

Q REPORT

양자정보과학 리포트

양자(Quantum)기술 분야 글로벌 시장 조사 및 분석



CONTENTS

I. 개요	3
1. 들어가며	4
2. 기술개요	4
3. 시장개요	7
II. 동향 분석	13
1. 기업 동향 분석	14
1-1. 대기업별 양자 관련 이슈	14
1-2. 기업별 양자 관련 Financing 이슈	22
2. 양자스타트업 투자동향 분석	29
2-1. 분석개요	29
2-2. 분석내용	30
3. 논문 클러스터링 분석	36
3-1. 분석개요	36
3-2. 분석내용	37
III. 결론	68
<부록>	75
별첨 1. 주요 양자컴퓨팅 기업 리스트	76
별첨 2. 양자 컴퓨팅 마켓 맵	83
별첨 3. 구간별 논문 검색결과	84



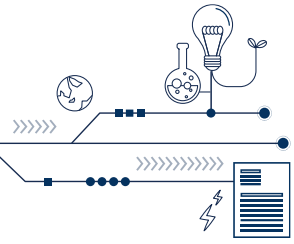
양자(Quantum)기술 분야 글로벌 시장 조사 및 분석

개요

1. 들어가며
2. 기술개요
3. 시장개요



개요



I-1. 들어가며

본 보고서는 “양자(Quantum)기술 분야 글로벌 시장 조사 및 분석”에 관한 보고서로, 아래와 같은 3가지 관점을 통해 글로벌 양자시장에서 어떤 기술들이 개발되고 있는지, 개발 자금은 어디로/얼마나 흐르고 있는지 분석함으로써 양자 기술 분야의 글로벌 시장동향을 살펴봄

- 01 양자 기업들의 기술개발동향
- 02 양자 스타트업의 투자동향
- 03 양자 기술 관련 논문 클러스터링 분석

I-2. 기술개요

2-1. 양자 기술의 정의

양자 기술 또는 양자정보과학기술(quantum information science & technology)은 “양자역학적 특성을 정보통신기술에 적용하기 위하여 양자상태를 생성(쓰고), 제어(전송, 저장, 처리), 측정(읽고) 및 분석하는 기술”로, 일반적으로 양자컴퓨팅, 양자통신, 양자센싱으로 구분됨(IITP, 2020)

양자컴퓨터	양자통신	양자센싱
양자역학적 현상을 이용하는 양자컴퓨터는 상호작용하는 양자비트(qubit, 큐비트)를 기반으로 하며 확률적이며 가역적 연산방법을 사용하는 컴퓨팅 기술	송신자와 수신자 사이에 단일광자 또는 공유된 얽힘에서 고전 통신 기술의 도움으로 양자 정보(예를 들면, 광자 또는 원자의 상태)를 전달하는 기술	양자 원리를 활용함으로써 고전 시스템을 사용한 센싱·계측 기술의 분해능, 민감도, 측정영역의 한계를 극복하는 기술

2-2. 각 나라별 양자 기술의 명칭 및 정의

[표] 각 나라별 양자 기술의 명칭 및 정의

국가	명 칭	정 의
미국	양자정보과학(Quantum Information Science(QIS) (NQI('18.12))	양자역학과 정보이론이 합쳐진 기술 (정보 저장, 전송, 조작, 컴퓨팅 및 측정을 위한 양자역학)
유럽	양자 기술(Quantum Technology) (Quantum Manifesto('16))	양자역학의 성질을 실제 응용분야에 사용 가능하도록 변화시키는 새로운 기술 (양자통신, 양자시뮬레이터, 양자센서, 양자컴퓨터 등)
중국	양자과학기술 (국가중점연구개발계획('16))	양자제어 및 양자정보 분야의 중대과학문제와 병목기술에 대한 기초, 전략 및 미래지향적인 탐구

국가	명 칭	정 의
일본	양자과학기술 (양자 기술혁신전략('20.1))	양자의 행동이나 영향에 관한 과학 및 그것을 응용하는 기술 (1. 양자컴퓨터, 양자시뮬레이션, 2. 양자계측, 센싱, 3. 양자통신, 암호, 4. 양자소재(양자특성, 재료)
한국	양자정보통신 (양자정보통신 중장기 추진전략('14.12))	양자적 특성을 정보통신분야에 적용하여 사이버 보안, 초고속 연산 등 기존 정보통신의 한계를 극복할 수 있는 차세대 정보통신기술
	양자 기술 (S&T GPS('18.3))	양자 기술은 양자역학적 상태를 직접 제어하고 활용하여 정보를 처리하거나 성능을 비약적으로 향상시키는 일에 국한하여 초점을 맞추고 있으며, 양자정보기술과 거의 일치
	양자정보통신기술 (정보통신 진흥 및 융합활성화 등에 관한 특별법('21.6))	양자역학적 효과를 기반으로 하는 양자암호 및 통신, 양자센서 및 소자, 양자컴퓨터 등을 가능케 하는 기술 (양자통신(암호통신/양자인터넷 등), 양자컴퓨터(연산), 양자센서)
	양자 기술 (양자 기술 개발 및 산업화 촉진에 관한 법률안('22.1))	양자(量子)역학의 원리를 활용하여 정보를 생성, 계측, 전송, 저장, 처리하는 기술

2-3. 기술의 부상 배경

빠른 연산 속도

양자컴퓨터는 기존 최고의 디지털 슈퍼컴퓨터와 비교해도 비교 불가능할 정도로 연산속도가 빠름

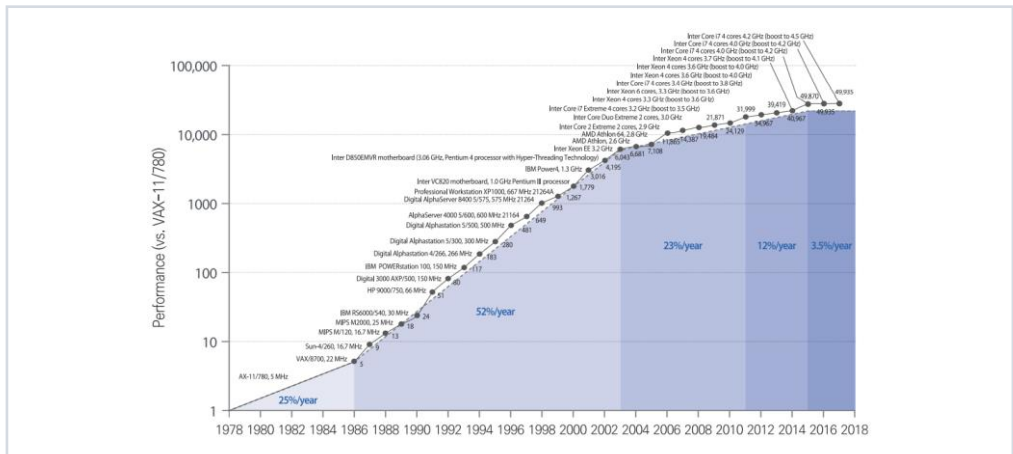
- 기존에 널리 사용되고 있는 RSA 암호체계는 2048비트를 사용하는 경우, 디지털컴퓨터를 이용하여 소인수분해 방식으로 암호를 푸려면 100만년 이상 걸리는데, 범용 양자컴퓨터가 개발된다면 이를 몇 초 안에 풀 수 있다고 함

반도체 칩 소형화의 한계

기존 반도체 칩의 성능 향상 속도가 한계에 도달했고, 이로 인해 디지털 컴퓨터의 연산 성능 향상 속도가 더뎠고 있어서 연산 속도가 매우 빠른 양자컴퓨터가 주목받고 있음

- 반도체 집적회로의 성능은 18개월마다 2배로 증가한다는 '무어의 법칙'이 수십 년간 통용되어 왔으나 2000년대 이후로는 전혀 들어맞지 않을 정도로 반도체 칩의 성능 향상 속도가 느려짐

[그림] 무어의 법칙 추세



저전력	<p>활용이 급증하고 있는 슈퍼컴퓨터는 대규모 전력을 사용하는 데에 반해 양자 컴퓨터는 전력 소비가 상대적으로 매우 적음(아주경제, 2021; 이준, 2019)</p> <ul style="list-style-type: none"> 슈퍼컴퓨터의 전력소비량을 줄이고자 딥러닝 기술을 적용하는 경우도 있으나 근본적으로 전력 소비가 적은 양자컴퓨터가 주목받고 있음
인공지능의 한계	<p>최근에 인공지능 기술이 급속히 발전하기는 했으나 대규모 데이터에 대한 고속 연산을 필요로 하며 이로 인해서 많은 컴퓨팅 자원(RAM 및 GPU 등)과 대규모 전력사용이 필요하여 비용부담이 되고 있는 상황에서 저전력으로 초고속 연산이 가능한 양자 기술이 주목받게 됨</p> <ul style="list-style-type: none"> 인공지능 기술이 제대로 적용되려면 많은 수의 정답 데이터(labeled data)가 필요한 경우가 대다수인데 이것 역시 비용과 데이터 확보 측면의 한계로 작용함

2-4. 주요국의 양자 관련 동향

양자 기술이 산업·안보적 파급력으로 반도체, 인공지능(AI) 등에 이어 미래 전략기술의 핵심으로 부상함에 따라 주요국은 대규모 예산 투입 등 정부 차원의 지속적·연속적 정책지원에 노력하고 있음

[표] 주요국의 양자 관련 동향

국가	정 의
미국	<ul style="list-style-type: none"> 2009년 1월 양자 기술비전 수립 2016년 양자 기술 발전계획 발표 2018년 12월 양자 기술의 연구·개발·시연·응용 지원, 범부처 계획 조정 및 연방기관간 활동연계, 산·학·연·관 협력 촉진, 국제 표준 개발 가속화를 위한 '국가양자이니셔티브' 법안 제정 2020년 2월 인터넷 시초인 아파넷(ARPAnet)의 파급효과를 양자분야에서 실현하기 위한 '양자인터넷 전략적 비전' 발표
일본	<ul style="list-style-type: none"> 2010년 NICT 주도로 양자 기술 개발 시작 2016년 4월 양자과학기술·연구개발기구(QST) 설립 FIRST('09-'13), ImPACT('14-), ERATO('16-'21) 등의 연구개발 프로그램이 진행 완료되었거나 진행 중 양자 기술을 인공지능, 바이오와 더불어 3대 국가전략기술로 지정
중국	<ul style="list-style-type: none"> 2006년 2월 "국가중장기과학기술발전계획 요강(2006~2020)" 발표 2012년 5월 "양자제어연구 국가중대과학기술 프로그램 12·전문규획" 제정 2016년 8월 "13차 5개년 국가과학기술혁신규획(2016~2020)" 발표 2017년 9월 세계 최대의 국립 양자 기술연구소 설립과 2년 6개월간 약 13조 원 투자 계획을 발표
캐나다	<ul style="list-style-type: none"> 글로벌 경쟁우위 강화를 위한 정부차원의 전폭적 지원 지속 대학을 양자분야 핵심거점으로 적극 육성 산학협력 기반의 실체적 혁신성과 창출에 매진
유럽	<ul style="list-style-type: none"> 2016년 5월 양자 선언문(Quantum Manifesto) 발표 2018년 10월 양자 플래그십 프로젝트 출범 (영국) 양자 기술의 산업적 활용에 중점 둔 전략 시행 (독일) 양자 기술 관련 인재·활용 저변확대에 집중 (네덜란드) 양자연구 전문연구기관 설립으로 연구역량 고도화 (프랑스·이탈리아) 공공연구기관을 중심으로 양자 기술 연구 수행
대한민국	<ul style="list-style-type: none"> 2014년 12월 양자정보통신 중장기 추진전략 수립 2019년 1월 양자컴퓨팅 기술개발사업 추진계획 마련 2021년 4월 미래 전략기술 확보를 위한 양자 기술(Quantum Technology) 연구개발 투자전략 수립

I-3. 시장개요

3-1. 세계양자시장

양자 기술의 세계 시장은 2019년 약 7.0억 달러에서 연평균성장률(CAGR) 25.8%를 보이며 성장하여 2026년 약 35.1억 달러 규모를 기록할 전망이다

(단위: 백만 달러)

구분	세계 양자시장규모 및 전망								CAGR
	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	
양자통신 (A)	80.2	121.7	142.9	158.8	323.6	481.6	581.0	1,238.1	47.9%
양자센서 (B)	394.6	399.6	410.3	426.3	447.7	474.4	492.2	510.7	3.8%
양자컴퓨팅 (C)	229.4	328.4	471.6	589.1	767.1	1,029.7	1,341.8	1,764.7	33.8%
Total	704.1	849.8	1,024.8	1,174.2	1,538.3	1,985.7	2,414.9	3,513.5	25.8%

※출처 : KISTI R&I Report 양자 기술 과학/기술/산업 분석(2021)

(1) 세계 양자통신시장

양자통신은 QKD(Quantum Key Distribution) 장비와 양자네트워크 암호서비스가 주된 시장으로 보이며, 2019년 약 0.8억 달러에서 연평균 47.9% 성장하여 2026년 약 12.38억 달러 규모를 기록할 전망이다

(단위: 백만 달러)

구분	세계 양자통신 시장규모 및 전망								CAGR
	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	
QKD 장비	79.34	120.2	141.3	154.2	301.0	441.7	530.1	1,118.0	45.9%
양자네트워크 암호서비스	0.82	1.53	1.60	4.59	22.58	39.86	50.85	120.1	103.9%
Total	80.2	121.7	142.9	158.8	323.6	481.6	581.0	1,238.1	47.9%

※출처 : KISTI R&I Report 양자 기술 과학/기술/산업 분석(2021)



(2) 세계 양자센싱시장

TechNavio(2020.04)에 따르면, 세계 양자센서 시장은 2019년 약 3.9억 달러에서 연평균 3.8% 성장하여 2026년 약 5.1억 달러 규모를 기록할 전망이다

세계 양자센서 시장은 제품별(by product)로 원자 시계(atomic clocks), PAR 양자 센서(PAR quantum sensors), 중력 센서(Gravity sensors), 자기 센서(Magnetic sensors)로 크게 구분됨

세분화된 시장에서는 원자시계 및 PAR 양자센서가 시장비중이 높고, 중력센서와 자기센서는 비중이 낮게 나타남

(단위: 백만 달러)

구분	세계 양자센싱 용도별 시장규모 및 전망								CAGR
	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	
원자시계	156.81	157.34	159.92	164.17	170.74	179.50	184.42	189.47	2.7%
PAR 양자 센서	136.05	140.11	146.91	156.32	168.01	181.79	192.64	204.14	6.0%
중력센서	70.67	71.09	72.25	74.35	77.04	80.60	82.75	84.95	2.7%
자기센서	31.05	31.09	31.18	31.46	31.87	32.50	32.80	33.10	0.9%
Total	394.58	399.63	410.26	426.30	447.66	474.39	492.61	511.66	3.8%

양자센서 세계 시장을 지역별로 살펴보면, 유럽(Europe), 북미(North America), 아시아태평양(APAC), 중동 및 아프리카(MEA), 남미(South America)로 구분되며, 각 세부 시장은 다음과 같음

(단위: 백만 달러)

구분	세계 양자센싱 지역별 시장규모 및 전망								CAGR
	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	
유럽	140.79	142.87	146.99	153.13	161.15	171.21	178.04	185.15	4.0%
북미	130.80	131.36	133.38	136.84	142.09	148.06	151.78	155.59	2.5%
아시아태평양	82.15	83.84	86.85	90.97	96.34	103.27	108.11	113.17	4.7%
중동아프리카	20.56	21.34	22.61	24.26	26.01	28.56	30.50	32.57	6.8%
남미	20.28	20.22	20.43	21.10	22.07	23.29	23.94	24.62	2.8%
Total	394.58	399.63	410.26	426.30	447.66	474.39	492.19	510.66	3.8%

(3) 세계 양자컴퓨팅

MarketsandMarkets(2021.01)에 따르면, 세계 양자컴퓨팅 시장은 2019년 약 2.3억 달러에서 2021년 약 4.7억 달러로 성장하였고, 2021년 이후 연평균 30.2% 성장하여 2026년 약 17.7억 달러 규모를 기록할 전망이다

(단위: 백만 달러)

구분	세계 양자컴퓨팅 시장규모 및 전망								CAGR
	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	
Systems	5	21	41	50	54	86	92	105	20.7%
Services	225	307	430	539	713	943	1,250	1,660	31.0%
Total	230	328	471	589	767	1,029	1,342	1,765	30.2%

세계 양자컴퓨팅 시장은 용도별(by application)로 최적화(Optimization), 머신러닝(Machine Learning), 시뮬레이션(Simulation), 기타(Others)로 구분되며 각 세부 시장은 다음 표와 같음

(단위: 백만 달러)

구분	세계 양자컴퓨팅 용도별 세부시장규모 및 전망								CAGR
	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	
최적화	108	151	213	260	331	434	553	710	27.2%
머신러닝	29	44	66	85	115	160	215	292	34.6%
시뮬레이션	56	81	117	146	192	258	339	444	30.6%
기타	36	53	77	97	129	177	235	319	32.9%
Total	229	329	473	588	767	1,029	1,342	1,765	30.1%

세계 양자컴퓨팅 시장은 기술별(by technology)로 초전도 양자 비트(Superconducting Qubits), 양자 어닐링(Quantum Annealing), 트랩이온(Trapped Ions), 기타(Others; 토폴로지·포토닉스)로 구분되며, 각 세부 시장은 다음과 같음

(단위: 백만 달러)

구분	세계 양자컴퓨팅 시장규모 및 전망								CAGR
	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	
초전도 양자비트	126	173	245	308	409	544	724	966	31.6%
양자 어닐링	48	79	120	145	175	241	289	356	24.3%
트랩 이온	55	76	107	135	180	242	325	439	32.6%
기타	-	-	-	2	2	3	4	4	18.9%
Total	229	328	472	590	766	1,030	1,342	1,765	30.2%

MarketsandMarkets에 따르면, IBM(미국), D-Wave Systems(캐나다), Microsoft(미국), Amazon(미국), Rigetti Computing(미국) 등 5개 업체가 세계 양자컴퓨팅 시장의 50~55%(2019년 기준)를 점유한 것으로 나타남

- IBM과 D-Wave Systems는 양자컴퓨팅 시장의 선두 주자로, 저명한 브랜드, 광범위한 제품, 그리고 강력한 유통 능력이 강점임
- Microsoft와 Amazon은 주로 제품 출시를 통해 양자 컴퓨팅 시장에서 입지를 강화해왔으며, 이들 업체의 매출은 경쟁사 매출보다 더 빨리 증가하고 있음
- 향후 3~5년 내에 IBM과 D-Wave Systems는 양자컴퓨팅 시장에서 입지를 확고히 할 것으로 예상되며, Amazon은 주로 아시아태평양(APAC) 지역에서 사업 성장으로 인해 시장 내 점유율이 증가할 것으로 예상됨

국가	정 의
Top 5 Players Market Share	50~55%
IBM	20~25%
D-Wave Systems	15~20%
Microsoft	10~12%
Amazon	8~10%
Rigetti Computing	6~8%
Others	35~45%

세계 양자컴퓨팅 시장은 최종 이용 산업별(by end-use industry)로 우주·방위, 은행·금융, 헬스케어·의약품, 에너지·전력, 화학, 수송·물류, 정부, 학술 부문으로 구분되며, 각 세부 시장은 다음과 같음

(단위: 백만 달러)

구 분	세계 양자컴퓨팅 산업별 시장규모 및 전망								CAGR
	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	
우주·방위	52	73	105	130	167	223	289	377	29.1%
은행·금융	77	110	157	196	256	343	447	587	30.2%
헬스케어·의약품	17	24	36	46	63	86	115	156	34.1%
에너지·전력	9	13	20	25	33	45	60	79	31.6%
화학	17	24	33	41	53	70	90	117	28.8%
수송·물류	22	32	45	56	73	98	127	166	29.8%
정부	25	36	53	67	88	120	158	211	31.8%
학술	11	16	22	28	33	44	57	73	27.1%
Total	239	328	471	589	766	1,029	1,343	1,766	30.3%

세계 양자컴퓨팅 시장은 지역별(by region)로 북미, 유럽, 아시아태평양, 기타 지역으로 구분되며, 각 세부 시장은 다음과 같음

(단위: 백만 달러)

구 분	세계 양자컴퓨팅 지역별 시장규모 및 전망								CAGR
	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	
북미	96.3	134.6	188.6	229.7	291.5	381.0	483.1	617.7	26.8%
유럽	57.3	81.1	115.2	142.2	183.0	242.7	312.4	405.9	28.6%
아시아태평양	71.1	105.9	158.0	204.7	276.1	383.6	516.6	701.5	34.7%
기타	4.6	6.7	9.8	12.4	16.4	22.4	29.7	39.7	32.3%
Total	229.3	328.3	471.6	589.0	767.0	1,029.7	1,341.8	1,764.8	30.2%

3-2. 국내양자시장

국내의 양자 기술 시장은 2019년 약 707억 원에서 연평균 20.4% 성장하여 2026년 약 2,595억 원 규모를 기록할 전망이다

(단위: 억 원)

구 분	국내 양자시장규모 및 전망								CAGR
	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	
양자통신	42	65	93	105	219	332	408	888	54.8%
양자센서	655	728	811	915	1,025	1,154	1,306	1,485	12.4%
양자컴퓨팅	10.2	17.4	34.9	46.8	66.5	99.7	140.4	222.3	55.3%
Total	707	810	939	1,067	1,311	1,586	1,855	2,595	20.4%

(1) 국내 양자통신시장

국내 양자통신 관련 시장은 2019년 약 42억 원에서 연평균 54.8% 성장하여 2026년 약 888억 원 규모를 기록할 전망이다

(단위: 억 원)

구 분	국내 양자통신 시장규모 및 전망								CAGR
	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	
QKD 장비	41.2	63.7	91.8	102.2	203.9	304.4	372.7	801.7	52.8%
양자네트워크 암호서비스	0.4	0.8	1.0	3.0	15.3	27.5	35.7	86.1	115.4%
Total	41.6	64.5	92.8	105.2	219.2	331.9	408.4	887.8	54.8%

(2) 국내 양자센싱시장

국내 양자센서 시장은 2019년 약 655억 원에서 연평균 12.4% 성장하여 2026년 약 1,485억 원 규모를 기록할 전망이다

국내 양자센서 제품별 시장점유율은 2019년 기준 원자시계가 전체에서 49.3%를 점유한 것으로 나타났고, 자기센서(44.4%), 기타(5.5%), 중력센서(0.8%) 순으로 나타남

(단위: 억 원)

구 분	국내 양자센싱 시장규모 및 전망								CAGR
	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	
원자시계	323	342	363	384	408	433	460	489	6.1%
중력센서	5	5	6	7	7	8	9	10	10.4%
자기센서	291	328	370	418	472	534	605	685	13.0%
기타	36	53	72	106	138	179	232	301	35.4%
Total	655	728	811	915	1,025	1,154	1,306	1,485	12.4%

(3) 국내 양자컴퓨팅시장

국내 양자컴퓨팅 시장은 2019년 약 10.2억 원에서 연평균 55.3% 성장하여 2026년 약 222.3억 원 규모를 기록할 전망이다

- 현재는 연구용으로만 시장이 형성되어 시장규모가 작지만 점차적으로 확대될 전망이다

(단위: 억 원)

구 분	국내 양자컴퓨팅 시장규모 및 전망								CAGR
	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	
Hardware	8.5	14.0	27.3	33.5	44.0	62.2	80.6	129.6	47.6%
Software	1.6	3.1	6.3	10.8	17.5	27.9	42.8	63.4	69.2%
Cloud service	0.1	0.3	1.3	2.5	5.0	9.6	17.0	29.3	125.1%
Total	10.2	17.4	34.9	46.8	66.5	99.7	140.4	222.3	55.3%



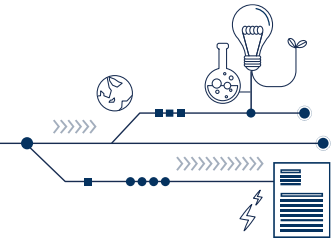
II

양자(Quantum)기술 분야 글로벌 시장 조사 및 분석

동향 분석

1. 기업 동향 분석
2. 양자스타트업 투자동향 분석
3. 논문 클러스터링 분석

동향분석

II-1.
기업 동향
분석

1-1. 대기업별 양자 관련 이슈

(1) IBM (미국)

