

## Η Γενική θεωρία σχετικότητας

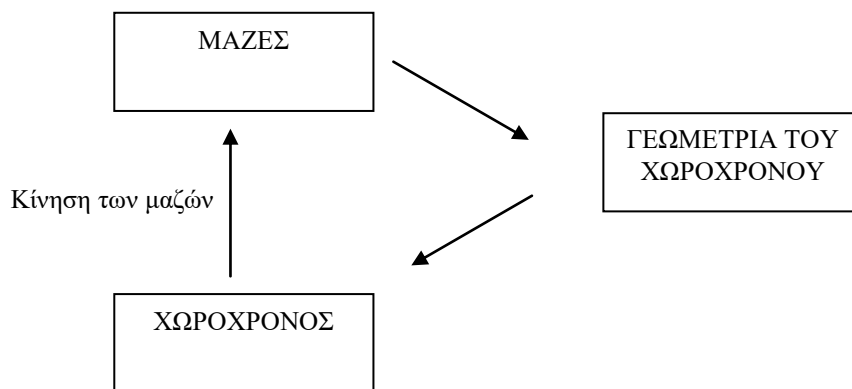
Ο Einstein ως γνωστό διατύπωσε δύο θεωρίες σχετικότητας.

- ❖ Την ειδική θεωρία σχετικότητας το 1905 η οποία μπορούμε να πούμε ότι είναι μια θεωρία η οποία άλλαξε ριζικά τις έννοιες του χώρου, του χρόνου της μάζας και της ενέργειας. Η θεωρία αυτή αναφέρεται σε αδρανειακά μόνο συστήματα και ουσιαστικά είναι μια νέα κινηματική θεωρία η οποία αντικατέστησε τους μετασχηματισμούς του Γαλιλαίου με τους μετασχηματισμούς Λορέντζ.
- ❖ Και την γενική θεωρία της σχετικότητας. Η δεύτερη θεωρία διατυπώθηκε το 1915, αναφέρεται σε μη αδρανειακά συστήματα και ουσιαστικά είναι μια νέα μακροσκοπική θεωρία της βαρύτητας. Έτσι ουσιαστικά αντικατέστησε το έργο του Νεύτωνα το οποίο αναφερόταν σε αυτά ακριβώς τα σημεία. Δηλαδή η μια θεωρία αντικατέστησε τον θεμελιώδη νόμο, ενώ η άλλη τον νόμο της παγκόσμιας έλξης.

Και οι δύο θεωρίες μαζί με την θεωρία της κβαντομηχανικής χαρακτήρισαν την Φυσική του 20ου αιώνα. Οι θεωρίες αυτές θεωρούνται πολύ σπουδαίες γιατί μπόρεσαν και ενοποίησαν έννοιες και φαινόμενα που μέχρι τότε θεωρούσαμε ότι δεν είχαν μεταξύ τους σχέση. Εξ' άλλου όλες οι θεωρίες – σταθμοί της Φυσικής έχουν το παραπάνω χαρακτηριστικό της ενοποίησης. Έτσι για παράδειγμα έχουμε:

Newton	κλαστική μηχανική	ουράνια μηχανική - επίγεια φαινόμενα
Joule	θεωρία θερμότητας	θερμικά - μηχανικά φαινόμενα
Oersted	ηλεκτρομαγνητισμός	ηλεκτρικά - μαγνητικά φαινόμενα
Maxwell	ηλεκτρομαγνητική θεωρία	ηλεκτρομαγνητικά - οπτικά φαινόμενα
Einstein	ειδική θεωρία σχετικότητας	χώρος-χρόνος, ορμή-ενέργεια
Einstein	γενική θεωρία σχετικότητας	γεωμετρία του χώρου –βαρυτικές δυνάμεις

Με τη γενική θεωρία της σχετικότητας με την οποία θα ασχοληθούμε σε αυτό το άρθρο τρία πράγματα που μέχρι τότε θεωρούνταν ασύνδετα, ενοποιήθηκαν. Οι μάζες σύμφωνα με την θεωρία αλλάζουν τη γεωμετρία του χώρου. Η γεωμετρία του χώρου με τη σειρά της επηρεάζει τις ιδιότητες του χώρου και του χρόνου που με τη σειρά τους επηρεάζουν την κίνηση των μαζών. Έτσι λοιπόν ο χώρος και ο χρόνος δεν είναι ένα αμέτοχο σκηνικό πάνω στο οποίο κινούνται οι ηθοποιοί ( οι μάζες ) αλλά οι ηθοποιοί επηρεάζουν το σκηνικό που με τη σειρά του επηρεάζει την κίνηση των ηθοποιών στη σκηνή.



