DAL SUPERCOMPUTER AL QUANTUM COMPUTING

«Quando scienziati e ingegneri si trovano a dover affrontare problemi difficili, si rivolgono ai supercomputer. Si tratta di computer classici molto grandi, spesso dotati di migliaia di *core* di CPU e GPU in grado di eseguire calcoli molto grandi e intelligenza artificiale avanzata. Tuttavia, anche i supercomputer sono macchine a codice binario che si basano sulla tecnologia transistor del XX secolo. In altre parole, fanno fatica a risolvere certi tipi di problemi. Se un supercomputer si blocca, probabilmente è perché alla grande macchina classica è stato chiesto di risolvere un problema con un alto grado di complessità. Quando i computer classici “falliscono”, spesso è a causa della complessità.» (<https://www.ibm.com/it-it/topics/quantum-computing>) Parola di IBM, un'azienda informatica che di macchine per l'ufficio o meglio “per gli affari” se ne intende, da anni impegnata nella corsa alla conquista di quel Nuovo Continente del digitale rappresentato da un oggetto affascinante eppure ancora circondato da un alone di mito e mistero, e che dovrebbe risolvere i problemi di complessità: il computer quantico o meglio quantistico.

Finora l'informatica si è basata su macchine che funzionano seguendo regole – le cosiddette “architetture” – introdotte molti anni or sono principalmente da Turing, Wiener e von Neumann: fino ad oggi, sia le macchine sia le leggi che le governano sono rimaste entro i confini della fisica classica. Per la stragrande maggioranza delle persone quel che avviene nei circuiti di silicio degli odierni PC e smartphone rimane indecifrabile, eppure a grandi linee è possibile farsene un'idea. Un supporto – schede perforate, poi nastri magnetici e infine circuiti sempre più piccoli – viene “letto” tramite una fonte di energia, elettromeccanica o soltanto elettrica, e ogni sua componente una volta “interrogata” risponde in alfabeto binario – aperto-chiuso, acceso-spento, 0-1 – che deriva da una scelta iniziale di adoperare il *logaritmo a base due*. A partire da queste fondamenta si sviluppano tutte le varie possibilità offerte da questa lettura-calcolo, che aumentano di complessità con l'aumentare della velocità e delle componenti presenti, diventate nel frattempo sempre più infinitesimalmente piccole.

Poi è arrivata la meccanica quantistica, in realtà già nota in linea teorica all'epoca dell'invenzione dei cervelli elettronici: basandosi sul principio di indeterminazione di Heisenberg e l'equazione di Schrödinger, ha dimostrato come oltre alle leggi che si credevano universali se ne potevano aggiungere altre, altrettanto valide sebbene in contrasto con le prime, e il mondo dell'informatica non ha tardato ad approfittarne. Negli anni Settanta si lavorò per dimostrare la possibilità di costruire una Macchina di Turing capace di soddisfare le nuove caratteristiche introdotte dalla meccanica quantistica; poi vennero le dimostrazioni teoriche di Charles Bennett e Paul Benioff, infine nel 1982 arrivò il lavoro seminale sul computer quantistico in cui Richard Feynman teorizzava il *qubit*, che a differenza dei bit dal comportamento binario può possedere più valori, o meglio un singolo valore quantistico che corrisponde simultaneamente a più valori classici. La prima vera descrizione di una macchina quantistica universale la si deve a David Deutsch nel 1985, e l'anno seguente il fisico Eric Drexler – lo scopritore del nanomondo – riflette in modo indipendente sulla possibilità di costruire “computer molecolari”. I prototipi di computer a *qubit* sono realizzati nel 1997 dal Centro ricerche dell'IBM di Almaden, ma bisogna aspettare il 2011 per vedere il primo computer quantistico messo in commercio dall'azienda canadese D-Wave, denominato *Vesuvius*, acquistato a fini di ricerca da NASA, Google e dalla Lockheed Martin, la triade del potere del nuovo mondo globalizzato: satelliti, internet e guerra.

