

Υγρά φωτόνια... α λα Grec!

Με εργασία που θέτει τα θεμέλια για την εποχή των «φωτονικών ημιαγωγών» ο **έλληνας επιστήμονας Δημήτρης Αγγελάκης** φέρνει ένα βήμα πιο κοντά τους ασύλληπτης ισχύος κβαντικούς υπολογιστές

ΤΟΥ **ΤΑΣΟΥ ΚΑΦΑΝΤΑΡΗ**

Την πολύχρονη... φαγούρα των φυσικών με τα φωτόνια σίγουρα την ξεκίνησε ο Αϊνστάιν, όταν επαναπροσδιόρισε τη φύση τους στη θεωρία της Σχετικότητας. Στη συνέχεια έγιναν το λατρεμένο τους θέμα, στην προσπάθειά τους να κατανοήσουν τη «διχασμένη προσωπικότητα» των κβάντων. Και έπειτα, αφότου ανακάλυψαν το λέιζερ, το 1960, έστησαν ολόκληρο κλάδο της φυσικής ειδικά για τη μελέτη των φωτονίων, τη φωτονική. Εκτοτε, η πρόοδος στον χειρισμό αυτών των «σωματιδίων του φωτός» υπήρξε αλματώδης, με τουλάχιστον τρεις έλληνες ερευνητές – τους καθηγητές Γιάννη Ιωαννόπουλο, Ελευθέριο Οικονόμου και Κώστα Σουκούλη – να πρωτοστατούν στις εξελίξεις. Όμως η όποια τιθάσευση των φωτονίων γινόταν πάντα υπό τους «δικούς τους όρους», καθ' όσον αυτά τα σωματίδια που ακροβατούν μεταξύ ύλης και ενέργειας έχουν δύο ιδιοτροπίες: δεν παγιδεύονται εύκολα και δεν αλληλεπιδρούν μεταξύ τους! Άρα η πιθανότητα να τα χειριστούμε με την ευκολία του ηλεκτρικού ρεύματος, ώστε να δομήσουμε με αυτά κβαντικούς υπολογιστές, παρέμενε ουτοπία. Ως πρόσφατα δηλαδή, οπότε ένας έλληνας φυσικός νέας εσοδείας συνέβαλε αποφασιστικά στην «αιχμαλωτίση των φωτονίων».

Φωτοηλεκτρονικά ειδύλλια...

Αν τα φωτόνια είναι από μόνα τους άπιαστα, δεν συμβαίνει το ίδιο όταν δημιουργηθούν μέσα σε *φωτονικούς κρυστάλλους* – που μοιάζουν με διάτρητο ελβετικό τυρί φτιαγμένο από οξείδια του πυριτίου. Όπως έδειξαν τις δεκαετίες του '80 και του '90 οι τρεις προαναφερθέντες Έλληνες και οι Ελι

Yablonovitch και John Sajeev στις ΗΠΑ, η δόμηση «φωτονικών ημιαγωγών» από φωτονικούς κρυστάλλους είναι εφικτή. Κατά αντιστοιχία με τους γνωστούς ημιαγωγούς, όπου τα ηλεκτρόνια μπορούν να ρέουν (αγωγός) ή να παραμένουν κερφωμένα στη θέση τους (μονωτής), και τα φωτόνια στους φωτονικούς κρυστάλλους μπορούν να διαρρεύσουν ή να παγιδευτούν, ανάλογα με τη γεωμετρία των κρυστάλλων και τη συχνότητά τους.

