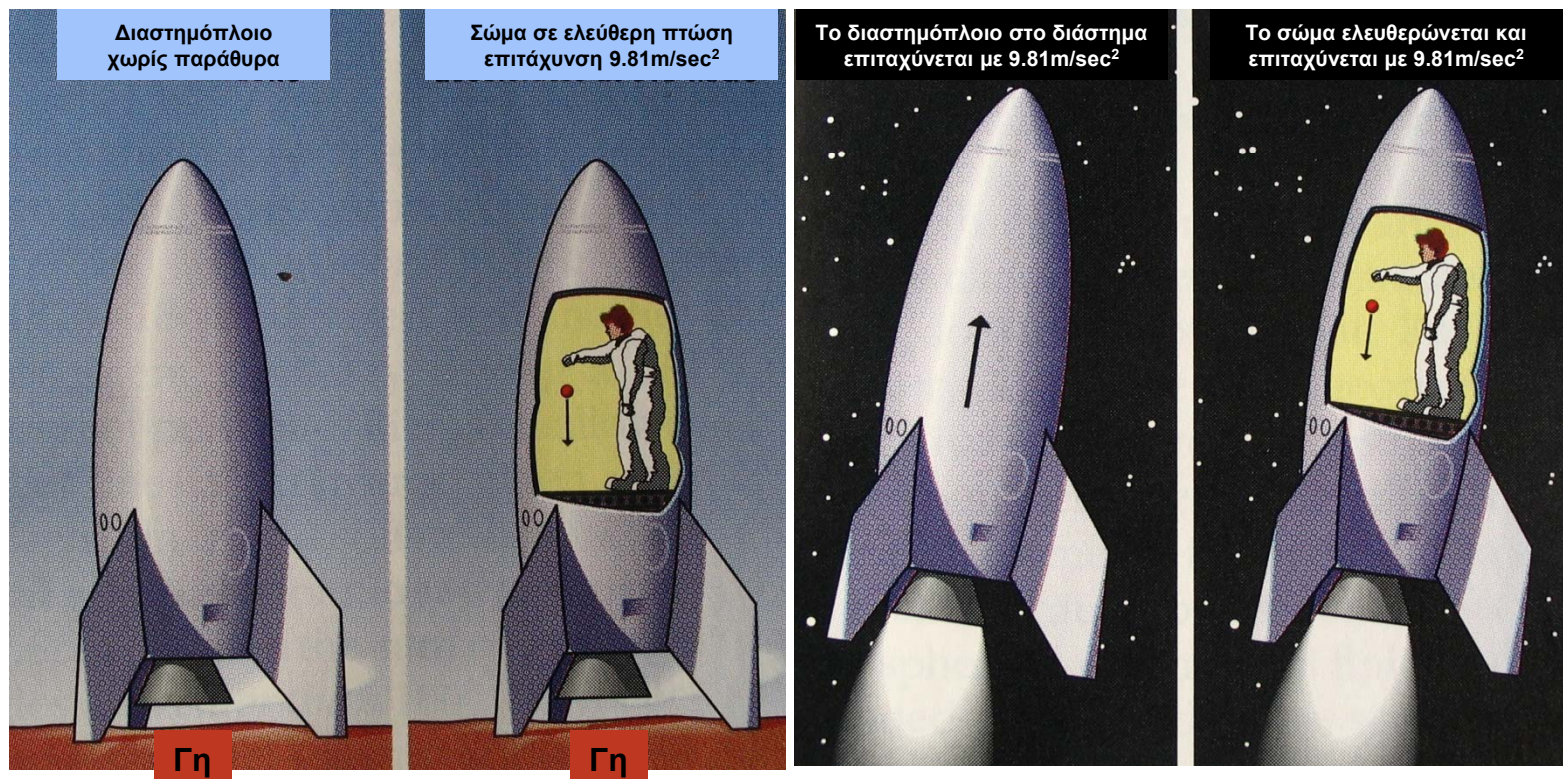
Γενική Θεωρία της Σχετικότητας

Αδρανειακή – Βαρυτική Μάζα

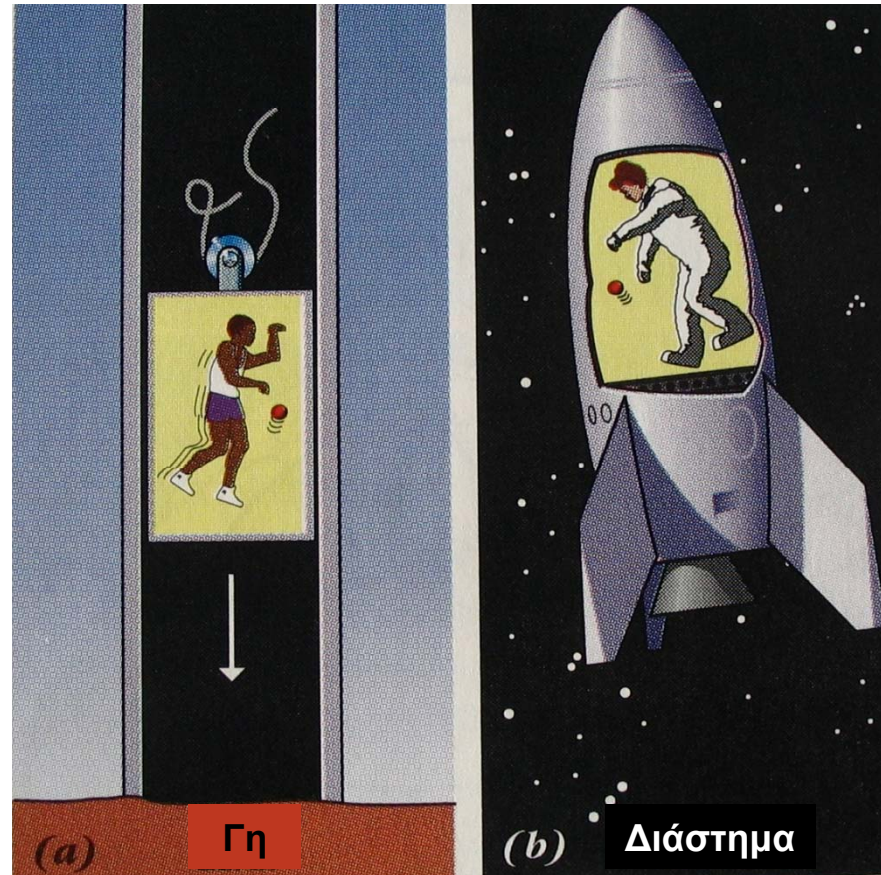
- Σύμφωνα με τον Νεύτωνα η μάζα ενός σώματος ορίζεται με δύο τρόπους:
 - Μέσω του δευτέρου νόμου $F=ma$. (**Αδρανειακή Μάζα**).
 - Ζυγίζοντας το σώμα και εφαρμόζοντας τον Νόμο της Βαρύτητας $W=G(mM/r^2)$. (**Βαρυτική Μάζα**)
- Ο Νεύτωνας πίστευε πως οι δύο μάζες είναι ίσες.
- Πρόσφατα πειράματα (Παν. Princeton-Μόσχα) δείχνουν ισότητα των δύο μαζών με ακρίβεια της τάξης του 10^{-11} .

Η Αρχή της Ισοδυναμίας

- “Δεν μπορούμε πειραματικά να διαχωρίσουμε επιταχύνσεις που οφείλονται στη βαρύτητα από επιταχύνσεις που οφείλονται σε δυνάμεις άλλου είδους ”



