

Spillere hjælper kvantecomputeren på vej

Jens Jakob W.H. Sørensen, Mads Kock Pedersen og Jacob Friis Sherson, AU Ideas Center for Community Driven Research

Vi vil ved hjælp af et online socialt computerspil forsøge at løse en aktuell og meget ressourcekrævende teknologisk udfordring – at designe verdens kraftigste kvantecomputer. I Quantum Moves skal spillerne på en sjov og nem måde udforske og udvikle kvantecomputerens fulde potentiale. Spillet er foreløbigt blevet spillet mere end 350.000 gange, hvilket har leveret enorme mængder af data til en grundig sammenligning af spillerenes og computeralgoritmernes effektivitet i at løse udfordringerne. Foreløbige resultater viser, at den menneskelige hjernes evne til multidimensioneel processering og intuition tillader store dele af spillerne at udkonkurrere computerne. En anden drøm i scienceathome.org projektet beskrevet i denne artikel er at levere spilbaseret undervisning på gymnasieniveau og gennem det helt nye læringsunivers, studentResearcher.org, at uddanne den almindelige befolkning til ikke bare at løse men også at foreslå nye forskningsudfordringer.

Introduktion

I et laboratorium er det ofte nødvendigt at arbejde med komplekse problemer som ikke kan beskrives analytisk med matematik. Forskere kan så systematisk ændre dele i deres eksperiment og håbe på at finde en god løsning. En computer kan i princippet regne sig frem til en god løsning, men det kan tage flere år. Den tredje vej ville være at forskerne anvendte deres forståelse og intuition til at guide computeren, som kan tage forskerens (forhåbentlige) gode bud på løsninger og optimerer dem til perfektion. Hvis mange folk – ikke kun forskere – bidrog med løsninger som computeren forbedrer kan man udvælge de bedste. Ved at analysere mønstre i de bedste løsninger kan man ikke kun løse sit problem men opnå en ny indsigt, der muliggør løsningen af en lang række relaterede problemer. Dette er essensen bag den mest ambitiøse version af det nye fænomen citizen science.

Bruger-drevet forskning/citizen science

Citizen science er, når manden på gaden bliver inddraget i løsningen af konkrete forskningsudfordringer [1]. Selvom feltet er relativt ungt, er antallet af projekter, som benytter sig af citizen science, i eksplosiv vækst. De gør det alle på forskellige måder og med hvert deres mål for øje. Projekterne spænder fra SETI@HOME, hvor man hjælper med at lede efter liv i rummet ved at donere den computerkraft, som man ikke bruger på sin computer [2], til eBird der lader fuglespottere indberette de fugle, som de observerer for at holde øje med træk mønstrene [3].

Et af de mest populære citizen science projekter til dato er Galaxy Zoo. Det hele startede da Kevin Schawinski i 2007 som en del af sit ph.d.-studie blev bedt om at kigge på mere end 900.000 billeder taget af galakser og klassificere om det var en spiral galakse eller ej. Det var en enkel opgave men krævede meget tid og var ifølge ham selv utrolig kedeligt, og efter en uges hårdt arbejde havde han kun nået 50.000 galakser. Det fik ham til at tænke på, om man ikke kunne gøre det på en anden måde. Da computere ikke er gode til at genkende objekter i et billede, lavede han i stedet en