✓ 양자 컴퓨터 실용화 로드맵 발표

IBM Q 네트워크를 구축(180여개 유료 회원) 및 대륙별 연구허브를 선정·지원하여 IBM 중심의 양자컴퓨팅 기술 생태계 구축에 집중하고, 수집된 데이터는 연구개발에 활용 중임

한국 IBM 대표에 의하면 양자우월성을 달성하는 것은 1천 큐비트(qubit, 양자컴퓨터 연산의 기본단위)가 넘어가면 가능하며, IBM은 그 시점을 내년으로 예상하고 있음

- 이와 관련하여 IBM은 2021년 Eagle 프로세서의 127큐비트에서 433큐비트를 특징으로 하는 Osprey 양자 프로세서의 출시를 발표함('22.11)
- 또한 이들의 양자 로드맵에는 2025년에 Kookaburra 프로세서로 4,000큐비트 단계에 도달하기 전에 2023년과 2024년에 Condor(콘도르)라는 1,121 큐비트 프로세서와 Flamingo라는 1,386큐비트 프로세서가 포함되어 있음

[그림] IBM의 양자
프로세서
오스프리(Osprey)



※출처: ITWorld 뉴스기사_“처리 속도 3배 IBM, 양자 프로세서 ‘오스프리’ 출시” (2022)

이 외에도 IBM은 퀀텀 서밋 2022(Quantum Summit 2022)에서 선보인 모듈형 양자 플랫폼 '시스템 투(System Two)' 개발을 지속하고 있음

- 시스템 2는 여러 프로세서를 새로운 통신 링크가 있는 단일 시스템으로 결합하며, 통신 링크는 하이브리드 클라우드 미들웨어를 사용하여 양자 및 기존 워크플로우를 통합함

✓ IBM과 Daimler, 양자 컴퓨터를 사용하여 차세대 배터리 개발

IBM과 Mercedes-Benz의 모회사인 Daimler AG 연구원들은 양자 컴퓨팅과 양자화학을 사용하여 리튬-황 배터리의 화학적 조성을 시뮬레이션하여 차세대 자동차 배터리를 연구개발하고 있음

- 양자 컴퓨터를 사용하여 배터리 속의 화합물 기본 행동을 시뮬레이션할 수 있다는 아이디어를 테스트하고 있으며, 세 개의 리튬 함유 분자의 쌍극자 모멘트를 모델링하여 오늘날 널리 사용되는 리튬보다 더 강력하고 오래 지속되며 저렴한 차세대 리튬황(Li-S) 배터리를 개발 중임

✓ 양자컴퓨팅 스타트업인 Algorithmiq와 협업체계 구축

Algorithmiq는 헬싱키의 양자 컴퓨팅 스타트업으로 양자 알고리즘과 후처리 기술로 IBM과 계약을 체결하고 IBM Quantum Network로 합병됨

IBM의 양자 전문지식과 Algorithmiq의 알고리즘 기술을 결합하여 신약개발에 소요되는 시간과 비용을 절감하는 것을 목표로 함

Algorithmiq의 새로운 측정 기술은 하이브리드 양자-고전 알고리즘에서 런타임을 크게 줄이는 것으로 나타났으며, Algorithmiq의 오류 완화를 위한 후처리 전략은 양자 화학 시뮬레이션의 정확도를 크게 향상하는 것으로 나타나 본 IBM과의 협력은 단기 양자 기술에서 양자 알고리즘의 성능을 향상시키는 유망한 결과를 낼 것으로 기대함

- Guillermo Garcia Perez (CSO, Algorithmiq의 공동 설립자)는 양자 시뮬레이션의 모든 기능을 발휘하려면 내결함성 양자 컴퓨터가 필요할 수 있다고 언급함

(2) Google (미국)

✓ ‘양자우월 증명’ 이후 상용 양자컴퓨터 개발 목표를 제시

오류보정을 통한 성능 고도화, NASA 공동 연구('17), 양자기계학습틀(Tensorflow Quantum) 개발('20) 등을 추진 중이며 '21년 Quantum AI Campus 개소('21.5)

- 양자 AI 캠퍼스는 양자 컴퓨터 칩셋으로 적합한 새로운 화학 공정과 새로운 재료 테스트를 연구하며 양자 컴퓨팅 관련 소프트웨어와 하드웨어도 직접 개발함
- '29년까지 100만 큐비트(1,000 논리 큐비트)를 가지는 범용 양자컴퓨터 구축 목표
- 오류정정 코드를 구성하는 물리 큐비트 숫자가 증가함에 따라 오류가 지수-함수적으로 감소하는 것을 54큐비트 시커모어 프로세서를 활용하여 확인('21.8)

상업용 양자컴퓨팅 도구 등을 개발하는 SW 스타트업 샌드박스(Sandbox AQ)를 Google로부터 분사하고, Google의 전 최고경영자(CEO) 에릭 슈미트를 이사장으로 초빙('22)



[그림] Google의 양자컴퓨터



※출처: zdnet 뉴스기사_ "양자 컴퓨터 실제 모습 공개...10년 내 상용화" (2021)

Google에서 현재 주력으로 연구 중인 프로젝트는 양자컴퓨터의 오류 최소화하고, 보정해 논리적인 큐비트를 만드는 단계로 이를 해결하기 위해 6단계 마일stones을 세우고 현재 2단계를 수행 중임

루세로 Google 퀀텀 엔지니어에 의하면 Google은 오류가 보정된 양자 컴퓨터를 10년 정도 후에는 만들 수 있다고 보고 10년 로드맵을 제시하고 있음

(3) Intel (미국)

✓ QuTech(和)와의 협업 및 SW를 포함한 Full-stack* 접근 방식을 연구

* Full-stack: 칩, 시스템, 소프트웨어, 클라우드 서비스 등 모든 솔루션을 포함

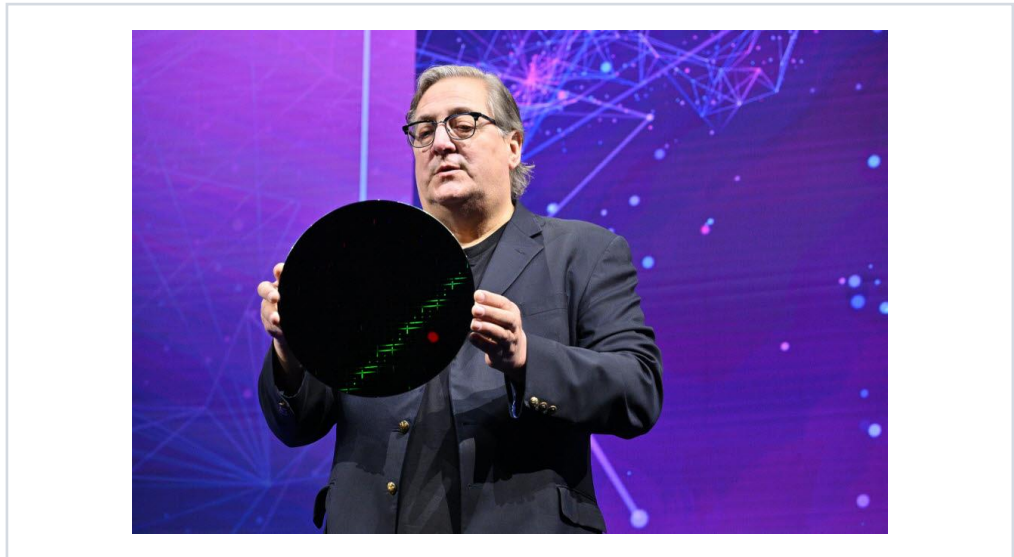
Intel은 몇 년 전에 초전도 기술을 실험하고 'Tangle Lake' 49큐비트 칩을 구축했지만 현재는 스핀 큐비트(양자점이라고도 함) 기술을 사용하여 큐비트를 구축하는 데 집중하고 있음

양자컴퓨터용 미래 암호 기술 개발을 위한 '크립토 프론티어 연구센터(Intel Crypto Frontiers Research Center)' 설립을 발표함('21.8)

Intel은 델프트 공과대학교(Delft University of Technology)와 네덜란드 국영 응용과학연구소(TNO) 연구진으로 구성된 첨단 퀀텀 컴퓨팅 연구소인 '큐텍(Qutech)'과 함께 미 오리건주(州) 힐스보로 소재 인텔 D1 제조 공장에서 최초의 대규모 실리콘 큐비트를 제작하는 데 성공함

- Intel의 공정기술로 칩을 제조하면 QuTech에서 칩의 성능분석을 수행하는 형태의 협업으로 반도체 양자점 방식은 단위 면적당 큐비트 수에 이점을 가지며, 수년간 최적화된 인텔의 반도체 공정장비를 그대로 사용하여 300nm 웨이퍼 양산 가능성을 확인함('22.4)
- 본 연구 결과는 국제 학술지 네이처 일렉트로닉스(Nature Electronics)에 게재됐으며, 피어리뷰를 통해 300밀리미터(mm) 실리콘에서 큐비트를 성공적으로 제작할 수 있다는 것을 입증함

[그림] 오리건 공장에서
제조한 큐비트 웨이퍼



※출처: Intel, "양자 컴퓨팅·뉴로모픽 반도체 생태계 구축 속도낸다" (2022)

이외에도 자체 SDK(소프트웨어 개발 키트) 개발 등을 통해 Full-stack을 연구하고 있으며, 미국 아르곤 국립 연구소(ANL)와 협업하여 Argonne에 양자 테스트 베드를 '22년 말까지 제공할 것을 발표함

- 현재 베타 버전으로 화학·원료·유기역학·재무 모델링 분야에서 인텔 양자 SDK를 활용하기 시작함

✓ Neuromorphic 반도체 생태계 구축

* Neuromorphic: 뇌 속의 뉴런 형태를 모방한 회로를 만들어 인간의 뇌 기능을 모사하는 기술

Intel은 미국 새너제이에서 (열린 '인텔 이노베이션 행사'(22.9)에서 인간의 뇌를 모방한 뉴로모픽 반도체 기술 혁신도 소개하였으며, 뉴로모픽 기술 역량을 키우기 위해 일찌감치 칩과 솔루션을 개발함

- 지난해 로이히 2 뉴로모픽 반도체 칩과 오픈소스 라바 SW를 출시하며 뉴로모픽 컴퓨팅 연구를 주도하고 있음

(4) Honeywell(미국)

✓ 거대 엔지니어링 기업 Honeywell이 이온트랩방식의 양자 컴퓨팅 채택

초전도 큐비트에 의존하는 주요 경쟁업체인 Google 및 IBM과 달리 Honeywell은 이온트랩방식을 채택하여 장치에 전원을 공급함

- 그러나, 기존의 이온트랩 컴퓨터와 달리 단일 정전기장을 사용하여 제자리에 고정되지 않으며, 장치의 198개 전극은 필드를 동적으로 변경하기 위해 독립적으로 제어할 수 있고, 이를 통해 큐비트가 서로 상호 작용하도록 위아래로 이동할 수 있음
- 본 연구를 통해서 Honeywell의 양자 솔루션 사업부는 10큐비트로 구성된 포획된 이온 기반 시스템인 최초의 상용 양자 컴퓨터를 출시함('20.11)

(5) AT&T (미국)

✓ AT&T Security Conference에서 '25년까지 'Quantum Ready' 달성에 대한 로드맵 발표

AT&T에 따르면 '25년까지 암호화 자산과 관련된 양자 컴퓨터를 개발하여 기존의 암호화 요소, 알고리즘을 대체할 수 있는 프레임워크 또는 아키텍처인 암호화 민첩성을 구현하도록 함

- 양자 공개키 암호 알고리즘(RSA-2048)을 깰 수 있는 컴퓨터인 CRQC를 이용한 암호화 자산 공격에 대비할 수 있는 서비스를 제공함

✓ 캘리포니아 공과대학교와 AQT를 통해 양자 네트워크 기술 연구 수행

캘리포니아 팔로알토에 있는 [The AT&T Foundry innovation center]가 캘리포니아 공과대학에 합류하여 AQT(Alliance for Quantum Technologies)를 결성함

- AQT(Alliance for Quantum Technologies)는 양자 기술 개발과 더불어 이의 실용적인 응용을 가속화하기 위해 산업, 정부 및 학계를 하나로 모으는 것이 목표임
- 이 협력은 또한 INQNET(INtelligent Quantum NEtworks and Technologies)이라는 연구 개발 프로그램을 통해 미래의 양자 네트워킹 기술을 통한 통신의 용량 및 보안 필요성에 중점을 둘 예정임

(6) BT (영국)

✓ Toshiba와 양자 보안 메트로 네트워크 상용화를 위한 프로토타입 개시

세계 최초로 양자 컴퓨팅이 본격적으로 상용화 될 때 발생할 수 있는 암호화 취약점을 차단하기 위한 양자 보안 메트로 네트워크(QSMN)의 시험을 개시함

- QSMN에서 BT는 네트워크를 통해 암호화 링크를 제공하고, Toshiba는 암호화키 분배(QKD) 하드웨어 및 양자 암호 관리 소프트웨어를 제공하며 협업함
- QKD 데이터가 전송되는 동안 양자 암호화키 통신 시스템에 가해질 수 있는 공격을 방어하는 BT의 보안 트래픽은 최대 30km에 달하는 수준임
- 금융 서비스 회사인 EY는 무상으로 QSMN 시스템을 도입하여 런던에 있는 두 사이트의 보안을 관리하고 있으나, BT의 광학 연구 수석 관리자인 Andrew Lord에 의하면 현재의 QKD 기술로는 수익창출에 어려움이 있음



[그림] BT와
Toshiba의 3노드 런던
교환 광섬유 링



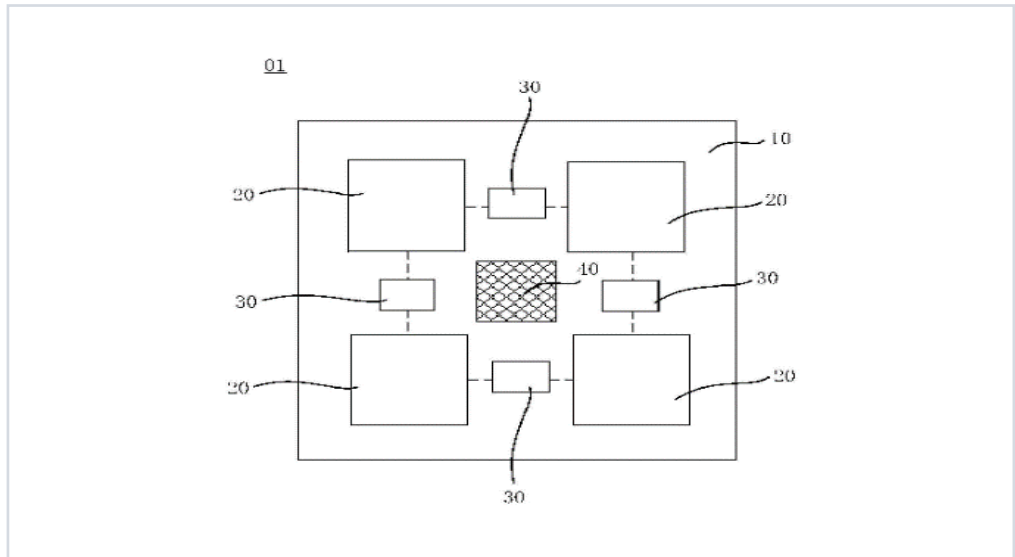
※출 처: BT, Toshiba unveil 'quantum-secured' metro network (2022)

(7) Huawei (중국)

✓ Huawei, '양자 칩셋 및 양자 컴퓨팅 장치' 특허권 확보

글로벌 모바일 제조업체로 알려진 화웨이에서 '22년 양자 컴퓨팅 장치 연구 개발 성과로 특허를 출원함

[그림] Huawei의
양자 칩셋



※출 처: <https://www.gizmochina.com/2022/06/12/huawei-patents-quantum-computer/>

- Huawei의 새로운 유형의 양자 컴퓨팅 장치는 양자 칩셋 제조의 복잡성과 양자 칩셋 생산과 관련된 문제(예를 들어 낮은 수율)를 해결하는 것을 목표로 함
- 본 특허의 양자 칩셋을 사용하면 하드웨어를 조립하기가 더 쉬울 뿐만 아니라 높은 수율로 더 많은 장치를 성공적으로 생산할 수 있어 업계에서 높은 시장 점유율을 기대할 수 있음

(8) Mercedes-Benz (독일)**✓ PsiQuantum과 양자 화학 시뮬레이션 연구 프로젝트 착수**

독일의 Mercedes-Benz가 전기 자동차에 대중적으로 사용되는 이차전지 배터리의 전해질인 리튬 이온(Li-ion)의 화학 반응 연구과정에서 슈퍼컴퓨터 대신 PsiQuantum의 양자 컴퓨팅 기술을 사용하는 공동 연구를 수행하기로 함

Mercedes-Benz와 PsiQuantum의 공동 연구 결과는 '22.04.07 '양자 화학 시뮬레이션을 위한 내결함성 리소스 추정 : 리튬 이온 배터리 전해질 분자에 대한 사례 연구' 라는 제목으로 Physical Review Research 저널에 학술지로 게재됨

- PsiQuantum은 Benz와 연구 협업을 통해 FBQC(photonic Fusion Based Quantum Computing)* 기술로 개발 한계를 극복하고 전기자동차 배터리 성능 향상을 위한 분석이 가능하다는 것을 밝힘

* FBQC : 광융합 양자컴퓨팅. 빛의 성질을 제어 및 활용하는 광기술과 양자컴퓨팅 기술을 융합하여 성능을 고도화하는 기술을 의미함

- 양자 컴퓨팅 기술의 도입으로 슈퍼컴퓨터의 시뮬레이션 한계점을 넘어서 지속 가능한 에너지 운송 및 저장 방식을 개발함

(9) BMW그룹 (독일)**✓ Quantinuum과 시뮬레이션을 위한 협력**

BMW와 Quantinuum은 InQuanto 플랫폼을 사용해 현재 수준의 하드웨어에서 가장 높은 수준의 정확도를 달성하는 것을 목표로 수소연료 전지의 전극 반응(산소 환원반응 모델링)을 시뮬레이션하기 위해 협력체계를 구축함

- Quantinuum의 양자 화학팀에 의해 개발 및 구축된 양자 계산화학 소프트웨어 플랫폼으로 업계에 특정한 양자 컴퓨팅의 사용 사례를 모색하고자 하는 BMW, Honeywell, JSR, 일본제철 및 TotalEnergies와 같은 협력사와의 협력을 지원함
- 특히, BMW는 연료전지에 대한 전문지식과 고도로 예측적인 양자 컴퓨팅 시뮬레이션을 결합하면, 물리적 프로토타이핑이 없는 새로운 재료 개발을 향상시킬 수 있을 것으로 기대함

(10) KT, SK, LGU+(한국)**✓ KT, 20kbps 속도 고속 양자암호통신 독자 개발**

KT가 한국정보통신기술협회에 제안한 양자암호통신 관련 기술 표준이 국내 표준안으로 최종 채택됨

20kbps 속도의 고속 양자암호통신을 독자 기술로 개발함

- 동시에 4000개 암호장비에 양자암호를 공급할 수 있는 20kbps를 구현함
- 핵심 부품인 '고속 단일광자광원 생성 모듈'과 '고속 양자난수 연동 인터페이스'도 직접 개발

✓ SK, 양자암호 통신망 구축

SK는 고려대학교 안암병원, 계명대학교 동산의료원, 평화홀딩스, 한국수력원자력, 대전광역시 등 8개 기관에 양자암호 통신망 구축을 완료했으며, 병원이나 기관 내에서 주고받는 통신망에 양자키분배(QKD) 기반의 양자암호통신망을 구축하는 것이 핵심임

또한 뉴딜 과제 수행을 통해 의료, 공공, 산업, 금융 등 다양한 분야에서 양자암호통신의 활용 범위를 확대하면서 양자 생태계 활성화에 주력하고 전국 주요도시를 연결하는 '양자암호 하이웨이(Highway)'를 구축하는 것이 목표임

✓ LGU+, 세계 최초 양자내성암호 서비스 출시

LG유플러스는 양자컴퓨터의 해킹 공격도 막아낼 수 있는 '양자내성암호 서비스'의 공공·민간분야 검증을 마쳤으며, 이는 현존 슈퍼컴퓨터보다 연산속도가 이론상 1,000만배 빠른 양자컴퓨터도 풀어낼 수 없는 수학적 알고리즘을 기반으로 함

- 키 교환, 인증 등 보안의 각 단계와 통신망의 전 구간에 적용할 수 있다는 것이 장점임

검증을 마친 양자 내성암호 서비스를 LG유플러스가 세계 최초로 출시하여 과학기술정보통신부로부터 상품 이용약관 승인을 받음

- 이는 LG유플러스가 첨단암호 스타트업 크립토크랩, 광전송장비업체 코위버와 손잡고 2019년부터 2년여간 공동 연구개발 끝에 보안성을 극대화한 양자암호가 적용된 전용회선을 상품화한 케이스임
- PQC 전용회선 서비스는 LG유플러스 양자 기술이 적용된 광전송장비(ROADM)로 해킹이 불가능한 보안환경을 제공하며, 고객이 전용회선으로 데이터를 송수신할 때 PQC 키로 암호·복호화하는 방식을 사용함
- 또한 PQC 전용회선은 전용회선 장비 외에 별도 회선과 장비·중계 노드 등이 필요한 양자키분배(QKD) 방식과 달리 별도 시설구축이 필요 없고 비용도 최소화할 수 있다는 장점이 있음



1-2. 양자 기업별 Financing 이슈

(1) XANADU (캐나다)

✓ 1억 달러(US) 시리즈C 마감, 2022.11.09

Xanadu는 시리즈B 라운드 에서 1억 달러를 확보한지 18개월 만에 시리즈C 라운드에서 1억 달러 투자유치에 성공함

- 리드 투자자는 캐나다 최대의 성장 주식회사인 Georgian으로 이전 투자자인 Bessemer Venture Partners, Capricorn, BDC Capital 및 Tim Draper 와 함께 Porsche Automobil Holding SE, Forward Ventures, Alumni Ventures, Pegasus Tech Ventures, Silicon Valley Bank가 함께 참여함
- 현재까지 Xanadu는 2억 5천만 달러(US)를 모금 하여 회사 가치를 10억 달러(US)로 평가받고 있음

이번 투자유치와 맞물려 Xanadu는 괄목할만한 성과로는 “Xanadu Cloud”를 통해 세계 최초의 “Cloud-deployed Photonic Quantum Computer 출시”, 널리 사용되는 “양자 소프트웨어 프레임워크인 PennyLane 구축”, “선도적인 글로벌 기업과 핵심 전략적 파트너십 구축” 그리고 가장 최근에는 “Xanadu의 양자 컴퓨터 Borealis을 통한 양자 우위 입증” 등이 있음

(2) COLDQUANTA (미국)

✓ 1억 1천만 달러(US) 규모의 시리즈 B 발표, 2022.11.01

ColdQuanta(Inflection)는 양자 컴퓨팅, 양자 알고리즘 및 응용 프로그램, 원자시계 및 센서를 포함한 회사의 제품 포트폴리오의 상용화를 위해 1억 1천만 달러 규모의 시리즈B 라운드를 마감함

- ColdQuanta는 새로운 기업 브랜드인 Inflection을 런칭하였으며, 이 브랜드는 오늘날의 양자 기술 및 상용 제품의 에코시스템을 구축하는데 초점을 두고 있음
- 전 Motorola 회장 겸 CEO인 Christopher Galvin은 ColdQuanta의 이사회에 합류함과 동시에 ColdQuanta의 투자자이기도 함

(3) Origin Quantum (중국)

✓ 1억4800만 달러(US) 규모의 시리즈 B 펀딩 라운드 확보, 2022.07.27

Origin Quantum은 중국 허페이에 본사를 두고 Guo Guoping 교수가 2017년에 설립한 양자 컴퓨팅 스타트업으로 1억 4,800만 달러 규모의 시리즈B(10억 위안) 라운드를 마감함

- 정부 지원을 받는 Shenzhen Capital Group의 Hotland Investment Asset Management가 주도하고 CITIC Securities, China International Capital Corporation(CICC), Bank of China Group Investment Limited(BOCGI) 및 기타 여러 중국 투자 기관이 추가로 참여함