Η Αρχή της Ισοδυναμίας

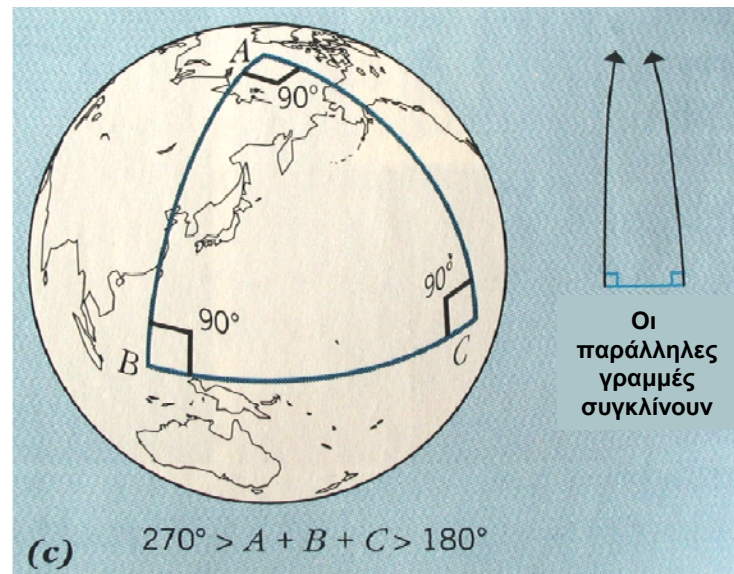
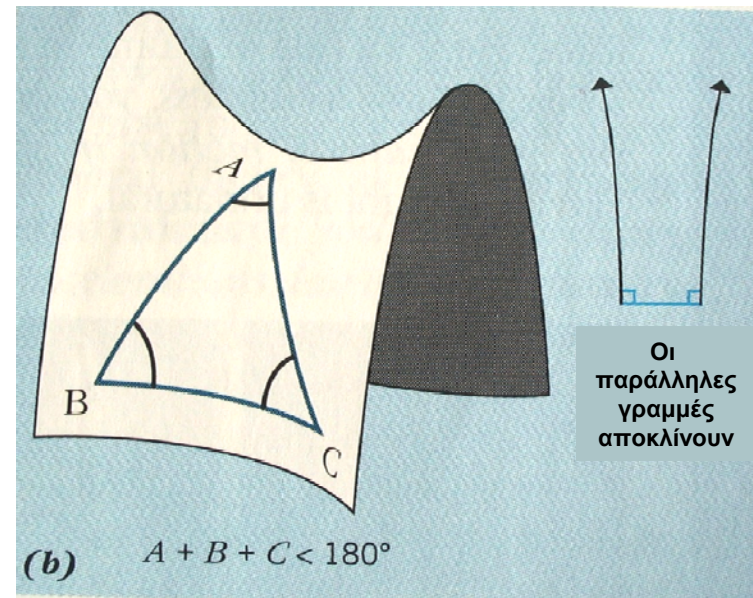
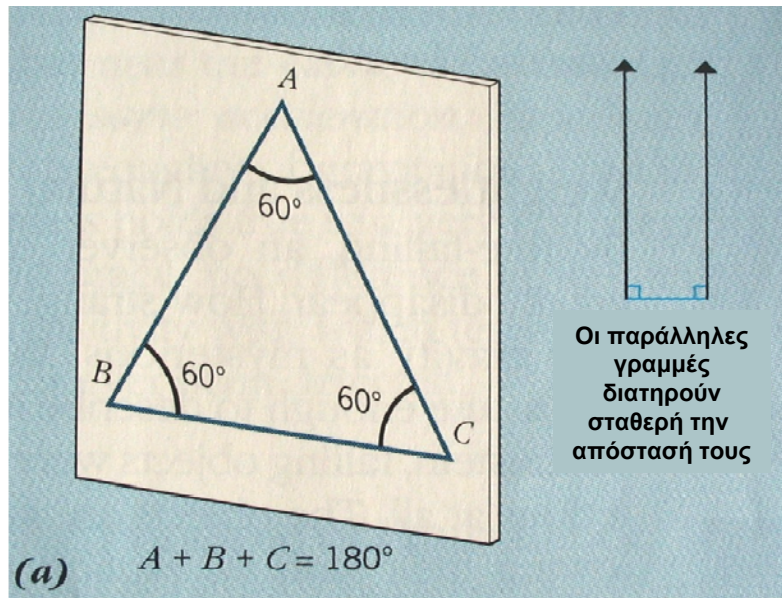


Εκμηδενισμός της βαρύτητας: Παρατηρητής μέσα στον ανελκυστήρα αφήνει ελεύθερο το σώμα το οποίο αιωρείται. Ο αστροναύτης στο διάστημα παρατηρεί το ίδιο πράγμα.

Η Γεωμετρία του Χωρόχρονου

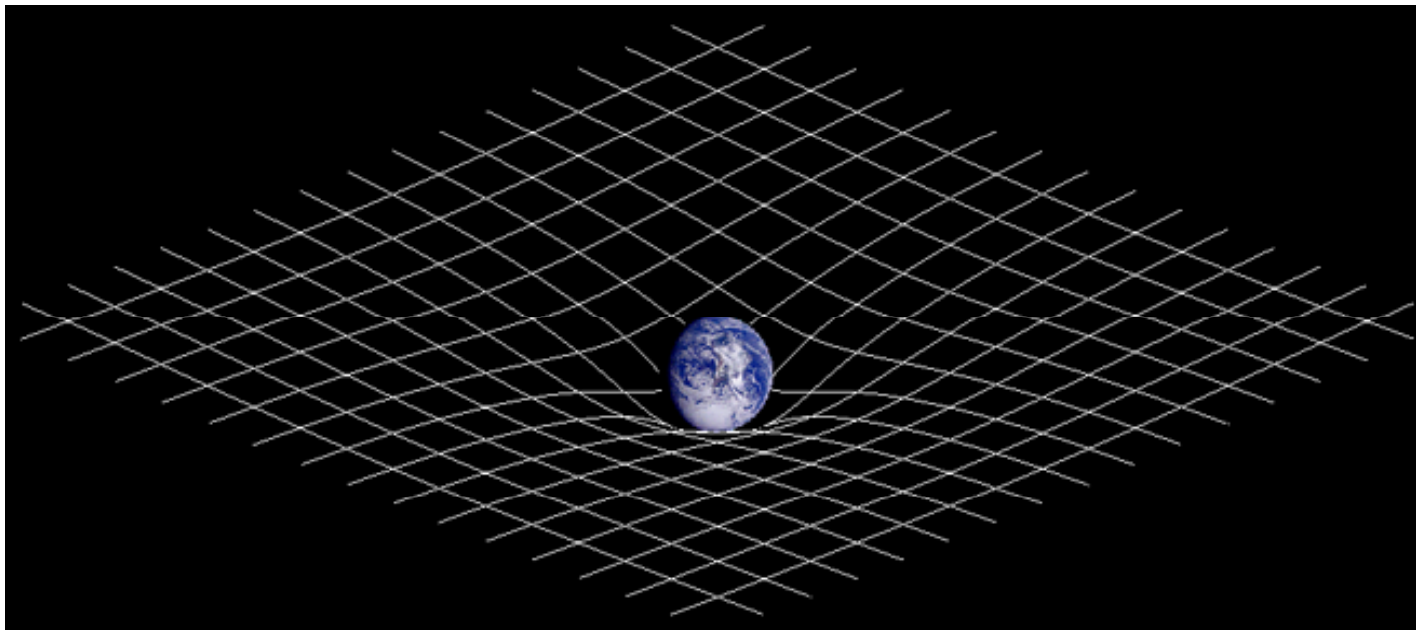
- Ερώτηση: Πως συσχετίζεται η γεωμετρία του χώρου με την Φυσική?
 - Νευτωνας: Η γεωμετρία του σύμπαντος είναι επίπεδη.
 - Einstein: Έθεσε την παραπάνω ερώτηση σε πειραματικό έλεγχο.
- Ευκλείδειος Γεωμετρία: δύο παράλληλες γραμμές προεκτεινόμενες στο άπειρο δεν τέμνονται. (**Επίπεδη Γεωμετρία**)
- 1829 Nikolai Lobachevski: δύο παράλληλες γραμμές μπορούν να αποκλίνουν. (**Υπερβολική Γεωμετρία**)
- 1854 Georg Riemann: δύο παράλληλες γραμμές μπορούν να συγκλίνουν. (**Σφαιρική Γεωμετρία**)

