

Ιόνιο Πανεπιστήμιο

Τμήμα Πληροφορικής



Διπλωματική Εργασία

Τεχνικές υλοποίησης και εκτέλεσης παιγνίων τύχης σε μη
συμβατικούς υπολογιστές

Ιωάννης Στυλιανουδάκης,

A.M.: Π2016057

Επιβλέπων: Θεόδωρος Ανδρόνικος

16 Ιουνίου 2021

Επιβλέπων

Θεόδωρος Ανδρόνικος, Μόνιμος Επίκουρος Καθηγητής,
Ιόνιο Πανεπιστήμιο

Τριμελής Επιτροπή

Θεόδωρος Ανδρόνικος, Μόνιμος Επίκουρος Καθηγητής,
Ιόνιο Πανεπιστήμιο

Μιχαήλ Στεφανιδάκης, Επίκουρος Καθηγητής,
Ιόνιο Πανεπιστήμιο

Δημήτριος Τσουμάκος, Αναπληρωτής Καθηγητής,
Ιόνιο Πανεπιστήμιο

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την στήριξή της όλα αυτά τα χρόνια.

Ιωάννης Στυλιανουδάκης

Περίληψη

Μέσα από την ιστορική αναδρομή παρατηρούμε την πρόοδο που έχει συμβεί στον τομέα της κβαντικής υπολογιστικής και ειδικότερα τα αλματώδη βήματα εξέλιξης που λαμβάνουν χώρα στο συγκεκριμένο πεδίο πάνω την τελευταία δεκαετία. Με τη βοήθεια της θεωρίας παιγνίων παρουσιάζονται οι δυνατότητες των κβαντικών στρατηγικών έναντι των κλασικών. Επιπλέον, με την βοήθεια των εργαλείων της “IBM” υλοποιήθηκαν προγράμματα σε πραγματικούς κβαντικούς υπολογιστές. Ακόμα, έχουν παρουσιαστεί εκτενώς οι διαδικασίες κατά βήμα για την εύκολη και ομαλή χρήση των εργαλείων και το πως να χρησιμοποιηθούν.

Πρόλογος

Η παρούσα εργασία με τίτλο “Τεχνικές υλοποίησης και εκτέλεσης παιγνίων τύχης σε μη συμβατικούς υπολογιστές” αποτελεί διπλωματική εργασία στα πλαίσια των προπτυχιακών σπουδών του τμήματος Πληροφορικής Ιονίου Πανεπιστημίου.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1	7
1.1 Μη συμβατικοί υπολογιστές	7
1.1.1 Ιστορική αναδρομή των μη συμβατικών υπολογιστών	11
1.2 Τι είναι το “IBM Quantum Experience”	23
1.2.1 Ιστορική αναδρομή του “IBM Quantum Experience”	29
1.3 Τι είναι το “Qiskit”	33
Κεφάλαιο 2	36
2.1 Το στρίψιμο του νομίσματος	36
2.1.1 Το στρίψιμο του νομίσματος σε πολλούς γύρους	41
2.2 Το στρίψιμο δύο νομισμάτων ταυτόχρονα	42
Κεφάλαιο 3	43
3.1 Οδηγός εγκατάστασης εργαλείων	43
3.1.1 Λήψη και εγκατάσταση του “Anaconda”	44
3.1.2 Έλεγχος σωστής εγκατάστασης	50
3.1.3 Εγκατάσταση των απαραίτητων βιβλιοθηκών του “Qiskit” σε τοπικό μηχάνημα	51
3.1.4 Έλεγχος και εκτέλεση ενός παραδείγματος κβαντικού προγράμματος	59
3.2 Υλοποίηση του παιχνιδιού στο “Qiskit”	60
3.3 Υλοποίηση δύο νομισμάτων	65
3.4 Προσομοίωση πραγματικών καταστάσεων - Ρίψη αληθινών νομισμάτων	68
Συμπεράσματα	72
Βιβλιογραφία	73

Κεφάλαιο 1

1.1 Μη συμβατικοί υπολογιστές

Με τον όρο κβαντικό υπολογισμό εννοούμε τη χρήση των κβαντικών φαινομένων όπως η κβαντική υπέρθεση (“Quantum superposition”) και η κβαντική διεμπλοκή (“Quantum entanglement”) για την επίτευξη υπολογισμών. Οι υπολογιστές που εκτελούν κβαντικούς υπολογισμούς είναι γνωστοί ως κβαντικοί υπολογιστές [Grumblin, 2019]. Αρκετοί είναι αυτοί που θεωρούν ότι οι κλασσικοί υπολογιστές είναι αρκετά υποδεέστεροι από τους κβαντικούς υπολογιστές σε ορισμένους τομείς. Εικάζεται ότι σε συγκεκριμένα υπολογιστικά προβλήματα, για λόγου χάριν η ακέραια παραγοντοποίηση, που έχει ως πυρήνα την κρυπτογράφηση “RSA”, η διαφορά των δυο προηγούμενων είναι ασύλληπτη. Μια υποκατηγορία της πληροφορικής είναι και η ανάλυση της κβαντικής πληροφορικής. Η κβαντική πληροφορική έχει αρχίσει να εξαπλώνεται σε πάρα πολλά

καθημερινά κομμάτια στις ζωές των ανθρώπων και είναι πιθανό να διευρυνθεί παραπάνω και ένα εμπλακεί περαιτέρω με την χρήση φαρμακευτικών προϊόντων, την ασφάλεια των δεδομένων και σε άλλα [Elsevier, 2021].

Η κβαντική υπολογιστική οφείλει πολλά στον φυσικό Πολ Μπενιόφ (Paul A. Benioff) όπου πρότεινε ένα κβαντικό μηχανικό μοντέλο της μηχανής “Turing”, στις αρχές της δεκαετίας του 1980 [Benioff, 1980]. Ο Ρίτσαρντ Φίλιπς Φάινμαν (Richard P. Feynman) και ο Γιούρι Μάνιν (Yuri Manin) αργότερα πρότειναν ότι ένας κβαντικός υπολογιστής είχε τη δυνατότητα να προσομοιώσει πράγματα που ένας κλασσικός υπολογιστής δεν μπορούσε [Feynman, 1980]



Εικόνα 1.1.1: Παράδειγμα μη συμβατικού υπολογιστή της "IBM"

[Manin, 1980]. Ο Πίτερ Σορ (Peter Shor) έπαιξε τεράστιο ρόλο καθώς το 1994, ανέπτυξε έναν κβαντικό αλγόριθμο για “factoring” ακεραίων αριθμών που είχαν τη δυνατότητα να αποκρυπτογραφήσουν κρυπτογραφημένες επικοινωνίες “RSA” [Mermin, 2006]. Πολλοί από τους ερευνητές, όσο ανάπτυξη και να έχει γνωρίσει ο τομέας από την περίοδο του 1990 και μετά, είναι πεπεισμένοι ότι η ανεκτική σε σφάλματα κβαντική υπολογιστική είναι επιστημονική φαντασία [Preskill, 2018]. Πολλοί είναι αυτοί που επενδύουν τα λεφτά τους, στις έρευνες με σκοπό την ανάπτυξη της κβαντικής υπολογιστικής. Ειδικά την σημερινή περίοδο έχουν υπάρξει αρκετά σχέδια από διάφορους οργανισμούς, άτομα αλλά και από κράτη [Gibney, 2019] [Rodrigo, 2019]. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι αυτό με την “Google AI” και την “NASA” (“U.S. National Aeronautics and Space Administration”) όπου λίγο πριν τις αρχές του 2020 ένωσαν τους πόρους τους και υποστήριξαν ότι κατάφεραν να πραγματοποιήσουν κβαντικό υπολογισμό “quantum computation” όπου δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί από έναν κλασικό υπολογιστή [Edwin Pednault, 2019].

Το εσωτερικό ενός κβαντικού υπολογιστή όπως φαίνεται στις εικόνες είναι αρκετά περίπλοκο. Με μια κοντινότερη ματιά, παρατηρείται ότι ο υπολογιστής είναι χωρισμένος σε στρώματα, ξεκινώντας από τα πάνω στρώματα και καταλήγοντας στα κάτω στρώματα, μέχρι και το τέλος που είναι το κύκλωμα.

Τα στρώματα όσο πηγαίνουν προς τα κάτω, η δουλειά τους είναι να δημιουργήσουν ένα ολο και πιο παγωμένο περιβάλλον. Στρώμα με το στρώμα η θερμοκρασία πέφτει. Αυτοί οι υπολογιστές είναι απομονωμένοι μέχρι στιγμής σε δωμάτια, λόγω των θερμοκρασιών που χρειάζονται να επιτευχθούν για την λειτουργία των υπολογιστών. Η θερμοκρασία δωματίου είναι περίπου στους “300 kelvin”. Μετρώντας όμως την θερμοκρασία του κυκλώματος οι θερμοκρασίες μειώνονται στις κλίμακες του “0.01 kelvin”.

Για να υπάρξουν τέτοιες θερμοκρασίες χρησιμοποιούνται υλικά όπως χρυσός, όπου είναι καλός αγωγός της θερμότητας. Με αυτό τον τρόπο, ρίχνοντας την θερμοκρασία και δημιουργώντας ένα περιβάλλον που είναι από τα πιο παγωμένα που υπάρχουν στο μέχρι στιγμής γνωστό κόσμο, καταφέρνουν έτσι να πετύχουν τις ιδιότητες που χρειάζονται για να δουλέψει ένας κβαντικός υπολογιστής. Ιδιότητες όπως η κβαντική υπέρθεση (“Quantum superposition”) και η κβαντική διεμπλοκή (“Quantum entanglement”).

Υπάρχουν διάφορα κβαντικά υπολογιστικά συστήματα, όπως το κβαντικό μοντέλο κυκλώματος (“quantum circuit model”), ο αδιαβατικός κβαντικός υπολογιστής (“adiabatic



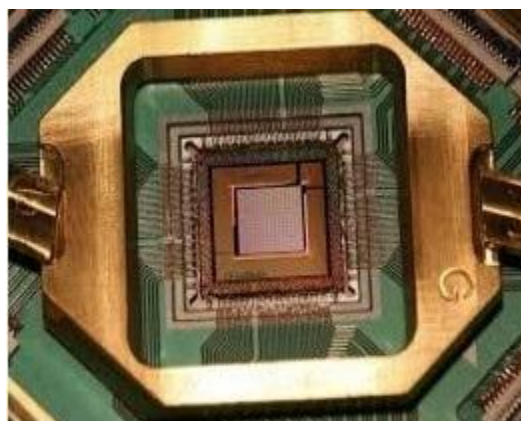
Εικόνα 1.1.2: Το εσωτερικό ενός μη συμβατικού υπολογιστή

quantum computer”), η κβαντική μηχανή “Turing” (“quantum Turing machine”), ο μονόδρομος κβαντικός υπολογιστής (“one-way quantum computer”) και διάφορα κβαντικά κυτταρικά αυτόματα (“quantum cellular automata”).

Το διασημότερο μοντέλο είναι το κβαντικό κύκλωμα (“quantum circuit”). Τα κβαντικά κυκλώματα βασίζονται στο κβαντικό δυφίο, ή “qubit”, το οποίο είναι κάπως ανάλογο με το “bit” στον κλασικό υπολογισμό βέβαια υπάρχουν και αρκετές διαφορές όπως το ότι τα “qubits” μπορούν να συγκρατήσουν διπλάσια πληροφορία από ότι τα κλασικά “bits”.

Τα “qubits” μπορούν να βρίσκονται στην κβαντική κατάσταση 1 ή 0 ή μπορεί να βρίσκονται σε υπέρθεση (“superposition”) των καταστάσεων 1 και 0. Ωστόσο, όταν τα “qubits” μετريούνται η ιδιότητα της υπέρθεσης παγώνει και το αποτέλεσμα της μέτρησης είναι πάντα 0 ή 1, δεν μπορεί να είναι και 0 και 1. Η κβαντική κατάσταση που βρίσκονται τα “qubits” λίγο πριν την μέτρηση θα καθορίσει τις πιθανότητες των αποτελεσμάτων.

Η δημιουργία αυτών των “qubits” δεν είναι απλή. Για αυτό και ο στόχος είναι η δημιουργία καλύτερης ποιότητας “qubits”. Έχουν επιτευχθεί αρκετοί στόχοι ως προς την δημιουργία φυσικών κβαντικών υπολογιστών που εμπλέκονται κυρίως με τεχνολογίες (“transmons”), παγιδευμένα ιόντα (“ion traps”) και τοπολογικούς κβαντικούς υπολογιστές (“topological quantum computers”). Αυτά τα “qubits” μπορεί να σχεδιαστούν διαφορετικά, ανάλογα με το μοντέλο υπολογισμού του πλήρους κβαντικού υπολογιστή, είτε η διαφορά θα είναι στις κβαντικές λογικές πύλες (“quantum logic gates”), είτε στην κβαντική ανόπτηση (“quantum annealing”) είτε στον αδιαβατικό κβαντικό υπολογισμό (“adiabatic quantum computation”).



Εικόνα 1.1.3: Κοντινή φωτογραφία του κβαντικού επεξεργαστή D-Wave TwoX 1000 Qubit

Υπάρχουν αρκετά δύσβατα εμπόδια ώστε να επιτευχθεί η υλοποίηση χρήσιμων κβαντικών υπολογιστών. Θα σκεφτόταν κάποιος, αφού όσο περισσότερα κβαντικά δυφία, “qubits” χρησιμοποιεί το σύστημα τόσο πιο αποδοτικό είναι, γιατί οι επιστήμονες-μηχανικοί δεν συνθέτουν έναν υπολογιστή με 1 εκατομμύριο ή και παραπάνω “qubits”? Έτσι θα μεγάλωνε επιτέλους αλματωδώς, η υπολογιστική ισχύ των κβαντικών υπολογιστών. Το θέμα είναι ότι αυτός είναι ο στόχος, αλλά το μονοπάτι προς τον στόχο είναι πιο δύσκολο από ότι ακούγεται. Επειδή είναι πολύ δύσκολο να απομονώσουμε τελείως το κύκλωμα μας και να μειώσουμε τον θόρυβο όσο προσθέτουμε “qubits” απλά πληθαίνουν τα προβλήματα που αντιμετωπίζει το σύστημα. Αν εστιάζουμε σε αυτά τα προβλήματα, η κβαντική αποκωδικοποίηση (“quantum decoherence”) και η κατάσταση πιστότητας (“state fidelity”) είναι δύο από τα κυριότερα εμπόδια ώστε να διατηρηθούν οι κβαντικές καταστάσεις των “qubits”. Αυτό μας δείχνει ότι, οι κβαντικοί υπολογιστές χρειάζονται διόρθωση σφαλμάτων [Franklin, 2004] [Pakkin, 2019].

Ένας μη συμβατικός υπολογιστής (κβαντικός υπολογιστής), έχει την δυνατότητα να επιλύσει όλα τα προβλήματα που μπορεί να επιλύσει και ένας συμβατικός υπολογιστής (κλασικός υπολογιστής). Αντίστροφα, κάθε πρόβλημα που μπορεί να λυθεί από έναν μη συμβατικό υπολογιστή, στη θεωρία αν του δοθεί ο χρόνος που χρειάζεται, ένας συμβατικός υπολογιστής μπορεί να λύσει ακριβώς το ίδιο πρόβλημα. Οπότε, οι μη συμβατικοί υπολογιστές υπακούνε στον κανόνα του “Church–Turing thesis”. Αν και αυτό σημαίνει ότι οι κβαντικοί υπολογιστές δεν παρέχουν επιπλέον πλεονεκτήματα σε σχέση με τους κλασικούς υπολογιστές όσον αφορά τη δυνατότητα υπολογισμού, οι κβαντικοί αλγόριθμοι για ορισμένα προβλήματα έχουν σημαντικά χαμηλότερες χρονικές πολυπλοκότητες από τους αντίστοιχους γνωστούς κλασικούς αλγόριθμους. Για την ακρίβεια, υπήρχε η εντύπωση ότι οι κλασικοί υπολογιστές ακόμα και με απεριόριστο χρόνο δεν μπορούν να λύσουν κάποια προβλήματα όπου σε αντιθέσει με τους κβαντικούς υπολογιστές, τα λύνουν με άνεση. Η νίκη αυτή των κβαντικών έναντι των κλασικών υπολογιστών λέγεται κβαντική υπεροχή (“quantum advantage”). Η θεωρία της κβαντικής πολυπλοκότητας αναφέρεται στην έρευνα της υπολογιστικής πολυπλοκότητας των προβλημάτων έναντι των κβαντικών υπολογιστών.

Ο αδιαβατικός κβαντικός αλγόριθμος είναι μια εξαίρεση όταν μιλάμε για την εξέλιξη στην ανακάλυψη των κβαντικών αλγορίθμων που εστιάζει συνήθως στα μοντέλα κβαντικών κυκλωμάτων. Οι κλασικοί αλγόριθμοι μπορούν να βοηθήσουν στην κατάταξη κατά προσέγγιση των κβαντικών αλγορίθμων με βάση την επιτάχυνση που πραγματοποιείται [Stephen, 2018]. Οι κβαντικοί αλγόριθμοι, οι οποίοι καταφέρνουν περισσότερα από μια πολυωνυμική επιτάχυνση σε σχέση με τους κβαντικούς αλγόριθμους για τον υπολογισμό διακριτών λογαρίθμων, τον αλγόριθμο του “Shor” για “factoring”, τους σχετικούς για την επίλυση της εξίσωσης του “Pell” και γενικά την επίλυση του κρυφού προβλήματος υποομάδας για πεπερασμένες ομάδες “abelian” [Stephen, 2018]. Στο πρωτόγονο του κβαντικού μετασχηματισμού “Fourier” βασίζονται οι συγκεκριμένοι αλγόριθμοι. Μέχρι στιγμής, αν και θεωρείται ακατόρθωτο, δεν έχει ανακαλυφθεί κάποια μαθηματική απόδειξη που να φανερώνει πως ένας παρόμοια ταχύς κλασικός αλγόριθμος δεν μπορεί να βρεθεί [Schiller, 2009].

Τα κατώτερα όρια αποδεικνύονται αρκετά εύκολα, με συγκεκριμένα προβλήματα όπως του “Simon” και το πρόβλημα “Bernstein – Vazirani” να προσφέρουν επιβεβαιωμένες επιταχύνσεις, αν και αυτά είναι στα μοντέλα των κβαντικών ερωτημάτων, τα οποία είναι περιορισμένα μοντέλα όπου δεν σημαίνει πάντα καλύτερη απόδοση για πρακτικά προβλήματα. Κάποιοι από τους κβαντικούς αλγόριθμους που φαίνεται να γίνονται σε υπερ-πολυωνυμικές ταχύτητες και είναι “BQP-complete” είναι η προσέγγιση ορισμένων πολυωνύμων “Jones”, η προσομοίωση των κβαντικών φυσικών διεργασιών από τη χημεία και τη φυσική στερεάς κατάστασης και ο κβαντικός αλγόριθμος για γραμμικά συστήματα εξισώσεων. Ένας ταχύς κλασικός αλγόριθμος για τα “BQP-complete” προβλήματα, θα μεταφραζόταν πως κανένας αλγόριθμος κβαντικής δεν προσφέρει μια υπέρ-πολυωνυμική επιτάχυνση, που αυτό θεωρείται άτοπο.

Μερικοί κβαντικοί αλγόριθμοι, όπως ο αλγόριθμος του “Grover” και η ενίσχυση πλάτους, δίνουν πολυωνυμικές επιταχύνσεις έναντι των αντίστοιχων κλασικών αλγορίθμων

[Stephen, 2018]. Όμως είναι ευρύτερα εφαρμόσιμοι και παρόλο που δίνουν μέτρια τετραγωνική επιτάχυνση συγκριτικά με άλλους, έτσι δίνεται η ώθηση σε μια μεγάλη γκάμα προβλημάτων. Πολλά παραδείγματα αποδεδειγμένων κβαντικών επιταχύνσεων για προβλήματα ερωτημάτων σχετίζονται με τον αλγόριθμο του “Grover”, συμπεριλαμβανομένων των αλγορίθμων “Brassard”, “Høyer” και “Tapp” για εύρεση συγκρούσεων σε λειτουργίες δύο προς ένα [Brassard, 2016], που χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο του “Grover” και τον αλγόριθμο “Farhi”, “Goldstone” και “Gutmann” για την αξιολόγηση των δέντρων “NAND” [Farhi, 2008], που είναι μια παραλλαγή του προβλήματος αναζήτησης.

1.1.1 Ιστορική αναδρομή των μη συμβατικών υπολογιστών

Ο Μαξ Πλανκ (“Max Planck”) το 1900 ανακάλυψε μία μέχρι τότε απρόβλεπτη και άγνωστη πτυχή της φύσης, την κβάντωση στον μικρόκοσμο. Στη συνέχεια, το 1905 ο Μαξ Πλανκ ήταν από τους λίγους φυσικούς, που συνειδητοποίησε την σπουδαιότητα της εργασίας του Αλμπερτ Αϊνστάιν (“Albert Einstein”) περί Ειδικής Θεωρίας της Σχετικότητας. Κατα κύριο λόγο της μεγάλης επιρροής του Μαξ Πλανκ, η θεωρία έγινε σύντομα ευρύτερα αποδεκτή στην Γερμανία και από εκεί και στην διεθνή κοινότητα των Φυσικών. Ωστόσο, αργότερα ο Αϊνστάιν δεν μπορούσε να πιστέψει ότι οι νόμοι της φυσικής μπορούν να εμπεριέχουν τυχαιότητα και έτσι απέρριψε την θεωρία των κβάντων.

Έπειτα, εμφανίστηκε και ο Έρβιν Σρέντινγκερ (“Erwin Schrödinger”) στο χώρο της φυσικής. Με την εξίσωση που δημιούργησε, έκανε προσπάθεια να προσδιορίσει την κβαντομηχανική κατάσταση του κβαντικού αντικειμένου, έκανε δηλαδή λόγο για την εύρεση της κυματοσυνάρτησης, η οποία περιγράφει το κβαντικό σύστημα, με το αποκορύφωμα του, την περίφημη “γάτα του Σρέντινγκερ”.

Αργότερα, ένας από τους πιο έμπειρους θεωρητικούς στον τομέα της κβαντικής μηχανικής, ο Πολ Ντιράκ (“Paul Dirac”) (1902-1984), στον οποίο οφείλεται η μορφή κβαντομηχανικού συμβολισμού όπως έχει επικρατήσει, υπήρξε στην εποχή του, μαζί με τον Βέρνερ Χάιζενμπεργκ (“Werner Heisenberg”) και τον Έρβιν Σρέντινγκερ. Πιθανότατα Ο συμβολισμός, τον οποίο ανέπτυξε, φημολογείται ότι δημιουργήθηκε με πρότυπο το ευρέως χρησιμοποιούμενο σύμβολο του βέλους για τα διανύσματα, δηλαδή, το μήκος του δίνει το μέτρο του διανύσματος και η αιχμή του βέλους δίνει την φορά του. Το διάνυσμα της κατάστασης ενός κβαντικού αντικειμένου είναι απαραίτητο να θεωρείται ένα κβαντομηχανικό μέγεθος αντίστοιχο των κλασσικών διανυσματικών μεγεθών.

Μία μηχανή υπολογισμού η οποία θα εκμεταλλευόταν την κβαντομηχανική, ερευνούνταν από επιστήμονες και φυσικούς του πεδίου των ηλεκτρονικών υπολογιστών και προηγήθη ήδη σαν ιδέα από τη δεκαετία του 1970. Ο Στίβεν Βίσνερ (“Steven Wiesner”), το 1969 πρότεινε την κβαντική επεξεργασία πληροφορίας ως έναν ανώτερο τρόπο για την εκτέλεση διαδικασιών

κρυπτολογικής. Οι πρώτες δημοσιευμένες εργασίες πάνω στην κβαντική πληροφορική ήταν από τους Αλέξανδρος Χόλοβο (“Alexander Holevo”) (1973), Ποπλάφσκι (“R.P. Poplavskiy”) (1975), Ρόμαν Ινγκάρντεν (“Roman Ingarden”) (1976) και Γιούρι Μάνιν (1980), με τον Στίβεν Βίσνερ να δημοσιεύει το δικό του το 1983. Αυτοί που άφησαν όμως το μεγαλύτερο σημάδι με την συμβολή τους στο χώρο στις αρχές της δεκαετίας του 1980 είναι οι Τσαρλς Μπενέτ (“Charles H. Bennett”) από την “IBM”, Τόμας Γουότσον (“Thomas J. Watson”) από το κέντρο ερευνών, Πολ Μπενιόφ, από το Εθνικό Εργαστήριο “Argonne” στο “Illinois”, Ντέιβιντ Ντότς (“David Deutsch”) από το Πανεπιστήμιο της Οξφόρδης, καθώς και ο Ρίτσαρντ Φίλιπς Φάινμαν από το Τεχνολογικό Ινστιτούτο Καλιφόρνιας “California Institute of Technology”. Η ιδέα γεννήθηκε, όταν οι επιστήμονες ερευνούσαν τα θεμελιώδη φυσικά όρια των κλασσικών ηλεκτρονικών υπολογιστών. Αν η τεχνολογία δεν σταματούσε να ακολουθεί το «Νόμο του Moore» 1, τότε το συνεχώς μειούμενο μέγεθος των κυκλωμάτων που κατασκευάζονται σε τσιπ πυριτίου θα καταλήξει τελικά σε σημείο, όπου τα ατομικά στοιχεία θα είναι μικρότερα από μερικά άτομα. Δεδομένου όμως ότι οι νόμοι της φυσικής που διέπουν την συμπεριφορά και τις ιδιότητες του υποτιθέμενου κυκλώματος σε ατομική κλίμακα αλλά ανήκουν εγγενώς στην κβαντική μηχανική και όχι στην κλασική, είναι έγκυρο λοιπόν το ερώτημα, θα μπορούσε να σχεδιαστεί ένα νέο είδος υπολογιστή με βάση τις αρχές της κβαντικής φυσικής.

Μεταξύ των πρώτων που προσπάθησαν να δώσουν μία απάντηση στο ερώτημα αυτό με την παραγωγή ενός θεωρητικού υποδείγματος το 1982 ήταν και ο Ρίτσαρντ Φίλιπς Φάινμαν, οι προσπάθειες αυτές έδειξαν ότι ένα κβαντικό σύστημα θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί, με σκοπό να πραγματοποιεί υπολογισμούς. Επίσης έδειξε πως μία τέτοια μηχανή θα είναι σε θέση να ενεργεί ως προσομοιωτής για την κβαντική φυσική. Ο Ρίτσαρντ Φίλιπς Φάινμαν υπέθεσε ακόμη και ότι κάθε κλασσικός υπολογιστής, που θα αξιοποιούνταν για την πραγματοποίηση του έργου αυτού, δεν θα το έπραττε ολόσωστα, δημιουργώντας μια εκθετική επιβράδυνση στο χρόνο του υπολογισμού. Ο Ντέιβιντ Ντότς το 1985 πρότεινε την πρώτη κβαντική μηχανή Τούρινγκ (“Turing machine”) και άνοιξε το μονοπάτι για το μοντέλο του κβαντικού κυκλώματος. Το νεοσύστατο πεδίο προσέελκυσε επίσης το ενδιαφέρον των φιλοσόφων. Ο Ντέιβιντ Άλμπερτ (“David Albert”), το 1983 έδειξε πως ένας αυτοματισμός, ο οποίος έχει ως βάση την κβαντομηχανική, συμπεριφέρεται αρκετά διαφορετικά από έναν κλασσικό αυτοματισμό, ενώ ο Ίταμαρ Πίτσοςκι (“Itamar Pitowsky”) το 1990 έκανε το ερώτημα αν η αρχή της επαλληλίας (“Superposition principle”), θα επιτρέψει στους κβαντικούς υπολογιστές την επίλυση “NP-complete” προβλημάτων. Τόνισε, ακόμα, ότι, αν κάποιος είναι ικανός να εξάγει τις πληροφορίες από εκθετική πολυπλοκότητα σε πολυωνμικά πολλές κβαντικές καταστάσεις, τότε το πραγματικό πρόβλημα βρίσκεται στην αποτελεσματική ανάκτηση των εν λόγω πληροφοριών.

Στη δεκαετία του 1990 ξεκίνησε η πρόοδος για τους κβαντικούς αλγόριθμους με την ανακάλυψη του “Deutsch-Josza oracle” (1992) και του “Simon oracle” (1994). Η δεύτερη αποτελεί την βάση για τον αλγόριθμο του Σορ για την κρυπτογράφηση των υπολογιστών. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος, δημοσιεύθηκε το 1994, πυροδοτώντας ένα τεράστιο ενδιαφέρον ακόμη και έξω από την κοινότητα του τομέα της φυσικής. Την χρονιά αυτή, η πρώτη πειραματική υλοποίηση της κβαντικής πύλης “CNOT” με παγιδευμένα ιόντα προτάθηκε από

τους Σιράκ και Ζόλερ (“Cirac and Zoller”) (1995). Ο Πίτερ Σορ και ο Άντριου Στιν (“Andrew Steane”) το 1995 πρότειναν το πρώτο σύστημα για την κβαντική διόρθωση σφάλματος. Μέσα στο ίδιο έτος, μετά από πρόταση των Σιράκ και Ζόλερ (“Cirac and Zoller”) πραγματοποιήθηκε η πρώτη υλοποίηση μιας κβαντικής λογικής πύλης όπου και έγινε στο “Boulder” του Κολοράντο.

Το 1996 ο Λοβ Γκρόβερ (“Lov Grover”) από την “Bell Labs” δημιούργησε τον κβαντικό αλγόριθμο αναζήτησης, που επιταχύνει κατά ένα τετράγωνο σε σύγκριση με τον αντίστοιχο κλασσικό αλγόριθμο της αναζήτησης. Ένα χρόνο έπειτα, προτάθηκε το πρώτο μοντέλο “NMR” για κβαντικό υπολογισμό, που είχε ως βάση την πυρηνική της μαγνητικής τομογραφίας. Η τεχνική αυτή πραγματοποιήθηκε το 1998 με ένα καταχωρητή των “2 qubit”, το οποίο εξελίχθηκε μέχρι τα “7 qubits” στο Εθνικό εργαστήριο “Los Alamos” (“Los Alamos National Lab”) το 2000.

Το 1965, ο Γκόρντον Μουρ (“Gordon Moore”), συνιδρυτής της “Intel”, πρόσεξε ότι ο αριθμός των τρανζίστορ ανά τετραγωνική ίντσα σε ολοκληρωμένα κυκλώματα, διπλασιαζόταν ανά 18 μήνες, σε σχέση με το ολοκληρωμένο κύκλωμα από το οποίο προερχόταν.

Αρχίζοντας από το 2000, το πεδίο γνώρισε μια τεράστια ανάπτυξη. Καινούργια πρότυπα κβαντικών αλγορίθμων έχουν εμφανιστεί στο προσκήνιο, όπως αδιαβατικοί αλγόριθμοι, αλγόριθμοι που βασίζονται σε μετρήσεις, καθώς και νέα φυσικά μοντέλα για την υλοποίηση μεγάλης κλίμακας κβαντικών υπολογιστών με ψυχρές παγίδες ιόντων, κβαντική οπτική χρησιμοποιώντας φωτόνια και οπτική κοιλότητα, φυσική στερεάς κατάστασης και “condensed matter” συστήματα.

Από τότε οι κβαντικοί υπολογιστές έχουν υλοποιηθεί και στην πράξη, για παράδειγμα ο κβαντικός υπολογιστής που κατασκευάστηκε από την εταιρία “D Wave Systems Inc” και λέγεται Ωρίων (“Orion”). Η “D-Wave” παρουσίασε στο Μουσείο Ιστορίας Υπολογιστών της, στο “Mountain View” στην Καλιφόρνια, τον συγκεκριμένο υπολογιστή το 2007, ο Ωρίων εκτέλεσε 3 διαφορετικά προγράμματα. Η βάση του Ωρίων αποτελείται από 16 “qubits” και ο ίδιος είναι κατασκευασμένος από ένα υλικό που είναι μέτριος αγωγός του ηλεκτρισμού και της θερμότητας, παρόλα αυτά είναι από ένα αρκετά σκληρό μέταλλο, το νιόβιο. Ωστόσο, τα “qubits” πρέπει να είναι παγωμένα για να διατηρούν την κβαντική τους κατάσταση. Για αυτό τον λόγο ο Ωρίων έχει θερμοκρασία που πλησιάζει το απόλυτο μηδέν. Στις 11 Μαΐου του 2011 ανακοινώθηκε από την “D-Wave Systems” ένας ολοκληρωμένος κβαντικός υπολογιστής, ο οποίος είναι εφοδιασμένος με έναν επεξεργαστή 128 “qubit”, ο υπολογιστής αυτός αποκαλείται “D-Wave One”. Το όνομα του επεξεργαστή που είναι ο εξοπλισμένος ο “D-Wave One” είναι ο “Rainier”, ο οποίος κάνει μόνο μία δουλειά, η δουλειά αυτή σχετίζεται με την διακριτή βελτιστοποίηση. Επίσης, είναι το πρώτο εμπορικά προσβάσιμο κβαντικό σύστημα υπολογιστών στον κόσμο και χρησιμοποιεί κβαντική ανόπτησης για την εύρεση των προβλημάτων βελτιστοποίησης. Ωστόσο η “D-Wave Systems” δεν επαναπαύτηκε και το 2012 παρουσίασε έναν νέο κβαντικό υπολογιστή με ισχύ “512-qubit”, το όνομα του, Βεζούβιος (“Vesuvius”). Ο Βεζούβιος, που είναι ο “D-Wave Two” είναι ο επόμενος στην σειρά από τον “D-Wave One” στους εμπορικά διαθέσιμους κβαντικούς υπολογιστές. Οι συγκεκριμένοι υπολογιστές έχουν σχεδιαστεί για την εκτέλεση αδιαβατικών κβαντικών υπολογισμών. Οι επιστήμονες από πάντα έχουν τις αμφιβολίες τους, αλλά από το

2014 και μεταγενέστερα, κερδίζουν έδαφος συζητήσεις για το αν τα επόμενα μοντέλα κβαντικών υπολογιστών της “D-Wave” θα έχουν να προσφέρουν κάτι παραπάνω από τους κλασικούς υπολογιστές και αν πραγματοποιείται από τον “D-Wave Two” κάποια υψηλής κλίμακα εμπλοκή. Ανεξαρτήτως τα αρνητικά σχόλια, η “D-Wave” κατάφερε μια πρωτοφανή πρόοδο από τον “D-Wave One” στον “D-Wave Two”, ο πρώτος είναι εξοπλισμένος με επεξεργαστή “128-qubit”, ενώ ο δεύτερος με “512 qubit”. Αν όλα τα “qubit” ήταν σε άμεση επικοινωνία μεταξύ τους, τότε μια μηχανή “512 qubit” θα ήταν πάνω από 100 τάξεις μεγέθους δυσκολότερο για την προσομοίωση από μια μηχανή “128 qubit”. Η “D-Wave” υπολογίζει ότι ο “D-Wave Two” σε σχέσει με τον “D-Wave One” είναι κάπου στις 300.000 φορές ισχυρότερος, καθώς κάθε “qubits” στην αρχιτεκτονική της “D-Wave” συνδέεται απευθείας μόνο με άλλα έξι “qubits”.