Τι είναι πράγματι η μάζα;. Αν ανοίξουμε ένα σχολικό βιβλίο θα διαβάσουμε ότι η μάζα ενός σώματος εκφράζει την ποσότητα ύλης του σώματος. Ο ορισμός όμως αυτός δεν είναι επιστημονικός. Γιατί κάποιος θα μπορούσε να πει και τι είναι αυτό που λέμε ποσότητα ύλης;. Ποιο σώμα άραγε έχει περισσότερο ύλη; Ένα κιλό σίδηρο ή ένα κιλό μπαμπάκι; Η ερώτηση αυτή που γινόταν στα παιδικά μας χρόνια αποκτάει πολύ σπουδαίο νόημα. Πρέπει να διευκρινήσουμε ότι ο ορισμός οποιουδήποτε φυσικού μεγέθους δεν είναι τίποτε άλλο παρά μια συνταγή μέτρησής του. Άρα έτσι και για τη μάζα αν θέλουμε να την ορίσουμε επιστημονικά θα πρέπει να προτείνουμε έναν τρόπο μέτρησής της. Η μάζα όμως εμφανίζεται σε δύο διαφορετικά φυσικά φαινόμενα.

1. στην έλξη των σωμάτων.. Επειδή το βάρος είναι ανάλογο της μάζας γι' αυτό πολλές φορές συγχέουμε το βάρος με τη μάζα. Λέγοντας ένα κιλό άλλοτε εννοούμε μάζα (Kg) και άλλοτε βάρος (Kp) . Ο Newton είχε διατυπώσει τον νόμο της παγκόσμιας έλξης λέγοντας ότι μεταξύ όλων των σωμάτων ασκείται μια ελκτική δύναμη που είναι ανάλογη των μαζών και αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου της απόστασης.

$$F = \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2} \quad (1)$$

μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τη σχέση (1) και να ορίσουμε την μάζα αν βέβαια ως θεμελιώδες μέγεθος έχουμε πάρει τη δύναμη.

2. Την αδράνεια της ύλης ή για να ακριβολογούμε περισσότερο τον δεύτερο νόμο του Newton

$$F = m^* \cdot a \quad (2)$$

παρομοίως από τη σχέση (2) μπορούμε να ορίσουμε την μάζα αν βέβαια ως θεμελιώδες μέγεθος έχουμε πάρει την δύναμη ( ένα τέτοιο σύστημα μέτρηση είναι το Τ.Σ Τεχνικό σύστημα μονάδων) Την δύναμη μπορούμε να την ορίσουμε του νόμου του Hooke

Άρα λοιπόν μπορούμε να ορίσουμε τη μάζα με δύο τρόπους. Για να γίνουμε πιο κατανοητοί, αν μας δώσουν δύο καθ' όλα όμοιες μπάλες και μας ρωτήσουν ποια έχει μεγαλύτερη μάζα, τότε εμείς μπορούμε να κάνουμε δύο πράγματα για να απαντήσουμε. Είτε να τις σηκώσουμε εξετάζοντας το βάρος τους, οπότε σύμφωνα με τη σχέση (1) η μπάλα που έχει το μεγαλύτερο βάρος θα έχει και την μεγαλύτερη μάζα, είτε να τις κλωστήσουμε, οπότε σύμφωνα με τη σχέση (2) αυτή που θα μας ασκήσει μεγαλύτερη δύναμη θα έχει και την μεγαλύτερη μάζα.

