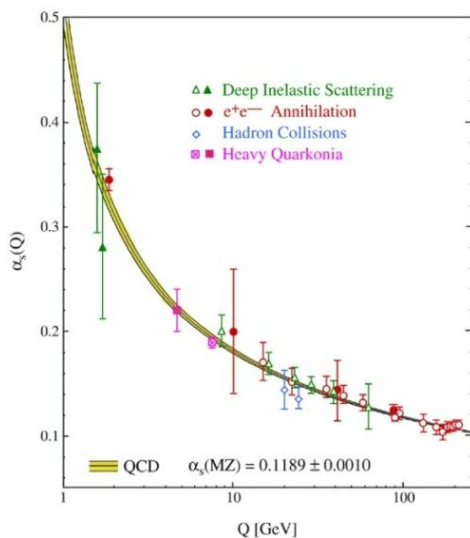


## “ΤΟ ΤΕΛΕΙΟΤΕΡΟ ΡΕΥΣΤΟ”

Η θεωρία της Κβαντικής Χρωμοδυναμικής (QCD) διατυπώθηκε το 1973 από τους [Fritzsch, Gell-Mann και Leutwyler](#) για να περιγράψει τις ισχυρές αλληλεπιδράσεις. Το βασικό έναυσμα αποτελούσαν πειράματα του επιταχυντή στο SLAC, όπου οι φυσικοί, στέλνοντας υψηλής ενέργειας ηλεκτρόνια πάνω σε πρωτόνια, είχαν ενδείξεις για σημειακά συστατικά που ήταν σχεδόν ελεύθερα μέσα στα πρωτόνια. Η κύρια αλληλεπίδραση μεταφέρεται από 8 γκλουόνια, και η θεωρία που τα περιγράφει, εισήχθη την δεκαετία του '50 από τους Yang και Mills. Η ισχυρά αλληλεπιδρώσα ύλη αποτελείται από σωματίδια που ονομάστηκαν κουάρκς και εμφανίζονται σε  $N_c=3$  χρώματα (το αντίστοιχο του ηλεκτρικού φορτίου). Οι φορείς της αλληλεπίδρασης, τα "γκλουόνια" είναι δίχρωμα.

Πώς όμως είναι δυνατόν οι «ισχυρές αλληλεπιδράσεις» να είναι ισχυρές και τα κουάρκς να αλληλεπιδρούν ασθενικά; Η απάντηση σε αυτήν την ερώτηση στηρίζεται στο γεγονός ότι, αντίθετα από αυτό που μαθαίνουμε στην πρώτη επαφή μας με την φυσική, τα κβαντικά φαινόμενα έχουν ως αποτέλεσμα η ισχύς των αλληλεπιδράσεων να αλλάζει με την ενέργεια. Στην κβαντική ηλεκτροδυναμική π.χ., το ηλεκτρικό φορτίο που καθορίζει, μέσω του νόμου Coulomb, την ισχύ της ηλεκτρομαγνητικής



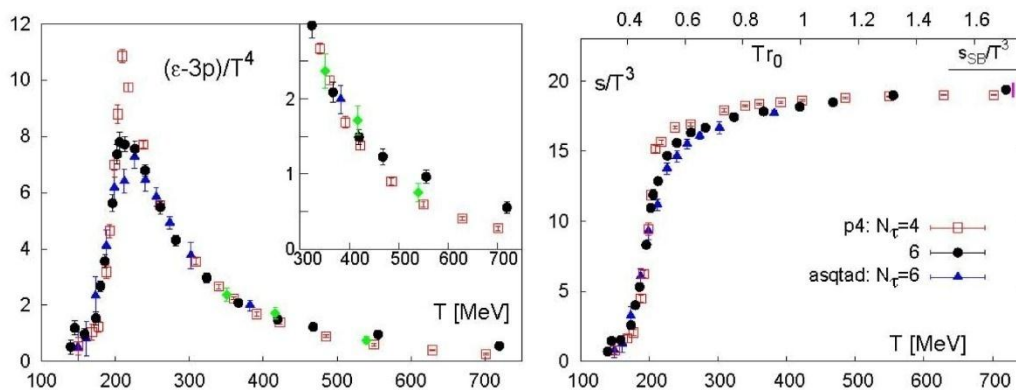
**Εικόνα 1.** Η ισχύς της σύζευξης της ισχυρής αλληλεπίδρασης σαν συνάρτηση της ενέργειας (σε GeV). Τα πειραματικά δεδομένα προέρχονται από διαφορετικά πειράματα.

αλληλεπίδρασης αυξάνεται (πολύ αργά) με την ενέργεια. Το 1974, οι Gross, Wilczek και Politzer (βραβείο Nobel 2004) έδειξαν ότι η QCD έχει "ασυμπτωτική ελευθερία". Αυτή η συμπεριφορά είναι αντίθετη με αυτήν της κβαντικής ηλεκτροδυναμικής: ενώ σε χαμηλές ενέργειες υπάρχει ισχυρή σύζευξη, σε υψηλές ενέργειες, η αλληλεπίδραση γίνεται ασθενική. Αυτή η παρατήρηση έλυσε το πρώτο μυστήριο και άνοιξε τον δρόμο για την κατανόηση των πειραμάτων του SLAC, στα τέλη της δεκαετίας του '60 (βραβείο Nobel 1990).

Η θεωρία έγινε αποδεκτή σταδιακά από όλο και μεγαλύτερο μέρος της επιστημονικής κοινότητας. Παρά ταύτα, η προσπάθεια εξαγωγής ποσοτικών προβλέψεων παρέμεινε καταδικασμένη από το γεγονός ότι η αλληλεπίδραση ήταν ισχυρή σε χαμηλές ενέργειες και οι συνηθισμένες μέθοδοι που αποδείχτηκαν σημαντικές για την κβαντική ηλεκτροδυναμική και τις ασθενείς αλληλεπιδράσεις, δεν ήταν ικανές για την QCD. Όσο και αν αυτό ακούγεται παράξενο, δεν μπορούμε να επιλύσουμε ακριβώς καμία κβαντική θεωρία σε 3+1 διαστάσεις χωρόχρονου. Αν βέβαια η αλληλεπίδραση είναι ασθενής μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε προσεγγιστικές μεθόδους. Στην QCD όμως, όλες οι πειραματικές παρατηρήσεις που αφορούν την θεωρία "περνούν" από τις χαμηλές ενέργειες και είναι εξαιρετικά δύσκολο να τις υπολογίσουμε ποσοτικά από την θεωρία σε αυτήν την περιοχή.

θεωρίας παραμένει ένα από τα μεγάλα άλυτα προβλήματα της θεωρητικής φυσικής. Το να αποδείξει κάποιος ότι η θεωρία κρατάει τα κουάρκ και τα γκλουόνια μόνιμα εγκλωβισμένα σε "άχρωμες" δέσμιες καταστάσεις (μεσόνια και βαρυόνια) που έχουν μη μηδενική μάζα, αποτελεί ένα από τα επτά μεγάλα μαθηματικά προβλήματα της χλιετηρίδας του Ιδρύματος Clay ([Clay Foundation](#)). Για την απόδειξη αυτή προβλέπεται μάλιστα [βραβείο ενός εκατομμυρίου δολλαρίων](#).

Οι φυσικοί δοκίμασαν πάμπολλες θεωρητικές τεχνικές για να αντλήσουν πληροφορίες από την θεωρία αλλά η επιτυχία ήταν προσεγγιστική και μερική. Μια ευθεία και ισχυρή μέθοδος υπολογισμού αναπτύχθηκε νωρίς από τον K. Wilson (βραβείο Nobel 1982) και ονομάζεται "QCD σε πλέγμα". Η κεντρική ιδέα της μεθόδου συνίσταται στην διακριτοποίηση του χωρόχρονου και τον περιορισμό του συστήματος σε πεπερασμένο όγκο. Το ολοκλήρωμα διαδρομών του Feynman που επιβάλλει τους κανόνες της κβαντικής φυσικής στην θεωρία, σε αυτήν την περίπτωση, αντικαθίσταται από μερικά εκατομμύρια απλά ολοκληρώματα που στην συνέχεια υπολογίζονται προσεγγιστικά χρησιμοποιώντας μεθόδους τύπου Monte Carlo. Τυπικοί υπολογισμοί σήμερα χωρίζουν την κάθε διάσταση σε 30 σημεία, ώστε ο χωρόχρονος συνολικά να έχει  $(30)^4$  σημεία. Παρά το φαινομενικά πενιχρό αυτής της προσέγγισης, μερικές ιδιότητες ισορροπίας της θεωρίας μπορούν να υπολογιστούν σήμερα ικανοποιητικά. Ο βασικός περιορισμός της ακρίβειας σε αυτήν την περίπτωση είναι η ισχύς των μοντέρνων ηλεκτρονικών υπολογιστών. Έτσι μπορούμε μεταξύ άλλων να υπολογίσουμε το φάσμα των πιο ελαφρών αδρονίων (μεσονίων και βαρυονίων), σε μηδενική θερμοκρασία καθώς και την θερμοδυναμική εξίσωση κατάστασης σε πεπερασμένη θερμοκρασία. Υπάρχουν όμως και αρκετά δυναμικά μεγέθη που δεν μπορούν να υπολογιστούν είτε γιατί είναι πολύπλοκα (οι σημερινοί υπολογιστές δεν είναι αρκετά γρήγοροι για να τα υπολογίσουν), είτε γιατί η μέθοδος του πλέγματος δεν επιτρέπει καν τον υπολογισμό τους.