Παράλληλα, και ανεξάρτητα με την έρευνα στα φωτόνια υλικά, η μελέτη της αλληλεπίδρασης ατόμων - φωτονίων στο πλαίσιο της κβαντικής οπτικής έφθανε στο απόγειό της την τελευταία δεκαετία. Απίστευτα πειράματα, όπως εκείνο όπου ένα και μοναδικό φωτόνιο παγιδευόταν σε μια αένια παλινδρομηση ανάμεσα σε δύο μικροσκοπικούς καθρέφτες και αλληλεπιδρούσε ισχυρά με ένα και μοναδικό άτομο στο μέσο της διαδρομής, πραγματοποιήθηκαν. Το «ειδύλλιο» ατόμου - φωτονίου, γνωστό στην κβαντική οπτική ως *πολαριπόνιο* ή *dressed state* (άτομο «ντυμένο» με φωτόνιο) οδήγησε σε τεράστιες ανακαλύψεις σε πλήθος πεδίων, από τον έλεγχο των θεμελίων της Κβαντικής Θεωρίας ως την πραγματοποίηση κβαντικών πυλών και κβαντικής κρυπτογραφίας.

Αυτό που παρέμενε ανοιχτό ήταν ο συνδυασμός των παραπάνω ανακαλύψεων και η εφαρμογή τους στην εξήγηση φαινομένων σε φαινομενικά ασύνδε-

τες περιοχές της φυσικής, όπως οι υπεραγωγοί, τα υγρά ηλεκτρονίων και οι φωτονικοί κβαντικοί υπολογιστές.