Η Αικατερίνη Μάτζιοχ “Catherine McGeoch” τον Μάιο του 2013, σύμβουλος της “D-Wave”, ανακοίνωσε την πρώτη σύγκριση της κβαντικής τεχνολογίας με ένα κλασικό “top-end” σταθερό υπολογιστή γενικού σκοπού (“CPLEX”), που τρέχει έναν αλγόριθμο βελτιστοποίησης. Χρησιμοποιώντας μια διαμόρφωση με “439 qubits”, το σύστημα εκτέλεσε 3600 φορές γρηγορότερα από τον “CPLEX”, με τον αποδοτικότερο αλγόριθμο για την συμβατική μηχανή να επιλύει προβλήματα με 100 ή και περισσότερες μεταβλητές σε μισή ώρα, σε αντίθεση με τον κβαντικό υπολογιστή, που χρειάστηκε μισό δευτερόλεπτο να λύσει τα ίδια προβλήματα. Βέβαια η σύγκριση αυτή δεν είναι “ακριβώς δίκαιη”, επειδή ο υπολογιστής γενικού σκοπού θα εκτελέσει τις διεργασίες πάντα πιο αργά από ότι μια συσκευή αφιερωμένη στην επίλυση ενός συγκεκριμένου προβλήματος. Σε συνέδριο, το 2013, προβλήθηκαν στο “Computing Frontiers” τα αποτελέσματα από τις έρευνες.

Ένα πρωτοφανές σύστημα μεγάλης κλίμακας αρχιτεκτονικής κβαντικών υπολογιστών με διαμάντια παρουσιάστηκε από επιστήμονες στην Αυστρία και στην Ιαπωνία το 2014 [Nemoto, 2014]. Ακόμα, επιστήμονες στο Πανεπιστήμιο του Ίνσμπρουκ κάνουν κβαντικούς υπολογισμούς σε ένα τοπολογικά κωδικοποιημένο “qubit” το οποίο κωδικοποιείται σε εμπλεγμένες “entangled” καταστάσεις κατανεμημένες σε επτά παγίδες ιόντων [Nigg, 2014]. Οι επιστήμονες κατάφεραν ένα εμβληματικό κατόρθωμα για την υλοποίηση ενός κβαντικού Διαδικτύου, μετέφεραν δεδομένα με κβαντική τηλεμεταφορά, με την απόσταση που τους διακατέχει να αγγίζει τα 3,048 μέτρα (10 πόδια) το επίτευγμα αυτό από μόνο του είναι μεγάλο αλλά αν διανοηθεί κανείς ότι το κατάφεραν με το ποσοστό σφάλματος να παραμένει στο μηδέν, το επίτευγμα γίνεται τεράστιο.[Markoff, 2014] [Pfaff, 2014]. Οι Νάικι Ντατάνι (“Nike Dattani”) & Νάθαν Μπράιανς (“Nathan Bryans”) έσπασαν το ρεκόρ για τον μεγαλύτερο αριθμό που συντελέστηκε σε κβαντική συσκευή, το ρεκόρ αυτό ξεπέρασε κατά πολύ το προηγούμενο, φτάνοντας τον αριθμό 56153 (το προηγούμενο ρεκόρ ήταν στα 143) [Zyga, 2014] [The Physics arXiv Blog, 2014]. Στον αγώνα καινοτομίας και ανάπτυξης του τομέα έδειξε να κινείται και η Αμερική. Έγγραφα που διέρρευσαν από τον Έντουαρντ Σνόουντεν (“Edward Snowden”) επιβεβαιώνουν το έργο “Penetrating Hard Targets” [The Washington Post, 2014], με το οποίο η Εθνική Υπηρεσία Ασφαλείας της Αμερικής επιδιώκει να αναπτύξει μια κβαντική υπολογιστική ικανότητα για σκοπούς κρυπτογράφησης [Kurzweil, 2014] [Rich, 2014] [Dockterman, 2014].

Αρχές Ιανουαρίου του 2015, δημοσιεύθηκε έρευνα όπου οπτικά διευθυνσιοδοτούμενοι “nuclear spins” περιστρέφονται σε στερεά μορφή με χρόνο συνοχής έξι ωρών [Zhong, 2015]. Την ίδια χρονιά, επιτεύχθηκε η κωδικοποίηση κβαντικών πληροφοριών από απλούς ηλεκτρικούς παλμούς [Wheelahan, 2015]. Πιο συγκεκριμένα, μια ερευνητική ομάδα υπό την ηγεσία του Πανεπιστημίου της Νέας Νότιας Ουαλίας στο Σίδνεϊ (“UNSW”) κωδικοποίησε κβαντικές πληροφορίες σε πυρίτιο χρησιμοποιώντας απλούς ηλεκτρικούς παλμούς για πρώτη φορά, φέρνοντας προσιτούς μεγάλους κβαντικούς υπολογιστές ένα βήμα πιο κοντά στην πραγματικότητα. Ένα ακόμα γεγονός έλαβε χώρα, όταν πραγματοποιήθηκε κβαντικός κωδικός ανίχνευσης σφαλμάτων χρησιμοποιώντας ένα τετράγωνο πλέγμα τεσσάρων υπεραγωγών “qubits” [Córcoles, 2015].

Η εταιρία “D-Wave Systems” ανακοίνωσε στις 22 Ιουνίου το 2015 ότι είχε σπάσει το φράγμα των “1.000 qubit” [D-Wave, 2015] αναπτύσσοντας έναν επεξεργαστή περίπου διπλάσιο του μεγέθους της προηγούμενης γενιάς της “D-Wave” όπου υπερβαίνει κατά πολύ τον αριθμό των “qubits” που έχει αναπτυχθεί ποτέ από την “D-Wave” ή οποιαδήποτε άλλη κβαντική προσπάθεια. Αυτό είναι ένα σημαντικό τεχνολογικό και επιστημονικό επίτευγμα που θα επιτρέψει την επίλυση πολύ πιο πολύπλοκων υπολογιστικών προβλημάτων από ό,τι ήταν δυνατό σε οποιονδήποτε προηγούμενο κβαντικό υπολογιστή. Για να καταφέρουν τα προηγούμενα αποτελέσματα η “D-Wave” αντιμετώπισε αρκετές προκλήσεις. Για να ξεπεράσουν τις προκλήσεις εξέτασαν τα θεμελιώδη στοιχεία του συστήματος. Στο θέμα της θερμοκρασία της λειτουργίας του συστήματος κατάφεραν να μειώσουν ακόμα περισσότερο την θερμοκρασία του. Ο επεξεργαστής της προηγούμενης γενιάς έτρεξε σε θερμοκρασία κοντά στο απόλυτο μηδέν, ο νέος επεξεργαστής τρέχει 40% πιο κρύος. Η χαμηλότερη θερμοκρασία λειτουργίας ενισχύει τη σημασία των κβαντικών εφέ, γεγονός που αυξάνει την ικανότητα διάκρισης του καλύτερου αποτελέσματος από μια συλλογή καλών υποψηφίων. Στο θέμα του θορύβου στο σύστημα κατάφεραν μέσω ενός συνδυασμού βελτιωμένου σχεδιασμού, αρχιτεκτονικών βελτιώσεων και αλλαγών υλικών, τα επίπεδα θορύβου μειώθηκαν κατά 50% σε σύγκριση με την προηγούμενη γενιά. Το χαμηλότερο περιβάλλον θορύβου βελτιώνει την απόδοση επίλυσης προβλημάτων ενώ ενισχύει την αξιοπιστία και τη σταθερότητα. Στο θέμα του κυκλώματος ελέγχου κατάφεραν ακόμα να αυξήσουν ακόμα περαιτέρω την ακρίβεια του κυκλώματος. Στον μέχρι σήμερα έλεγχο, η αυξημένη ακρίβεια σε συνδυασμό με τη μείωση του θορύβου έχει δείξει βελτιωμένη ακρίβεια έως και 40%. Η επίτευξη και των δύο βελτιώνοντας παράλληλα την απόδοση της παραγωγής είναι ένα σημαντικό επίτευγμα στο χώρο. Βελτίωσαν ακόμα και την κατασκευή των συστημάτων κάνοντας τα την πιο προηγμένη. Οι νέοι επεξεργαστές περιλαμβάνουν πάνω από 128.000 συνδέσεις “Josephson” (συνδέσεις σήραγγας με υπεραγώγιμα ηλεκτρόδια) σε επίπεδη διαδικασία 6-μεταλλικών επιπέδων με χαρακτηριστικά “0,25μm”, που πιστεύεται ότι είναι τα πιο σύνθετα ολοκληρωμένα κυκλώματα υπεραγωγών που κατασκευάστηκαν ποτέ. Η νέα τεχνολογία επεκτείνει τα όρια των τρόπων εκμετάλλευσης των κβαντικών πόρων. Εκτός από την εκτέλεση διακριτής βελτιστοποίησης όπως ο προκάτοχός του, οι αναβαθμίσεις υλικολογισμικού και λογισμικού θα διευκολύνουν τη χρήση του συστήματος για δειγματοληψία εφαρμογών προσφέροντας νέους τρόπους χρήσης.

Μια λογική πύλη πυριτίου “2 qubit” έχει αναπτυχθεί με επιτυχία [Silva, 2015]. Μια ομάδα Αυστραλών μηχανικών δημιούργησε μια κβαντική λογική πύλη από πυρίτιο για πρώτη φορά, καθιστώντας δυνατούς τους υπολογισμούς μεταξύ δύο “qubits” πληροφοριών και επομένως ξεκαθαρίζοντας το τελικό εμπόδιο για να κάνουμε τους κβαντικούς υπολογιστές πυριτίου πραγματικότητα.

Οι κβαντικοί υπολογιστές είναι εγγενώς διαφορετικοί από τους κλασικούς ομολόγους τους επειδή περιλαμβάνουν κβαντικά φαινόμενα, όπως η υπέρθεση και η εμπλοκή, τα οποία δεν υπάρχουν στους κλασικούς ψηφιακούς υπολογιστές. Αλλά σε ένα νέο έγγραφο, οι φυσικοί έχουν δείξει ότι ένας κλασικός αναλογικός υπολογιστής μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να μιμηθεί έναν κβαντικό υπολογιστή, μαζί με την κβαντική υπέρθεση και την εμπλοκή, με αποτέλεσμα το πλήρως κλασικό σύστημα να συμπεριφέρεται σαν έναν πραγματικό κβαντικό υπολογιστή [Zyga, 2015].

Οι φυσικοί με επικεφαλής τον Ράινερ Μπλατ (“Rainer Blatt”) ένωσαν τις δυνάμεις τους με επιστήμονες από το Ινστιτούτο Τεχνολογίας της Μασαχουσέτης (“MIT”), με επικεφαλής τον Ισαάκ Τσουνάγκ (“Isaac Chuang”), για να εφαρμόσουν αποτελεσματικά τον αλγόριθμο του Σορ σε έναν κβαντικό υπολογιστή που βασίζεται σε παγίδες ιόντων [Monz, 2016]. Ορισμένοι αλγόριθμοι για τους κβαντικούς υπολογιστές είναι σε θέση να ξεπεράσουν τους αντίστοιχους αλγόριθμους των κλασικών υπολογιστών. Το 1994, ο Πίτερ Σορ βρήκε έναν κβαντικό αλγόριθμο που υπολογίζει τους πρωταρχικούς παράγοντες ενός μεγάλου αριθμού πολύ πιο αποτελεσματικά από έναν κλασικό υπολογιστή. Για γενική επεκτασιμότητα τέτοιων αλγορίθμων, το υλικό, η διόρθωση κβαντικών σφαλμάτων και η ίδια η αλγοριθμική πραγματοποίηση πρέπει να είναι επεκτάσιμα. Η συγκεκριμένη ομάδα παρουσίασε την υλοποίηση ενός επεκτάσιμου αλγόριθμου του Σορ, όπως προτείνεται από τον Κιτάεβ (“Kitaev”). Συνυπολογίζοντας τον αριθμό 15, χρησιμοποιώντας αποτελεσματικά και ελέγχοντας “7 qubits” και “4 cache qubits” και εφαρμόζοντας γενικευμένες αριθμητικές λειτουργίες, γνωστές ως “modular multipliers” Αυτός ο αλγόριθμος έχει υλοποιηθεί κλιμακωτά σε έναν κβαντικό υπολογιστή παγίδευσης ιόντων και επιστρέφει τους σωστούς παράγοντες με επίπεδο εμπιστοσύνης που υπερβαίνει το 99%.

Το 2016 η “IBM” κυκλοφορεί την “Quantum Experience”, μια διαδικτυακή διεπαφή για τα υπεραγωγικά συστήματά τους. Το σύστημα χρησιμοποιείται αμέσως για τη δημοσίευση νέων πρωτοκόλλων στην κβαντική επεξεργασία πληροφοριών [Devitt, 2019] [Alsina, 2016]. Η “Google” την ίδια περίοδο, χρησιμοποιώντας μια σειρά από “9 superconducting qubits” που αναπτύχθηκαν από την ομάδα Μαρτίνης (“Martinis”) και το πανεπιστήμιο της Καλιφόρνια, Σάντα Μπάρμπαρα (“Santa Barbara”) (“UCSB”), προσομοιώνει ένα μόριο υδρογόνου [O’Malley, 2016]. Παράλληλα την ίδια χρόνια, το “Sneakernet” δημιουργείται, το οποίο θεωρείται η κβαντική εκδοχή ενός συστήματος επικοινωνιών, με τους δημιουργούς του να είναι επιστήμονες από την Αυστραλία και την Ιαπωνία [Greentree, 2016]. Το “Sneakernet”, που ονομάζεται επίσης “sneaker net”, είναι ένας άτυπος όρος για τη μεταφορά ηλεκτρονικών πληροφοριών μέσω φυσικής κίνησης μέσω όπως μαγνητική ταινία, δισκέτες, οπτικούς δίσκους, “USB flash drives” ή εξωτερικούς σκληρούς δίσκους μεταξύ υπολογιστών, αντί να τις μεταδίδει μέσω δικτύου υπολογιστών. Ο όρος είναι ένα λογοπαίγνιο των αγγλικών όρων “net(work)” όπως

και οι λέξεις “Internet” και “Ethernet”, αναφέρεται στο περπάτημα στα πάνινα παπούτσια ως μηχανισμό μεταφοράς [Wikipedia, 2016].

Στις αρχές του 2017, ο κβαντικός ανοπτής “D-Wave 2000Q” ανακοινώνεται με την “D-Wave Systems Inc.” να προσθέτει ένα ακόμη διαμάντι στην ιστορία της και να φανερώνει τη γενική εμπορική διαθεσιμότητα του, οι προδιαγραφές του συστήματος αυτού αγγίζουν τα “2000 qubit” [D-Wave, 2017]. Η απόδοση του συστήματος “D-Wave 2000Q” αξιολογήθηκε με διάφορους τρόπους. Σε δοκιμές συγκριτικής αξιολόγησης, τα “D-Wave QPUs” ξεπέρασαν τους ανταγωνιστικούς κλασικούς αλγόριθμους κατά 1000 έως 10000 φορές σε καθαρό χρόνο υπολογισμού. Για αυτές τις δοκιμές, η “D-Wave” ανέπτυξε αποδοτικές υλοποιήσεις βασισμένες σε “CPU” και “GPU” πολύ εξειδικευμένων αλγορίθμων που αναγνωρίζονται ως ο σκληρότερος ανταγωνισμός με τα “QPU D-Wave” και τα έτρεξε στους κλασικούς διακομιστές υπολογιστών τελευταίας γενιάς. Αυτά τα προβλήματα αναφοράς στη δειγματοληψία και τη βελτιστοποίηση δημιουργήθηκαν για να αντιπροσωπεύουν τη δομή των κοινών πραγματικών προβλημάτων, μεγιστοποιώντας παράλληλα το μέγεθος του προβλήματος που θα μπορούσε να χωρέσει στο “QPU 2000-qubit”. Οι συγκρίσεις αναφοράς ήταν σχετικές με μεμονωμένους πυρήνες “CPU” και “2500 cores GPUs” στο μεγαλύτερο μέγεθος προβλήματος [D-Wave 1, 2021]. Το σύστημα “D-Wave 2000Q” ξεπέρασε τις υλοποιήσεις που βασίζονται σε “GPU” κατά 100 φορές σε ισοδύναμη απόδοση επίλυσης προβλημάτων ανά “watt”. Η αποδοτικότητα ισχύος είναι ένα σοβαρό και αυξανόμενο ζήτημα σε υπολογιστές μεγάλης κλίμακας. Η ισχύς των συστημάτων της “D-Wave” παρέμεινε σταθερή σε διαδοχικές γενιές και αναμένεται να συνεχίσει να το κάνει ενώ η υπολογιστική ισχύς αυξάνεται δραματικά. Ως αποτέλεσμα, η υπολογιστική ισχύς ανά “watt” αναμένεται να αυξηθεί πολύ πιο γρήγορα για τα “D-Wave QPUs” απ’ότι για τα κλασικά συστήματα. [D-Wave 2, 2021]. Η νέα δυνατότητα αντιστάθμισης ανόπτησης παρείχε μια αξιοσημείωτη βελτίωση σε σχέση με την απόδοση βάσης σε μια επίδειξη μικρής κλίμακας ακέραιου “factoring”, σε ορισμένες περιπτώσεις κάνοντας τον υπολογισμό περισσότερο από 1000 φορές γρηγορότερο από ό, τι όταν το πρόβλημα εκτελέστηκε χωρίς αυτό το χαρακτηριστικό [D-Wave 3, 2021].

Η διαθεσιμότητα ενός καθολικού κβαντικού υπολογιστή μπορεί να έχει θεμελιώδη επίδραση σε μεγάλο αριθμό ερευνητικών τομέων και στην κοινωνία στο σύνολό της. Μια όλο και μεγαλύτερη επιστημονική και βιομηχανική κοινότητα εργάζεται για την πραγματοποίηση μιας τέτοιας συσκευής. Ένας αυθαίρετα μεγάλος κβαντικός υπολογιστής μπορεί καλύτερα να κατασκευαστεί χρησιμοποιώντας μια αρθρωτή προσέγγιση. Παρουσιάστηκε ένα προσχέδιο για μια παγιδευμένη μονάδα κλιμάκωσης κβαντικών υπολογιστών που βασίζεται σε ιόντα, επιτρέποντας τη δημιουργία μιας επεκτάσιμης κβαντικής αρχιτεκτονικής υπολογιστή με βάση κβαντικές πύλες ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος. Οι μονάδες ελέγχουν όλες τις λειτουργίες ως αυτόνομες μονάδες, κατασκευάζονται χρησιμοποιώντας τεχνικές μικροκατασκευής πυριτίου και είναι προσιτές από την τρέχουσα τεχνολογία. Για την εκτέλεση των απαιτούμενων κβαντικών υπολογισμών, οι μονάδες χρησιμοποιούν τεχνολογία κβαντικής πύλης με ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος. Για την κλιμακωση αυτής της κβαντικής αρχιτεκτονικής υπολογιστών μικροκυμάτων σε μεγάλο μέγεθος, παρουσιάστηκε ένας πλήρως

επεκτάσιμος σχεδιασμός που χρησιμοποιεί τη μεταφορά ιόντων μεταξύ διαφορετικών μονάδων, επιτρέποντας έτσι αυθαίρετα να συνδέονται πολλές μονάδες για την κατασκευή μιας συσκευής μεγάλης κλίμακας. Ένας κωδικός διόρθωσης επιφανειακών σφαλμάτων υψηλού ορίου μπορεί να εφαρμοστεί στην προτεινόμενη αρχιτεκτονική για την εκτέλεση ανεκτικών λειτουργιών. Με τις κατάλληλες ρυθμίσεις, οι προτεινόμενες μονάδες είναι επίσης κατάλληλες για εναλλακτικές αρχιτεκτονικές κβαντικών υπολογιστών παγιδευμένων ιόντων, όπως σχήματα που χρησιμοποιούν φωτονικές διασυνδέσεις. Τον φεβρουάριο του 2017 δημοσιεύθηκε το συγκεκριμένο σχέδιο για έναν κβαντικό υπολογιστή παγιδευμένων ιόντων σε μικροκύματα [Lekitsch, 2017].

Η “IBM”, η “Google” και άλλοι αγωνίζονται για την επίτευξη της κβαντικής υπεροχής. Με την δεύτερη το 2017, να κάνει γνωστό έναν αποδοτικότερο τρόπο αξιολόγησης των συστημάτων και παράλληλα να φανερώνει την υλοποίηση ενός κβαντικού υπολογιστή “17-qubit”. Ένα επίτευγμα για τον αγώνα προς την κβαντική υπεροχή [Meredith, 2017]. Ακόμα, επιστήμονες χτίζουν ένα μικροτσίπ που παράγει δύο εμπλεγμένα “qubits” το καθένα με 10 καταστάσεις, για 100 διαστάσεις συνολικά [Choi, 2017]. Μερικούς μήνες αργότερα, η “Q Sharp” αποκαλείπεται από την “Microsoft”, είναι μια κβαντική γλώσσα προγραμματισμού, την οποία έχουν ενσωματώσει στην “Visual Studio”. Τα προγράμματα μπορούν να εκτελεστούν τοπικά σε προσομοιωτή “32-qubit” ή σε προσομοιωτή “40-qubit” στο “Azure” [Staff, 2017]. Ο Καζί Σααμπίκη Αχμέτ (“Kazi Saabique Ahmed”), πρώην σύμβουλος έξυπνων συστημάτων του Οργανισμού Προηγμένων Ερευνητικών Έργων Άμυνας της Αμερικής (“DARPA”), σε συνεργασία με τους ερευνητές της “QuAIL”, αναπτύσσει το πρώτο διαδραστικό λειτουργικό σύστημα στον κόσμο που χρησιμοποιείται σε εμπορικούς κβαντικούς υπολογιστές. Παράλληλα η “Intel” επιβεβαιώνει την ανάπτυξη ενός υπεραγωγίμου κυκλώματος “17-qubit” [Knight, 2017]. Στά τέλη της ίδιας χρονιάς, η “IBM” αποκαλύπτει έναν κβαντικό υπολογιστή “50-qubit” που μπορεί να διατηρήσει την κβαντική του κατάσταση για 90 μικροδευτερόλεπτα [Will, 2017].

Παρόλη την πρόοδο που έχει πραγματοποιηθεί στον κβαντικό χώρο, οι πιο πολλοί από τους ερευνητές πιστεύουν ότι τα ανεκτικά σε σφάλματα, “fault-tolerant”, κβαντικά συστήματα είναι ακόμα ένα μακρινό όνειρο [Preskill, 2018]. Ειδικότερα, η τεχνολογία “Noisy Intermediate-Scale Quantum” (“NISQ”) θα είναι διαθέσιμη στο εγγύς μέλλον. Οι κβαντικοί υπολογιστές με 50-100 “qubits” ενδέχεται να είναι σε θέση να εκτελούν εργασίες που υπερβαίνουν τις δυνατότητες των σημερινών κλασικών ψηφιακών υπολογιστών, αλλά ο θόρυβος στις κβαντικές πύλες θα περιορίσει το μέγεθος των κβαντικών κυκλωμάτων που μπορούν να εκτελεστούν αξιόπιστα. Οι συσκευές “NISQ” θα είναι χρήσιμα εργαλεία για την εξερεύνηση της κβαντικής φυσικής πολλών σωμάτων και μπορεί να έχουν άλλες χρήσιμες εφαρμογές, αλλά ο κβαντικός υπολογιστής με τα 100 “qubit” δεν θα αλλάξει τον κόσμο αμέσως, πρέπει να τον θεωρήσουμε ως ένα σημαντικό βήμα προς τις πιο ισχυρές κβαντικές τεχνολογίες του μέλλοντος. Οι κβαντικοί τεχνολόγοι θα πρέπει να συνεχίσουν να αγωνίζονται για πιο ακριβείς κβαντικές πύλες και, τελικά, πλήρως ανεκτικούς σε σφάλματα κβαντικούς υπολογιστές.

Επιστήμονες του “MIT” το 2018, αναφέρουν την ανακάλυψη μιας νέας μορφής φωτός τριπλού φωτονίου [Hignett, 2018] [Liang, 2018]. Αναλυτικότερα εξηγούν ότι, οι δεσμευμένες

καταστάσεις τεράστιων σωματιδίων, όπως πυρήνες, άτομα ή μόρια, αποτελούν το μεγαλύτερο μέρος του ορατού κόσμου γύρω μας. Αντίθετα, τα φωτόνια αλληλεπιδρούν συνήθως ασθενώς. Ανέφεραν την παρατήρηση των διακινούμενων καταστάσεων τριών φωτονίων σε ένα κβαντικό μη γραμμικό μέσο όπου οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των φωτονίων μεσολαβούνται από ατομικές καταστάσεις “Rydberg”. Η συσχέτιση των φωτονίων και οι μετρήσεις φάσης υπό όρους αποκαλύπτουν τα ξεχωριστά χαρακτηριστικά συσσώρευσης και φάσης που σχετίζονται με καταστάσεις τριών φωτονίων και δύο φωτονίων. Τέτοια φωτονικά τριμερή και διμερή διαθέτουν κυματοσυνθήκες διατήρησης σχήματος που εξαρτώνται από τον συνιστώμενο αριθμό φωτονίου. Η παρατηρούμενη συσσώρευση και έντονα μη γραμμική οπτική φάση περιγράφονται από μια αποτελεσματική θεωρία πεδίου (“EFT”) των αλληλεπιδράσεων φωτονίων-επαγόμενων από “Rydberg”. Αυτές οι παρατηρήσεις καταδεικνύουν την ικανότητα συνειδητοποίησης και ελέγχου αλληλεπιδρώντας έντονα με τις κβαντικές καταστάσεις φωτός πολλών σωματιδίων.

Την ίδια χρονιά ερευνητές της Οξφόρδης χρησιμοποιούν επιτυχώς μια τεχνική παγιδευμένων ιόντων, όπου τοποθετούν δύο φορτισμένα άτομα σε κατάσταση κβαντικής εμπλοκής για να επιταχύνουν τις λογικές πύλες κατά 20 έως 60 φορές, σε σύγκριση με τις προηγούμενες καλύτερες πύλες, μεταφρασμένες σε 1,6 μικροδευτερόλεπτα, με ακρίβεια 99,8% [Griffin, 2018]. Ως βάση το πυρίτιο, από μια άλλη ομάδα, γνωστή και ως “QuTech” δοκιμάζεται με επιτυχία ένας επεξεργαστής “2-spin-qubit” [Giles, 2018]. Η “Google” δεν μπορούσε να μην δημοσιεύσει τα ευχάριστα πλάνα της, ανακοινώνοντας το 2018 τη δημιουργία ενός κβαντικού τσιπ 72 “qubit”, που ονομάζεται “Bristlecone” [Conover, 2018], επιτυγχάνοντας νέο ρεκόρ στον τομέα.

Το “Tangle Lake” γεννιέται και η “Intel” επιβεβαιώνει την ανάπτυξη του, το δοκιμαστικό “chip” υπεραγωγών 49 “qubit”, είναι γεγονός [Hsu, 2018]. Μερικούς μήνες αργότερα, η “Intel” κάνει γνωστό ότι ασχολείται με διάφορες ατζέντες, μια από αυτές είναι ότι ξεκινά να δοκιμάζει έναν επεξεργαστή “spin-qubit” με βάση το πυρίτιο που κατασκευάζεται στο “D1D Fab” της εταιρείας στο Όρεγκον [Forrest, 2018]. Σύμφωνα με την ανακοίνωση, το “chip” δημιουργήθηκε χρησιμοποιώντας τις ίδιες τεχνικές κατασκευής πυριτίου που χρησιμοποιεί η εταιρεία για να κάνει τα παραδοσιακά “chip” υπολογιστών. Η χρήση μιας τόσο γνωστής διαδικασίας και ο σχεδιασμός του “chip” για δραματική επεκτασιμότητα, θα μπορούσε να σημαίνει ότι η “Intel” τοποθετείται για μελλοντική ανάπτυξη στον κβαντικό χώρο υπολογιστών [Nagata, 2018].

Στις αρχές του Δεκέμβρη το 2018 ολοκληρώθηκε φωτονική πλατφόρμα για κβαντικές πληροφορίες με συνεχείς μεταβλητές [Lenzini, 2018]. Η ενσωματωμένη κβαντική φωτονική παρέχει μια επεκτάσιμη πλατφόρμα για τη δημιουργία, τον χειρισμό και την ανίχνευση οπτικών κβαντικών καταστάσεων περιορίζοντας το φως μέσα σε μικροσκοπικά κυκλώματα κυματοδηγού. Στην έρευνα που πραγματοποιήθηκε, παρουσιάστηκε η δημιουργία, ο χειρισμός και το ενδομετρικό στάδιο της ανίχνευσης ομοδύνης μη κλασικού φωτός σε μία μόνο συσκευή, ένα βασικό βήμα προς μια πλήρως ολοκληρωμένη προσέγγιση των κβαντικών πληροφοριών με συνεχείς μεταβλητές. Χρησιμοποιήθηκε ένα δυναμικά αναδιαμορφώσιμο δίκτυο κυματοδηγών νιοβικού λιθίου (“lithium niobate”) για να δημιουργηθεί και να χαρακτηριστεί το συμπίεσμένο κενό και οι καταστάσεις εμπλοκής δύο τρόπων, βασικοί πόροι για διάφορα πρωτόκολλα

κβαντικής επικοινωνίας και κβαντικών υπολογιστών. Μετρήθηκε επίσης ένα επίπεδο συμπίεσης “ $-1,38 \pm 0,04$ dB” και επιτεύχθηκε εμπλοκή επαληθεύοντας ένα κριτήριο αδιαχώριστου “ $I = 0,77 \pm 0,02 < 1$ ”. Η πλατφόρμα μπορεί να εφαρμόσει όλες τις διαδικασίες που απαιτούνται για την οπτική κβαντική τεχνολογία, και η υψηλή μη γραμμικότητα και η γρήγορη επαναδιαμόρφωση του, την καθιστούν ιδανική για την πραγματοποίηση του κβαντικού υπολογισμού με χρονικές κωδικοποιημένες συνεχείς μεταβλητές καταστάσεις συμπλέγματος.

Στις 17 Δεκεμβρίου 2018, η εταιρεία “IonQ” παρουσίασε τον πρώτο εμπορικό κβαντικό υπολογιστή παγιδευμένων ιόντων, με διάρκεια προγράμματος πάνω από 60 “two-qubit” πύλες, με 11 πλήρως συνδεδεμένα “qubit”, 55 διευθυνσιοδοτούμενα ζεύγη, σφάλμα πύλης ενός “qubit” $< 0,03\%$ και “2-qubit” σφάλμα πύλης $< 1,0\%$ [Ball, 2018] [IonQ, 2018].

Τέσσερις μέρες αργότερα, ορίστηκαν τα επιτευγματα που πρέπει να επιτευχθούν και οι προτεραιότητες για ένα δεκαετές σχέδιο για την προώθηση της ανάπτυξης εφαρμογών κβαντικής επιστήμης και τεχνολογίας στις Ηνωμένες Πολιτείες από τον Πρόεδρο Ντόναλντ Τραμπ, ο οποίος υπέγραψε τον νόμο της Εθνικής Κβαντικής Πρωτοβουλίας στις 21 Δεκεμβρίου του 2018 [Congress, 2018] [Giles, 2018] [US-National, 2018].

Απο το 2019 ξεκίνησαν να εισέρχονται στο χώρο περισσότερα λεφτά, στον ιδιωτικό αλλά και στον δημόσιο τομέα. [Gibney, 2019]. Η “IBM” παρουσιάζει τον πρώτο εμπορικό κβαντικό υπολογιστή της, το “IBM Q System One” [Aron, 2019], που σχεδιάστηκε από το “Map Project Office” και το “Universal Design Studio” με έδρα το Ηνωμένο Βασίλειο και κατασκευάστηκε από την “Gorppion” [Lardinois, 2019]. Ενώ η “IBM” το περιγράφει ως το πρώτο πλήρως ενσωματωμένο καθολικό σύστημα κβαντικών υπολογιστών που έχει σχεδιαστεί για επιστημονική και εμπορική χρήση, αξίζει να τονιστεί ότι μια μηχανή “20-qubit” δεν είναι αρκετά ισχυρή για τις περισσότερες από τις εμπορικές εφαρμογές που οραματίζονται οι άνθρωποι για έναν κβαντικό υπολογιστή με περισσότερα “qubits”, και “qubits” που είναι χρήσιμα για περισσότερα από 100 μικροδευτερόλεπτα. Δεν αποτελεί έκπληξη λοιπόν το γεγονός ότι η “IBM” τονίζει ότι πρόκειται για μια πρώτη απόπειρα και ότι τα συστήματα, έχουν σχεδιαστεί για να αντιμετωπίζουν μια μέρα προβλήματα που θεωρούνται σήμερα πολύ περίπλοκα και εκθετικά στη φύση για να χειριστούν τα κλασικά συστήματα. Αυτήν τη στιγμή, δεν είναι ακόμα αρκετά εκεί, αλλά η εταιρεία σημειώνει επίσης ότι αυτά τα συστήματα είναι αναβαθμίσιμα, και εύκολα συντηρημένα.

Η αποκωδικοποίηση της αρχιτεκτονική Πήγασος (“Pegasus”) της “D-Wave” γίνεται από τους Νάικι Ντατάνι και τους συναδέλφους του όπου την περιγράφουν και την κάνουν ανοιχτή προς το κοινό [Dattani, 2019] [Chancellor, 2019]. Το Πήγασος είναι ένα γράφημα που προσφέρει ουσιαστικά αυξημένη συνδεσιμότητα μεταξύ των “qubits” του κβαντικού υλικού ανόπτησης σε σύγκριση με το γράφημα Χίμαιρα (“Chimera”). Είναι η πρώτη θεμελιώδης αλλαγή στο γράφημα συνδεσιμότητας του κβαντικού ανόπτη (“Quantum Annealing”) που κατασκευάστηκε από την “D-Wave” από τότε που η Χίμαιρα εισήχθη το 2009 και στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε το 2011 για το πρώτο εμπορικό κβαντικό ανόπτη της “D-Wave”. Στην έρευνα που πραγματοποιήθηκε περιέγραψαν έναν αλγόριθμο που καθορίζει τη συνδεσιμότητα του Πήγασου και παρέχει αυτό που πιστεύουν ότι είναι ο καλύτερος τρόπος για να απεικονιστεί γραφικά ο Πήγασος για να

φανεί ποια “qubits” συνδέεται μεταξύ τους. Ως συμπληρωματικό υλικό, παρέχεται μια μεγάλη ποικιλία διαφορετικών απεικονίσεων του Πήγασου που εκθέτουν διαφορετικές ιδιότητες του γραφήματος με διαφορετικούς τρόπους. Ακόμα παρέχεται ένας ανοιχτός κώδικας για τη δημιουργία των πολλών απεικονίσεων του Πήγασου που απεικονίζονται.

