
Εκατό χρόνια με τον Αϊνστάιν

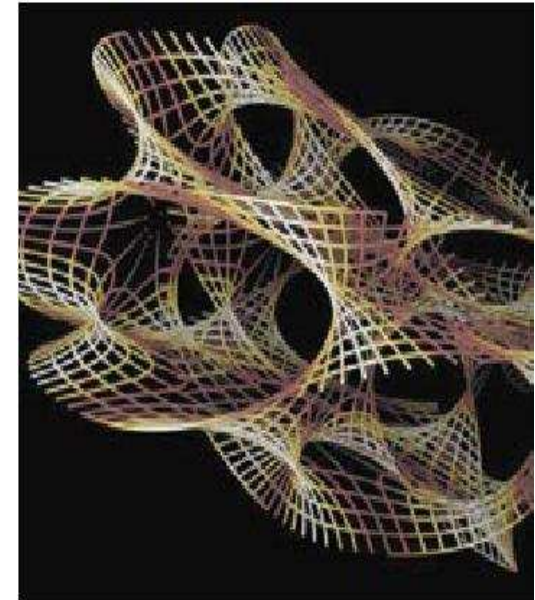
ΓΙΩΡΓΟΣ ΣΙΩΨΗΣ

Πανεπιστήμιο Τεννεσσή

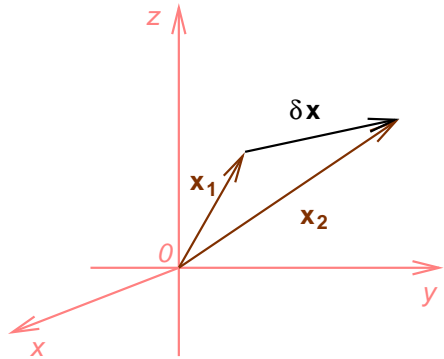
12 Ιουνίου 2005

100 χρόνια πέρασαν απ' τη χρονιά των μεγάλων ανακαλύψεων του Αϊνστάιν που άλλαξαν τον τρόπο που αντιλαμβανόμαστε θεμελιώδεις φυσικές έννοιες (χώρο και χρόνο, μάζα και ενέργεια, βαρύτητα) και βοήθησαν να εδραιωθεί η κβαντική φύση του Σύμπαντος. Η δουλειά του Αϊνστάιν άφησε σημαντικά ερωτήματα αναπάντητα (συμβατότητα βαρύτητας και κβαντομηχανικής, ενοποίηση όλων των δυνάμεων της Φύσης).

Σήμερα έχουμε μια θεωρία που δίνει απαντήσεις σ' αυτά τα ερωτήματα: τη Θεωρία των Χορδών. Θα προσπαθήσω να εξηγήσω πώς η Θεωρία των Χορδών συμπληρώνει και διαφοροποιεί τις ιδέες του Αϊνστάιν δίνοντας μια γεύση της τρέχουσας ερευνητικής δραστηριότητας.



ΝΕΥΤΩΝΕΙΟΣ ΧΩΡΟΣ ΚΑΙ ΧΡΟΝΟΣ



απόσταση μεταξύ δύο σημείων

$$\delta s^2 = \delta x^2 + \delta y^2 + \delta z^2$$

όλοι συμφωνούν (αναλλοίωτη)

οι αδρανείς παρατηρητές δεν αισθάνονται εξωτερικές δυνάμεις.

$$\vec{F} = m\vec{a}$$

Νόμος του Νεύτωνα αναλλοίωτος κάτω από

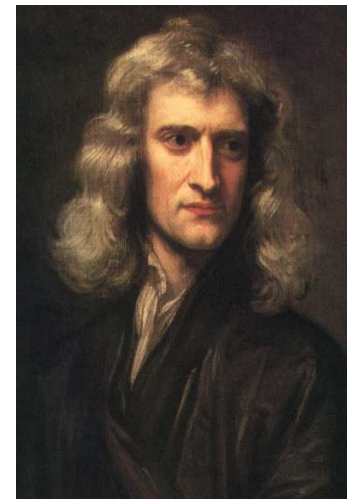
$$\vec{x} \rightarrow \vec{x} - \vec{v}t$$

(μετασχηματισμός Γαλιλέου μεταξύ αδρανών παρατηρητών).

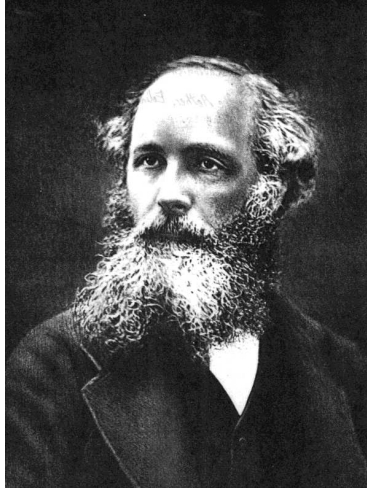
★ Ο Νεύτωνας είναι αδρανής - το μήλο δεν είναι ($a = -g$).



$W=mg$



ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΣ



Ενοποίηση ηλεκτρικών και μαγνητικών
δυνάμεων (Μάξγουελ)
⇒ κύματα
ταξιδεύουν με την ταχύτητα του φωτός

$$c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

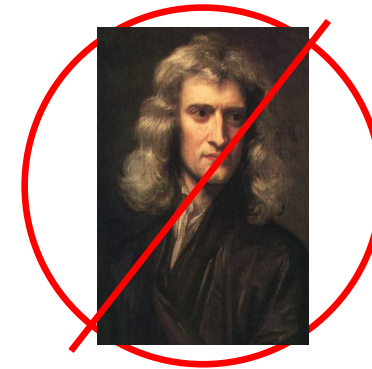
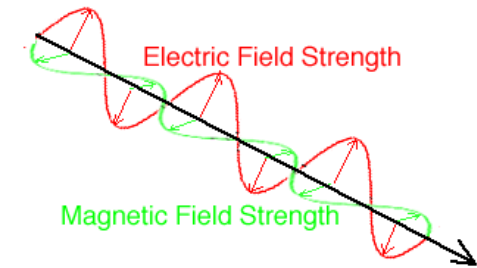
ανεξάρτητα απ' την ταχύτητα του παρατηρητή
⇒ ασύμβατο με τους νόμους του Νεύτωνα.