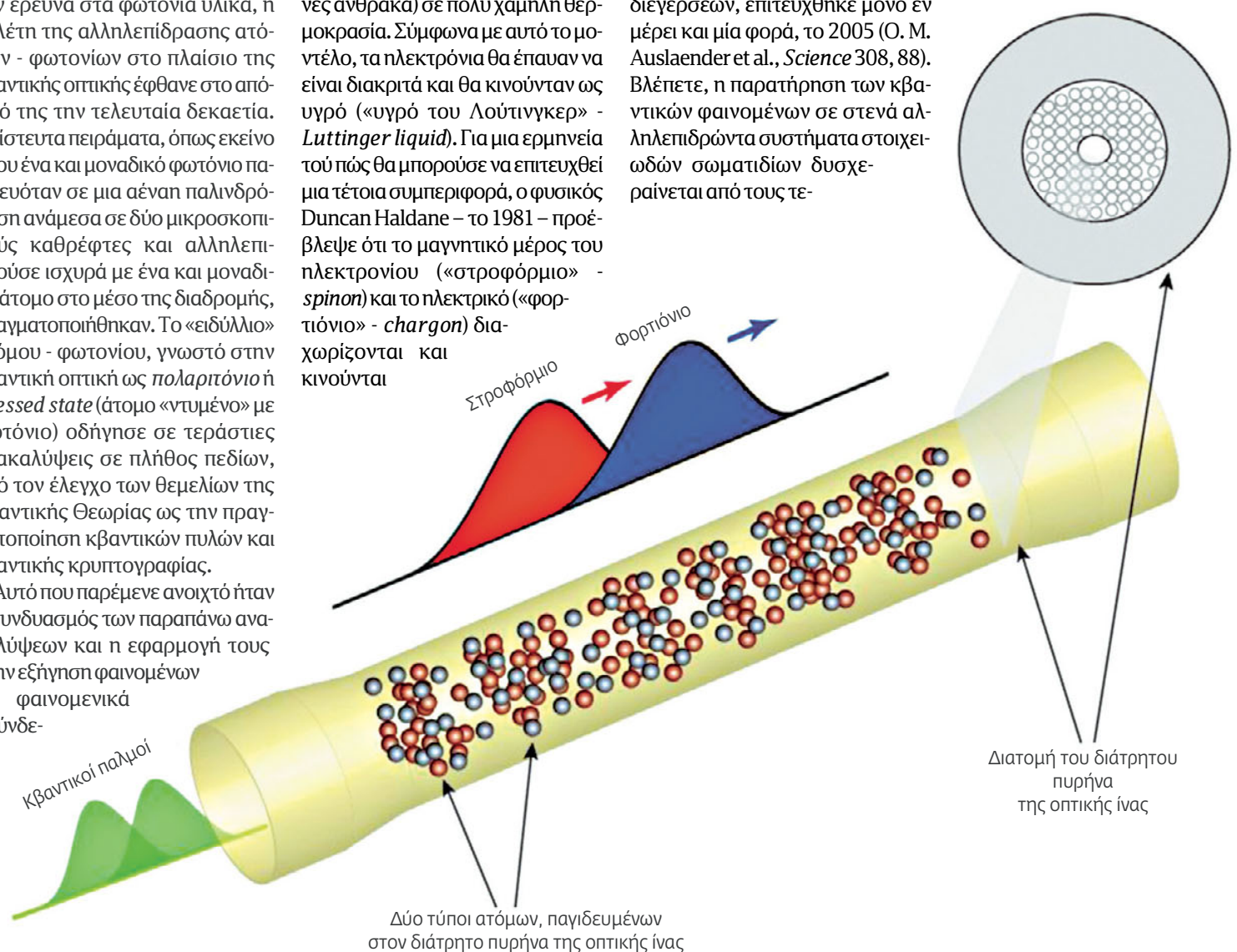
Στροφόρμια, φορτιόνια και υγρά φωτόνια

Το ημερολόγιο έδειχνε 1963 όταν ο αμερικανός φυσικός Joaquín Luttinger πρότεινε ένα θεωρητικό μοντέλο για το πώς αλληλεπιδρούν τα ηλεκτρόνια ενός μονοδιάστατου αγωγού (όπως είναι οι νανοσωληνικές άνθρακα) σε πολύ χαμηλή θερμοκρασία. Σύμφωνα με αυτό το μοντέλο, τα ηλεκτρόνια θα έπαυαν να είναι διακριτά και θα κινούνταν ως υγρό («υγρό του Λούτινγκερ» - *Luttinger liquid*). Για μια ερμηνεία του πώς θα μπορούσε να επιτευχθεί μια τέτοια συμπεριφορά, ο φυσικός Duncan Haldane – το 1981 – πρόβλεψε ότι το μαγνητικό μέρος του ηλεκτρονίου («στροφόρμιο» - *spinon*) και το ηλεκτρικό («φορτιόνιο» - *chargon*) διαχωρίζονται και κινούνται

με διαφορετικές ταχύτητες. Η σύλληψη αυτή ήταν το λιγότερο προκλητική, καθώς η στροφορμή και το φορτίο του ηλεκτρονίου θεωρούνταν χαρακτηριστικά αναπόσπαστα συνδεδεμένα με αυτό.

Οι ανά τον κόσμο φυσικοί προσπάθησαν πολλαπλά στα επόμενα χρόνια να επαληθεύσουν πειραματικά τα της εν λόγω θεωρίας για τα ηλεκτρόνια, χωρίς ουσιαστική επιτυχία: η μέτρηση της *φασματικής συνάρτησης* $A(q, \omega)$, που εμπεριέχει τις σχέσεις ενέργειας-ορμής των διεγέρσεων, επιτεύχθηκε μόνο εν μέρει και μία φορά, το 2005 (O. M. Auslaender et al., *Science* 308, 88). Βλέπετε, η παρατήρηση των κβαντικών φαινομένων σε στενά αλληλεπιδρώντα συστήματα στοιχειωδών σωματιδίων δυσχεραίνεται από τους τε-

χνικούς περιορισμούς που παρουσιάζει η αναδιάταξη της ύλης σε μικροκλίμακα. Αντίθετα, στον άυλο κόσμο των φωτονίων, μια εργασία που δημοσιεύθηκε το 2007, υπό τον τίτλο «Photon blockade induced Mott transitions and XY spin models in coupled cavity arrays» [*Phys. Rev. A (Rap. Com.)* vol. 76, 031805] έφερε μεγάλη πρόοδο στη μεθοδολογία παρατήρησης. Ήταν η εργασία του Δημήτρη Αγγελάκη, τότε μεταδιδακτορικού ερευνητή στο Πανεπιστήμιο



Γράφημα που αναπαριστά τη «διάταξη Αγγελάκη»: από αριστερά, εισέρχονται στη διάτρητη οπτική ίνα φωτόνια, που συναντούν αέριο δύο διαφορετικών ατόμων. Από το «στρίμωγμα» προκύπτει διαχωρισμός της στροφορμής και του φορτίου, όπως ακριβώς έλεγε η θεωρία για τα «υγρά ηλεκτρόνια»



ΠΟΙΟΣ ΕΙΝΑΙ Ο Δ. ΑΓΓΕΛΑΚΗΣ

1993-1997: Πτυχίο και μεταπτυχιακό Φυσικής στο Πανεπιστήμιο Κρήτης.