Η Γεωμετρία του Χωρόχρονου



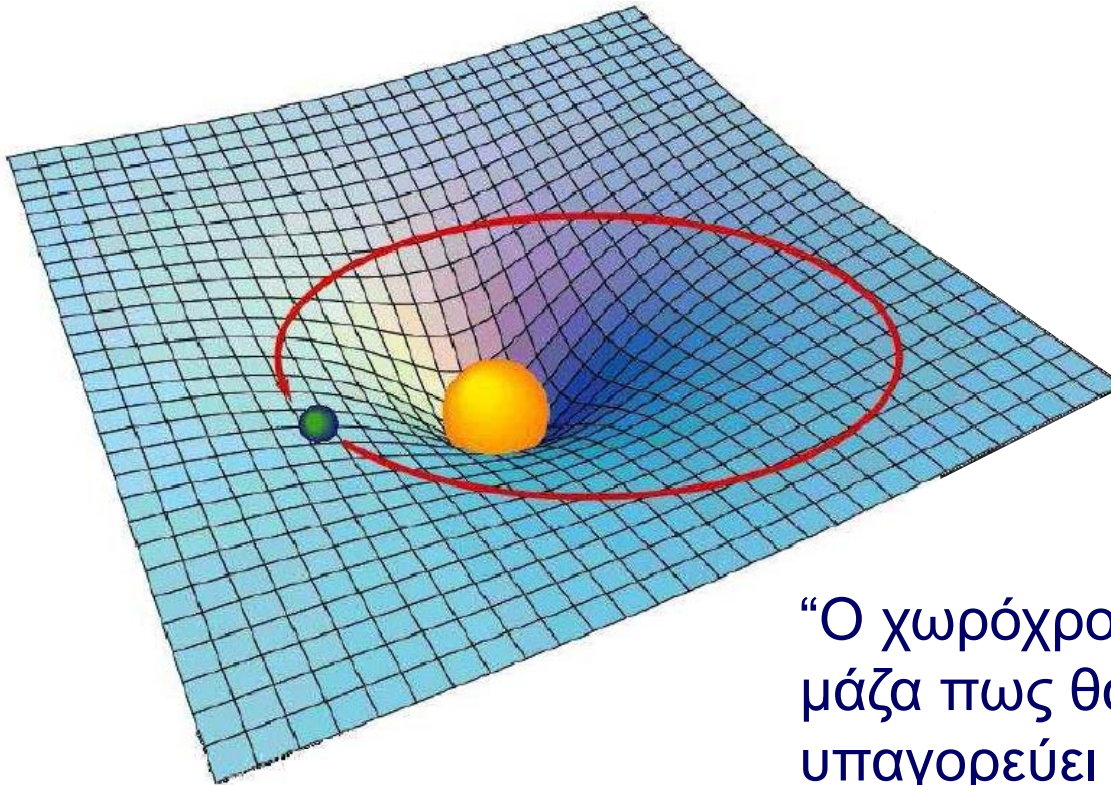
Γενική Θεωρία της Σχετικότητας

- Η τοπική κατανομή της μάζας (ή της Ενέργειας) προσδιορίζει τη γεωμετρία του χωρόχρονου.
- Όλα τα σώματα εξ αιτίας της μάζας προκαλούν καμπύλωση στον χωρόχρονο.
- Η καμπύλωση στον χωρόχρονο αναδεικνύεται ως επιταχυνόμενη κίνηση την οποία ο Νευτωναs προσδιόρισε πως δημιουργείται λόγω των βαρυτικών δυνάμεων.



Γενική Θεωρία της Σχετικότητας

- **Γαιωδετική Γραμμή:** Καθώς ένα σώμα κινείται στον καμπυλωμένο χώρο ακολουθεί μια ευθύγραμμη πορεία η οποία αποτελεί εξ ορισμού το συντομότερο δρόμο μεταξύ δύο σημείων.



“Ο χωρόχρονος υπαγορεύει στη μάζα πως θα κινηθεί και η μάζα υπαγορεύει στον χωρόχρονο πως θα καμπυλωθεί”

Οι τρεις πειραματικές δοκιμασίες ελέγχου

Όταν ο Einstein διατύπωσε την Γενική Θεωρία της Σχετικότητας πρότεινε τις ακόλουθες τρεις πειραματικές δοκιμασίες ελέγχου

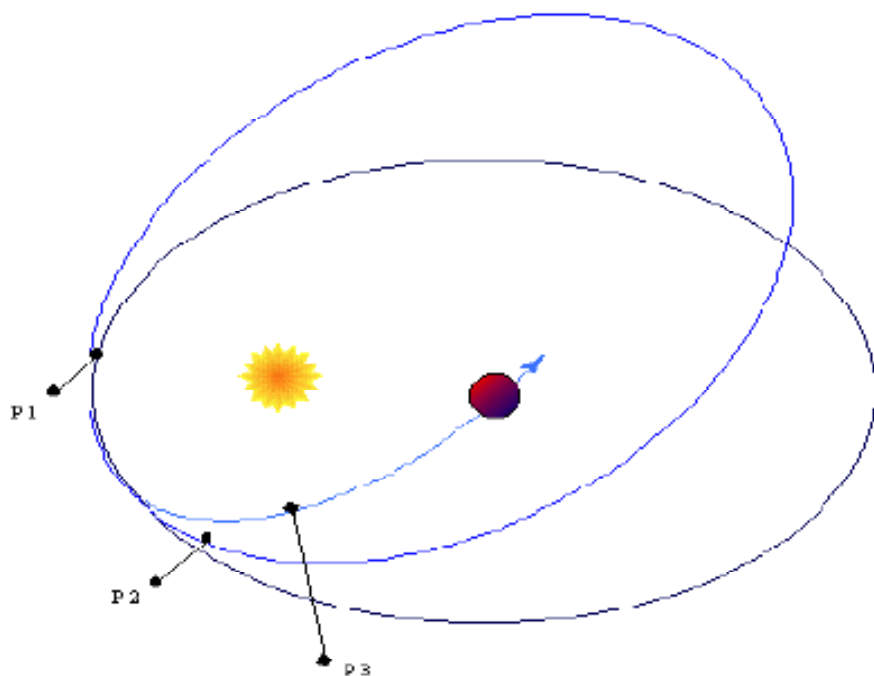
Την εξήγηση της ανώμαλης μετατόπισης του περιηλίου του Ερμή.

Την εκτροπή του φωτός από τον Ήλιο.

Τη μετατόπιση του φάσματος του φωτός προς το ερυθρό λόγω της βαρύτητας.

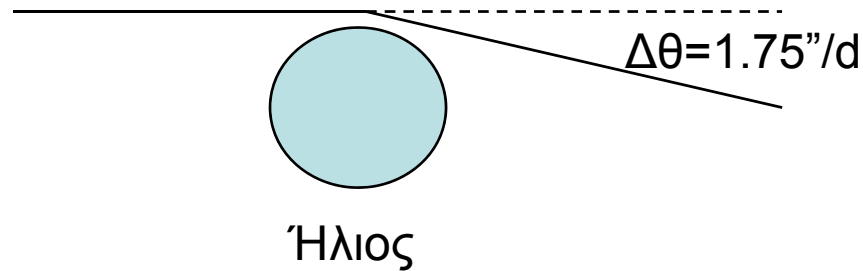
Μετατόπιση του Περιηλίου

Το 1859 ο Le Verrier ανακοίνωσε πως στην τροχιά του Ερμή υπήρχε μια ανεξήγητη προήγηση του περιηλίου.



	Παρατήρηση	ΓΘΣ
Ερμής	$(43.11 \pm 0.45)''$	$43.03''$
Αφροδίτη	$(8.4 \pm 4.8)''$	$8.6''$
Γη	$(5.0 \pm 1.2)''$	$3.8''$