**Εικόνα 2.** Δεξιά: Η πυκνότητα εντροπίας της θεωρίας Yang-Mills με  $N_c=3$ , διαιρεμένη με τον κύβο της θερμοκρασίας, (ώστε να είναι αδιάστατη), σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας, υπολογισμένη με μεθόδους πλέγματος. Φαίνεται η δραματική αύξηση της εντροπίας περίπου σε  $T=200$  GeV, που υποδηλώνει την αλλαγή φάσης πρώτης τάξης, και σηματοδοτεί την "απελευθέρωση του χρώματος". Αριστερά: Το "μέτρο αλληλεπίδρασης",  $(E-3p)/T^4$ , της ίδιας θεωρίας, σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας, υπολογισμένο με μεθόδους πλέγματος, ( $E$  είναι η ενέργεια και  $p$  είναι η πίεση). Έχει μέγιστο στην θερμοκρασία αλλαγής φάσης. Μηδενίζεται για μεγάλες θερμοκρασίες λόγω του ότι η θεωρία γίνεται ελεύθερη και σύμμορφη (αναλλοίωτη κάτω από αλλαγή κλίμακας).

Η αριθμητική μελέτη της θεωρίας σε μη μηδενική θερμοκρασία έχει δείξει την ύπαρξη μιας καινούργιας φάσης σε υψηλή θερμοκρασία, όπου η ισχυρά αλληλεπιδρώσα ύλη είναι στη μορφή ενός Πλάσματος Κουάρκ και Γκλουονίων (ΠΚΓ). Σε αυτήν την φάση, η ιδιότητα του "μόνιμου εγκλωβισμού" για τα κουάρκ

και γκλουόνια παύει να ισχύει, και το "χρώμα" γίνεται πλέον μια παρατηρήσιμη ποσότητα. Θα μπορούσαμε λοιπόν να χαρακτηρίσουμε το ΠΚΓ ως την "απεγκλωβισμένη φάση" της αδρονικής ύλης. Σε χαμηλές θερμοκρασίες, οι παρατηρήσιμες καταστάσεις είναι άχρωμα αδρόνια. Σε υψηλές θερμοκρασίες, είναι μια ζεστή (και χρωματιστή) σούπα από κουάρκς και γλουόνια. Το ΠΚΓ είναι μια καινούργια φάση της αδρονικής ύλης με πολύ διαφορετικές ιδιότητες από αυτήν που έχουμε μελετήσει τα τελευταία πενήντα χρόνια. Η κρίσιμη θερμοκρασία στην οποία γίνεται η αλλαγή, έχει υπολογιστεί με την μέθοδο του πλέγματος και είναι περίπου 160-200 MeV (2 τρισεκατομμύρια βαθμούς Κελσίου). Είναι πολύ μεγαλύτερη από οποιαδήποτε θερμοκρασία επικρατεί σήμερα στο σύμπαν, δέκα χιλιάδες φορές μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία που επικρατεί στο κέντρο του ήλιου και των άλλων αστερών και πολύ μεγαλύτερη ακόμα και από την θερμοκρασία στα κέντρα των πιο γνωστών κατακλυσμικών εκρήξεων, αυτών των υπερκαινοφανών αστερών.

Η παρουσία του ελεύθερου χρώματος στο ΠΚΓ και μερικές άλλες ενδείξεις οδήγησαν τους φυσικούς να πιστέψουν, επί δύο δεκαετίες, ότι οι αλληλεπιδράσεις στο ΠΚΓ είναι ασθενικές και επομένως ότι είναι εύκολο να κατανοηθεί από πρώτες αρχές η συμπεριφορά του ΠΚΓ χρησιμοποιώντας το συνηθισμένο εργαλείο των θεωρητικών φυσικών: τη θεωρία διαταραχών. Επί τριάντα σχεδόν χρόνια, το ΠΚΓ ήταν μια κατάσταση της ύλης μακριά από τον μεγεθυντικό φακό των πειραματικών φυσικών επειδή για τη δημιουργία του, θα έπρεπε να συγκεντρωθούν τεράστιες ποσότητες ενέργειας σε ένα πολύ μικρό χώρο. Η ισοδύναμη θερμοκρασία θα έπρεπε να είναι πολλές τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη από οτιδήποτε υπάρχει στο σύμπαν σήμερα. Είναι η θερμοκρασία που πιστεύουμε ότι είχε η ύλη στο σύμπαν μερικά δισεκατομμυριοστά του δευτερολέπτου μετά την "μεγάλη έκρηξη".

Στο παρελθόν έγιναν πολλά πειράματα για να επιτευχθεί μια τέτοια πυκνότητα ενέργειας σε θερμοδυναμική ισορροπία.



**Εικόνα 3.** Η σήραγγα του επιταχυντή RHIC στο Brookhaven

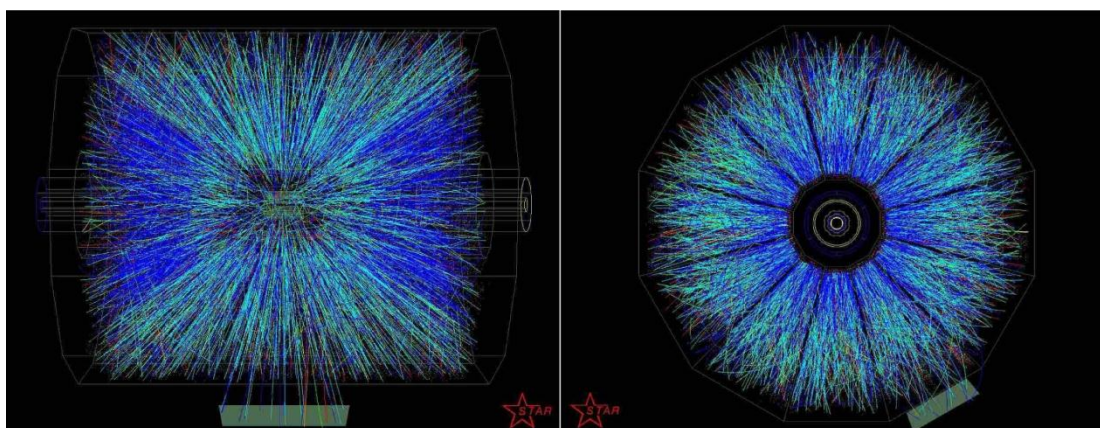
Τη δεκαετία του '80, έγινε η πρώτη προσπάθεια στο Bevalac του Lawrence Berkeley Laboratory. Τη δεκαετία του '90, ακολούθησαν πειράματα στο AGS του Brookhaven και στο SPS του CERN. Τα αποτελέσματα όμως έδειξαν ότι δεν είχε ακόμα επιτευχθεί η κρίσιμη πυκνότητα ενέργειας, αν και στα πειράματα του CERN, παρατηρήθηκαν τα πρώτα δείγματα

"συλλογικής" συμπεριφοράς των σκεδαζόμενων νουκλεονίων. Παρά τις τεχνικές δυσκολίες, οι φυσικοί κατόρθωσαν

πρόσφατα να δημιουργήσουν το ΠΚΓ σε συγκρούσεις βαρέων πυρήνων στον επιταχυντή RHIC στο Brookhaven. Η γενική ιδέα συνίσταται στην επιτάχυνση πυρήνων (χαλκού η χρυσού στο RHIC) ώστε να φέρουν τελικά ενέργεια 200 GeV ανά νουκλεόνιο στο κέντρο μάζας. Οι εξαιρετικά ενεργητικοί αυτοί πυρήνες ταξιδεύουν πριν τη σύγκρουσή τους με ταχύτητες σχεδόν ίσες με την ταχύτητα του φωτός. Φέρονται σε μετωπική σύγκρουση σε ειδικά σημεία του επιταχυντή, όπου υπάρχουν οι ανιχνευτές.