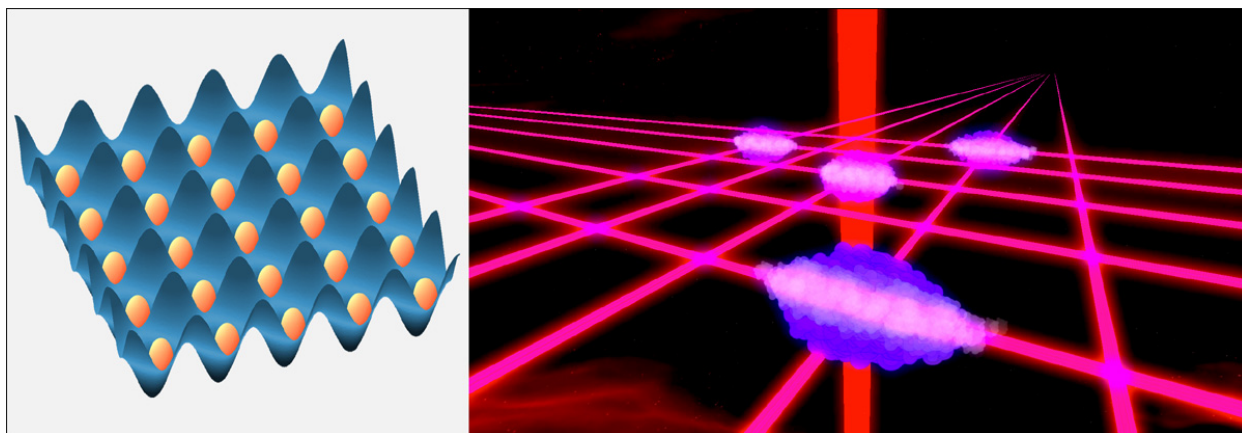
hjemmeside hvor alle kunne gå ind og få præsenteret et af billederne, og så skulle de bare afgøre om det var en spiral eller ej. Til hans egen store overraskelse blev projektet en kæmpe succes; 24 timer efter at de havde lanceret projektet klassificerede brugerne mere end 70.000 galakser i timen, og i dag har projektet mere end 1 million brugere som hjælper med at klassificere langt mere end de oprindelige 900.000 galakser [4].

Den opgave som brugerne bliver stillet i Galaxy Zoo hører måske ikke hjemme blandt de mest krævende, hvilket var et gennemgående træk for alle Citizen Science projekter indtil FoldIt blev lanceret i 2008. De var startet på samme måde som SETI@HOME ved bare at være en pauseskærm, som man installerede og så prøvede en computeralgoritme om den kunne finde den optimale måde et bestemt protein kunne foldes på. Efter et stykke tid begyndte de at høre fra en del af deres brugere om de ikke kunne få lov til at folde proteinerne selv, da de mente at de løsninger, som computeren afprøvede, var helt håbløse og at de kunne gøre det meget bedre selv. Da forskerne bag projektet ikke selv var tilfredse med deres computeralgoritme, begyndte de at lave et computerspil, hvor man kunne folde proteiner, og kæmpe imod de andre spillere. Spillet har indtil nu været en succes og igennem spillet har forskerne været i stand til at udvikle nye algoritmer til proteinfoldning som er de gamle langt overlegne [5].

Vi vil skabe en citizen science tilgang til kvantemekanik. Vi fokuserer særligt på problemer indenfor kvantecomputeren.

Kvantecomputere

Hvert år bliver computerkomponenter mindre og mere kraftfulde. Ingeniører bliver i højere grad nødt til at kompensere for atomfysikkens særlige spilleregler (fx tunnelering) formuleret i kvantemekanikken, når de skal udvikle nye, mindre og hurtigere computere. I stedet for at kompensere for kvanteeffekterne vil kvantecomputeren udnytte dem til at skabe regnekraft på en helt ny skala. Vi giver her en kort introduktion til kvantecomputerens særlige egenskaber, da vi tidligere har beskrevet konceptet i [6].



Figur 1. Til venstre: Atomer fanget i en lysfælde. De enkelte atomer i fælden er kvantebits. Til højre: En visualisering af dynamikken i Quantum Moves. Atomerne er repræsenteret ved blå skyer. Et atom er blevet fanget i den røde laserstråle. Ved at flytte atomer på en passende måde kan de realisere en kvantecomputer.

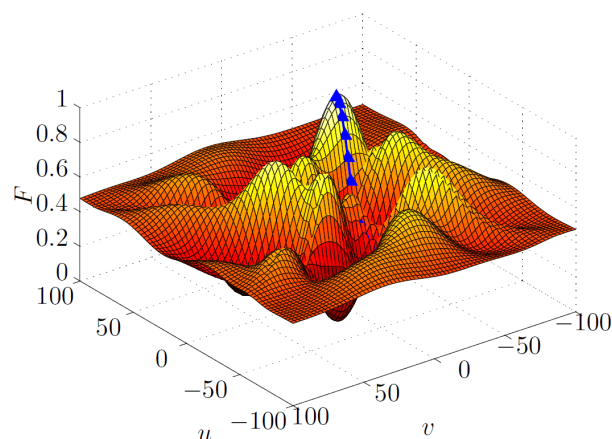
Superpositionsprincippet er fundamentalt i kvantefysikken: atomer kan eksistere i flere forskellige tilstande samtidig. I en kvantecomputer benyttes enkelte kvantepartikler (fx atomer) som kvantebits, der kan være 0 og 1 på samme tid. Det betyder, at n kvantebits kan være i 2^n forskellige tilstande samtidigt. Denne eksponentielt hurtige vækst i kapacitet gør, at selv en lille kvantecomputer med nogle hundrede eller få tusinder kvantebits (modsat milliarder i en klassisk computer) kan foretage enorme mængder af beregninger på en gang, og dermed udkonkurrere alle nuværende computere tilsammen.