Η χρησιμοποιήσει ενός βρόχου ανάδρασης μεταξύ ενός κλασικού υπολογιστή και ενός κβαντικού συν-επεξεργαστή απο Αυστριακούς φυσικούς που επιδεικνύουν αυτο-επαλήθευση, υβριδική, παραλλαγή κβαντικής προσομοίωσης μοντέλων δικτυωτού πλέγματος σε συμπτυκνωμένη ύλη και φυσική υψηλής ενέργειας [Kokail, 2019]. Οι υβριδικοί κλασικοί αλγόριθμοι στοχεύουν στην επίλυση διαφοροποιημένων προβλημάτων βελτιστοποίησης χρησιμοποιώντας έναν βρόχο ανατροφοδότησης μεταξύ ενός κλασικού υπολογιστή και ενός κβαντικού συν-επεξεργαστή, ενώ επωφελούνται από τους κβαντικούς πόρους. Στην έρευνα παρουσιάστηκαν πειράματα που δείχνουν αυτο-επαλήθευση, υβριδική, παραλλαγή κβαντικής προσομοίωσης μοντέλων πλέγματος σε συμπτυκνωμένη ύλη και φυσική υψηλής ενέργειας. Σε αντίθεση με την αναλογική κβαντική προσομοίωση, αυτή η προσέγγιση παραλείπει την απαίτηση για την πραγματοποίηση του στοχευμένου “Hamiltonian” απευθείας στο εργαστήριο, επιτρέποντας έτσι τη μελέτη μιας ευρείας ποικιλίας προγενέστερων δυσάρεστων μοντέλων στόχων. Εστιάζοντας στο πλέγμα μοντέλο “Schwinger”, μια θεωρία μετρητή της μονοδιάστατης κβαντικής ηλεκτροδυναμικής. Ο συγκεκριμένος κβαντικός συν-επεξεργαστής είναι ένας προγραμματιζόμενος, αναλογικός κβαντικός προσομοιωτής παγιδευμένων ιόντων με έως “20 qubit”, ικανός να δημιουργήσει οικογένειες εμπλεγμένων δοκιμαστικών καταστάσεων με σεβασμό στις συμμετρίες του στόχου “Hamiltonian”. Προσδιορίζοντας τις καταστάσεις εδάφους, τα κενά ενέργειας και επιπλέον, μετρώντας τις διακυμάνσεις του “Schwinger Hamiltonian”, παρέχει αλγοριθμικά σφάλματα για τις ενέργειες, κάνοντας ένα βήμα προς την επαλήθευση της κβαντικής προσομοίωσης. Οι κβαντικές κλασικές τεχνικές παραλλαγής συνδυάζονται με έναν προγραμματιζόμενο αναλογικό κβαντικό προσομοιωτή που βασίζεται σε μια μονοδιάστατη συστοιχία έως 20 παγιδευμένων ιόντων ασβεστίου για την προσομοίωση της κατάστασης εδάφους του μοντέλου πλέγματος “Schwinger”.

Κβαντικός Δαρβινισμός παρατηρείται σε διαμάντια σε θερμοκρασία δωματίου [Unden, 2019] [Cho, 2019]. Ο κβαντικός Δαρβινισμός είναι μια θεωρία που προορίζεται να εξηγήσει την εμφάνιση του κλασικού κόσμου από τον κβαντικό κόσμο λόγω μιας διαδικασίας φυσικής επιλογής του Δαρβίνου που προκαλείται από το περιβάλλον που αλληλεπιδρά με το κβαντικό σύστημα, όπου οι πολλές πιθανές κβαντικές καταστάσεις επιλέγονται έναντι μιας σταθερής κατάστασης δείκτη. Ο “Wojciech Zurek”, μαζί με τους “Ollivier, Poulin”, “Paz” και “Blume-Kohout” και τους συνεργάτες τους πρότειναν το 2003 την προηγούμενη θεωρεία. Η ανάπτυξη της θεωρίας αυτής ευθύνεται στον “Zurek” και στην ενσωμάτωση ορισμένων ερευνητικών θεμάτων του, που έλαβαν χώρα την περίοδο των είκοσι πέντε χρόνων, μη εξαιρουμένων των καταστάσεων δείκτη, ηλεκτρονικής επιλογής και αποσυγκρότησης [Wikipedia, 2019].

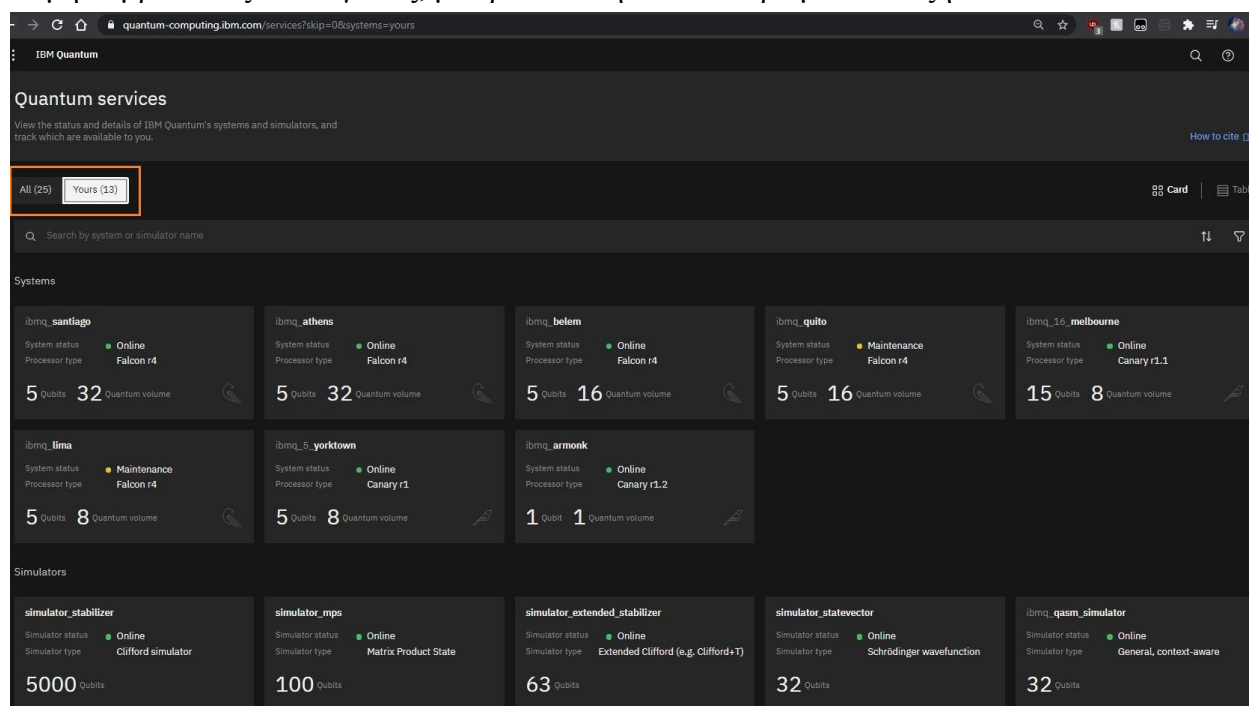
Μία εργασία από την κβαντική ερευνητική ομάδα υπολογιστών της “Google” ήταν σύντομα διαθέσιμη στα τέλη Σεπτεμβρίου 2019, υποστηρίζοντας ότι το έργο έχει φτάσει στην

κβαντική υπεροχή [Bonifacic, 2019] [Porter, 2019] [Murgia, 2019]. Συγκεκριμένα, στις 23 Οκτωβρίου το 2019, η “Google AI”, σε συνεργασία με την “NASA”, υποστήριξαν ότι κατάφεραν να πραγματοποιήσουν κβαντικό υπολογισμό, “quantum computation“ όπου δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί από έναν κλασικό υπολογιστή [Pednault, 2019] [Rodrigo, 2019]. Παράλληλα η “IBM” αποκαλύπτει τον μεγαλύτερο κβαντικό υπολογιστή της, αποτελούμενη από “53 qubit”. Το οποίο σύστημα θα συνδεθεί τον Οκτώβριο του 2019 [Shankland, 2019].

1.2 Τι είναι το “IBM Quantum Experience”

Η “IBM” προσφέρει πρόσβαση στους πιο προηγμένους διαθέσιμους κβαντικούς υπολογιστές με την χρήση του “IBM Quantum Experience”. Το “IBM Quantum Experience” είναι ένα περιβάλλον υπολογιστικού νέφους, “Cloud” περιβάλλον όπου δίνει την δυνατότητα στο ευρύ κοινό να αποκτήσει πρόσβαση σε κβαντικούς υπολογιστές, εκτελώντας κώδικα σε αυτούς μέσω του περιβάλλοντος της “IBM”. Το “IBM Quantum Experience” χωρίζεται σε δυο κομμάτια το “IBM Quantum Composer” και το “IBM Quantum Lab”. Μια δυνατότητα που προσφέρει η “IBM” είναι ότι εκτός από κώδικα που απευθύνεται σε κβαντικούς υπολογιστές, οι χρήστες μπορούν να γράψουν/εκτελέσουν κώδικα που περιέχει και κλασικούς υπολογισμούς και να δημιουργήσουν αποτελεσματικούς συνδυασμούς αυτών.

Υπάρχει ακόμα η δυνατότητα ανάπτυξης κβαντικών κυκλωμάτων και εκτέλεσης τους είτε σε πραγματικούς κβαντικούς υπολογιστές, με σειρά προτεραιότητας, είτε σε προσομοιωμένους υπολογιστές που συμπεριφέρονται όπως θα συμπεριφέρονταν και οι κβαντικοί υπολογιστές. Η “IBM” μας επιτρέπει ακόμα να δούμε σε πραγματικούς χρόνους, τους μη συμβατικούς υπολογιστές, το φόρτο εργασίας που έχουν αναλάβει και πολλές ακόμα πληροφορίες που μας επιτρέπει να κατεβάσουμε σε αρχείο “.Csv” και να επεξεργαστούμε αναλόγως, όπως θα παρατηρήσουμε και σε λίγο. Στην παρακάτω εικόνα, τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή, αν προσέξουμε, οι απλοί χρήστες μπορούν να συναναστραφούν με 13 μη συμβατικούς υπολογιστές ενώ ακόμα βλέπουμε ότι έχουν συνολικά συνδεδεμένους στο σύστημα 25 μη συμβατικούς υπολογιστές, με προδιάθεση αυτοί οι αριθμοί να αυξηθούν.

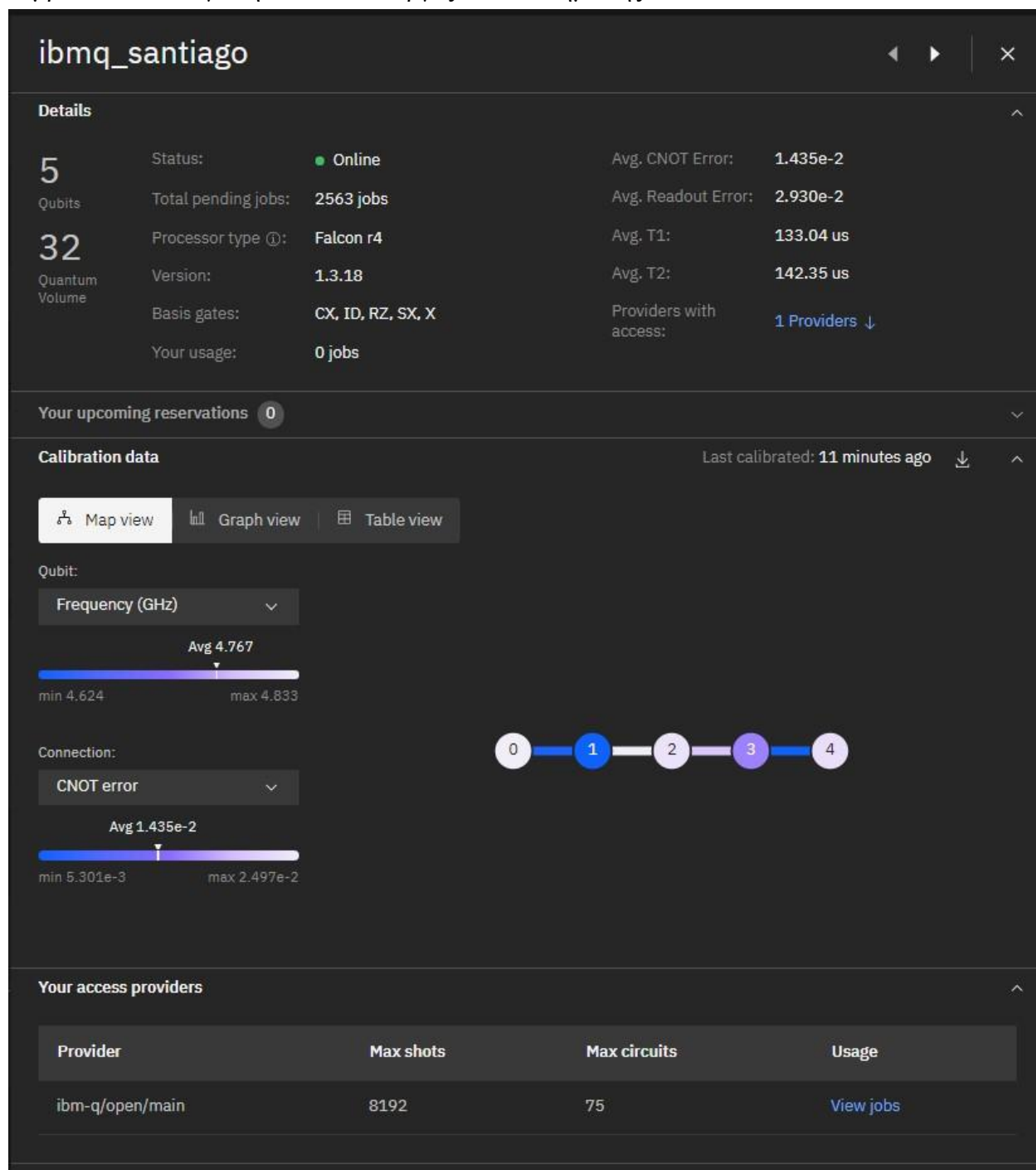


The screenshot shows the IBM Quantum Experience dashboard. At the top, there's a search bar and a filter for 'Yours (13)'. Below this, the dashboard is divided into two main sections: 'Systems' and 'Simulators'.

System Name	Status	Processor Type	Qubits	Quantum Volume
ibmq_santiago	Online	Falcon r4	5	32
ibmq_athens	Online	Falcon r4	5	32
ibmq_belem	Online	Falcon r4	5	16
ibmq_quito	Maintenance	Falcon r4	5	16
ibmq_16_melbourne	Online	Canary r1.1	15	8
ibmq_lima	Maintenance	Falcon r4	5	8
ibmq_5_yorktown	Online	Canary r1	5	8
ibmq_armonk	Online	Canary r1.2	1	1
simulator_stabilizer	Online	Clifford simulator	5000	
simulator_mps	Online	Matrix Product State	100	
simulator_extended_stabilizer	Online	Extended Clifford (e.g. Clifford+T)	63	
simulator_statevector	Online	Schrödinger wavefunction	32	
ibmq_qasm_simulator	Online	General, context-aware	32	

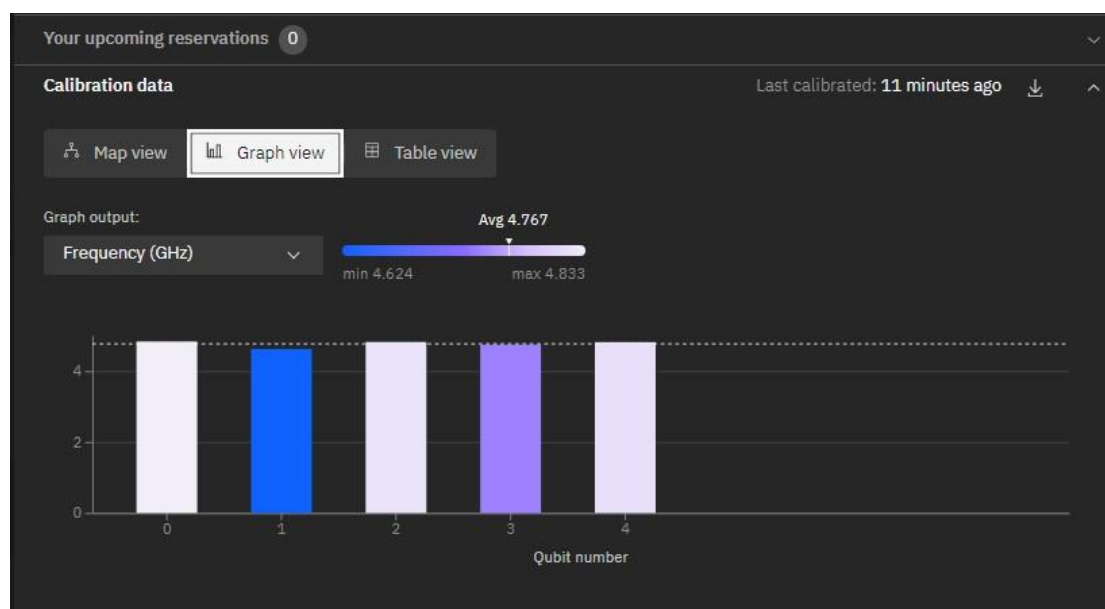
Εικόνα 1.2.1: Οι διαθέσιμοι κβαντικοί υπολογιστές της “IBM Quantum Experience”

Εδώ βλέπουμε τις πληροφορίες του, πρώτου από την προηγούμενη εικόνα, συγκεκριμένου μη συμβατικού υπολογιστή που είναι ενεργός στο σύστημα της “IBM”.



Εικόνα 1.2.2: Ένα δείγμα διαθέσιμου κβαντικού υπολογιστή της “IBM Quantum Experience”

Έχοντας παράλληλα την δυνατότητα να δούμε τις πληροφορίες των συστημάτων που προαναφέραμε με διάφορες απεικονίσεις.



Εικόνα 1.2.3: Πληροφορίες για τον επιλεγμένο κβαντικό υπολογιστή της “IBM Quantum Experience”

Calibration data

Last calibrated: 11 minutes ago

Map view | Graph view | **Table view**

Qubit	T1 (us)	T2 (us)	Frequency (GHz)	Anharmonicity (GHz)	Readout assignment
Q0	116.67	213.52	4.833	-0.34189	1.020e-2
Q1	147.32	111.91	4.624	-0.32823	1.310e-2
Q2	113.35	93.6	4.821	-0.34107	1.079e-1
Q3	150.95	102.11	4.742	-0.34013	6.600e-3
Q4	136.91	190.59	4.816	-0.34291	8.700e-3

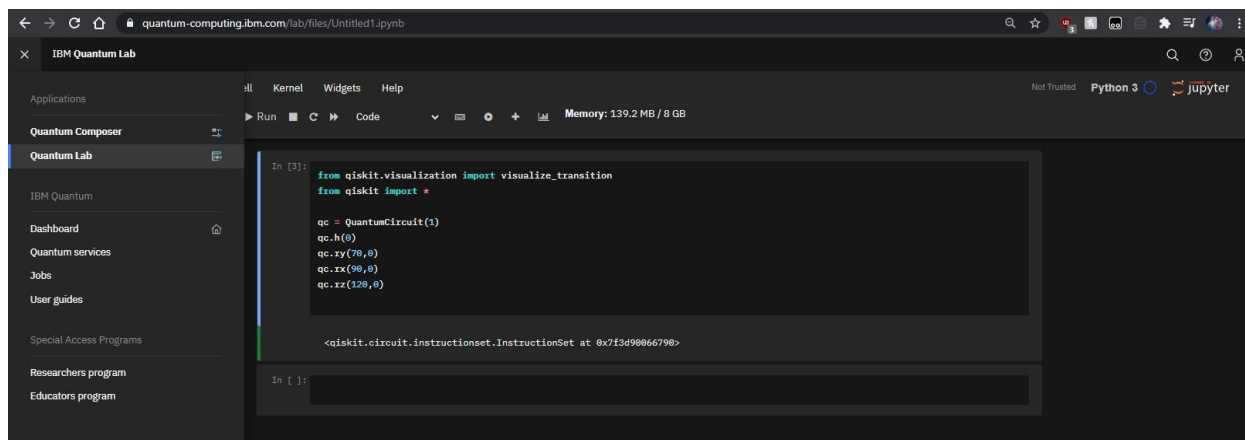
Download calibration data (.csv)

Your access providers

Provider	Max shots	Max circuits	Usage
ibm-q/open/main	8192	75	View jobs

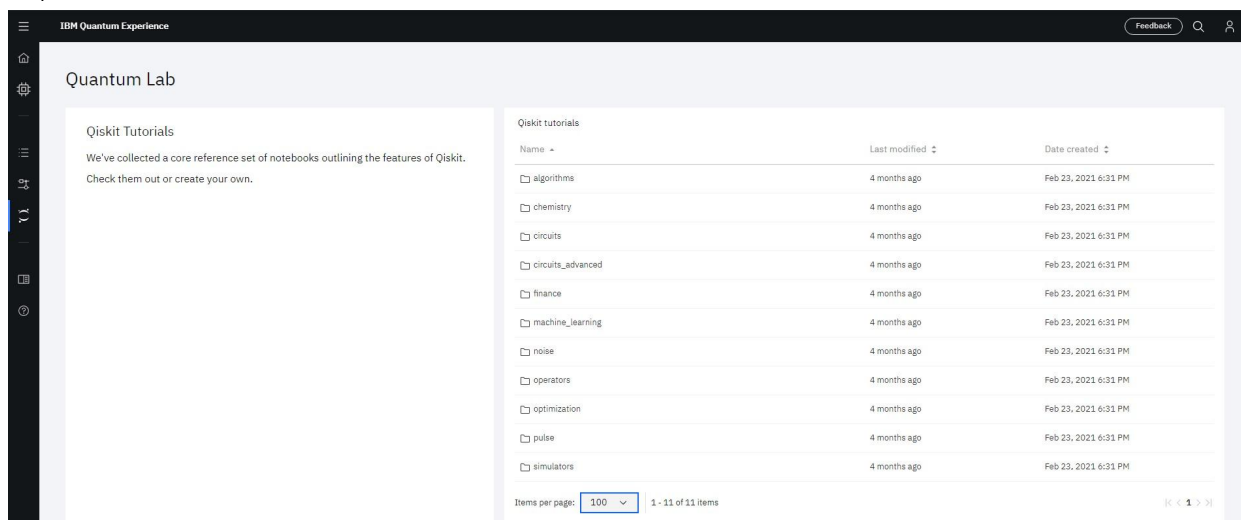
Εικόνα 1.2.4: Πως να κατεβάσουμε τις διαθέσιμες πληροφορίες των κβαντικών υπολογιστών της “IBM Quantum Experience”

Η ιστοσελίδα χρησιμοποιεί το “Jupyter Notebook” όπου αυτό χρησιμοποιεί την γλώσσα προγραμματισμού “Python” για την εκτέλεση του κώδικα. Η ιστοσελίδα χρησιμοποιεί αρκετές βιβλιοθήκες, μέσα σε αυτές είναι και οι βιβλιοθήκες του “Qiskit”. Επίσης, η “IBM” παρέχει στους χρήστες της, την δυνατότητα υλοποίησης κυκλωμάτων χωρίς καθόλου κώδικα μέσα από μια διαισθητική μεταφορά και απόθεση “Drag & Drop” διεπαφή χρήστη όπως θα δούμε στις φωτογραφίες παρακάτω. Ακόμα, επιτρέπει στους χρήστες να δημιουργήσουν τις δικές τους πύλες στο κύκλωμα και να εξερευνήσουν το συγκεκριμένο πεδίο. Αυτό μειώνει σημαντικά την καμπύλη εκμάθησης για τους νέους χρήστες καθώς δεν υπάρχουν προαπαιτούμενα για συγκεκριμένες δεξιότητες [Wikipedia, 2021].



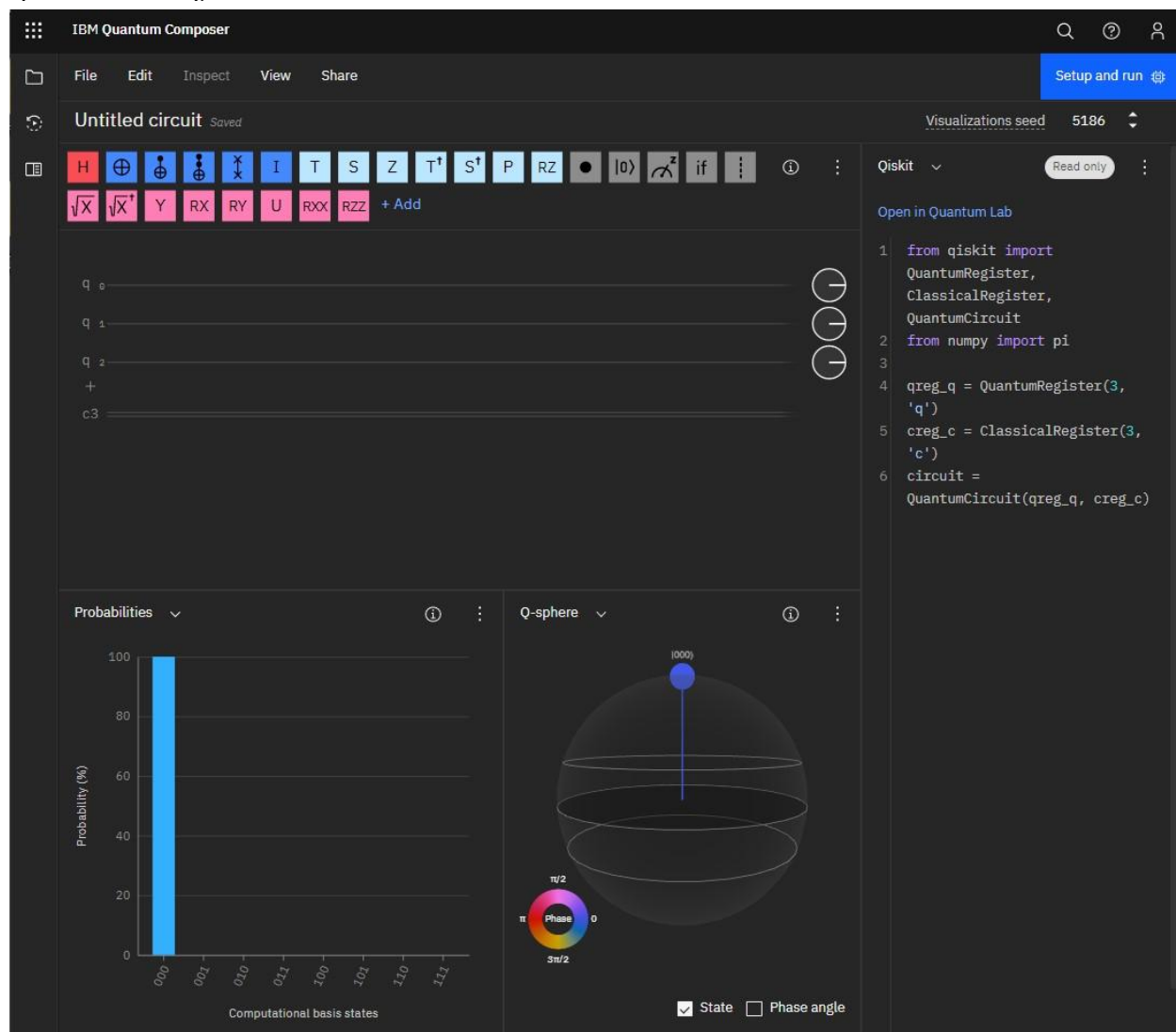
Εικόνα 1.2.5: Το περιβάλλον “Quantum Lab” της “IBM Quantum Experience”

Αξίζει να σημειωθεί, ότι γενικά η χρήση του υπολογιστικού νέφους “Cloud περιβάλλοντος” είναι απλή. Ο χρήστης απλά φτιάχνει έναν λογαριασμό και αποκτά αμέσως πρόσβαση σε όλες αυτές τις λειτουργίες που προανέφερα. Δίνεται ακόμα και πρόσβαση, με την βοήθεια του “Qiskit”, σε έτοιμους οδηγούς εκμάθησης, όπου τα έχει όλα καταναμεμημένα ανα κεφάλαια.



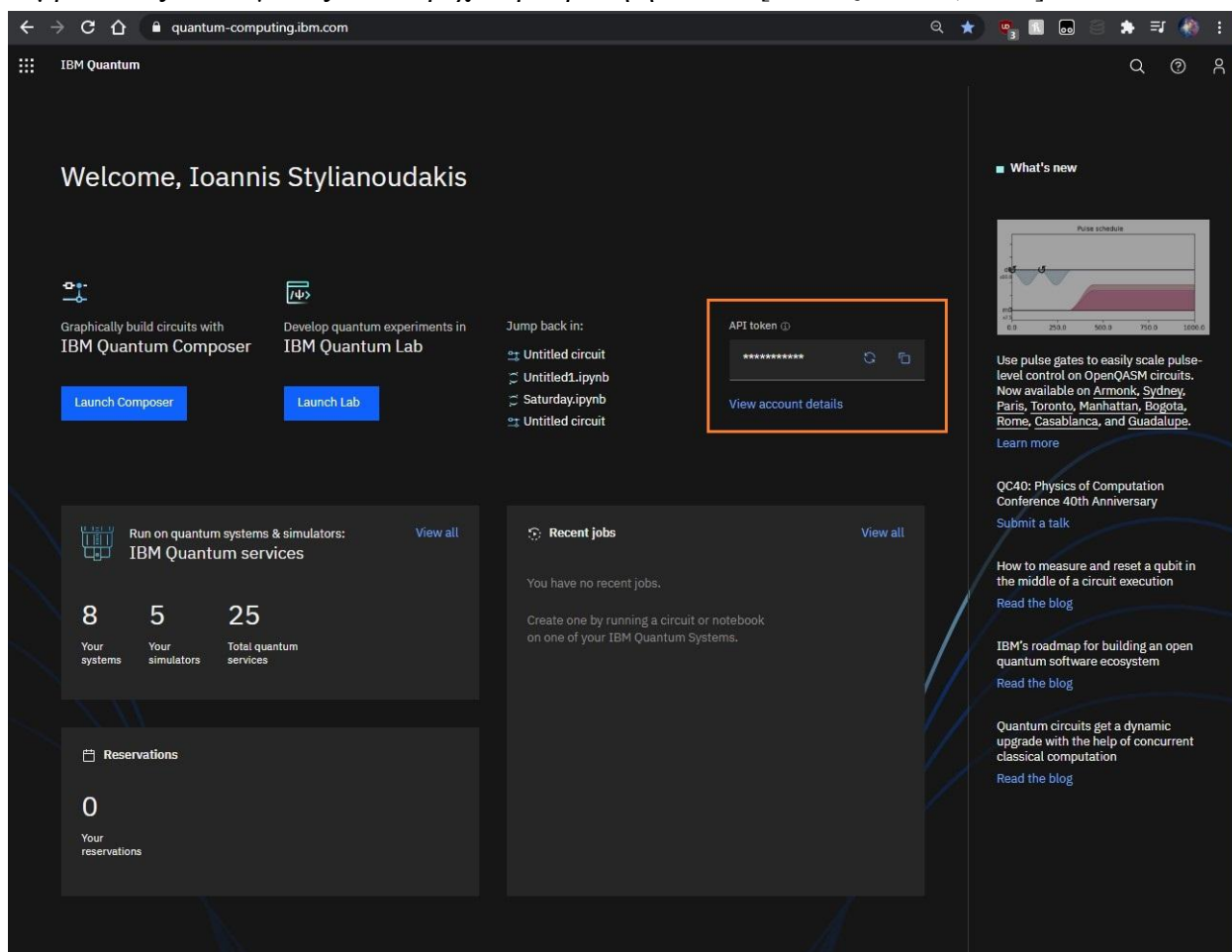
Εικόνα 1.2.6: Έτοιμοι οδηγοί εκμάθησης στο περιβάλλον της “IBM Quantum Experience”

Οι κβαντικοί επεξεργαστές της “IBM” αποτελούνται από υπεραγωγικά “qubits transmon”, που βρίσκονται σε ψυγείο αραιώσεως στα κεντρικά γραφεία της “IBM Research” στο ερευνητικό κέντρο “Thomas J. Watson”. Το μοντέλο κβαντικών κυκλωμάτων υπολογισμού βοηθάει τους χρήστες να αλληλεπιδράσουν με έναν κβαντικό επεξεργαστή. Με την χρήση “Quantum Composer” ή μέσω προγραμματισμού στο “Quantum Lab”, όπως είδαμε και προηγουμένως, μπορούν να δημιουργηθούν ποικίλα κυκλώματα, τα οποία δημιουργούνται μέσα από το “Qiskit” και μπορούν να μεταγλωττιστούν στο “OpenQASM” ώστε να εκτελεστούν σε αληθινά κβαντικά συστήματα.



Εικόνα 1.2.7: Το περιβάλλον “Quantum Composer” της “IBM Quantum Experience”

Παρέχεται ακόμα η δυνατότητα στους χρήστες που προτιμάνε να εκτελούν τον κώδικα τους τοπικά στον υπολογιστή τους, να δημιουργήσουν έναν λογαριασμό στο “IBM Quantum Experience” και να χρησιμοποιήσουν ένα τόκεν “API Token” που δίνει η “IBM” σε όλους τους λογαριασμούς στο “Quantum Experience” και να το συνδέσουν με εκεί που εκτελούν τοπικά τον κώδικα τους ώστε να τρέξει απευθείας ο κώδικας από τα μηχανήματα των χρηστών στους μη συμβατικούς υπολογιστές που παρέχει πρόσβαση η “IBM” [IBM Quantum, 2021].



Εικόνα 1.2.8: Που βρίσκεται το κλειδί “API” στη σελίδα της “IBM Quantum Experience”

1.2.1 Ιστορική αναδρομή του “IBM Quantum Experience”

Σήμερα, οι πραγματικοί κβαντικοί επεξεργαστές χρησιμοποιούνται από ερευνητές από όλο τον κόσμο για να δοκιμάσουν αλγόριθμους για εφαρμογές σε διάφορους τομείς. Αλλά πριν από λίγες δεκαετίες, η κβαντική πληροφορική ήταν ένα καθαρά θεωρητικό θέμα. Όλα ξεκίνησαν το 1927 με την αρχή της αβεβαιότητας. Ο Γερμανός φυσικός Βέρνερ Χάιζενμπεργκ εισάγει την αρχή της αβεβαιότητας, η οποία ισχυρίζεται ότι δεν μπορούμε να γνωρίζουμε τα πάντα για ένα κβαντικό σωματίδιο ταυτόχρονα. Όσα περισσότερα γνωρίζουμε για τη θέση του, τόσα λιγότερα γνωρίζουμε για την ορμή του και το αντίστροφο.

Μερικές δεκαετίες αργότερα, το 1970 ξεκινάει η γέννηση της κβαντικής πληροφορίας. Οι σημειώσεις που ελήφθησαν από τις συζητήσεις μεταξύ του Στίβεν Βίσνερ και του Τσαρλς Μπενέτ (που ήταν τότε απόφοιτος φοιτητής στο Χάρβαρντ) περιέχουν ποια μπορεί να είναι η πρώτη χρήση της φράσης, θεωρία κβαντικής πληροφορίας, και η πρώτη πρόταση για τη χρήση της διεμπλοκής ως πόρος επικοινωνίας. Οι σημειώσεις περιγράφουν επίσης την αρχή της κωδικοποίησης της υπερ-πυκνότητας, που τελικά δημοσιεύθηκε το 1992 από τους Βίσνερ και Μπενέτ.