1998-2002: Διδακτορικό στο Imperial College του Λονδίνου. Η διδακτορική του διατριβή στις αλληλεπιδράσεις ατόμων - φωτονίων τού χάρισε τον Οκτώβριο 2002 το 1ο Βραβείο της Ενωσης Φυσικών του Ηνωμένου Βασιλείου.

2002-2007: Ερευνητής στο Κέντρο Κβαντικής Πληροφορικής του Πανεπιστημίου Κέιμπριτζ.

2007 ως σήμερα: Λέκτορας στο Πολυτεχνείο Κρήτης, στα Χανιά, και επισκέπτης ερευνητής στο Κέντρο Κβαντικών Τεχνολογιών του Πανεπιστημίου της Σιγκαπούρης.



ου του Κέιμπριτζ, που έδειχνε τώ πως οι συνδυασμοί διεγερμένων ατόμων και φωτονίων «αιχμαλωτισμένων σε κλουβιά» μπορούσαν να γίνουν ελεγχόμενες και μετρήσιμες οντότητες, παίζοντας τον ρόλο των ηλεκτρονίων στην πραγματική ύλη. Παρατηρώντας το τι συνέβαινε στα φωτόνια όταν «χτυπιούνταν απελπισμένα» συνωστίζόμενα μέσα σε αυτές τις φωτοπαγίδες, ο δρ Αγγελάκης, νυν λέκτορας του Πολυτεχνείου Κρήτης και επισκέπτης ερευνητής στο Κέντρο Κβαντικών Τεχνολογιών του Πανεπιστημίου της Σιγκαπούρης, θυμήθηκε τη δύναμη της «παραβολής»: Αν μπορούσε να προσομοιώσει το «υγρό ηλεκτρονίων» με ένα «υγρό φωτονίων», θα έφθανε ίσως στην ποθητή εξήγηση της συμπεριφοράς των ηλεκτρονίων.

Η διάταξη της επιτυχίας

Η ομάδα του, αυτή τη φορά απαριζόμενη από τον ίδιο και τρεις ερευνητές στη Σιγκαπούρη, σκέφθηκε να χρησιμοποιήσει το οπτικό ανάλογο

ενός μονοδιάστατου νανοσωλήνα, χρησιμοποιώντας μια οπτική ίνα φωτονικού κρυστάλλου. Η συγκεκριμένη διάταξη είχε ήδη προταθεί το 2008 από μια ερευνητική ομάδα του Πανεπιστημίου του Χάρβαρντ (C. Chang et al., Crystallization of strongly interacting photons in a nonlinear optical fiber, *Nat. Phys.*), αλλά η ομάδα του Αγγελάκη την επεξεργάστηκε: Γέμισαν τον σωλήνα με δύο αέρια ατόμων και σημάδεψαν την είσοδό του με δύο ακτίνες λέιζερ. Στη συνέχεια ρύθμισαν τα λέιζερ έτσι ώστε να επιβραδύνουν τους εκπαιδόμενους παλμούς φωτονίων, με αποτέλεσμα να τα αποθηκεύσουν μέσα στον σωλήνα σαν «στάσιμα βαγόνια διεγερμένης φωτο-ύλης». Λόγω του συνωστισμού τους με τα προϋπάρχοντα άτομα αερίου στον σωλήνα, τα παγιδευμένα φωτόνια υποχρεώθηκαν να αλληλεπιδράσουν όπως ακριβώς προέβλεπε για τα ηλεκτρόνια η θεωρία του Luttinger και να φθάσουν στη φάση διαχωρισμού των στροφορμών από τα φορτίονα. Όταν, στη συνέχεια, απελευθερώνονταν στην έξοδο του σωλήνα, η