Εκτροπή του φωτός



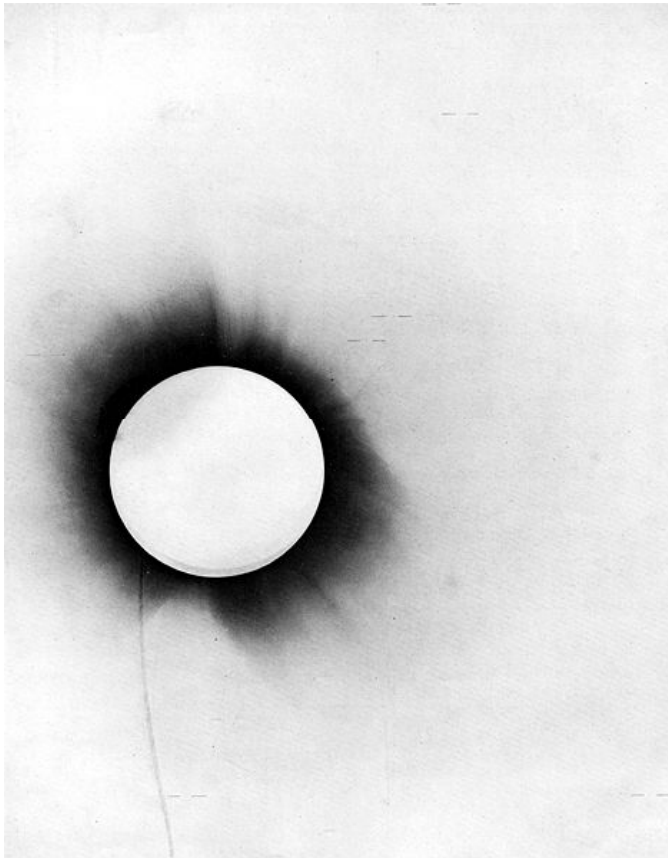
Με βάση την Αρχή της Ισοδυναμίας

$$E = mc^2 \Rightarrow m = \frac{E}{c^2} \Rightarrow m = \frac{hf}{c^2}$$

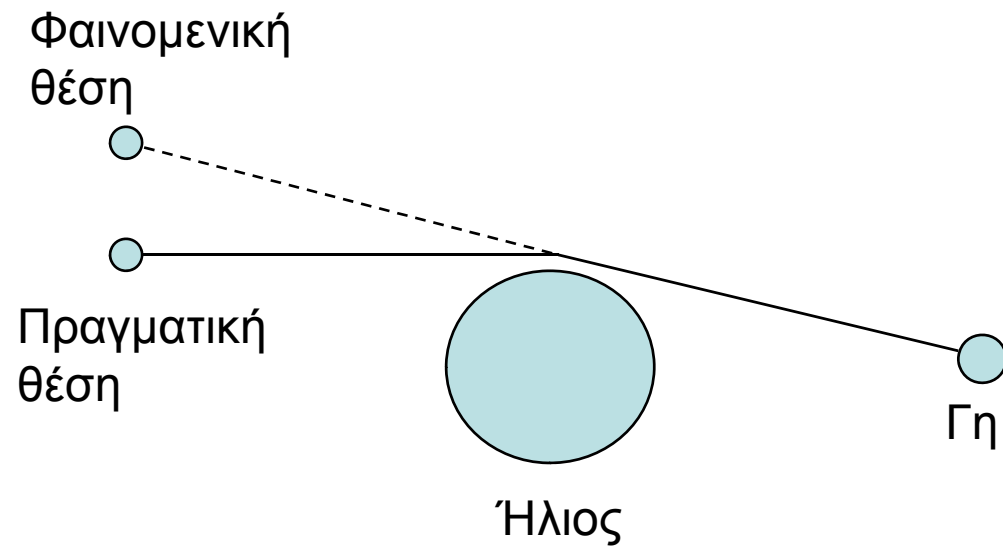
Τα φωτόνια έλκονται από μάζες. Καθαρή εκτροπή $\Delta\theta = 0.875''/d$

Λαμβάνοντας υπ' όψη την καμπύλωση του χωρόχρονου γύρω από την μάζα του Ηλίου : Ολική εκτροπή $\Delta\theta = 1.75''/d$

Εκτροπή του φωτός



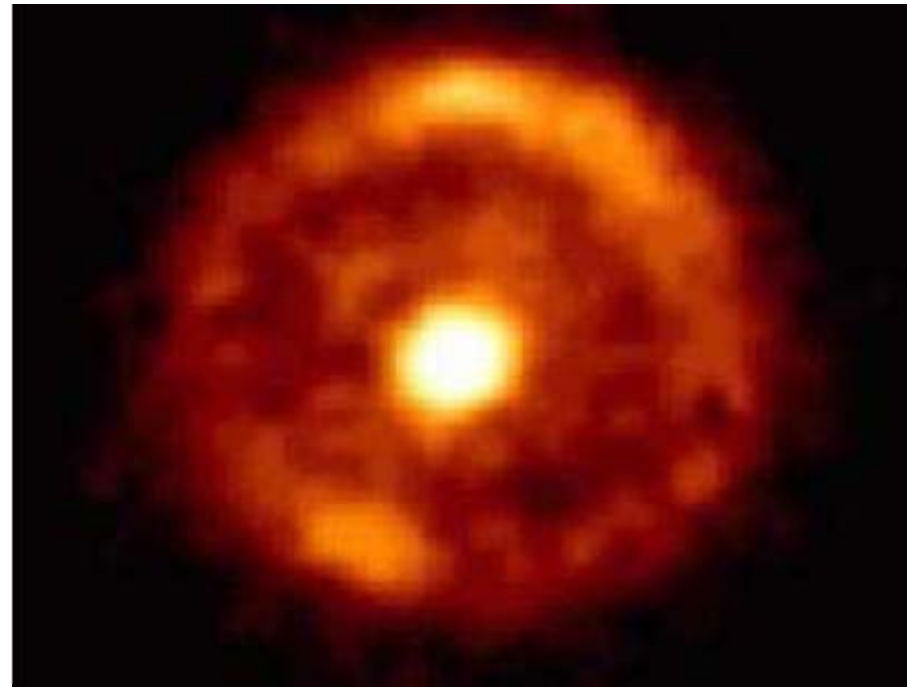
Το πρώτο πείραμα το 1919 από τους Eddington και Crommelin.



Εκτροπή του φωτός

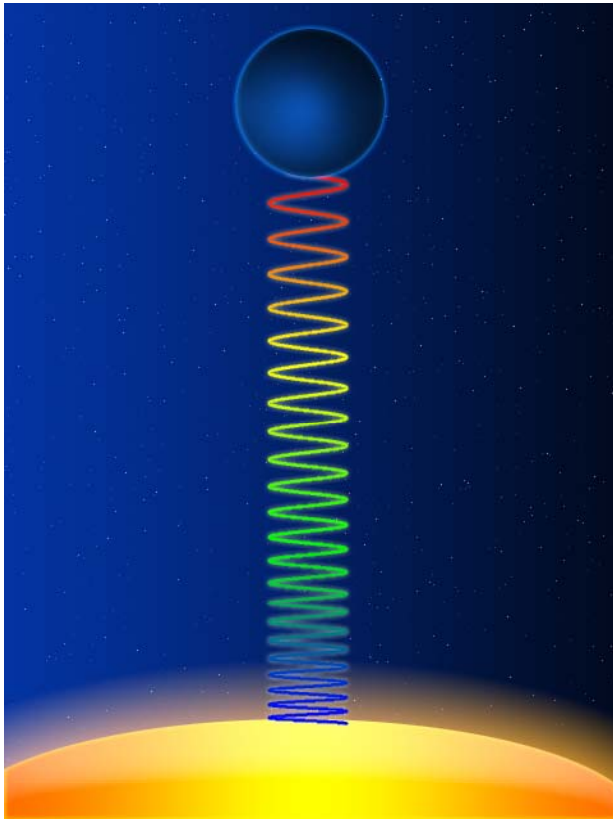


Einstein Cross



Einstein Ring

Βαρυτική Ερυθρά Μετατόπιση

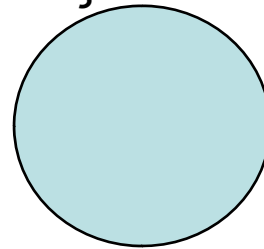


Δέκτης



y

Πομπός



$$f = f_0 \left(1 - \frac{gy}{c^2} \right)$$

$$\frac{\Delta f}{f} = -\frac{gy}{c^2}$$

Μελανές Οπές

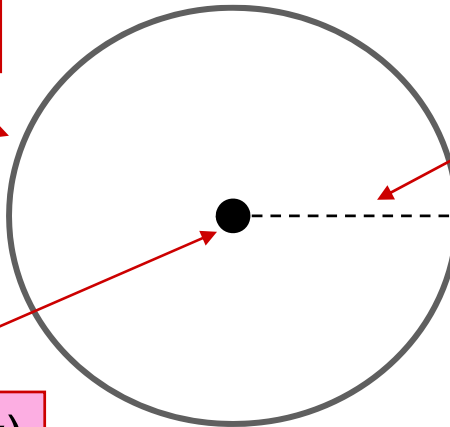
Πρώτη αναφορά τον 18^ο αιώνα από τον John Michell

1916 Karl Schwarzschild : σχετικιστική λύση για μη περιστρεφόμενη μελανή οπή
1939 Oppenheimer-Snyder: Υπολογισμός βαρυτικής κατάρρευσης σε μελανή οπή
1963 Roy Kerr: σχετικιστική λύση για περιστρεφόμενη μελανή οπή

Ορίζοντας Γεγονότων

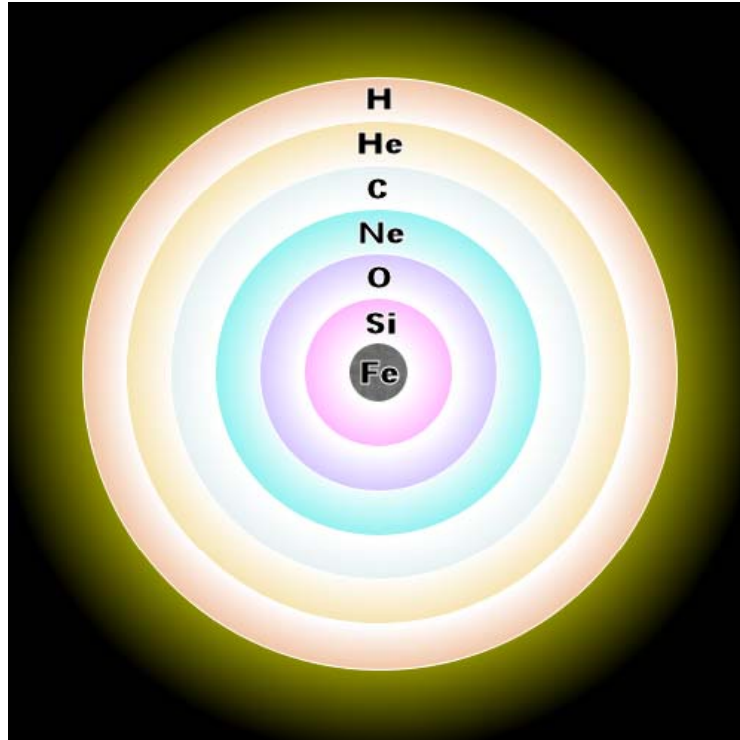
Ακτίνα Schwarzschild

Ιδιομορφία(Singularity)



$$R = \frac{2GM}{c^2}$$

Δημιουργία Μελανών Οπών αστρικού μεγέθους



Τα στρώματα των στοιχείων ενός αστέρα μεγάλης μάζας ακριβώς πριν την βαρυτική του κατάρρευση (Not to scale)