Οι συγκρούσεις που ακολουθούν είναι εντυπωσιακής ισχύος και ο αριθμός των σωματιδίων που φτάνει τελικά στους ανιχνευτές είναι τεράστιος. Σε μια μετωπική

σύγκρουση παράγονται περίπου 9000 σωματίδια. Οι τροχιές τους φαίνονται στην παρακάτω εικόνα που απεικονίζει τις τροχιές των φορτισμένων σωματιδίων όπως αυτές ανιχνεύονται από τον ανιχνευτή του [πειράματος STAR](#) στο [RHIC](#).



**Εικόνα 4.** Σύγκρουση βαρέων ιόντων χρυσού στο RHIC, όπως καταγράφηκε από τον ανιχνευτή του πειράματος STAR. Φαίνονται οι τροχιές μόνο των φορτισμένων σωματιδίων, στην συντριπτική τους πλειοψηφία αδρονίων. Οι δύο φωτογραφίες είναι από τα πλάγια της δέσμης (αριστερά) και κάθετα στον αγωγό δέσμης (δεξιά). Το πείραμα καταφέρνει να αναγνωρίσει την πλειοψηφία των χιλιάδων σωματιδίων που καταγράφονται σε κάθε σύγκρουση.

Σε ελάχιστο χρόνο μετά την σύγκρουση η αδρονική ύλη που παράγεται έρχεται σε θερμική ισορροπία. Η αρχική θερμοκρασία της είναι περίπου διπλάσια από την κρίσιμη θερμοκρασία για τη δημιουργία του ΠΚΓ.

Η μεγάλη έκπληξη για θεωρητικούς και πειραματικούς φυσικούς ήταν η ασυμβατότητα των πειραματικών ενδείξεων με την περιγραφή του ΠΚΓ σαν μια σούπα σχεδόν ελεύθερων κουάρκ και γκλουονίων όπως πιστευόταν μέχρι τότε. Η καλύτερη (προσεγγιστική) περιγραφή των πολύπλοκων πειραματικών δεδομένων υπέθετε ότι το ΠΚΓ ήταν ένα υγρό με ελάχιστο ιξώδες. Αυτό θα μπορούσε να συμβεί μόνο αν οι αλληλεπιδράσεις ήταν πολύ ισχυρές. Τα πειραματικά δεδομένα μάλιστα υπονοούσαν ότι το ΠΚΓ είναι το ιδανικότερο υγρό που έχει παρατηρηθεί μέχρι σήμερα στην φύση. Ο λόγος του εγκάρσιου ιξώδους ως προς την πυκνότητα εντροπίας του είναι μικρότερος κατά μια τάξη μεγέθους από τον μέχρι τότε "πρωταθλητή", το υπερρευστό υγρό ήλιο<sub>3</sub>.

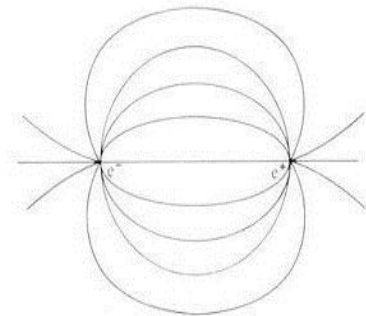
Οι τεχνικές ασθενούς αλληλεπίδρασης που αποτελούν το βασικό κουτί εργαλείων για τους θεωρητικούς φυσικούς, ήταν αδύνατον να βοηθήσουν εδώ. Οι αριθμητικοί υπολογισμοί πάνω σε πλέγμα, οι οποίοι στο παρελθόν είχαν βοηθήσει πολύ στην κατανόηση της θεωρίας, αποδείχθηκαν εδώ ανήμποροι: δεν μπορούσαν να χειριστούν δυναμικές ερωτήσεις σε πεπερασμένη θερμοκρασία. Σε αυτό το σημείο ένας απρόσμενος συνέταιρος έκανε την εμφάνισή του: η θεωρία των χορδών.

Για να καταλάβουμε αυτό το γεγονός, θα πρέπει να γυρίσουμε στο 1974, στην χρονιά που ανακαλύφθηκε η ασυμπωτική ελευθερία της QCD. Ο G. 't Hooft (βραβείο Nobel 1999), χρησιμοποίησε το γεγονός ότι μπορεί να γενικεύσει την QCD σε μια υποθετική θεωρία όπου τα κουάρκ και τα γκλουόνια έχουν αυθαίρετο αριθμό χρωμάτων ίσον με  $N_c$ . Στον κόσμο μας υπάρχουν τρία χρώματα και άρα το  $N_c = 3$ . Ο

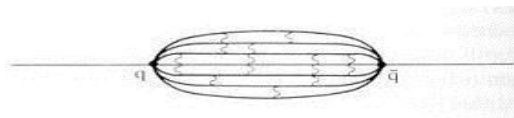
't Hooft παρατήρησε ότι όταν το  $N_c$  είναι πολύ μεγάλο, τότε η θεωρία φαίνεται να συμπεριφέρεται σαν μια θεωρία χορδών οι οποίες αλληλεπιδρούν μεταξύ τους ασθενικά. Η ιστορική ειρωνεία είναι ότι η παρατήρηση του 't Hooft συνέπεσε με τον "θάνατο" της πρώτης θεωρίας των χορδών (γνωστές τότε σαν "δυσικά μοντέλα") που διατυπώθηκε έμμεσα, από τον Veneziano, το 1968, για να περιγράψει τις ισχυρές αλληλεπιδράσεις.

Η περιγραφή των ισχυρών αλληλεπιδράσεων μέσω των χορδών φάνηκε διαισθητικά πιθανή εξαιτίας του "μόνιμου εγλωβισμού" των γκλουονίων (και κουάρκ).

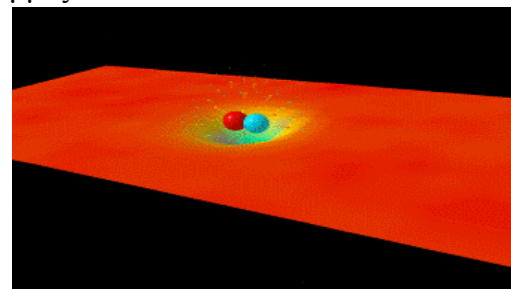
Στην περίπτωση του ηλεκτρομαγνητισμού, το ηλεκτρικό πεδίο που γεννιέται από ένα θετικό και ένα αρνητικό ηλεκτρικό φορτίο έχει την γνωστή διπολική μορφή όπως φαίνεται στο διπλανό σχήμα. Οι γραμμές του πεδίου εκτείνονται και μεταξύ των φορτίων αλλά και από τα φορτία προς το άπειρο. Αντίθετα, στην περίπτωση ένα διπόλου από κουάρκς, ο "μόνιμος εγλωβισμός" της θεωρίας δεν επιτρέπει στις γραμμές του χρωμο-ηλεκτρικού πεδίου, να απομακρυνθούν όπως στον ηλεκτρομαγνητισμό. Αν απομακρύνουμε το κουάρκ από το αντικουάρκ, οι γραμμές



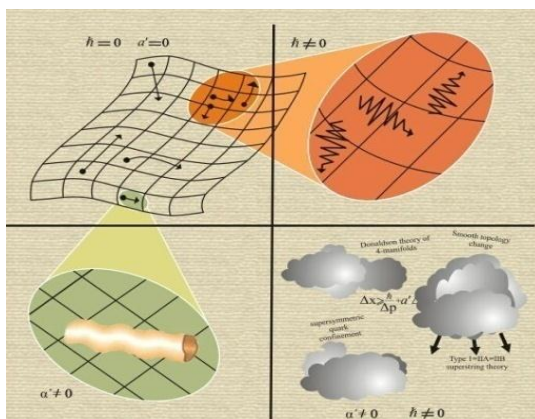
**Εικόνα 5:** Ηλεκτρικό πεδίο φορτίων στον ηλεκτρομαγνητισμό



**Εικόνα 6.** Γραμμές χρωμοηλεκτρικού πεδίου μεταξύ ενός κουάρκ και ενός αντικουάρκ. Το πεδίο είναι συμπιεσμένο σε μια δέσμη που δεν διαχέεται σε όλο τον χώρο και συμπεριφέρεται σαν ένα ελατήριο που ασκεί ελκτική δύναμη στα σωμάτια.