Το 1981, κατά τη διάρκεια ενός συνεδρίου που φιλοξένησε το “MIT” και η “IBM”, ο νικητής του βραβείου Νόμπελ Ρίτσαρντ Φίλιπς Φάινμαν προκαλεί μια ομάδα επιστημόνων υπολογιστών να αναπτύξει μια νέα φυλή υπολογιστών βασισμένη στην κβαντική φυσική. Πάνω από 35 χρόνια αργότερα, οι επιστήμονες σε όλο τον κόσμο πλησιάζουν όλο και περισσότερο στην εκπλήρωση αυτής της πρόκλησης.

Ο αλγόριθμος του “Shor”, που τον εφτιαξε ο Πίτερ Σορ του “MIT”, το 1994 τάραξε τα νερά και έδειξε ότι είναι δυνατόν να αποδόσει αποτελεσματικά έναν αριθμός ως προς τους πρώτους του αριθμούς σε έναν κβαντικό υπολογιστή - ένα πρόβλημα που για να λυθεί από τους κλασικούς υπολογιστές απαιτεί, εκθετικά μεγάλο χρονικό διάστημα, για μεγάλους αριθμούς. Ο αλγόριθμος του ξεκινά μια έκρηξη θεωρητικού και πειραματικού ενδιαφέροντος στον τομέα της κβαντικής πληροφορικής.

Λίγο αργότερα, το 1995, από διάφορες ομάδες σε όλο τον κόσμο, συμπεριλαμβανομένης και της “IBM”, προκύπτει η κβαντική διόρθωση σφαλμάτων. Η θεωρία δείχνει ότι είναι δυνατή η χρήση ενός έξυπνου πλεονασμού για την προστασία από τον περιβαλλοντικό θόρυβο, καθιστώντας τη φυσική πραγματοποίηση του κβαντικού υπολογισμού σημαντικά πιο υλοποιήσιμη.

Δεν άργησαν να έρθουν και τα κριτήρια “DiVincenzo”. Το 1996, ο ερευνητής της “IBM” Ντέιβιντ Ντίβεντσο (“David DiVincenzo”) περιγράφει τις πέντε ελάχιστες απαιτήσεις για τη δημιουργία ενός κβαντικού υπολογιστή:

- (1) μια καλά καθορισμένη επεκτάσιμη συστοιχία “qubit”
- (2) ικανότητα να αρχικοποιηθεί η κατάσταση των qubits σε μια απλή βασική κατάσταση
- (3) ένα καθολικό σύνολο κβαντικών πυλών

- (4) μεγάλοι χρόνοι συνοχής, πολύ μεγαλύτεροι από τον χρόνο λειτουργίας πύλης
- (5) μέτρηση ενός “qubit”

Οι τοπολογικοί κωδικοί (“surface code”) πρωτοσυσζητήθηκαν το 1997. Ο πρώτος τοπολογικός κωδικός διόρθωσης κβαντικών σφαλμάτων, γνωστός ως “surface code”, προτείνεται από τον καθηγητή Αλεξέι Κιτάεβ (Alexei Kitaev) του Ινστιτούτου Τεχνολογίας της Καλιφόρνια. Ο “surface code” θεωρείται σήμερα η πιο ελπιδοφόρα πλατφόρμα για την πραγματοποίηση ενός κλιμακούμενου, ανθεκτικού σε σφάλματα κβαντικού υπολογιστή.

Τέσσερα χρόνια αργότερα, το 2001, ο αλγόριθμος του “Shor” παρουσιάζεται για πρώτη φορά σε ένα πραγματικό πείραμα κβαντικών υπολογιστών, αν και με πολύ κοινό πρόβλημα: $15 = 3 \times 5$. Το σύστημα “IBM” χρησιμοποίησε “qubit” σε “nuclear spins”, παρόμοια με ένα μηχανήμα μαγνητικού τομογράφου.

Το 2004, Ο Ρομπερτ Σόελκοφ (“Robert Schoelkopf”) και οι συνεργάτες του στο Πανεπιστήμιο “Yale” εφευρίσκουν το κύκλωμα “QED”, ένα μέσο για την μελέτης της αλληλεπίδρασης ενός φωτονίου και ενός τεχνητού κβαντικού αντικειμένου σε ένα τσιπ. Η δουλειά τους καθιέρωσε το πρότυπο για τη σύζευξη και την ανάγνωση των υπεραγωγών “qubits” καθώς τα συστήματα συνεχίζουν να κλιμακώνονται.

Τρία χρόνια αργότερα, το 2007, ο Σόελκοφ και οι συνεργάτες του επινοούν έναν τύπο υπεραγωγού “qubit” (“Transmon Superconducting Qubit”) που έχει σχεδιαστεί για να έχει μειωμένη ευαισθησία στη φόρτιση του θορύβου, ένα σημαντικό εμπόδιο για τη μεγάλη συνοχή. Το υπεραγωγίμο “qubit” έχει υιοθετηθεί από πολλές υπεραγωγικές κβαντικές ομάδες, συμπεριλαμβανομένης της “IBM”.

Το 2012 βελτιώνονται αρκετές σημαντικές παράμετροι για την επεξεργασία κβαντικών πληροφοριών με “qubits transmon”. Η “IBM” επεκτείνει τον χρόνο συνοχής, δηλαδή τη διάρκεια που ένα “qubit” διατηρεί την κβαντική του κατάσταση, έως και 100 μικροδευτερόλεπτα.

Ενώ το 2015, η κβαντική ομάδα της “IBM” εκτελεί ένα πείραμα που δείχνει τον μικρότερο, σχεδόν κβαντικό κωδικό ανίχνευσης σφαλμάτων. Με μια κβαντική κατάσταση σταθεροποιημένη, είναι δυνατόν να εντοπιστούν και οι δύο τύποι κβαντικών σφαλμάτων: “bit-flips” και “phase-flip”. Ο κώδικας υλοποιείται σε διάταξη δικτυωτού πλέγματος “four-qubit”, η οποία χρησιμεύει ως δομικό στοιχείο για μελλοντικά κβαντικά υπολογιστικά συστήματα.

Το 2016, οι επιστήμονες της “IBM” κατασκευάζουν την “IBM Quantum Experience”, μια πρώτη στο είδος της, πλατφόρμα κβαντικών υπολογιστών που παραδίδεται μέσω του “IBM Cloud Services” και είναι προσβάσιμη από επιτραπέζιες ή κινητές συσκευές. Η συγκεκριμένη διαδικτυακή διεπαφή επιτρέπει στους χρήστες της να εκτελούν πειράματα στον κβαντικό επεξεργαστή της “IBM”, να δουλεύουν με μεμονωμένα “qubits” και να διερευνούν σεμινάρια και προσομοιώσεις για τις θαυμάσιες δυνατότητες του κβαντικού υπολογισμού. Η δημοσίευση νέων πρωτοκόλλων στην κβαντική επεξεργασία πληροφοριών έρχεται ως αποτέλεσμα από την χρησιμοποίηση του προαναφερθέντος συστήματος. Η υπηρεσία κυκλοφόρησε με έναν κβαντικό

επεξεργαστή πέντε “qubit” και αντίστοιχο προσομοιωτή συνδεδεμένο σε σχήμα αστεριού. Στις αρχικές εκδοχές, οι αλληλεπίδραση των χρηστών με την εφαρμογή αφορούσε αποκλειστικά το υλικό μέσω του κβαντικού συνθέτη “GUI”. Οι πύλες δύο “qubit” που διατίθενται στο υλικό έθεταν το όριο στα κβαντικά κυκλώματα [Devitt, 2019] [Alsina, 2016] [IBM, 2021]. Το φόρουμ κοινότητας “IBM Quantum Experience” δημιουργήθηκε τον Ιούλιο του 2016 από την “IBM” και στη συνέχεια αντικαταστάθηκε από το “Slack”.

Το “IBM Quantum Experience” υπέστη αρκετές τροποποιήσεις και συνεχίζει να λαμβάνει στο πέρασμα του χρόνου. Πιο συγκεκριμένα, κάποιες από τις αλλαγές ήταν ότι αυξήσαν το σύνολο των αλληλεπιδράσεων που προσφέρεται στον κβαντικό επεξεργαστή από δύο “qubit” σε πέντε “qubit”, επιπλέον σε προσαρμοσμένες τοπολογίες ο προσομοιωτής επεκτάθηκε έως και είκοσι “qubit” επιτρέποντας στους χρήστες να αλληλεπιδράσουν με τη συσκευή και τον προσομοιωτή χρησιμοποιώντας κώδικα κβαντικής γλώσσας συναρμολόγησης. Αυτές ήταν κάποιες από τις αλλαγές που πραγματοποίησε “IBM” τον Ιανουάριο του 2017 [IBM History, 2020].

Τον Μάρτιο του 2017, λαμβάνει χώρα η έναρξη του “IBM Quantum”. Ειδικότερα, παρουσιάζεται η πρώτη βιομηχανική πρωτοβουλία για τη δημιουργία διαθέσιμων στο εμπόριο καθολικών συστημάτων κβαντικών υπολογιστών. Τα κβαντικά συστήματα “IBM” θα σχεδιαστούν για την αντιμετώπιση προβλημάτων που



Εικόνα 1.2.1.1: Το εμβλημα της “Qiskit”

θεωρούνται σήμερα πολύ περίπλοκα και πειραματικά στη φύση για τον κλασικό υπολογισμό. Ο στόχος είναι να αποδειχθεί η βιωσιμότητα του κβαντικού υπολογισμού και η χρησιμότητά του σε όλες τις βιομηχανίες. Για την απλούστερη γραφή και εκτέλεση πειραμάτων στον κβαντικό επεξεργαστή και προσομοιωτή, η “IBM” κυκλοφόρησε το “Qiskit”. Ένας οδηγός χρήσης για άτομα με χαμηλές γνώσεις επί του θέματος προστέθηκε από την “IBM” [IBM Developer, 2021]. Ένας “16-qubit” επεξεργαστής προστεθηκε στην υπηρεσία της “IBM Quantum” τον Μάιο του 2017 [IBM Quantum Computing, 2021].

Μερικούς μήνες αργότερα, τον Σεπτέμβριο του 2017, τολμήθηκε η προσομοίωση της Κβαντικής Χημείας. Οι επιστήμονες της “IBM” πρωτοστάτησαν σε μια νέα προσέγγιση για την προσομοίωση της χημείας σε έναν κβαντικό υπολογιστή. Ήταν σε θέση να προσομοιώσουν το μεγαλύτερο μόριο έως σήμερα - “Beryllium” υδρίδιο (BeH_2) - σε έναν κβαντικό επεξεργαστή της “IBM”. Τα αποτελέσματα δημοσιεύθηκαν στο εξώφυλλο της Φύσης.

Μερικές εβδομάδες έπειτα, τον Οκτώβριο του 2017 σπάστηκε το φράγμα της προσομοίωσης, παράλληλα οι επιστήμονες αποδεικνύουν ένα πλεονέκτημα της κβαντικής υπολογιστικής σε σχέση με την κλασική. Στις 19 Οκτωβρίου, η “Science” δημοσίευσε το, “Κβαντικό πλεονέκτημα με ρηχά κυκλώματα” (“Quantum Advantage with Shallow Circuits”) - ένα σημαντικό μαθηματικό αποτέλεσμα - μια φόρμουλα - που θα καθοδηγήσει την ανάπτυξη

μελλοντικών κβαντικών αλγορίθμων. Είναι ένα σταθερό και απαραίτητο τούβλο στη βάση της κβαντικής πληροφορικής. Ο τύπος ξεχωρίζει επειδή σε αντίθεση με τον αλγόριθμο του “Shor”, αποδεικνύει ότι ένας κβαντικός υπολογιστής μπορεί πάντα να λύσει ορισμένα προβλήματα σε έναν καθορισμένο αριθμό βημάτων, ανεξάρτητα από την αυξημένη είσοδο. Ενώ αυτά τα ίδια προβλήματα, σε έναν κλασικό υπολογιστή, απαιτούν αυξημένο αριθμό βημάτων καθώς αυξάνεται η είσοδος.

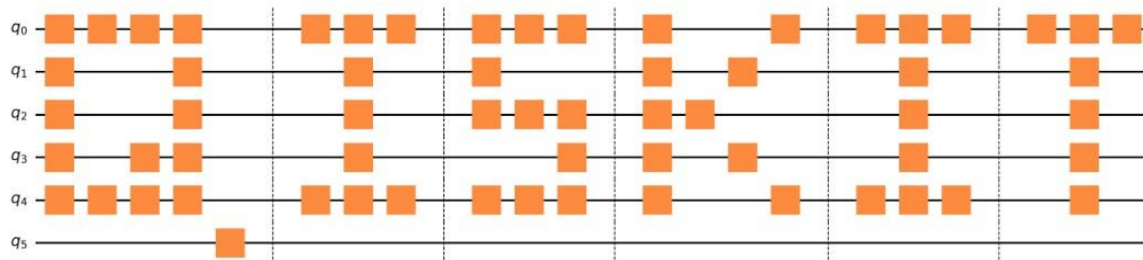
Η “IBM Quantum Experience” ξεκίνησε και πρωτο φιλοξένησε ένα πρόγραμμα κβαντικών βραβείων, το οποίο έλαβε μέρος τον Ιανουάριο του 2018 [IBM Stuff, 2018]. Την ίδια περίοδο εκτελέστηκαν συλλογικά περισσότερα από 3 εκατομμύρια πειράματα από τους πάνω από 80.000 χρήστες του “IBM Quantum Experience”, αναφέρει η “IBM” [Welser, 2018]. Τον Μάιο του 2019 πραγματοποιήθηκε μια μεγάλη αναθεώρηση της υπηρεσίας, συμπεριλαμβανομένης της προσθήκης σημειωματάρων “Jupyter” που φιλοξενούνται από τον Ιστό και της ενσωμάτωσης με το διαδικτυακό και διαδραστικό εγχειρίδιο “Qiskit” [Chow, 2021].

Για να καταστήσει τους κβαντικούς υπολογιστές πιο αξιόπιστους και σταθερούς, η “IBM Quantum” το 2019 σχεδίασε και δημιούργησε το πρώτο ολοκληρωμένο σύστημα κβαντικών υπολογιστών στον κόσμο για εμπορική χρήση: “IBM Q System One”. Το “IBM Q System One” επιτρέπει στους καθολικούς κατά προσέγγιση υπεραγωγούς κβαντικούς υπολογιστές να λειτουργούν πέρα από τα όρια του ερευνητικού εργαστηρίου για πρώτη φορά.

Μετά από έναν επανασχεδιασμό, τον Μάρτιο του 2021, έγινε η μεγαλύτερη διάκριση μεταξύ του συνθέτη “GUI” και των “notebooks” του “Jupyter”. Το όνομα “IBM Quantum Experience” αποσύρθηκε υπέρ των ξεχωριστών ονομάτων “IBM Quantum Composer” και “IBM Quantum Lab” [Gambetta, 2021].

Απο την χρονολογία που δημιουργήθηκε η συγκεκριμένη υπηρεσία της “IBM”, πολλές ακαδημαϊκές εργασίες έχουν δημοσιευτεί από ερευνητές που έχουν πραγματοποιήσει πειράματα χρησιμοποιώντας την υπηρεσία [IBM QX papers, 2021] [Rundle, 2017] [Moran, 2016] [Huffman, 2017] [Deffner, 2016] [Huang, 2016] [Wootton, 2017] [Fedortchenko, 2016] [Berta, 2016] [Li, 2016] [Hebenstreit, 2017] [Alsina, 2016] [Linke, 2017] [Devitt, 2016] [Steiger, 2018] [Santos, 2017] [Caicedo-Ortiz, 2017]. Ακόμα, έχουν ενσωματώσει παραδείγματα και πειράματα με βάση την υπηρεσία της “IBM Quantum” σε εκπαιδευτικά προγράμματα καθηγητών πανεπιστημίου [Sheldon, 2016]. Η υπηρεσία της “IBM Quantum” χρησιμοποιήθηκε από την δρ. Κριστίν Κορμπέτ Μόραν (Christine Corbett Moran) ενώ έκανε έρευνα στην Ανταρκτική. Η δρ. Κριστίν Κορμπέτ Μόραν είναι μεταδιδασκτορικός συνεργάτης στο Ινστιτούτο Τεχνολογίας της Καλιφόρνιας [Nay, 2016]. Επίσης, η Τάρα Τόσιτς (Tara Tosis), φοιτήτρια φυσικής στο Ομοσπονδιακό Ινστιτούτο Τεχνολογίας στη Λωζάνη (“École Polytechnique Fédérale de Lausanne”) ή αλλιώς “EPFL”, χρησιμοποίησε την υπηρεσία “IBM Quantum” ενώ έκανε έρευνα στην Αρκτική [Tosis, 2018]. Η υπηρεσία της “IBM Quantum” έχει χρησιμοποιηθεί από αρκετούς χρήστες για διάφορους μη ακαδημαϊκούς σκοπούς. Ένα παράδειγμα είναι η αναπτυξη ενός παιχνιδιού με τίτλο “κβαντικά θωρηκτά”, ενώ ο ίδιος χρήστης έχει δημιουργήσει αρκετά ακόμα παιχνίδια. [Wootton, 2017] [James, 2017].

1.3 Τι είναι το “Qiskit”



Εικόνα 1.3.1: Το όνομα “QISKIT” ζωγραφισμένο με “qubits”. [Qiski photo]

Το “Qiskit” είναι μια “open source” βιβλιοθήκη για την υλοποίηση προγραμμάτων και κυκλωμάτων σε κβαντικούς υπολογιστές ή σε προσομοιωτές σε έναν τοπικό υπολογιστή. Ιδρύθηκε από την “IBM Research”, τον Μάρτιο του 2017, για να επιτρέψει την ανάπτυξη λογισμικού για την υπηρεσία “IBM Quantum Experience” η οποία δεν έχει σταματήσει να συνεισφέρει για την ανάπτυξη του πρότζεκτ [Magee, 2018] [Hemsoth, 2018]. Παράλληλα όμως βοηθάνε και εξωτερικοί υποστηρικτές, συνήθως ακαδημαϊκά ιδρύματα αλλά και ομάδες ατόμων μέσω σελιδών όπως το “github” [Github Qiskit, 2021] [Wille, 2019].

Με την χρήση της συγκεκριμένης βιβλιοθήκης, επιταχύνεται η ανάπτυξη κβαντικών εφαρμογών παρέχοντας το πλήρες σύνολο εργαλείων που απαιτούνται για την αλληλεπίδραση με κβαντικά συστήματα και προσομοιωτές. Ακολουθεί το μοντέλο κυκλώματος για καθολικό κβαντικό υπολογισμό και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για οποιοδήποτε κβαντικό υλικό που ακολουθεί το μοντέλο που υποστηρίζει επί του παρόντος υπεραγωγικά “qubits” και παγιδευμένα ιόντα [Javadi-Abhari, 2019].

Η κύρια έκδοση του “Qiskit” χρησιμοποιεί τη γλώσσα προγραμματισμού “Python”. Εκδόσεις για “Swift” [Github Qiskit Swift, 2021] και “JavaScript” [Github Qiskit JS, 2021] εξερευνήθηκαν αρχικά, αν και η ανάπτυξη για αυτές τις εκδόσεις έχει πια σταματήσει. Αντ’ αυτού, διατίθεται μια ελάχιστη εκ νέου εφαρμογή βασικών χαρακτηριστικών ως “MicroQiskit” [Github MicroQiskit, 2021], η οποία είναι εύκολο να μεταφερθεί σε εναλλακτικές πλατφόρμες.

Μια σειρά από “Jupyter notebooks” παρέχονται με παραδείγματα κβαντικών υπολογισμών που χρησιμοποιούνται [Github Qiskit-tutorials, 2021]. Τα παραδείγματα περιλαμβάνουν τον πηγαίο κώδικα πίσω από επιστημονικές μελέτες που χρησιμοποιούν το “Qiskit” [IBM Editorial, 2018], καθώς και ένα σύνολο ασκήσεων για να βοηθήσουν τους ανθρώπους να μάθουν τα βασικά του κβαντικού προγραμματισμού. Ένα βιβλίο ανοιχτού κώδικα κβαντικών αλγορίθμων βασισμένο στο “Qiskit” είναι διαθέσιμο σε δυσκολία πανεπιστημιακού επιπέδου ενώ μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως συμπλήρωμα μαθημάτων για μαθήματα πάνω στον κβαντικό υπολογισμό [Qiskit Learn, 2021]. Επίσης, παρέχει πρόσβαση σε πολύ χρήσιμα κυκλώματα όπου υπάρχει η δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν σαν εργαλεία, για να

πραγματοποιηθούν δοκιμές, να δημιουργηθούν πιο σύνθετα κυκλώματα ή απλά να βελτιωθούν οι γνώσεις των ενδιαφερόμενων στον κβαντικό υπολογισμό. Επιπροσθέτως, παρέχεται η δυνατότητα να δημιουργηθούν καινούργιες βιβλιοθήκες που θα έχουν ως βάση υπάρχουσες βιβλιοθήκες. Με την βοήθεια του “Qiskit” μπορεί κάποιος να μελετήσει και να μειώσει την επίδραση των θορύβων χρησιμοποιώντας ενσωματωμένες μονάδες για τον χαρακτηρισμό θορύβου και την βελτιστοποίηση κυκλωμάτων. Δίνεται ακόμα η δυνατότητα εκτέλεσης κώδικα σε συστήματα διαφόρων αρχιτεκτονικών από “superconducting qubits” μέχρι και “trapped-ions”. Όπως έχει προαναφερθεί, αποκτώντας πρόσβαση στο δωρεάν, ψηφιακό βιβλίο του “Qiskit”, έννοιες της κβαντικής πληροφορικής απλοποιούνται και γίνονται πιο εύκολα προσβάσιμες για μελέτη. Τα συγκεκριμένα εργαλεία μπορούν να χρησιμοποιηθούν εφόσον έχει εγκατασταθεί το “Qiskit” τοπικά σε κάποιο μηχάνημα, είτε να χρησιμοποιηθεί με την βοήθεια κάποιου περιβάλλοντος στο cloud που ενσωματώνει το “Jupyter Notebooks” όπως το “IBM Quantum Lab” [Qiskit page, 2021].

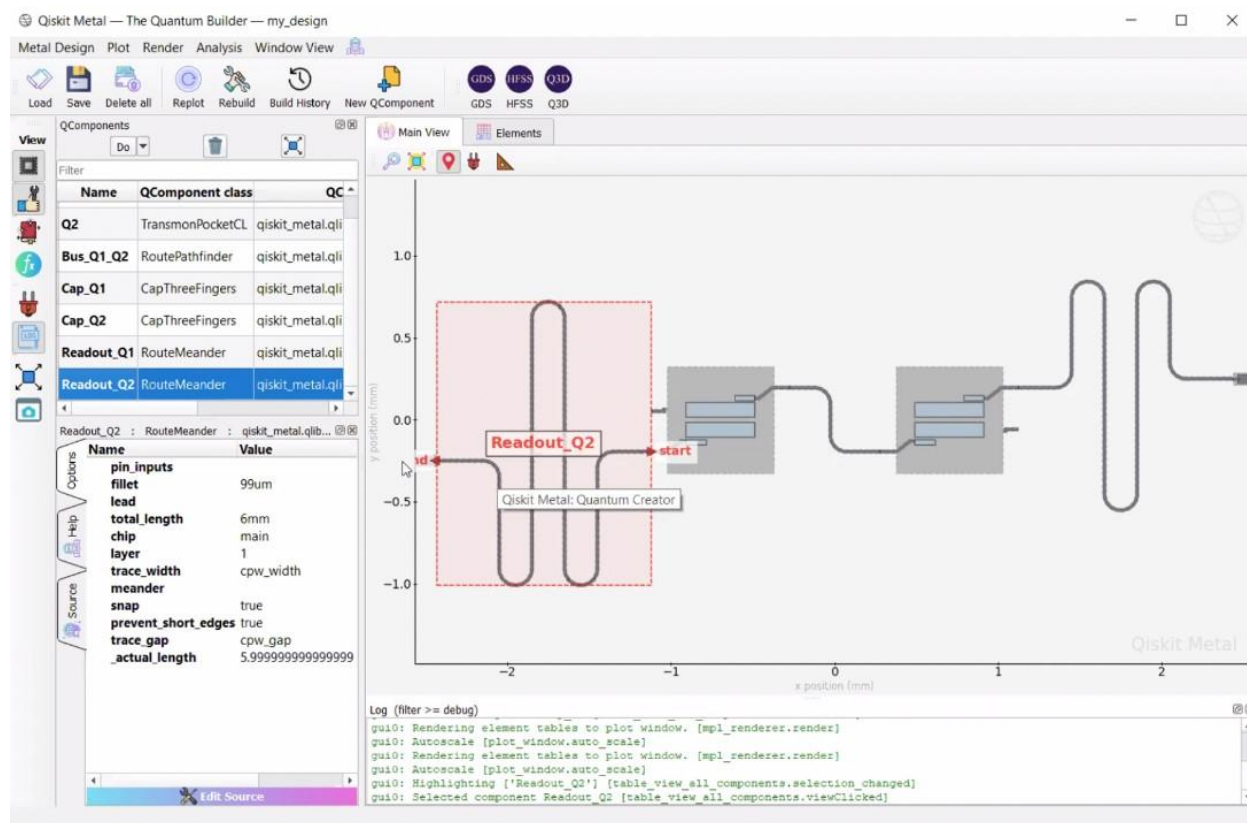
Αξίζει να αναφερθεί, ότι το “Qiskit” προσπαθεί να κάνει πραγματικότητα ένα νέο κεφάλαιο το “Qiskit Metal” που βρίσκεται ακόμα στα αρχικά στάδια. Ο σκοπός τους είναι να μπορούν να σχεδιάζουν “superconducting quantum devices” από την αρχή μέχρι το τέλος. [Qiskit-Metal page, 2021]. Ο σχεδιασμός και η προσομοίωση μιας κβαντικής συσκευής υπήρξε εδώ και πολύ καιρό, μια διεργασία πολλών βημάτων που απαιτεί πολύ χρόνο και βασίζεται στην διάδοση σε πολλές αποσυνδεδεμένες σουίτες λογισμικού. Ελπίζεται ότι το “Qiskit Metal” θα φέρει επανάσταση σε αυτήν τη διαδικασία. Το “Qiskit Metal” είναι το πρώτο εργαλείο αυτοματισμού ηλεκτρονικής σχεδίασης (“EDA”) ειδικά για κβαντικούς υπολογιστές, με σκοπό να βοηθήσει την κοινότητα να καινοτομήσει και να σχεδιάσει υπεραγωγικές κβαντικές συσκευές με ευκολία και σύμφωνα με τις δικές τους προδιαγραφές χρησιμοποιώντας είτε προκατασκευασμένα είτε προσαρμοσμένα εξαρτήματα. Πιστεύεται ότι το “Qiskit Metal” θα είναι απαραίτητο για ερευνητές που εργάζονται για τη βελτίωση των “qubits” και των ζευξεων ή για την ανάπτυξη νέας, δημιουργικής κβαντικής τεχνολογίας. Ελπίζουμε ότι το “Qiskit Metal” μπορεί επίσης να είναι ένα χρήσιμο εκπαιδευτικό εργαλείο για όσους θέλουν να κατανοήσουν καλύτερα το κβαντικό υλικό.

Η διαδικασία σχεδιασμού του “Qiskit Metal” ξεκινά με μια ιδέα, τις επιθυμητές παραμέτρους για μια συγκεκριμένη συσκευή Hamiltonian, που είναι ο χειριστής που περιγράφει την ενέργεια και τις κβαντικές του ιδιότητες. Για παράδειγμα, οι χρήστες μπορούν να δημιουργήσουν μια συσκευή με συγκεκριμένη συχνότητα “qubit” ή ζεύξη “qubit-qubit”. Υποθέτουν σε μια πρώτη διάταξη, μια διαδικασία που διαρκεί μόνο λίγα λεπτά στο “Qiskit Metal” χάρη στη βιβλιοθήκη των συστατικών της. Στη συνέχεια, το “Metal” εκτελεί μια αυτόματη κλασική ανάλυση για τον προσδιορισμό των ηλεκτρομαγνητικών ιδιοτήτων της συσκευής και, στη συνέχεια, μια κβαντική ανάλυση για την επιστροφή των πληροφοριών, όπως το ενεργειακό φάσμα της συσκευής. Ο χρήστης μπορεί στη συνέχεια να συγκρίνει το αποτέλεσμα της κβαντικής ανάλυσης με τον στόχο “Hamiltonian” και να τροποποιήσει ανάλογα με τις ανάγκες.

Ένα επιθυμητό αποτέλεσμα, είναι να γίνει η καμπύλη εκμάθησης του “Metal” εύκολη. Ακόμα και χωρίς ιστορικό τυπικού λογισμικού EDA, ένας νέος χρήστης μπορεί να σχεδιάσει ένα σχέδιο σαν να χτίζει με δομικά παιχνίδια, ενώ ένας έμπειρος χρήστης μπορεί να παράγει προσαρμοσμένα εξαρτήματα για να επινοήσει ένα προηγμένο τσιπ. Η ομάδα αναμένει ότι το “Metal” θα ωριμάσει παράλληλα με το πεδίο της υπεραγώγιμης κβαντικής πληροφορικής συνολικά και θα ενσωματώνει συνεχώς τις μελλοντικές κβαντικές εξελίξεις υλικού και μοντελοποίησης [Mineev, 2021].

Η παραγωγή κβαντικών μαρκών ήταν λίγο «χειροτεχνική» διαδικασία, που απαιτεί εβδομάδες και μήνες χειροκίνητου σχεδιασμού, ανάλυσης και αναθεωρήσεων. Χάρης το “Qiskit Metal” επιτυγχάνεται η συνέπεια-συνοχή. Καθώς οι συσκευές αναπτύσσονται σε πολυπλοκότητα και ποικιλία, ελπίζεται ότι το “Qiskit Metal” μπορεί να συμβάλει στην απρόσκοπτη διαδικασία. Με αυτόν τον τρόπο, το Metal μπορεί να βοηθήσει και να ενδυναμώσει τους ανθρώπους να αντιμετωπίσουν κβαντικές προκλήσεις υλικού που θεωρούνται από καιρό ως πολύ περίπλοκες. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι αυτό το λογισμικό εξακολουθεί να βρίσκεται σε πρώιμο στάδιο “alpha phase”. Υπάρχουν ακόμα πολλές δυνατότητες που θα προστεθούν στο μέλλον και σίγουρα το δίκαιο μερίδιο των σφαλμάτων που πρέπει να διορθωθεί [Qiskit Medium, 2021].

Στη συνέχεια, ακολουθεί ένα στιγμιότυπο οθόνης από το “Qiskit Hackathon” από την ομάδα της Κορέας του “Qiskit Metal GUI” που εμφανίζει ένα από τα δύο τσιπ “qubit” που σχεδιάστηκαν από τις ομάδες “hackathon” στο διήμερο γεγονός [Qiskit Medium, 2021].



Εικόνα 1.3.2: Ένα τσιπ “qubit” που έχει σχεδιαστεί στο “Qiskit Metal” [Qiskit Medium, 2021]

Κεφάλαιο 2

2.1 Το στρίψιμο του νομίσματος

Σε αυτό το κεφάλαιο εξετάζεται το στρίψιμο του νομίσματος, ένα από τα πιο κλασικά παιχνίδια στην θεωρία παιγνίων. Σε αυτό το παιχνίδι, όταν εισχωρούν κβαντικές στρατηγικές, παύει να δημιουργείται ανταγωνισμός γιατί είναι ξεκάθαρη η υπεροχή της κβαντικής στρατηγικής έναντι της κλασικής. Κατασκευάζοντας μια συγκεκριμένη κβαντική στρατηγική δίνεται πάντα ανταμοιβή αν παίζεται σε σχέση με οποιαδήποτε κλασική στρατηγική. Το παιχνίδι που περιγράφεται στη συνέχεια προτάθηκε το 1999 από τον Meyer (Meyer, 1999), ωστόσο η περιγραφή του βασίζεται στο βιβλίο του Ιωάννη Καραφυλλίδη (Karafyllidis, 2015).

Στο κβαντικό παιχνίδι, ο Captain Class που είναι κυβερνήτης του διαστημικού σκάφους με το όνομα Classical, αντιμετωπίζει μία αρκετά δύσκολη κατάσταση. Βρίσκεται με το διαστημικό σκάφος του αρκετά μακριά από τη Γη, σχεδόν στην πιο απομακρυσμένη μεριά του γαλαξία. Ο κινητήρας έχει χαλάσει και κανείς στο πλήρωμα δεν έχει τα μέσα να τον επισκευάσει. Ταξιδεύει με τον βοηθητικό κινητήρα του σκάφους αλλά δεν μπορεί να αναπτύξει την επιθυμητή ταχύτητα και έτσι δεν θα προλάβει να ολοκληρώσει την αποστολή του.

Από το πουθενά εμφανίζεται ένα άγνωστο διαστημικό σκάφος. Ο Captain Class παρατηρεί αυτό το άγνωστο σκάφος που έχει το όνομα Quantum γραμμένο στην πλευρά του. Επικοινωνεί αμέσως με αυτό και ζητά βοήθεια. Ο κυβερνήτης του διαστημικού σκάφους Quantum αποκαλείται Quant και είναι μια κβαντική οντότητα. Ο κυβερνήτης Quant προτείνει στον κυβερνήτη Captain Class να συναντηθούν από κοντά και να παίξουν ένα παιχνίδι. Αν ο Captain Class κερδίσει στο παιχνίδι, τότε ο Quant θα επισκευάσει την ζημιά στον κινητήρα χωρίς αντάλλαγμα. Αν όμως ηττηθεί, τότε ο Quant θα παρατήρει αυτόν και το πλήρωμά του στην κοντινότερη βάση, στην πιο απομακρυσμένη μεριά του γαλαξία, και τότε θα φύγει παίρνοντας μαζί του το διαστημικό σκάφος Classical του Captain Class.