μετασχηματισμός Λορέντζ:

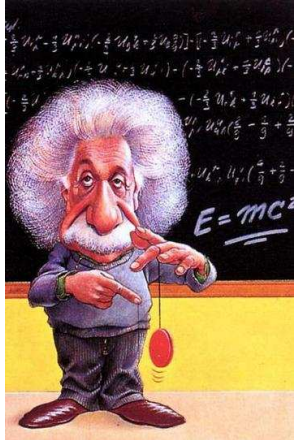
$$x \rightarrow \gamma(x - vt) \quad , \quad t \rightarrow \gamma(t - vx/c^2)$$

($\gamma < 1$ - συστολή) γνωστός πριν τον Αϊνστάιν.

★ Ο Λορέντζ επίσης έδειξε: $E = \frac{3}{4}mc^2$ για ένα ηλεκτρόνιο (ΛΑΘΟΣ!)



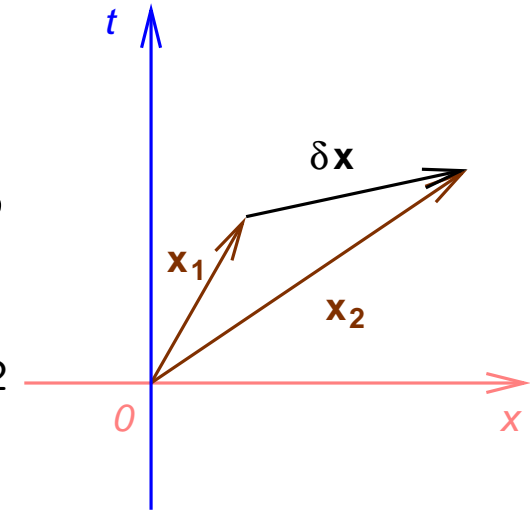
ΧΩΡΟΧΡΟΝΟΣ



Αϊνστάιν: χώρος και χρόνος δεν ξεχωρίζουν
Αναλλοίωτη απόσταση μεταξύ γεγονότων:

$$\delta s^2 = -c^2 \delta t^2 + \delta x^2 + \delta y^2 + \delta z^2 = -c^2 \delta \tau^2$$

τ : χρόνος για τον ακίνητο παρατηρητή.



ΕΙΔΙΚΗ ΣΧΕΤΙΚΟΤΗΤΑ

συνέπειες μεγάλης εμβέλειας:

$$E = mc^2$$



ΚΒΑΝΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗ

Ηλιακό
φάσμα:

$$I(\nu) = \frac{8\pi kT\nu^2}{c^3}$$

← ΛΑΘΟΣ!

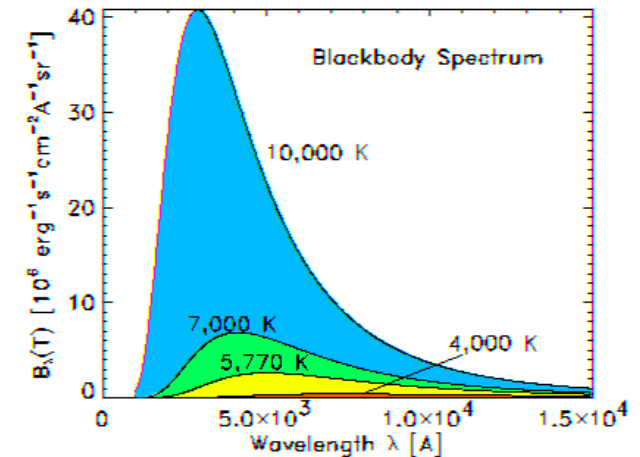


Σε μια κίνηση απελπισίας, ο Πλανκ προτείνει (το φως εκπέμπεται σαν κβάντα)

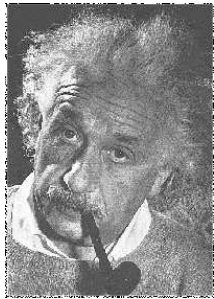
$$E = h\nu$$

αλλάζει ένα ολοκλήρωμα σε σειρά:

$$I(\nu) = \frac{8\pi h}{c^3} \frac{\nu^3}{e^{h\nu/kT} - 1}$$

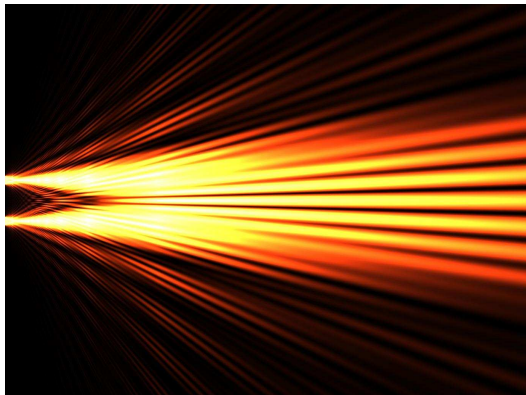
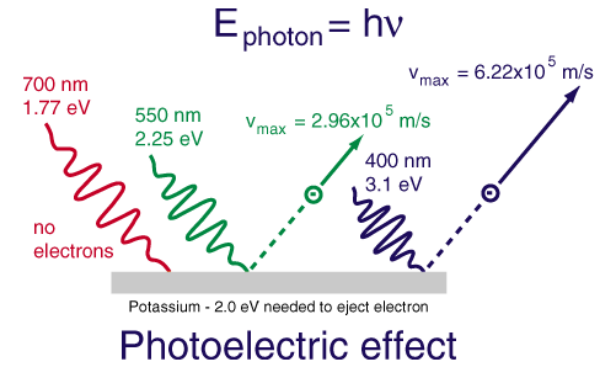


← ΣΩΣΤΟ!



Ο Αϊνστάιν εξηγεί το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο (Βραβείο Νόμπελ 1921)

► το φως απορροφάται σαν κβάντα.



ΕΡΩΤΗΣΗ: το φως ταξιδεύει σαν σωματίδια (φωτόνια);

► δυσκολοχώνευτο: τα φωτόνια δεν μπορεί να είναι **μπαλλάκια** - συμβάλλουν!

Ο Αϊνστάιν αντιλήφθηκε τις συνέπειες **πριν** την ανακάλυψη της Αρχής της Απροσδιοριστίας απ' τον Χάιζενμπεργκ

$$\Delta p \Delta x \geq \hbar$$

► δεν του άρεσε



“Ο Θεός δεν παίζει ζάρια με το Σύμπαν”

ΚΒΑΝΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗ + ΣΧΕΤΙΚΟΤΗΤΑ

Εξίσωση των Klein-Gordon (ανακαλύφθηκε απ' τον Schrödinger)

- ▶ δεν δουλεύει (αρνητικές πιθανότητες)

Εξίσωση του Dirac

- ▶ οδηγεί σε θεωρία σπίν (ανοησίες).