På Fysisk Institut i Aarhus arbejder vi i øjeblikket på at bygge en kvantecomputer, hvor vi bruger neutrale atomer som kvantebits. Atomerne kan fanges i en fælde af lys, som giver et potentiale-landskab meget lig en æggebakke (se figur 1). Derved skabes en kunstig krystal af lys, og med det rette valg af laserlys vil atomerne søge mod fordybningerne i æggebakken. Vi har tidligere vist, at kvantecomputeren kan initialeres ved at lægge præcis et atom i hver brønd [7]. Det eneste der mangler for at det er en kvantecomputer, er teknikken til at samle atomer op, flytte dem rundt og aflevere dem i hvile i en ny brønd [8]. Vi er kommet et stykke af vejen ved at skabe en såkaldt lyspincet; en laser stråle, der er så fokuseret, at den kun rammer et enkelt atom i krystallen [7]. Som med lyskrystallen vil det rigtige valg af laserens bølgelængde betyde, at atomet tiltrækkes til positionen med størst lysintensitet, og vi kan samle atomet op og flytte det rundt.

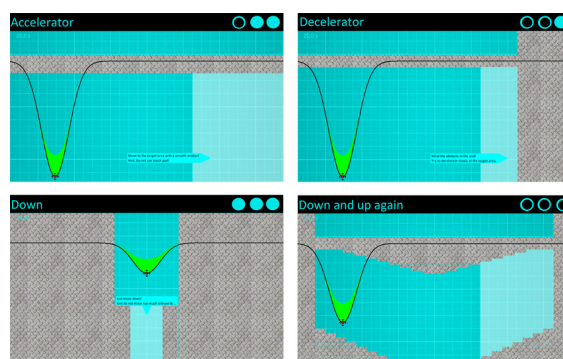
Transporten af atomet skal foregå ekstremt hurtigt for at bevare kvantebitsenes tilstande. Hvis vi flytter atomet på den forkerte måde vil atomet ikke være i hvile når pincettens bevægelse stopper og kvanteberegningen vil fejle. Det svarer til at gå meget hurtigt mens man holder et glas med vand. Hvis man ikke passer på, skulper det over – en simpel men meget udfordrende opgave.

Oprindeligt forsøgte vi med computerberegninger til at løse problemet. På computeren beskrives problemet i termer af to kontrolparametre: positionen og styrken af

lyspincetten til ethvert tidspunkt i bevægelsen. I analogien med vandet beskriver kontrolparametrene måden man bevæger glasset på. Computeren opererer ved at finjustere alle kontrolparametrene så hver ændring giver en lidt bedre score. Computeren foretager mange successive opdateringer indtil den får den ønskede score (se figur 2).



Figur 2. Et fiktivt kontrollandskab af kontrolparameterne u og v . Langs z -aksen ses overlappet mellem start- og sluttilstanden, som kvaliteten af et par af kontrolparametre (u, v) . De blå trekanten viser de successive opdateringer i kontrollandskabet som en computer foretager.

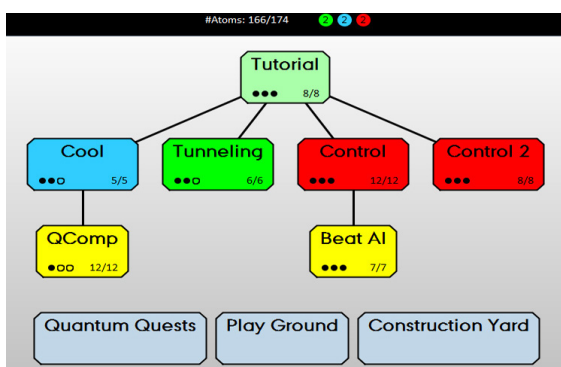


Figur 3. Et udvalg af banerne i Control-programmet, som træner spillerne i hvordan ændringer i lyspincettens intensitet og position påvirker atomets udbredelse.