**Εικόνα 7.** Σύνδεσμος σε μια δυναμική εικόνα της χρωμοηλεκτρικής χορδής που κρατάει δέσμη τα κουάρκς.

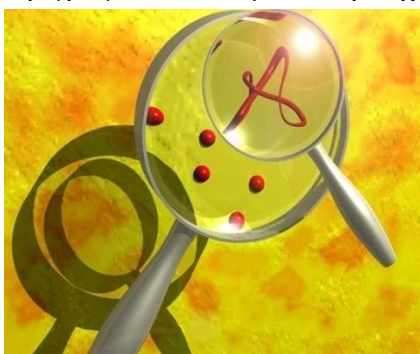


**Εικόνα 8.** Τέσσερις (σηματικές) περιοχές στην φυσική των χορδών, σαν συνάρτηση των θεμελιωδών σταθερών τους, η σταθερά του Planck,  $\hbar$  και η τάση της χορδής  $\alpha'$ . Η περιοχή πάνω αριστερά είναι η κλασσική περιοχή, σκληρών χορδών. Η περιοχή κάτω δεξιά είναι η άκρως κβαντική περιοχή όπου ούτε ο χωρόχρονος ούτε οι ίδιες οι χορδές είναι καλά ορισμένες

συγκεντρώνονται σε μια λεπτή δέσμη που τα ενώνει. Αυτή η δέσμη συμπεριφέρεται σαν ένα ελατήριο (χορδή) που "δένει" τα κουάρκς μεταξύ τους και συνοψίζει έτσι την ισχυρή αλληλεπίδραση (όπως φαίνεται και στην μικρή ταινία που παρατίθεται στον υπερσύνδεσμο της εικόνας 7). Αυτή η χορδή που "δένει" τα κουάρκς μεταξύ τους φαίνεται να εκτείνεται στο χώρο και το χρόνο, δηλαδή σε 3+1 διαστάσεις. Παρά την απλή αυτή εικόνα, η προσπάθεια της περιγραφής των ισχυρών αλληλεπιδράσεων από μια θεωρία χορδών, έμεινε ουσιαστικά άκαρπη έως το 1997.

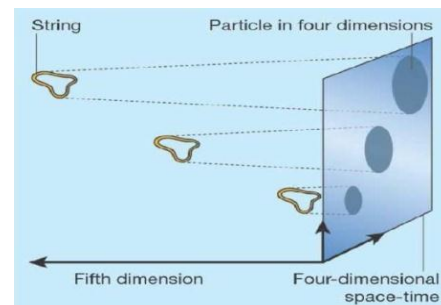
Εν τω μεταξύ, οι (υπερ)χορδές ως βασικό συστατικό της ύλης, επανήλθαν στο προσκήνιο το 1984, με μεγαλύτερες πλέον φιλοδοξίες: να περιγράψουν και να ενοποιήσουν όλες τις θεμελιώδεις αλληλεπιδράσεις, συμπεριλαμβανομένης και της βαρύτητας. Μαζί τους έφεραν και μια μεγάλη αλλαγή: αν οι υπερχορδές περιέγραφαν τα βασικά συστατικά της ύλης, ο κόσμος θα έπρεπε να έχει 9+1 διαστάσεις. Η θεωρία των υπερχορδών δίνει την πιο εξελιγμένη μορφή θεωρίας κβαντικής βαρύτητας και φιλοδοξεί να προσφέρει ένα πλαίσιο ενοποίησης όλων των αλληλεπιδράσεων. Πιο συγκεκριμένα, ενοποιεί την βαρύτητα με την κβαντική μηχανική και προσφέρει μια καινούργια οπτική, και σε κάποιο βαθμό λύση, στα προβλήματα των μελανών οπών και της απώλειας πληροφορίας λόγω της ακτινοβολίας Hawking. Η θεωρία των υπερχορδών έχει επίσης αποδειχθεί «θησαυρός» για τα μοντέρνα μαθηματικά, επειδή έχει δημιουργήσει νέες κατευθύνσεις, αναγκαίες για τη μελέτη και κατανόηση της θεωρίας. Παρά τις προόδους των τελευταίων δεκαετιών, οι φυσικοί που ασχολούνται με αυτήν συμφωνούν ότι τα μαθηματικά εργαλεία που διαθέτουμε είναι ακόμα πρωτόγονα για να μπορέσουμε να κατανοήσουμε το εύρος και το βάθος της θεωρίας των υπερχορδών.

Το 1997, ο Juan Maldacena, μόλις έχει πάρει το διδακτορικό του από το πανεπιστήμιο του Princeton, μελετώντας τις μικροκαταστάσεις των μελανών οπών, στα πλαίσια της θεωρίας των χορδών (ένα από τα μεγάλα προβλήματα που γέννησαν οι μελέτες των Χριστοδούλου, Bekenstein και Hawking). Επηρεασμένος από τα αποτελέσματα αυτών των μελετών καθώς και από την ακρίβεια μερικών πολύ προσεγγιστικών υπολογισμών, ο Maldacena έκανε μια θαρραλέα και αναπάντεχη παρατήρηση/πρόταση: σε μια θεωρία βαθμίδα ισχυρών αλληλεπιδράσεων, αρκετά όμοια με την κβαντική χρωμοδυναμική σε 3+1 χωροχρονικές διαστάσεις, οι αλληλεπιδράσεις φαίνεται να περιγράφονται από μια θεωρία χορδών που (α)



**Εικόνα 10.** Μια χορδή αν την δούμε από πολύ μακριά (ισοδύναμα αν είναι πολύ μικρή) φαίνεται σαν σημειακό σωματίδιο. Μόνο με μεγεθυντικό φακό (επιταχυντή?) μπορούμε ίσως να δούμε το μέγεθος και το ποιόν της.

ερευνητών του πεδίου. Η θεωρία αυτή των ισχυρών αλληλεπιδράσεων μοιάζει να περιέχει χορδές που "γέννησαν" έξι καινούργιες διαστάσεις. Αν κάποιος περιγράφει



**Εικόνα 9.** Πενταδιάστατος χώρος, με ένα τετραδιάστατο όριο στα δεξιά. Οι χορδές κινούνται σε όλο τον πενταδιάστατο χώρο. Τα παρατηρήσιμα μεγέθη τους ορίζονται μόνο στο όριο. Οι αντίστοιχη θεωρία βαθμίδα ορίζεται πάνω στο τετραδιάστατο όριο.

κινείται σε 9+1 διαστάσεις και (β) η γεωμετρία του

δεκαδιάστατου χωροχρόνου είναι καμπύλη αλλά ιδιαίτερα συμμετρική. Η γεωμετρία αυτή, περιέχει δύο πενταδιάστατες γεωμετρίες. Η μια περιγράφεται από ένα χώρο σταθερής αρνητικής καμπυλότητας. Τέτοιοι χώροι λέγονται χώροι Anti-DeSitter (AdS) προς τιμή του Ολλανδού μαθηματικού που τους μελέτησε πρώτος. Η άλλη γεωμετρία είναι μια πενταδιάστατη σφαίρα, ένα χώρος σταθερής θετικής καμπυλότητας .

Η εικασία αυτή ήλθε σαν κεραυνός εν αιθρία και προσέκρουσε στην αρχή στη δυσπιστία των

τη θεωρία με τη συνηθισμένη γλώσσα των γκλουονίων, αυτά κινούνται στις συνηθισμένες 3+1 διαστάσεις. Αν όμως κάποιος περιγράψει ισοδύναμα την δυναμική, χρησιμοποιώντας τη γλώσσα των χορδών, τότε αυτές κινούνται σε ένα χώρο 9+1 διαστάσεων που περιέχει και τις συνηθισμένες 3+1 διαστάσεις. Ο δεκαδιάστατος χώρος των χορδών έχει ένα μοναδικό τετραδιάστατο "τέλος" (ή "όριο" όπως το λένε οι μαθηματικοί). Η πενταδιάστατη σφαίρα δεν έχει σημαντικό ρόλο σε αυτήν την αντιστοιχία. Τον κύριο ρόλο έχει ο χώρος αρνητικής καμπυλότητας, Anti-DeSitter ο οποίος έχει άπειρο όγκο και τετραδιάστατο "όριο". Αυτό το τετραδιάστατο "τέλος του κόσμου" είναι ο τετραδιάστατος χώρος στον οποίο ζουν και κινούνται τα γκλουόνια. Οι παραπάνω διαστάσεις γίνονται περισσότερο εμφανείς όταν ο αριθμός των χρωμάτων της θεωρίας βαθμίδας είναι μεγάλος. Σε αυτή την περίπτωση τα κβαντικά φαινόμενα της αντίστοιχης θεωρίας χορδών είναι ασθενικά και η κλασική γεωμετρία είναι σχεδόν αδιατάραχη. Αν μάλιστα η σταθερά σύζευξης της θεωρίας βαθμίδας είναι ισχυρή, τότε η (κλειστή) χορδή γίνεται ιδιαίτερα άκαμπτη, και οι ταλαντώσεις της "κοστίζουν" σημαντική ενέργεια. Έτσι, σε χαμηλές ενέργειες, όπου η διαθέσιμη ενέργεια είναι λίγη, μπορούμε να τις αγνοήσουμε και να προσεγγίσουμε τη δυναμική της χορδής με αυτήν ενός σημειακού σωματιδίου: σε αυτό το όριο, η θεωρία των χορδών γίνεται μια (γενικευμένη) θεωρία βαρύτητας.