Τελικά, Κβαντική Θεωρία Πεδίου - θρίαμβος της ανθρώπινης διανόησης!

- ◇ εξηγεί την Απαγορευτική Αρχή του Pauli
- ◇ προβλέπει την ύπαρξη αντι-ύλης

ΚΒΑΝΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗ + ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΣ

ισχύς ηλεκτρομαγνητικών αλληλεπιδράσεων

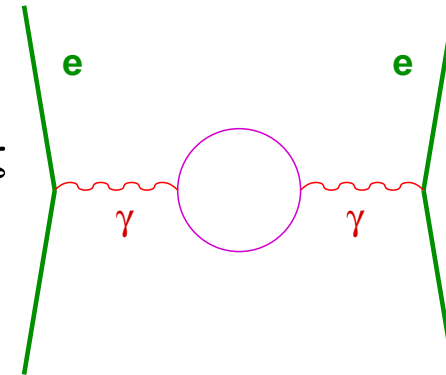
$$\alpha = \frac{e^2}{2hc} = \frac{1}{137}$$

Κβαντική ηλεκτροδυναμική - μη πεπερασμένες ποσότητες

Η πόλωση του **κενού** μεταβάλλει το Νόμο Coulomb

$$V(r) = \frac{e(r)}{4\pi r}$$

- ★ $e(r)$ φθίνουσα συνάρτηση της απόστασης r
- ★ το **κενό** είναι διηλεκτρικό (μονωτής)
- ★ σε μεγάλες ενέργειες, οι ηλεκτρικές δυνάμεις γίνονται ισχυρότερες.



ΠΥΡΗΝΙΚΕΣ ΔΥΝΑΜΕΙΣ

ΑΣΘΕΝΕΙΣ: Ραδιενεργή ακτινοβολία β



αλληλεπίδραση σ' ένα σημείο με ισχύ (Fermi)

$$G_F = 1.166 \times 10^{-5} \text{GeV}^{-2}$$

δεν ισχύει σε υψηλές ενέργειες (άπειρη πιθανότητα)

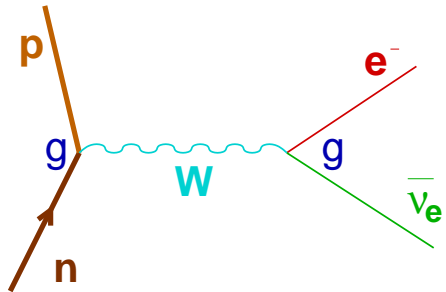
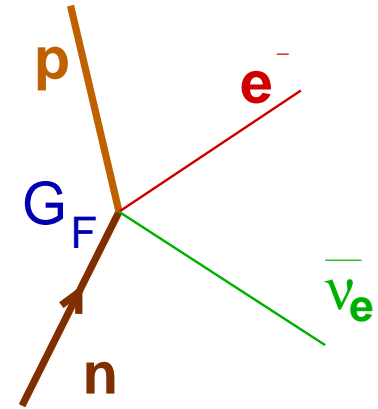
Εισάγουμε σωματίδιο W , φορέα της αλληλεπίδρασης.

$$G_F \sim \frac{\alpha_W}{(m_W c^2)^2}, \quad m_W \sim 80 m_{\text{πρωτονίου}}$$

ισχύς ασθενών πυρηνικών δυνάμεων:

$$\alpha_W = \frac{1}{29}$$

$\alpha/\alpha_W = \sin^2 \theta_W$ (γωνία Weinberg).



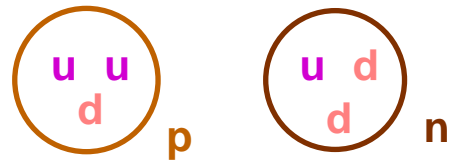
ΙΣΧΥΡΕΣ: Κβαντική Χρωμοδυναμική

Τα κουάρκ και τα γλουόνια έχουν
χρωματικό φορτίο

► δεν είναι ελεύθερα

Μόνο “λευκά” σώματα είναι “ορατά”
(πρωτόνια, νετρόνια, κλπ)

Χαρακτηριστική ενέργεια:



τα πυρηνικά σωματίδια
αποτελούνται από κουάρκ.