For realistiske problemer er kontrollandskabet uhyggeligt kompliceret med mange falske maksima. Metodens kvalitet er derfor stærkt afhængig af startpunktet og hvor hurtigt computeren skal flytte atomet. Computerens løsninger var ofte meget komplicerede og uden nogen klar fysisk mening, og vi var overbeviste om at der måtte findes bedre løsninger. Derfor har vi udviklet spillet Quantum Moves, hvor spillere kan få lov til at styre laserens position og intensitet (kontrolparametrene som er x - og y -akserne i figur 3) som funktion af tiden. For hvert spil gemmes det fulde trajektorie af kontrolparametre og når den globale high-score er høj nok, kan spillernes musebevægelser oversættes direkte til den bevægelse laserstrålen skal følge i laboratoriet.

Quantum Moves

Quantum Moves er blevet udviklet med inspiration fra online casual games. Ligesom i Angry Birds skal spillerne opnå en bestemt score for at låse de næste baner op. Banerne er samlet i forskellige labs med hvert sit formål – se figur 4.



Figur 4. Hovedskærmen i Quantum Moves. Her ses det program spillerne skal igennem før de kommer til de videnskabelige udfordringer.

Efter en kort introduktion til spillet føres spillerne videre gennem fire *skill-labs*, som træner de basale færdigheder. Til sidst kommer de *videnskabelige labs*, QComp og Beat AI, hvor spillerne skal forsøge at

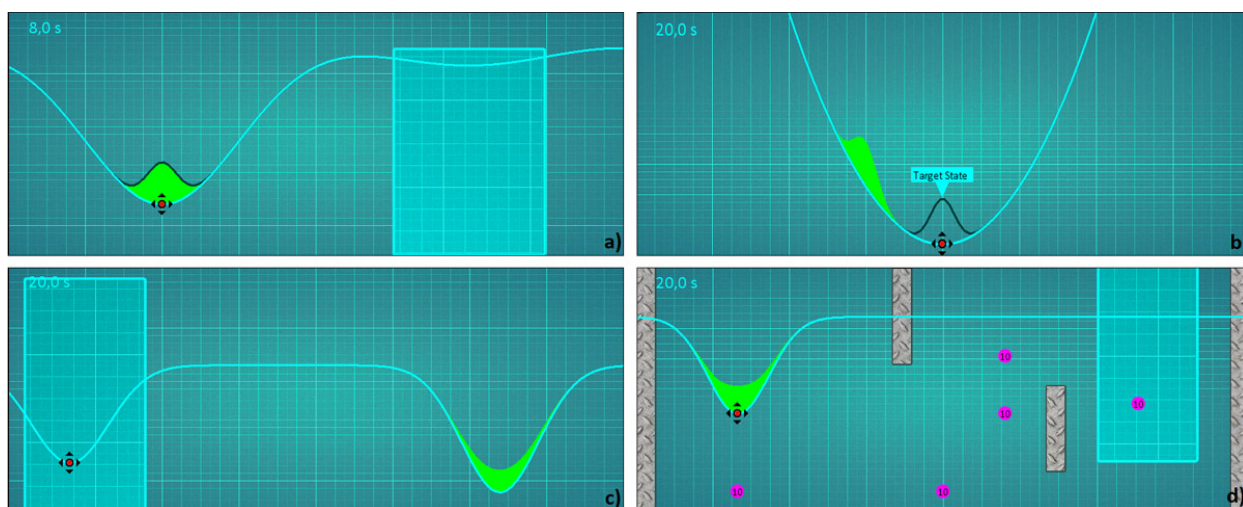
slå computeren. I Skill-labs skal spillerne opbygge en basal forståelse af de kvantemekaniske effekter, som de kan udnytte til at styre atomet med pincetten. Spillerne sendes derfor igennem et temmelig omfattende træningsprogram før de videnskabelige udfordringer.

På figur 3 ses banerne i Control-programmet. Her lærer spillerne hvordan ændringer i laserens intensitet påvirker atomet. Hvis intensiteten er meget høj så kan man lettere flytte atomet uden at det *skvulper*. I vand-analogien kan det forstås på to måder; dels svarer det til at man lettere kan flytte vand hurtigt i et halvfyldt glas end i et fyldt og dels til, at det er nemmere at flytte vand i en beholder med stejle kanter end i et fladt fad. I det sidste tilfælde er substansen simpelthen for modtagelig overfor pludselige bevægelser. De andre Skill-labs træner spillerne i at anvende tunnelering af atomet mellem forskellige brønde og i at bevæge laserens så rystelser i atomet forsvinder.