Ancora fino a pochi anni fa, questo guazzabuglio quantico era considerato dagli stessi ricercatori un sogno piuttosto lontano, ma quando si ha a che fare con l'*hybris* degli scienziati e con i denari e le

mire di chi li finanzia l'imprudenza non è mai troppa. Nel 2017 è presentato un prototipo commerciale di *quantum computer*, l'IBM Q System One, e nell'ottobre dello stesso anno Google ufficializza che un suo computer quantistico avrebbe completato in 200 secondi un calcolo che una vecchia macchina avrebbe svolto in 10.000 anni. Da lì in avanti il ritmo delle innovazioni accelera, IBM presenta prima il processore quantistico *Eagle*, e nel 2022 il nuovo prototipo, *Osprey*, a 433 qubit, lo stesso anno in cui in Giappone sono commercializzati i primi 3 *quantum computer* portatili. Il resto è cronaca del presente.

Ma come funziona un computer quantistico? Torniamo all'esempio iniziale. «Un processore IBM Quantum è un wafer non molto più grande di quello che si trova in un laptop. Un sistema hardware quantistico ha all'incirca le dimensioni di un'automobile ed è costituito principalmente da sistemi di raffreddamento per mantenere il processore superconduttore alla sua temperatura operativa ultrafredda. (...). Un computer quantistico utilizza *qubit* (bit CUE) per eseguire algoritmi quantistici multidimensionali.» (<https://www.ibm.com/it-it/topics/quantum-computing>)

Dunque, primo requisito è il freddo, per evitare la temuta “decoerenza” ovvero mantenere i loro stati quantistici. Tanto freddo, «circa un centesimo di grado sopra lo zero assoluto», prodotto in modo artificiale adoperando superfluidi ultra-raffreddati con giganteschi costi energetici e ovviamente generando al tempo stesso *calore*. «A queste temperature bassissime, alcuni materiali presentano un importante effetto meccanico quantistico: gli elettroni si muovono attraverso di essi senza resistenza. Ciò li rende “superconduttori”», e quando gli elettroni passano attraverso questi materiali «si accoppiano, formando “coppie di Cooper”. Queste coppie possono trasportare una carica attraverso barriere, o isolanti, tramite un processo noto come *tunneling* quantistico. Due superconduttori collocati su entrambi i lati di un isolante formano una giunzione Josephson».

Per farla breve, sono queste giunzioni Josephson i *qubit* superconduttori, su cui vengono “sparati” «fotoni a microonde», di modo che si possa «controllarne il comportamento e far sì che essi contengano, modifichino e leggano singole unità di informazioni quantistiche.» Non è tanto il *qubit* di per sé a essere di grande utilità, ma il fatto che può collocare le informazioni che contiene in uno «stato di sovrapposizione, che rappresenta una combinazione di tutte le possibili configurazioni del *qubit*. I gruppi di *qubit* in sovrapposizione possono creare spazi computazionali complessi e multidimensionali. In questi spazi, è possibile rappresentare problemi complessi in modi nuovi.» Infine, altra importante caratteristica è rappresentata dalle relazioni che i *qubit* hanno fra di loro, che possono generare un effetto detto “*entanglement* quantistico” e qui arriviamo al dunque: «in un ambiente di *qubit entangled* posti in uno stato di sovrapposizione, ci sono onde di probabilità» che sono «le probabilità dei risultati di una misurazione del sistema. Queste onde possono accumularsi l'una sull'altra quando molte di esse raggiungono il picco in corrispondenza di un particolare risultato, oppure annullarsi a vicenda quando i picchi e le depressioni interagiscono. In entrambi i casi, si tratta di forme di interferenza.»

Ma lasciamo stare le questioni tecniche, troppo esoteriche per noi comuni mortali, e vediamo alcuni recenti sviluppi della *quantum race*. A marzo 2025 la Cina ha annunciato che *Zughongzhi 3.0* – dal nome del matematico cinese che nel quinto secolo dopo Cristo aveva calcolato i valori del *pi greco* – è in grado di superare il risultato ottenuto da *Sycamore*, il processore quantistico di Google di precedente generazione, di sei ordini di grandezza. Nel frattempo però Google ha sfornato a dicembre 2024 *Willow*, un chip quantistico che ha risolto in meno di cinque minuti un calcolo che avrebbe richiesto ad un supercomputer odierno 10 settilioni di anni (cifra con 24 zeri), più dell'età dell'universo. Pare che i due processori siano molto simili in termini di capacità, nello specifico per quanto riguarda l'elemento chiave dei computer quantistici, la correzione degli errori: il gruppo di ricercatori cinese ha raggiunto lo stesso risultato di *Willow*, ottenendo una riduzione degli errori significativa con una griglia di 7x7 *qubit* e intende proseguire per arrivare a 9x9 e poi a 11x11.