$$\Lambda_{\chi} = 0.236 \text{ GeV} \sim \frac{1}{5} m_{\text{πρωτονίου}} c^2$$

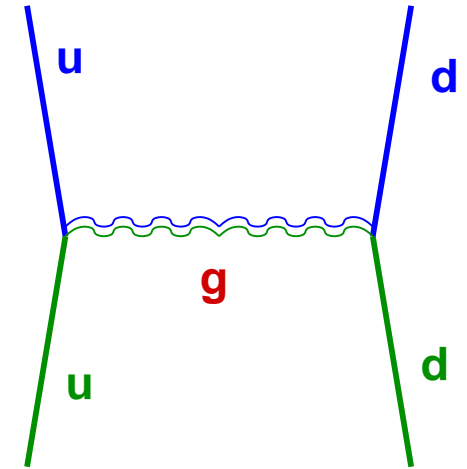
★ ασυμπτωτική ελευθερία

Σε υψηλές ενέργειες οι δυνάμεις **εξασθενούν**

► τα γλουόνια μετατρέπουν το **κενό** σε παραμαγνητικό υλικό

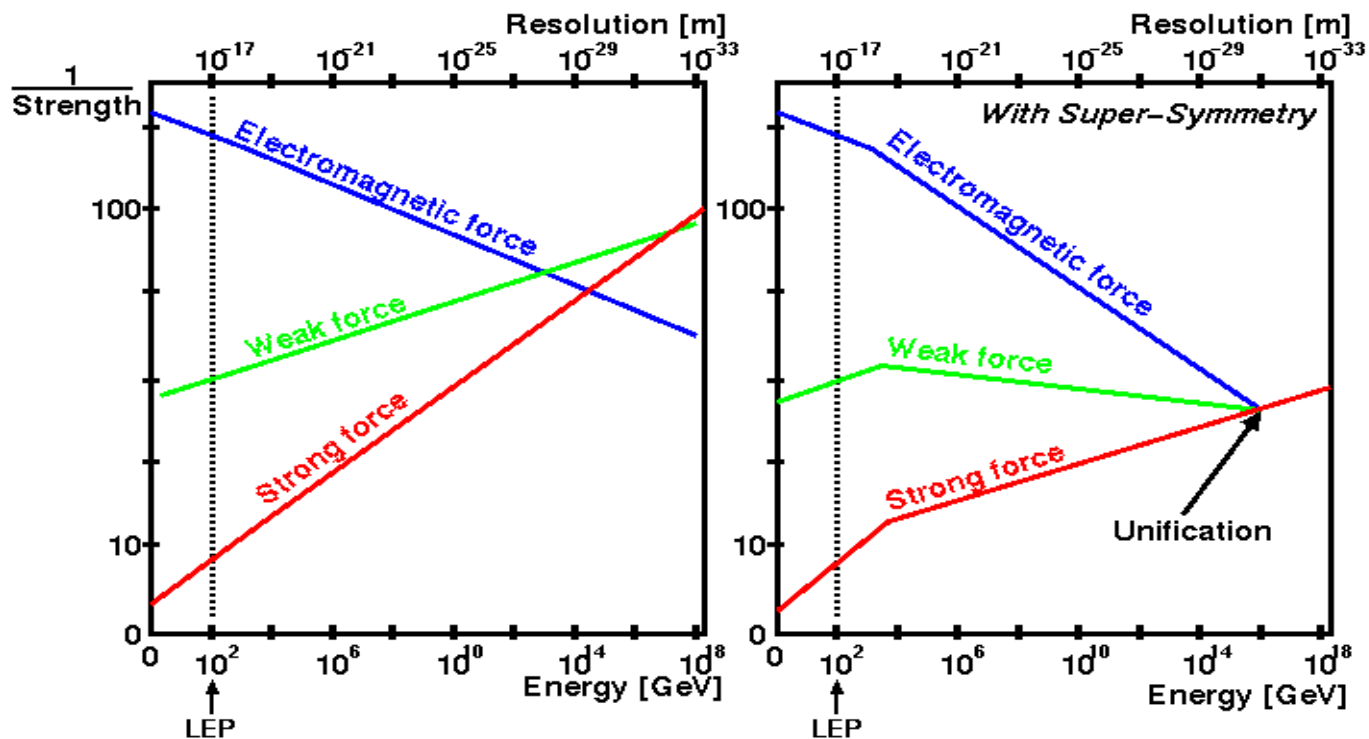
[Politzer, Gross, Wilczek - Βραβείο Νόμπελ 2004]

HM + ΑΣΘΕΝΕΙΣ + ΙΣΧΥΡΕΣ = ΣΤΑΝΤΑΡ ΜΟΝΤΕΛΟ



αλληλεπιδράσεις μέσω
γλουονίων.

ΕΝΟΠΟΙΗΣΗ ΔΥΝΑΜΕΩΝ



σε υψηλές ενέργειες όλες οι δυνάμεις έχουν πάνω κάτω την ίδια ισχύ.

★ Αν συμπεριλάβουμε **υπερσυμμετρία**, αποκτούν ίση ισχύ σε ενέργεια ισοδύναμη με 10^{16} × μάζα πρωτονίου.

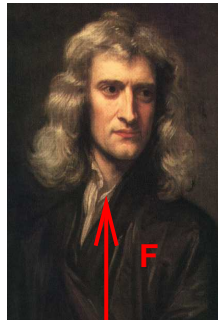
★ Οι δυνάμεις της Φύσης φαίνεται να έχουν κοινή προέλευση.

ΒΑΡΥΤΗΤΑ + ΣΧΕΤΙΚΟΤΗΤΑ



Αϊνστάιν: Το μήλο είναι αδρανής παρατηρητής, όχι ο Νεύτωνας!

► Ο Νεύτωνας αισθάνεται εξωτερική δύναμη, όχι το μήλο.



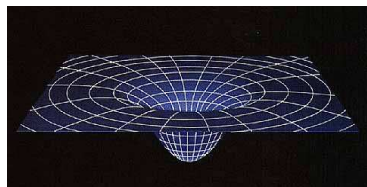
Αρχή Ισοδυναμίας

Το μήλο ακολουθεί **γεωδειακή** γραμμή

$$x \approx -\frac{1}{2}gt^2$$

η μάζα (ενέργεια) **δημιουργεί** τον χωρόχρονο

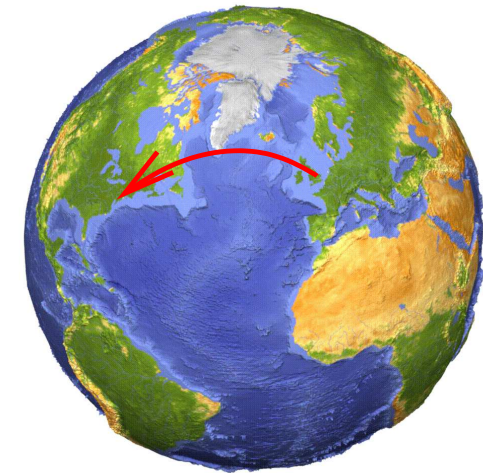
► συντελεστής “**κύρτωσης**” του χρόνου:



$$g_{00} \simeq 1 - \frac{2gR}{c^2} = 1 - 1.4 \times 10^{-9} = 0.99999999986$$



απουσία εξωτερικών δυνάμεων



υπερατλαντική πτήση

ΓΕΝΙΚΗ ΣΧΕΤΙΚΟΤΗΤΑ

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

Άμεση επιτυχία:

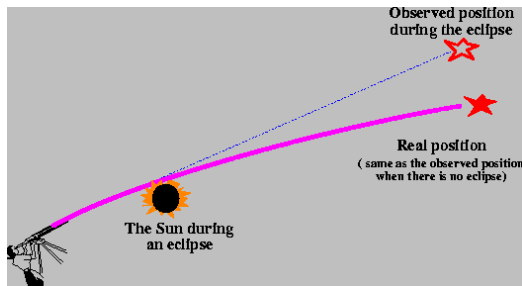
★ Περιστροφή τροχιάς του Ερμή

συνολική: $\Delta\phi = 5,601''/\text{αιώνα}$.

λόγω γεωκεντρικού συστήματος: $5,026''/\text{αιώνα}$.

επίδραση άλλων πλανητών: $532''/\text{αιώνα}$.

Αϊνστάιν: $43''/\text{αιώνα}$.