Αλλά γιατί ονομάσαμε και τα δύο ανωτέρω μεγέθη με το ίδιο όνομα μάζα;. Μήπως πρόκειται για δύο διαφορετικά μεγέθη ή μάζες μία βαρυτική και άλλη αδρανειακή;. Στο ερώτημα αυτό θα μας απαντήσει το πείραμα. Αν φέρουμε ένα σώμα στην επιφάνεια της γης και το αφήσουμε χωρίς να λάβουμε υπόψη την αντίσταση του αέρα, συνδυάζοντας τις σχέσεις (1) και (2) θα έχουμε:

$$m^* \cdot g = \frac{m \cdot M_{\gamma\eta\varsigma}}{R_{\gamma\eta\varsigma}^2} \rightarrow g = \frac{M_{\gamma\eta\varsigma}}{R_{\gamma\eta\varsigma}^2} \left( \frac{m}{m^*} \right)$$

πολλά πειράματα ακριβείας που έγιναν στο τέλος του 19<sup>ου</sup> αιώνα απέδειξαν ότι το πηλίκο  $\frac{m}{m^*}$  ήταν σταθερό για όλα

τα σώματα. Δηλαδή διαπιστώθηκε ότι όλα τα σώματα, ανεξάρτητα από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τους πέφτουν στο κενό με την ίδια επιτάχυνση. Έτσι λοιπόν αυτός ο λόγος εκφράζει μια παγκόσμια σταθερά, και τα δύο μεγέθη τελικά δεν είναι δύο αλλά ένα που ονομάζουμε μάζα. Έτσι θα έχουμε:

$$\frac{m}{m^*} = \sqrt{G} \rightarrow m = m^* \cdot \sqrt{G} \text{ οπότε η (1) γίνεται } F = G \frac{m_1^* \cdot m_2^*}{r^2}$$

Καμία θεωρία πριν από τον Einstein δεν εξηγούσε γιατί το ανωτέρω πηλίκο ήταν σταθερό για όλα τα σώματα. Εδώ πρέπει να αναφέρουμε ότι ο Newton χωρίς να κάνει τα αντίστοιχα πειράματα με οδηγό μόνο τη φυσική του διαίσθηση είχε λάβει υπόψη στη θεωρία του αυτήν την παγκόσμια αναλογία των δύο μαζών.

Ο Einstein έδωσε μια ριζοσπαστική λύση στο πρόβλημα. Έλυσε τον γόρδιο δεσμό κόβοντάς τον. Δεν απέδειξε την αναλογία των δύο μαζών αλλά έφτιαξε μια θεωρία η οποία αξιωματικά δεχόταν ότι οι δύο μάζες η αδρανειακή και η βαρυτική είναι ακριβώς ίσες. Η θεωρία αυτή δηλαδή θεώρησε **ότι ένα επιταχυνόμενο σύστημα αναφοράς είναι ακριβώς το ίδιο πράγμα με ένα βαρυτικό πεδίο**. Το μεγαλοφυές αυτό κόλπο σπασίματος του γόρδιου δεσμού, εξ' άλλου το είχε χρησιμοποιήσει ξανά, 10 χρόνια νωρίτερα στην ειδική θεωρία σχετικότητας. Στις αρχές του αιώνα είχε βρεθεί πειραματικά ότι η ταχύτητα του φωτός είναι η ίδια σε όλα τα αδρανειακά συστήματα από το περίφημο πείραμα των Michelson-Morley. Ενώ λοιπόν όλοι οι επιστήμονες στις αρχές του αιώνα προσπαθούσαν να διατυπώσουν μια θεωρία η οποία να ερμηνεύει την σταθερότητα της ταχύτητας του φωτός σε όλα τα αδρανειακά συστήματα, ο Einstein διατύπωσε μια θεωρία που το γεγονός αυτό το λάμβανε ως αξίωμα.