Microsoft non è rimasta a guardare e nel febbraio 2025 ha annunciato la creazione di *Majorana 1*, che sfrutterebbe le particelle scoperte dal fisico catanese nel 1937 per far diventare “topologici” i *qubit*, rendendoli così più stabili e resistenti agli errori. I *qubit* per modo di dire “tradizionali”, basati su ioni intrappolati o su quelli superconduttori, sono estremamente sensibili alle interferenze esterne, mentre quelli topologici sarebbero protetti da “intrecci” quantistici che li renderebbero più resistenti alla famosa *decoherence*, il fenomeno che causa la perdita di informazioni quantistiche.

La principale novità risiede in questo concetto di topoconduttore: come sostiene Antonino Caffo, giornalista scientifico e collaboratore dell’ANSA, «si tratta di un materiale che presenta proprietà sia di superconduttività (assenza di resistenza elettrica) sia di isolante topologico (conduzione di corrente solo sulla superficie). In un topoconduttore le particelle di Majorana possono emergere come “quasi-particelle”, cioè entità che si comportano come particelle elementari. I topoconduttori sono cruciali per il calcolo quantistico perché offrono un ambiente ideale per la creazione e la manipolazione dei *qubit* topologici. A temperature estreme, il chip raggiunge la superconduttività, creando uno stato della materia inedito: non solido, liquido o gassoso, bensì topologico, preservando le sue proprietà intrinseche anche se sottoposto a torsioni e alterazioni. Questo stato permette al chip di accogliere particelle singolari, i “fermioni di Majorana”, che veicolano l’elettricità. Grazie alla loro stabilità, questi fermioni risolvono il problema principale dei computer quantistici: l’instabilità dei *qubit*, che spesso mutano dal loro stato 0 e 1 a causa di disturbi, perdendo le loro proprietà quantistiche. Il superconduttore topologico, in grado sia di condurre l’elettricità che di ospitare i fermioni di Majorana, offre protezione da errori e deterioramento. Tale ottimizzazione si traduce in un miglioramento sia delle dimensioni che delle funzionalità del dispositivo.»

E noialtri, della vecchia Europa, come siamo messi in questa competizione? Dopo che nel 2016 la Comunità ha lanciato il suo *Quantum Manifesto*, nel 2018 è partito il programma *Quantum Flagship*, il cui obiettivo «è sostenere la trasformazione della ricerca europea in applicazioni commerciali che sfruttino appieno il potenziale dirompente del quantum (...) finanziando progetti in quattro aree di applicazione principali: calcolo quantistico; simulazione quantistica; comunicazione quantistica; rilevamento quantistico e metrologia.» Nella fase di avvio dell’iniziativa faro (2018-2022), il suo bilancio complessivo ammontava a 152 milioni di EUR per un totale di 24 progetti, con oltre 1.600 ricercatori coinvolti, fase conclusasi con la pubblicazione di un Rapporto nel gennaio 2023 (<https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/news/quantum-tech-flagship-ramp-phase-report>). La fase successiva è in corso di svolgimento, con un bilancio totale di oltre 400 milioni di EUR e più di venti nuovi progetti, e la sua visione a lungo termine «è quella di sviluppare in Europa una cosiddetta Internet quantistica, in cui computer quantistici, simulatori e sensori siano interconnessi tramite reti di comunicazione quantistica».

Venendo alla situazione italiana, in attesa del computer quantistico si lavora al miglioramento dell’HPC (high-performance computing) tramite il Centro nazionale per la ricerca in supercalcolo (ICSC), che coordina la decina di progetti esistenti e facilita la collaborazione tra istituzioni accademiche, centri di ricerca e aziende: «l’obiettivo è trasformare il supercalcolo e il quantum computing in strumenti accessibili e strategici per la crescita economica e scientifica», ha spiegato Daniela Gabellini, direttrice generale della Fondazione ICSC.