(4) IonQ (미국)

✓ 2022년 3분기 매출 280만 달러(US) 발표, 2022.11.15

IonQ는 기업인수목적회사 DMYI와의 합병을 통해 나스닥에 상장되었으며, 주요투자자로 삼성전자와 현대차, 구글벤처스, 아마존웹서비스(AWS) 등이 있음

IonQ의 3분기 매출은 280만 달러이며 순손실은 2,400만 달러, '22년 4분기 예상매출은 290만 달러 ~ 340만 달러로 공시됨

IonQ는 미 공군 연구소와의 협업체계를 구축하고 Dell Technologies와 파트너십을 체결함

- 미 공군 연구소와 1,340만 달러 규모의 계약을 체결하여 이온트랩 시스템에 클라우드와 양자 네트워킹 기술을 제공함
- 25개의 알고리즘 큐비트를 달성하여 IonQ Aria 컴퓨팅 성능을 4배 향상시킴
- 컴퓨터 하드웨어 분야의 유망한 기업인 Dell Technologies와 파트너십을 체결하고 하이브리드 양자 컴퓨팅 기술과 관련하여 협업할 예정임

✓ 시총 9.3억 달러(US) 가운데 韓 투자금 비중이 28%

양자컴퓨팅 기업 아이온큐가 미국 주식 가운데 한국인 투자액 비중이 가장 큰 것으로 나타남

- 한국예탁결제원 증권정보포털에 따르면 아이온큐 주식에 대한 한국인의 보관금액(2일 기준)이 2억5557만달러(약 3361억원)로 시가총액 9억3000만달러(약 1조2233억원) 중 27.5%에 달하는 것으로 집계됨

(5) IQM (핀란드)

✓ 시리즈A2 펀딩에서 128M 유로 모금, 2022.07.22

IQM은 핀란드에 본사를 두고 슈퍼컴퓨팅 데이터 센터 및 연구소를 위한 on-premises 양자 컴퓨터를 제공하는 기업임

IQM Quantum Computers(IQM)는 특히 기후 위기와 같은 세계에서 가장 시급한 문제를 해결하기 위한 글로벌 비즈니스를 확장하고 제품 개발을 가속화하기 위해 World Fund가 주도하는 시리즈 A2 자금에서 1억 2,800만 유로(1억 2,800만 US달러) 규모의 자금을 조달함

- 2020년에 발표된 3,900만 유로(3,900만 US달러) 시리즈A1에 이어 올해 초에 발표된 유럽 투자 은행(EIB)의 벤처 대출 3,500만 유로(3,500만 달러) 중 일부가 포함된 이번 투자라운드는 유럽 양자 컴퓨팅 회사가 모금한 사상 최대 규모의 자금 조달 라운드임
- 이 라운드에는 Bayern Kapital, EIC Fund, OurCrowd, QCI SPV, Tofino 및 Varma와 기존 투자자인 Maki.vc, Matadero QED, MIG Fonds, OpenOcean, Salvia GmbH, Santo Venture Capital GmbH, Tencent, Tesi 등이 포함됨

(6) Atom Computing (미국)

✓ 6천만 달러(US) 규모의 시리즈 B를 모금, 2022.01.20

optically-trapped neutral atoms 핵 스핀 큐비트로 만든 최초의 양자 컴퓨터를 만든 Atom Computing은 6천만 달러 규모의 시리즈B 라운드를 마감함

- Third Point Ventures가 해당 라운드를 주도했고 Primer Movers Lab과 Innovation Endeavors, Venrock 및 Prelude Ventures 와 같이 내부 투자자도 포함됨
- Atom Computing은 2세대 양자 컴퓨팅 시스템을 구축하고 기술을 상용화하는데 이번 자금을 활용할 계획임

(7) TERRA QUANTUM AG (스위스)

✓ 시리즈A 자금 조달을 7,500만 달러(US)로 확장, 2022.03.31

Terra Quantum은 스위스에 본사를 둔 선도적인 양자 기술 기업으로 시리즈A 라운드를 7,500만 달러로 확장했으며, 나노 전자공학을 위한 효율적인 전력 장치라는 오랜 과제에 대한 획기적인 솔루션을 발표함

- 테라퀀텀은 강유전체 기반 음극 정전용량의 기본 메커니즘을 최초로 공개하고 이를 실현하기 위한 방법도 공유하고 있으며, 이는 하드웨어 설계의 괄목할만한 성과이며 차세대 기술의 토대라는 평가임

Terra Quantum의 시리즈A는 이미 양자 기술 분야에서의 규모 있는 펀딩라운드 중 하나이며 라운드의 확장으로 총 자금 조달 금액은 75백만 달러임

- 조달된 자금은 데이터 암호화 및 사이버 보안과 관련된 Terra Quantum의 제품을 강화하는 데 사용될 예정임
- Terra Quantum의 설립자이자 CEO인 Markus Pflichtsch에 의하면 양자 컴퓨터 및 양자 통신 개발에 중요한 것은 기존 바이너리 폰 노이만 아키텍처의 병목 현상을 극복하는 것임
- 따라서, 생물학적 뇌의 신경과학 원리의 특징을 이용해야하기 때문에 Terra Quantum은 표준 계산 단위의 이진 논리와 대조되는 다중 비트 논리의 프레임워크 내에서 작동할 수 있는 강유전성 논리 단위를 기반으로 neuromorphic spiking 신경망을 구현할 예정임

(8) Oxford Quantum Circuits (영국)

✓ 3,800만 파운드 투자유치, 2022.08.09

시리즈A 라운드를 통해 3,800만 파운드(약 590억원)규모의 자금을 조달함

- 투자 라운드는 랜스다운 파트너스와 UTEC(University of Tokyo Edge Capital Partners)가 공동으로 주도했으며 브리티시 패이션트 캐피탈, 옥스퍼드 사이언스 엔터프라이즈, 옥스퍼드 인베스트먼트 컨설턴츠 등이 참여함
- 수백억원의 투자유치를 통한 자금으로 아시아·태평양 시장을 본격적으로 확장할 예정임

(9) ELEQTRON (독일)**1 양자 컴퓨터 개발을 위해 5,000만 유로 투자유치, 2022.11.02**

Tech EU에 따르면 EleQtron은 독일 항공우주 센터(DLR)가 향후 4년 동안 이온 트랩 프로세서를 개발하기 위해 총 2억 850만 유로를 수여한 5개 하위 프로젝트의 일부로 양자 컴퓨터 개발을 위해 5천만 유로 이상의 새로운 자금을 조달함

- eleQtron은 포획된 이온, RF 제어 및 MAGIC(Magnetic Gradient Induced Coupling)을 기반으로 양자 컴퓨터를 개발 및 운영하며, 본 자금 조달에는 Earlybird와 Siegerlandfonds가 포함됨

(10) QUANTINUUM (미국)**✓ 잠재적 가치 370억 달러(US), 2022.09.07**

주식 시장 분석 회사인 Vertical Research Partners는 Quantinuum이 10년 내에 약 370억 달러의 할인된 주식 가치에 도달할 수 있다고 추정함

- 이는 Honeywell의 54% 소유권을 고려하면 Honeywell의 주당 약 \$29의 가치를 의미하며, 이는 Honeywell 총 자기자본의 약 15%에 해당하는 수치임

(11) QUANTONATION VENTURES (프랑스)**✓ 9,100만 유로 규모의 양자 기술 펀드 결성 발표, 2022.07.11**

QUANTONATION VENTURES는 Quantum Technologies 전용 첫 번째 펀드를 초기 목표인 5,000만 유로를 초과한 9,100만 유로(약 9,700만 US달러)로 최종 마감을 발표함

- QUANTONATION VENTURES는 MIT, Ecole Polytechnique, Ecole Normale Supérieure, l'Institut d'Optique, Oxford University, Waterloo University 및 University of Sherbrooke를 포함하여 전 세계에서 가장 인정받는 대학의 스피어아웃에 투자함
- 또한 이들은 포트폴리오에 19개 회사와 2개의 엑시트를 통해 전문 지식 내부화, 전문가 네트워크 활용 및 글로벌 생태계와의 네트워크를 통하여 최고의 기업을 소싱하고 건전한 투자 결정을 내리는 데 성공했다고 보고함

(12) QBN과 CM-EQUITY**✓ 1억 유로 규모의 양자 기술 펀드 조성, 2022.01.20**

CM-Equity와 QBN(Quantum Business Network)은 주로 유럽 내에서 초기 단계 기업과 확장 기업에 투자하기 위해 새로운 딥 테크 벤처 펀드(블랙 퀀트 펀드)를 조성함

- 블랙 퀀트 펀드는 양자 기술 발전과 상업화를 가속화하기 위해 시리즈A에 대한 프리시드 및 후속 투자에 1억 유로를 사용할 예정이며 유럽연합 집행위원회와 각국 정부는 독일과 프랑스가 미국 및 중국과의 글로벌 경쟁을 따라잡기 위해 투자를 늘리고 있음

(13) D-Wave System(캐나다)

✓ **지난 분기 및 작년 대비 3분기 매출 증가, 2022.11.14**

D-Wave System은 기업인수목적회사(SPAC·스팩)합병을 통해 미국 증시에 입성함

- 뉴욕증권거래소(NYSE)에 상장된 스펙인 DPCM캐피탈과 합병완료 후 거래시작, 상장 첫날 15.47% 오른 10달러에 거래를 마감함
- 기업공개(IPO)를 통해 2억9100만 달러(약 3800억원)를 조달함

'22년 3분기 매출은 170만 달러로 '21년 3분기보다 30% 증가했으며 '22년 2분기 매출보다 24% 증가, 운영비용은 52% 증가함

'22년 3분기 총 이익은 110만 달러로 추정되며, '21년 3분기보다 약 9%, '22년 2분기에 비해 약 38% 증가한 수치임

2022 추정 매출은 700만 달러에서 900만 달러이며 EBITDA*는 -4,900만 달러 미만일 것으로 예상됨

*EBITDA(Earnings Before Interest, Taxes, Depreciation and Amortization)는 기업이 영업활동으로 벌어들인 현금창출 능력을 나타내는 지표로 법인세·이자·감가상각비 차감 전 영업이익, 즉 순이익을 의미함

(14) SILICON QUANTUM COMPUTING (호주)

✓ **1억 3천만 달러(AUD) 자금 조달 라운드 준비**

SQC(Silicon Quantum Computing)는 실리콘을 사용하여 양자 컴퓨터를 구축하는 기업으로 2022년에 1억 3천만 달러(AUS)의 자금 조달 라운드를 시작하였으며, 연방 및 NSW 정부, Telstra, Commonwealth Bank of Australia 및 UNSW로부터 시드투자자 8,300만 달러 규모의 자금을 조달함

- TQI의 인텔리전스 플랫폼에 따르면 SQC는 2023년까지 실리콘으로 된 10큐비트 양자 집적 회로 프로토타입이 핵심적인 마일스톤이 될 것으로 예상하고 있음

(15) Classiq (이스라엘)

✓ **시리즈 B에서 3,300만 달러(US) 규모 발표, 2022.02.17**

Classiq는 양자 알고리즘 설계를 위한 플랫폼을 제공하는 기업으로 시리즈B 라운드를 통해 3,600만 달러(약 460억원)를 조달하는데 성공함

- 이번 투자 라운드를 통해 Classiq의 총 자금은 설립된 지 20개월 만에 약 4,800만 달러가 되었으며, 추가로 확보한 자금을 바탕으로 글로벌 수준의 엔지니어 및 연구원을 고용하며 전 세계에 사무실을 마련하고 회사 규모를 4배 확장하여 목표 달성에 속도를 높이겠다는 계획임
- 특히, 양자 회로 생성을 자동화하고 양자 컴퓨팅의 진입 장벽을 크게 낮추는 혁신적인 양자 알고리즘 설계 특허를 지속적으로 개발할 예정임
- 투자자에는 Hewlett Packard Enterprise(HPE)의 벤처 캐피탈 프로그램인 Hewlett Packard Pathfinder; 600억 달러 규모의 보험 회사인 Phoenix; Stanford 졸업생 투자자 그룹인 Spike Ventures; 삼성의 투자 계열사인 Samsung NEXT가 참여함

(16) EeroQ (미국)

✓ 시드 투자 라운드로 725만 달러(US) 투자유치, 2022.08.23

EeroQ는 2017년 설립됐으며 헬륨전자를 활용해 대규모 양자컴퓨터를 개발하고 있는 기업으로 시드 투자 라운드를 통해 725만 달러(약 97억원)를 투자받음

- 투자 라운드는 B캐피탈 산하 어센트 펀드가 주도했으며 V캐피탈, 칼리브레이트 벤처스,알루미 벤처스, 언바운드 벤처스, 레드 세이다 벤처스 등이 투자자로 참여함
- 투자 라운드 결과 B캐피탈 의장인 하워드 모건과 수석 매니저인 모건 폴로탄이 EeroQ 이사회 멤버로 합류함









위와 같이 양자분야는 좀 더 성숙한 다른 딥테크 영역과 비교할 때, 아직은 틈새시장에 가깝지만 많은 수의 양자 기술 기업들이 기술력과 상용화 잠재력을 입증함으로써 수십억 달러의 투자유치와 함께 기업 가치를 인정받고 있음

이와 관련하여 다음에 기재된 12개의 양자 기업은 The Quantum Insider가 선정한 [잠재적인 유니콘 양자 기업]에 관한 목록으로 정부 및 민간자금으로부터 상당한 투자를 받았으며, Quantum Daily에서 주목할 만한 성과가 보고된 기업이기도 함

- 이 기업들 중 어느 기업도 공식적으로 유니콘 기업이 되었다는 공식적인 발표는 없었지만, 이들이 조달한 상당한 규모의 투자금, 잠재적 시장 규모 및 이들 기업들에 대한 투자자들의 관심은 유니콘 기업으로의 가능성을 간접적으로 보여주는 지표라 할 수 있음
- 현재 양자 분야에는 더 많은 기업들이 상당한 규모의 투자를 유치했고 수십억 달러의 기업 가치를 달성했지만, 아래의 표는 모든 기업들을 포함하고 있지는 않음

[표] The Quantum Insider 선정 잠재적 유니콘 양자 기업 12개사(2021기준)

번호	기업	내용
1		<ul style="list-style-type: none"> ● 미국-중국 생명공학 회사인 XtalPi은 Softbank를 주요 투자자로총 \$385,178,900 규모의 자금을 조달함 ● XtalPi는 인공 지능을 사용하여 drug discovery 분야를 주도하고 있으며, 양자 알고리즘을 제약 연구 및 개발을 향상시키는 효과적인 수단으로 보고 있음
2		<ul style="list-style-type: none"> ● 미국에 본사를 둔 PsiQuantum은 약 \$278,500,000 백만 달러 규모의 자금을 조달함 ● PsiQuantum은 실리콘 광자 큐비트를 사용하는 최초의 범용 양자 컴퓨터 구축을 목표로 하고 있으며, 그 목표를 달성하기 위한 가장 가능성이 높은 수단은 photonics라고 판단함
3		<ul style="list-style-type: none"> ● D-Wave는 양자 컴퓨팅 및 초전도 전자 장치를 설계하고 제조하는 풀 스택 양자 컴퓨팅 회사로 \$204,922,252 규모의 자금을 조달한 것으로 추산됨
4		<ul style="list-style-type: none"> ● Rigetti Computing은 캘리포니아 버클리에 본사를 두고 양자 컴퓨터를 위한 하드웨어 및 소프트웨어 솔루션을 개발함 ● 2020년 8월 발표된 지난해 7,900만 달러 규모의 시리즈 C 라운드를 이끌었으며 총 약 \$198,450,000 규모의 자금을 조달함

번호	기업	내용
5		<ul style="list-style-type: none"> 캘리포니아 주 칼스 배드에 본사를 두고있는 Ostendo는 세계 유일의 quantum photonic imager의 본거지라고 평가됨 약 \$192,200,000 규모의 자금을 조달한 것으로 추정됨
6		<ul style="list-style-type: none"> 메릴랜드 주 칼리지 파크에 본사를 둔 IonQ는 양자 회로를 생성하고 최적화하는데 필요한 소프트웨어와 함께 이온트랩형 범용 양자 컴퓨터를 개발하고 있으며, 약 \$84,000,000의 자금을 조달함
7		<ul style="list-style-type: none"> 제네바에 본사를 둔 ID Quatique는 양자 암호화 제품에는 양자 키 분배 시스템, 양자 안전 네트워크 암호화, 단일 광자 카운터 및 하드웨어 난수 생성기 등을 개발하고 있음 총 약 \$74,600,000 규모의 자금을 조달함
8		<ul style="list-style-type: none"> 영국에 본사를 둔 Cambridge Quantum Computing(CQC)은 이미 NLP (quantum AI) 및 양자 사이버 보안을 포함한 다양한 용도의 제품을 만들고 있는 풀 스택 양자 기업임 CQC는 총 \$73,000,000 규모의 자금을 조달한 것으로 나타났으며, 현재 평가액은 약 \$50,000,000로 추산됨
9		<ul style="list-style-type: none"> 보스톤에 본사를 둔 Zapata Computing은 기업을 위한 양자 소프트웨어 및 알고리즘을 개발하고 있으며, 최근 2020년 가을에 시리즈B 라운드를 위한 \$38,000,000의 자금을 발표하여 총 \$67,400,000 규모의 자금을 조달함
10		<ul style="list-style-type: none"> Australia CQC2T(Centre of Excellence for Quantum Computation and Communication Technology)에서 개발된 기술에 기반을 둔 Silicon Quantum Computing은 실리콘의 양자 집적 회로 프로토타입을 개발하고 있으며, 총 \$65,000,000 규모의 자금을 조달한 것으로 추정됨
11	 ColdQuanta	<ul style="list-style-type: none"> ColdQuanta는 다양한 유형의 양자 기술에 필요한 냉각레이저, 초저온 원자 장비들을 개발하고 있음 총 \$59,000,000 규모의 자금을 조달함
12		<ul style="list-style-type: none"> 스코틀랜드에 본사를 둔 M Squared Lasers는 광자 중심의 양자 기업으로 총 \$56,400,000 규모의 자금을 조달함

II-2. 양자스타트업 투자동향 분석

2-1. 분석개요

본 자료는 '양자 스타트업'의 투자동향에 관한 분석자료로 스타트업의 기준은 '설립 7년 이내'로 정함

- 그러나, D-Wave System, ColdQuanta 와 같이 설립 7년 이내는 아니지만, 양자분야를 대표하는 기업들은 예외적으로 포함하고 있음

Crunchbase 및 자체조사 데이터를 기반으로 하며, 투자이력 추적이 불가능한 기업은 본 통계에서 제외되었음

투자건수 및 투자금액(KRW)의 경우 분석시기/환율 등에 따라 다소간의 차이가 있을 수 있음

따라서, 본 자료는 양자스타트업의 투자동향에 대한 정확한 수치보다는 Landscape을 참고하는데 의미가 있으며, 상기 Landscape은 스타트업에 초점이 맞춰져 있음

[표] 양자스타트업 투자동향 분석개요

분석대상	설립 7년 이내 스타트업 (2016-2022)	DB출처	Crunchbase 및 자체조사
적용환율	약 1,353원/1달러		
비고	설립 7년 이후이지만, 양자분야를 대표하는 기업들은 예외적으로 포함하고 있음		
예외적으로 포함된 기업	기업명	국가	설립연도
	D-Wave System	Canada	1999
	ColdQuanta	US	2007
	M Squared	UK	2003
	Quintessence Lab	Australia	2008
	Post-Quantum	UK	2009
	1QBit	Canada	2012
	Rigetti	US	2013
	Cambridge Quantum Computing	UK	2014
	QC Ware	US	2014
	IonQ	US	2015
	Crypto Quantique	UK	2015
	Quantum Circuits	US	2015
	Quantala	US	2015
	EeroQ	US	2016
Psi Quantum	US	2016	
Xanadu	Canada	2016	

2-2. 분석내용

(1) 연도별 양자스타트업 설립 추이

(단위: 개)

[그림] 연도별 양자스타트업 설립 추이



(단위: 개)

[표] 연도별 양자스타트업 설립 추이

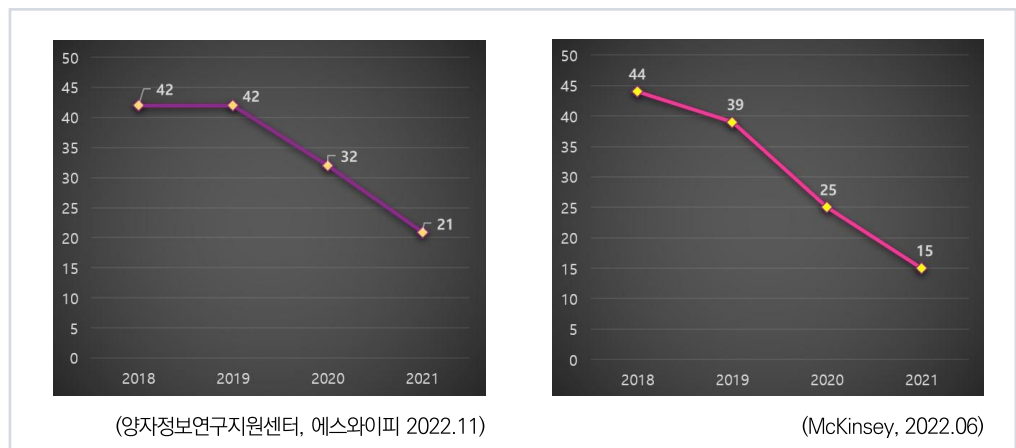
구분	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
개 수	9	8	17	24	41	42	42	32	21	6
누적	9	17	34	58	99	141	183	215	236	242

본 그래프는 양자 스타트업의 연도별 설립수와 누적설립수를 함께 나타낸 그래프임

- 2015년과 2016년 그리고 2016년과 2017년 두 번에 걸쳐서 큰 증가세를 보였으며 특히 2016년과 2017년 사이에는 두배 가까이 되는 증가세를 보임
- 2019년을 기점으로 최근 2-3년 동안에는 양자 스타트업의 설립수는 감소세를 보이고 있음

[그림] 양자스타트업 설립 추이 (좌)

[그림] 양자컴퓨팅기업 설립 추이 (우)



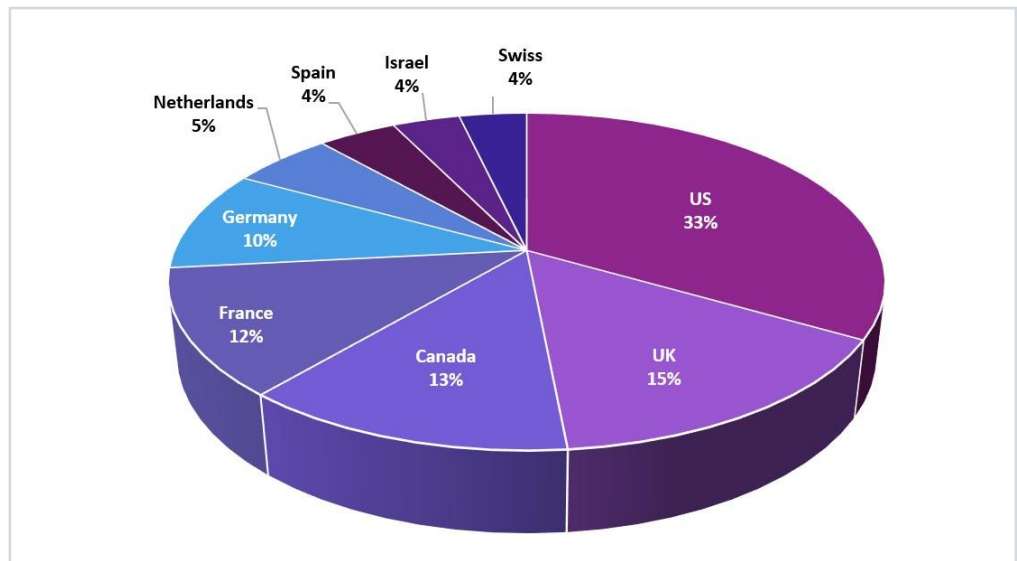
상기 두 개의 그래프는 본고의 조사로 도출된 “[그림] 2018-2021년 양자스타트업의 설립 추이(좌)”와 글로벌 경영컨설팅 그룹인 McKinsey(맥킨지)에서 조사한 “[그림] 2018-2021년 양자컴퓨팅기업의 설립 추이(우)” 를 함께 나타낸 그래프임