I QComp findes de udfordringer som vi lige nu står overfor at skulle løse for at kunne bygge en kvantecomputer. I Beat AI præsenteres spillerne for lidt mere abstrakte kvantefysiske udfordringer. Formålet med disse baner er, at sammenligne spillernes succesrate med computerens. Spillerne anvender meget kompliceret mønstergenkendelse og intuition til at løse banerne i forhold til den relativt simple computer algoritme beskrevet ovenfor. Det giver spillerne et globalt overblik i forhold til computeren. Hvor spillerne udkonkurrer computeren, identificerer vi så, hvilke strategier spillerne har fundet frem til. I ånd med forskerne i laboratoriet beskrevet i introduktionen vil denne viden forhåbentligt hjælpe udviklingen af nye og forbedrede optimeringsalgoritmer og dermed gøre visse former for kunstig intelligens lidt mere intelligent.

Foreløbige resultater fra Quantum Moves

Selvom vi kun har frigivet en beta udgave af spillet er det gennem det seneste år blevet spillet mere end 350.000 gange af over 3.000 spillere. Eksempler på de udfordringer, hvor vi sammenligner spillerne med computerne, er de fire baner vist på figur 5.



Figur 5. De fire baner i spillet som vi har analyseret. a) Transport, b) QShakeIt, c) BringHomeWater og d) Wiggle. Den turkise kurve viser den potentielle energi og brønden på denne kurve angiver positionen af laserpincetten. Det grønne vand viser atomet – eller mere præcist atomets bølgefunktion.

Den første bane, Transport, beskriver en af de centrale udfordringer i at udnytte atomerne i lyskrystallen til en kvantecomputer. Her skal spillerne flytte atomet fra venstre side til det blå målområde i højre side, og atomet skal ligge stille til sidst. Spillernes hurtige bevægelse af laseren vil ryste atomet og tilføje atomet energi. Spillerne skal derfor svinge laseren således at energien fjernes fra atomet igen. For at lære spillerne dette, introducerede vi QShakeIt (anden bane). Her er laserens intensitet konstant (krumningen på parabeln), men ved at svinge laseren fra side til side kan spillerne få atomet til at ligge stille i bunden af laseren. I den tredje bane BringHomeWater skal spillerne hente et atom og bringe det tilbage i hvile.

At foretage en grundig sammenligning af spillere og computer kræver enorme mængder af computerberegninger, og vi er langt fra færdige med de mange analyser. Af de tre ovennævnte spil har vi i første omgang koncentreret os om BringHomeWater. Foreløbige beregninger viser, at ca. 15 % af spillerne var bedre end computeren. Når løsningerne må være langsomme nok er computeren meget hurtig til at finde løsninger, men når løsningerne skal være hurtige fejler computeren. Dette hænger sammen med at kontrollandskabet bliver betydeligt mere kompliceret for de korte tider, hvor forskellen imellem strategierne bag de gode løsninger er meget stor. Efter få forsøg kan mennesker derimod bevidst eller ubevidst identificere disse gode strategier. Spillerne kan fx se en god strategi og insistere på denne selvom de først får dårlige resultater. Ved at give spillernes løsninger til computeren har vi udviklet en helt ny Man-Machine optimeringsalgoritme, som har sat os i stand til at finde løsninger som var tre gange hurtigere end de rent computerbaserede løsninger. De bedste spillere benytter i BringHomeWater en af to strategier. I den første flyttes den venstre laser til den højre side af atomet, før atomet bliver samlet op. De to laserpincetter skal så lægges oven i hinanden på det første stykke på vej hjem, hvilket gør det muligt at få en stor startacceleration af atomet. Imens atomet bringes tilbage svinges laseren således at rystelser i atomet fjernes. Den anden strategi er at bringe laseren utroligt tæt på atomet og lave en hurtig kvantetunnelering, hvorefter atomet bringes tilbage. De bedste spillere kan gøre dette på under et sekund i spillet.