**Εικόνα 11.** Οι κλασικές μελανές οπές αποτελούν "νεκροταφεία πληροφορίας". Είναι στο προσκήνιο για μερικές δεκαετίες και παίζουν καθοριστικό ρόλο στην κατανόηση της βαρύτητας. Τώρα φαίνεται να κρατούν επίσης τα μυστικά των ισχυρά αλληλεπιδρώντων θεωριών βαθμίδας.

Η παραπάνω αναπάντεχη αντιστοιχία μεταξύ θεωριών βαθμίδας και θεωρίας χορδών που ζουν στο χώρο Anti-DeSitter είναι σήμερα γνωστή ως "αντιστοιχία AdS/CFT". Παραμένει ακόμα και σήμερα μια εικασία η οποία όμως έχει περάσει ένα μεγάλο αριθμό από δοκιμασίες, ούτως ώστε οι φυσικοί να μην αμφιβάλλουν για την ισχύ της αν και δεν την έχουν ακόμα αποδείξει αυστηρά. Την τελευταία δεκαετία, η αντιστοιχία AdS/CFT έχει αποτελέσει μια γόνιμη "υπόθεση" που έχει οδηγήσει σε σημαντικά αποτελέσματα

Η παρουσία μιας θεωρίας χορδών ως διαφορετικής (αλλά ισοδύναμης) περιγραφής των ισχυρών αλληλεπιδράσεων των γκλουονίων, έφερε στο προσκήνιο ένα νέο

στοιχείο, τη βαρύτητα, που είναι αναπόσπαστο κομμάτι κάθε θεωρίας με κλειστές χορδές, αναπόσπαστο και αναπάντεχο συστατικό κάθε θεωρίας βαθμίδας. Αυτή η συνειδητοποίηση άλλαξε σημαντικά τον τρόπο που βλέπουμε τις αλληλεπιδράσεις. Μέχρι τώρα, είχαμε το καθιερωμένο πρότυπο των αλληλεπιδράσεων που περιέγραφε τις τρεις γνωστές αλληλεπιδράσεις (ισχυρή και ηλεκτρασθενείς), χρησιμοποιώντας θεωρίες βαθμίδας και τη βαρύτητα που έμοιαζε πολύ διαφορετική από τις υπόλοιπες αλληλεπιδράσεις. Στην προσπάθεια ενοποίησής τους με την θεωρία των υπερχορδών, η βαρύτητα και οι θεωρίες βαθμίδας, σχετίζονται μεν, αλλά φαίνεται να συμπεριφέρονται διαφορετικά. Η αντιστοιχία AdS/CFT όμως μας διαβεβαιώνει πλέον ότι δεν υπάρχει καμία σημαντική διαφορά μεταξύ θεωριών βαθμίδας και

γενικευμένων θεωριών βαρύτητας : πρόκειται για δύο διαφορετικές περιγραφές της ίδιας θεωρίας.

Ένα άλλο ενδιαφέρον στοιχείο της αντιστοιχίας είναι η ολογραφική ιδιότητα. Όπως και στα συνηθισμένα ολογράμματα, η πληροφορία της δεκαδιάστατης θεωρίας των χορδών είναι αποτυπωμένη στο τετραδιάστατο όριο του χώρου. Για το λόγο αυτό, είναι επίσης γνωστή ως "ολογραφική αντιστοιχία".

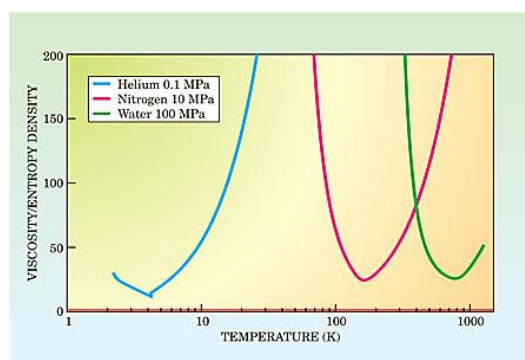
Μια ενδιαφέρουσα άποψη αυτής της αντιστοιχίας απορρέει από την προσπάθεια περιγραφής των αλληλεπιδράσεων βαθμίδας σε ένα περιβάλλον πεπερασμένης θερμοκρασίας. Το περιβάλλον που αντιστοιχεί στην αντίστοιχη θεωρία των χορδών, όπως παρατήρησε [o Witten το 1998](#), είναι αυτό μια μελανής οπής με θερμοκρασία Hawking ίση με αυτήν της θεωρίας βαθμίδας. Η σύνδεση μελανών οπών με θεωρίες βαθμίδας, σε πεπερασμένη θερμοκρασία, έδωσε μια καινούργια ώθηση στις μελέτες του προβλήματος της πληροφορίας και φαίνεται να [έπεισε τον Hawking ότι η πρόβλεψή του, το 1974, για την οριστική απώλεια της πληροφορίας είναι άστοχη](#).

Η σύνδεση των καταστάσεων πεπερασμένης θερμοκρασίας με μελανές οπές έδωσε μια καινούργια διάσταση στο πρόβλημα της φυσικής του πλάσματος κουάρκ και γκλουονίων. Η φάση της απελευθέρωσης του χρώματος σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες από περίπου 200 MeV περιγράφεται στην βαρυτική περιγραφή από μια μελανή οπή! Και η δυναμική των μικρών διακυμάνσεων σε

αυτήν την φάση περιγράφεται από την σχετικιστική υδροδυναμική: η αλληλεπίδραση είναι αρκετά δυνατή ώστε το πλάσμα κουάρκ και γκλουονίων να συμπεριφέρεται σαν υγρό. Είναι βέβαια ένα πολύ ασυνήθιστο υγρό με πυκνότητα εντροπίας, πολλές τάξεις μεγέθους μεγαλύτερης από οτιδήποτε άλλο έχουμε μελετήσει μέχρι σήμερα.

Μια σημαντική ιδιότητα ενός υγρού είναι το ιξώδες του. Ένα υγρό με μηδενικό συντελεστή ιξώδους, το ονομάζουμε ιδανικό, επειδή σε αυτήν την περίπτωση, δεν υπάρχουν καθόλου απώλειες και διατηρείται η εντροπία. Πραγματικά υγρά βέβαια, έχουν μη-μηδενικό συντελεστή ιξώδους, ο οποίος μπορεί να κυμαίνεται σε μια μεγάλη περιοχή από αριθμούς. Το νερό π.χ., έχει συντελεστή ιξώδους περίπου 1 cp (centipoise) ενώ η γλυκερίνη περίπου 1500 cp. Άλλα υλικά, όπως το γυαλί, έχουν ιξώδες μεγαλύτερο από  $10^{15}$  cp.

Μπορούμε να συγκρίνουμε το συντελεστή ιξώδους «η» μέσω του λόγου του με την πυκνότητα εντροπίας, s. Αυτός ο λόγος, η/s έχει διαστάσεις στροφορμής. Μπορεί επομένως να εκφραστεί σε πολλαπλάσια της (κβαντικής) σταθεράς του Planck, ħ.



**Εικόνα 12.** Ο λόγος ιξώδους προς πυκνότητα εντροπίας σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας για τρεις χημικές ενώσεις: το νερό (πράσινη καμπύλη), το άζωτο (κόκκινη καμπύλη) και το ήλιο (μπλέ καμπύλη). Το ελάχιστο κάθε καμπύλης βρίσκεται κοντά στην αντίστοιχη αλλαγή φάσης. Από το *K. Blau*, [Phys. Today 58, May, 23 \(2005\)](#).