Εξέλιξη αστέρα μάζας $> 20M_{\text{Ηλίου}}$



Εξάντληση “πυρηνικού καυσίμου”



Βαρυτική κατάρρευση

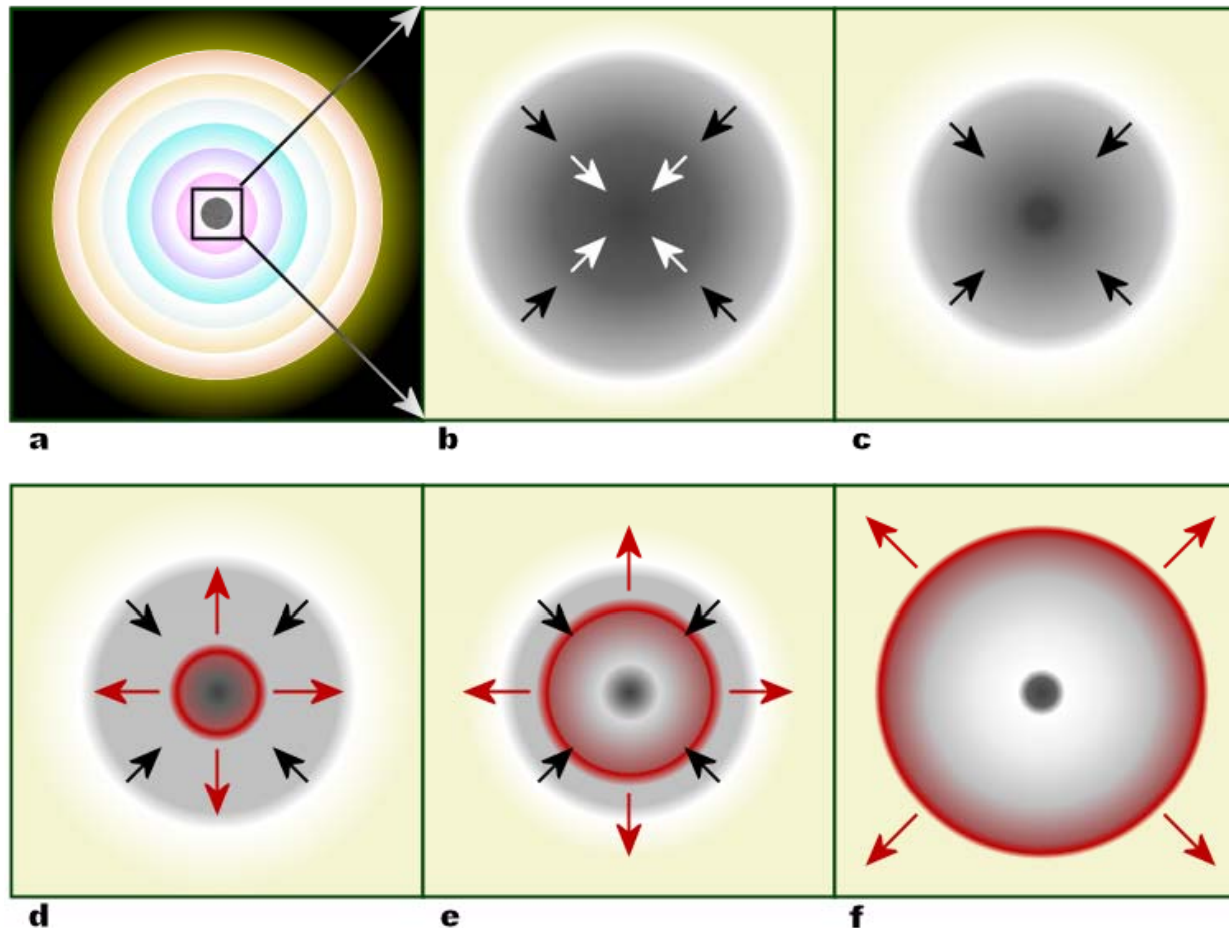


Δημιουργία υπερκαινοφανούς αστέρα



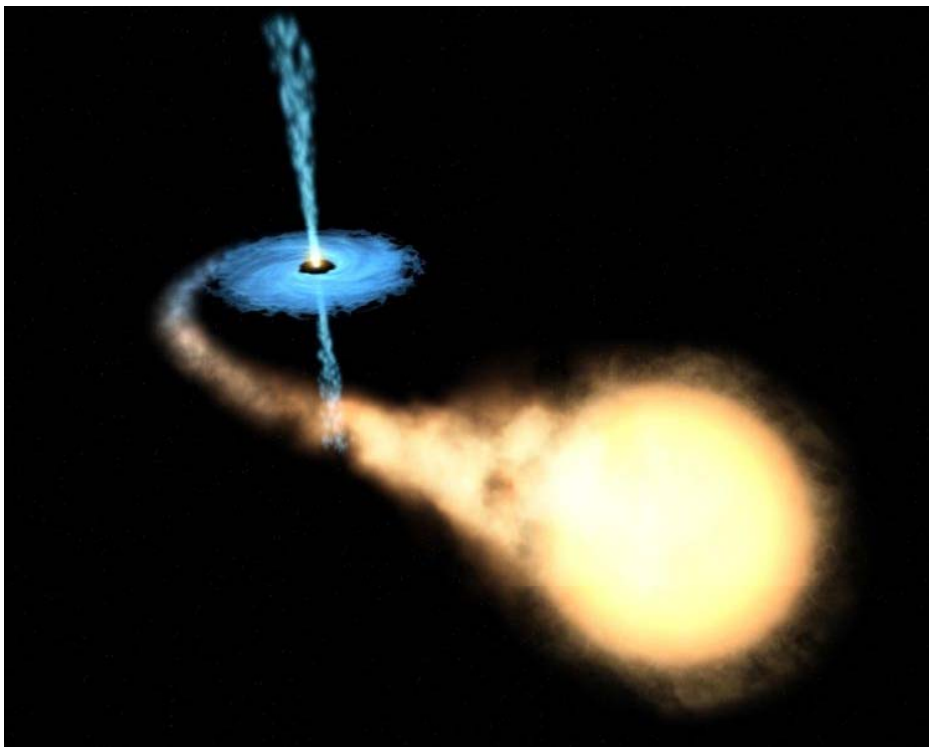
Μελανή Οπή

Δημιουργία Μελανών Οπών αστρικού μεγέθους

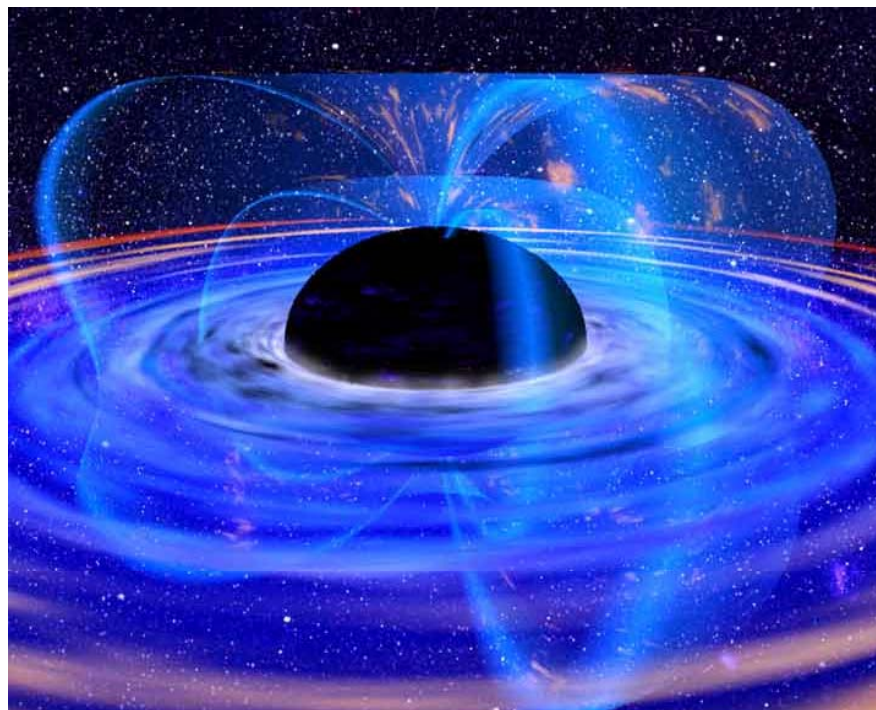


Στάδια της Βαρυτικής κατάρρευσης ενός αστέρα μεγάλης μάζας και δημιουργία υπερκαινοφανούς αστέρα.