Για να γίνουμε πιο συγκεκριμένοι. Ας φανταστούμε στο απώτερο μέλλον ένα διαστημόπλοιο να φεύγει από τη γη με επιτάχυνση  $g$  και να κατευθύνεται στο γειτονικό μας γαλαξία της Ανδρομέδας. Το διαστημόπλοιο αυτό δεν έχει παράθυρα και οι αστροναύτες που ξυπνάνε μετά από έναν μακροχρόνιο ύπνο θέλουν κάνοντας διάφορα πειράματα να διαπιστώσουν αν ταξιδεύουν ή αν φθάσανε σε έναν πλανήτη με την ίδια βαρύτητα της γης. Τότε ο Einstein μας πληροφορεί ότι κανένα πείραμα δεν μπορεί να δώσει απάντηση στους αστροναύτες. Η αδρανειακή δύναμη που δέχονται λόγω της επιτάχυνσης του διαστημοπλοίου τους είναι ακριβώς ισοδύναμη με την βαρυτική δύναμη που θα δέχονταν αν είχαν επισκεφθεί έναν άλλον πλανήτη με την ίδια βαρύτητα. Αυτή όμως η αρχή μας οδηγεί σε αναπάντεχα συμπεράσματα. Κάποιος λοιπόν αστροναύτης που ήταν φυσικός αλλά δεν γνώριζε την Γ.Θ.Σ σκέφτηκε να κάνει το εξής πείραμα. Να ρίξει μια ακτίνα φωτός από το σημείο Α κάθετα προς τη διεύθυνση που ασκείται η δύναμη η αδρανειακή ή βαρυτική. Τότε αν το διαστημόπλοιο επιταχύνεται η τροχιά που θα ακολουθήσει το φως προφανώς θα είναι καμπύλη ΑΒ, ενώ αν είναι κάπου προσεδαφισμένο θα είναι ευθεία ΑΓ. Έτσι παρατηρώντας το σχήμα της τροχιάς, θα καταλάβαινε αν το διαστημόπλοιο επιταχύνεται ή όχι. Σύμφωνα όμως με την Γ.Θ.Σ. ότι συμβαίνει στη μια περίπτωση θα συμβαίνει και στην άλλη. Άρα αφού η τροχιά του φωτός είναι καμπύλη στο επιταχυνόμενο σύστημα αναφοράς του διαστημοπλοίου, θα καμπυλώνει και από το βαρυτικό πεδίο. Άρα φθάνουμε στο εκπληκτικό συμπέρασμα ότι το **βαρυτικό πεδίο έλκει το φως**.

Βέβαια εκ των υστέρων αν λάβουμε υπ' όψη και την κβαντική θεωρία που μας λέει ότι το φως αποτελείται από σωματίδια που λέγονται φωτόνια, το κάθε φωτόνιο έχει κάποια ενέργεια, η ενέργεια ισοδυναμεί με κάποια μάζα, οπότε είναι λογικό να υπάρχει έλξη. Μη ξεχνάμε όμως ότι η Γ.Θ.Σ διατυπώθηκε πριν από την κβαντική θεωρία.

Η έλξη του φωτός από το βαρυτικό πεδίο διαπιστώθηκε πειραματικά μετά από μια έκλειψη του ηλίου που παρατηρήθηκε μετατόπιση στη θέση των αστερών που ήταν κοντά στον ήλιο. Τα αστέρια βέβαια δεν επηρεάζονται από μια έκλειψη οπότε αυτή η μετακίνηση αποδόθηκε στην καμπύλωση του φωτός που έρχεται από αυτά τα αστέρια και το φως τους περνάει κοντά από τον ήλιο.

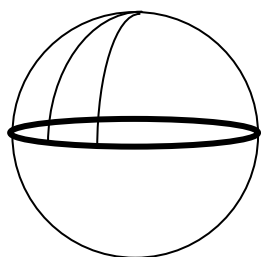
Οι εκπλήξεις όμως δεν τελειώνουν εδώ.