In cima alla lista delle eccellenze informatiche italiane c’è il Tecnopolo di Bologna, dov’è attivo il supercomputer *Leonardo* e sono in preparazione nuovi prodigi. A marzo 2025 è stato annunciato l’arrivo del computer quantistico più potente d’Italia, *Iqm Radiance 54*, dal numero di *qubit*, frutto della partnership tra il Cineca (originariamente acronimo di Consorzio Interuniversitario del Nord-Est per il Calcolo Automatico), a cui aderiscono circa settanta università e ha sede centrale a Casalecchio di Reno, e Iqm Quantum Computers, un’azienda leader globale nell’ambito dei computer quantistici superconduttivi con sedi in tutto il mondo. Al Tecnopolo il quantum computer sarà

integrato in *Leonardo*, come aveva preannunciato già due anni fa l'ex rettore dell'Università di Bologna ingegner Francesco Ubertini: «Parliamo di una tecnologia emergente. *Leonardo* fa 250 milioni di miliardi di operazioni al secondo. Per capirci: un'ora di lavoro di *Leonardo* equivale a 920 anni di lavoro di un computer portatile. Il quantistico è una macchina ancora più potente e rapida, ma consuma meno».

Nel frattempo Iqm ha acceso il suo primo computer quantistico a Torino, il 22 maggio 2025, installato nel *data center* del Politecnico. «La macchina installata è dotata di un sistema criogenico avanzato che opera a una temperatura di circa 20 millikelvin, prossima allo zero assoluto (-273,15 °C) e 100 volte più bassa dello spazio profondo. Tale temperatura è necessaria per garantire la coerenza quantistica dei *qubit*. All'interno del criostato, si crea quindi un ambiente ultra-isolato e controllato, che consente le condizioni ideali per il funzionamento di circuiti quantistici estremamente delicati.» (<https://www.polito.it/ateneo/comunicazione-e-ufficio-stampa/poliflash/a-torino-si-accende-il-primo-computer-quantistico-iqm-in>) L'intero sistema copre un'area di circa 4 metri quadri per 3 di altezza, la cui parte centrale è racchiusa in una schermatura che protegge il delicatissimo ambiente da vibrazioni e interferenze elettromagnetiche.

A Napoli l'Università Federico II ha inaugurato nel maggio 2024 il Superconducting quantum computing center, assieme a un computer quantistico di 24 *qubit* superconduttivi «progettato per essere scalabile, modulare e modificabile, al fine di supportare le attività e le esigenze di ricerca e industria, e di promuovere lo sviluppo di una filiera italiana del calcolo quantistico attraverso la formazione di nuove competenze e professionalità» e mira ad ampliare la propria attività «con l'installazione entro la fine del 2024 di un processore quantistico con 40 *qubit*».

In un evento organizzato a marzo del 2025 al Politecnico di Milano da ICSC e da IFAB (International Foundation Big Data and Artificial Intelligence for Human Development), fondazione del Tecnapolo di Bologna, Sergio Zazzera di Eni ha presentato HPC6, il supercomputer aziendale operativo da novembre 2024. Con una potenza di picco di 606 PFlops (oltre 600 milioni di miliardi di operazioni al secondo), si colloca al quinto posto a livello globale e primo in Europa. Adoperato per effettuare scansioni accurate della struttura geologica del sottosuolo, «esattamente come farebbe una Tac», ma anche per migliorare l'operatività degli impianti industriali, migliorare l'accuratezza degli studi geologici e fluidodinamici per lo stoccaggio dell'anidride carbonica, per sviluppare batterie più performanti, ottimizzare la filiera dei biocarburanti, sviluppare materiali innovativi per applicazioni nei settori della bio-chimica e, infine, per simulare il comportamento del plasma nella fusione a confinamento magnetico.

Per l'ennesima volta la favoletta della tricotanza ipertecnologica a vantaggio dell'ambiente e dell'uomo, che di passaggio è anche quella raccontata dall'industria nucleare, che della natura e delle creature è grande amica! Il tutto in vista della fantomatica transizione energetica, che in realtà sarà una pura e semplice addizione, anzi, moltiplicazione delle fonti di energia, in vista della produzione che si sogna *illimitata* di quell'elettricità di cui la civiltà cibernetica ha un bisogno sfrenato, al punto da voler succhiare altra linfa all'atomo, di cui si progetta – molto probabilmente, si spera, invano – sfruttarne non solamente il potere scatenato dalla fissione, la violenta divisione in due delle particelle, ma pure quello che deriverà dall'ultimo abbraccio mortale della materia, la fusione.