Ανίχνευση Μελανών Οπών

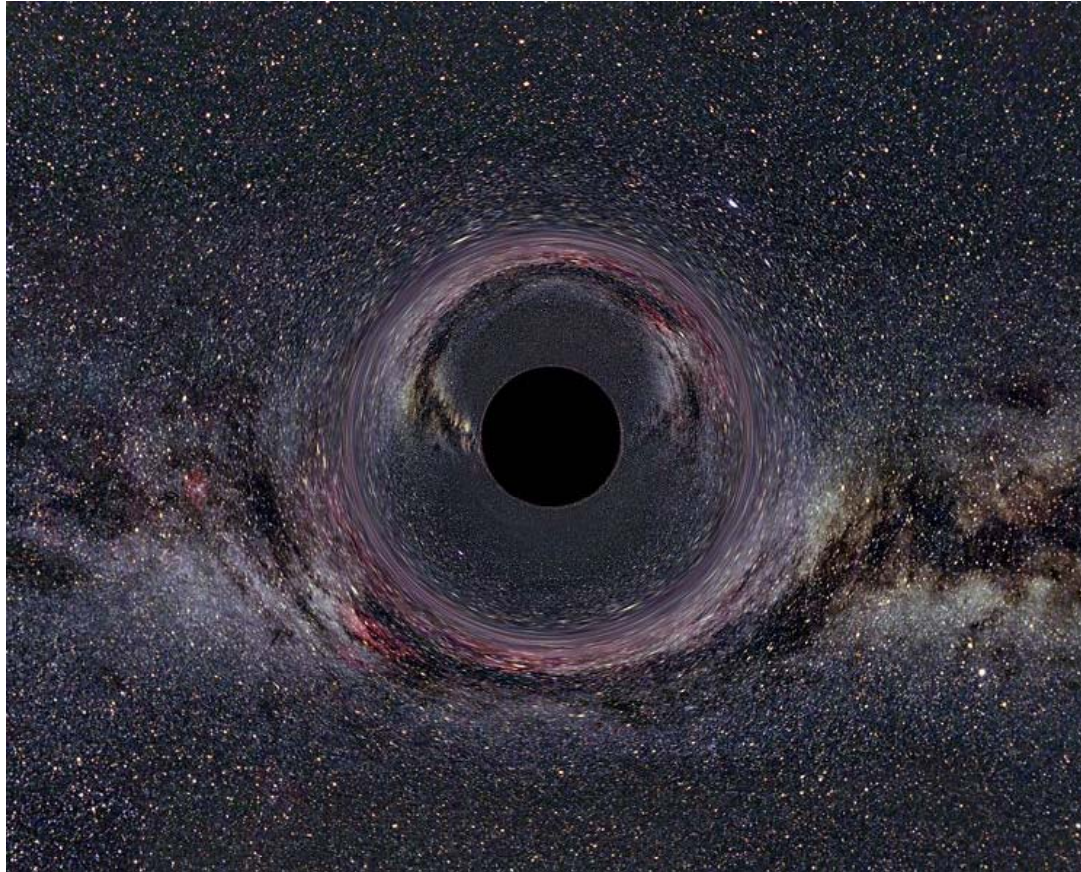


Δημιουργία του δίσκου προσαύξεσης μιας μελανής οπής η οποία “τραβά” ύλη από γειτονικό άστρο.



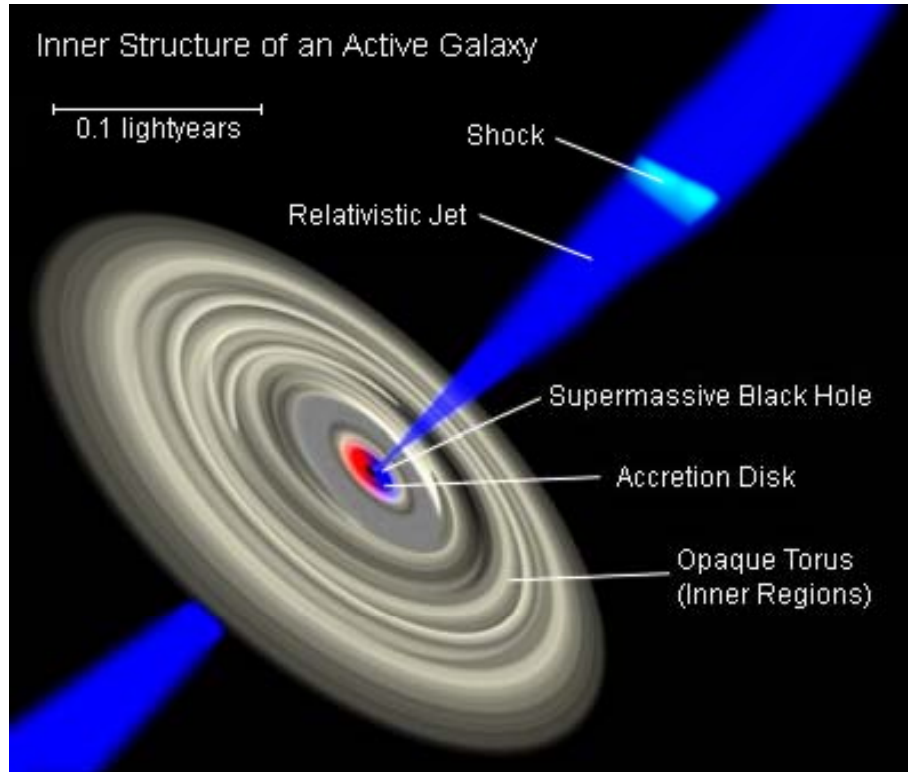
Ο δίσκος προσαύξεσης γύρω από μια μελανή οπή. Η τριβή από τα αέρια παράγει τεράστια ποσότητα θερμότητας. Τα αέρια εκπέμπουν ακτίνες Χ.

Κοντά σε μια Μελανή Οπή

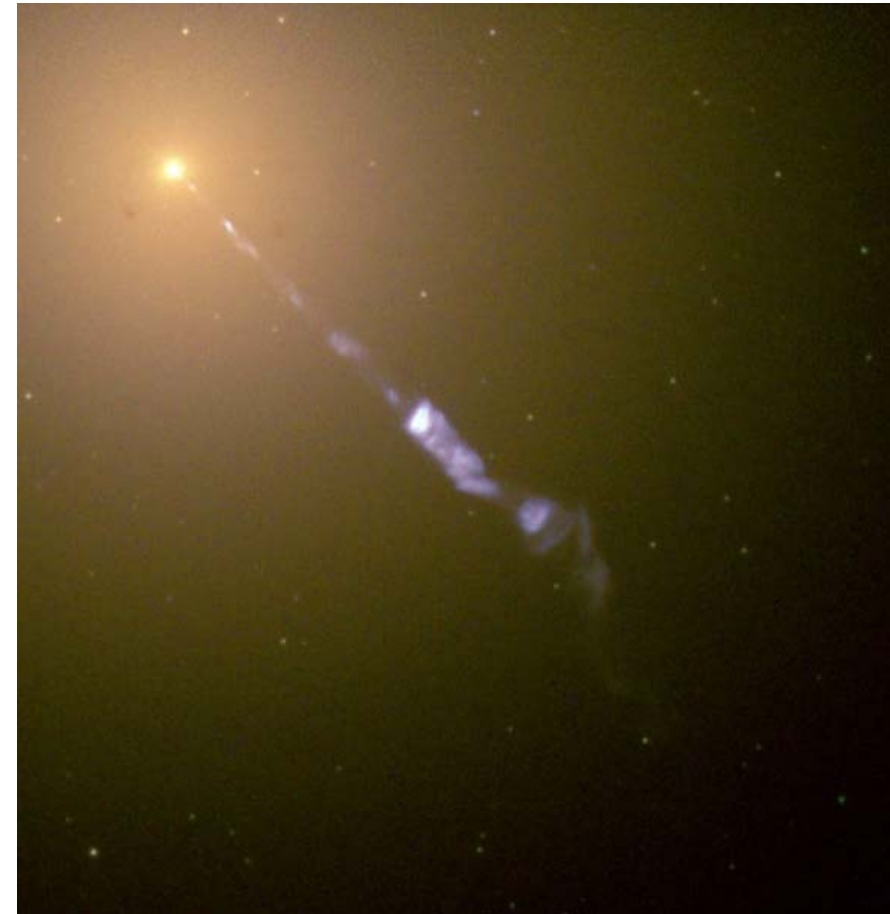


Εικόνα εξομοίωσης μιας μελανής οπής με φόντο τον Γαλαξία μας όπως θα την βλέπαμε από απόσταση 600 Km. Η μελανή οπή έχει μάζα ίση με 10 ηλιακές μάζες. Για να σταθούμε ακίνητοι στην συγκεκριμένη θέση θα χρειαζόμασταν μια αντίθετη επιτάχυνση ίση με 400 εκατομμύρια g!!!