- 두 그래프의 양상은 유사하게 나타났으며, 두 그래프간 조사범위와 시기의 차이를 감안하면 유의미한 조사가 이루어졌다고 판단됨
- 특히, 두 그래프의 조사범위는 각각 ‘양자스타트업’과 ‘양자컴퓨팅기업’으로 차이가 있는데 반해 그 양상이 유사하다는 것은 기존에 알려진 바와 같이 “양자스타트업은 양자컴퓨팅기업에 치중되어 있다” 고 해석해도 큰 무리가 없을 것으로 보임

(2) 국가별 양자스타트업 수

(단위: %)

[그림] 국가별 양자 스타트업 TOP10 (2016-2022)



[그림] 국가별 양자 스타트업 TOP10 (2016-2022)

번호	국가명	개수	번호	국가명	개수
1	US	55	11	China	4
2	UK	25	12	India	4
3	Canada	21	13	Japan	4
4	France	20	14	Poland	4
5	Germany	16	15	Singapore	4
6	Netherlands	9	16	Austria	3
7	Spain	7	17	South Korea	3
8	Israel	6	18	Bulgaria	2
9	Swiss	6	19	Estonia	2
10	Australia	4	20	Finland	2

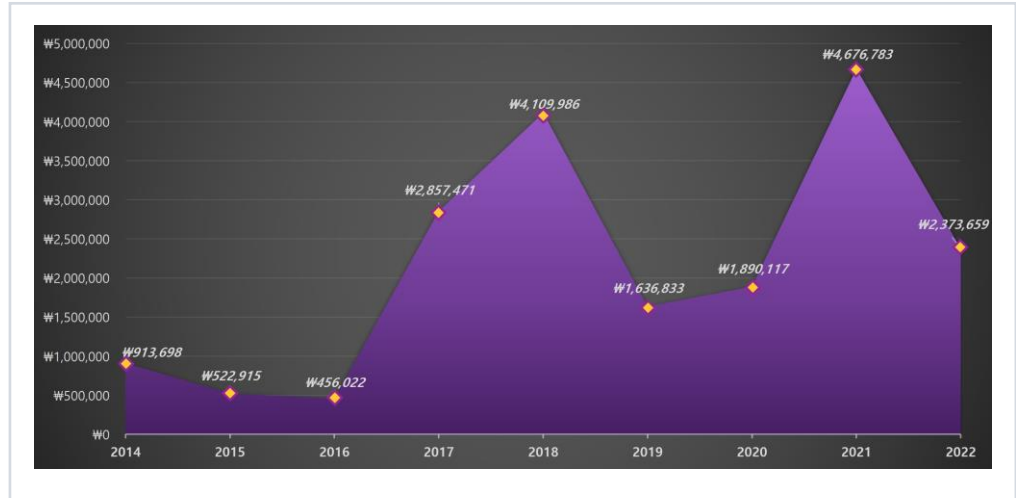
본 그래프는 국가간 양자 스타트업의 개수와 비율에 관한 그래프임

- 미국이 33%(55개)의 비율로 가장 많은 기업을 보유하고 있는 국가로 나타났으며, 그 뒤를 영국(25개, 15%)과 캐나다(21개, 13%)가 자리하고 있음
- 대한민국의 양자 스타트업 수는 3개(17순위)로 Austria와 자리를 같이하고 있음

(3) 연도별 양자스타트업 투자규모

(단위: 백만원)

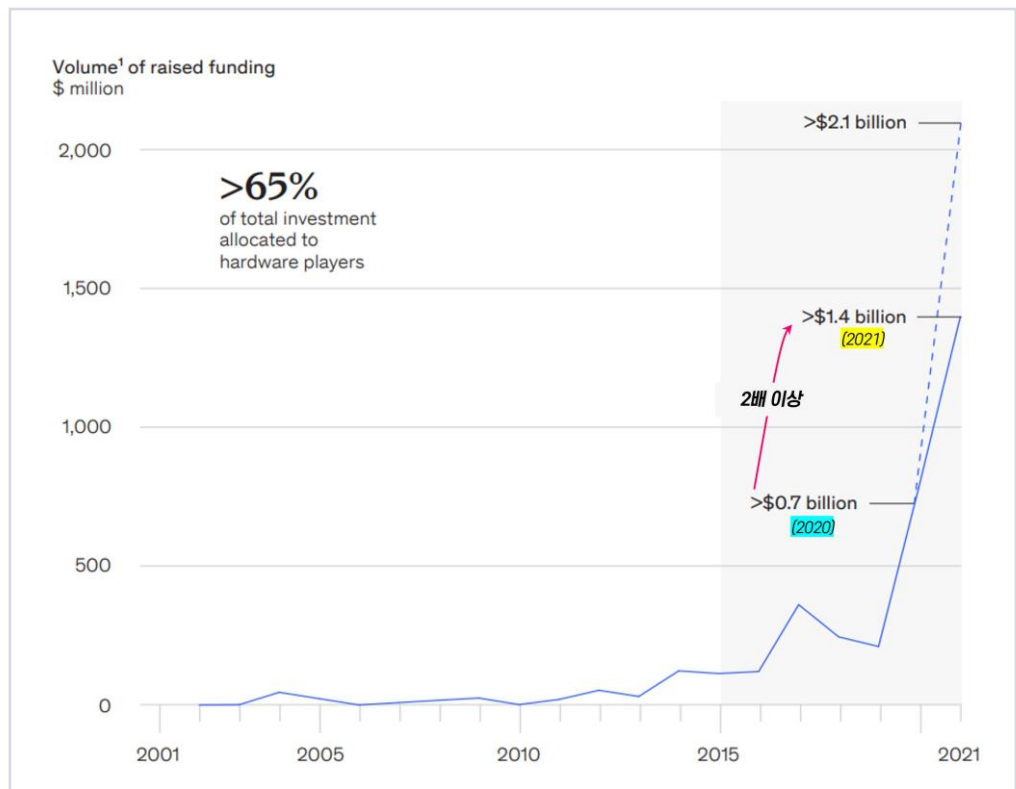
[그림] 연도별 양자스타트업 투자규모



본 그래프는 2014-2022년 연도별 양자 스타트업의 투자금액 추이에 관한 그래프임

- 양자 기업들의 총투자금액 추이는 2020년 약 1.9조 수준에서 2021년 4.67조로 두 배 이상 증가함
- 앞서 다룬 양자 기업의 설립과 연관 지어 보면 기업의 설립은 2016-2017년도에 커다란 증가세를 보였고 그로부터 2-3년 뒤인 2020-2021년에 투자금의 성장세를 볼 수 있음
- 2022년에는 전 세계적인 투자 둔화세와 맞물려 양자분야 역시 직전 2021년도 대비 투자금액이 절반 가량으로 줄어든 것이 확인됨

[그림] McKinsey의 연도별 양자스타트업 투자규모



※출 처: McKinsey, Quantum Technology Monitor, (2022.06)

글로벌 경영컨설팅 그룹인 McKinsey(맥킨지)에 따르면 양자 기술에 중점을 둔 스타트업에 대한 투자가 2020년 7억 달러에서 2021년 14억 달러로 두 배 이상 증가함

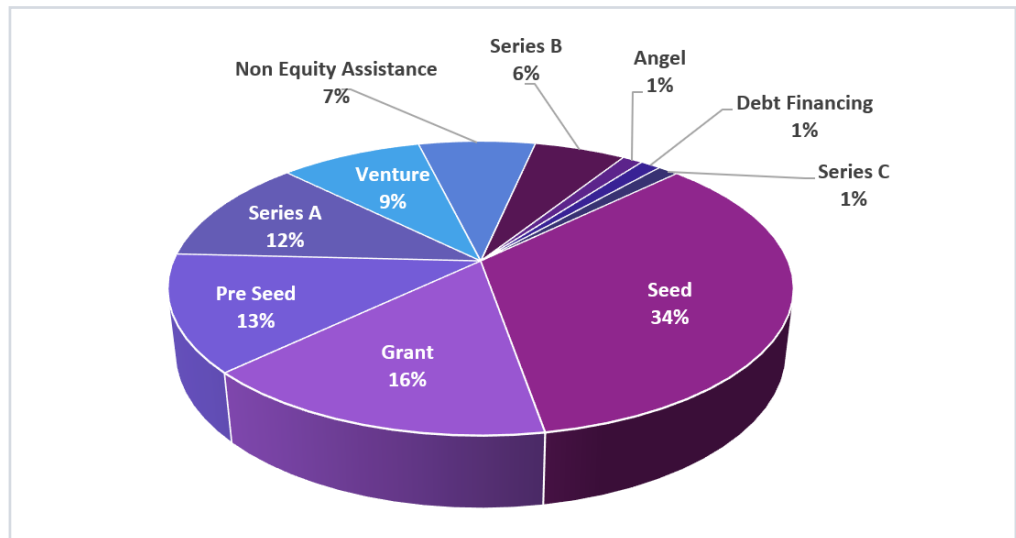
- 양자스타트업에 대한 투자 비중은 2021년 하반기에 증가(2021년 9월 50%에서 증가)했으며 투자의 70% 이상을 차지하는 것으로 나타남
- McKinsey(맥킨지)는 이를 양자 기술에 대한 투자가 수익을 낼 수 있다는 가능성이 높아졌음을 간접적으로 보여주는 자료로 평가함
- 본고의 조사로 도출된 “[그림] 연도별 양자스타트업 투자규모”와도 같은 양상(2020년에서 2021년까지 투자규모가 2배 이상 증가, 2022년의 투자규모는 직전년도 대비 절반 수준)을 보이고 있음

아울러 “전 세계적으로 이러한 민간 투자의 가장 큰 부분(49%)은 여전히 미국 기업에 있으며 영국(17%)과 캐나다(14%)가 그 뒤를 잇는다” 는 McKinsey(맥킨지)의 분석은 본고에서 앞서 언급한 “[그림] 국가별 양자 스타트업 TOP10 (2016-2022)” 과도 맞물리는 부분으로 판단됨

(4) 투자라운드 별 건수 및 비율

(단위: %)

[그림] 투자라운드 별 비율 TOP10 (2016-2022)



[표] 투자라운드 별 건수 TOP15 (2016-2022)

번호	투자라운드	개 수	비 고
1	Seed	110	초기투자
2	Grant	50	지원금
3	Pre Seed	41	프리시드
4	Series A	37	시리즈 A
5	Venture	28	벤처투자
6	Non Equity Assistance	23	비주식자금조달
7	Series B	18	시리즈 B
8	Angel	4	엔젤투자
9	Debt Financing	4	부채조달
10	Series C	4	시리즈C
11	Convertible Note	2	전환사채
12	Post-IPO Equity	2	상장후 자금조달
13	Series D	2	시리즈D
14	Equity Assistance	1	자금조달
15	Funding Round	1	펀딩라운드

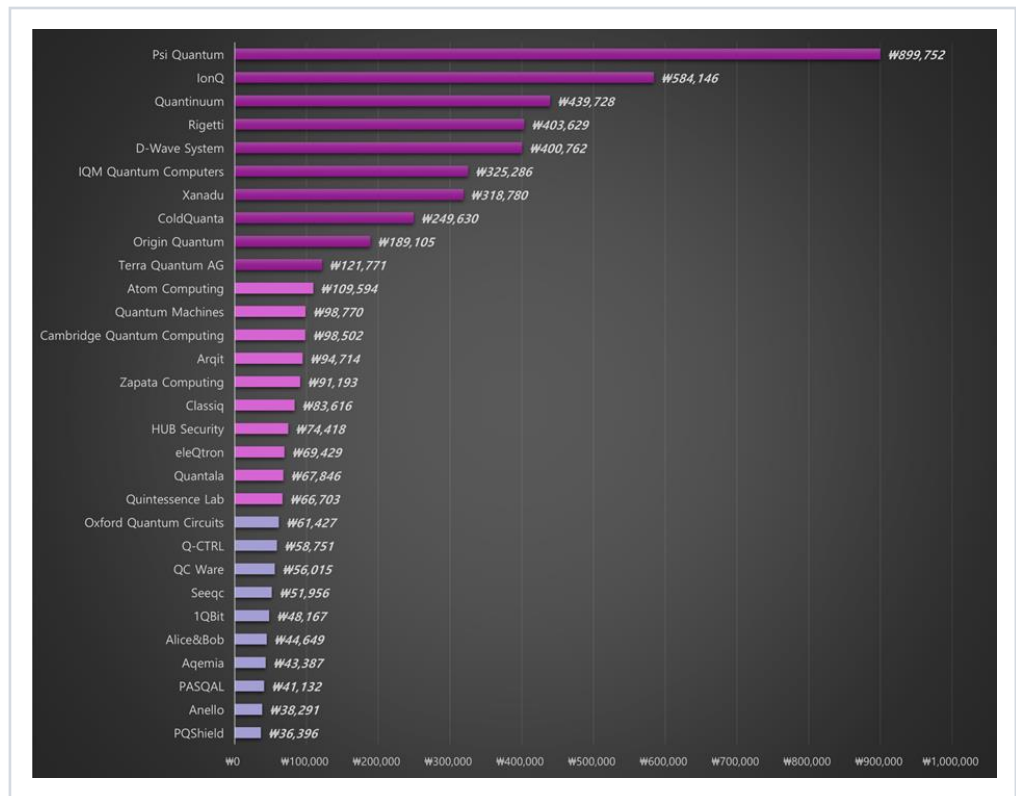
본 그래프는 양자스타트업들의 투자라운드 별 건수 및 비율에 관한 그래프임

- 양자스타트업 또한 스타트업의 특성상 주요 투자라운드로는 Seed 라운드가 34%(110건) 가장 많은 비율을 차지하고 있음
- 눈여겨 볼만한 항목으로는 Seed 다음으로 자리 잡은 Grant(지원금) 라운드로 양자분야에는 '공적자금' 이 많이 유입되고 있음을 알 수 있음

(5) 양자스타트업 투자유치 TOP30

(단위: 백만원)

[그림] 양자스타트업 투자유치 TOP30 (2016-2022)



본 그래프는 양자스타트업 투자유치 TOP30에 관한 그래프임

*그래프의 색깔은 가독성을 높이기 위한 구분일 뿐, 다른 의미를 내포하고 있지 않음

- 본 통계는 Crunchbase에 기재된 'Total Funding Amount' 를 기준으로 함
- 분석개요에도 언급한 바와 같이 설립 7년 이후이지만, 양자분야를 대표하는 기업들(D-Wave System외 16개 기업)도 포함하였음
- DT(Deutsch Telekom), BT(British Telecom)와 같이 양자 기술을 영위하고 있는 글로벌 통신기업들도 각각 3.7조, 3.6조원 규모의 투자를 받은 것으로 나타나지만, 순수하게 양자 기술로만 받은 투자가 아닐 가능성이 높아 본 그래프에서는 노이즈로 간주하여 제외하였음
- 순수한 양자 스타트업으로는 미국의 Psi Quantum이 약 9천억 원으로 압도적으로 큰 규모의 자금을 유치한 것으로 나타났으며, 그 뒤를 각각 IonQ가 5천 8백억 원, Quantinuum이 4천 4백억 원 규모의 투자를 받아 2위, 3위에 자리하고 있음

[표] 양자스타트업
투자유치 TOP30
(2016-2022,
투자금액 내림차순)

번호	기업명	설립연도	투자금액	백만원
1	Psi Quantum	2016	₩899,751,650,000	₩899,752
2	IonQ	2015	₩584,146,080,000	₩584,146
3	Quantinuum	2021	₩439,728,250,000	₩439,728
4	Rigetti	2013	₩403,628,715,000	₩403,629
5	D-Wave System	1999	₩400,761,562,000	₩400,762
6	IQM Quantum Computers	2018	₩325,285,940,000	₩325,286
7	Xanadu	2016	₩318,779,770,654	₩318,780
8	ColdQuanta	2007	₩249,630,345,000	₩249,630
9	Origin Quantum	2017	₩189,105,000,000	₩189,105
10	Terra Quantum AG	2019	₩121,770,900,000	₩121,771
11	Atom Computing	2018	₩109,593,810,000	₩109,594
12	Quantum Machines	2018	₩98,769,730,000	₩98,770
13	Cambridge Quantum Computing	2014	₩98,502,407,910	₩98,502
14	Arqit	2016	₩94,713,853,760	₩94,714
15	Zapata Computing	2017	₩91,192,874,000	₩91,193
16	Classiq	2020	₩83,616,018,000	₩83,616
17	HUB Security	2017	₩74,418,027,954	₩74,418
18	eleQtron	2020	₩69,429,000,000	₩69,429
19	Quantala	2015	₩67,845,500,000	₩67,846
20	Quintessence Lab	2008	₩66,703,393,000	₩66,703
21	Oxford Quantum Circuits	2017	₩61,426,654,000	₩61,427
22	Q-CTRL	2017	₩58,750,977,779	₩58,751
23	QC Ware	2014	₩56,014,614,000	₩56,015
24	Seeqc	2018	₩51,955,584,000	₩51,956
25	1QBit	2012	₩48,167,156,000	₩48,167
26	Alice&Bob	2020	₩44,649,330,000	₩44,649
27	Aqemia	2019	₩43,387,142,285	₩43,387
28	PASQAL	2019	₩41,131,504,000	₩41,132
29	Anello	2021	₩38,291,458,020	₩38,291
30	PQShield	2018	₩36,395,969,000	₩36,396

II-3. 논문 클러스터링 분석

3-1. 분석개요

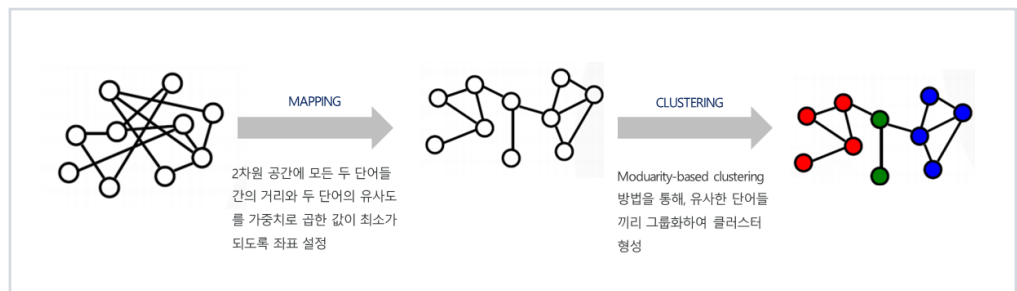
(1) 클러스터 분석이란

클러스터분석은 시각화(mapping)와 주제별 군집화(clustering)를 동시에 수행할 수 있는 VOSviewer 프로그램을 사용하여 진행하였음

해당 프로그램은 중요도에 따른 가중치를 고려하는 modularity-based clustering 알고리즘을 사용하여 단어 간 유사도가 높을수록 가깝게 위치함

이 때 유사도는 두 단어가 한 논문에서 동시 출현한 횟수에 비례하고, 두 단어를 제외한 다른 단어들과 동시 출현한 빈도의 합에 반비례함

[그림] 클러스터 분석 방법



위와 같은 방식으로 클러스터를 군집화한 뒤, 프로그램 내부 알고리즘에 따라 클러스터 내에 속한 아이템의 수가 많은 클러스터부터 차례대로 번호와 색상을 부여함

본고에서는 각각의 클러스터 색상에 따라 클러스터-R (Red, 빨강), 클러스터-G (Green, 초록), 클러스터-B (Blue, 파랑), 클러스터-Y (Yellow, 노랑), 클러스터-P (Purple, 보라), 클러스터-S (Sky blue), 클러스터-O (Orange, 주황), 클러스터-D (Dark brown, 어두운 갈색), 클러스터-H (Hot pink, 진한분홍), 클러스터-L (Light pink)로 명명함

(2) 분석조건

검색 DB	SCOPUS	정 령	관련도순 정렬	
유효데이터	각 연도별 상위 2,000개	기간	제 1구간	2006-2010
			제 2구간	2011-2015
			제 3구간	2019-2023
문서유형	Article, Conference Paper			
검색식	TITLE-ABS-KEY(((quantumW/1(comput* OR information OR technology OR communication OR algorithm OR advantage)) ANDNOT "densityfunctionaltheory" ANDNOT "quantumdot"))			

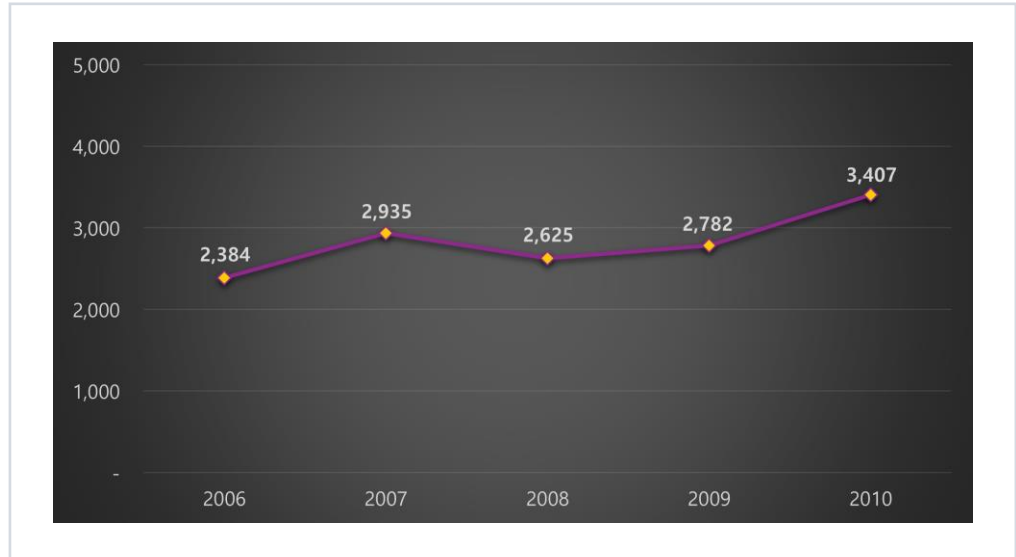
[표] 전체구간 +
전체분야 상위키워드
TOP50

번호	키워드	출현빈도	번호	키워드	출현빈도
1	Quantum computers	12,286	26	Computational complexity	637
2	Quantum optics	11,086	27	Quantum gates	622
3	Quantum theory	8,434	28	Quantum key distribution	637
4	Quantum entanglement	5,561	29	Communication channels	613
5	Quantum computing	5,353	30	Quantum network	610
6	Quantum communication	4,428	31	Quantum correlations	600
7	Quantum information	3,698	32	Quantum information processing	591
8	Photons	3,495	33	Quantum efficiency	579
9	Qubits	3,479	34	Quantum circuits	570
10	Quantum cryptography	3,338	35	Machine learning	570
11	Quantum algorithms	2,130	36	Single photons	567
12	Quantum-information processing	2,093	37	Computer simulation	563
13	Quantum chemistry	1,992	38	Learning algorithms	554
14	Article	1,912	39	network security	550
15	Quantum theory	1,690	40	Optical fibers	547
16	Quantum technologies	1,608	41	Quantum genetic algorithms	557
17	Particle beams	1,409	42	degrees of freedom	525
18	algorithms	1,364	43	Ions	522
19	Logic gates	1,297	44	Quantum information theory	553
20	Quantum computation	1,243	45	Quantum teleportation	518
21	Quantum state	1,294	46	Quantum simulations	505
22	Quantum circuits	1,229	47	Superconducting qubits	494
23	optimization	1,193	48	Codes	486
24	atoms	1,166	49	Quantum information science	482
25	Of quantum-information	1,157	50	Authentication	479

(2) 제 1구간(2006년-2010년)