Frattanto i cantori delle magnifiche sorti continueranno ad innalzare litanie funebri, travestite da Odi alla potenza, come questi versi dell'infame Neruda che tra un'Ode a Stalin e quelle ai più umili alimenti, trovò il modo di magnificare il nucleare.

ODE ALL'ATOMO, Pablo Neruda, 1954

Piccolissima
stella
sembravi
per sempre
sepolta,
e nel metallo, nascosto,
il tuo diabolico
fuoco.
Un giorno
bussarono
alla tua minuscola
porta:
era l'uomo.
Con una
scarica
ti liberarono,
vedesti il mondo,
uscisti
nel giorno,
percorresti
città,
il tuo gran fulgore arrivava
a illuminare le esistenze,
eri
un frutto terribile
d'elettrica bellezza,
venivi
a affrettare le fiamme
dell'estate,
e allora
giunse
armato
d'occhiali di tigre
e armatura,
con camicia quadrata,
con sulfurei baffi
e coda di porcospino,
giunse il guerriero
e ti sedusse:
dormi,
ti mormorò,
avvolgiti tutto,
atomo, che sembri
un dio greco,
una primaverile
modista parigina,
adagiati
sulla mia unghia,
entra in questa cassetta,
e allora
il guerriero
ti mise nel suo gilè
come se fossi soltanto
una pillola
nordamericana,
e se ne andò per il mondo
e ti lasciò cadere
a Hiroshima.
Ci svegliammo.

L'aurora
si era consumata.
Tutti gli uccelli
caddero calcinati.
Un odore
di feretro,
di gas delle tombe,
tuonò per gli spazi.
Ascese orrenda
la forma del castigo
sovrumano,
fungo cruento, cupola,
gran fumata,
spada
dell'inferno.
Ascese bruciante l'aria
e si sparse la morte
a onde parallele,
e raggiunse
la madre addormentata
col suo bambino,
il pescatore del fiume
e i pesci,
la panetteria
e i pani,
l'ingegnere
e i suoi edifici,
tutto fu polvere
che mordeva,
aria assassina.
La città
sgretolò i suoi ultimi alveoli,
cadde, cadde d'un tratto,
demolita,
fradicia,
gli uomini
furono d'improvviso lebbrosi,
afferravano
la mano dei figli
e la piccola mano
rimaneva nella loro.
Così, dal tuo nascondiglio,
dal segreto
manto di pietra
dove il fuoco dormiva,
ti trassero,
scintilla accecante,
luce rabbiosa
per distruggere le vite,
per infestare lontane esistenze,
sotto il mare,
nell'aria,
sulle spiagge,
nell'ultimo
gomito dei porti,
per cancellare
i semi,
per assassinare i germi,
per ostacolare la corolla,

ti destinarono, atomo,
a lasciare rase al suolo
le nazioni,
a tramutare l'amore in nera
pustola,
a bruciare cuori ammonticchiati,
ad annebbiare il sangue.
Oh folle scintilla,
torna
nel tuo sudario,
sotterrati
nei tuoi strati minerali,
torna ad essere pietra cieca,
non dar retta ai banditi,
corrotti invece
alla vita, all'agricoltura,
soppianta i motori,
stimola l'energia,
feconda i pianeti.
Non hai più
segreti
cammina
in mezzo agli uomini
senza maschera
terribile
affrettando il passo
e propagando
i passi della frutta
separando
montagne,
raddrizzando fiumi,
e fecondando,
atomo,
straboccata
coppa
cosmica,
torna
alla pace del grappolo,
alla velocità della gioia,
torna al recinto
dalla natura,
mettiti al nostro servizio,
e anziché le ceneri
mortalì
della tua maschera,
anziché gli inferni scatenati
della tua collera,
anziché la minaccia
del tuo terribile chiarore, dacci
la tua sussultante
indocilità
per il bene dei cereali,
il tuo magnetismo sfrenato
per fondare la pace fra gli uomini,
e così non sarà inferno
la tua luce abbacinante,
ma solo felicità,
mattutina speranza,
contributo terrestre.