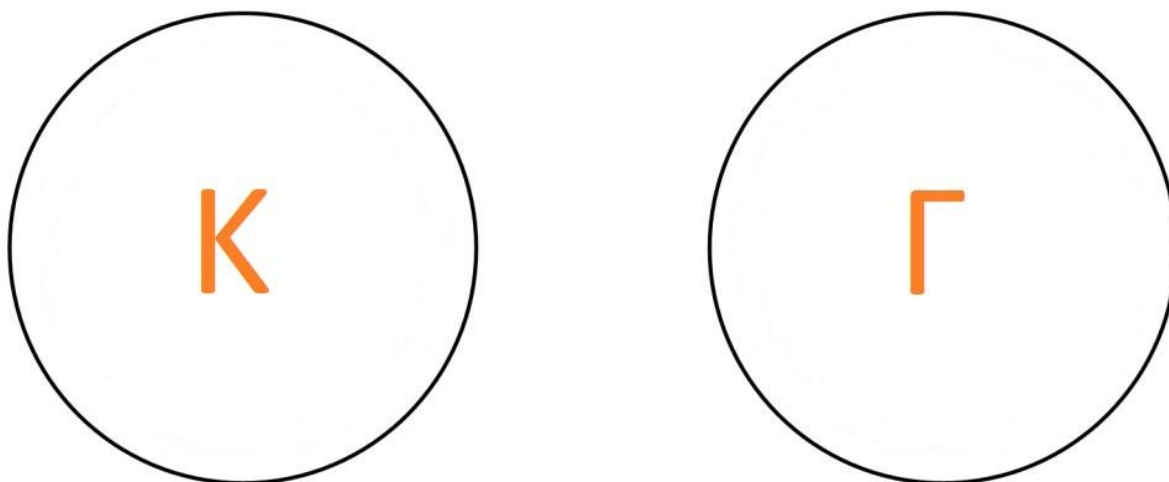
Το παιχνίδι που προτείνει ο Quant να παίξουν με τον Captain Class έχει ως εξής. Αρχικά, ο Quant δίνει στον Captain Class ένα νόμισμα. Το νόμισμα αυτό έχει δύο εντελώς ίδιες πλευρές, μόνο που στη μία πλευρά φαίνεται το γράμμα “Κ” και στην άλλη το γράμμα “Γ”. Είναι εντελώς αδύνατον να ξεχωρίσει κανείς τις πλευρές με την αφή. Έπειτα, ο Quant απομακρύνεται από το δωμάτιο και ο Captain Class τοποθετεί το νόμισμα πάνω σε ένα τραπέζι με όποια από τις δύο πλευρές θέλει προς τα πάνω. Γράφει το γράμμα που φαίνεται στην πάνω πλευρά σε ένα κομμάτι χαρτί, τοποθετεί το χαρτί σε ένα φάκελο, τον σφραγίζει και τον τοποθετεί στην άκρη του τραπεζιού. Στη συνέχεια καλύπτει το νόμισμα με ένα κάλυμμα, που έχει ένα μικρό άνοιγμα από το οποίο αυτός και ο Quant μπορούν να βάλουν το χέρι τους και να δράσουν στο νόμισμα. Το κάλυμμα είναι εντελώς αδιαφανές και κανείς δεν μπορεί να παρατηρήσει το νόμισμα μέσα από αυτό. Στη συνέχεια, ο Quant εισέρχεται στο δωμάτιο, βάζει το χέρι του μέσα στο κάλυμμα και δρα στο νόμισμα. Με την σειρά του ο Captain Class βάζει το χέρι του μέσα στο κάλυμμα και δρα στο νόμισμα. Ο Quant βάζει για δεύτερη φορά το χέρι του μέσα στο κάλυμμα και δρα ξανά

στο νόμισμα και στο τέλος βγάζουν το κάλυμμα για να φανεί το νόμισμα ανοίγοντας τον φάκελο. Το αποτέλεσμα έχει ως εξής, αν το νόμισμα βρεθεί με την αρχική πλευρά προς τα πάνω, ο Quant κερδίζει, αλλιώς κερδίζει ο Captain Class.

Φυσικά, ο Captain Class αρνείται να ποντάρει το διαστημικό σκάφος του σ' αυτό το παιχνίδι. Ο Quant τότε του κάνει την εξής ελκυστική πρόταση, να παίξουν το παιχνίδι επαναλαμβάνοντας το χίλιες φορές και, αν σε μία από αυτές ηττηθεί ο Quant, τότε θα επισκευάσει την ζημιά στον κινητήρα, αν όμως ο Quant κερδίσει και τις χίλιες φορές, τότε ο Captain Class θα χάσει το διαστημικό σκάφος του. Ο Captain Class θεωρεί εξαιρετικά απίθανο να κερδίσει ο Quant χίλιες φορές συνεχόμενα, και δέχεται να παίξει το παιχνίδι. Παίζουν το παιχνίδι συνολικά χίλιες φορές και ο Quant κερδίζει σε όλες. Ο Captain Class χάνει το διαστημικό του σκάφος.

Έπειτα, προς την επιστροφή του στον πλανήτη Γη, ο Captain Class καλείται στο δικαστήριο για να κριθεί για τις αποφάσεις που έλαβε για την θητεία του ως κυβερνήτης στο διαστημικό σκάφος Classical. Οι δικαστικές αρχές αναγνωρίζουν ότι βρέθηκε σε αρκετά δύσκολη κατάσταση και θεωρούν λογική την απόφασή του να ποντάρει το διαστημικό σκάφος του και να παίξει το παιχνίδι. Επειδή όμως το αποτέλεσμα του κόστισε το διαστημικό σκάφος Classical, τον υποβιβάζουν σε κυβερνήτη μεταγωγικού διαστημικού σκάφους. Ο Captain Class αναλαμβάνει να γίνει κυβερνήτης του μεταγωγικού διαστημικού σκάφους Boring. Στις αμέτρητες και κουραστικές ώρες των ταξιδιών του, ο Captain Class προσπαθεί να συνειδητοποιήσει πώς έχασε το διαστημικό σκάφος του από τον Quant.

Υποθέτοντας ότι υπάρχει ένα νόμισμα πάνω σε ένα τραπέζι. Το νόμισμα αυτό, όπως και όλα τα άλλα νομίσματα, έχει δύο όψεις. Οι δύο αυτές όψεις είναι εντελώς παρόμοιες, μόνο που στη μία διακρίνεται το γράμμα "Κ" και στην άλλη πλευρά το γράμμα "Γ".



Εικόνα 2.1.1: Ένα νόμισμα με τις 2 πλευρές του, κορώνα και γράμματα.

Οι δύο όψεις του νομίσματος φαίνονται στο προηγούμενο σχήμα. Όλες οι άλλες ιδιότητες του νομίσματος, όπως το χρώμα, η πυκνότητά του ή το βάρος του, είναι παντελώς αδιάφορες. Σημασία έχει μόνο εάν η πάνω πλευρά του είναι αυτή με το γράμμα “Γ” ή αυτή με το γράμμα “Κ”. Ένα καθημερινό νόμισμα, όπως αυτά που κάνει συναλλαγές ο οποιοσδήποτε καθημερινά, αποκαλείται κλασικό νόμισμα. Ένα κλασικό νόμισμα μπορεί να βρεθεί ή στην μεριά με το γράμμα “Κ” ή στην μεριά με το γράμμα “Γ” στην πάνω πλευρά του και τότε λέγεται ότι το νόμισμα βρίσκεται στην κατάσταση “Κ” ή στην κατάσταση “Γ”.

Εικάζουμε ακόμα, ότι για κάποιο λόγο δεν γίνεται να δούμε σε ποια πλευρά βρίσκονται τα νομίσματα, κβαντικά ή κλασικά, είτε αυτά βρίσκονται στην κατάσταση “Κ” ή είτε στην κατάσταση “Γ”. Για να γίνει αντιληπτό σε ποιά από τις δυο πλευρές βρίσκονται τα νομίσματα, εικάζεται ότι υπάρχει μία συσκευή μέτρησης. Με τη βοήθεια της συσκευής αυτής υπολογίζεται η κατάσταση του νομίσματος και, αν διαβαστεί στην οθόνη της συσκευής το γράμμα “Κ”, τότε ξέρουμε ότι το νόμισμα βρίσκεται στην κατάσταση “Κ”, αν διαβάσουμε το γράμμα “Γ”, τότε ξέρουμε ότι το νόμισμα βρίσκεται στην κατάσταση “Κ”.

Ένα κλασικό νόμισμα και ένα κβαντικό νόμισμα πέφτουν πάνω στο ίδιο τραπέζι. Δεν υπολογίζονται ακόμη οι καταστάσεις τους. Το κλασικό νόμισμα μπορεί να βρεθεί ή στην κατάσταση “Κ” ή στην κατάσταση “Γ”. Είναι όμως αδύνατο να πούμε το ίδιο και για το κβαντικό νόμισμα. Η κατάσταση που βρίσκεται το κβαντικό νόμισμα περιγράφεται από το διάλυμα κατάστασης.

Στη συνέχεια, εξηγείται πως νίκησε ο Quant. Αρχικά, ο Captain Class τοποθετεί το νόμισμα στο τραπέζι από την πλευρά που έχει το γράμμα “Γ” να κοιτάει προς τα πάνω. Ο Captain Class γράφει το γράμμα “Γ” σε ένα χαρτί, όπου μετά το τοποθετεί σε ένα φάκελο, όπου έπειτα σφραγίζει τον φάκελο και τον τοποθετεί στην άκρη του τραπεζιού καλύπτοντας το νόμισμα. Το επόμενο βήμα είναι ο ερχομός του Quant στο δωμάτιο, όπου και τοποθετεί το χέρι του μέσα από το κάλυμμα για να δράσει στο νόμισμα. Ο Quant είναι μια κβαντική οντότητα και με τη δράση του φέρνει το νόμισμα σε υπέρθεση καταστάσεων. Εν συνεχεία, ο Captain Class τοποθετεί το χέρι του μέσα στο κάλυμμα και δρα στο νόμισμα. Ο Captain Class μπορεί να δράσει με δύο μόνο τρόπους. Μπορεί να αφήσει το νόμισμα στην κατάσταση που βρίσκεται ή να το γυρίσει. Ο Captain Class επιλέγει να γυρίσει το νόμισμα. Έπειτα, ο Quant τοποθετεί για δεύτερη φορά το χέρι του μέσα στο κάλυμμα, για να δράσει στο νόμισμα. Αυτή τη φορά, επιλέγει να γυρίσει το νόμισμα. Τέλος, βγάζουν το κάλυμμα, ανοίγουν το φάκελο και βρίσκουν το νόμισμα με την αρχική πλευρά προς τα πάνω. Ως αποτέλεσμα ο Captain Class είναι και ο ηττημένος του παιχνιδιού.

Συγκεντρωτικά, όλοι οι υπολογισμοί των κινήσεων διαμορφώνουν την εξής εξίσωση:

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Εικόνα 2.1.2 η εξίσωση του παιχνιδιού

Στην εξίσωση, οι πίνακες που αναπαριστούν τις κινήσεις των παικτών κατά τη διάρκεια του παιχνιδιού εμφανίζονται στην εξίσωση χρονικά, με τη σειρά που εφαρμόστηκαν σαν στρατηγικές.

Αναλυτικά τώρα, θα εξηγήσουμε τι αναπαριστούν οι επιμέρους όροι της παραπάνω εξίσωσης.

“Αρχικά, ο Captain Class τοποθετεί το νόμισμα στο τραπέζι από την πλευρά που έχει το γράμμα “Γ” να κοιτάει προς τα πάνω.” Η κατάσταση του νομίσματος δίνεται από τον πίνακα στην εξίσωση που ακολουθεί και συγκεκριμένα στο κομμάτι αριστερά απο το ίσον:

$$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Ο μοναδιαίος πίνακας που εμφανίζεται παραπάνω συμβολίζει την πρώτη κίνηση του παιχνιδιού η οποία είναι και η πρώτη κίνηση του Captain Class.

Στη συνέχεια, “...είναι ο ερχομός του Quant στο δωμάτιο, όπου και τοποθετεί το χέρι του μέσα από το κάλυμμα για να δράσει στο νόμισμα. Ο Quant είναι μια κβαντική οντότητα και με τη δράση του φέρνει το νόμισμα σε υπέρθεση καταστάσεων.” Αυτή είναι και η μόνη κίνηση που κάνει ο Quant στο παιχνίδι, να επιλέξει δηλαδή να χρησιμοποιεί σαν στρατηγική την πύλη “Hadamard” κατά τη διάρκεια του παιχνιδιού. Στην εικόνα βλέπουμε την πύλη “Hadamard” όπου ακριβώς επειδή έχει αυτή την μορφή επιτρέπει να γυρίσει το νόμισμα στην αρχική του κατάσταση.

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

Μετά, ξαναπαίζει ο Captain Class. “Εν συνεχεία, ο Captain Class τοποθετεί το χέρι του μέσα στο κάλυμμα και δρα στο νόμισμα. Ο Captain Class μπορεί να δράσει με δύο μόνο τρόπους. Μπορεί να αφήσει το νόμισμα στην κατάσταση που βρίσκεται ή να το γυρίσει. Ο Captain Class επιλέγει να γυρίσει το νόμισμα.” Ο πίνακας με τις κινήσεις συγκεντρωτικά του Captain Class παρουσιάζεται ως εξής και αποτελεί την πλήρη στρατηγική του Captain Class στο παιχνίδι:

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

“Επειτα, ο Quant τοποθετεί για δεύτερη φορά το χέρι του μέσα στο κάλυμμα, για να δράσει στο νόμισμα. Αυτή τη φορά, επιλέγει να γυρίσει το νόμισμα.” Ουσιαστικά η μια πύλη “Hadamard” αναιρεί τις κινήσεις που έχουν γίνει ενδιάμεσα με την άλλη “Hadamard” πύλη. Οπότε επιστρέφουμε στην αρχική κατάσταση αγνοώντας τις ενδιάμεσες καταστάσεις που έχει κάνει ο Captain Class.

Μέχρι στιγμής, εξετάστηκε μόνο η περίπτωση του ενός γύρου. Οι παίκτες αλληλεπιδρούν μεταξύ τους για να καταλήξουν σε ένα αποτέλεσμα του παιχνιδιού. Στη συνέχεια θα παρουσιαστεί το παιχνίδι αλλά με την προσθήκη γύρων. Δηλαδή, το παιχνίδι καταλήγει σε αρκετά αποτελέσματα, για τα οποία οι παίκτες έχουν γνώση στο τέλος κάθε γύρου, έτσι ώστε να μπορούν να προσαρμόσουν τη στρατηγική που θα ακολουθήσουν στην πορεία του παιχνιδιού.

2.1.1 Το στρίψιμο του νομίσματος σε πολλούς γύρους

Προσθέτοντας στο παιχνίδι που περιγράψαμε προηγουμένως έναν επιπλέον γύρο, ο Captain Class τοποθετεί αρχικά το νόμισμα στο τραπέζι με την πλευρά που έχει το γράμμα “H” προς τα επάνω. Αυτή τη φορά όμως δεν στρίβει το νόμισμα, αλλά επιλέγει να αφήσει το νόμισμα όπως είναι. Ο Quant επιλέγει πάλι να εφαρμόσει την ίδια πύλη. Οπότε η εξίσωση πλέον παίρνει τη μορφή:

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Εικόνα 2.1.3: Η εξίσωση για περισσότερες κινήσεις

Ο Quant κερδίζει και πάλι. Το ίδιο θα συνέβαινε ακόμα και αν ο Captain Class τοποθετούσε το νόμισμα με το γράμμα T στην πάνω πλευρά, ανεξάρτητα από την στρατηγική που θα επιλέξει δηλαδή στο παιχνίδι. Ο Quant πάντα κερδίζει επιλέγοντας την ίδια δράση άσχετα με το τι θα κάνει ο Captain Class.

2.2 Το στρίψιμο δύο νομισμάτων ταυτόχρονα

Στην προηγούμενη ενότητα είδαμε το στρίψιμο του νομίσματος για ένα κέρμα. Αν αυξήσουμε τα νομίσματα σε αυτό το παιχνίδι αυξάνεται και η πολυπλοκότητα και αλλάζουν οι πιθανότητες για τα επιθυμητά αποτελέσματα. Όταν στρίβουμε λοιπόν δύο κέρματα ταυτόχρονα προκύπτουν τέσσερις πιθανές καταστάσεις. Φαίνονται σαν τρεις ωστόσο η πιθανότητα να έρθει μια από αυτές τις καταστάσεις είναι $\frac{1}{4}$. Τα πιθανά αποτελέσματα λοιπόν είναι είτε να φέρουμε δύο κορώνες είτε δύο γράμματα είτε μια κορώνα και μια γράμματα. Ισχύει και πάλι ότι τα κέρματα είναι αμερόληπτα και επομένως δεν υπάρχει κίνδυνος απάτης. Παρόλο που φαίνονται ως τρεις καταστάσεις, ουσιαστικά είναι τέσσερις διότι η πιθανότητα να έρθει κορώνα και γράμματα υπάρχει δύο φορές καθώς είναι η περίπτωση το νόμισμα νούμερο ένα να έρθει κορώνα και το νόμισμα νούμερο δύο να έρθει γράμματα και η περίπτωση το νόμισμα νούμερο ένα να έρθει γράμματα και το νόμισμα νούμερο δύο να έρθει κορώνα. Εκτελώντας λοιπόν βήμα βήμα το παιχνίδι, στρίβοντας ταυτόχρονα δηλαδή δύο νομίσματα προκύπτουν τέσσερις δυνατές καταστάσεις όπως προκύπτουν και στον παρακάτω πίνακα.

		K	Γ
	K	KK	KΓ
	Γ	ΓK	ΓΓ

Η κβαντική έκδοση του παιχνιδιού χρησιμοποιείται κατά κόρον στην κβαντική κρυπτογραφία και σε πρωτόκολλα αυτής.

Κεφάλαιο 3

3.1 Οδηγός εγκατάστασης εργαλείων

Εγκατάσταση της “Python” (“Anaconda”) στα “Windows”.

“Σε περίπτωση μικρής απόκλισης στις εικόνες, αυτός ο οδηγός εγκατάστασης δημιουργήθηκε στις 27/1/2021.”

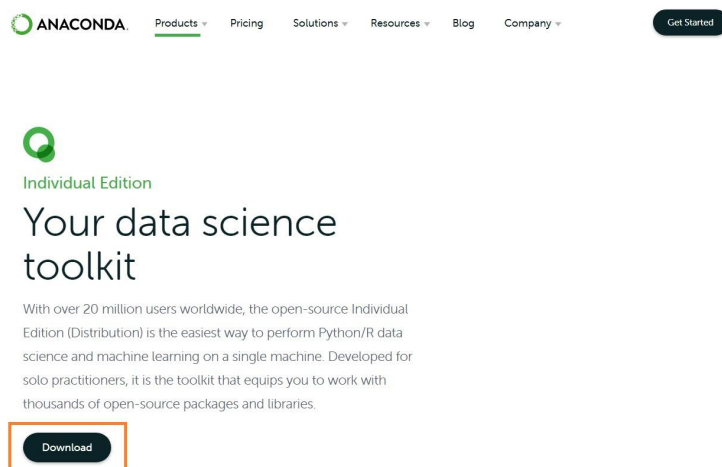
Το “Anaconda” είναι ένας διαχειριστής πακέτων, ένας διαχειριστής περιβάλλοντος και μια διανομή της “Python” που περιέχει πληθώρα απο “open source” βιβλιοθήκες (όπως την “numpy”, την “scikit-learn”, την “scipy”, την “pandas” και άλλες). Το “Anaconda” αφού εγκατασταθεί παρέχει ήδη κάποιες βιβλιοθήκες έτοιμες για να χρησιμοποιηθούν, στην περίπτωση όμως που θέλουμε και άλλες βιβλιοθήκες μπορούμε απλά να χρησιμοποιήσουμε τον διαχειριστή πακέτων, “conda” ή “pip” για να εγκαταστήσουμε τις επιπλέον βιβλιοθήκες. Με αυτό τον τρόπο γλιτώνουμε την ταλαιπωρία που δεν ανακατευόμαστε με τυχόν συσχετίσεις βιβλιοθηκών. Επίσης, το “Anaconda” μας λύνει τα χέρια κάνοντας πολύ εύκολη την εναλλαγή απο “Python 2” σε “Python 3” και το ανάποδο. Επιπλέον, με την εγκατάσταση του “Anaconda” εγκαθιστάται στο σύστημα μας και το “Jupyter Notebooks”.

Στη συνέχεια θα δούμε:

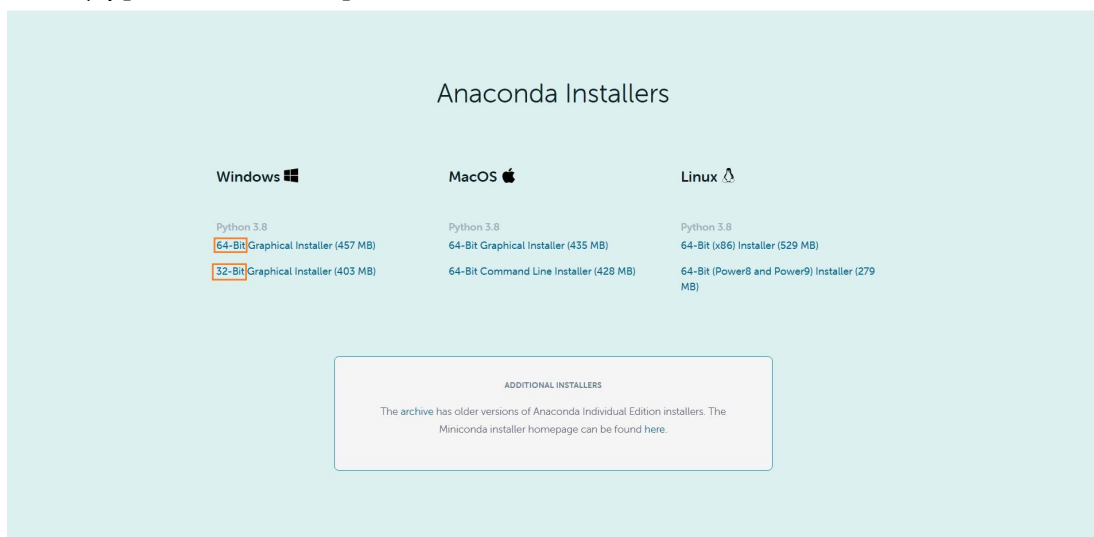
- Πως να εγκαταστήσουμε το Anaconda στα Windows.
- Πως να ελέγξουμε αν έγινε σωστά η εγκατάσταση.
- Πως να εγκαταστήσουμε τις απαραίτητες βιβλιοθήκες του “Qiskit” στο μηχάνημα μας.
- Και πως να ελέγξουμε οτι όλα πήγαν καλά εκτελώντας ένα παράδειγμα κβαντικού προγράμματος

3.1.1 Λήψη και εγκατάσταση του “Anaconda”

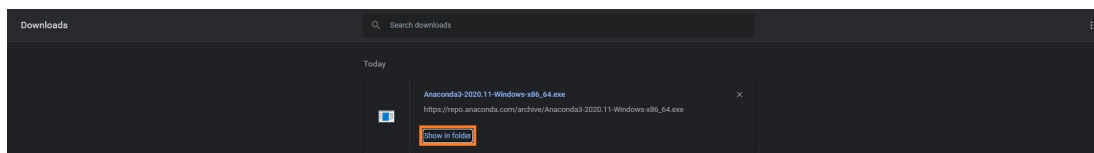
- 1) Πηγαίνουμε στην σελίδα του “Anaconda” και πατάμε το κουμπί “Download” [“https://www.anaconda.com/products/individual#windows”](https://www.anaconda.com/products/individual#windows) [Anaconda, 2021].

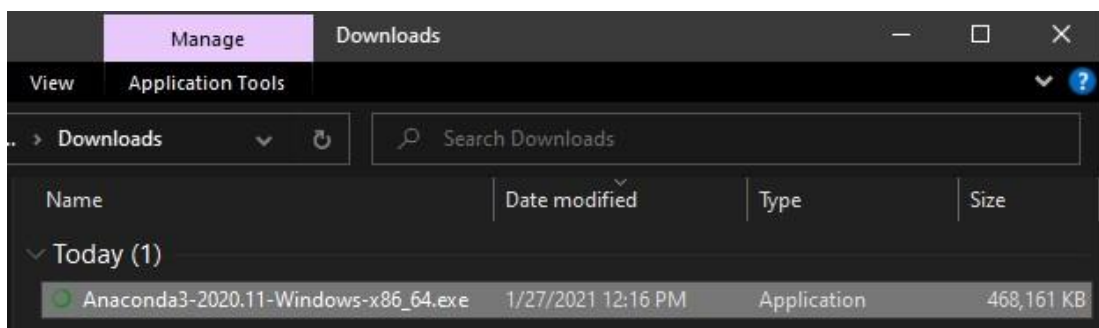


- 2) και ανάλογα με την έκδοση του υπολογιστή που έχουμε (64 bit ή 32 bit) κατεβάζουμε την ανάλογη [Anaconda, 2021].

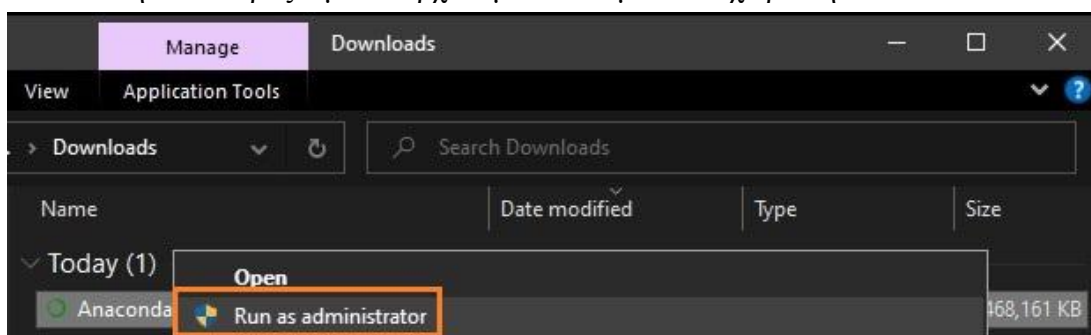


- 3) Βρίσκουμε το αρχείο στον υπολογιστή μας (το πιθανότερο να είναι στις λήψεις, στην περίπτωση που δεν το βρούμε, ανοίγουμε τον περιηγητή “browser” που το κατεβάσαμε, και πηγαίνουμε στο ιστορικό των λήψεων μας πατώντας “CTRL+J”. Έπειτα πατάμε στο “Εμφάνιση σε φάκελο”.

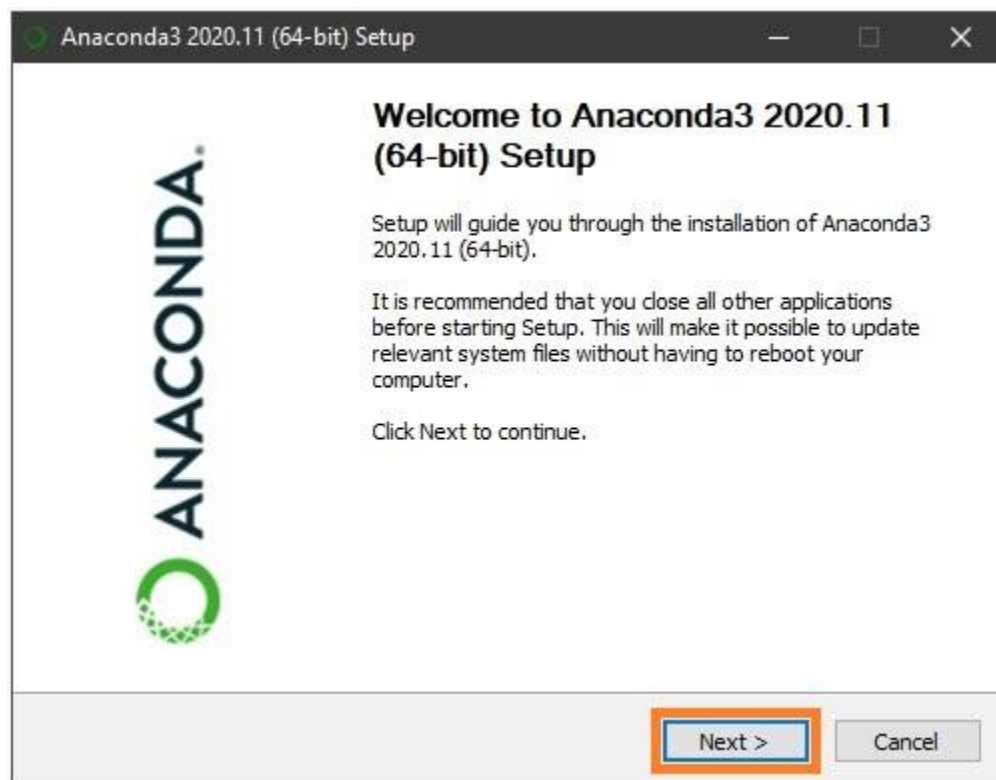




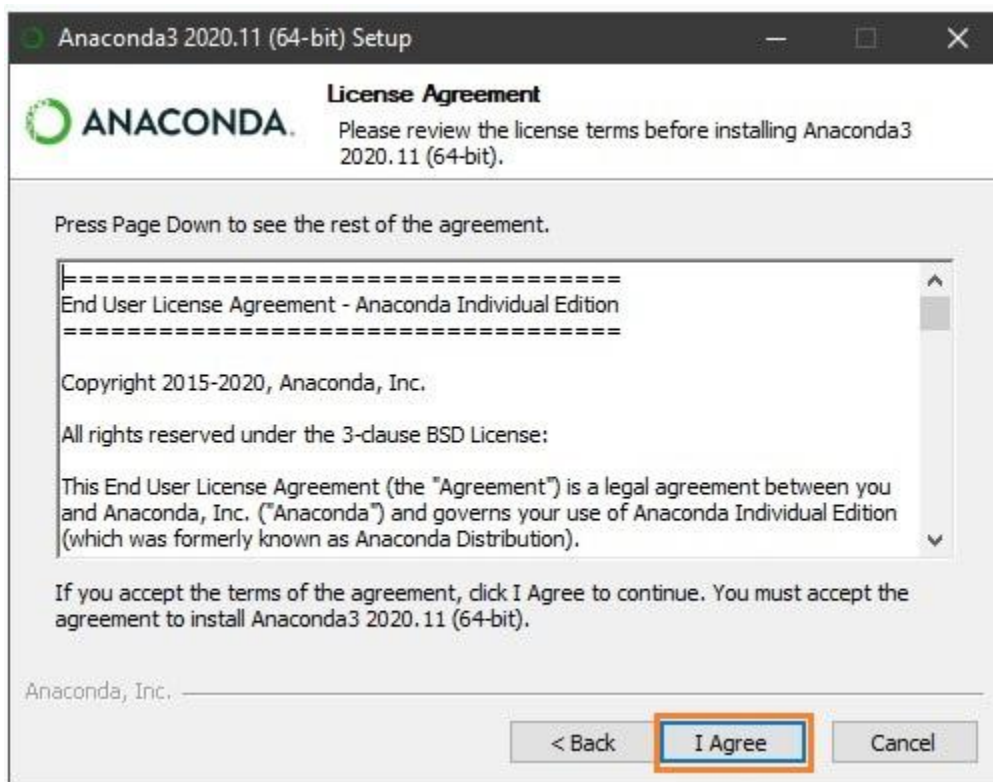
- 4) Καλό θα ήταν να τρέξουμε το αρχείο με δικαιώματα διαχειριστή.



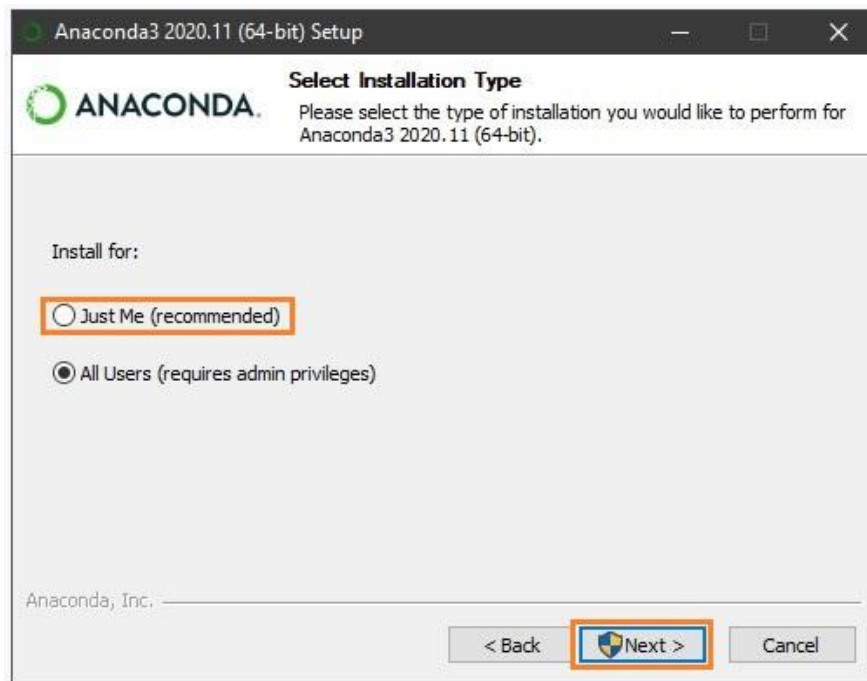
- 5) Αφού δώσουμε δικαιώματα διαχειριστή για να τρέξει το αρχείο, θα εμφανιστεί το παρακάτω παράθυρο, συνεχίζουμε την εγκατάσταση πατώντας "Next".



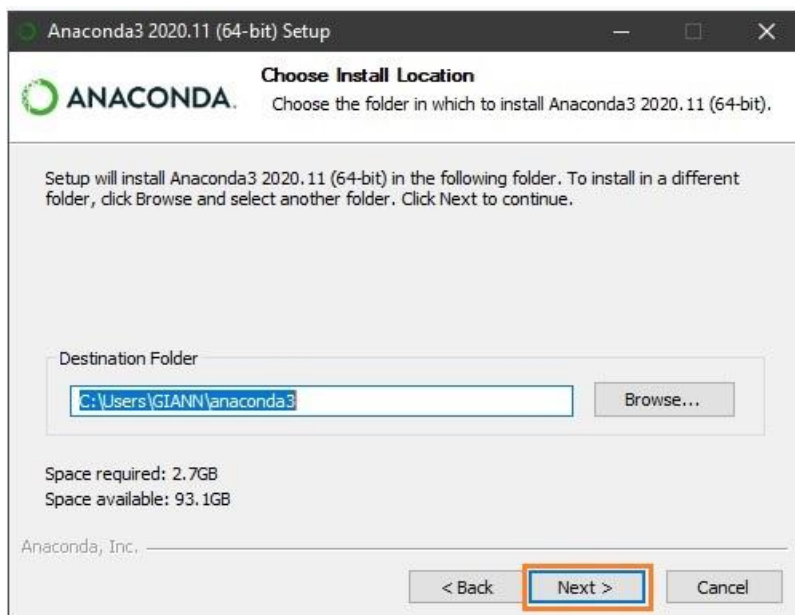
- 6) Στη συνέχεια διαβάζουμε το “License Agreement” και πατάμε “I Agree”



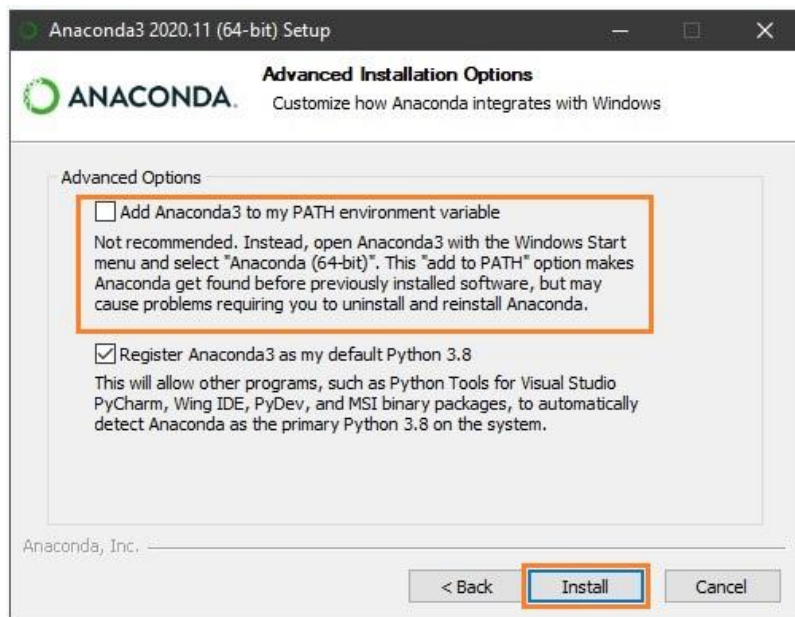
- 7) Επιλέγουμε είτε “Just me” ή “All Users”. Στην περίπτωση που δεν είμαστε σίγουροι επιλέγουμε το “Just me” για να είμαστε σίγουροι και έπειτα πατάμε “Next”.