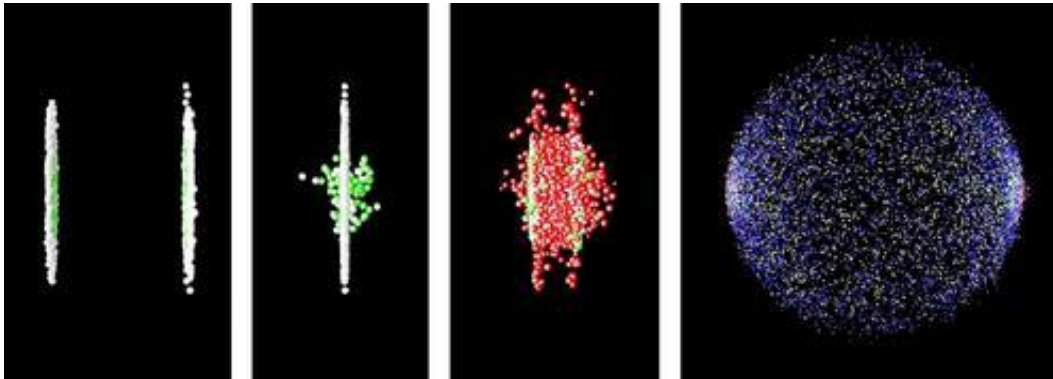
Υλικό	Ελάχιστο
-------	----------



	$\eta/s$ σε $\hbar/4\pi$
H, He	8.8
Ne	17
Ar	37
Kr	57
Xe	84
H <sub>2</sub> O	25
H <sub>2</sub> S	35
N <sub>2</sub>	23
O <sub>2</sub>	28
CO	35
CO <sub>2</sub>	32
SO <sub>2</sub>	39

Όταν, το 2001, οι Policastro, Son και Starinets υπολόγισαν το συντελεστή ιξώδους ενός υποθετικού, πολύ συμμετρικού πλάσματος κουάρκς και γκλουονίων, χρησιμοποιώντας τεχνικές της θεωρίας χορδών, η απάντηση ήταν ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα. Αφενός γιατί ο υπολογισμός του ιξώδους, χρησιμοποιώντας ως εργαλείο τη βαρύτητα, μεταφράζεται στον υπολογισμό της πιθανότητας απορρόφησης ενός βαρυτονίου πολύ χαμηλής ενέργειας από μια μελανή οπή. Αφετέρου επειδή ο υπολογισμός έδωσε μια απάντηση, ιδιαίτερα ευρείας ισχύος, για τον λόγο του συντελεστού ιξώδους προς την πυκνότητα εντροπίας:  $\eta/s = \hbar/4\pi$ . Επιπλέον εκφράστηκε η εικασία ότι η τιμή αυτή είναι η πιο μικρή που επιτρέπουν τα κβαντικά φαινόμενα. Αυτός ο λόγος είναι ο μικρότερος

από όλα τα μέχρι τώρα γνωστά ρευστά, όπως φαίνεται και στο διπλανό πίνακα. Είναι μάλιστα σχεδόν 10 φορές μικρότερος από το ελάχιστο  $\eta/s$  που γνωρίζουμε μέχρι σήμερα, αυτό του υγρού ηλίου, που είναι το ρευστό με τα πιο έντονα κβαντικά φαινόμενα. Το υγρό ήλιο βέβαια γίνεται υπερρευστό κοντά στο απόλυτο μηδέν. Παραμένει όμως πάντα μια πεπερασμένη αναλογία κανονικού ρευστού που έχει μη τετριμμένο ιξώδες. Ο λόγος αυτός εξακολουθεί να παραμένει μικρότερος από τα πρόσφατα κατασκευασθέντα, ισχυρά αλληλεπιδρώντα συσσωματώματα Bose-Einstein που χρησιμοποιούν το συντονισμό του Feshbach.

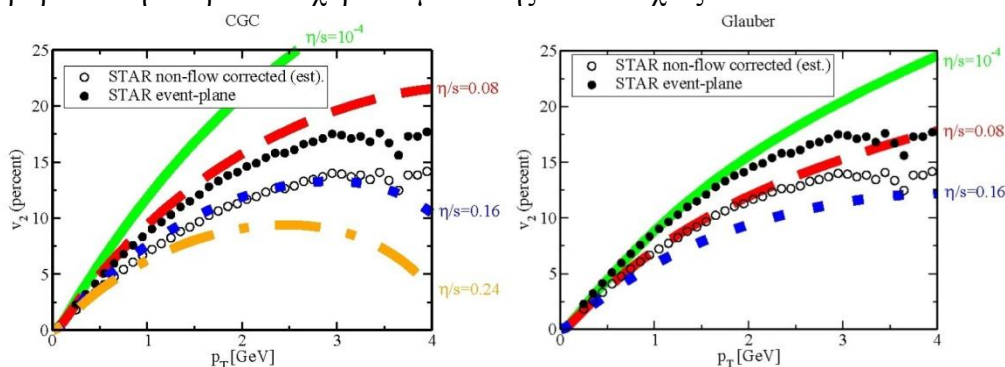


**Εικόνα 13.** Διάφορα στάδια στην σύγκρουση δύο πυρήνων χρυσού. Από αριστερά: (α) οι πυρήνες, πλησιάζουν μοιάζοντας σαν τηγανίτες λόγω της σχετικιστικής συστολής Lorentz. (β) Γίνεται η πρόσκρουση, και η ενέργεια τους αρχίζει να μετατρέπεται σε ισχυρά αλληλεπιδρώντα σωματίδια. (γ) Η καινούργια ύλη που δημιουργείται έρχεται σχεδόν ακαριαία σε θερμική ισορροπία και αρχίζει να διαστέλλεται αδιαβατικά. (δ) όταν η θερμοκρασία κατέβει κάτω από την κρίσιμη τιμή, το πλάσμα μετατρέπεται σε αδρόνια. Ο υπερσύνδεσμος οδηγεί σε μια μικρή ταινία της παραπάνω σύγκρουσης.

Αυτή η συμπεριφορά φαίνεται να εμφανίζεται στα πειράματα που έγιναν και συνεχίζονται στο [RHIC](#). Η εικόνα που έχει διαμορφωθεί μετά από δέκα περίπου χρόνια πειραμάτων και σημαντικής μελέτης θεωρητικών και πειραματικών φυσικών είναι η εξής: Δύο βαρείς πυρήνες επιταχύνονται σε υψηλή ενέργεια και εν συνεχεία συγκρούονται όπως φαίνεται στην εικόνα 13. Στο σύστημα αναφοράς του κέντρου μάζας, λόγω της σχετικιστικής συστολής μήκους, οι σφαιρικοί πυρήνες μοιάζουν σαν σχεδόν επίπεδες τηγανίτες. Η κατά μήκος διάστασή τους συμπιέζεται περίπου 100

φορές. Η σύγκρουση δημιουργεί πολύ γρήγορα (μόλις μετά από  $3 \times 10^{-24}$  δευτερόλεπτα) κουάρκς και γκλουόνια στην περιοχή ανάμεσα στους συγκρουσθέντες πυρήνες. Η ύλη που σχηματίζεται, έρχεται, σχεδόν ακαριαία, λόγω των ισχυρών αλληλεπιδράσεων, σε θερμική ισορροπία με θερμοκρασία περίπου 400 MeV (που αντιστοιχεί σε  $4 \times 10^{12}$  °C, περίπου 4 τρισεκατομμύρια βαθμούς Κελσίου), δύο φορές μεγαλύτερη από την θερμοκρασία αλλαγής φάσης της QCD. Σύμφωνα με όσα γνωρίζουμε, είναι με μεγάλη διαφορά, η υψηλότερη θερμοκρασία που υπάρχει στο σύμπαν σήμερα. Σε αυτήν τη φάση, η ύλη είναι ουσιαστικά το ρευστό του ΚΓΠ. Στη συνέχεια, το ρευστό αρχίζει να διαστέλλεται αδιαβατικά και ταυτόχρονα να ψύχεται έως ότου η θερμοκρασία του πέσει κάτω από τη θερμοκρασία αλλαγής φάσης. Αυτή η περίοδος διαστολής διαρκεί περίπου  $3 \times 10^{-23}$  δευτερόλεπτα. Αν και ο χρόνος φαίνεται μικρός, είναι όμως αρκετά μεγάλος για τα δεδομένα των ισχυρών αλληλεπιδράσεων και μάλιστα αρκετός ώστε το ΠΓΚ να μελετηθεί επαρκώς. Είναι σαν να χρειάζεται να μετρήσουμε ένα διάστημα 10 δευτερολέπτων με ένα χρονόμετρο ακρίβειας ενός δευτερολέπτου.

Όταν πλέον η θερμοκρασία πέσει χαμηλότερα από τα 200 MeV, συμβαίνει η αλλαγή φάσης : το χρωματιστό ρευστό μετατρέπεται σε άχρωμα σωματίδια (αδρόνια) που συνεχίζουν το ταξίδι τους μέχρι να φτάσουν στους ανιχνευτές και να καταμετρηθούν. Τα πειραματικά αποτελέσματα, όπως φαίνονται στο παρακάτω σχήμα, αν και όχι εξαιρετικά ακριβή, επιβεβαιώνουν ότι το ΠΓΚ είναι το ιδανικότερο υγρό στην φύση με λόγο συντελεστού ιξώδους προς την πυκνότητα εντροπίας κοντά σε αυτόν που προβλέπει η θεωρία των χορδών μέσω της αντιστοιχίας AdS/CFT.