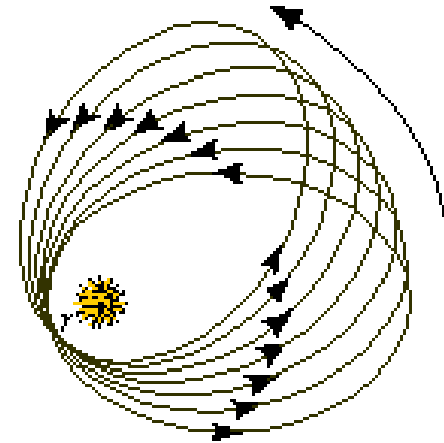


★ λύγισμα ακτίνας φωτός απ' τον Ηλιο

$$\Delta\theta \simeq \frac{4GM_{\odot}}{c^2 R_{\odot}} \simeq 1.75''$$

παρατηρήθηκε απ' τον **Eddington** (1919)

★ διαμόρφωση πυρήνων στοιχείων όταν το Σύμπαν είχε ηλικία $1''$



ΚΟΣΜΟΛΟΓΙΑ

Αστρονομικές μετρήσεις \Rightarrow Επίπεδο Σύμπαν.

Εξίσωση **Friedman**: $\Omega = \frac{\rho}{\rho_0} = 1$, $\rho_0 = \frac{3H^2}{8\pi G}$, $H = \frac{1}{a} \frac{da}{dt}$

★ Κοσμολογική σταθερά: προτάθηκε απ' τον Αϊνστάιν, ώστε $H = 0$
(στατικό Σύμπαν)

► Αντιστοιχεί σε ενέργεια **κενού** (σκοτεινή ενέργεια)

★ την αποκύρηξε μετά την ανακάλυψη της διαστολής του Σύμπαντος απ' τον **Hubble**

$H_0^{-1} \approx 14 \times 10^9$ έτη \sim ηλικία του Σύμπαντος.

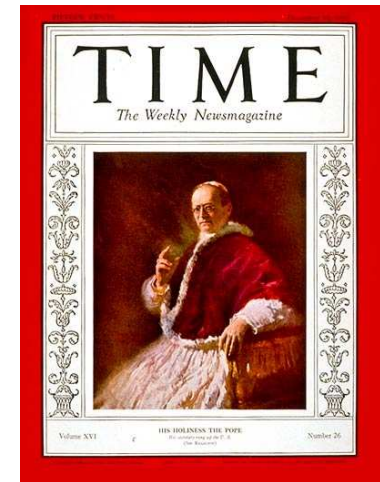
$$\Omega = \Omega_\Lambda + \Omega_{\nu\lambda\eta\varsigma} + \Omega_{\alpha\kappa\tau\iota\nu\omicron\beta\omicron\lambda\iota\alpha\varsigma} + \Omega_\kappa$$

$\Omega_\kappa > 0$ (κλειστό), < 0 (ανοιχτό), $= 0$ (επίπεδο)

$$\Omega_\Lambda \propto \Omega_{\nu\lambda\eta\varsigma} a^3 \propto \Omega_\kappa a^2 \propto \Omega_{\alpha\kappa\tau\iota\nu\omicron\beta\omicron\lambda\iota\alpha\varsigma} a^4$$

★ Σήμερα το Σύμπαν αποτελείται από

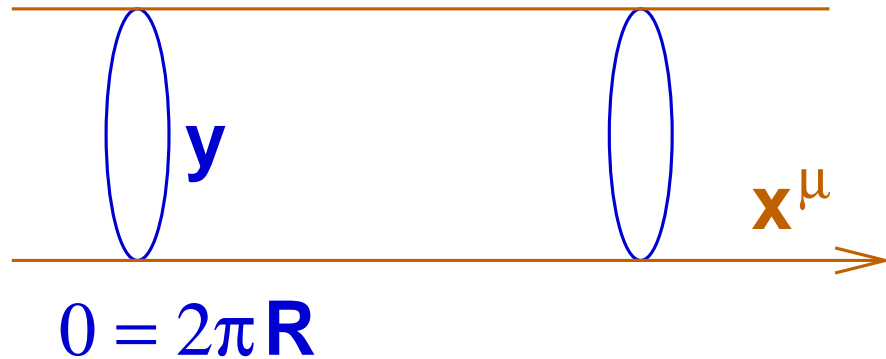
70% σκοτεινή ενέργεια, **26%** σκοτεινή ύλη, **4%** γνωστή ύλη.



$H \neq 0$ ικανοποίησε τον Πάππα.

(Πίος XI)

ΒΑΡΥΤΗΤΑ + ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΣ



Ενοποίηση των **Kaluza-Klein**:

- πρώτη ένδειξη ύπαρξης επιπλέον διαστάσεων.

► η νέα διάσταση είναι κύκλος ακτίνας R .

Ορμή σωματιδίου

$$p_y = \frac{n}{R} \quad (n \in \mathbb{Z})$$

5-διάστατο σωματίδιο χωρίς μάζα \Rightarrow 4-διάστατο **με** μάζα:

$$m = |n|m_0 \quad , \quad m_0 = \frac{\hbar}{cR}$$

5-διάστατη βαρύτητα \Rightarrow 4-διάστατη βαρύτητα + ηλεκτρομαγνητισμός + επιπλέον δύναμη.

★ ΠΡΟΣΟΧΗ: **Δεν είναι** κβαντική θεωρία!

ΚΒΑΝΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗ + ΒΑΡΥΤΗΤΑ

Η σταθερά του Νεύτωνα G μαζί με τις άλλες θεμελιώδεις σταθερές, h (σταθερά Πλανκ) και c (ταχύτητα του φωτός) οδηγούν στη σταθερά

$$m_P = \sqrt{\frac{\hbar c}{G}} \simeq 10^{19} \times m_{\text{πρωτονίου}}$$

που έχει διαστάσεις μάζας.

- ▶ θεμελιώδης μάζα της Φύσης
- ▶ προτάθηκε απ' τον Πλανκ.

$E_P = m_P c^2$ είναι η ενέργεια πάνω απ' την οποία κβαντικά φαινόμενα δεν είναι αμελητέα.

ΕΡΩΤΗΣΗ: Ποιά θεωρία επεκτείνει τη Γενική Θεωρία Σχετικότητας του Αϊνστάιν ώστε να περιλάβει σωματίδια με μάζα m_P και επομένως μας δίνει μια κβαντική θεωρία της βαρύτητας;

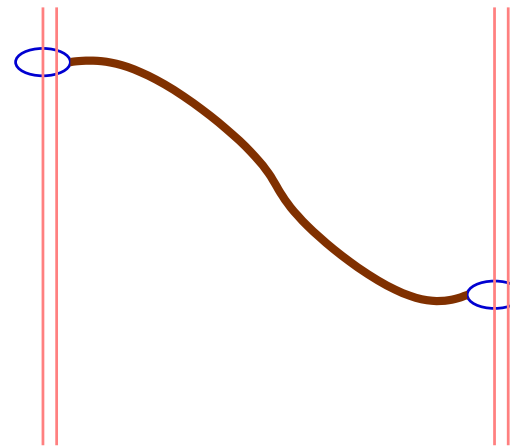
ΑΠΑΝΤΗΣΗ: Η θεωρία των χορδών!