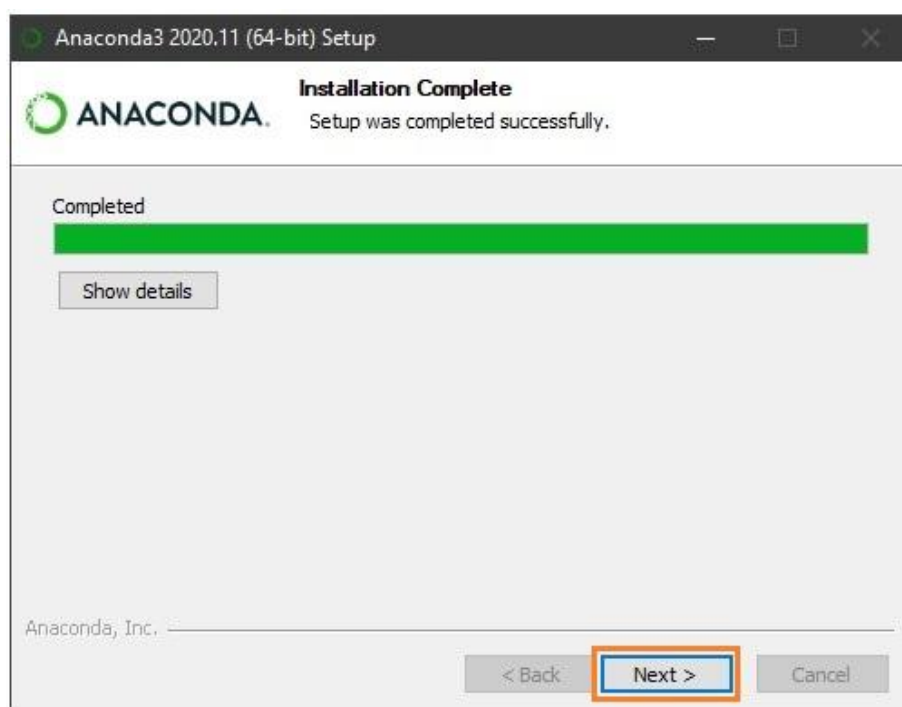
- 8) Συνεχίζουμε με την εγκατάσταση του “Anaconda” πατώντας “Next”



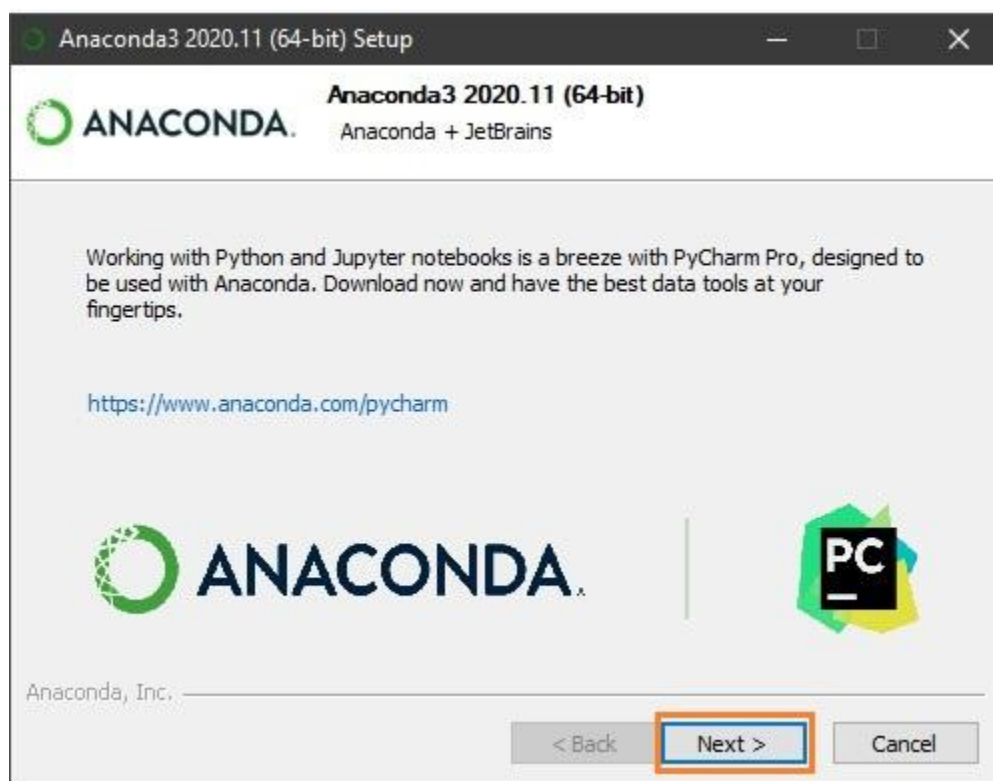
- 9) Σε αυτό το κομμάτι στην διαδικασία της εγκατάστασης, η προτεινόμενη προσέγγιση είναι να μην επιλέξουμε το πλαίσιο (1) “Add Anaconda to my path environment variable”. Με το να μην επιλέξουμε αυτή την ρύθμιση, για να χρησιμοποιήσουμε το “Anaconda”, θα πρέπει να το κάνουμε μέσω του “Anaconda Navigator” ή τη γραμμή εντολών “Anaconda” (η οποία βρίσκεται στο μενού Έναρξη των “windows” στην περιοχή “Anaconda”). (Αν δεν το επιλέξουμε, σε περίπτωση που αλλάξουμε γνώμη μπορούμε αργότερα να το επιλέξουμε). Αλλιώς επιλέγουμε την ρύθμιση αυτή. Έπειτα πατάμε “Install”



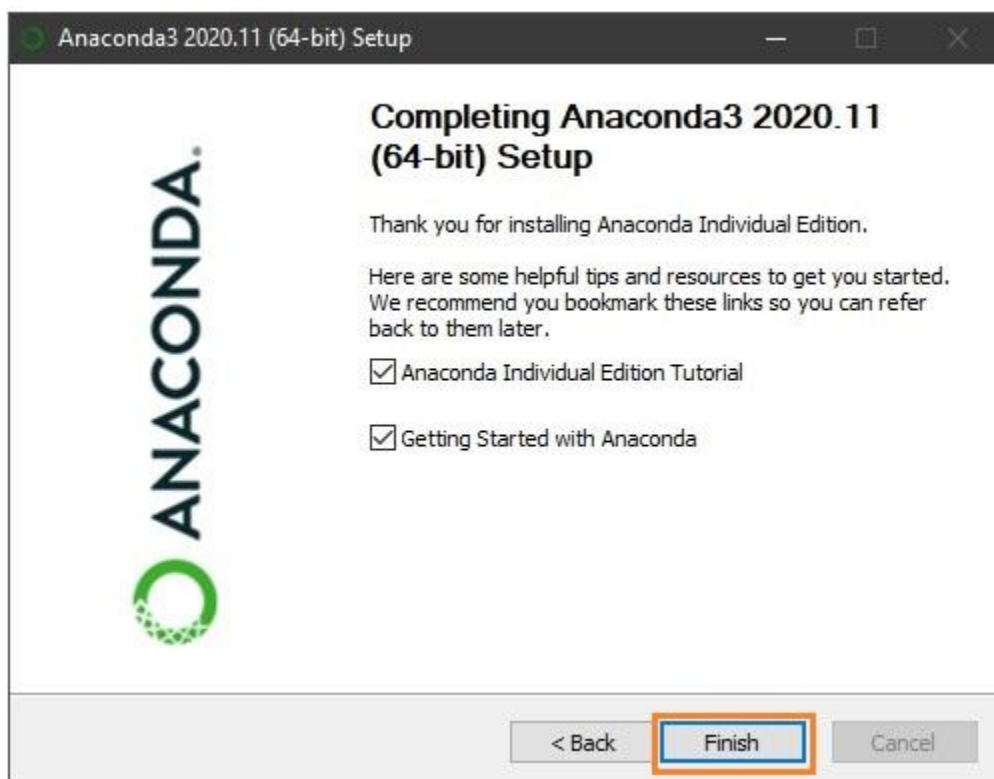
10) Στη συνέχεια αφού ολοκληρωθεί η εγκατάσταση πατάμε “Next”



11) Έπειτα πατάμε πάλι “Next”

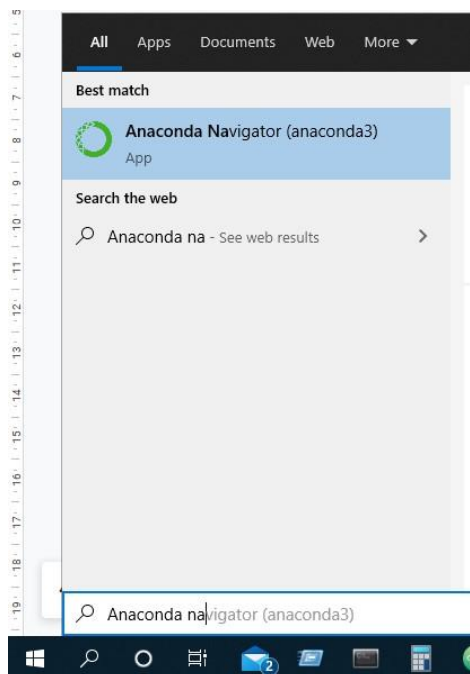


12) Για να ολοκληρώσουμε την εγκατάσταση, συνεχίζουμε πατώντας το κουμπί “Finish”.

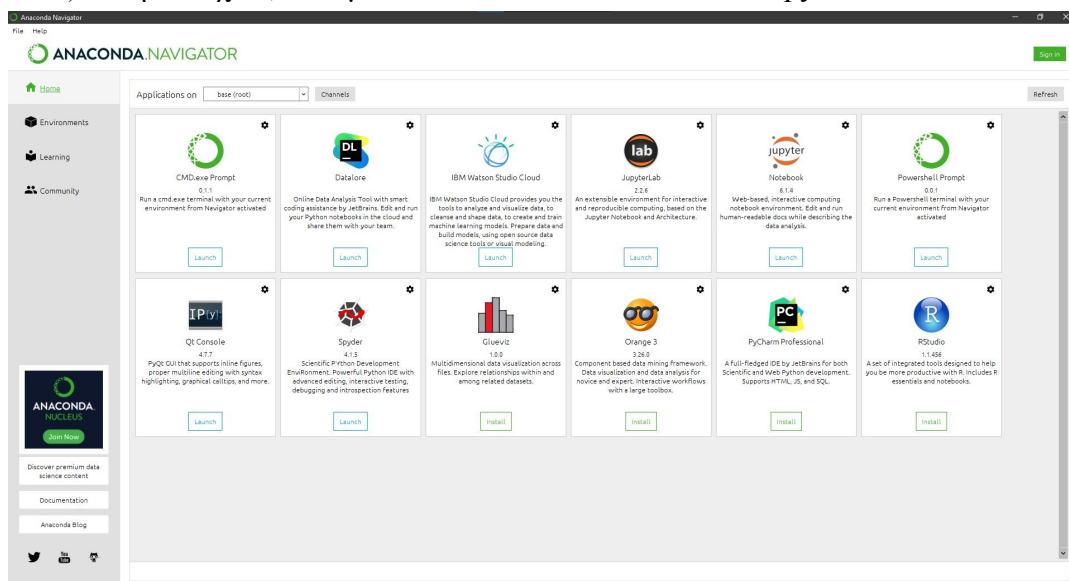


3.1.2 Έλεγχος σωστής εγκατάστασης

- 1) Ένας τρόπος για να ελέγξουμε ότι όλα πήγαν καλά με την εγκατάσταση είναι να ανοίξουμε το “Jupyter Notebook”, μέσω του “Anaconda Navigator”.



- 2) Στη συνέχεια, πατάμε στο “Launch” κάτω από το “Jupyter Notebook”.

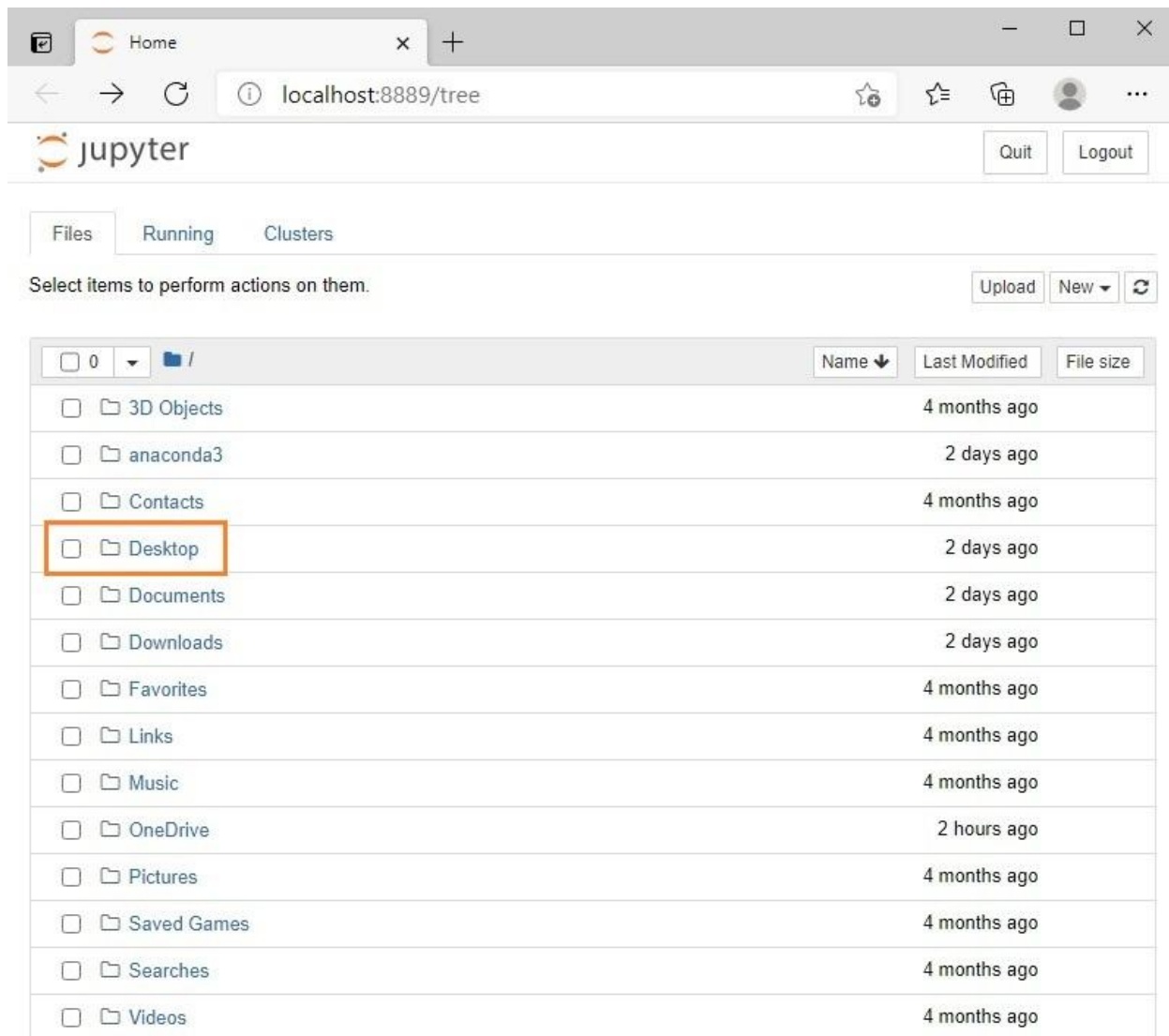


- 3) Αν δεν υπάρχει κάποιο πρόβλημα θα μας ανοίξει το “Jupyter Notebook” στον περιηγητή.

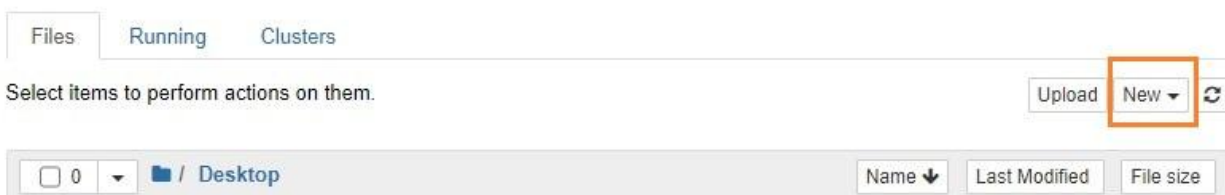
3.1.3 Εγκατάσταση των απαραίτητων βιβλιοθηκών του “Qiskit” σε τοπικό μηχάνημα

Απο την στιγμή που ανοίξουμε το “Jupyter Notebook”, αρχικά, καλο θα ήταν να δημιουργήσουμε ένα φάκελο για να ξέρουμε ακριβώς που βρίσκονται τα αρχεία μας. Στην περίπτωση του συγκεκριμένου “tutorial” για ευκολία, τοποθετούμε τα αρχεία που θα χρησιμοποιήσουμε σε φάκελο στην επιφάνειας εργασίας.

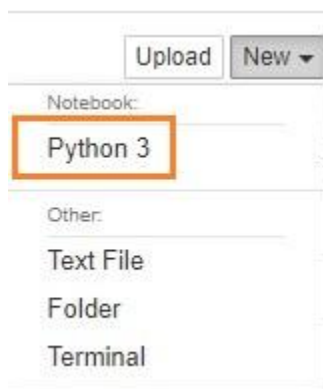
1) Πατάμε λοιπόν να ανοίξουμε τον φάκελο της επιφάνειας εργασίας, “Desktop”



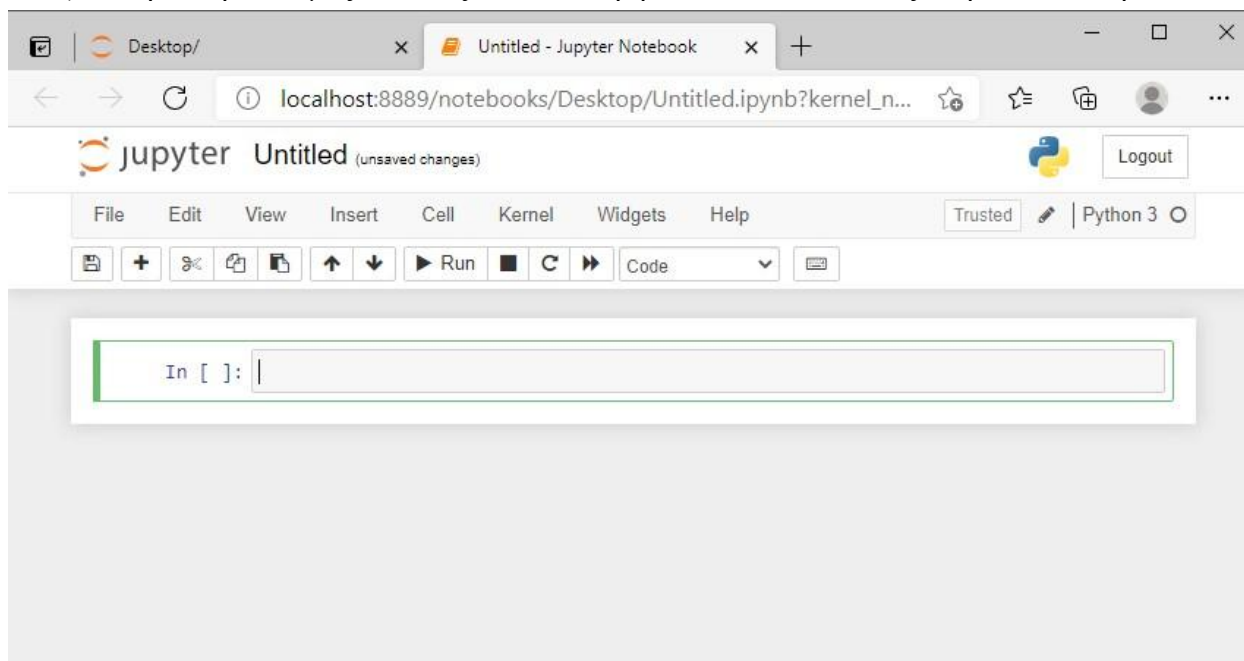
2) Πατάμε στο “New”



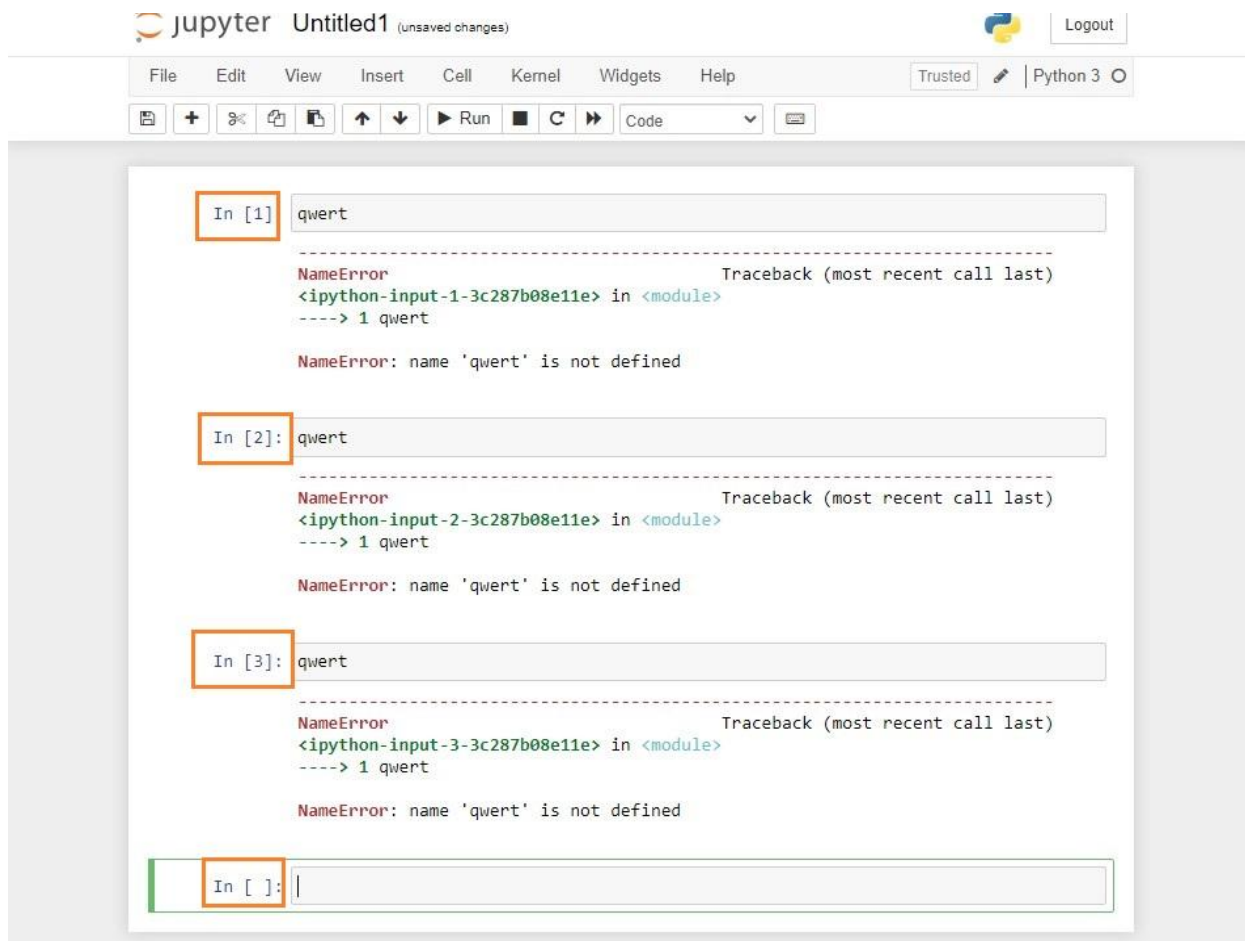
Όπου θα μας εμφανίσει τις επιλογές τις φωτογραφίας. Θα επιλέξουμε το “Python 3” και θα δημιουργήσουμε το πρώτο μας αρχείο.



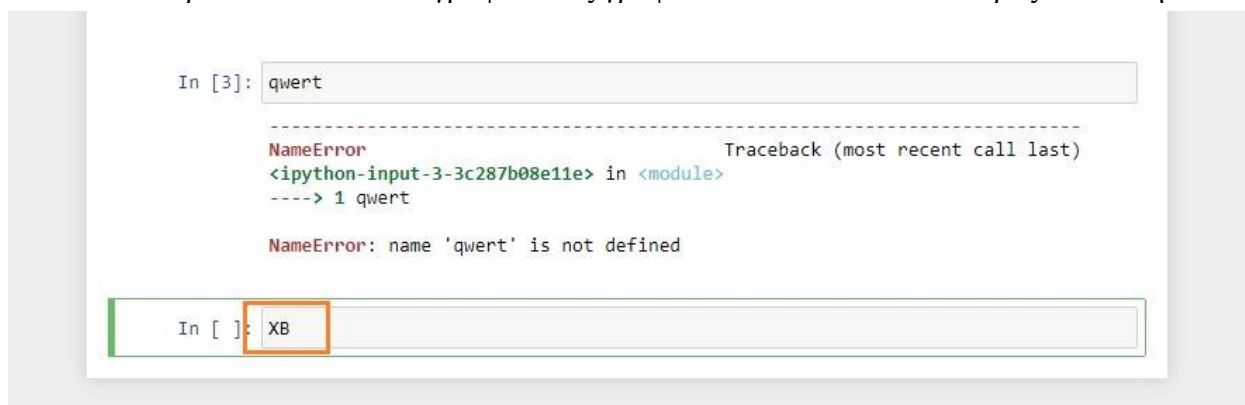
3) Παράλληλα θα μας το ανοίξει και το περιβάλλον θα είναι όπως στην εικόνα παρακάτω.



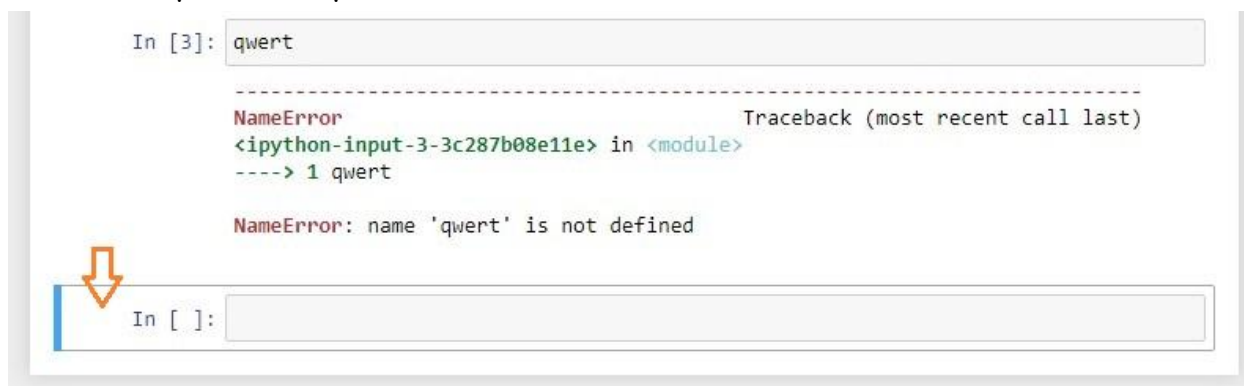
- 4) Στο Jupyter Notebook ο κώδικας εκτελείται σε κομμάτια [brackets] πατώντας τα πλήκτρα “ctrl+Enter”. Για να δημιουργήσουμε ένα νέο bracket πατάμε το πλήκτρο “B” ενώ για να σβήσουμε ένα, πατάμε το πλήκτρο “X”. Επίσης, μας δείχνει και την σειρά που έχει εκτελεστεί κάθε bracket.



- 5) Πρέπει όμως να προσέχουμε, όταν θέλουμε να κάνουμε τις συγκεκριμένες λειτουργίες πρέπει να έχουμε πατήσει στο “bracket” και το χρώμα να είναι μπλε και όχι πράσινο. Αν είναι πράσινο απλα θα το γράψει όπως γράφει τον κώδικα που είναι προς εκτέλεση.



- 6) Για να γίνει μπλε πρέπει να πατήσουμε μέσα στο bracket (μέσα στο πράσινο) αλλά όχι μέσα στην γκρι περιοχή που είναι για τον κώδικα. Ενα ωραίο σημείο είναι αυτό που φαίνεται με το βελάκι στην επόμενη φωτογραφία. Και έπειτα πατάμε το “B” για το καινούργιο μας “bracket”, το πλήκτρο “X” για να σβήσουμε ένα “bracket” ή ότι άλλο θέλουμε να κάνουμε.



```
In [3]: qwert
```

```
NameError                                Traceback (most recent call last)
<ipython-input-3-3c287b08e11e> in <module>
----> 1 qwert

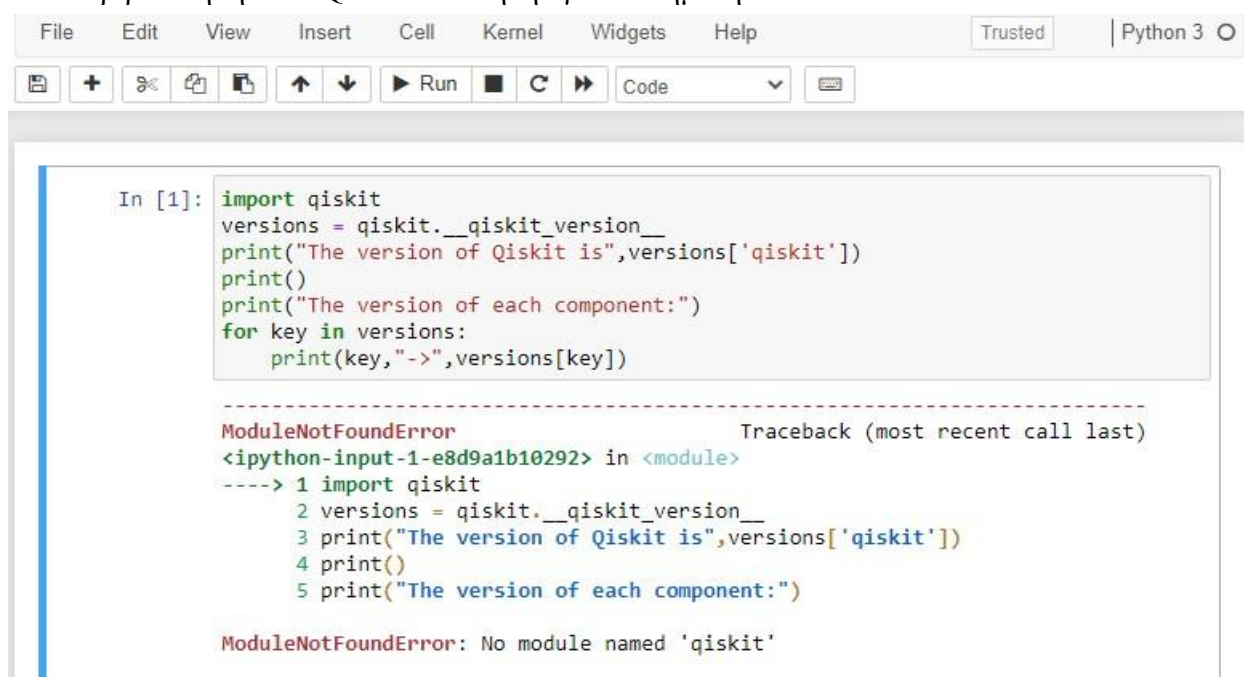
NameError: name 'qwert' is not defined
```

 In []:

- 7) Όταν έχουμε πατήσει να εκτελεστή ο κώδικας και ακόμα δεν έχει βγάλει αριθμό μέσα στο (In[*]:) αυτό σημαίνει ότι ο κώδικας ακόμα εκτελείται. Όταν εκτελεστεί θα μας βγάλει τον αριθμό και τα αποτελέσματα.

```
In [*]:
```

- 8) Σε αυτό το κομμάτι θέλουμε να ελέγξουμε το σύστημα μας, για την περίπτωση που η βιβλιοθήκη του “Qiskit” είναι ήδη εγκατεστημένη σε αυτό.



```
File Edit View Insert Cell Kernel Widgets Help Trusted Python 3
```

```
In [1]: import qiskit
versions = qiskit.__qiskit_version__
print("The version of Qiskit is", versions['qiskit'])
print()
print("The version of each component:")
for key in versions:
    print(key, "->", versions[key])
```

```
ModuleNotFoundError                        Traceback (most recent call last)
<ipython-input-1-e8d9a1b10292> in <module>
----> 1 import qiskit
      2 versions = qiskit.__qiskit_version__
      3 print("The version of Qiskit is", versions['qiskit'])
      4 print()
      5 print("The version of each component:")

ModuleNotFoundError: No module named 'qiskit'
```

- 9) Ο συγκεκριμένος κώδικας θα μας δείξει τον αριθμό της έκδοσης των βιβλιοθηκών που έχουμε εγκατεστημένες στο σύστημα μας (όπως θα δούμε και μερικά βήματα αργότερα). Ενώ στην περίπτωση που το “Qiskit” δεν είναι εγκατεστημένο στο σύστημα μας θα μας δείξει τα σφάλματα όπως προηγούμενη φωτογραφία.

```
import qiskit
versions = qiskit.__qiskit_version__
print("The version of Qiskit is",versions['qiskit'])
print()
print("The version of each component:")
for key in versions:
    print(key,"-",versions[key])
```

ΠΡΟΣΟΧΗ! στην αντιγραφή του κώδικα από το πλαίσιο, προσέχουμε για τυχόν λάθη που μπορεί να συμβούν στην αντιγραφή από αυτό το αρχείο PDF!

- 10) Στην συνέχεια θα εγκαταστήσουμε το Qiskit

```
In [2]: !pip install "qiskit[visualization]" --user

Collecting qiskit[visualization]
  Downloading qiskit-0.25.0.tar.gz (4.5 kB)
Collecting qiskit-terra==0.17.0
  Downloading qiskit_terra-0.17.0-cp38-cp38-win_amd64.whl (5.2 MB)
Collecting qiskit-aer==0.8.0
  Downloading qiskit_aer-0.8.0-cp38-cp38-win_amd64.whl (24.2 MB)
Collecting qiskit-ibmq-provider==0.12.2
  Downloading qiskit_ibmq_provider-0.12.2-py3-none-any.whl (198 kB)
Collecting qiskit-ignis==0.6.0
  Downloading qiskit_ignis-0.6.0-py3-none-any.whl (207 kB)
Collecting qiskit-aqua==0.9.0
  Downloading qiskit_aqua-0.9.0-py3-none-any.whl (2.1 MB)
Requirement already satisfied: matplotlib>=2.1 in c:\users\virtus machos\anaconda3\lib\site-packages (from qiskit[visualization]) (3.3.2)
Requirement already satisfied: ipywidgets>=7.3.0 in c:\users\virtus machos\anaconda3\lib\site-packages (from qiskit[visualization]) (7.5.1)
Collecting pydot
  Downloading pydot-1.4.2-py2.py3-none-any.whl (21 kB)
Requirement already satisfied: pillow>=4.2.1 in c:\users\virtus machos\anaconda3\lib\site-packages (from qiskit[visualization]) (7.0.0)
```

Για να εγκαταστήσουμε το “Qiskit” θα εκτελέσουμε την επόμενη εντολή

```
!pip install "qiskit[visualization]" --user
```

ΠΡΟΣΟΧΗ! στην αντιγραφή του κώδικα από το πλαίσιο, προσέχουμε για τυχόν λάθη που μπορεί να συμβούν στην αντιγραφή από αυτό το αρχείο PDF!