I spillet Wiggle har vi prøvet at stille en helt ny type af problemer ved at indføre forhindringer, hvor man dør og får en score på 0 hvis atomet rammer. Det viser sig at optimeringsalgoritmerne har meget svært ved at løse den type problemer, det er fordi kontrol-landskabet er helt fladt, da alle de veje hvor atomet vil ramme en forhindring vil give scoren 0. Computeren vil derfor ikke vide i hvordan den skal forandre startgættet for at finde en løsning. Til gengæld kan vores spillere se forskellige grader af død, man kan være "helt-håbløst-død", eller "lige-ved-at-klare-det-død". Spillerne kan derved bruge den ekstra information til at løse problemet.

Disse resultater illustrerer altså tydeligt, hvor fantastisk effektiv den menneskelige hjerne kan være til at løse komplekse problemer, hvis disse kan bringes på

en tilstrækkeligt grafisk form til at udnytte vores fulde potentiale.

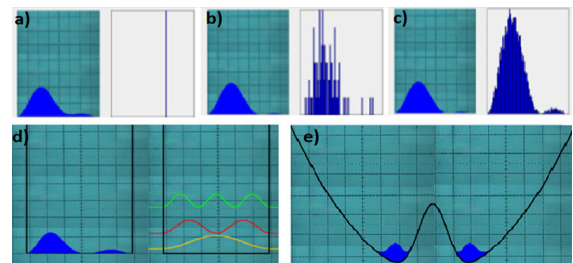
Spil-baseret undervisning

Som nævnt ovenfor, mener vi, at det er utroligt vigtigt at give spillerne så stor en forståelse af den kvantefysiske proces som muligt. Det er en stor didaktisk udfordring, som vi i de sidste to år har øvet os på ved at designe små læringsforløb af 2-20 timers varighed og implementere dem i gymnasieundervisningen ved ca. 10 testklasser [9]. Hvert forløb var designet med to store fokusområder for at øge motivationen:

1. Brugen af spil og grafiske illustrationer i undervisningen
2. Give et klart link fra elevernes pensum til vores forskningsudfordring

Vi har deltaget i gymnasieforløb med fokusområderne klassisk fysik, kvantefysik, datalogi, algoritmer og formidling. Efter hvert forløb foretager vores hold af didaktikere en evaluering med eleverne, og resultaterne bruges i udviklingen af de næste forløb.

Figur 6 giver eksempler på vores grafiske applikationer til at introducere basale kvantefysiske fænomener som sammenhængen mellem bølgefunktionen og målinger, formen af stationære tilstande i forskellige potentialer som fx en partikel i en brønd og til sidst opførslen af et atom ved en energibarriere for at illustrere konceptet bag kvantetunnelering, der bl.a. er essentiel i BringHomeWater-udfordringen og er ansvarlig for radioaktivitet og fusionsprocesser i Solen.



Figur 6. Grafiske applikationer fra undervisningen. a,b,c) En målings-applikation som viser hvordan man ved flere målinger på identisk præparerede bølgefunktioner kan genskabe bølgefunktionen fra målingsresultaterne. d) Superpositions-applikation, hvor brugerne kan skabe superpositioner af stationære tilstande, og se hvordan superpositionerne udvikler sig i tid. e) En interferens-applikation hvor man kan se resultatet af, at samle to adskilte bølgefunktioner i den samme brønd.

Udover de noget abstrakte forløb i kvantefysik har vi også forløb i klassisk fysik. Det viser sig nemlig at atomets bevægelse i lyspincetten minder rigtig meget om et pendul eller en fjeder i bevægelse. Ved at forklare de klassiske Newtonske ligninger for bevægelserne kan vi altså opbygge en intuition for potentiel og kinetisk energi, som kan bruges til løsninger af kvanteproblemet. Inspireret af professions-simuleringsspillet drabs-sag Melved [6] har vi udviklet en aktivitet med tre eksperter: En teoretiker, en eksperimentalfysiker og en simuleringseksperter. Eleverne arbejder først i en af

rollerne og mødes derefter med en repræsentant fra hver af de andre roller, hvorefter de skal sammenligne erfaringer og udfærdige et samlet præsentationsprodukt. I de tidlige forløb var elevernes egen vurdering af det faglige udbytte meget lavt. Siden da har vi fokuseret intenst på at inddrage deres eget pensum så meget som muligt, hvilket på det seneste har givet udslag i højere rapporteret læringsudbytte.