✓ 제 1구간 전체분야 논문출판 추이

[그림] 제 1구간
(2006년-2010년)
전체분야 논문출판
추이



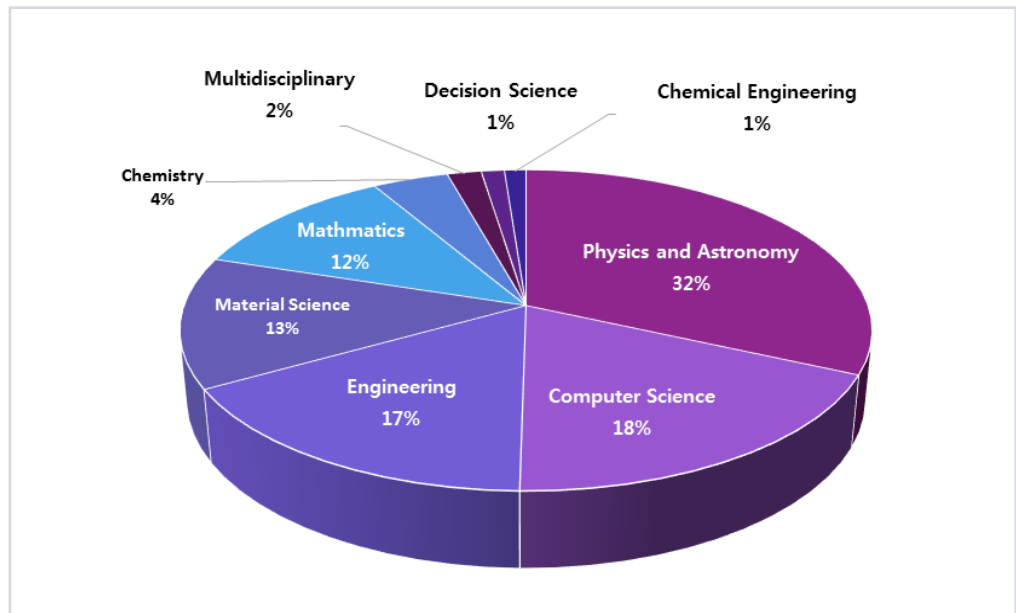
제 1구간의 전체분야 평균 논문출판 수는 약 2,827건으로 나타남

제 1구간의 전체분야 논문출판 수는 전반적으로 증가하는 추세로 나타났으나, 2007년~2008년에는 약 10.56% 감소함

- 논문 출판 수 증가율은 2006년~2007년 23.11%, 2007년~2008년 -10.56%, 2008년~2009년 5.98% 2009년~2010년 22.47%로 2007년에 가장 큰 비율로 증가하였음
- 제 1구간(2006년-2010년)의 연평균 논문 출판 증가율은 9.34%로 나타남

✓ 제 1구간 전체분야 논문출판 추이

[그림] 제 1구간
(2006년-2010년)
전체분야 논문 분야별
비율



클러스터-P는 양자와 관련된 단어들 포함되어 있으며 상위 빈도수 키워드는 quantum measurement(75), cavity qed(64), atomic spontaneous emission(10) 등으로 나타남

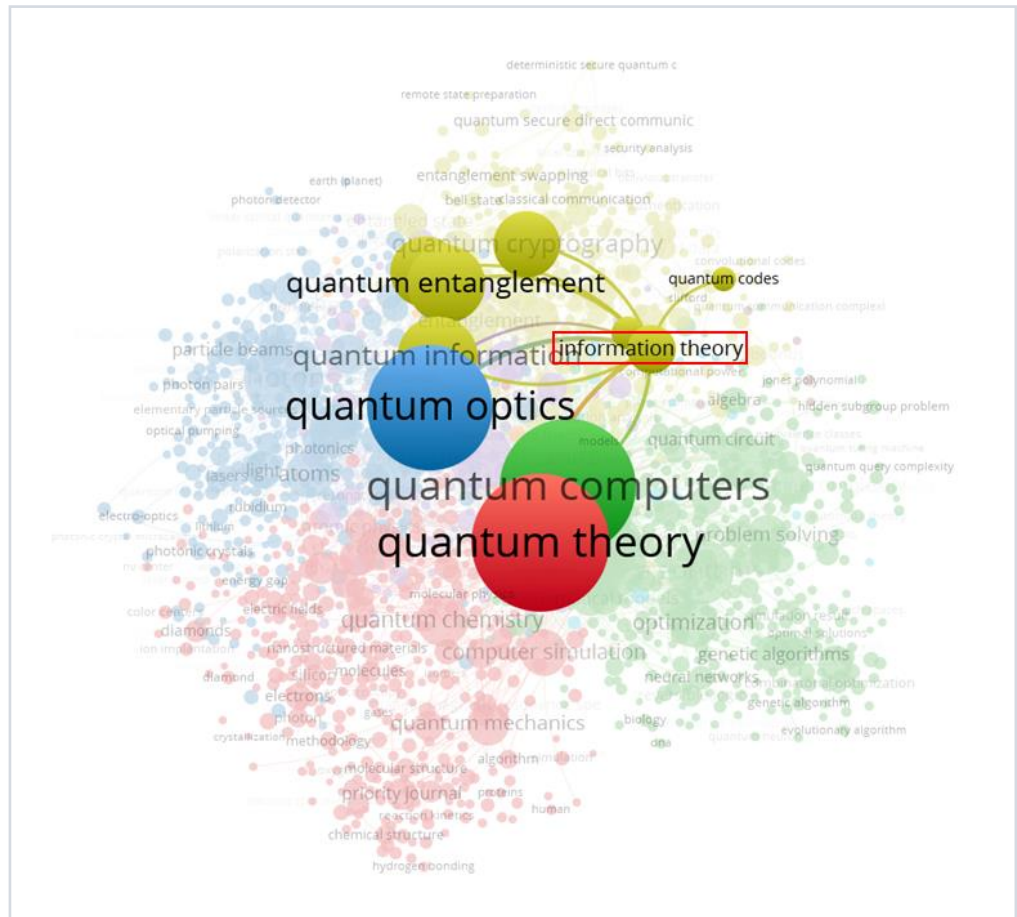
클러스터-S는 양자물리학 분야에 속하는 단어들 포함되어 있으며 상위 빈도수 키워드는 measurement theory(44), entropy(102), fisher information(28) 등으로 나타남

클러스터-O는 디스플레이 분야에 속하는 단어들 포함되어 있으며 상위 빈도수 키워드는 display devices(13), temperley-lieb algebra(10), statistical methods(27) 등으로 나타남

클러스터-D는 양자역학 분야에 속하는 단어들 포함되어 있으며 상위 빈도수 키워드는 quantum field theory(13), weaving(13), complete problems(11) 등으로 나타남

클러스터-H는 correlation theory(10) 키워드가 속해있음

[그림] 제 1구간 (2006년-2010년) 전체분야 'information theory' 하이라이팅



제 1구간에서 표현된 클러스터 중 information theory 키워드를 분석한 결과 Quantum theory(2508), quantum optics(2059), quantum entanglement(790)가 연관된 것으로 분석됨

제 1구간 전체분야의 출현빈도수 Top20 키워드를 아래에 표로 나타냄

[표] 제 1구간
(2006년~2010년)
전체분야 상위키워드

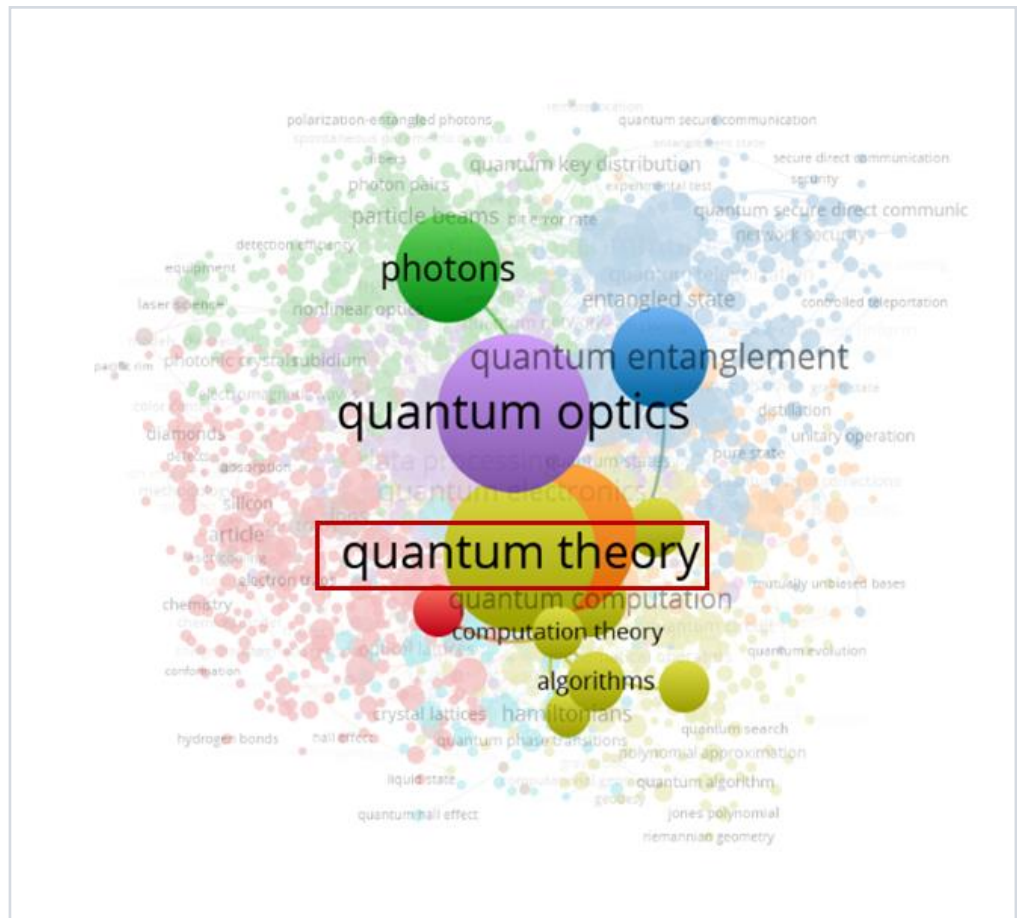
번호	키워드	빈도수
1	Quantum Theory	2,508
2	Quantum computers	2,422
3	Quantum optics	2,059
4	Quantum computing	874
5	Photons	843
6	Quantum information	821
7	Quantum entanglement	790
8	Quantum communication	640
9	Algorithms	576
10	Quantum cryptography	565
11	Quantum electronics	552
12	Quantum computation	568
13	Computational linguistics	471
14	Data processing	409
15	Quantum-information processing	375
16	Quantum algorithms	375
17	Quantum chemistry	370
18	Optimization	325
19	Computation theory	312
20	Atoms	307

클러스터-O는 양자암호 분야에 속하는 단어들이 포함되어 있으며 상위 빈도수 키워드는 quantum codes(40), quantum error corrections(38), computer programming(9) 등으로 나타남

클러스터-D는 이온입자 분야에 속하는 단어들이 포함되어 있으며 상위 빈도수 키워드는 ions(123), neutral atoms(35), precision measurement(14) 등으로 나타남

클러스터-H는 양자센싱 분야에 속하는 단어들이 포함되어 있으며 상위 빈도수 키워드는 parameter estimation(49), simple schemes(12), quantum fisher information(11) 등으로 나타남

[그림] 제 1구간
(2006년-2010년)
TOP01 분야 'quantum
theory' 하이라이팅



제 1구간 Physics and Astronomy 분야에서 표현된 클러스터 중 Quantum theory 키워드를 분석한 결과 Quantum optics(1604), Photons(748), algorithms(221)가 연관된 것으로 분석됨

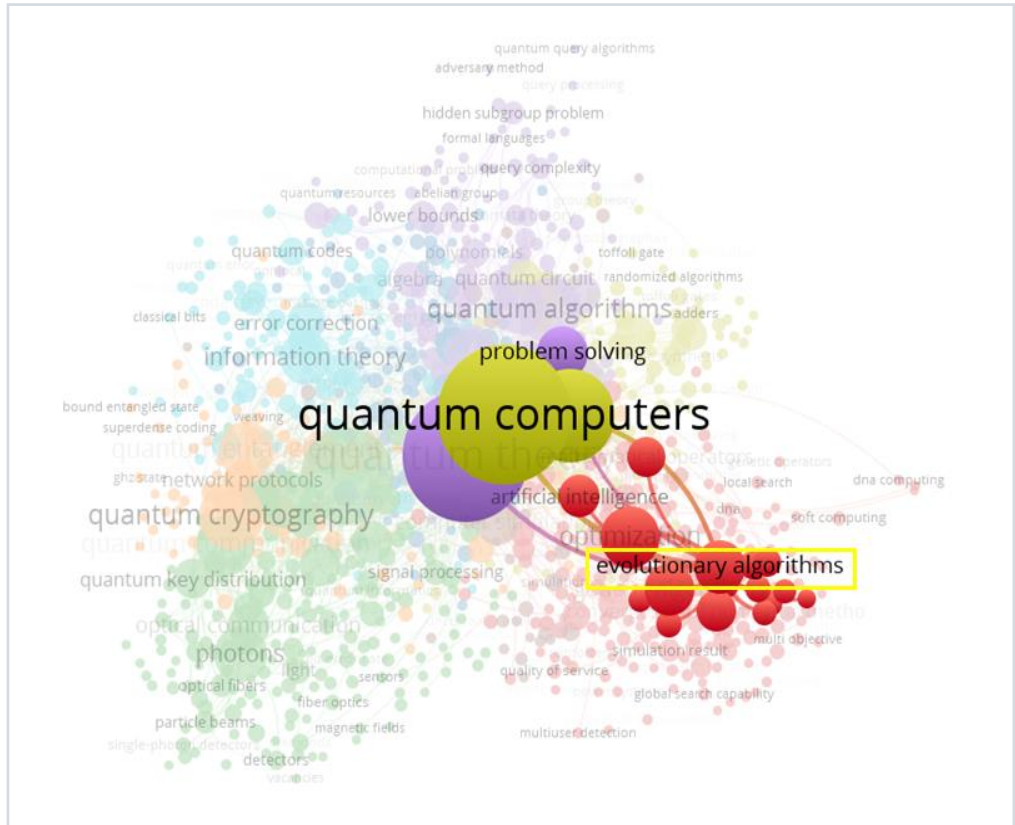
제 1구간 Physics and Astronomy 빈도수 Top20 키워드를 아래에 표로 나타냄



[표] 제 1구간
(2006년-2010년)
TOP01 분야
상위키워드

번호	키워드	빈도수
1	Quantum Optics	1,604
2	Quantum theory	1,596
3	Quantum computers	1,407
4	Photons	748
5	Quantum information	684
6	Quantum entanglement	647
7	Quantum communication	462
8	Quantum computing	412
9	Quantum electronics	390
10	Quantum cryptography	338
11	Quantum-information processing	332
12	Quantum computation	346
13	Data processing	329
14	Atmos	269
15	Computational linguistics	267
16	Spin dynamics	231
17	Algorithms	221
18	Qubits	220
19	Decoherence	207
20	Quantum chemistry	182

[그림] 제 1구간
(2006년-2010년)
TOP02 분야
'evolutionary
algorithms' 하이라이팅



제 1구간 Computer Science 분야에서 표현된 클러스터 중 evolutionary algorithms 키워드를 분석한 결과 quantum computers(933), quantum algorithms(216), problem solving(131) 가 연관된 것으로 분석됨

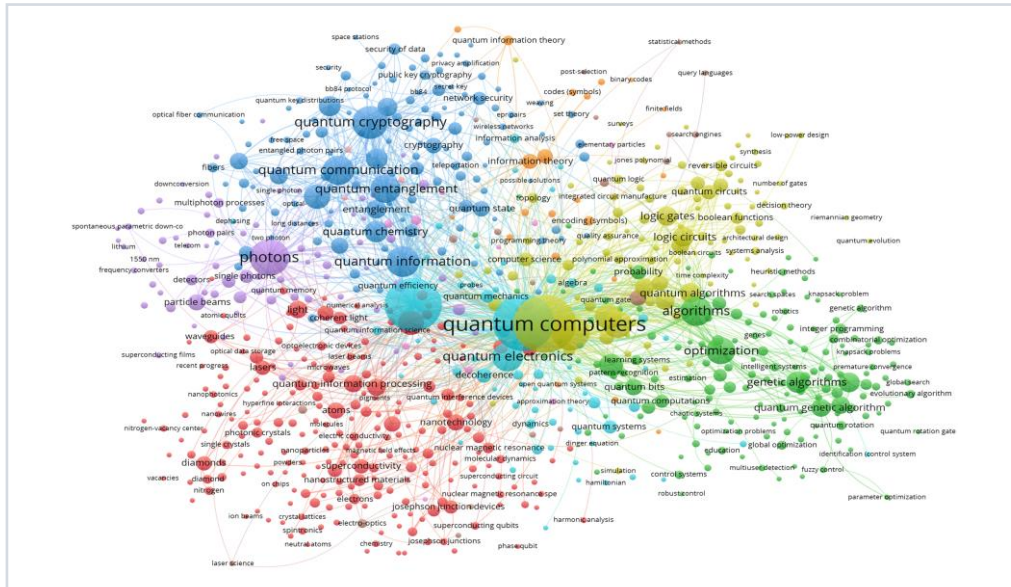
제 1구간 Computer Science의 빈도수 Top20 키워드를 아래에 표로 나타냄

[표] 제 1구간
(2006년-2010년)
TOP02 분야
상위키워드

번호	키워드	빈도수	번호	키워드	빈도수
1	Quantum computers	933	11	Optimization	179
2	Quantum theory	873	12	Quantum entanglement	170
3	Quantum optics	472	13	Quantum information	168
4	Quantum computing	416	14	Photons	160
5	Algorithms	290	15	Computational complexity	145
6	Quantum cryptography	230	16	Information theory	143
7	Quantum algorithms	216	17	Computation theory	139
8	Quantum computation	204	18	Evolutionary algorithms	132
9	Computational linguistics	187	19	Problem solving	131
10	Quantum communication	186	20	Genetic algorithms	124

[그림] 제 1구간
(2006년-2010년)
TOP03
분야(Engineering)
클러스터

제 1구간 TOP03 분야(Engineering) 클러스터



제 1구간 Engineering 분야 클러스터는 총 10개로 나타남

클러스터-R는 양자정보처리 분야에 속하는 단어들이 포함되어 있으며 상위 빈도수(Occurrences) 키워드는 quantum-information processing(57), light(57), photonics(44) 등으로 나타남

클러스터-G는 양자알고리즘 분야에 속하는 단어들이 포함되어 있으며 상위 빈도수 키워드는 algorithms(162), optimization(138), computer simulation(94) 등으로 나타남

클러스터-B는 양자시스템 분야에 속하는 단어들이 포함되어 있으며 상위 빈도수 키워드는 quantum electronics(158), decoherence(41), quantum systems(33) 등으로 나타남

클러스터-Y는 양자컴퓨터 분야에 속하는 단어들이 포함되어 있으며 상위 빈도수 키워드는 quantum computers(629), quantum computation(139), logic circuits(73) 등으로 나타남

클러스터-P는 광학분야에 속하는 단어들이 포함되어 있으며 photons(249), particle beams(49), nonlinear optics(28) 등으로 나타남

클러스터-S는 양자시스템 분야에 속하는 단어들이 포함되어 있으며 상위 빈도수 키워드는 quantum systems(33), numerical methods (18), hamiltonian(6) 등으로 나타남

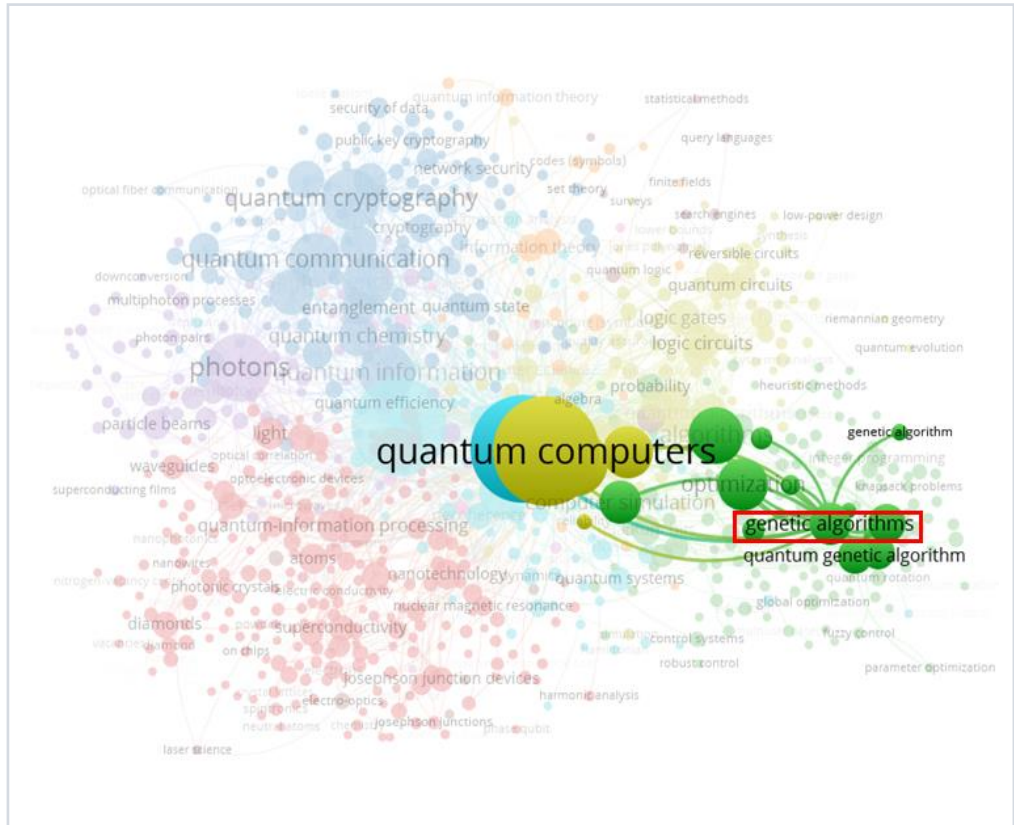
클러스터-O는 양자정보 분야에 속하는 단어들이 포함되어 있으며 상위 빈도수 키워드는 information theory(44), quantum information theory(19), decoding(8) 등으로 나타남

클러스터-D는 데이터 분야에 속하는 단어들이 포함되어 있으며 상위 빈도수 키워드는 mathematical models(45), measurement theory(12), quantum fourier transform(6) 등으로 나타남

클러스터-H는 입자분야에 속하는 단어들이 포함되어 있으며 상위 빈도수 키워드는 entangled states(18), quantum noise(12), boson(5) 등으로 나타남

클러스터-N은 클라우드와 관련된 단어들이 포함되어 있으며 상위 빈도수 키워드는 cluster state(9), continuous variables(8), one-way quantum computation(6) 등으로 나타남

[그림] 제 1구간
(2006년-2010년)
TOP03 분야 'genetic algorithms' 하이라이팅



제 1구간 분야에서 표현된 클러스터 중 genetic algorithms 키워드를 분석한 결과 Quantum computers(629), quantum genetic algorithm(63), genetic algorithm(12) 가 연관된 것으로 분석됨

제 1구간 Engineering의 빈도수 Top20 키워드를 아래에 표로 나타냄

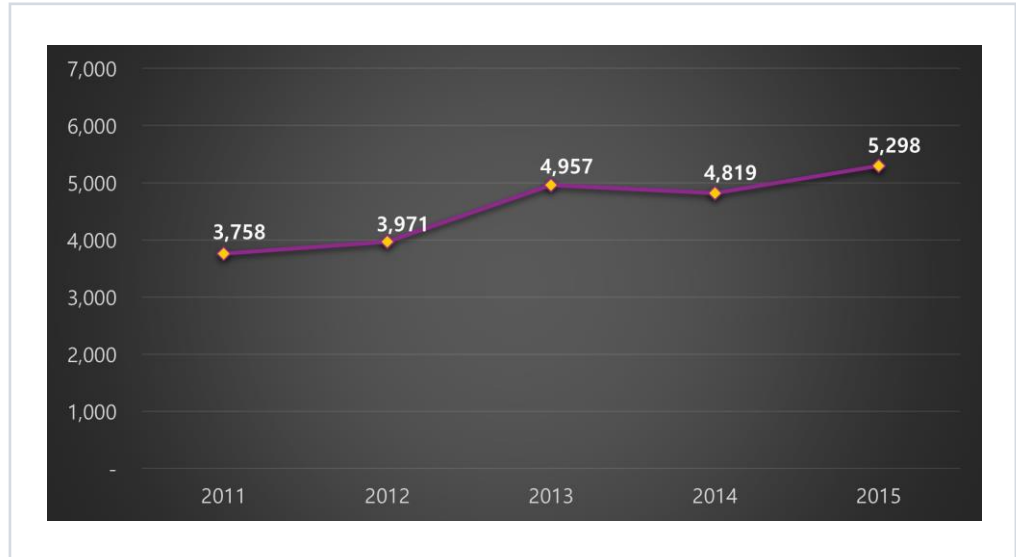
[표] 제 1구간
(2006년-2010년)
TOP03 분야
상위키워드

번호	키워드	빈도수	번호	키워드	빈도수
1	Quantum computers	629	11	Quantum entanglement	146
2	Quantum theory	595	12	Optimization	138
3	Quantum optics	523	13	Quantum computation	139
4	Photons	249	14	Computational linguistics	121
5	Quantum computing	237	15	Optical communication	116
6	Quantum cryptography	200	16	Data processing	110
7	Quantum information	178	17	Computer simulation	94
8	Algorithms	162	18	Genetic algorithms	87
9	Quantum communication	162	19	Quantum chemistry	86
10	Quantum electronics	158	20	Quantum key distribution	78