**Εικόνα 14.** Διαγράμματα του συντελεστή ελλειπτικής ροής,  $v_2$ , σαν συνάρτηση της εγκάρσιας ορμής. Περιέχει τα πειραματικά δεδομένα από το πείραμα του και διάφορες καμπύλες που συνοψίζουν τους θεωρητικούς υπολογισμούς χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις της σχετικιστικής υδροδυναμικής, με διάφορες τιμές του λόγου  $\eta/s=0,0.08,0,16,0,24$ . για δύο ειδών αρχικές συνθήκες, (αριστερά) και (δεξιά). Τα πειραματικά δεδομένα συγκλίνουν σε μια τιμή του λόγου  $\eta/s=0.08-0,16$ . Από το [M. Luzum, P. Romatchke, Phys.Rev.C78:034915,2008.](#)

Η αντιστοιχία AdS/CFT έχει μελετηθεί αρκετά στην πιο απλή θεωρία που μπορεί να εφαρμοστεί: τη μέγιστα υπερσυμμετρική ( $N=4$ ) θεωρία Yang-Mills σε τέσσερις διαστάσεις. Η θεωρία αυτή έχει σημαντικές ομοιότητες με την QCD αλλά και σημαντικές διαφορές. Η πιο σημαντική διαφορά είναι η ασυμπτωτική ελευθερία της QCD: η σύζευξη γίνεται ασθενική σε υψηλές ενέργειες. Αυτό σημαίνει ότι η αντίστοιχη θεωρία χορδών έχει ιδιαίτερα χαλαρές χορδές σε υψηλές ενέργειες, γεγονός που κάνει το χειρισμό της θεωρίας δύσκολο στην βαρυτική της ενσάρκωση. Όσο και αν αυτό φαίνεται περίεργο, δεν είμαστε ακόμα ικανοί να λύσουμε ακριβώς τις θεωρίες χορδών που αντιστοιχούν στις θεωρίες βαθμίδας. Προς το παρόν, οι υπολογιστικές προσεγγίσεις περιορίζονται στην βαρυτική προσέγγιση: οι χορδές προσεγγίζονται με σημειακά σωματίδια.

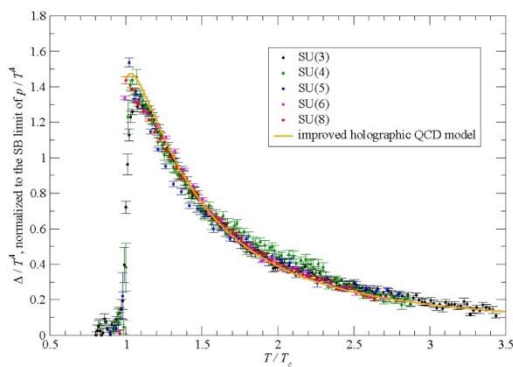
Οι φυσικοί έχουν κατασκευάσει μέχρι σήμερα αρκετές προσεγγίσεις της QCD, χρησιμοποιώντας διάφορων ειδών ολογραφικά μοντέλα. Με αυτές τις μελέτες έχουν κατορθώσει μια σειρά από σημαντικές προόδους στη φυσική των θεωριών με ισχυρές αλληλεπιδράσεις:

I. Η "μόνιμη σκλαβιά" για τα κουάρκ και γκλουόνια έχει αποδειχθεί αναλυτικά σε μια μεγάλη κατηγορία από θεωρίες.

II. Το δυναμικό και αυθόρμητο σπάσιμο της χειρικής συμμετρίας (chiral symmetry), ένα φαινόμενο-κλειδί για την κατανόηση του αδρονικού κόσμου, έχει αποδειχθεί αναλυτικά σε πολλά παραδείγματα.

III. Τα φάσματα των μεσονίων και βαρυονίων έχουν υπολογιστεί σε αρκετές θεωρίες χρησιμοποιώντας φορητούς υπολογιστές αντί για υπερυπολογιστές που χρησιμοποιούνται στην QCD επί πλέγματος.

IV. Οι αλλαγές φάσης της απεγκλώβισης και της αποκατάστασης της χειρικής συμμετρίας έχουν μελετηθεί και κατανοηθεί σε πολλά παραδείγματα χρησιμοποιώντας τη φυσική των μελανών οπών και τη βαρυτική θερμοδυναμική τους.



**Εικόνα 15.** Το αδιάστατο μέτρο αλληλεπίδρασης της θεωρίας Yang-Mills,  $(E-3p)/T^4$ , κατάλληλα κανονικοποιημένο, για διαφορετικές τιμές του αριθμού των χρωμάτων, 3 (μαύρο), 4 (πράσινο), 5(μωβ), 6 (ανοιχτό μωβ), 8 (κόκκινο), υπολογισμένο σε πλέγμα. Η διαφορά στις καμπύλες για διαφορετικό αριθμό χρωμάτων είναι μηδαμινές. Η κίτρινη καμπύλη είναι η πρόβλεψη της ολογραφικού μοντέλου της QCD. Από [το M. Panero, Phys.Rev.Lett. 103 \(2009\) 232001](https://arxiv.org/abs/0904.1572)

αλλά και ισχυρή σύζευξη.

Τα πιο ρεαλιστικά μοντέλα που πλησιάζουν την φυσική της QCD είναι φαινομενολογικά ολογραφικά μοντέλα. Το πιο προχωρημένο μοντέλο σε αυτήν την κατεύθυνση, η "Ολογραφική QCD", χρησιμοποιεί την βαρύτητα σε 5 διαστάσεις μαζί με ένα βαθμωτό πεδίο για να περιγράψει ολογραφικά τις ισχυρές αλληλεπιδράσεις των γκλουονίων στο όριο των πολλών χρωμάτων. Αναπτύχθηκε τα τελευταία χρόνια από τον Η. Κυρίτση (Κέντρο Θεωρητικής Φυσικής Κρήτης) μαζί με τους νεαρούς συνεργάτες του, U. Gursoy (CERN) και τον F. Nitti (Πανεπιστήμιο

V. Ο υπολογισμός πολλών συντελεστών μεταφοράς σε πεπερασμένη θερμοκρασία έχει επιτευχθεί σε αρκετά παραδείγματα, ανοίγοντας το δρόμο στη μελέτη δυναμικών φαινομένων σε συνθήκες ισχυρής σύζευξης.

VI. Παράλληλη πρόοδος στο διαταρακτι-

κό υπολογισμό διαγραμμάτων Feynman σε μέγιστα υπερσυμμετρικές θεωρίες βαθμίδος δείχνει ότι τεχνικές της θεωρίας των χορδών, τεχνικές με τουίστορς καθώς και τεχνικές διατήρησης της πιθανότητας, έχουν καταλήξει σε εικασίες για τον ακριβή υπολογισμό των πιθανοτήτων των διαδικασιών που περιέχουν 4 και 5 γκλουόνια και που έχουν περάσει αρκετές μη-τετριμμένες δοκιμασίες για ασθενική

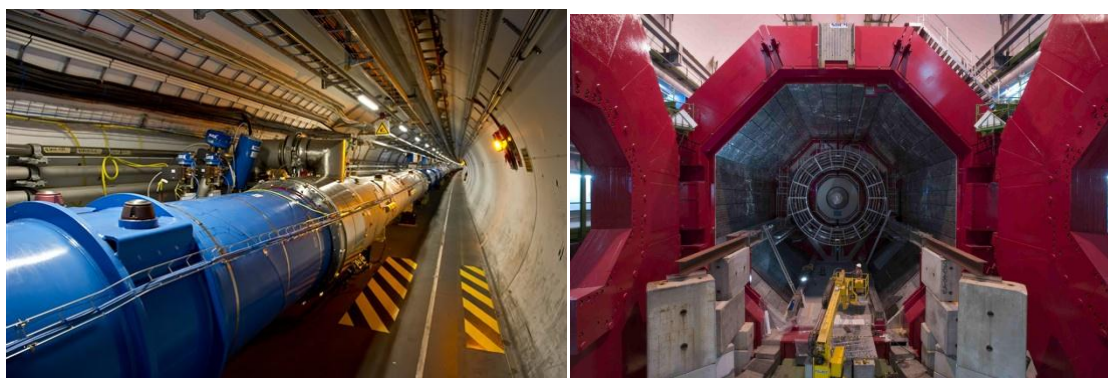
Denis Diderot, Paris 7). Κατορθώνει να περιγράψει πολύ καλά τη φυσική των γκλουονίων σε μηδενική και πεπερασμένη θερμοκρασία, στο όριο των πολλών χρωμάτων.

Πρόσφατα, μια υψηλής ακρίβειας μελέτη του Marco Panero (Πολυτεχνείου ΕΤΗ της Ζυρίχης), χρησιμοποιώντας υπολογισμούς QCD σε πλέγμα, έδειξε ότι:

(α) Τα θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά της QCD (τρία χρώματα) είναι πολύ κοντά σε αυτά της θεωρίας με πολλά χρώματα.