Det er som sagt vigtigt at give spillerne en så dyb forståelse af problemets karakter som muligt, og jo større kognitiv indsats problemet kræver jo sværere bliver denne udfordring; vores udfordring ligger i den tunge ende af sværhedsgraden for citizen science projekter. Stort set alle nuværende citizen science projekter ligger i bunden af skalaen over brugerinnovation i den forstand, at det er forskerne, der stiller problemerne og spillerne der løser dem. Det vil vi gerne ændre i fremtiden ved at uddanne vores spillere i en grad, der sætter dem i stand til at formulere deres egne forskningsproblemer. Til det formål er vi ved at udvikle et online læringsmiljø, studentResearcher.org, hvor vi tager al vores erfaring fra gymnasiebesøgene og udvikler online individuelle læringsforløb, der ideelt set skal kunne tilpasse sig i form og niveau til den enkelte, uanset om det drejer sig om en ufaglært tømrer, en pensioneret politibetjent eller en fysikstuderende på universitetet. Ligesom med arbejdet med at bygge en stor-skala kvantecomputer er det didaktiske projekt naturligvis enormt krævende, og vi tager kun små skridt mod drømmen af gangen, men med hjælp fra de mange fysikinteresserede mennesker rundt omkring i verden er vi sikre på at begge drømme nok skal gå i opfyldelse engang.

Vil du være med?

Vil du være med til at udvikle The Quantum Moves?

- Så meld dig som beta-tester. Skriv en mail til: coderteam@phys.au.dk
- Hvis du underviser i fysik/matematik/datalogi og har lyst til at bruge spillet i din undervisning eller opbygge et undervisningsforløb omkring spillet så skriv en mail til sherson@phys.au.dk.

Besøg os på vores hjemmeside: www.scienceathome.org

Litteratur

- [1] Societize Project (2013). Green Paper on Citizen Science: Citizen Science for Europe – Towards a better society of empowered citizens and enhanced research. En rapport skrevet af Societize Projekt for EU i 2013.
- [2] David P. Anderson, Jeff Cobb, Eric Korpela, Matt Lebofsky, and Dan Werthimer (2002). Seti@home: an experiment in public-resource computing. *Communications of the ACM*, **45**(11):56-61.

- [3] B.L. Sullivan (2006). More than memories: From your backyard to places across North America, eBird keeps track of sightings. *BirdScope* 20:1.
- [4] Galaxy Zoo. The Story So Far, <http://www.galaxyzoo.org/#/story>.
- [5] FoldIt About, <http://fold.it/portal/info/about>
- [6] Sidse Damgaard Hansen, Rikke Magnussen og Jacob Friis Sherson. Demokratiseret forskning og spilbaseret undervisning, *Kvant* nr. 2, 2012.
- [7] Jacob F. Sherson, Christof Weitenberg, Manuel Endres, Marc Cheneau, Immanuel Bloch, & Stefan Kuhr. Single-atom-resolved fluorescence imaging of an atomic Mott insulator. *Nature* **467**, 68-72 (2010).
- [8] Christof Weitenberg, Stefan Kuhr, Klaus Mølmer, & Jacob F. Sherson. Quantum computation architecture using optical tweezers. *Phys. Rev. A* **84**, 032322 (2011).
- [9] Rikke Magnussen, Sidse Damgaard Hansen, Tilo Planke, & Jacob Friis Sherson. Games as a Platform for Student Participation in Authentic Scientific Research. *EJEL* **12**, 258-269 (2014).



Jacob Friis Sherson er lektor ved Institut for Fysik og Astronomi (IFA), Aarhus Universitet, og er leder af det tværfaglige AU Ideas Center for Community Driven Research (CODER). Han har gennem både eksperimentelt og teoretisk arbejde med kolde atomare gasser bidraget til udviklingen mod en stor-skala kvantecomputer.



Jens Jakob W.H. Sørensen er ph.d.-studerende i fysik og arbejder med udvikling af de computeralgoritmer som bruges til løsning af banerne i Quantum Moves. Han interesserer sig også for fysikken bag atomerne i lyskrystallen.



Mads Kock Pedersen er kandidatstuderende i fysik og har i sit speciale arbejdet med at analysere spillernes data fra Quantum Moves. Han er fagligt ansvarlig for udviklingen af den nye læringsplatform studentResearcher.org.