Το φως σύμφωνα με την αρχή του Fermat ταξιδεύει πάντα ακολουθώντας τον συντομότερο δρόμο. Ο συντομότερος όμως χρονικά δρόμος δεν είναι πάντα η ευθεία. Ο συντομότερος δρόμος λέγεται και γεωδαισδιακή γραμμή. Αν αλλάζει η ταχύτητα του φωτός τότε προκειμένου το φως να ακολουθήσει τον συντομότερο δρόμο ακολουθεί μια τροχιά που δεν είναι ευθεία. **Η ταχύτητα του φωτός σύμφωνα με την δεύτερη αρχή της Γ.Θ.Σ είναι η ίδια σε όλα τα συστήματα αναφοράς.** Άρα θα πρέπει να είναι η ίδια και στα επιταχυνόμενα συστήματα αναφοράς. Ένα όμως επιταχυνόμενο σύστημα είναι όπως είπαμε ισοδύναμο με ένα βαρυτικό πεδίο. Έτσι συμπεραίνουμε ότι το βαρυτικό πεδίο δεν επηρεάζει την ταχύτητα του φωτός. Αφού όμως δεν αλλάζει η ταχύτητα του φωτός τότε πως θα συμβιβάσουμε την αρχή του Fermat με την καμπύλωση της τροχιάς του φωτός από ένα βαρυτικό πεδίο; Η απάντηση είναι και πάλι καλή. Αρκεί να δεχτούμε ότι στο βαρυτικό πεδίο η συντομότερη διαδρομή δεν είναι η ευθεία αλλά η συγκεκριμένη καμπύλη που ακολουθεί το φως. Αυτό ήταν γνωστό ήδη στους μαθηματικούς. Αρκετά πριν από τον Einstein ο Reimman μελετώντας τις ιδιότητες ενός καμπύλου χώρου είχε βρει τις εξισώσεις της συντομότερης διαδρομής, καταλήγοντας στο συμπέρασμα ότι σ' αυτή τη περίπτωση οι συντομότερες διαδρομές δεν είναι ευθείες αλλά καμπύλες. Έτσι λοιπόν με απλούς συλλογισμούς καταλήξαμε στο συμπέρασμα ότι το βαρυτικό πεδίο επηρεάζει τη γεωμετρία του χώρου γύρω του, καθιστώντας τον καμπύλο, έτσι ώστε το φως ακολουθώντας πάντα το συντομότερο δρόμο διαγράφει καμπύλη τροχιά.

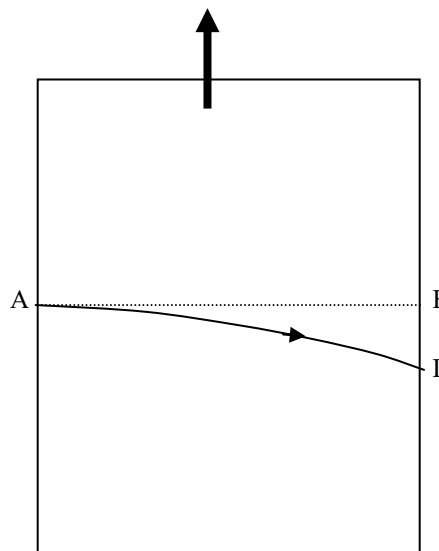
Μπορούμε εύκολα να μελετήσουμε τις ιδιότητες ενός καμπύλου χώρου δύο διαστάσεων αν φανταστούμε έναν κόσμο που ενεργεί στην επιφάνεια μιας σφαίρας. Για τις ιδιότητες ενός τρισδιάστατου καμπύλου χώρου, τα πράγματα δυσκολεύουν και χρειαζόμαστε όπως και ο Einstein την βοήθεια των μαθηματικών. Στη επιφάνεια μιας σφαίρας ο συντομότερος δρόμος που ενώνει δύο σημεία προφανώς είναι μια καμπύλη. Άρα αυτή θα είναι και η γεωδαισδιακή γραμμή του χώρου μας. Φέρνοντας δύο κάθετες πάνω στο ισημερινό κύκλο οι δύο γραμμές που προκύπτουν ( οι δύο μεσημβρινοί κύκλοι ) είναι ευθείες, αφού είναι γεωσιακές γραμμές αλλά τέμνονται στους πόλους. Έτσι από ένα σημείο δεν περνάει καμία ευθεία ( γεωσιακή γραμμή ) παράλληλη προς δεδομένη. Το τρίγωνο που σχηματίζεται έχει δύο γωνίες από μία ορθή, άρα το άθροισμα των γωνιών του τριγώνου είναι μεγαλύτερο από 180 μοίρες.