(3) 제 2구간(2011년-2015년)

✓ 제 2구간 전체분야 논문출판 추이

[그림] 제 2구간
(2011년-2015년)
전체분야 논문출판
추이



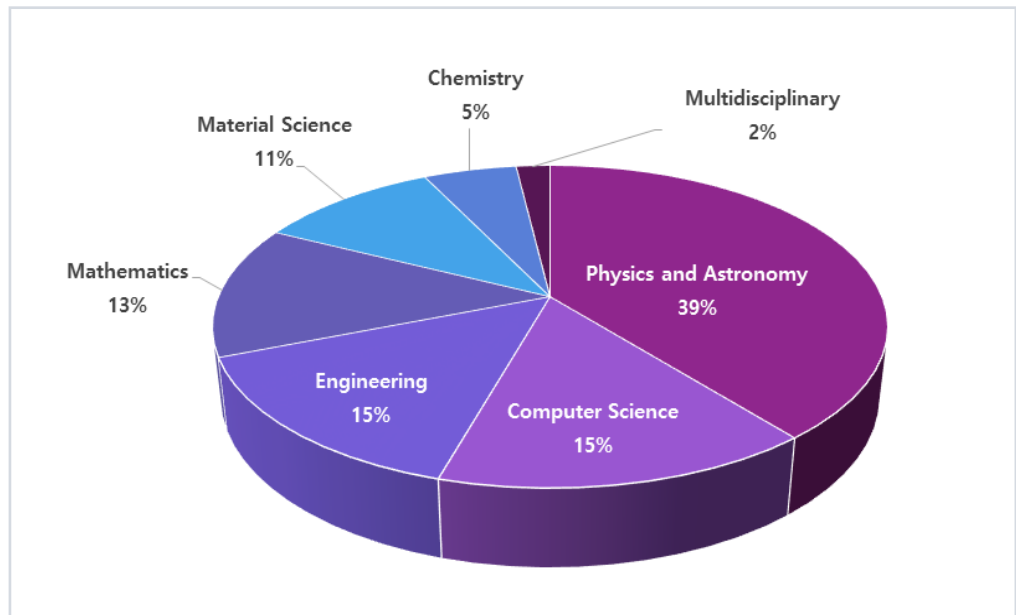
제 2구간의 전체분야 평균 논문출판 수는 4,561건으로 나타남

제 2구간의 전체분야 논문출판 수는 전반적으로 증가하는 추세로 나타났으나, 2013년~2014년에는 약 2.8% 감소함

- 논문 출판 수 증가율은 2011년~2012년 5.7%, 2012~2013년 24.8%, 2013~2014년 -2.8%, 2014~2015년 9.94%로 2013년에 가장 큰 비율로 증가하였음
- 제 2구간(2011년-2015년)의 연평균 논문출판 증가율은 8.97%로 나타남

✓ 제 2구간 전체분야 논문출판 추이

[그림] 제 2구간
(2011년-2015년)
전체분야 논문 분야별
비율



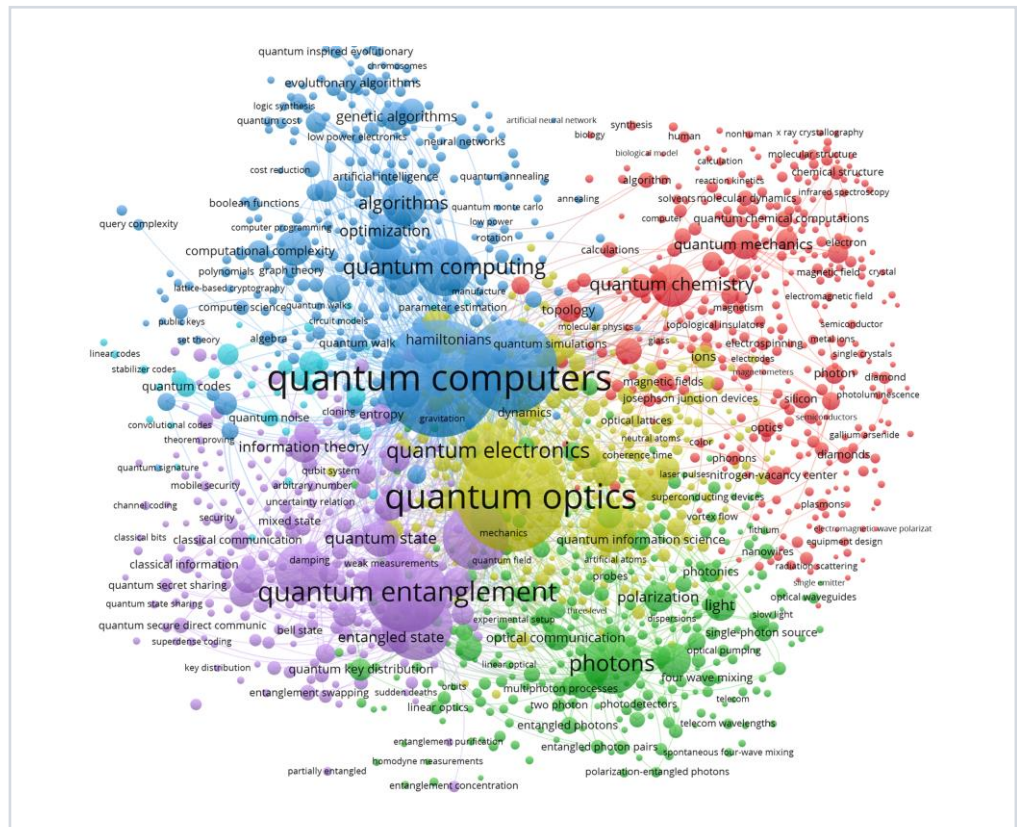
제 2구간의 출판 논문 분야는 크게 7가지로 분류되는 것으로 나타남

제 2구간의 상위 Top 3 분야는 Physics and Astronomy(21.8%, 8,735), Computer science(8.5%, 3,417), Engineering(8.1%, 3,257) 으로 선정됨

가장 큰 비중을 차지하고 있는 분야는 Physics and Astronomy로 제 2구간에 속하는 논문 중 약 39%가 해당 분야에 속함

제 2구간 전체분야 클러스터

[그림] 제 2구간 (2011년-2015년) 전체분야 클러스터



제 2구간에서 표현된 클러스터는 총 6개로 나타남

클러스터-R은 양자화학 분야와 관련된 단어들 포함되어 있으며 상위 빈도수(Occurrences) 키워드는 Quantum chemistry(493), Quantum mechanics(307), Spin dynamics(246) 등으로 나타남

클러스터-G는 양자와 관련된 단어들 포함되어 있으며 상위 빈도수 키워드는 Photons(1701), Particle beams(646), Light(451) 등으로 나타남

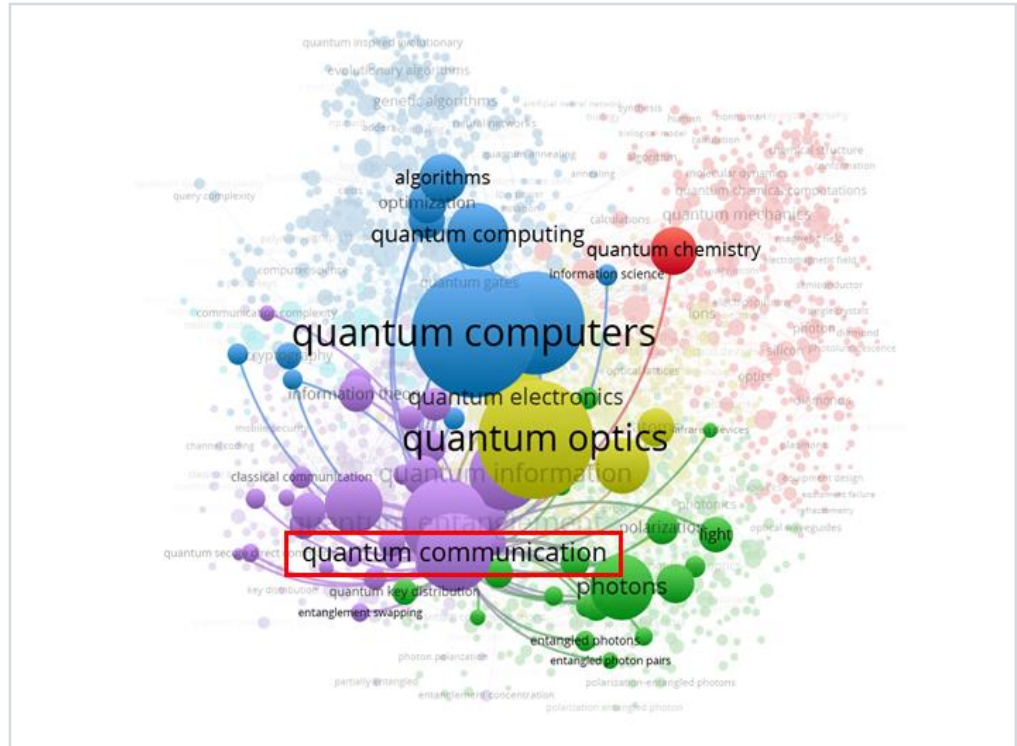
클러스터-B는 양자컴퓨터와 관련된 단어들 포함되어 있으며 상위 빈도수 키워드는 Quantum Computers(4743), Quantum theory(3019), Quantum computing(1078) 등으로 나타남

클러스터-Y는 양자광학과 관련된 단어들 포함되어 있으며 상위 빈도수 키워드는 Quantum optics(4004), quantum electronics(1199), Quantum-information processing(970) 등으로 나타남

클러스터-P는 양자얽힘과 관련된 단어들이 포함되어 있으며 상위 빈도수 키워드는 Quantum entanglement(2254), Quantum communication(2254), Quantum information(1523) 등으로 나타남

클러스터-S는 양자오류와 관련된 단어들이 포함되어 있으며 상위 빈도수 키워드는 error correction(203), codes(159), erros(122) 등으로 나타남

[그림] 제 2구간 (2011년-2015년) 전체분야 'Quantum communication' 하이라이팅



제 2구간에서 표현된 클러스터 중 Quantum communication 키워드를 분석한 결과 Quantum computers, Quantum optics, Photons, Quantum chemistry가 연관된 것으로 분석됨

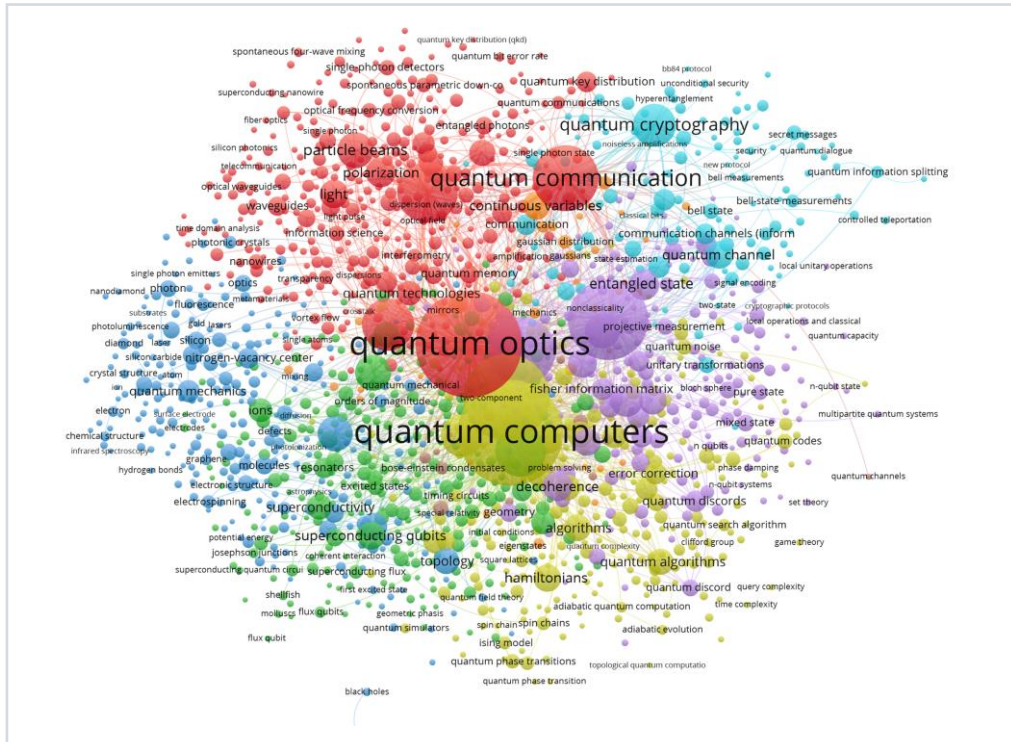
제 2구간 전체분야의 출현빈도수 Top20 키워드를 아래에 표로 나타냄

[표] 제 2구간 (2011년-2015년) 전체분야 상위키워드

번호	키워드	빈도수	번호	키워드	빈도수
1	Quantum computers	4,743	11	Article	873
2	Quantum optics	4,004	12	Quantum chemistry	493
3	Quantum theory	3,019	13	Algorithms	644
4	Quantum communication	2,254	14	Particle beams	646
5	Photons	1,701	15	Logic gates	418
6	Quantum information	1,523	16	Quantum state	413
7	Quantum electronics	1,199	17	Light	451
8	Quantum computing	1,078	18	Atoms	341
9	Quantum cryptography	1,135	19	Of Quantum-information	399
10	Quantum-information processing	970	20	optimization	417

[그림] 제 2구간(2011년-2015년) TOP01 분야(Physics and Astronomy) 클러스터

제 2구간 TOP01 분야(Physics and Astronomy) 클러스터



제 2구간 Physics and Astronomy 분야에서 표현된 클러스터는 총 8개로 나타남

클러스터-R은 양자광학 분야와 관련된 단어들 포함되어 있으며 상위 빈도수(Occurrences) 키워드는 Quantum optics(3164), Quantum communication(1199), Photons(1028) 등으로 나타남

클러스터-G는 양자와 관련된 단어들 포함되어 있으며 상위 빈도수 키워드는 Atoms(364), Superconducting qubits(217), superconductivity(182) 등으로 나타남

클러스터-B는 양자화학 분야와 관련된 단어들 포함되어 있으며 상위 빈도수 키워드는 Quantum chemistry(353), Spin dynamics(208), topology(187) 등으로 나타남

클러스터-Y는 양자컴퓨터와 관련된 단어들 포함되어 있으며 상위 빈도수 키워드는 Quantum computers(3087), Quantum theory(2082), Quantum computing(484) 등으로 나타남

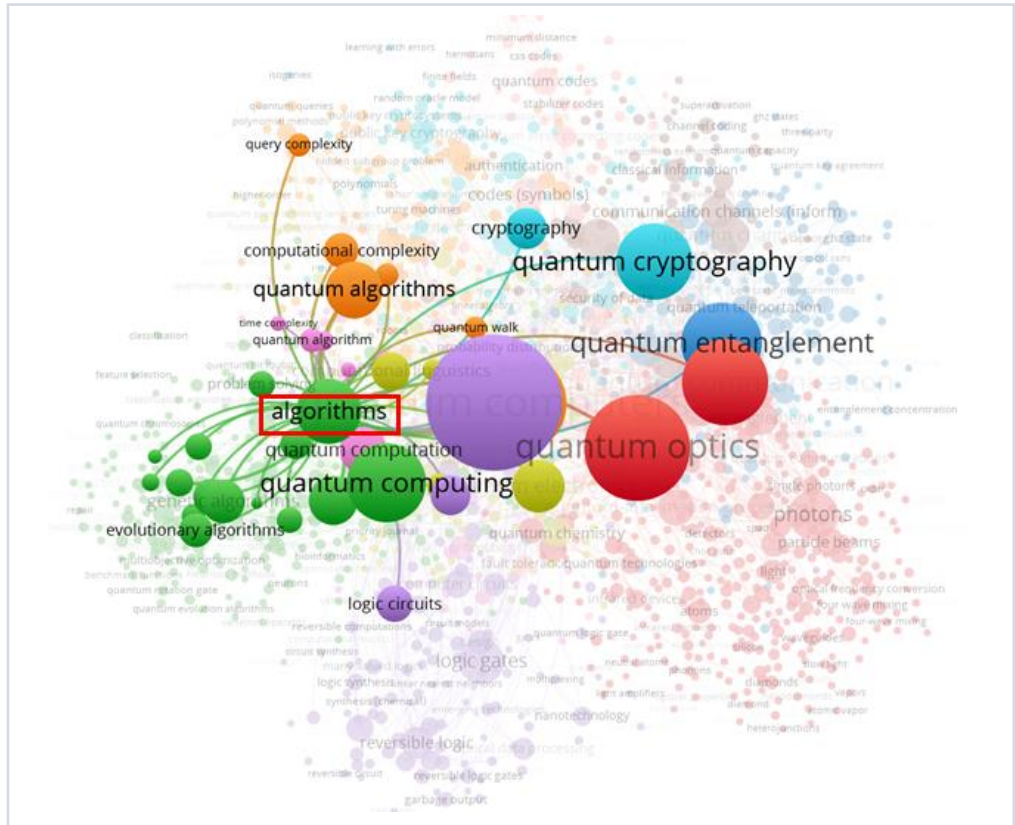
클러스터-P는 양자오류와 관련된 단어들 포함되어 있으며 상위 빈도수 키워드는 Quantum entanglement(1087), Quantum information(1220), quantum correlations(306) 등으로 나타남

클러스터-S는 양자암호와 관련된 단어들 포함되어 있으며 상위 빈도수 키워드는 Quantum cryptography(513), quantum channel(213), cluster state(131) 등으로 나타남

클러스터-O는 알고리즘과 관련된 단어들 포함되어 있으며 상위 빈도수 키워드는 continuous variables(208), degrees of freedom(96), gaussians(53) 등으로 나타남

클러스터-D는 통계물리학과 관련된 단어들 포함되어 있으며 상위 빈도수 키워드는 statistical mechanics(69), quantum fisher information(52), bose-einstein condensates(49) 등으로 나타남

[그림] 제 2구간
(2011년~2015년)
TOP02 분야 Algorithms
하이라이팅



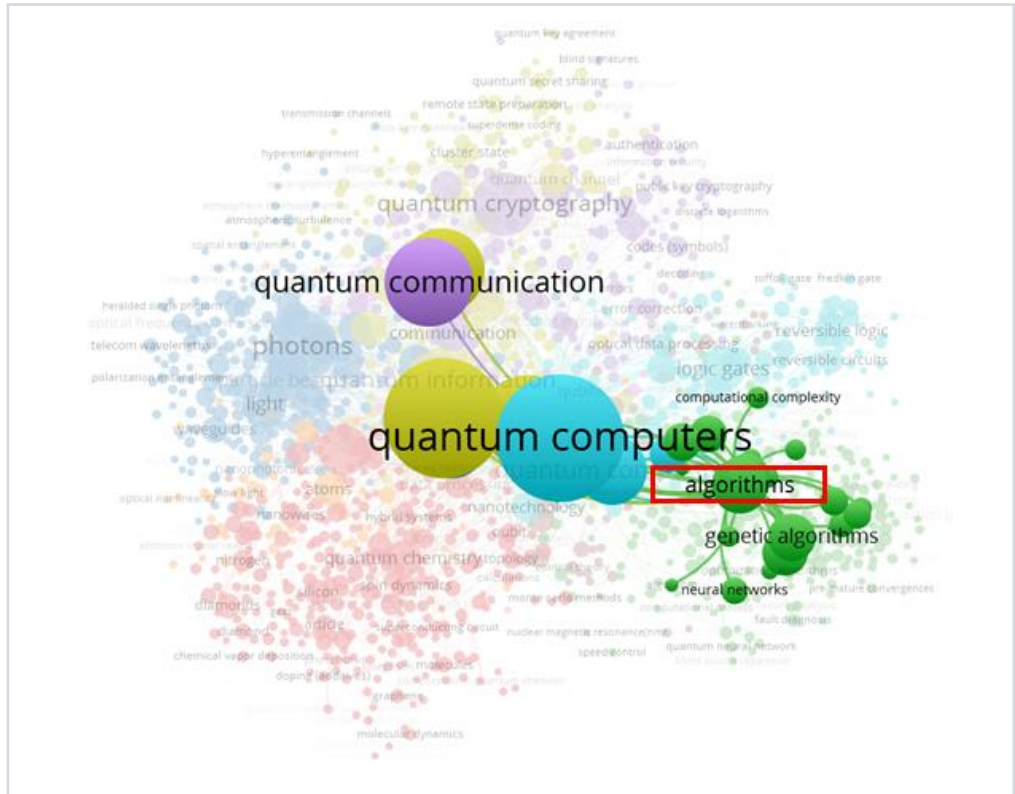
제 2구간 Computer Science 분야에서 표현된 클러스터 중 algorithms 키워드를 분석한 결과 Quantum optics, Quantum computing, Quantum entanglement, Quantum cryptography가 연관된 것으로 분석됨

제 2구간 Computer Science 분야의 출현빈도수 Top20 키워드를 아래에 표로 나타냄

[표] 제 2구간
(2011년~2015년)
TOP02 분야
상위키워드

번호	키워드	빈도수	번호	키워드	빈도수
1	Quantum computers	1,687	11	Computation theory	257
2	Quantum optics	1,025	12	Quantum electronics	248
3	Quantum theory	961	13	photons	237
4	Quantum communication	672	14	optimization	213
5	Quantum entanglement	593	15	Logic gates	199
6	Quantum computing	568	16	Quantum computation	194
7	Quantum cryptography	521	17	Communication	181
8	algorithms	376	18	Information theory	169
9	Quantum information	321	19	Genetic algorithms	166
10	Quantum algorithms	291	20	Quantum channel	148

[그림] 제 2구간
(2011년-2015년)
TOP03 분야
'algorithms' 하이라이팅



제 2구간 Engineering 분야에서 표현된 클러스터 중 algorithms 키워드를 분석한 결과 Quantum optics, Quantum electronics, Quantum communication, Quantum computers 이 연관된 것으로 분석됨

제 2구간 Physics and Astronomy 분야의 출현빈도수 Top20 키워드를 아래에 표로 나타냄

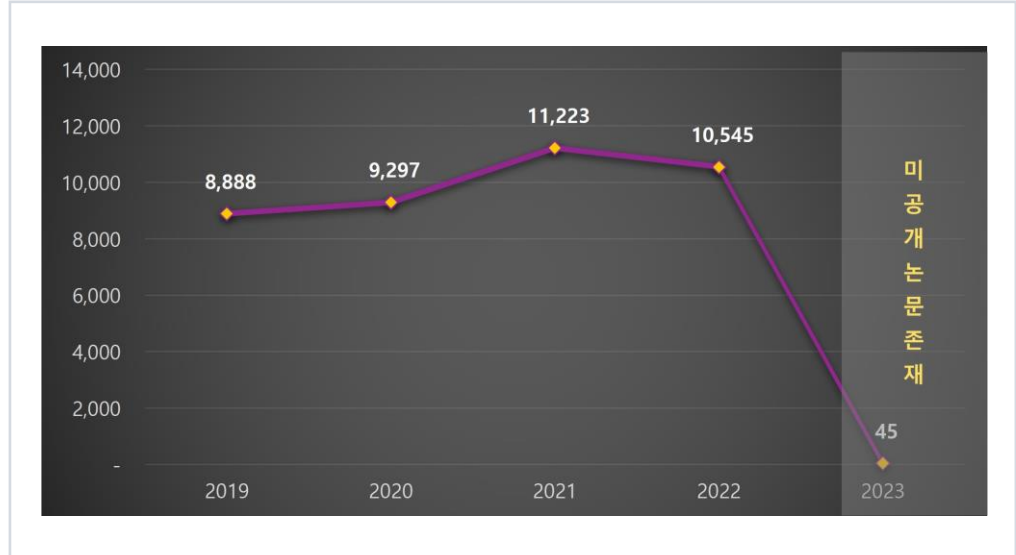
[표] 제 2구간
(2011년-2015년)
TOP03 분야
상위키워드

번호	키워드	빈도수	번호	키워드	빈도수
1	Quantum computers	1,199	11	algorithms	226
2	Quantum optics	1,056	12	Quantum-information processing	200
3	Quantum theory	629	13	Genetic algorithms	160
4	Quantum communication	578	14	Logic gates	157
5	Quantum entanglement	530	15	Light	154
6	photons	387	16	optimization	152
7	Quantum electronics	354	17	Particle beams	141
8	Quantum computing	351	18	Quantum genetic algorithms	146
9	Quantum cryptography	314	19	Electron optics	134
10	Quantum information	302	20	Communication	108