ομάδα του δρος Αγγελάκη μπόρεσε να δείξει ότι τα χαρακτηριστικά της φασματικής συνάρτησης του περιβάλλοντος διαχωρισμού θα μπορούσαν να μετρηθούν με πρωτόγνωρη ακρίβεια, χρησιμοποιώντας υπάρχουσα οπτική τεχνολογία.

Η δυνατότητα επίτευξης πειραματικής διάταξης που επαληθεύει τη θεωρία του Luttinger για «υγρό ηλεκτρονίων» ήταν επόμενο να χαιρετισθεί με ενθουσιασμό από την επιστημονική κοινότητα. Η εργασία τους, υπό τον τίτλο «Optical Physics: A liquid of photons», δημοσιεύθηκε μετ' επαίνων στο περιοδικό *Physical Review Letters* και έγινε κύριο άρθρο στο *Physics* και στο *Nature* της 20ής Απριλίου 2011. Η αγαλλίαση όμως δεν προερχόταν μόνο από τη συμβολή στη μελέτη των ηλεκτρονίων αλλά και από τις προοπτικές που διάνοιγε ο χειρισμός του «υγρού φωτονίων»: Η οπτική διάταξη του Δημήτρη Αγγελάκη κατέδειξε ότι τα φωτόνια συμπεριφέρονταν ακριβώς όπως τα ηλεκτρόνια σε κρυστάλλους μονωτικού υλικού (Mott Insulator State). Δηλαδή,

η διάταξη αυτή λειτουργεί ως φυσικός κβαντικός καταχωρητής, όπου το κάθε φωτόνιο στο κάθε κλουβί αντιστοιχεί στην ύπαρξη μιας κβαντικής μονάδας πληροφορίας (qubit). Είναι το δεύτερο βήμα μας προς την κατασκευή «κβαντικών λογικών πυλών», έπειτα από εκείνο που παρουσίασε εργασία του ίδιου ερευνητή και του δρος A. Kay, το 2008 (βλ. «Weaving light-matter qubits into a one way quantum computer», *New J. Phys.* 10, 023012).

Όπως συνάγεται, τα θεμέλια για μια εποχή «φωτονικών ημιαγωγών» έχουν πλέον τεθεί. Οι πολυπόθητοι κβαντικοί υπολογιστές, με την ασύλληπτα μεγαλύτερη ισχύ και ταχύτητα επεξεργασίας δεδομένων, γίνονται επιτέλους εφικτή πραγματικότητα. Και η υπερφάνεια μας είναι ότι, από αυτό το καθημαγμένο εκπαιδευτικό σύστημα αυτής της στερημένης από όνειρα χώρας, συνεχίζουν να βγαίνουν επιστήμονες που «αλλάζουν τον κόσμο». Συνεχώς και επίμονα, σε πείσμα κάθε Κασσάνδρας!

a.kafantaris@gmail.com

ΠΟΤΑΜΟΙ ΜΠΟΖΟΝΙΩΝ ΣΕ ΘΑΛΑΣΣΑ ΦΕΡΜΙΟΝΙΩΝ

Μολονότι οι όροι ηλεκτρόνια και φωτόνια είναι αρκούτσως οικεία σε όλους μας, η ελέω CERN εισβολή του μποζονίου του Χιγκς στην ειδησεογραφία επιτρέπει (έως και επιβάλλει) την εξοικείωσή μας με τους όρους φερμιόνια και μποζόνια. Διότι, πολύ απλά, τα ηλεκτρόνια είναι μέλη της οικογένειας των φερμιονίων, ενώ τα φωτόνια εκείνης των μποζονίων.