ΘΕΩΡΙΑ ΧΟΡΔΩΝ

ΜΗ-ΣΧΕΤΙΚΙΣΤΙΚΕΣ ΧΟΡΔΕΣ:

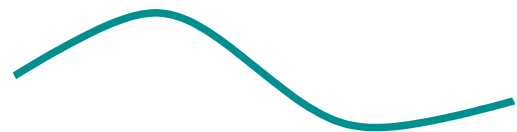


άκρα σε μεμβράνες διάστασης 0

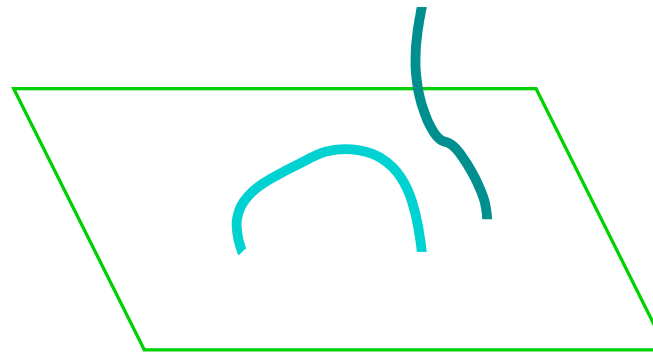


άκρα σε μεμβράνες διάστασης 1

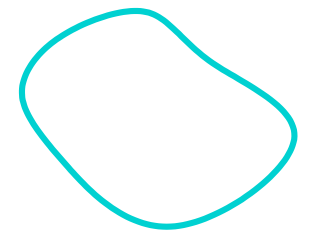
ΣΧΕΤΙΚΙΣΤΙΚΕΣ ΧΟΡΔΕΣ:



ανοικτές (ελεύθερες)