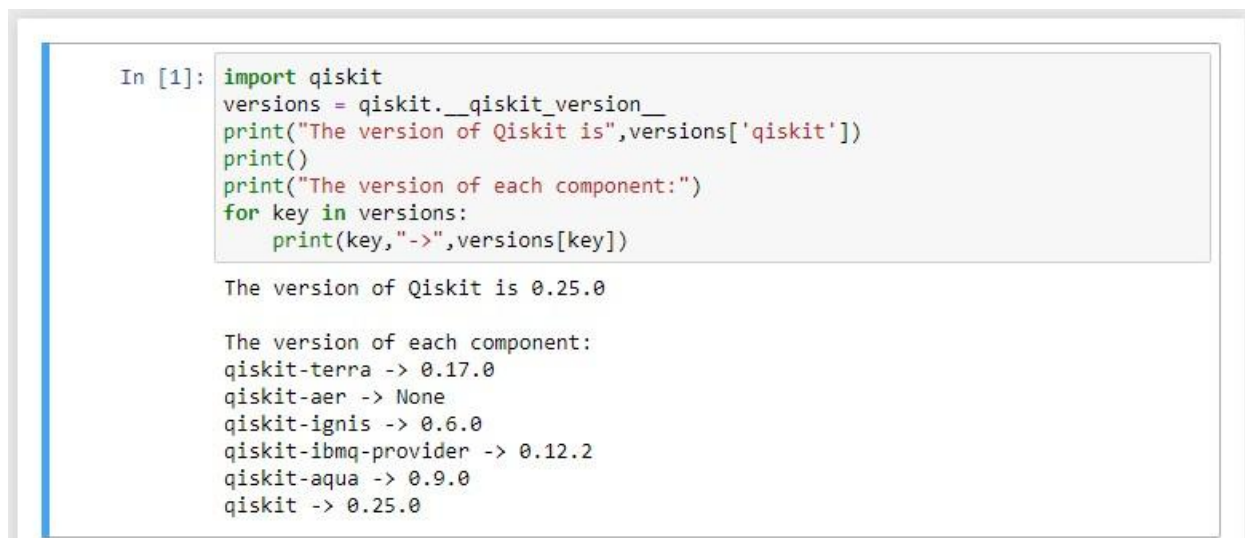
11) Έπειτα πρέπει να κάνουμε ένα restart το kernel για να φορτώσει η βιβλιοθήκη.



12) Αφου πατήσουμε τα κουμπια όπως στην εικόνα θα μας δείξει μια επιβεβαίωση για να κάνουμε το restart στο kernel. Το κάνουμε και συνεχίζουμε.



13) Αν ξανα εκτελέσουμε το πρώτο κώδικα, που μας έβγαζε σφάλμα και όλα έχουν πάει καλά, θα πρέπει να μας βγάλει τον αριθμό της έκδοσης των βιβλιοθηκών που έχουμε εγκατεστημένες στο σύστημα μας. Σε περίπτωση που εμφανιστούν διαφορετικοί αριθμοί εκδόσεων, είναι επειδή από τότε που έγινε αυτό το "tutorial" έχουν βγει πιο νέες εκδόσεις. Στην περίπτωση όμως που μας εμφανιστεί κάποιο σφάλμα τότε κάτι δεν έχει πάει καλά στην διαδικασία και πρέπει να την επαναλάβουμε.



Για να κάνουμε ενημέρωση του “Qiskit” εκτελούμε τον κώδικα:

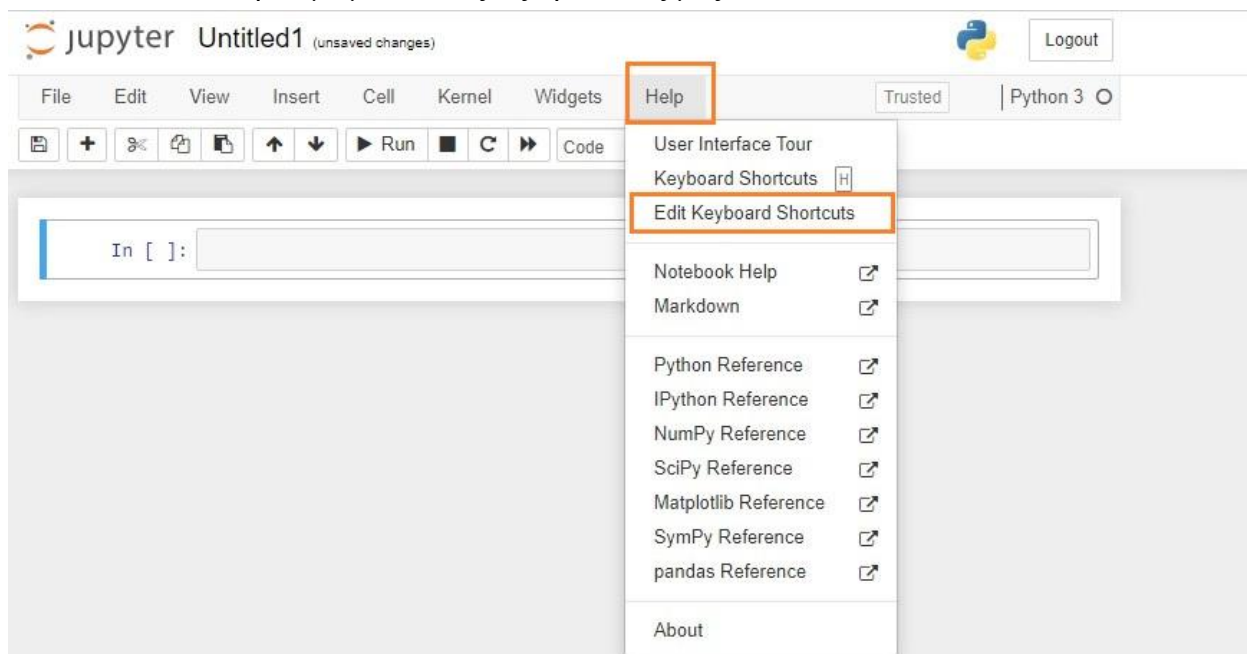
```
!pip install -U qiskit --user
```

Ενώ για να απεγκαταστήσουμε το “Qiskit” εκτελούμε τον κώδικα:

```
!pip uninstall qiskit
```

ΠΡΟΣΟΧΗ! στην αντιγραφή του κώδικα από το πλαίσιο, προσέχουμε για τυχόν λάθη που μπορεί να συμβούν στην αντιγραφή από αυτό το αρχείο PDF!

- 14) Μας δίνει επίσης την δυνατότητα πατώντας τα κουμπιά “Help” και μετά “Edit Keyboard Shortcuts” να αλλάξουμε τις συντομεύσεις που δεν μας βολεύουν και να τις αντικαταστήσουμε με κάποιες τις αρεσκείας μας.



15) Πατώντας τα κουμπιά “Help” και μετά “Edit Keyboard Shortcuts” θα μας ανοίξει το παράθυρο με όλες τις συντομεύσεις που μπορούμε να αλλάξουμε.

Edit Command mode Shortcuts

Here you can modify the keyboard shortcuts available in command mode. Your changes will be stored for later sessions. See more [details of defining keyboard shortcuts](#) below.

toggle cell rtl layout	add shortcut	+
toggle rtl layout	add shortcut	+
edit command mode keyboard shortcuts	add shortcut	+
shutdown kernel	add shortcut	+
confirm shutdown kernel	add shortcut	+
restart kernel	add shortcut	+
confirm restart kernel	0,0 ✕ add shortcut	+
restart kernel and run all cells	add shortcut	+
confirm restart kernel and run all cells	add shortcut	+
restart kernel and clear output	add shortcut	+
confirm restart kernel and clear output	add shortcut	+
interrupt kernel	I,I ✕ add shortcut	+
run cell and select next	Shift-Enter ✕ add shortcut	+
run cell	Ctrl-Enter ✕ add shortcut	+
run cell and insert below	Alt-Enter ✕ add shortcut	+
run all cells	add shortcut	+
run all cells above	add shortcut	+
run all cells below	add shortcut	+
enter command mode	add shortcut	+
insert image	add shortcut	+

OK

3.1.4 Έλεγχος και εκτέλεση ενός παραδείγματος κβαντικού προγράμματος

1) Αρχικά, θα δημιουργήσουμε ένα κβαντικό κύκλωμα εκτελώντας τις εντολές:

```
# εισαγάγουμε τα αντικείμενα από την βιβλιοθήκη qiskit
from qiskit import QuantumRegister, ClassicalRegister, QuantumCircuit, execute, Aer
from random import randrange

# δημιουργούμε ένα κβαντικό κύκλωμα και τα αντικείμενα του καταχωρητή του
qreg = QuantumRegister(2) # κβαντικός καταχωρητής με δύο κβαντικά bit
creg = ClassicalRegister(2) # κλασικός καταχωρητής με δύο κλασσικά bit
circuit = QuantumCircuit(qreg,creg) # κβαντικό κύκλωμα που αποτελείται από έναν κβαντικό
καταχωρητή και έναν κλασικό καταχωρητή

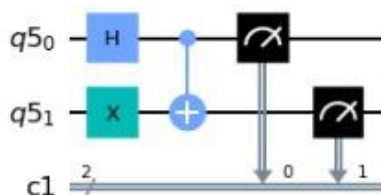
circuit.h(qreg[0]) # εφαρμόζουμε μια πύλη Hadamard στο πρώτο qubit
circuit.x(qreg[1]) # ορίζουμε το δεύτερο qubit στην κατάσταση |1>
circuit.cx(qreg[0],qreg[1]) # εφαρμόζουμε την πύλη CNOT(πρώτο_qubit,δεύτερο_qubit)

circuit.measure(qreg,creg) # μετράμε και τα δύο qubits

print("Η εκτέλεση του bracket ολοκληρώθηκε και το κύκλωμα δημιουργήθηκε :-)")
```

2) Έπειτα, θα σχεδιάσουμε το κύκλωμα:

```
circuit.draw(output='mpl') # σχεδιάζουμε το κύκλωμα
# η έξοδος θα είναι αντικείμενο "matplotlib.figure"
```



Εικόνα 3.1.4.1: Κύκλωμα κατάστασης “2-qubit”

Στην περίπτωση που δεν εμφανιστεί η εικόνα (σαν έξοδος) τότε θα εκτελέσουμε ξανά το “bracket”.

3) Τέλος, εκτελούμε το κύκλωμα 2048 φορές στον τοπικό προσομοιωτή και εκτυπώνουμε τα αποτελέσματα.

```
## εκτελούμε το κύκλωμα 2048 φορές
job = execute(circuit,Aer.get_backend('qasm_simulator'),shots=2048)
counts = job.result().get_counts(circuit) # Λαμβάνουμε τα αποτελέσματα
print(counts)
```

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν είναι το λεξικό ως εξής: {'01': 1032, '10': 1016}

3.2 Υλοποίηση του παιχνιδιού στο “Qiskit”

Η ρίψη νομισμάτων στο πρόγραμμα της “IBM Quantum Experience”, είναι κάπως έτσι.



Εικόνα 3.2.1: Ρίψη νομίσματος στο “IBM Quantum Experience”

Για να επιτευχθεί η ρίψη του κβαντικού νομίσματος, θα χρησιμοποιήσουμε την πύλη “Hadamard” και την πύλη μέτρησης. Με την πύλη “Hadamard” θα δημιουργήσουμε μια κβαντική υπέρθεση και με την πύλη μέτρησης θα αναγκαστεί η υπέρθεση να καταρρεύσει σε μία από τις δύο καταστάσεις “qubit” “ $|0\rangle$ ” ή “ $|1\rangle$ ”, που αντιπροσωπεύουν “Κ” για κορώνα ή “Γ” για γράμματα. Το διαφορετικό που κάνουμε σε αυτό το κεφάλαιο είναι ότι θα δημιουργήσουμε το κύκλωμα στην Python με το “Qiskit”, το οποίο υποδηλώνει ότι χρειάζεται επίσης να φτιάξουμε το πλαίσιο για τις πύλες και τη μέτρηση δημιουργώντας και καθορίζοντας κλασικά και κβαντικά κυκλώματα χρησιμοποιώντας εντολές της γλώσσας “Python” που χρησιμοποιεί το “Qiskit”.

Αυτά θα συμβούν με την σειρά που θα γραφτούν στη συνέχεια. Αρχικά, εισάγουμε τις απαιτούμενες βιβλιοθήκες της Qiskit. Ξεκινάμε εισάγοντας τις κλάσεις Python που απαιτούνται για τη δημιουργία καταχωρητών και κυκλωμάτων και ορίζουμε ένα ενσωματωμένο σύστημα υποστήριξης.

```

from qiskit import QuantumRegister, ClassicalRegister
from qiskit import QuantumCircuit, Aer, execute
from IPython.core.display import display
from qiskit.quantum_info import DensityMatrix
from qiskit.visualization import plot_state_city
%matplotlib inline

```

Επιπροσθέτως, εισάγουμε επίσης τη μέθοδο “display” από την “IPython.core.display” βιβλιοθήκη. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται για την σωστή εμφάνιση της εξόδου γραφικών στο περιβάλλον “Anaconda Spyder IPython” και ενδέχεται να μην απαιτείται σε όλα τα περιβάλλοντα. Το επόμενο βήμα είναι να δημιουργήσουμε τους απαιτούμενους καταχωρητές και το κβαντικό κύκλωμα. Δημιουργούμε δύο καταχωρητές, έναν για το κβαντικό “qubit” και έναν για το κλασικό “bit”. Δημιουργούμε επίσης ένα κβαντικό κύκλωμα που αποτελείται από τον κβαντικό καταχωρητή και τον κλασικό καταχωρητή. Ο κβαντικός καταχωρητής αρχικοποιείται στην αρχική κατάσταση “ $|0\rangle$ ” και ο κλασικός καταχωρητής ορίζεται σε 0.

```

q = QuantumRegister(1)
c = ClassicalRegister(1)
qc = QuantumCircuit(q, c)

```

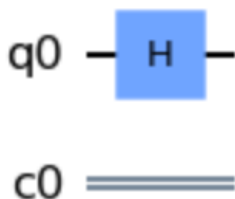
Στη συνέχεια, προσθέτουμε τις απαραίτητες πύλες στο κβαντικό μας κύκλωμα. Προκειμένου το κβαντικό μας πρόγραμμα να έχει πραγματικά μια χρησιμότητα, προσθέτουμε μια πύλη “Hadamard” που θα βάλει το “qubit” σε μια υπέρθεση.

```

qc.h(q[0])
display(qc.draw('mpl'))

```

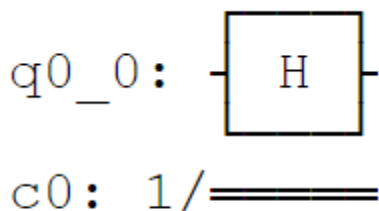
Οπτικοποιώντας το κύκλωμα με την εντολή “qc.draw('mpl')”, έχουμε ένα κβαντικό κύκλωμα με 1 “qubit” και 1 κλασικό “bit”, με μια πύλη “Hadamard” στο “qubit”.



Εικόνα 3.2.2: Το κύκλωμα με το ένα “qubit” με την πύλη “Hadamard” καθώς και το ένα “bit”

Σε ένα περιβάλλον αυστηρά βασισμένο στη γλώσσα Python, μπορούμε επίσης να εκτυπώσουμε το κύκλωμα μας με την εντολή εκτύπωσης “(qc)” ή να χρησιμοποιήσουμε το “qc.draw ('text')”, και τα δύο θα μας βγάλουν το ίδιο αποτέλεσμα στην έξοδο κειμένου ASCII.

```
qc.draw ('text')
```



Εικόνα 3.2.3: Το κύκλωμα εμφανιζόμενο ως κείμενο ASCII

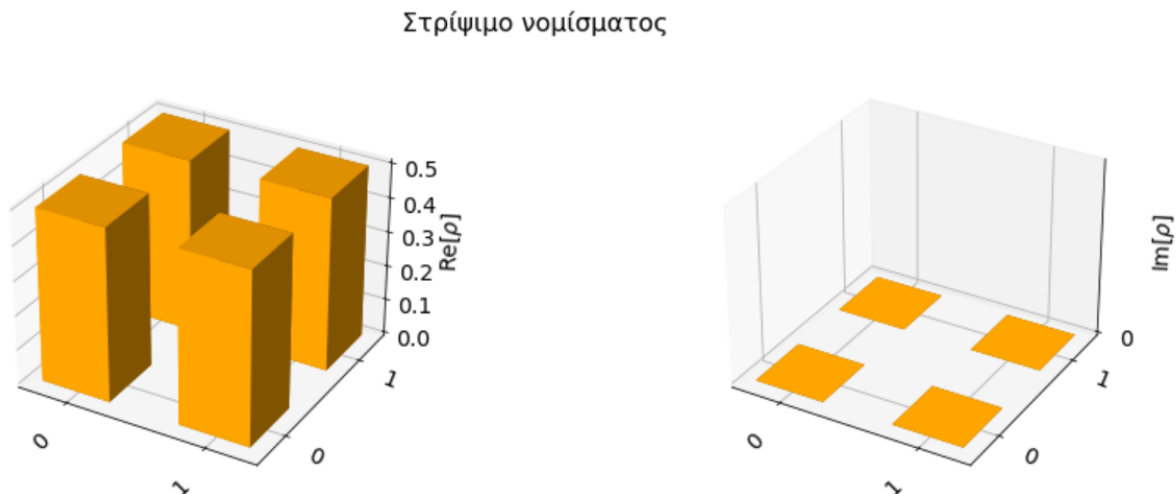
Έπειτα, ορίζουμε το ενσωματωμένο σύστημα υποστήριξης στο οποίο θα εκτελεστεί ο κώδικας. Για αυτά τα βήματα, θα χρησιμοποιήσουμε το ενσωματωμένο σύστημα υποστήριξης “qasm_simulator”. Δημιουργούμε μια μεταβλητή για το ενσωματωμένο σύστημα υποστήριξης και καλούμε το στοιχείο “Aer” για να λάβουμε τις απαιτούμενες πληροφορίες του ενσωματωμένου συστήματος υποστήριξης

```
backend = Aer.get_backend('qasm_simulator')
```

Δημιουργούμε μια διεργασία για το κβαντικό κύκλωμα και το επιλεγμένο ενσωματωμένο σύστημα υποστήριξης η οποία θα εκτελεστεί μια φορά και θα προσομοιώνει μια ρίψη του νομίσματος. Στη συνέχεια, εκτελούμε την διεργασία και εμφανίζουμε το αποτέλεσμα που επιστρέφεται. Το αποτέλεσμα που προκύπτει είναι είτε “| 0 ⟩” για κορόνα είτε “| 1 ⟩” για γράμματα. Τα αποτελέσματα επιστρέφονται ως λεξικό Python. Ως λεξικό της python εννοούμε μια μη ταξινομημένη συλλογή τιμών δεδομένων, που χρησιμοποιείται για την αποθήκευση τιμών δεδομένων, η οποία σε αντίθεση με άλλους τύπους δεδομένων που διατηρούν μόνο μία τιμή ως στοιχείο, το λεξικό κρατά ως κλειδί ένα ζεύγος τιμών. Η τιμή κλειδί παρέχεται στο λεξικό για να γίνει πιο βελτιστοποιημένο.

```
job = execute(qc, backend, shots=1)
result = job.result()
counts = result.get_counts(qc)
```

```
state = DensityMatrix.from_instruction(qc)
plot_state_city(state, color=['orange', 'orange'],
    title="Tossing a coin")
```

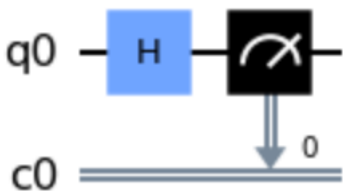


Εικόνα 3.2.4: Απεικόνιση με χρήση τρισδιάστατων ραβδογραμμάτων (δύο διαστάσεων) του πραγματικού και φανταστικού τμήματος

Αφού προσθέσουμε μια πύλη μέτρησης θα μπορέσουμε να διαβάσουμε την τιμή του κβαντικού “bit” στο τέλος του προγράμματος μας.

```
qc.measure(q, c)
display(qc.draw('mpl'))
```

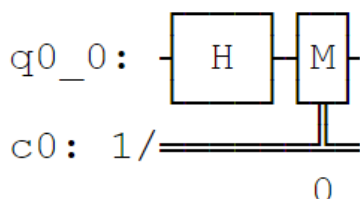
Οπτικοποιώντας το κύκλωμα με την εντολή “qc.draw('mpl')”, παρατηρούμε ότι όπως ακριβώς και στον συνθέτη της “IBM Quantum Experience”, έχουμε ένα κβαντικό κύκλωμα με 1 “qubit” και 1 κλασικό “bit”, με μια πύλη “Hadamard” στο “qubit” και τέλος προσθέσαμε μια πύλη μέτρησης που θα γράψει την κατάσταση του “qubit q0_0” (“| 0 ⟩” ή “| 1 ⟩”) στο κλασικό “bit c0_0” ως 0 ή 1.



Εικόνα 3.2.5: Ρίψη κβαντικού νομίσματος στο “Jupyter notebook”

Εκτυπώνουμε επίσης το κύκλωμα μας με την εντολή εκτύπωσης “(qc)” ή χρησιμοποιούμε το “qc.draw ('text')”, και τα δύο θα μας βγάλουν το ίδιο αποτέλεσμα στην έξοδο κειμένου ASCII.

```
qc.draw ('text')
```



Εικόνα 3.2.6: Το κύκλωμα εμφανιζόμενο ως κείμενο ASCII

Εάν τα αποτελέσματα στο μηχάνημα μας είναι παρόμοια με αυτά που βγάλαμε στις προηγούμενες εικόνες, το πρόγραμμα κβαντικών νομισμάτων που υλοποιήσαμε, επέστρεψε με επιτυχία το αποτέλεσμα κορώνα ή “ $|0\rangle$ ”.

Η διαδικασία έχει ως εξής, στρίψαμε ένα κβαντικό νόμισμα που ξεκίνησε με κορώνα προς τα πάνω (“ $|0\rangle$ ”), περιστράφηκε στον κβαντικό χώρο ως υπέρθεση του “ $|0\rangle$ ” και “ $|1\rangle$ ”, και τελικά προσγειώθηκε σε κορώνα όταν το μετρήσαμε. Αναλυτικότερα, δημιουργήσαμε ένα qubit και το αρχικοποιήσαμε στην αρχική κατάσταση “ $|0\rangle$ ”. Έπειτα εφαρμόσαμε μια πύλη “Hadamard” στο “qubit”, η οποία μετακίνησε το διάνυσμα κατάστασης από τον πόλο στον ισημερινό της σφαίρας Bloch. Απο την πλευρά των μαθηματικών, όταν εφαρμόζουμε την πύλη “Hadamard” σε ένα “qubit”, εκτελείται μέσω δύο περιστροφών, πρώτα μια περιστροφή “ $\pi / 2$ ” γύρω από τον άξονα “y” και μετά μια περιστροφή “ π ” γύρω από τον άξονα “x”. Το “qubit” βρίσκεται τώρα σε υπέρθεση “ $|0\rangle$ ” και “ $|1\rangle$ ”, στα μισά μεταξύ των πόλων. Και τέλος, μετράμε το “qubit”. Μετρώντας το “qubit” καταστρέφουμε την υπέρθεση, αναγκάζοντας κυριολεκτικά τη φύση να αποφασίσει για το αποτέλεσμα και το “qubit” θα είναι είτε “ $|0\rangle$ ” είτε “ $|1\rangle$ ”.

3.3 Υλοποίηση δύο νομισμάτων

Προηγουμένως, είδαμε πως υλοποιείται η ρίψη του κβαντικού νομίσματος. Στη συνέχεια θα υλοποιήσουμε το ίδιο, αλλά με δυο νομίσματα ταυτόχρονα. Μέχρι στιγμής, έχουμε ασχοληθεί μόνο με ένα νόμισμα κάθε φορά, σε αυτό το κεφάλαιο όμως θα εξετάσουμε την περίπτωση να προσθέσουμε περισσότερα νομίσματα. Επομένως, θα προσθέσουμε ένα νόμισμα παραπάνω στην προσομοίωση και θα ρίξουμε και τα δύο νομίσματα ταυτόχρονα. Θα το κάνουμε προσθέτοντας ένα δεύτερο “qubit”, αυξάνοντας συνολικά τον αριθμό των “qubits”.

Αυτά θα υλοποιηθούν με την σειρά που θα αναλυθούν στη συνέχεια. Αρχικά, ρυθμίζουμε τον κώδικα μας όπως και στο προηγούμενο παράδειγμα, εισάγουμε τις βιβλιοθήκες και τις μεθόδους που χρειαζόμαστε αλλά με την μόνη διαφορά ότι το κβαντικό μας κύκλωμα αποτελείται από “2-qubits”.

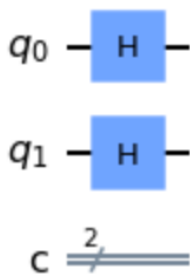
```
from qiskit import QuantumCircuit, Aer, execute
from IPython.core.display import display
from qiskit.quantum_info import DensityMatrix
from qiskit.visualization import plot_state_city
%matplotlib inline
```

Έπειτα, τροποποιούμε το κβαντικό μας κύκλωμα με δύο “qubits” και δύο κλασικά “bits”.

```
qc = QuantumCircuit(2, 2)
```

Παρακάτω, προσθέτουμε τις πύλες “Hadamard”.

```
qc.h([0,1])
display(qc.draw('mpl'))
```



Εικόνα 3.3.1: Το κύκλωμα με δύο “qubits” και “Hadamard” καθώς και ένα “bit”

Τώρα χρησιμοποιούμε λίστες για να αναφέρουμε πολλαπλά “qubits” και πολλαπλά “bits”. Για παράδειγμα, εφαρμόζουμε την πύλη “Hadamard” στα “qubit” “ $|0\rangle$ ” και “ $|1\rangle$ ” χρησιμοποιώντας το $[0,1]$ ως είσοδο.

Στην συνέχεια, ορίζουμε ότι ο κώδικας μας, θα εκτελεστεί σε αυτόν τον προσομοιωτή.

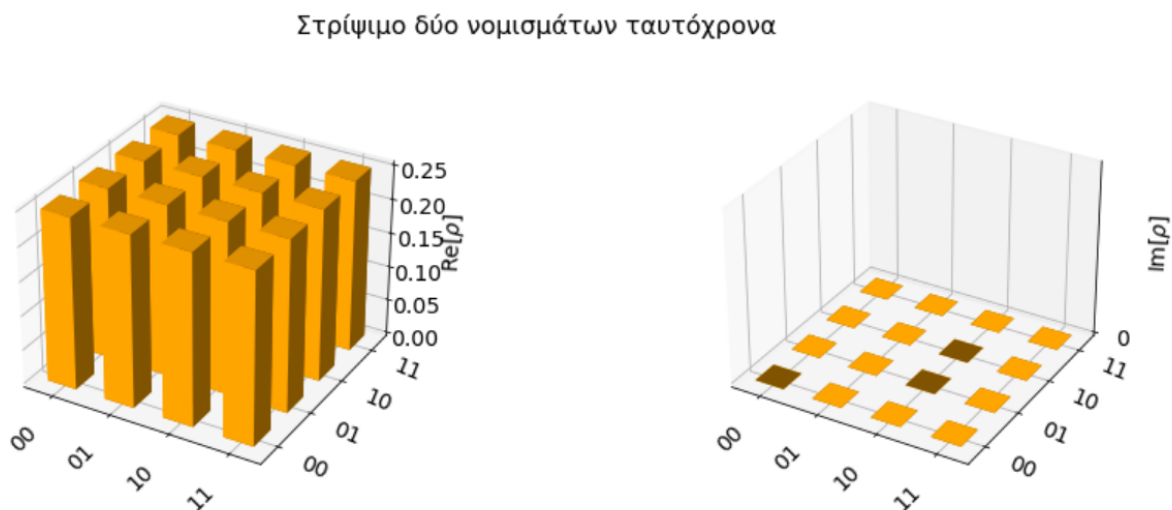
```
backend = Aer.get_backend('qasm_simulator')
```

Εκτελούμε την διεργασία με μια ρύψη.

```
counts = execute(qc, backend, shots=1).result().get_counts(qc)
```

Αξίζει να σημειωθεί, ότι χρησιμοποιούμε βελτιωμένο κώδικα σε αυτό το κομμάτι καθώς ενδιαφερόμαστε μόνο για τις μετρήσεις. Έπειτα, οπτικοποιούμε τα αποτελέσματα.

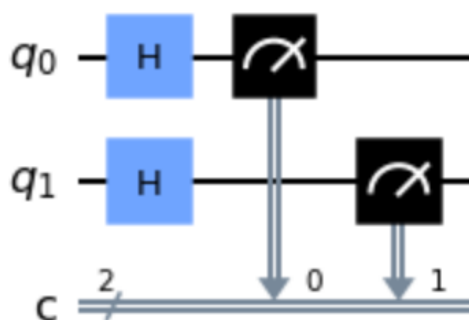
```
state = DensityMatrix.from_instruction(qc)
plot_state_city(state, color=['orange', 'orange'],
    title="Tossing two coins simultaneously")
```



Εικόνα 3.3.2: Η οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων προτού γίνει η μέτρηση του συστήματος.

Έπειτα προσθέτουμε και τις πύλες μέτρησης στο κύκλωμα μας.

```
qc.measure([0,1],[0,1])
display(qc.draw('mpl'))
```



Εικόνα 3.3.3: Το κβαντικό κύκλωμα με τα “2-qubits” - Ρίψη 2 νομισμάτων.

Στο πρόγραμμα που υλοποιήσαμε έχουμε την δυνατότητα να πράξουμε ως εξής. Μπορούμε να ορίσουμε τον αριθμό των “qubit” όταν δημιουργούμε το κβαντικό κύκλωμα. Όταν το πρόγραμμα εκτελέστηκε, εφαρμόστηκαν και στα δύο “qubits” πύλες “Hadamard” και δημιουργήθηκαν δύο παράλληλα “qubits” όπου και τα δύο βρίσκονταν σε υπέρθεση. Στο “Qiskit”, η αρίθμηση των “qubit” ξεκινά με το 0 για το πρώτο “qubit” και στη συνέχεια μετράει προς τα πάνω. Δηλαδή, ένα κύκλωμα με “3-qubit” θα περιέχει τα ακόλουθα “qubits”, όπου αναφέρονται ως το πρώτο, δεύτερο και τρίτο “qubit”, εάν δηλαδή χρησιμοποιήσουμε τη σημειογραφία “QuantumRegister”, όπως στον αναθεωρημένο κώδικα κβαντικών νομισμάτων τότε αυτά θα εμφανίζονται ως εξής, q [0], q [1] και q [2]. Εάν από την άλλη χρησιμοποιήσουμε τη σημειογραφία της λίστας τότε αυτά θα εμφανίζονται ως εξής, [0,1,2].

3.4 Προσομοίωση πραγματικών καταστάσεων - Ρίψη αληθινών νομισμάτων

Αφού έχουμε ολοκληρώσει την προσομοίωση των κβαντικών νομισμάτων, τώρα θα υλοποιήσουμε το “Qiskit” πρόγραμμα μας της κβαντικής ρίψης νομισμάτων, σε έναν πραγματικό κβαντικό υπολογιστή της “IBM”. Θα χρειαστούμε το κλειδί “API” της “IBM Quantum Experience” που λάβαμε όταν εγγραφήκαμε στην σελίδα τους. Σε αυτό το κομμάτι, θα εκτελέσουμε την κβαντική ρίψη κέρματος σε ένα πραγματικό κβαντικό μηχάνημα της “IBM” χρησιμοποιώντας το “Qiskit”. Μπορεί να γνωρίζουμε πώς είναι το αναμενόμενο αποτέλεσμα σε έναν άψογα προσομοιωμένο κβαντικό υπολογιστή αλλά τώρα θα δούμε τα αποτελέσματα μιας πραγματικής μηχανής “NISQ” (“Noisy Intermediate-Scale Quantum”).

Τέλος, με την βοήθεια του κλειδιού “API”, θα παρουσιάσουμε τα στοιχεία “IBMQ”, πώς να βρούμε τα ενσωματωμένα συστήματα υποστήριξης, πώς να επιλέξουμε το καλύτερο ενσωματωμένο σύστημα υποστήριξης και πώς να τρέξουμε το κύκλωμα με αυτό το ενσωματωμένο σύστημα υποστήριξης. Για να μπορέσουμε να εκτελέσουμε το κβαντικό μας πρόγραμμα σε πραγματικό υλικό της “IBM”, πρέπει να χρησιμοποιήσουμε το κλειδί “API” με το οποίο έχουμε εκχωρηθεί στον λογαριασμό μας “IBM Quantum Experience”. Στην περίπτωση που χρησιμοποιούμε το “notebook” της “Qiskit” από το περιβάλλον της “IBM Quantum Experience”, τότε το κλειδί “API” μας είναι ήδη διαθέσιμο για εμάς και δεν απαιτείται περαιτέρω ενέργεια. Εάν, ωστόσο, χρησιμοποιούμε το “Qiskit” στον τοπικό μας υπολογιστή τότε πρέπει να αποθηκεύσουμε το κλειδί “API” τοπικά.

Το πρώτο βήμα είναι να ρυθμίσουμε τον κώδικα μας όπως στα προηγούμενα παραδείγματα, με δύο “qubits” και κλασικά “bits”. Εισάγουμε τις βιβλιοθήκες και τις μεθόδους που χρειαζόμαστε.

```
from qiskit import QuantumCircuit, Aer, execute
from IPython.core.display import display
from qiskit import IBMQ
from qiskit.tools.monitor import job_monitor
from qiskit.quantum_info import DensityMatrix
from qiskit.visualization import plot_state_city
%matplotlib inline
```

Σε αυτό το κομμάτι ανακτάμε το αποθηκευμένο μας κλειδί “API”.

```
IBMQ.load_account()
provider = IBMQ.get_provider()
```

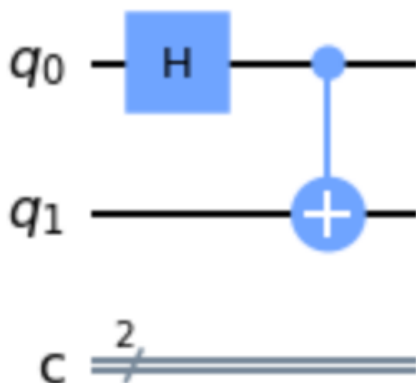
Μετά ρυθμίζουμε το κβαντικό μας κύκλωμα με δύο “qubits” και δύο κλασικά “bits”.

```
qc = QuantumCircuit(2, 2)
```

Έπειτα προσθέτουμε την πύλη “Hadamard” και την πύλη “CX”.

```
qc.h(0)
qc.cx(0,1)
display(qc.draw('mpl'))
```

Ο προηγούμενος κώδικας δείχνει το ακόλουθο κύκλωμα.