Τι είναι αυτές οι δύο οικογένειες και τι μας νοιάζουν; Μα... είναι τα βασικά συστατικά της συνταγής που «μαγειρεύει» τον κόσμο μας! Τα οκτώ μέλη της οικογένειας των φερμιονίων – που διακρίνονται σε κουάρκ και λεπτόνια – είναι τα συστατικά της ύλης, ενώ τα τέσσερα μποζόνια είναι συστατικά ακτινοβολίας, ήτοι φορείς δυνάμεων. Το πιο γνωστό μας συστατικό ύλης είναι το ηλεκτρόνιο, ενώ το πασίγνωστο συστατικό ακτινοβολίας είναι ο φορέας του φωτός, το φωτόνιο. Τα δύο πιο άγνωστα σε όλους μας συστατικά είναι δύο θεωρητικές κατασκευές που μετά μανίας προσπαθούν οι φυσικοί να αποδείξουν πειραματικά: το μποζόνιο του Χιγκς (Higgs boson) και το

βαρυτόνιο (graviton) - ο φορέας της βαρύτητας.

Τα φέουδα των δύο εν λόγω οικογενειών στοιχειωδών σωματιδίων κυβερνιούνται με διαφορετικούς νόμους: τα φερμιόνια υπακούουν στις στατιστικές Fermi-Dirac και στην αρχή αποκλεισμού του Pauli, ενώ τα μποζόνια πειθαρχούν στις στατιστικές Bose-Einstein. Όσο για τη «φορεσιά» των δύο οικογενειών, είναι και αυτή διακριτή: τα φερμιόνια έχουν στροφορμή ημιακέραιη, ενώ τα μποζόνια ακέραιη. Ιδιαίτερη σημασία για τον «υγρότοπο» ηλεκτρονίων και φωτονίων του άρθρου μας έχουν οι συνέπειες της «νομολογίας» των δύο οικογενειών: Δύο φερμιόνια (π.χ. ηλεκτρόνια) δεν μπορούν να κατέχουν ταυτόχρονα την ίδια κβαντική κατάσταση – πράγμα που οδηγεί στη στιβαρότητα της ύλης –, ενώ τα μποζόνια (όπως φωτόνια) μπορούν. Απόρροια αυτής της «δυσκινησίας» των πρώτων είναι κάτι που εμφανίζεται στη θερμοκρασία του απολύτου μηδενός (-273,15°C), όπου η θερμική ενέργεια της ύλης εκμηδενίζεται. Τότε έχουμε τη λεγόμενη θάλασσα Fermi, της οποίας η επι-

φάνεια διαχωρίζει την ενεργειακή συμπεριφορά των «υγρών φερμιονίων» που βρίσκονται κάτω της από εκείνη των «αέριων φερμιονίων» πάνω από αυτήν. Υπάρχει ωστόσο μια παραδοξότητα, την οποία «εκμεταλλεύθηκε αγρίως» η διάταξη της ομάδας Αγγελάκη: Η θεωρία των κατά Fermi υγρών παύει να ισχύει σε μονοδιάστατους χώρους (όπως οι σωλήνες νανοάνθρακα που απαρτίζονται από μονοατομικό πλέγμα). Τότε σχηματίζεται το «υγρό Luttinger», που χαρακτηρίζεται από διεγέρσεις μποζονίων και όχι φερμιονίων (που ήθελε η θάλασσα Fermi). Και, μάλιστα, εμφανίζεται ο μυστήριος διαχωρισμός της στροφορμής από το φορτίο, που προκαλεί διχασμό προσωπικότητας στα ηλεκτρόνια. Το εκπληκτικό που κατέδειξε η διάταξη του Αγγελάκη είναι πως, όταν οι αλληλεπιδράσεις σε ένα σύστημα μποζονίων (βλ. φωτονίων) γίνονται πολύ ισχυρές, τα μποζόνια τείνουν να αποφεύγουν τη συνύπαρξη στον ίδιο χώρο, μιμούμενα την κλασική συμπεριφορά των φερμιονίων (βλ. ηλεκτρόνια).