Το συμπέρασμα από όλη αυτήν την ανάλυση είναι ότι σύμφωνα με την Γ.Θ.Σ δεν υπάρχουν βαρυτικές δυνάμεις, αλλά το φως καθώς και όλα τα σώματα κινούνται μέσα στο χωροχρόνο έτσι ώστε να έχουμε την ελάχιστη δράση. Αν πρόκειται για φως η ελάχιστη δράση ταυτίζεται με την ελάχιστη διαδρομή και τον ελάχιστο χρόνο. Αν δεν έχουμε μάζες η γεωμετρία του χώρου είναι η Ευκλείδεια και οι συντομότερες διαδρομές είναι οι ευθείες. Όχι μόνο το φως αλλά και όλα τα σώματα κινούνται πάνω σε ευθείες ( αρχή της αδράνειας ). Αν υπάρχουν μάζες τότε η γεωμετρία του χώρου αλλάζει, γίνεται καμπύλη και τα σώματα κινούνται πάνω σε καμπύλες γεωσιακές τροχιές ( γενικευμένη αρχή της αδράνειας ).

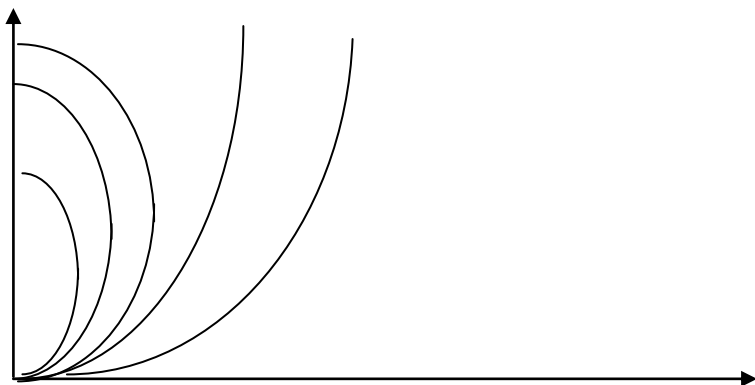
Είναι πραγματικά εκπληκτικό το συμπέρασμα ότι ρίχνοντας ένα σώμα κατακόρυφα προς τα πάνω τότε αυτό ανεβαίνει ελαττώνοντας συνεχώς την ταχύτητα του μέχρι ενός ορισμένου ύψους και μετά κατεβαίνει επιταχυνόμενο διαγράφοντας



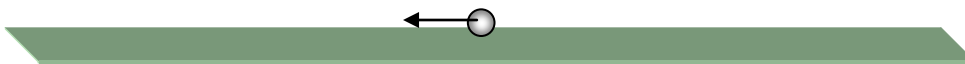
τελικά την συντομότερη χωροχρονική τροχιά μέσα στον καμπύλο χωρόχρονο που δημιουργεί το βαρυτικό πεδίο της γης.



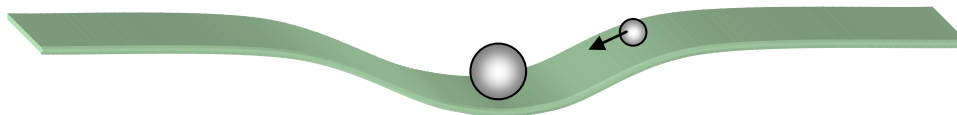
Το σπουδαίο συμπέρασμα από την παραπάνω ανάλυση είναι ότι τελικά δεν υπάρχουν βαρυτικές δυνάμεις. Τα σώματα ακολουθούν πάντα την συντομότερη χωροχρονική τροχιά υπακούοντας σε έναν γενικευμένο νόμο αδράνειας. Οι μάζες όμως αλλάζουν τη γεωμετρία του χωροχρόνου και έτσι η τροχιά που ακολουθούν τα σώματα καμπυλώνεται. Αυτή όμως την καμπύλωση, πριν την διατύπωση της Γ.Θ.Σ την αποδίδαμε σε δυνάμεις μεταξύ των μαζών, ενώ τώρα στην αλλαγή της γεωμετρίας του χωροχρόνου.