(4) 제 3구간(2019년-2023년)

✓ 제 3구간 전체분야 논문출판 추이

[그림] 제 3구간 (2019년-2023년) 전체분야 논문출판 추이



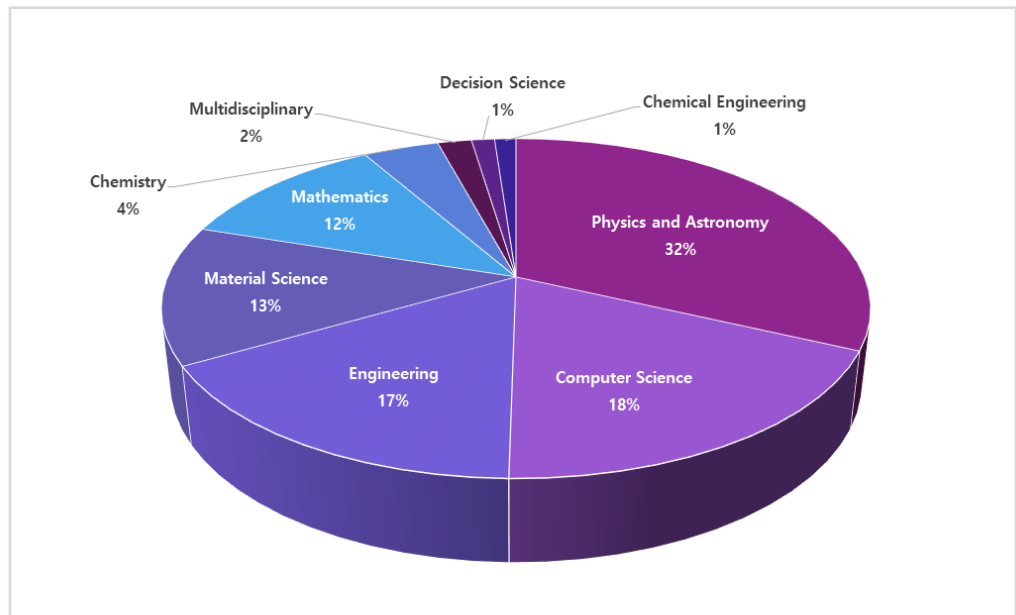
제 3구간의 전체분야 평균 논문출판 수는 9,988건으로 나타남

제 3구간의 전체분야 논문출판 수는 전반적으로 증가하는 추세로 나타났으나, 2021년~2022년에는 약 6.04% 감소함

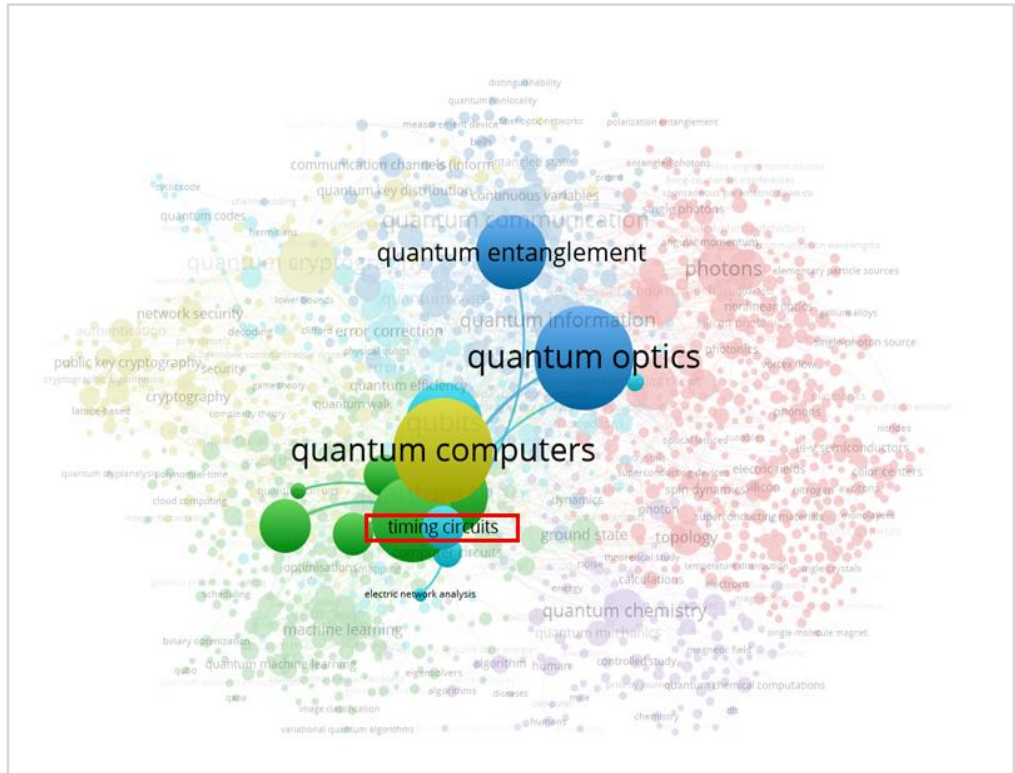
- 논문 출판 수 증가율은 2019년~2020년 4.6%, 2020~2021년 20.7%, 2021~2022년 - 6.04%로 2020년에 가장 큰 비율로 증가하였음
- 제 3구간(2019~2022, 2023년 제외)의 연평균 논문출판 증가율은 5.86%로 나타남

✓ 제 3구간 전체분야 논문출판 추이

[그림] 제 3구간 (2019년-2023년) 전체분야 논문 분야별 비율



[그림] 제 3구간
(2019년-2023년)
전체분야 'Timing
circuits' 하이라이팅



제 3구간에서 표현된 클러스터 중 Timing circuits 키워드를 분석한 결과 Quantum optics, Quantum computers, qubits 가 연관된 것으로 분석됨

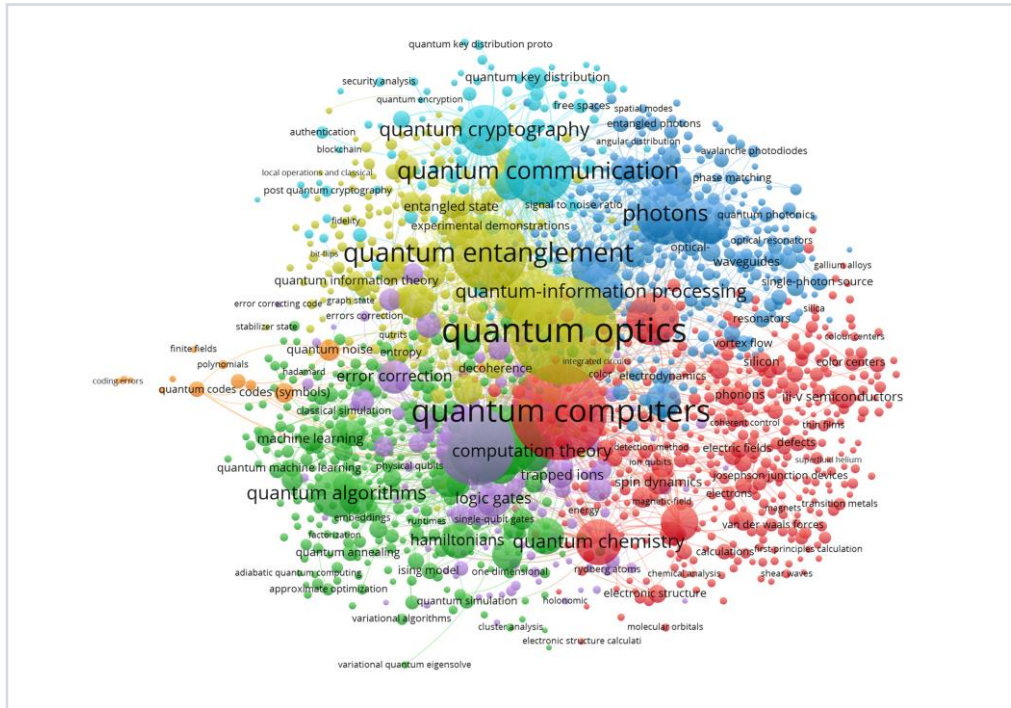
제 3구간 전체분야의 출현빈도수 Top20 키워드를 아래에 표로 나타냄

[표] 제 3구간
(2019년-2023년)
전체분야 상위키워드

번호	키워드	빈도수	번호	키워드	빈도수
1	Quantum computers	5,160	11	Quantum technologies	1,468
2	Quantum optics	5,055	12	Article	1,365
3	Quantum computing	3,360	13	Quantum chemistry	1,317
4	Quantum theory	2,972	14	Computational theory	1,149
5	Quantum entanglement	2,957	15	Timing circuits	1,114
6	Quantum communication	2,523	16	Quantum circuit	1,003
7	Quantum cryptography	2,097	17	Particle beams	931
8	Photons	1,808	18	Logic gates	855
9	Quantum information	1,468	19	Topology Electron optics	848
10	Quantum algorithms	1,365	20	Quantum state	819

[그림] 제 3구간
(2019년-2023년)
TOP01 분야(Physics and Astronomy)
클러스터

제 3구간 TOP01 분야(Physics and Astronomy) 클러스터



제 3구간 Physics and Astronomy 분야에서 표현된 클러스터는 총 9개로 나타남

클러스터-R은 양자컴퓨터와 관련된 단어들이 포함되어 있으며 상위 빈도수(Occurrences) 키워드는 Quantum computers(2503), Quantum technologies(749), topology(401) 등으로 나타남

클러스터-G는 양자 알고리즘과 관련된 단어들이 포함되어 있으며 상위 빈도수 키워드는 Quantum computing(1302), Quantum theory(1417), quantum algorithms(641) 등으로 나타남

클러스터-B는 양자와 관련된 단어들이 포함되어 있으며 상위 빈도수 키워드는 photons(1004), Particle beams(587), quantum-information processing(721) 등으로 나타남

클러스터-Y는 양자광학과 관련된 단어들이 포함되어 있으며 상위 빈도수 키워드는 Quantum optics(3138), Quantum entanglement(1588), Quantum information(914) 등으로 나타남

클러스터-P는 양자오류와 관련된 단어들이 포함되어 있으며 상위 빈도수 키워드는 qubit(1704), lgates(339), error correction(308) 등으로 나타남

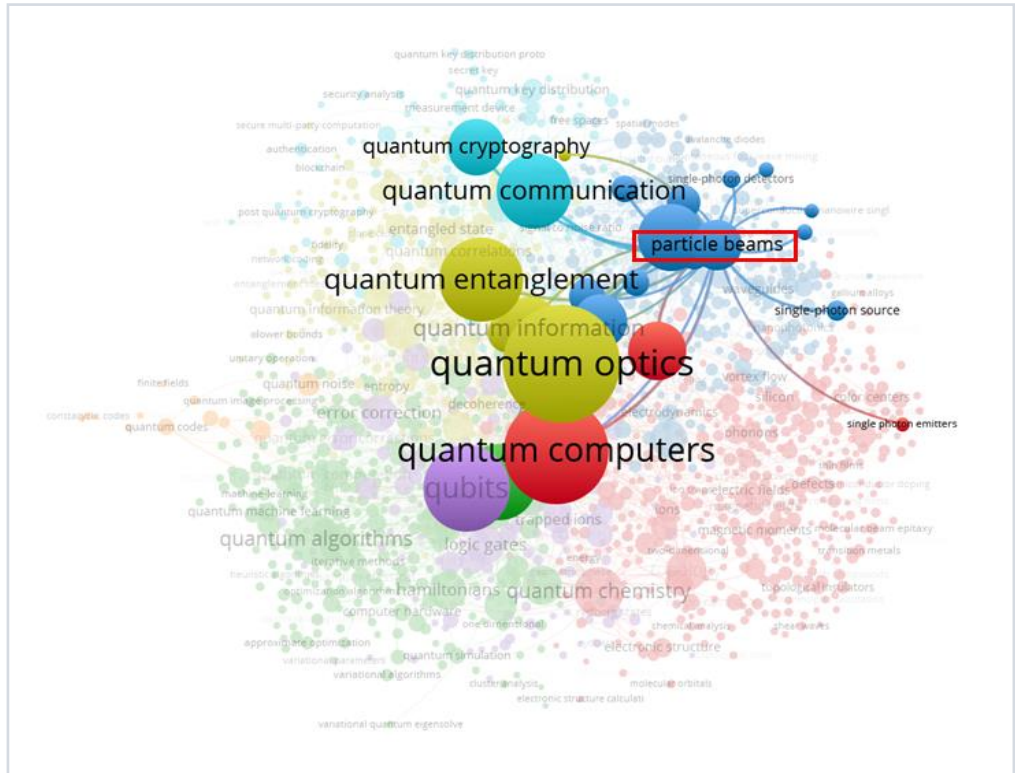
클러스터-S는 양자네트워크와 관련된 단어들이 포함되어 있으며 상위 빈도수 키워드는 Quantum communication(1280), quantum cryptography(716), quantum network(236) 등으로 나타남

클러스터-O는 코드(code)와 관련된 단어들이 포함되어 있으며 상위 빈도수 키워드는 quantum noise(131), codes(108), quantum codes(70) 등으로 나타남

클러스터-D는 양자물리학과 관련된 단어들이 포함되어 있으며 상위 빈도수 키워드는 quantum state transfers(37), nonlocal(30), spin chains(16) 등으로 나타남

클러스터-H는 fundamental research(12) 키워드로 이루어져 있음

[그림] 제 3구간
(2019년-2023년)
TOP01 분야 'particle
beams' 하이라이팅



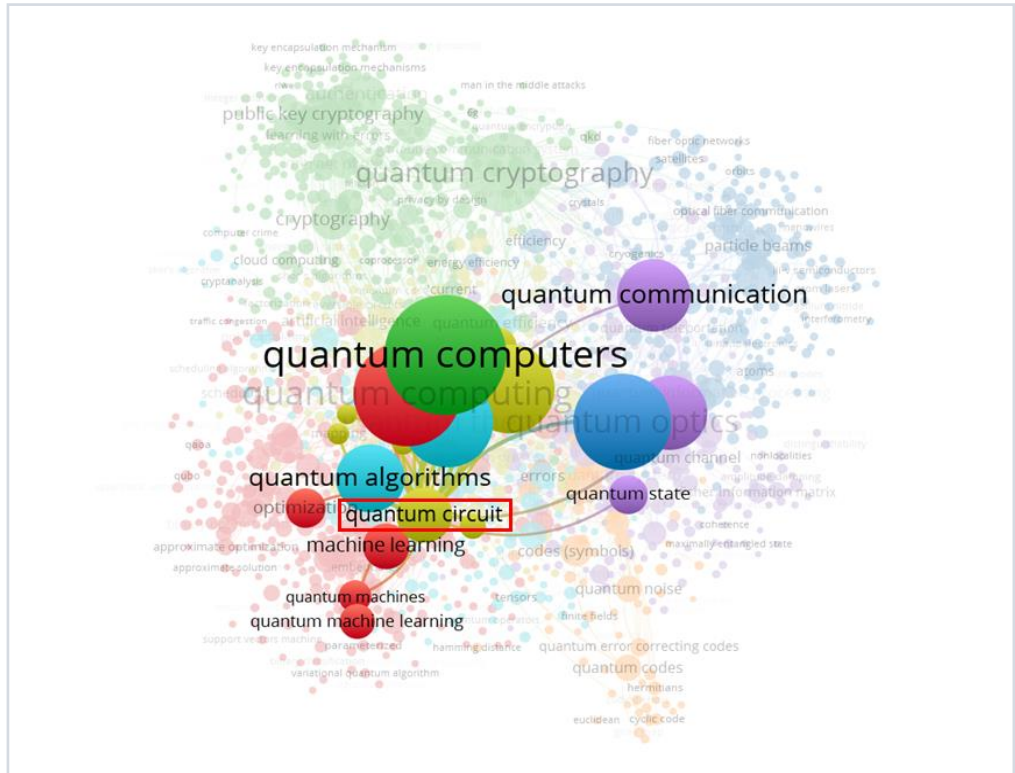
제 3구간 Physics and Astronomy 분야에서 표현된 클러스터 중 particle beams 키워드를 분석한 결과 Quantum optics, Quantum computers, Quantum communication, qubits 이 연관된 것으로 분석됨

제 3구간 Physics and Astronomy 분야의 출현빈도수 Top20 키워드를 아래에 표로 나타냄

[표] 제 3구간
(2019년-2023년)
TOP01 분야
상위키워드

번호	키워드	빈도수	번호	키워드	빈도수
1	Quantum optics	3,138	11	quantum-information processing	721
2	Quantum computers	2,503	12	quantum algorithms	641
3	Qubits	1,704	13	Quantum chemistry	625
4	Quantum entanglement	1,588	14	Particle beams	587
5	Quantum theory	1,417	15	Article Light	561
6	Quantum communication	1,280	16	Computational theory	502
7	Quantum computing	1,302	17	Quanta computer	451
8	photons	1,004	18	ground state	401
9	Quantum information	914	19	Hamiltonian	386
10	Quantum technologies	749	20	Timing circuit	370

[그림] 제 3구간 (2019년-2023년) TOP02 분야 'quantum circuit' 하이라이팅



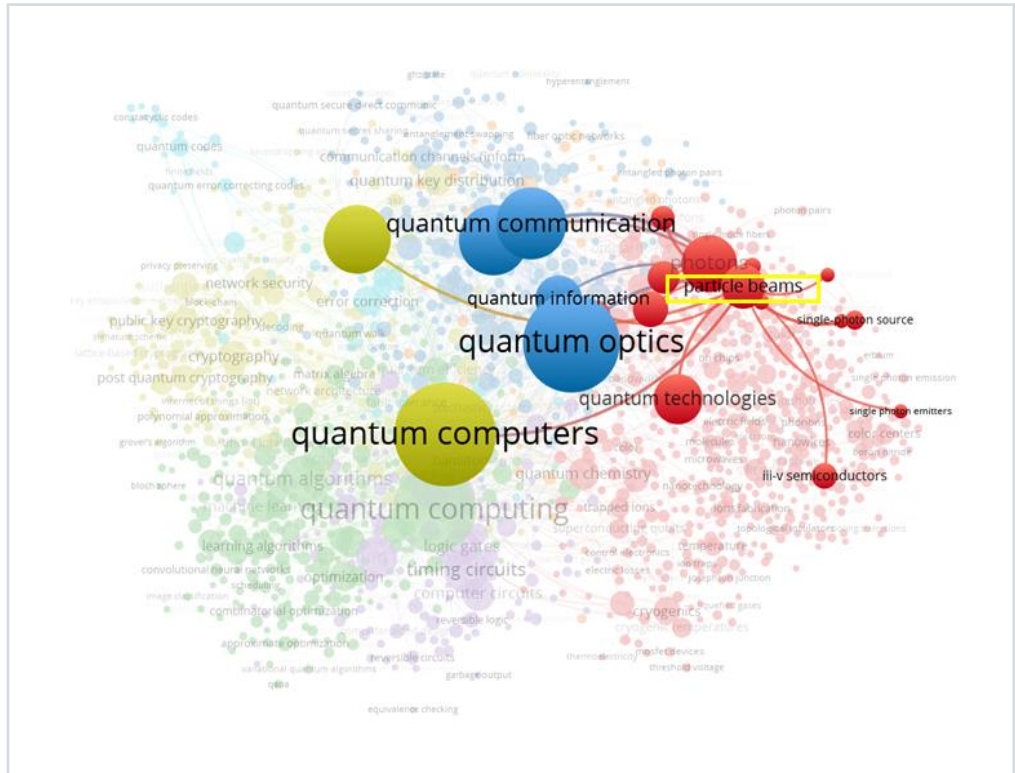
제 3구간 Computer Science 분야에서 표현된 클러스터 중 quantum circuit 키워드를 분석한 결과 machine learning, Quantum algorithms, Quantum computers, Quantum optics가 연관된 것으로 분석됨

제 3구간 Computer Science 분야의 출현빈도수 Top20 키워드를 아래에 표로 나타냄

[표] 제 3구간 (2019년-2023년) TOP02 분야 상위키워드

번호	키워드	빈도수	번호	키워드	빈도수
1	Quantum computers	2,604	11	Timing circuits	521
2	Quantum computing	2,000	12	Computation theory	494
3	Quantum optics	1,658	13	Quanta computers	439
4	Quantum theory	1,438	14	quantum information	377
5	Qubits	1,409	15	Machine learning	361
6	Quantum cryptography	1,190	16	Cryptography	321
7	Quantum entanglement	971	17	Photons	315
8	Quantum communication	920	18	Quantum technologies	307
9	Quantum algorithms	814	19	Public key cryptography	292
10	Quantum circuit	525	20	Network security	288

[그림] 제 3구간
(2019년-2023년)
TOP03 분야 'particle
beams' 하이라이팅



제 3구간 Engineering 분야에서 표현된 클러스터 중 particle beams 키워드를 분석한 결과 Quantum optics, Quantum communication, Quantum computers가 연관된 것으로 분석됨

제 3구간 Engineering 분야의 출현빈도수 Top20 키워드를 아래에 표로 나타냄

[표] 제 3구간
(2019년-2023년)
TOP03 분야
상위키워드

번호	키워드	빈도수	번호	키워드	빈도수
1	Quantum computers	2,019	11	Quantum algorithms	439
2	Quantum optics	1,841	12	Quantum information	416
3	Quantum computing	1,422	13	Timing circuits	399
4	Qubits	1,109	14	Computation theory	379
5	Quantum theory	962	15	Particle beams	355
6	Quantum communication	957	16	Quantum circuits	344
7	Quantum entanglement	923	17	Quanta computers	289
8	Quantum cryptography	885	18	Logic gates	253
9	photons	596	19	quantum-information processin	237
10	Quantum technologies	459	20	Computers circuits	221

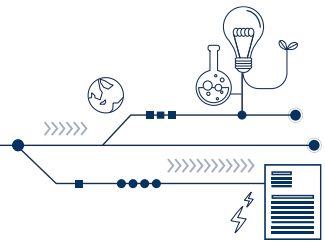


양자(Quantum)기술 분야 글로벌 시장 조사 및 분석

결론



결론



본 보고서는 “양자(Quantum)기술 분야 글로벌 시장 조사 및 분석”에 관한 보고서로, 아래와 같은 3가지 관점을 통해 글로벌 양자시장에서 어떤 기술들이 개발되고 있는지, 개발 자금은 어디로/얼마나 흐르고 있는지 분석함으로써 양자 기술의 글로벌 시장동향을 살펴봄

- 01 양자 기업들의 기술동향**
- 02 양자 스타트업의 투자동향**
- 03 양자 기술 관련 논문 클러스터링 분석**

양자 기업들의 기술개발동향

본 파트에서 주체가 되는 기업은 크게 ‘양자 기술 개발을 위해 설립된 기업(이하 양자스타트업)’ 과 ‘비양자 기업이면서 양자 기술을 영위하는 기업(이하 글로벌 대기업)’ 으로 나눌 수 있는데, 전자의 경우를 본고에서는 ‘양자스타트업’ 이라 칭했으며 대표적인 기업들은 PsiQuantum, IonQ, ColdQuanta, EeroQ 등이 있으며, 후자의 경우 주로 대기업들이 많으며 Google, IBM, Intel, Honeywell 등이 대표적임