άκρα σε μεμβράνη διάστασης 2

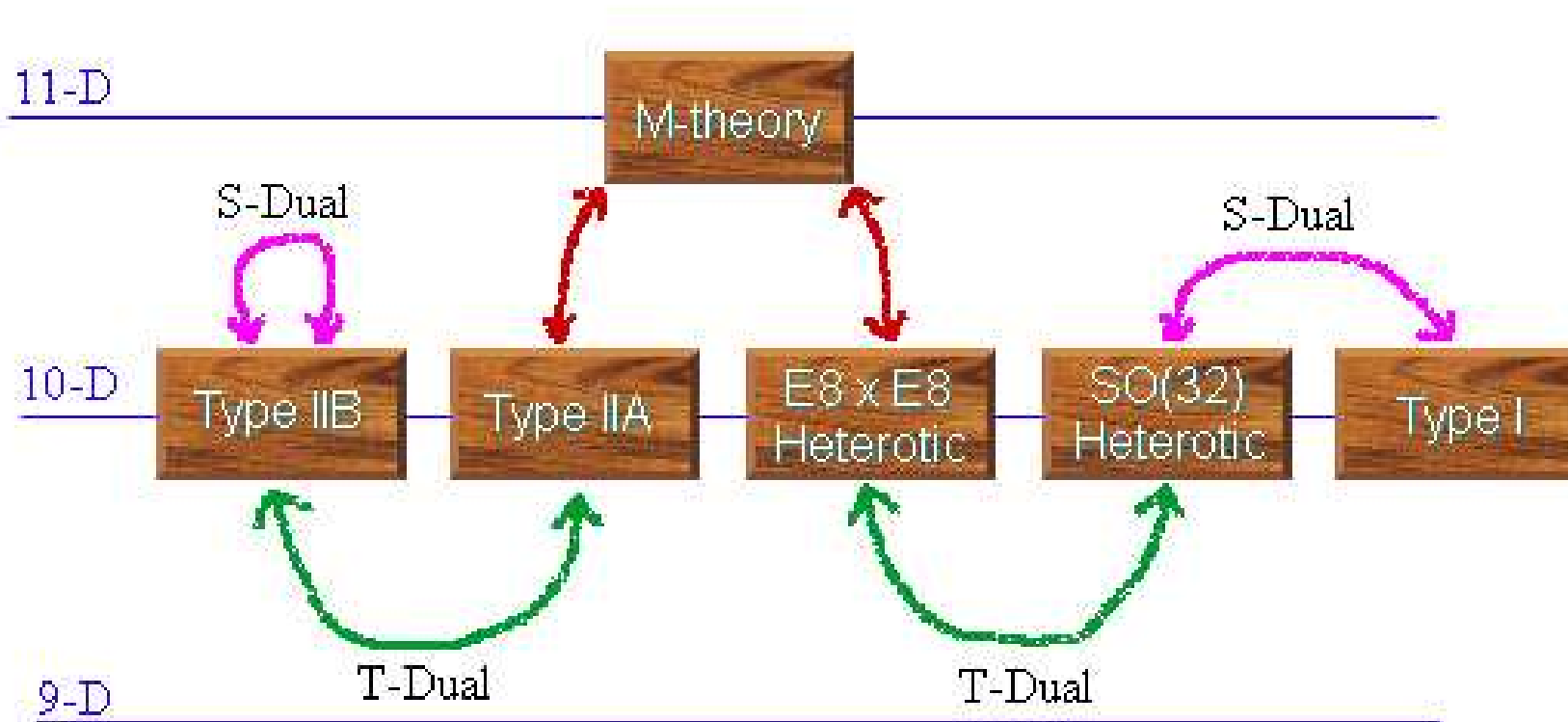


κλειστές

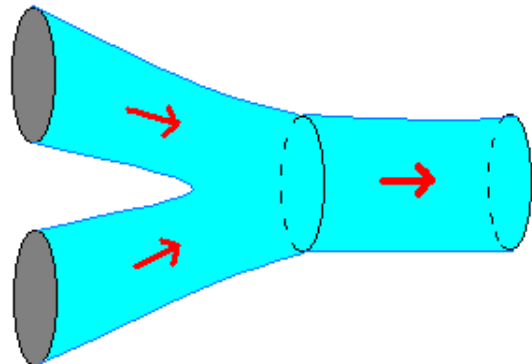
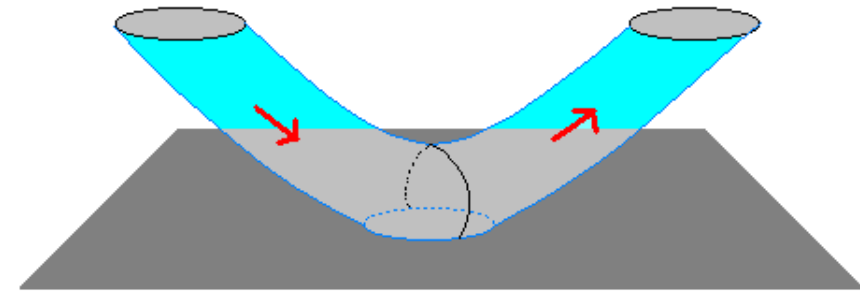
★ ταλαντώσεις: ανοικτές (κλειστές) χορδές περιλαμβάνουν φωτόνια (βαρυτόνια).

ενέργεια ταλάντωσης $\sim m_P c^2 \Rightarrow$ σωματίδια μάζας m_P .

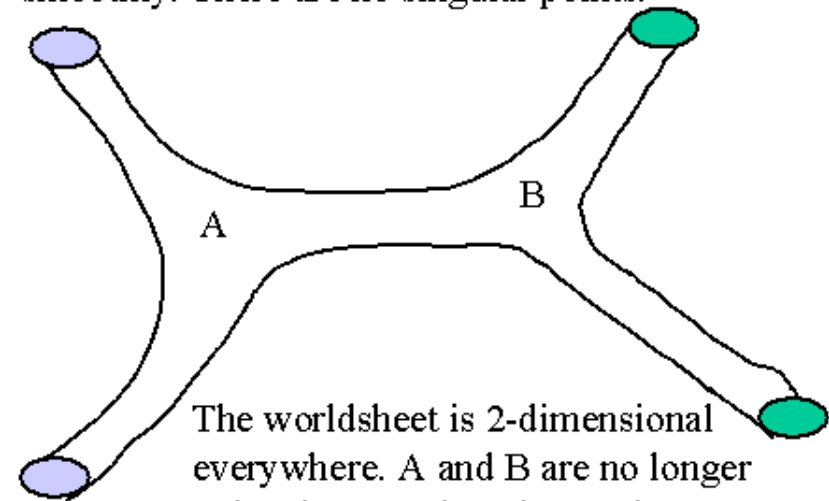
- χορδές χωρίς υπερσυμμετρία σε 26 διαστάσεις - έχουν ταχύονια
- χορδές με υπερσυμμετρία σε 10 διαστάσεις - δεν έχουν ταχύονια



- ▶ η θεωρία χορδών προβλέπει
 - χορδές (σωματίδια)
 - μεμβράνες (σώματα πεπερασμένης έκτασης)
- ▶ αλληλεπιδράσεις μέσω κοπής και ένωσης χορδών



Strings interact by splitting and merging smoothly. There are no singular points.



The worldsheet is 2-dimensional everywhere. A and B are no longer points in spacetime, but regions.

ΕΠΙΠΛΕΟΝ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΚΑΙ ΒΑΡΥΤΗΤΑ



$$F_{gr} = G \frac{m_{\text{πρωτονιου}}^2}{r^2}, \quad F_{el} = \frac{e^2}{4\pi r^2}.$$

$$\frac{F_{gr}}{F_{el}} = \frac{1}{\alpha} \frac{m_{\text{πρωτονιου}}^2}{m_P^2} \sim 10^{-36}$$

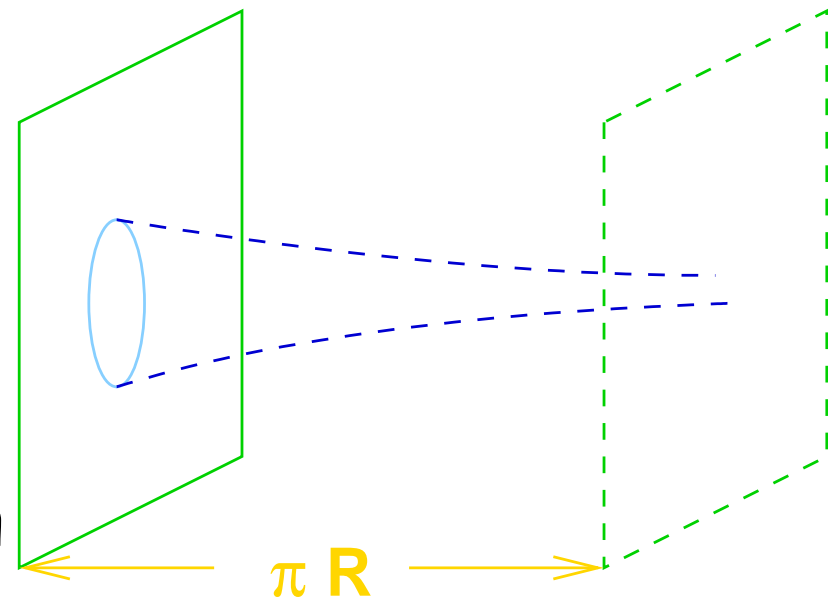
ασθενής βαρύτητα διότι $m_{\text{proton}} \ll m_P$ (πρόβλημα **ιεράρχησης**).

σενάριο των Randall-Sundrum

πέμπτη κυρτή διάσταση

μεμβράνες διάστασης 3 σε $y = 0, \pi R$
(εμείς ζούμε στη μεμβάνη $y = 0$)

Η μάζα m_P εξηγείται με βάση 5-διάστατη
θεμελιώδη (αλλά μη μετρήσιμη) σταθερά



► λύνει το πρόβλημα **ιεράρχησης**.
 ⇒ μετρήσιμα βαρυτικά φαινόμενα
 στον επιταχυντή **LHC!**

Αλλαγή στο βαρυτικό δυναμικό

$$V(r) = -\frac{GM}{r} \left\{ 1 + o\left(\frac{\ell_P^2}{r^2}\right) \right\}$$

μικρή ως αποστάσεις

$$r \sim \ell_P = \sqrt{\frac{G\hbar}{c^3}} \sim 10^{-33} \text{ cm}$$

★ Γενικά, με επιπλέον διαστάσεις:

- σωματίδια ⇒ αλλαγή στους νόμους **Coulomb** και Νεύτωνα.
- Χορδές ⇒ αλλαγή μόνο στο νόμο του Νεύτωνα (φωτόνια και λοιπά σωματίδια δεν μπορούν να ξεφύγουν απ' τη μεμβράνη)

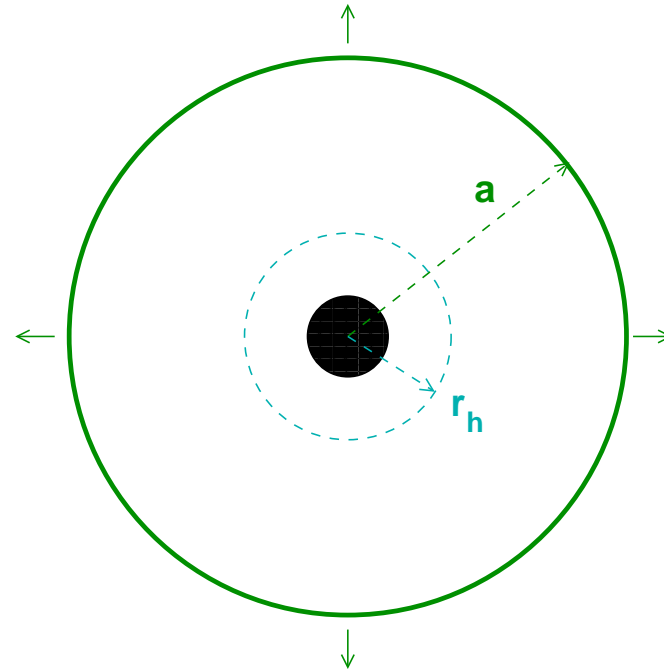
μέτρηση που αποκλίνει απ' το νόμο του Νεύτωνα ⇒ απόδειξη της θεωρίας των χορδών



LHC at CERN, Geneva, Switzerland

ΜΕΜΒΡΑΝΕΣ ΚΑΙ ΚΟΣΜΟΛΟΓΙΑ

Μαύρη τρύπα στο κέντρο (έξω απ' το Σύμπαν μας)



Μεμβράνη τάσης κ σε ακτίνα $r = a$.

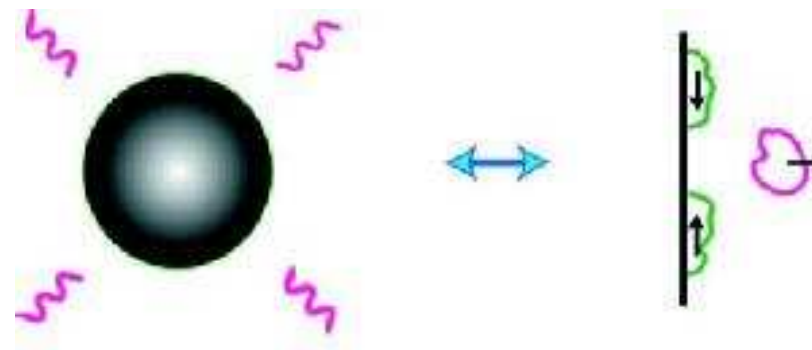
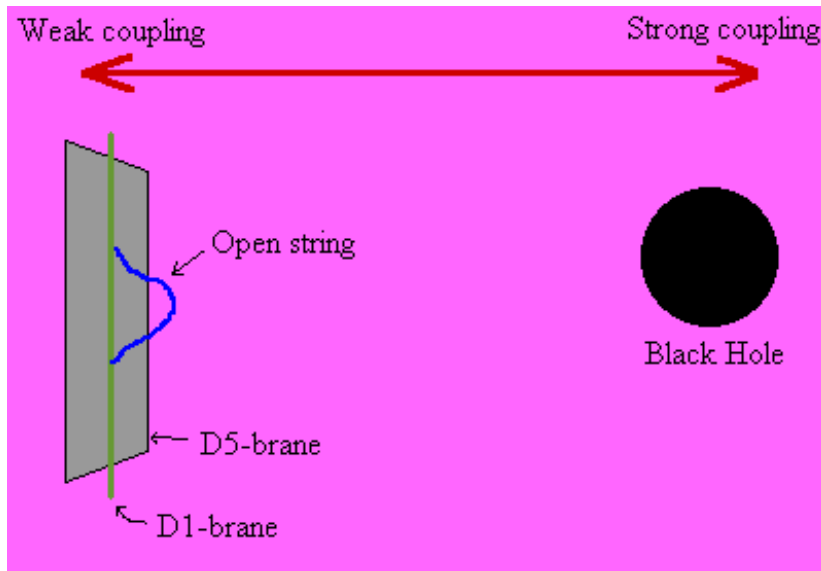
Εξίσωση κίνησης \Rightarrow εξίσωση Friedmann για κλειστό Σύμπαν!

Κοσμολογική σταθερά: $\Lambda = \frac{\kappa^2 - (3/R)^2}{3}$.

Για $\Lambda > 0$, πρέπει $\kappa > 3/R$.

ΕΝΤΡΟΠΙΑ ΜΑΥΡΗΣ ΤΡΥΠΙΑΣ

Οι χορδές εξηγούν την εντροπία με βάση τις μεμβράνες
 [Strominger, Vafa]



- Ακτινοβολία Hawking
 ⇒ Παράδοξο Απώλειας Πληροφορίας

ΠΟΥ ΒΡΙΣΚΟΜΑΣΤΕ ΣΗΜΕΡΑ;

Η θεωρία των χορδών:

- ενοποιεί όλες τις δυνάμεις της Φύσης
- είναι μια κβαντική θεωρία της βαρύτητας

Είναι η **μόνη** θεωρία μ' αυτές τις ιδιότητες!

ΕΠΙΤΥΧΙΕΣ:

- κβάντωση της Γενικής Θεωρίας Σχετικότητας του Αϊνστάιν
- εξήγηση της ασθενούς ισχύος της δύναμης βαρύτητας και του προβλήματος **ιεράρχησης**
- κατανόηση των μαύρων τρυπών (εντροπία, ακτινοβολία Hawking)
- νέες ιδέες στην Κοσμολογία

ΑΝΟΙΧΤΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ:

- Πειραματική επαλήθευση (στο εργαστήριο η απο αστρονομικές παρατηρήσεις)
- Ανακάλυψη θεμελιώδους αρχής (σαν την **Αρχή Ισοδυναμίας** του Αϊνστάιν)