Υπερμεγέθεις Μελανές Οπές



Σχηματισμός σχετικιστικού πίδακα
κάθετα ως προς τον δίσκο
προσαύξησης μίας υπερμεγέθους
μελανής οπής στο κέντρο ενός
ενεργού γαλαξία.

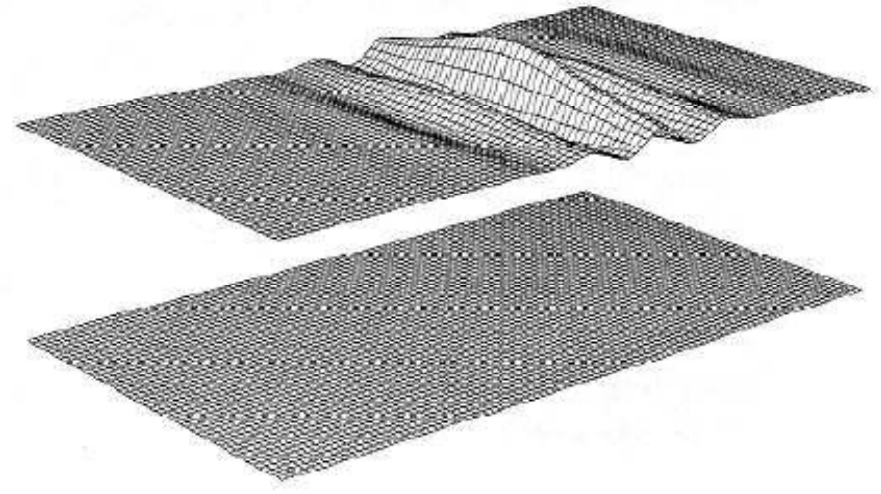


Active Galaxy M87

Βαρυτική Ακτινοβολία

1916 Einstein: Οι εξισώσεις πεδίου της Γενικής Σχετικότητας Ικανοποιούνταν με λύσεις κυματικής μορφής

Τα Βαρυτικά κύματα προκαλούν Διατάραχές στον Χωρόχρονο



Βαρυτικά κύματα => συμπιέζουν-επεκτείνουν μια ράβδο κατά μήκος του άξονα της.

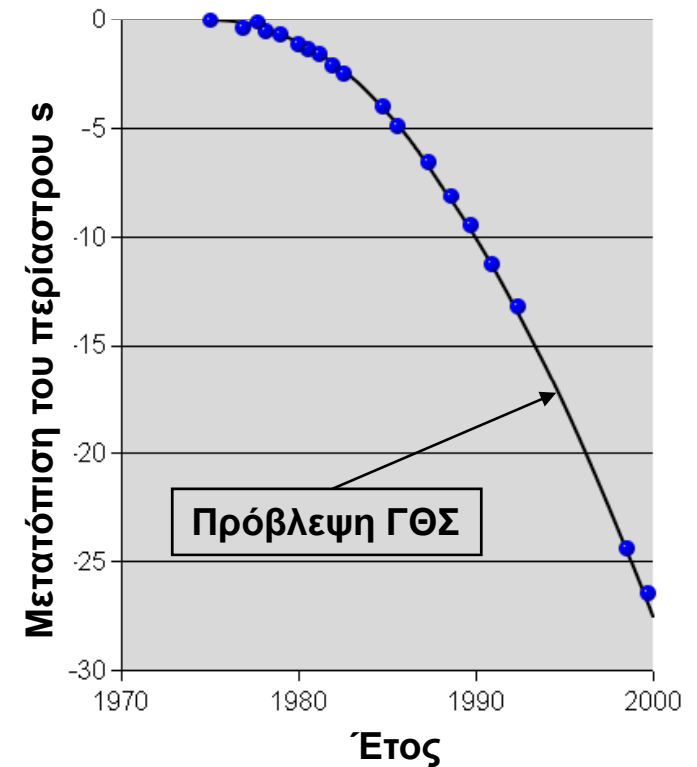
Πρώτα πειράματα: 1968 Joseph Weber (Ράβδοι του Weber)

Έμμεση Ανίχνευση Βαρυτικής Ακτινοβολίας

1974: Ανακάλυψη συστήματος διπλού πάλσαρ (PSR B1913+16)
Russell Hulse – Joseph Taylor (Nobel Prize 1993))

Διπλό πάλσαρ = δύο αστέρες νετρονίων
Απόσταση από τη Γη : 21000 έτη φωτός
Μάζες αστέρων νετρονίων : $\sim 1.4 M_{\text{Ηλίου}}$
Διάμετρος αστέρων νετρονίων : 20 Km

Περίοδος περιστροφής : 7.75 ώρες
Ελάττωση Περιόδου : 76.5 $\mu\text{sec}/\text{έτος}$
Ελάττωση Απόστασης: 3.5 m/έτος
Χρόνος ζωής συστήματος 300×10^6 έτη



Ανιχνευτές Βαρυτικής Ακτινοβολίας

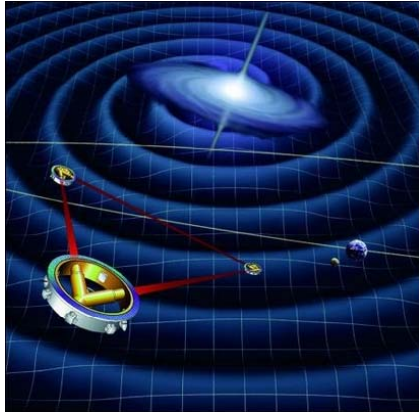
Συμβολόμετρα (Michelson-Morley)

LIGO : Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory
Livingston, Louisiana – Hanford, Richland, Washington

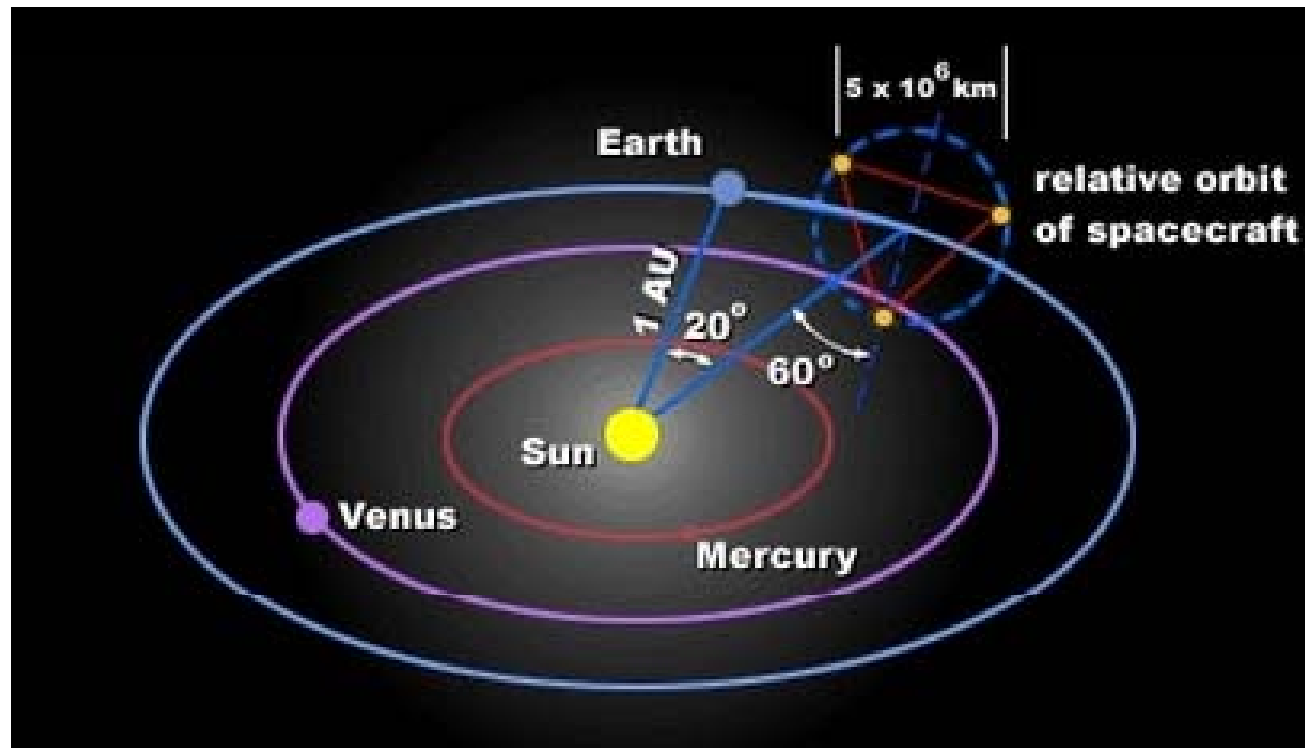


VIRGO: Cascina Pisa Italy, TAMA 300: Japan, GEO 600: Germany

Ανιχνευτές Βαρυτικής Ακτινοβολίας



LISA: Laser Interferometer Space Antenna
ESA-NASA (2018)



Κοσμολογία

Ο Einstein το 1917 χρησιμοποίησε πρώτος τη Θεωρία της Γενικής Σχετικότητας για να υπολογίσει ένα μοντέλο για το Σύμπαν.