Ένα ωραίο παράδειγμα για το τι εννοούμε είναι το ακόλουθο. Θεωρούμε ότι ο κόσμος μας είναι μια τεράστια επίπεδη ελαστική μεμβράνη. Αν σ' αυτόν τον κόσμο αφήσουμε ένα σώμα τότε αυτό θα παραμένει συνεχώς ακίνητο, ενώ αν το ρίξουμε με κάποια ταχύτητα, τότε αυτό θα συνεχίζει να κινείται ευθύγραμμα ομαλά προς τη διεύθυνση που το ρίξαμε. Αν τώρα τοποθετήσουμε σ' αυτή την μεμβράνη ένα σώμα μεγάλης μάζας, μια γη για παράδειγμα, τότε θα δημιουργηθεί μια καμπύλωση του χώρου μας. Αν τώρα στη συνέχεια αφήσουμε ένα σώμα, λόγω ακριβώς της καμπύλωσης του χώρου το σώμα θα κινηθεί προς το μεγάλο σώμα. Αυτή η κίνηση αν δεν αντιληφθούμε την καμπυλότητα του χώρου θα την αποδώσουμε σε κάποια φανταστική ελκτική δύναμη ανάμεσα στις δύο μάζες. Επίσης αν δώσουμε την κατάλληλη ταχύτητα στην μικρή μάζα, μπορούμε να την θέσουμε σε τροχιά γύρω από τη μεγάλη, όπως ακριβώς κινείται η σελήνη γύρω από τη γη, ή η γη γύρω από τη σελήνη. Και πάλι μια τέτοια κίνηση οφείλεται στην καμπυλότητα του χώρου και όχι στην ανύπαρκτη ελκτική δύναμη μεταξύ των μαζών.



Ένας κόσμος επίπεδος κόσμος επίπεδος. Σ' αυτόν μια μικρή μάζα θα κινείται ευθύγραμμα ομαλά



Ένας κόσμος καμπύλος λόγω της ύπαρξης της μεγάλης μάζας που αλλάζει τη γεωμετρία του κόσμου. Σ' αυτόν τον κόσμο η μικρή μάζα θα κινείται έτσι ώστε να δημιουργεί την εντύπωση της έλξης από τη μεγάλη.

Το πλάνο αυτό της αλλαγής των ιδιοτήτων του χωροχρόνου από τις μάζες και την απόδοση των δυνάμεων μεταξύ των μαζών σε αυτήν ακριβώς την αλλαγή είναι αρκετά ελκυστικό να επεκταθεί και στις υπόλοιπες δυνάμεις που εμφανίζονται στη φύση. Πχ στις δυνάμεις μεταξύ των ηλεκτρικών φορτίων. Αυτή ήταν και η προσπάθεια του Einstein μέχρι το τέλος της ζωής του, χωρίς όμως να πετύχει το σκοπό αυτό. Η αποτυχία οφείλεται στο γεγονός ότι μόνο η μάζα έχει την διπλή ιδιότητα που αναφέραμε στην αρχή του άρθρου. Δηλαδή να είναι και η πηγή βαρυτικών δυνάμεων αλλά και το μέτρο της αδράνειας των σωμάτων. Τα φορτία για παράδειγμα μπορεί να αποτελούν την πηγή των ηλεκτρικών δυνάμεων αλλά δεν εμφανίζονται σε καμία περίπτωση ως αδράνεια των σωμάτων σε κάποια κινηματική σχέση αντίστοιχη της σχέσης  $F=ma$  που εκφράζει τον θεμελιώδη νόμο.

Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί πολλά μοντέλα με τη γενική ονομασία θεωρίες υπερχορδών τα οποία εκτός των 4 διαστάσεων που εισάγει η ειδική θεωρία σχετικότητας, εισάγουν και πολλές άλλες με σκοπό να αποδώσουν στις ιδιομορφίες αυτών των διαστάσεων τις ιδιότητες των στοιχειωδών σωματιδίων. Οι θεωρίες αυτές δεν έχουν γίνει ακόμη γενικά αποδεκτές στην επιστημονική κοινότητα για δύο βασικά λόγους. Πρώτον γιατί είναι τρομερά πολύπλοκες από μαθηματική άποψη και δεύτερον και βασικότερο δεν έχουν προβλέψει νέα πειραματικά ελέγξιμα φυσικά φαινόμενα. Στοιχείο απαραίτητο για την αποδοχή μιας νέας επιστημονικής θεωρίας.