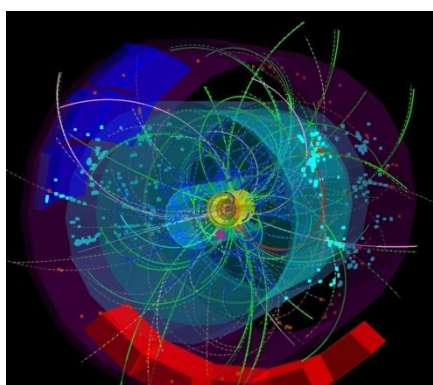
(β) Το Μοντέλο της Ολογραφικής QCD περιγράφει πολύ καλά την φυσική των γκλουονίων σε πεπερασμένη θερμοκρασία, όπως φαίνεται στην εικόνα 15.

Μια περιγραφή των αποτελεσμάτων εμφανίστηκε πρόσφατα στο [Physics Focus](#) της American Physical Society.



**Εικόνα 16.** Αριστερά: το τούνελ του LHC, και ο σωλήνας της δέσμης πρωτονίων. Δεξιά: ο ανιχνευτής του πειράματος ALICE, κατά την εγκατάσταση του στο CERN.

Η παρούσα περίοδος είναι ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα εφόσον καινούργια πειράματα βαρέων ιόντων αναμένονται να γίνουν στο LHC, του [CERN](#). Το πείραμα [ALICE](#), είναι αφιερωμένο αποκλειστικά στη μελέτη της φυσικής του ΠΓΚ. Μια Ελληνίδα φυσικός, η Γιώτα Φωκά, είναι ηγετικό μέλος της ομάδας φυσικής του ALICE. Η σπουδαιότητα της φυσικής που εμπεριέχεται έχει πείσει τα δύο μεγάλα πειράματα του [LHC](#), το [CMS](#) και το [ATLAS](#), να αναπτύξουν ένα σημαντικό παράλληλο πρόγραμμα για φυσική βαρέων ιόντων, μελετώντας συμπληρωματικά χαρακτηριστικά με αυτά του ALICE. Αξίζει να σημειωθεί ότι η ελληνική συμμετοχή είναι σημαντική και στα δύο πειράματα.

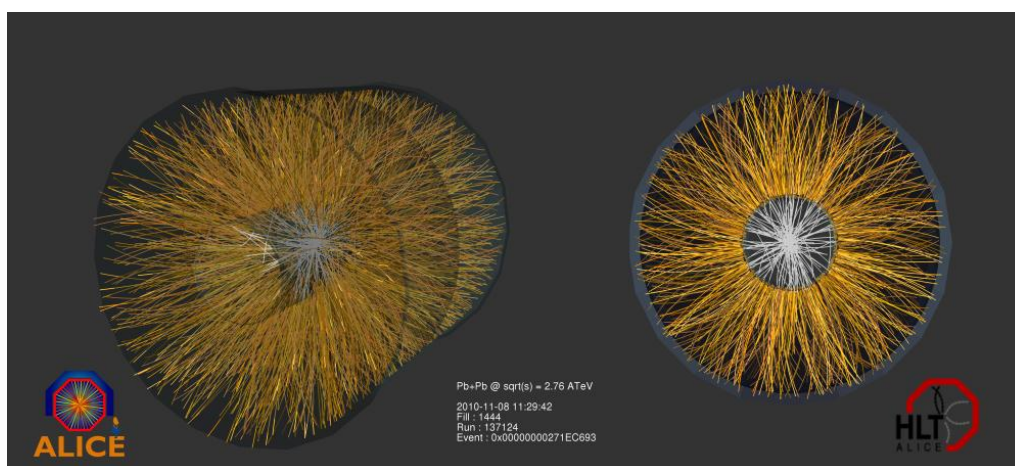


**Εικόνα 17.** Μια από τα πρώτες καταγραφίσεις συγκρούσεις πρωτονίων σε 0.9 TeV από το πείραμα ALICE.

Τα πρώτα αποτελέσματα από τις συγκρούσεις πρωτονίων στο [LHC](#), σε γεγονότα με μεγάλο αριθμό σωματιδίων έδωσαν ήδη θερμικά φάσματα αδρονίων με μια θερμοκρασία αλλαγής φάσης περίπου 180 MeV, συγκρίσιμη με αυτήν που περιμένουμε στην QCD. Το [CMS](#) έχει δει [υπονίκες συλλογικής συμπεριφοράς](#) σε συγκρούσεις πρωτονίων που μας οδηγούν στο συμπέρασμα ότι

ακόμα και σε τέτοιες συγκρούσεις δημιουργείται μια πύρινη σφαίρα από ΠΚΓ. Το Νοέμβριο του 2010, στις πρώτες συγκρούσεις ιόντων μολύβδου, το πείραμα επιβεβαιώνει την αναμενόμενη δημιουργία ΠΚΓ, σε κατάσταση ισχυρής σύζευξης. Η ελλειπτική ροή, σημάδι συλλογικής συμπεριφοράς και ισχυρής σύζευξης είναι μεγαλύτερη από αυτήν στο RHIC και η μείωση της παραγωγής σωματιδίων υψηλής ενέργειας είναι σημαντική. Οι μελέτες συνεχίζονται.

Η πιο έντονη εκπληξη όμως έχει να κάνει με τις μελανές οπές. Πολλοί φυσικοί μίλησαν για την πιθανότητα δημιουργίας μικρών μελανών οπών στις συγκρούσεις του LHC, και διάφοροι αδαείς πολίτες επαναστάτησαν ενάντια στην πιθανότητα καταστροφής του κόσμου από τέτοιες μελανές οπές. Κανείς δεν υποπτεύθηκε ότι η φύση θα ήταν, ως συνήθως, ακόμα πιο παράξενη από τις προβλέψεις των ειδικών. Μίνι-μελανές οπές παράχθηκαν για πρώτη φορά στο RHIC, πριν μερικά χρόνια. Δεν ήταν όμως μελανές οπές στο συνηθισμένο τετραδιάστατο χώρο αλλά μάλλον σε πέντε διαστάσεις, που μόνο οι ισχυρές αλληλεπιδράσεις μπορούν να δούν. Το LHC συνέχισε να τις παράγει χωρίς να κινδυνεύουμε με αφανισμό. Αν και δεν καταλαβαίνουμε ακόμα καλά όλους τους κανόνες του παιχνιδιού, ελπίζουμε ότι σιγά-σιγά τα πειράματα και η θεωρία θα φωτίσουν το σκοτάδι στο οποία βρισκόμαστε σήμερα.



**Εικόνα 18.** Μια από τις πρώτες συγκρούσεις πυρήνων μολύβδου στο LHC, καταγεγραμμένη από τον ανιχνευτή του πειράματος ALICE .

Ο Ηλίας Κυρίτσης είναι μέλος του Κέντρου Θεωρητικής Φυσικής Κρήτης και καθηγητής φυσικής στο Φυσικό τμήμα του Πανεπιστημίου Κρήτης.

Το κείμενο αυτό περιέχει πολλούς υπερσυνδέσμους, συνδιασμένους με κείμενο ή εικόνες, που οδηγούν σε περαιτέρω πηγές πληροφορίας. Η αναπαραγωγή μέρους η όλου του κειμένου επιτρέπεται για διδακτικούς σκοπούς εφ'όσον φαίνεται καθαρά η αναφορά στον αρχικό συγγραφέα. Περαιτέρω πληροφορίες και σύνδεσμοι υπάρχουν στην ιστοσελίδα πληροφοριών για το ευρύ κοινό του Κέντρου Θεωρητικής Φυσικής Κρήτης.

### Βιβλιογραφία

1. E. Witten, "Black holes and quark confinement", [Current Science, Vol 81, No 12, 25 December 2001.](#)
2. *I. Klebanov and J. Maldacena*, "Solving Quantum Field Theories via curved spacetimes", [Physics Today](#).
3. *S. K. Blau*, "A string theory calculation of viscosity may have surprising applications" [Phys. Today 58, May, 23 \(2005\).](#)
4. *M. Natsuume*, "String theory and quark-gluon plasma", ArXiv: [hep-ph/0701201v2](#)
6. D. Son, A. Starinets, "Viscosity, Black Holes, and Quantum Field Theory", [Ann.Rev.Nucl.Part.Sci.57:95-118,2007.](#) **e-Print:** [arXiv:0704.0240](#)
7. U. Gürsoy, E. Kiritsis, L. Mazzanti, and F. Nitti, "Exploring improved holographic theories for QCD: Part II" [JHEP\\_0802 \(2008\) 019](#), [ArXiv](#)
8. U. Gürsoy, E. Kiritsis, L. Mazzanti, and F. Nitti, "Improved Holographic Yang-Mills at Finite Temperature: Comparison with Data," [Nucl. Phys. B 820, 148 \(2009\).](#) [ArXiv](#)
9. *Marco Panero*, Thermodynamics of the QCD Plasma and the Large- $N$  Limit, [Phys. Rev. Lett. 103, 232001.](#) [ArXiv](#)