Εικόνα 3.4.1: Κύκλωμα κατάστασης “2-qubit” πριν την μέτρηση

Παρακάτω ρυθμίζουμε το ενσωματωμένο σύστημα υποστήριξης στο λιγότερο απασχολημένο κβαντικό μηχάνημα της “IBM”.

```
from qiskit.providers.ibmq import least_busy
backend = least_busy(provider.backends(n_qubits=5,
    operational=True, simulator=False))
print(backend.name())
```

Κατα την επιτυχή εκτέλεση του κώδικα, το παραπάνω κομμάτι κώδικα θα μας επιστρέψει και ως έξοδο ένα όνομα, το οποίο είναι το λιγότερο απασχολημένο κβαντικό μηχάνημα της “IBM”. Το μηχάνημα αυτό θα αναλάβει και την διεργασία, για παράδειγμα το μηχάνημα “ibmq_athens”.

Στη συνέχεια εκτελούμε την διεργασία με 1.000 ρίψεις και περιμένουμε να ολοκληρωθεί το πρόγραμμα.

```
job = execute(qc, backend, shots=1000)
job_monitor(job)
```

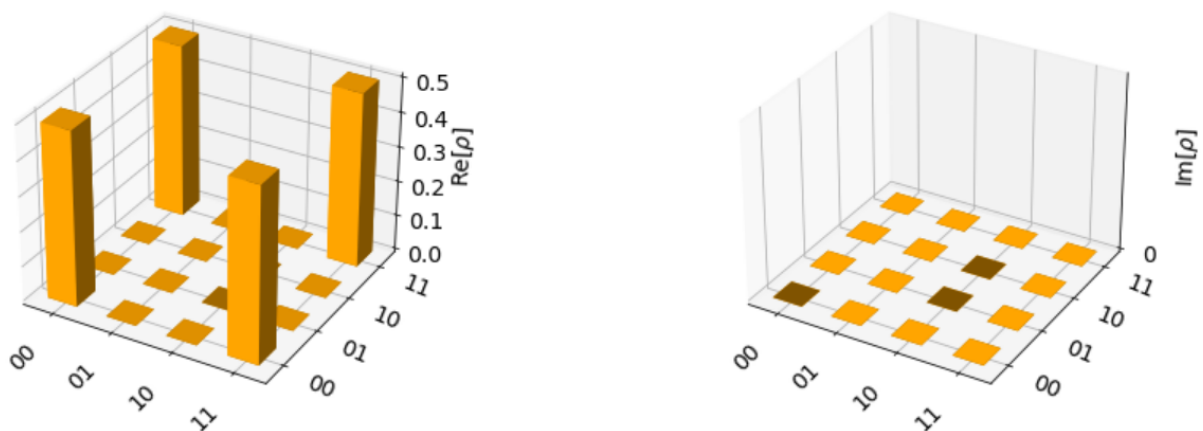
Το παραπάνω κομμάτι κώδικα θα μας επιστρέψει επίσης ως έξοδο αν έχει εκτελεστεί ή όχι επιτυχώς το πρόγραμμα. Για παράδειγμα αν το πρόγραμμα έχει εκτελεστεί επιτυχώς θα μας επιστρέψει το μήνυμα “Job Status: job has successfully run”.

Τέλος λαμβάνουμε τα αποτελέσματα πριν την μέτρηση του κυκλώματος.

```
result = job.result()
counts = result.get_counts(qc)
state = DensityMatrix.from_instruction(qc)
plot_state_city(state, color=['orange', 'orange'],
    title="Στρίψιμο δύο νομισμάτων ταυτόχρονα")
```

Η παρουσίαση του παιχνιδιού σε τρισδιάστατο γράφημα για τον προηγούμενο κώδικα μοιάζει με την ακόλουθη.

Στρίψιμο δύο νομισμάτων ταυτόχρονα

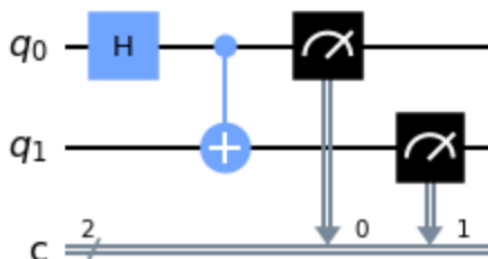


Εικόνα 3.4.2: Το στρίψιμο δύο νομισμάτων σε πραγματικό ενσωματωμένο σύστημα υποστήριξης “IBM Quantum”.

Περιμέναμε αποτελέσματα μόνο για “ $|00\rangle$ ” και “ $|11\rangle$ ”. Ενώ λοιπόν περιμέναμε τα δύο προηγούμενα, μας εμφανίστηκαν για “ $|00\rangle$ ”, “ $|01\rangle$ ”, “ $|10\rangle$ ” και “ $|11\rangle$ ”.

Έπειτα προσθέτουμε και τις πύλες μέτρησης στο κύκλωμα μας.

```
qc.measure([0,1],[0,1])
display(qc.draw('mpl'))
```



Εικόνα 3.4.3: Το κύκλωμα κατάστασης “2-qubit” μετά την μέτρηση

Αυτό που βλέπουμε είναι τα “qubits” που προκαλούν θόρυβο στην εκτέλεσή μας. Παρόλο που οι κβαντικοί υπολογιστές της “IBM” λειτουργούν σε θερμοκρασίες χαμηλότερες από το διάστημα περίπου στους 15 “millikelvin”, εξακολουθούν να εμπλέκονται με τυχαίο θόρυβο τόσο όταν εκτελούν πύλες στα “qubit” όσο και κατά τη μέτρησή τους. Ο τοπικός `qasm_simulator` στον οποίο έχουμε εκτελέσει τα κβαντικά προγράμματα μέχρι αυτό το σημείο συμπεριφέρεται σαν ένας τέλειος κανονικός κβαντικός υπολογιστής. Το πραγματικό υλικό, από την άλλη πλευρά, είναι αυτό που ονομάζεται “Noisy Intermediate-Scale Quantum” (NISQ), το οποίο συμπεριφέρεται λιγότερο τέλεια. Το όνομα μπορεί να εξηγηθεί ως εξής: “Noisy” επειδή δεν έχουμε αρκετά “qubits” για να διορθώσουμε το σφάλμα και έτσι θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε άμεσα τα ατελή “qubits” στο φυσικό επίπεδο. Και “Intermediate-Scale” λόγω του μικρού (αλλά όχι πολύ μικρού) αριθμού “qubit”.

Συμπεράσματα

Στη σημερινή εποχή οι κβαντικοί υπολογιστές έχουν έρθει για να αντικαταστήσουν τους κλασικούς υπολογιστές έτσι όπως τους γνωρίζουμε και χρησιμοποιούμε. Η κβαντική υπολογιστική προσφέρει μια πληθώρα δυνατοτήτων, εκεί που η κλασική υπολογιστική υστερεί. Με την χρήση κβαντικών τεχνικών μπορούν να επιλυθούν προβλήματα όπου η κλασική υπολογιστική δεν μπορεί να διαχειριστεί και παραμένουν ακόμη και σήμερα άλυτα. Με τις κβαντικές τεχνικές τέτοια προβλήματα μπορούν να λυθούν σε σύντομο χρονικό διάστημα με καλύτερη απόδοση και ταχύτητα σε σχέση με τους κλασικούς αλγορίθμους.

Προς το παρόν τα μεγέθη ενός κβαντικού υπολογιστή δεν επιτρέπουν την εμπορική χρήση και την διανομή ενός τέτοιου αλλά κάποιες εταιρείες προσφέρουν την δυνατότητα εξ αποστάσεως χρήσης κβαντικών υπολογιστών για την διεξαγωγή πειραμάτων και εκτέλεση κώδικα.

Η “IBM” έχει τέτοιους υπολογιστές και μέσω εγγραφής στη σελίδα της μπορεί κανείς να πραγματοποιήσει πειράματα σε έναν υπολογιστή εξ αποστάσεως. Το “IBM Quantum Experience” είναι ακριβώς αυτό το εργαλείο το οποίο έχει σχεδιάσει η IBM και διανέμει μέσω της ιστοσελίδας της για δοκιμές στον κβαντικό υπολογιστή της. Το περιβάλλον είναι πολύ φιλικό προς τον χρήστη και αυτή η εργασία είναι μια προσπάθεια κατανόησης και παρουσίασης των βημάτων χρήσης αυτού ακριβώς του εργαλείου καθώς και του Qiskit, το οποίο είναι ένα επιπλέον εργαλείο που προσφέρει η IBM προγραμματιστικά για τον σκοπό αυτό.

Τα εργαλεία αυτά είναι σε πολύ προχωρημένο επίπεδο, με πολύ εύκολη και φιλική προς τον χρήστη διεπαφή και το τρίτο κεφάλαιο της εργασίας αφορά την εγκατάσταση των εργαλείων καθώς και κάποια κομμάτια προγραμματισμού-κώδικα έτσι ώστε να επιτευχθούν κάποια πρώτα πειράματα σε κβαντικούς υπολογιστές.

Πριν τον οδηγό εγκατάστασης των απαραίτητων εργαλείων γίνεται εκτενής αναφορά στο παιχνίδι του νομίσματος. Το στρίψιμο του νομίσματος είναι ένα κλασικό παιχνίδι από την θεωρία παιγνίων το οποίο προσομοιώνει ουσιαστικά μια κατάσταση με τη μορφή ενός νομίσματος. Αυτό το παιχνίδι αναλύεται και στην κλασική και στην κβαντική του μορφή και γίνεται επέκταση του παιχνιδιού και σε δύο κέρματα, καθώς και σε περισσότερους από έναν γύρους. Η υλοποίηση του παιχνιδιού στον κβαντικό υπολογιστή παρουσιάζεται και εξηγείται αναλυτικά στο τρίτο κεφάλαιο της εργασίας και έχει προγραμματιστεί για τα περιβάλλοντα Qiskit και IBM Quantum Experience αντίστοιχα.

Σκοπός της εργασίας είναι να παρουσιαστεί με κατανοητό και εύκολο τρόπο, βήμα-βήμα η χρήση των εργαλείων αυτών, καθώς και η παρουσίαση της μοντελοποίησης του παιχνιδιού προς μελέτη στα περιβάλλοντα αυτά. Με γνώμονα αυτή την εργασία, μπορεί μελλοντικά να γίνει έρευνα και άλλων κλασικών παιγνίων από τη θεωρία και να υλοποιηθούν στα περιβάλλοντα της IBM.

Βιβλιογραφία

- Alsina, D., & Latorre, J. I. (2016, July 11). Experimental test of Mermin inequalities on a five-qubit quantum computer. Retrieved from <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.94.012314>
- Alsina, D., & Latorre, J. I. (2016). Experimental test of Mermin inequalities on a five-qubit quantum computer. *Physical Review A*, 94(1). doi:10.1103/physreva.94.012314
- Aron, J. (2019, January 08). IBM unveils its first commercial quantum computer. Retrieved from <https://www.newscientist.com/article/2189909-ibm-unveils-its-first-commercial-quantum-computer/>
- Ars Staff - Sep 25, 2. 1. (2017, September 25). Microsoft makes play for next wave of computing with quantum computing toolkit. Retrieved from <https://arstechnica.com/gadgets/2017/09/microsoft-quantum-toolkit/>
- Benioff, P. (1980). The computer as a physical system: A microscopic quantum mechanical Hamiltonian model of computers as represented by Turing machines. *Journal of Statistical Physics*, 22(5), 563-591. doi:10.1007/bf01011339
- Berta, M., Wehner, S., & Wilde, M. M. (2016). Entropic uncertainty and measurement reversibility. *New Journal of Physics*, 18(7), 073004. doi:10.1088/1367-2630/18/7/073004
- Bonifacic, I. (2021, May 13). Google may have taken a step towards quantum computing 'supremacy' (updated). Retrieved from <https://www.engadget.com/2019/09/23/google-quantum-supremacy/>
- Brassard, G., Høyer, P., & Tapp, A. (2016). Quantum Algorithm for the Collision Problem. *Encyclopedia of Algorithms*, 1662-1664. doi:10.1007/978-1-4939-2864-4_304
- Cho, A. (2019). Quantum Darwinism seen in diamond traps. *Science*, 365(6458), 1070-1070.

doi:10.1126/science.365.6458.1070

Conover, E. (2019, August 08). Google moves toward quantum supremacy with 72-qubit

computer. Retrieved from

<https://www.sciencenews.org/article/google-moves-toward-quantum-supremacy-72-qubit-computer>

Conover, E. (2019, October 23). Quantum computers are about to get real. Retrieved from

<https://www.sciencenews.org/article/quantum-computers-are-about-get-real>

Córcoles, A., Magesan, E., Srinivasan, S. J., Cross, A. W., Steffen, M., Gambetta, J. M., &

Chow, J. M. (2015). Demonstration of a quantum error detection code using a square lattice of four superconducting qubits. *Nature Communications*, 6(1).

doi:10.1038/ncomms7979

D-Wave. (2017) Retrieved from

<https://www.dwavesys.com/press-releases/d-wave-systems-breaks-1000-qubit-quantum-computing-barrier>

D-Wave 0. (2017) Retrieved from

<https://www.dwavesys.com/press-releases/d-wave-announces-d-wave-2000q-quantum-computer-and-first-system-order>

D-Wave 1. (2021) Retrieved from

<https://www.dwavesys.com/publications/quantum-annealing-amid-local-ruggedness-and-global-frustration>

D-Wave 2. (2021) Retrieved from

<https://www.dwavesys.com/publications/computational-power-consumption-and-speedup>

D-Wave 3. (2021) Retrieved from

- <https://www.dwavesys.com/publications/boosting-integer-factoring-performance-quantum-annealing-offsets-0>
- Dattani, N., & Chancellor, N. (2019, January 23). Embedding quadratization gadgets on Chimera and Pegasus graphs. Retrieved from <https://arxiv.org/abs/1901.07676>
- Dattani, N., Szalay, S., & Chancellor, N. (2019, January 22). Pegasus: The second connectivity graph for large-scale quantum annealing hardware. Retrieved from <https://arxiv.org/abs/1901.07636>
- Deffner, S. (2017). Demonstration of entanglement assisted invariance on IBM's quantum experience. *Heliyon*, 3(11). doi:10.1016/j.heliyon.2017.e00444
- Devitt, S. J., Greentree, A. D., Stephens, A. M., & Meter, R. V. (2016). High-speed quantum networking by ship. *Scientific Reports*, 6(1). doi:10.1038/srep36163
- Devitt, S. J. (2016). Performing quantum computing experiments in the cloud. *Physical Review A*, 94(3). doi:10.1103/physreva.94.032329
- Dockterman, E. (2014, January 02). The NSA Is Building a Computer to Crack Almost Any Code. Retrieved from <http://nation.time.com/2014/01/02/the-nsa-is-building-a-computer-to-crack-almost-any-code/>
- Eisert, J., Wilkens, M., & Lewenstein, M. (1999). Quantum Games and Quantum Strategies. *Physical Review Letters*, 83(15), 3077-3080. doi:10.1103/physrevlett.83.3077
- Elsevier. (2021). Scopus for Corporate Research & Development. Retrieved from <https://www.elsevier.com/solutions/scopus/who-uses-scopus/research-and-development#tr-ends>
- Farhi, E., Goldstone, J., & Gutmann, S. (2008). *Theory of Computing*, 4(1), 169-190.

doi:10.4086/toc.2008.v004a008

Fedortchenko, S. (2016, July 13). A quantum teleportation experiment for undergraduate students. Retrieved from <https://arxiv.org/abs/1607.02398>

Feynman, R. P. (1982). Simulating physics with computers. *International Journal of Theoretical Physics*, 21(6-7), 467-488. doi:10.1007/bf02650179

Fisher, C. (2009, April 02). IBM: Quantum Computing. Retrieved from <https://www.ibm.com/quantum-computing/>

Fisher, C. (2009, April 02). IBM: What is Quantum Computing? Retrieved from <https://www.ibm.com/quantum-computing/learn/what-is-quantum-computing/>

Forrest, C. (2018, June 12). Why Intel's smallest spin qubit chip could be a turning point in quantum computing. Retrieved from <https://www.techrepublic.com/article/why-intels-smallest-spin-qubit-chip-could-be-a-turning-point-in-quantum-computing/>

Franklin, D., & Chong, F. T. (n.d.). Challenges in Reliable Quantum Computing. *Nano, Quantum and Molecular Computing*, 247-266. doi:10.1007/1-4020-8068-9_8

Full Page Reload. (n.d.). Retrieved from <https://spectrum.ieee.org/tech-talk/computing/hardware/qudits-the-real-future-of-quantum-computing>

Full Page Reload. (n.d.). Retrieved from <https://spectrum.ieee.org/tech-talk/computing/hardware/intels-49qubit-chip-aims-for-quantum-supremacy>

Gambetta, J. (2021, March 02). 5 years ago we released the first programmable quantum computer in the cloud (the IBM Quantum Experience). Today we have evolved our cloud

- programming tools and the IBM Quantum Experience is now two separate tools: IBM Quantum Composer and IBM Quantum Lab <https://t.co/6GzJZ863Pw>
pic.twitter.com/stKyuLpEpg. Retrieved from
<https://twitter.com/jaygambetta/status/1366787131151163395>
- Gibney, E. (2019). Quantum gold rush: The private funding pouring into quantum start-ups. *Nature*, 574(7776), 22-24. doi:10.1038/d41586-019-02935-4
- Giles, M. (2020, April 02). Old-fashioned silicon might be the key to building ubiquitous quantum computers. Retrieved from
<https://www.technologyreview.com/s/610273/old-fashioned-silicon-might-be-the-key-to-building-ubiquitous-quantum-computers/>
- Giles, M. (2020, April 02). President Trump has signed a \$1.2 billion law to boost US quantum tech. Retrieved from
<https://www.technologyreview.com/the-download/612679/president-trump-has-signed-a-12-billion-law-to-boost-us-quantum-tech/>
- Karafyllidis, I. (2015). Quantum Computing.
- Hassi Norlén. (2020). Quantum Computing in Practice with Qiskit® and IBM Quantum Experience®: Practical recipes for quantum computer coding at the gate and algorithm level with Python
- Hebenstreit, M., Alsina, D., Latorre, J. I., & Kraus, B. (2017). Compressed quantum computation using a remote five-qubit quantum computer. *Physical Review A*, 95(5). doi:10.1103/physreva.95.052339
- Hemsoth, N., & Morgan, T. P. (2018, August 17). QISKit Developments Key to IBM Quantum Engagement. Retrieved from

<https://www.nextplatform.com/2018/08/07/qiskit-developments-key-to-ibm-quantum-engagement/>

Hignett, K. (2018, February 16). This new form of light could drive the quantum computing revolution. Retrieved from <http://www.newsweek.com/photons-light-physics-808862>

Horowitz, M., & Grumblin, E. (2019). *Quantum computing: Progress and prospects*. The National Academies Press.

Huang, H., Zhao, Y., Li, T., Li, F., Du, Y., Fu, X., . . . Bao, W. (2017, July 02). Homomorphic Encryption Experiments on IBM's Cloud Quantum Computing Platform. Retrieved from <https://arxiv.org/abs/1612.02886>

Huffman, E., & Mizel, A. (2017). Violation of noninvasive macrorealism by a superconducting qubit: Implementation of a Leggett-Garg test that addresses the clumsiness loophole.

Physical Review A, 95(3). doi:10.1103/physreva.95.032131

IBM Collaborating With Top Startups to Accelerate Quantum Computing. (2021, January 18). Retrieved from

<https://www.ibm.com/blogs/research/2018/04/ibm-startups-accelerate-quantum/>

IBM Just Made a 17 Qubit Quantum Processor, Its Most Powerful One Yet. (n.d.). Retrieved from

https://motherboard.vice.com/en_us/article/wnwk5w/ibm-17-qubit-quantum-processor-computer-google

IBM Q Experience community publishes research. (2021, January 18). Retrieved from

<https://www.ibm.com/blogs/research/2018/03/ibmq-published-research/>

IBM Q in the Arctic: 76.4° North. (2021, January 18). Retrieved from

<https://www.ibm.com/blogs/research/2018/11/ibm-q-arctic/>

IBM Quantum. (n.d.). Retrieved from <https://quantum-computing.ibm.com/>

IBM Quantum Experience. (2021, May 17). Retrieved from

https://en.wikipedia.org/wiki/IBM_Quantum_Experience

Individual Edition. (n.d.). Retrieved from

<https://www.anaconda.com/products/individual#windows>

Ion-based commercial quantum computer is a first. (2018, December 20). Retrieved from

<https://physicsworld.com/a/ion-based-commercial-quantum-computer-is-a-first>

Jordan, S. (n.d.). Quantum Algorithm Zoo. Retrieved from <https://quantumalgorithmzoo.org/>

Knight, W. (2020, April 02). IBM Raises the Bar with a 50-Qubit Quantum Computer. Retrieved from

<https://www.technologyreview.com/s/609451/ibm-raises-the-bar-with-a-50-qubit-quantum-computer/>

Knight, W. (2020, April 02). Quantum Inside: Intel Manufactures an Exotic New Chip. Retrieved from

<https://www.technologyreview.com/s/609094/quantum-inside-intel-manufactures-an-exotic-new-chip/>

Kokail, C., Maier, C., Bijnen, R. V., Brydges, T., Joshi, M. K., Jurcevic, P., . . . Zoller, P. (2019).

Self-verifying variational quantum simulation of lattice models. *Nature*, 569(7756), 355-360. doi:10.1038/s41586-019-1177-4

KurzweilTracking the acceleration of intelligence. (n.d.). Retrieved from

<http://www.kurzweilai.net/nsa-seeks-to-develop-quantum-computer-to-crack-nearly-every-kind-of-encryption>

Lardinois, F. (2019, January 08). IBM unveils its first commercial quantum computer. Retrieved

from

<http://social.techcrunch.com/2019/01/08/ibm-unveils-its-first-commercial-quantum-computer/>

- Lekitsch, B., Weidt, S., Fowler, A. G., Mølmer, K., Devitt, S. J., Wunderlich, C., & Hensinger, W. K. (2017). Blueprint for a microwave trapped ion quantum computer. *Science Advances*, 3(2). doi:10.1126/sciadv.1601540
- Lenzini, F., Janousek, J., Thearle, O., Villa, M., Haylock, B., Kasture, S., . . . Lobino, M. (2018). Integrated photonic platform for quantum information with continuous variables. *Science Advances*, 4(12). doi:10.1126/sciadv.aat9331
- Li, R., Alvarez-Rodriguez, U., Lamata, L., & Solano, E. (2017). Approximate Quantum Adders with Genetic Algorithms: An IBM Quantum Experience. *Quantum Measurements and Quantum Metrology*, 4(1), 1-7. doi:10.1515/qmetro-2017-0001
- Liang, Q., Venkatramani, A. V., Cantu, S. H., Nicholson, T. L., Gullans, M. J., Gorshkov, A. V., . . . Vuletić, V. (2018). Observation of three-photon bound states in a quantum nonlinear medium. *Science*, 359(6377), 783-786. doi:10.1126/science.aao7293
- Linke, N. M., Maslov, D., Roetteler, M., Debnath, S., Figgatt, C., Landsman, K. A., . . . Monroe, C. (2017). Experimental comparison of two quantum computing architectures. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(13), 3305-3310. doi:10.1073/pnas.1618020114
- Manin, Yu. I. (1980). *Vychislimoe i nevychislimoe* [Computable and Noncomputable] (in Russian). Sov.Radio. pp. 13–15.
- Markoff, J. (2014, May 29). Scientists Report Finding Reliable Way to Teleport Data. Retrieved from <https://www.nytimes.com/2014/05/30/science/scientists-report-finding-reliable-way-to-tele>

port-data.html

Mermin, David (28 March 2006).

"Breaking RSA Encryption with a Quantum Computer: Shor's Factoring Algorithm" (PDF). *Physics 481-681 Lecture Notes*. Cornell University.

Meyer, D. A. (1999). Quantum strategies. *Physical Review Letters*, 82(5), 1052.

Mineev, Z. K., McConkey, T. G., Takita, M., Corcoles, A. D., & Gambetta, J. M. (2021, March 18). Circuit quantum electrodynamics (cQED) with modular quasi-lumped models.

Retrieved from <https://arxiv.org/abs/2103.10344>

Monz, T., Nigg, D., Martinez, E. A., Brandl, M. F., Schindler, P., Rines, R., . . . Blatt, R. (2016).

Realization of a scalable Shor algorithm. *Science*, 351(6277), 1068-1070.

doi:10.1126/science.aad9480

Moran, C. C. (2016, June 29). Quintuple: A Python 5-qubit quantum computer simulator to facilitate cloud quantum computing. Retrieved from <https://arxiv.org/abs/1606.09225>

Moran, C. (2019). Mastering Quantum computing with IBM QX. Packt Publishing.

Nagata, K., Kuramitani, K., Sekiguchi, Y., & Kosaka, H. (2018). Universal holonomic quantum gates over geometric spin qubits with polarised microwaves. *Nature Communications*, 9(1). doi:10.1038/s41467-018-05664-w

National Quantum Initiative Act (2018 - H.R. 6227). (n.d.). Retrieved from <https://www.govtrack.us/congress/bills/115/hr6227>

Nemoto, K., Trupke, M., Devitt, S. J., Stephens, A. M., Scharfenberger, B., Buczak, K., . . .

Munro, W. J. (2014). Photonic Architecture for Scalable Quantum Information Processing in Diamond. *Physical Review X*, 4(3). doi:10.1103/physrevx.4.031022

Nigg, D., Muller, M., Martinez, E. A., Schindler, P., Hennrich, M., Monz, T., . . . Blatt, R. (2014).

Quantum computations on a topologically encoded qubit. *Science*, 345(6194), 302-305.

doi:10.1126/science.1253742

On "Quantum Supremacy". (2020, August 16). Retrieved from

<https://www.ibm.com/blogs/research/2019/10/on-quantum-supremacy/>

Open-Source Quantum Development. (n.d.). Retrieved from <https://qiskit.org/>

O'Malley, P., Babbush, R., Kivlichan, I., Romero, J., McClean, J., Barends, R., . . . Martinis, J.

(2016). Scalable Quantum Simulation of Molecular Energies. *Physical Review X*, 6(3).

doi:10.1103/physrevx.6.031007

Pakin, S. (2019, June 10). The Problem with Quantum Computers. Retrieved from

<https://blogs.scientificamerican.com/observations/the-problem-with-quantum-computers/>

Pfaff, W., Hensen, B. J., Bernien, H., Dam, S. B., Blok, M. S., Taminiau, T. H., . . . Hanson, R.

(2014). Unconditional quantum teleportation between distant solid-state quantum bits.

Science, 345(6196), 532-535. doi:10.1126/science.1253512

Porter, J. (2019, September 23). Google may have just ushered in an era of 'quantum supremacy'.

Retrieved from

<https://www.theverge.com/2019/9/23/20879485/google-quantum-supremacy-qubits-nasa>

Preskill, J. (2018). Quantum Computing in the NISQ era and beyond. *Quantum*, 2, 79.

doi:10.22331/q-2018-08-06-79

QEducation. (n.d.). Retrieved from <https://qworld.net/qeducation/>

Qiskit. (2021). Retrieved from <https://github.com/Qiskit>

Qiskit. (2021) Retrieved from <https://qiskit.org/metal>

Qiskit. (2021, April 07). Retrieved from <https://en.wikipedia.org/wiki/Qiskit>

Qiskit - Write once, target multiple architectures. (2021, January 19). Retrieved from

<https://www.ibm.com/blogs/research/2019/11/qiskit-for-multiple-architectures/>

Qiskit 0.26.2 documentation¶. (n.d.). Retrieved from <https://qiskit.org/documentation/#>

Qiskit-Community. (n.d.). Qiskit-community/MicroQiskit. Retrieved from

<https://github.com/qiskit-community/MicroQiskit>

Qiskit-Community. (n.d.). Qiskit-community/qiskit-js. Retrieved from

<https://github.com/Qiskit/qiskit-js/>

Qiskit-Community. (n.d.). Qiskit-community/qiskit-swift. Retrieved from

<https://github.com/Qiskit/qiskit-swift/>

Qiskit. (n.d.). Qiskit/qiskit-tutorials. Retrieved from <https://github.com/Qiskit/qiskit-tutorial/>

Qiskit. (2021, March 22). Starting Today, Anyone Can Design Quantum Hardware with Qiskit

Metal. Retrieved from

<https://medium.com/qiskit/starting-today-anyone-can-design-quantum-hardware-with-qiskit-metal-4fd5dcf4c7cf>

Quantum Darwinism. (2021, May 13). Retrieved from

https://en.wikipedia.org/wiki/Quantum_Darwinism

Quantum Experiences: Q&A with Caltech's Christine Corbett Moran. (2019, February 08).

Retrieved from

<https://www.ibm.com/blogs/research/2016/07/quantum-experiences-qa-caltechs-christine-corbett-moran/>

Quantum computing. (n.d.). Retrieved from

<https://developer.ibm.com/dwblog/2017/quantum-computing-api-sdk-david-lubensky/>

Quantum computing. (2021, May 16). Retrieved from

https://en.wikipedia.org/wiki/Quantum_computing

Quantum computing prizes introduced for users of the IBM Q Experience. (2019, February 07).

- Retrieved from <https://www.ibm.com/blogs/research/2018/01/quantum-prizes/>
- Quantum Repo / basics of quantum computing. (n.d.). Retrieved from <https://gitlab.com/qkitchen/basics-of-quantum-computing>
- Rich, S., & Gellman, B. (2014, January 02). NSA seeks to build quantum computer that could crack most types of encryption. Retrieved from https://www.washingtonpost.com/world/national-security/nsa-seeks-to-build-quantum-computer-that-could-crack-most-types-of-encryption/2014/01/02/8fff297e-7195-11e3-8def-a33011492df2_story.html
- Rodrigo, C. M. (2020, February 10). Trump budget proposal boosts funding for artificial intelligence, quantum computing. Retrieved from <https://thehill.com/policy/technology/482402-trump-budget-proposal-boosts-funding-for-artificial-intelligence-quantum>
- Rundle, R. P., Mills, P. W., Tilma, T., Samson, J. H., & Everitt, M. J. (2017). Simple procedure for phase-space measurement and entanglement validation. *Physical Review A*, 96(2). doi:10.1103/physreva.96.022117
- Santos, A. C. (2016). O Computador Quântico da IBM e o IBM Quantum Experience. *Revista Brasileira De Ensino De Física*, 39(1). doi:10.1590/1806-9126-rbef-2016-0155
- Schiller, J. (2009). *Quantum computers*. BookSurge Publishing?
- Scientists make major quantum computing breakthrough. (2018, March 01). Retrieved from <https://www.independent.co.uk/life-style/gadgets-and-tech/news/quantum-computing-logic-gates-oxford-university-breakthrough-latest-discovery-a8235281.html>
- Shankland, S. (2019, September 18). IBM's biggest-yet 53-qubit quantum computer will come online in October. Retrieved from

- <https://www.cnet.com/news/ibm-new-53-qubit-quantum-computer-is-its-biggest-yet/>
- Sneakernet. (2021, May 21). Retrieved from <https://en.wikipedia.org/wiki/Sneakernet>
- Steiger, D. S., Häner, T., & Troyer, M. (2018). ProjectQ: An open source software framework for quantum computing. *Quantum*, 2, 49. doi:10.22331/q-2018-01-31-49
- Students try hand at cracking quantum code. (2019, February 08). Retrieved from <https://www.ibm.com/blogs/research/2016/06/students-try-hand-cracking-quantum-code/>
- Team, T. Q. (2021, May 27). Learn Quantum Computation using Qiskit. Retrieved from <https://qiskit.org/textbook/preface.html>
- The Physics arXiv Blog. (2014, December 02). The Mathematical Trick That Helped Smash The Record For The Largest Number Ever Factorised By A... Retrieved from <https://medium.com/the-physics-arxiv-blog/the-mathematical-trick-that-helped-smash-the-record-for-the-largest-number-ever-factorised-by-a-77fde88499>
- Trapped Ion Quantum Computing. (n.d.). Retrieved from <https://ionq.com/>
- Uden, T., Louzon, D., Zwolak, M., Zurek, W., & Jelezko, F. (2019). Revealing the Emergence of Classicality Using Nitrogen-Vacancy Centers. *Physical Review Letters*, 123(14). doi:10.1103/physrevlett.123.140402
- Waters, R., & Murgia, M. (2019, September 20). Google claims to have reached quantum supremacy. Retrieved from <https://www.ft.com/content/b9bb4e54-dbc1-11e9-8f9b-77216ebe1f17>
- Wille, R., Meter, R. V., & Naveh, Y. (2019). IBM's Qiskit Tool Chain: Working with and Developing for Real Quantum Computers. *2019 Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE)*. doi:10.23919/date.2019.8715261
- Wootton, D. J. (2017, March 07). Quantum Battleships: The first multiplayer game for a

- quantum computer. Retrieved from
<https://medium.com/@decodoku/quantum-battleships-the-first-multiplayer-game-for-a-quantum-computer-e4d600ccb3f3#.7jthid6v1>
- Wootton, D. J. (2017, June 21). Why we need to make quantum games. Retrieved from
<https://medium.com/@decodoku/why-we-need-to-make-quantum-games-6f8c7bc4ace7#.hlkit1g23>
- Wootton, J. R. (2017). Demonstrating non-Abelian braiding of surface code defects in a five qubit experiment. *Quantum Science and Technology*, 2(1), 015006.
doi:10.1088/2058-9565/aa5c73
- Zhong, M., Hedges, M. P., Ahlefeldt, R. L., Bartholomew, J. G., Beavan, S. E., Wittig, S. M., . . . Sellars, M. J. (2015). Optically addressable nuclear spins in a solid with a six-hour coherence time. *Nature*, 517(7533), 177-180. doi:10.1038/nature14025
- Zyga, L. (2014, November 28). New largest number factored on a quantum device is 56,153. Retrieved from <http://phys.org/news/2014-11-largest-factored-quantum-device.html>
- Zyga, L. (2015, May 27). Quantum computer emulated by a classical system. Retrieved from <https://phys.org/news/2015-05-quantum-emulated-classical.html>
- A description of the Penetrating Hard Targets project. (n.d.). Retrieved from
<https://apps.washingtonpost.com/g/page/world/a-description-of-the-penetrating-hard-targets-project/691/Z3508948>
- (2015, April 15). Breakthrough opens door to affordable quantum computers. Retrieved from
<http://newsroom.unsw.edu.au/news/science-tech/breakthrough-opens-door-affordable-quantum-computers>

Z3509982. (2015, October 11). Crucial hurdle overcome in quantum computing. Retrieved from <http://www.newsroom.unsw.edu.au/news/science-tech/crucial-hurdle-overcome-quantum-computing>

Κβαντικός υπολογιστής. (2020, June 16). Retrieved from https://el.wikipedia.org/wiki/Κβαντικός_υπολογιστής

IBM Unveils Beta of Next Generation Quantum Development Platform. (2021, January 18). Retrieved from <https://www.ibm.com/blogs/research/2019/05/next-gen-ibmqx/>