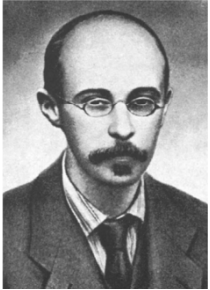
Το Μοντέλο του Σταθερού Σύμπαντος

- Δεν υπάρχει συγκεκριμένη γένεση και αρχή του Σύμπαντος.
- Υπάρχει συνεχής δημιουργία ύλης έτσι ώστε η πυκνότητα μάζας να παραμένει σταθερή.
- Το Σύμπαν είναι άπειρο σε μέγεθος και ηλικία.

Ένα τέτοιο σύμπαν θα μπορούσε να υποστεί βαρυτική κατάρρευση.

Ο Einstein στις εξισώσεις του εισήγαγε την “κοσμολογική σταθερά” Λ , η οποία προκαλούσε μία δύναμη που αντιτίθονταν στη βαρύτητα.

Κοσμολογία



1922-24 Alexander Friedmann: Δεν υιοθέτησε την κοσμολογική σταθερά του Einstein και παρήγαγε τις πρώτες διαφορικές λύσεις των εξισώσεων της Γενικής Θεωρίας της Σχετικότητας που έδειχναν πως το Σύμπαν διαστέλλεται.



1927 Georges Lemetre: Ανεξάρτητα από τον Friedmann παρουσίασε την ιδέα του διαστελλομένου σύμπαντος ξεκινώντας από τις εξισώσεις της Σχετικότητας. Σήμερα θεωρείται ο εμπνευστής της θεωρίας της μεγάλης έκρηξης.

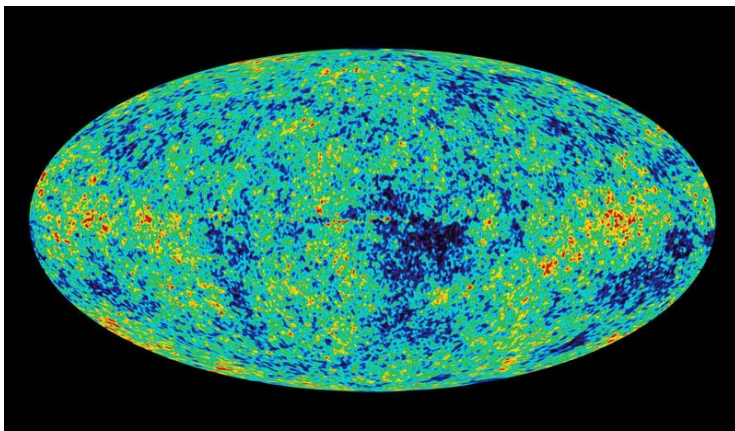


1929 Edwin Hubble: 100-inch telescope, Mount Wilson Ανακάλυψε πως οι γαλαξίες απομακρύνονται μεταξύ τους. “Η ερυθρή τους μετατόπιση είναι ανάλογη με την απόστασή τους (Νόμος του Hubble).”

Κοσμολογία

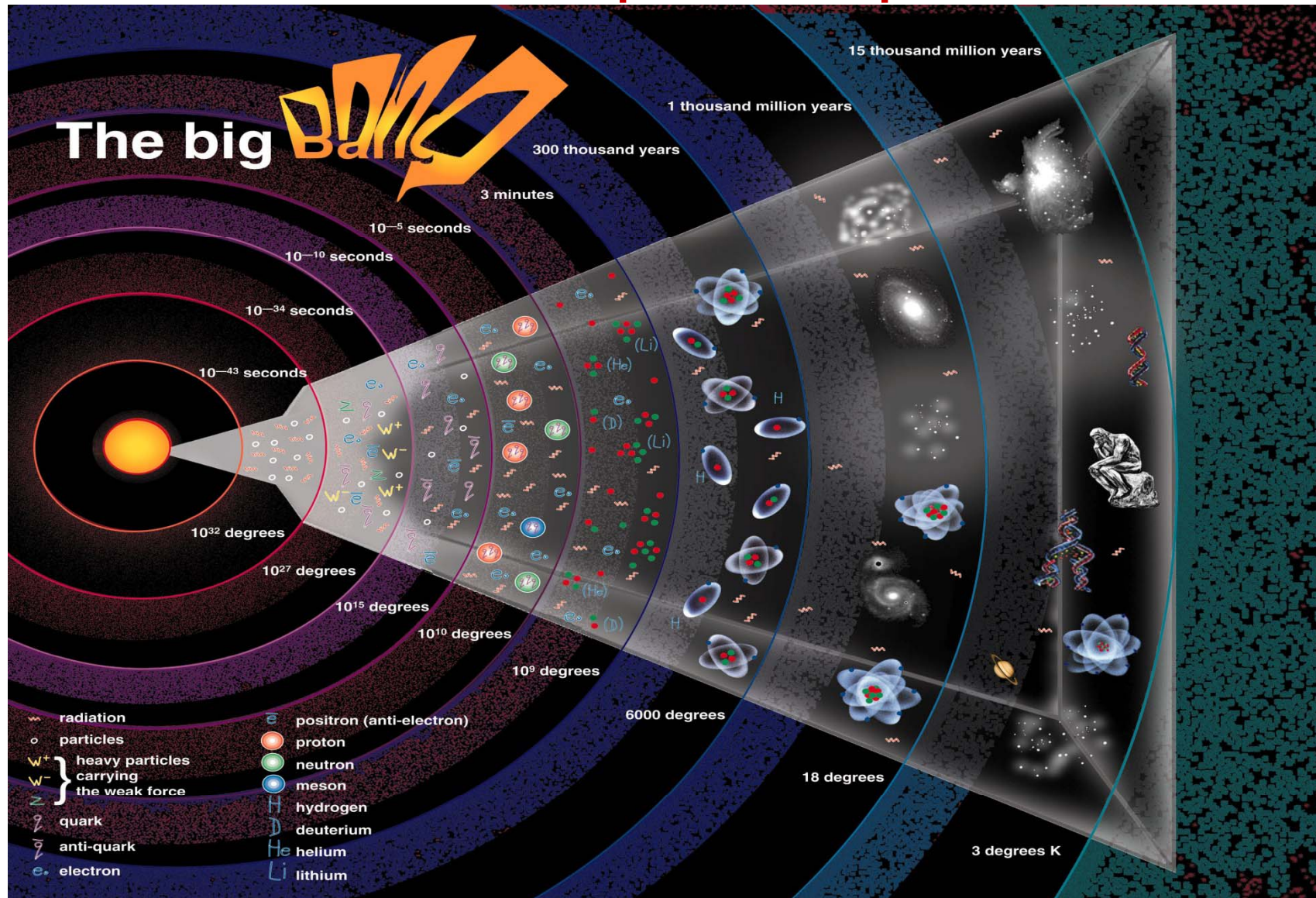


1965 Arno Penzias – Robert Wilson:
Ανακάλυψη της κοσμικής μικρο-
κυματικής ακτινοβολίας υποβάθρου.
 $2.725^{\circ}\text{ K} \Rightarrow 160.2\text{ GHz}$
(Nobel Prize 1978)



2003 WMAP:
Wilkinson Anisotropy Probe(NASA)
Ηλικία : 13.7 ± 0.2 δισεκατομ. έτη
Σύσταση: 4% βαρυονική ύλη
22% σκοτεινή ύλη
74% σκοτεινή ενέργεια

Η θεωρία της μεγάλης έκρηξης Διαστελλόμενο Σύμπαν



Η θεωρία της μεγάλης έκρηξης Διαστελλόμενο Σύμπαν