- [글로벌 대기업]들은 자본이 뒷받침되어 양자 기술경쟁에 돌입한 경우가 많으며, 이들 기업들은 실용화/상용화/고도화에 초점을 맞추어 기술개발을 집중하고 있는 것으로 보임
- (IBM)의 경우 1천 큐비트를 넘겨 양자우월성을 달성하는 시점을 내년으로 예상하고 있으며, 이들의 양자 로드맵에는 2025년에 Kookaburra 라는 4,000큐비트 프로세서 단계에 도달하기 전에 2023년과 2024년에 Condor(콘도르)라는 1,121 큐비트 프로세서와 Flamingo라는 1,386큐비트 프로세서가 포함되어 있음
- (Google)은 현재 주력으로 연구 중인 프로젝트는 양자컴퓨터의 오류 최소화하고, 보정해 논리적인 큐비트를 만드는 단계로 이를 해결하기 위해 6단계 마일스톤을 세우고 현재 2단계를 수행 중임
- 이와 관련하여 루세로 Google 퀀텀 엔지니어에 의하면 Google은 오류가 보정된 양자 컴퓨터를 10년 정도 후에는 만들 수 있다고 보고 10년 로드맵을 제시하고 있음
- (Intel)은 QuTech(和)과 공동으로 반도체 양자점 방식을 지속 연구하여 수년간 최적화된 인텔의 반도체 공정장비를 그대로 사용하여 300nm 웨이퍼 양산 가능성을 확인하였고, SW를 포함한 Full-stack* 접근 방식을 연구하고 있음
- 이와 관련하여 Intel은 미국 아르곤 국립 연구소(ANL)와 협업하여 Argonne에 양자 테스트 베드를 '22년 말까지 제공할 것을 발표함
- [양자스타트업]들은 양자 기술개발을 목표로 설립된 초기기업들이기 때문에 기술개발과 함께 투자유치가 또 하나의 중요한 이슈이며, 이들 기업들은 타기업/기관과의 여러 가지 협업을 펼치고 있는 것으로 보임
- (PsiQuantum)은 Mercedes-Benz의 리튬 이온 배터리 전해질 분자의 양자 컴퓨터 시뮬레이션 방법을 구축하기 위해 협업을 진행 중이며 이를 통해 배터리의 성능을 비약적으로 향상시키고자 함

- (Quantum Computing Inc.)는 CI의 Qatalyst 소프트웨어 및 Quantum Photonics Systems 하드웨어를 사용하여 UAV의 최적 비행 궤적을 결정하기 위해 VIPCO와 제휴를 맺고 협업 중이며, BMW와 함께 InQuanto 플랫폼을 사용해 현재 수준의 하드웨어에서 가장 높은 수준의 정확도를 달성하는 것을 목표로 수소연료 전지의 전극 반응(산소 환원반응 모델링)을 시뮬레이션하기 위해 협력체계를 구축함
- (IonQ)는 미 공군 연구소와의 협업체계를 구축하고 Dell Technologies와 파트너십을 체결하였으며, 미 공군 연구소와 1,340만 달러 규모의 계약을 체결하여 Trap-Ion 시스템에 클라우드와 양자 네트워킹 기술을 제공함

**양자
스타트업의
투자동향**

본 파트에서는 양자스타트업을 중심으로 다양한 투자동향과 함께 양자스타트업의 연도별 설립추이, 국가별 양자스타트업 수 등에 대하여 분석을 진행함

- (양자스타트업 설립 추이) 2015년(17개사 설립, 34개사 누적)과 2016년(24개사 설립, 58개사 누적) 그리고 2016년과 2017(41개사 설립, 99개사 누적)년 두 번에 걸쳐서 큰 증가세를 보였으며 특히 2016년과 2017년 사이에는 2배 가까이 되는 증가세를 보임
- (국가별 양자스타트업) 2016-2022년 기간 동안 미국이 33%(55개)의 비율로 가장 많은 기업을 보유하고 있는 국가로 나타났으며, 그 뒤를 영국(25개, 15%)과 캐나다(21개, 13%)가 자리하고 있고 대한민국의 양자 스타트업 수는 3개(17순위)로 Austria와 자리를 같이하고 있음
- (연도별 양자스타트업 투자규모) 양자 기업들의 총투자금액 추이는 2020년 1.9조 수준에서 2021년 4.6조로 2배 이상 증가하였으며, 앞서 다룬 양자 기업의 설립과 연관 지어 보면 기업의 설립은 2016-2017년도에 커다란 증가세를 보였고 그로부터 2-3년 뒤인 2020-2021년에 투자금의 성장세를 볼 수 있음
- (투자라운드 별 건수 및 비율) 양자스타트업 또한 스타트업의 특성상 주요 투자라운드로는 Seed 라운드가 34%(110건) 가장 많은 비율을 차지하고 있으며, 눈여겨 볼만한 항목으로는 Seed 다음으로 자리 잡은 Grant(지원금) 라운드로 양자분야에는 ‘공적자금’ 이 많이 유입되고 있음을 알 수 있음
- (양자 기업 투자유치 TOP10) 미국의 Psi Quantum이 약 9천억 원으로 압도적으로 큰 규모의 자금을 유치한 것으로 나타났으며, 그 뒤를 각각 IonQ가 5천 8백억 원, Quantinuum이 4천 4백억 원 규모의 투자를 받아 2위, 3위에 자리하고 있음
- DT(Deutsch Telekom), BT(British Telecom)와 같이 양자 기술을 영위하고 있는 글로벌 통신기업들도 각각 3.7조, 3.6조원 규모의 투자를 받은 것으로 나타나지만, 순수하게 양자 기술로만 받은 투자가 아닐 가능성이 높아 본 그래프에서는 노이즈로 간주하여 제외하였음

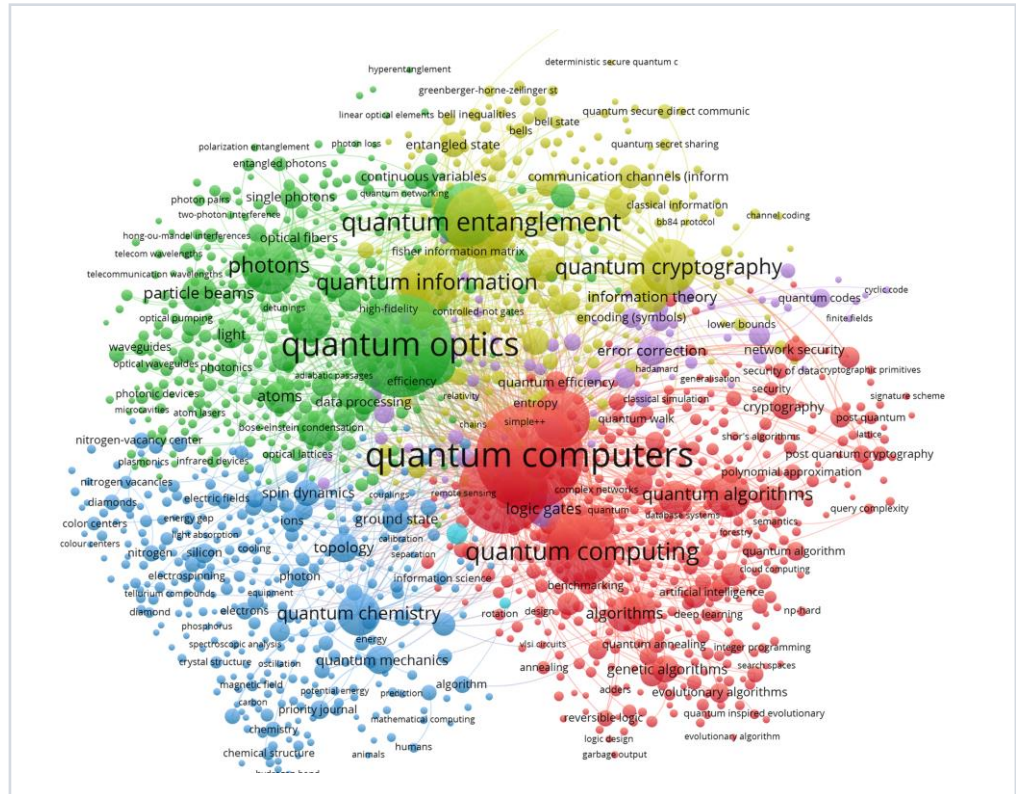
**양자 기술 관련
논문
클러스터링**

본 파트에서는 SCOPUS를 기본 Database로 삼아 양자 기술 관련 논문 클러스터링 분석을 진행하였으며, 2006년부터 2010년까지 1구간, 2011년부터 2015년까지 2구간 및 2019년부터 2023년까지 3구간으로 정의하고 최근 15년에 해당하는 논문을 분석대상 논문으로 선정함

각 구간별 논문 검색결과는 모두 Physics and Astronomy, Computer Science, Engineering 분야 순으로 최대 논문이 검색되었으며, 전구간+전체분야에 대한 논문 클러스터는 아래와 같음

✓ [전체 구간]에서 표현된 클러스터는 총 6개로 나타남

[그림] 전체 분석기간+전체분야



클러스터-R은 양자컴퓨터 분야와 관련된 단어들이 포함되어 있으며 상위 빈도수(Occurrences) 키워드는 Quantum computers(12286), Quantum theory(8483), Quantum computing(5353) 등으로 나타남

클러스터-G는 광양자와 관련된 단어들이 포함되어 있으며 상위 빈도수 키워드는 Quantum optics(11086), Quantum communication(4428), Photons(3495) 등으로 나타남

클러스터-B는 양자화학 분야와 관련된 단어들이 포함되어 있으며 상위 빈도수 키워드는 Quantum chemistry(1992), topology(916), ground state(836) 등으로 나타남

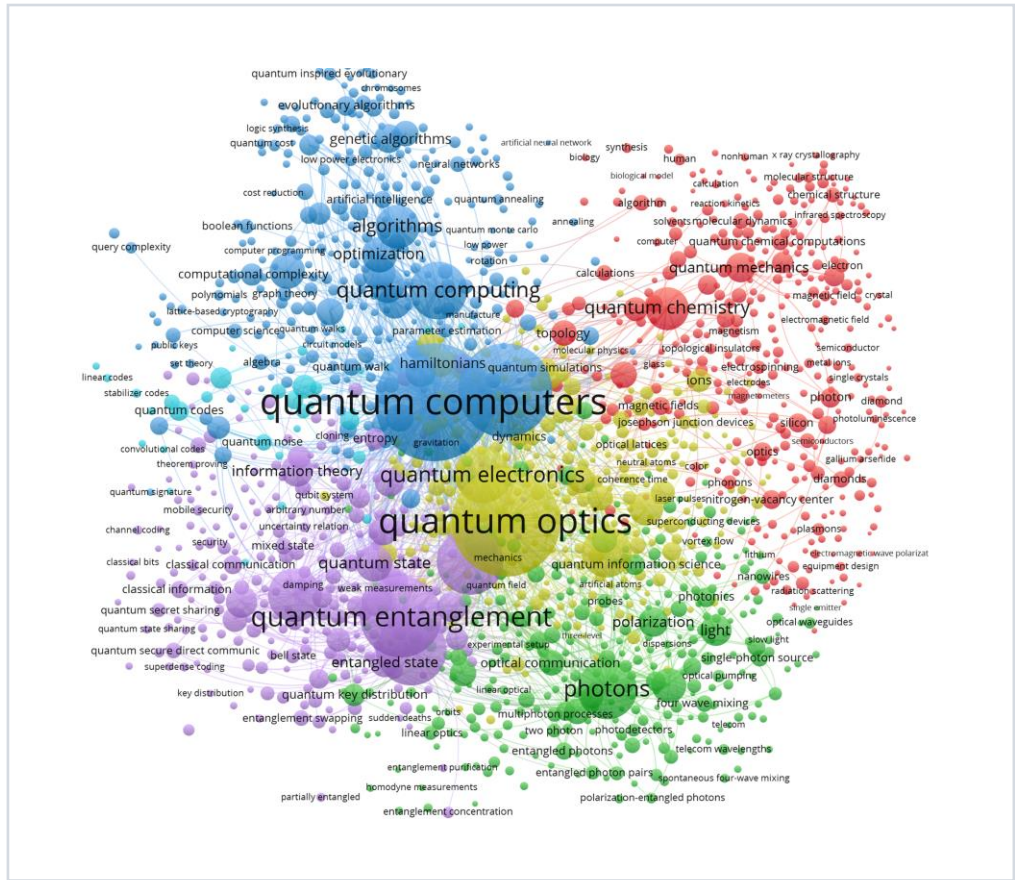
클러스터-Y는 양자통신과 관련된 단어들이 포함되어 있으며 상위 빈도수 키워드는 Quantum entanglement(5561), Quantum information(3698), Quantum cryptography(3338) 등으로 나타남

클러스터-P는 양자오류와 관련된 단어들이 포함되어 있으며 상위 빈도수 키워드는 logic gates(1243), error correction(916), quantum gates(617) 등으로 나타남

클러스터-S는 양자시뮬레이션과 관련된 단어들이 포함되어 있으며 상위 빈도수 키워드는 quantum simulations(503), simulation platform(66) 등으로 나타남

✓ [제 2구간]에서 표현된 클러스터는 총 6개로 나타남

[그림] 제 2구간
(2011년-2015년)
전체분야 클러스터



클러스터-R은 양자화학 분야와 관련된 단어들이 포함되어 있으며 상위 빈도수(Occurrences) 키워드는 Quantum chemistry(493), Quantum mechanics(307), Spin dynamics(246) 등으로 나타남

클러스터-G는 양자와 관련된 단어들이 포함되어 있으며 상위 빈도수 키워드는 Photons(1701), Particle beams(646), Light(451) 등으로 나타남

클러스터-B는 양자컴퓨터와 관련된 단어들이 포함되어 있으며 상위 빈도수 키워드는 Quantum Computers(4743), Quantum theory(3019), Quantum computing(1078) 등으로 나타남

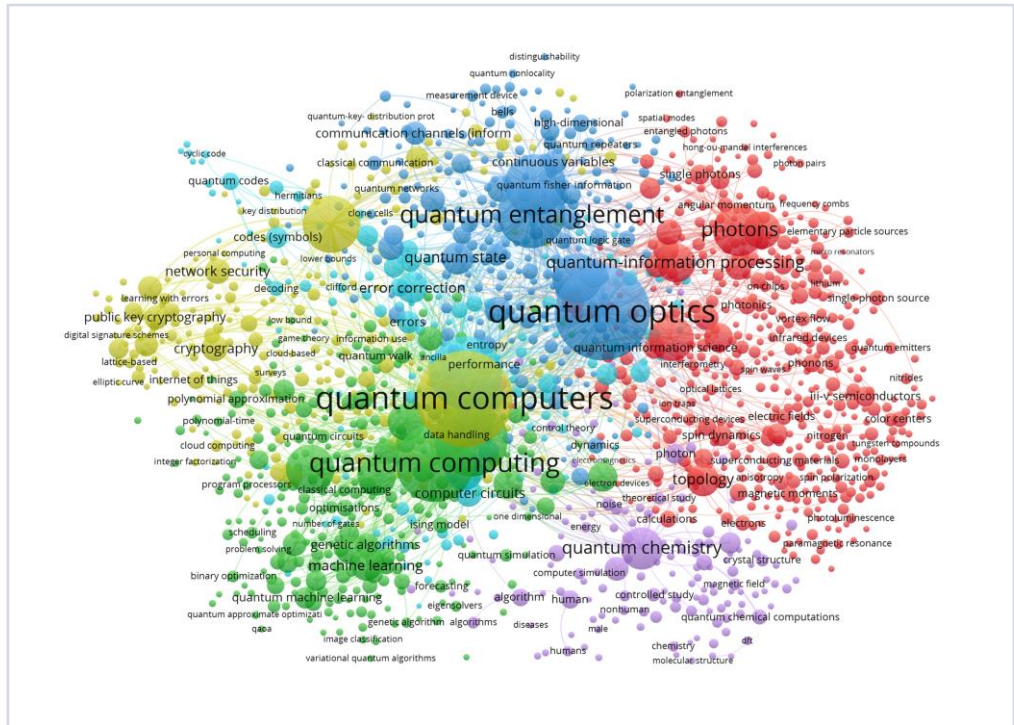
클러스터-Y는 양자광학과 관련된 단어들이 포함되어 있으며 상위 빈도수 키워드는 Quantum optics(4004), quantum electronics(1199), Quantum-information processing(970) 등으로 나타남

클러스터-P는 양자얽힘과 관련된 단어들이 포함되어 있으며 상위 빈도수 키워드는 Quantum entanglement(2254), Quantum communication(2254), Quantum information(1523) 등으로 나타남

클러스터-S는 양자오류와 관련된 단어들이 포함되어 있으며 상위 빈도수 키워드는 error correction(203), codes(159), errors(122) 등으로 나타남

✓ [제 3구간]에서 표현된 클러스터는 총 6개로 나타남

[그림] 제 3구간
(2019년-2023년)
전체분야 클러스터



클러스터-R은 양자통신기술과 관련된 단어들이 포함되어 있으며 상위 빈도수(Occurrences) 키워드는 Quantum chemistry(493), Quantum technologies(1468), Quantum information processing(848) 등으로 나타남

클러스터-G는 양자컴퓨터와 관련된 단어들이 포함되어 있으며 상위 빈도수 키워드는 Quantum computing(3360), Quantum theory(2972), Quantum algorithms(1365) 등으로 나타남

클러스터-B는 양자광학 분야와 관련된 단어들이 포함되어 있으며 상위 빈도수 키워드는 Quantum optics(5055), Quantum entanglement(2957), Quantum communication(2523) 등으로 나타남

클러스터-Y는 양자암호와 관련된 단어들이 포함되어 있으며 상위 빈도수 키워드는 Quantum computers(5160), Quantum cryptography(2097), network security(362) 등으로 나타남

클러스터-P는 양자화학과 관련된 단어들이 포함되어 있으며 상위 빈도수 키워드는 Quantum chemistry(1317), Quantum mechanics(314) 등으로 나타남

클러스터-S는 양자오류와 관련된 단어들이 포함되어 있으며 상위 빈도수 키워드는 qubits(2968), computation theory(937), timing circuits(855) 등으로 나타남





부록

양자(Quantum)기술 분야 글로벌 시장 조사 및 분석

별첨1. 주요 양자컴퓨팅 기업 리스트

별첨2. 양자 컴퓨팅 마켓 맵

별첨3. 구간별 논문 검색결과



별첨 1.

주요 양자 컴퓨팅 기업 리스트 81개

1 Top Quantum Computing Companies

번호	기업명	국가	설립년도	내용
1	IBM	미국	1911	<ul style="list-style-type: none"> 27큐비트 양자 컴퓨팅 시스템을 보유하고 있으며, 2026년 수만 큐비트로 확장을 목표로함
2	Google Quantum AI	미국	2013	<ul style="list-style-type: none"> 폴스택 양자 컴퓨팅을 연구 개발함 NASA 및 대학 우주 연구회와 협업하여 10년 이내로 양자컴퓨터의 상용화를 위한 연구를 추진하고 있음
3	Microsoft	미국	1975	<ul style="list-style-type: none"> 양자 시뮬레이팅 알고리즘, 라이브러리, TFQ(TensorFlow Quantum)를 개발함 양자 컴퓨팅 프로그래밍 언어인 Q# 개발 키트를 오픈소싱 함
4	Amazon Braket	미국	2020	<ul style="list-style-type: none"> AWS 고객에게 게이트 기반 양자 컴퓨터 플랫폼을 통한 완전 관리형 서비스를 제공함 연구 및 소프트웨어, 서비스 구축 지원을 위한 플랫폼을 제공함
5	Alibaba Group	중국	2018	<ul style="list-style-type: none"> '15년 CAS사와 아시아 최초의 양자 컴퓨팅 연구소를 설립하고 11 큐비트 성능의 초전도 클라우드를 출시함 양자 알고리즘 및 양자 컴퓨터를 위한 시뮬레이터 기반 개발 도구인 Alibaba Cloud Quantum Development Platform(ACQDP)를 운영함
6	Atos Quantum	프랑스	2016	<ul style="list-style-type: none"> 30~40 큐비트의 양자 시뮬레이션 컴퓨터 및 프로그래밍 언어인 'AQASM'를 개발하고 서비스를 제공함
7	Baidu	중국	2000	<ul style="list-style-type: none"> 10 큐비트 양자 컴퓨터에 호환 가능한 '플러그 앤 플레이' 양자 하드웨어-소프트웨어 통합 솔루션을 제공함
8	Intel	미국	1968	<ul style="list-style-type: none"> 초전도 큐비트 보다 백만 배 작고 고온에서도 작동하는 '핫 실리콘 스핀 큐비트' 개발하고 있음 Qutech과 함께 업계 최초로 극저온 양자 컴퓨팅 제어칩인 '호스리지'를 개발함 극저온에서도 작동하는 2세대 실리콘 스핀 테스트 칩인 'Intel Cryoprober'를 사용하여 높은 수율과 균일성을 확보함

2 Top Hardware-Focused Quantum Computing Companies

번호	기업명	국가	설립년도	내용
1	Alice & Bob	프랑스	2020	<ul style="list-style-type: none"> 초전도 내결함성 오류 수정 양자컴퓨팅을 개발함 양자 오류 복원력을 2분으로까지 증가시키며 자가 오류수정 초전도 양자 비트를 연구하고 있음
2	Alpine Quantum Technologies	독일	2017	<ul style="list-style-type: none"> 이온 트랩 기술을 사용하여 전력 소비가 적고 실온에서도 작동 가능한 대규모 양자 컴퓨팅 개발 로드맵을 제시함
3	Anyon Systems	캐나다	2014	<ul style="list-style-type: none"> 초전도 큐비트를 기반으로 하여 극저온의 양자 전자 및 소프트웨어 게이트 양자 컴퓨팅 플랫폼 서비스를 제조함
4	Atlantic Quantum	미국	2022	<ul style="list-style-type: none"> 계산속도 지연을 줄이기 위해 양자 중첩 시간이 긴 플러스늄형 양자 비트 소프트웨어를 개발함
5	Atom Computing	미국	2018	<ul style="list-style-type: none"> 'Phoenix'로 불리는 100큐비트 양자컴퓨터인 '피닉스' 소프트웨어를 구축하여 양자 소프트웨어 개발자 TOOL-KIT으로 회로를 구축할 수 있는 큐비트 배열을 제공함
6	Bleximo	미국	2017	<ul style="list-style-type: none"> 초전도 큐비트 기반의 양자 가속기 'qASIC'를 개발함 분자 및 화학 반응의 구조와 속성 시뮬레이션 시스템과 극저온 하드웨어 솔루션을 연구함
7	C12 Quantum Electronics	프랑스	2020	<ul style="list-style-type: none"> 탄소 나노 튜브를 양자 전자공학에 활용하기 위한 양자 컴퓨팅 프로세스를 개발함
8	ColdQuanta	미국	2007	<ul style="list-style-type: none"> 중성 원자를 활용하는 양자 컴퓨터인 'Hilbert'를 개발하고 100큐비트 성능을 달성하는 것을 목표로 함 '22년 양자 소프트웨어 기업인 Super.Tech를 인수함
9	D-Wave	캐나다	1999	<ul style="list-style-type: none"> 양자 컴퓨팅 및 초전도 장치를 설계 및 제조하며 양자 어닐링과 게이트 기반의 양자 컴퓨팅을 제조함
10	Diraq	호주	2022	<ul style="list-style-type: none"> 자체 기술인 'CMOS' 큐비트로 내결함성 양자 컴퓨팅을 구축함 나노미터 규모의 실리콘 양자 프로세서 칩 개발을 목표로 함
11	EeroQ	미국	2016	<ul style="list-style-type: none"> 헬륨 기반의 양자 컴퓨터 칩을 개발하여 빠른 성능을 가진 컴퓨팅 환경을 통해 오류 발생이 적은 양자 컴퓨터 구축을 위한 연구를 진행함
12	IQM Finland	유럽	2018	<ul style="list-style-type: none"> 초전도 양자 프로세서 독점 기술을 기반으로 2세대 양자 컴퓨팅 프로세서를 개발함 업계에서 가장 빠른 큐비트 성능 구현을 위해 연구를 진행하고 센터용 컴퓨터 구축에 초점을 맞추고 있음
13	IonQ	미국	2015	<ul style="list-style-type: none"> AOD 기술을 통해 노이즈를 최소화한 이온 트랩 고성능 양자 컴퓨터를 구축함

번호	기업명	국가	설립년도	내용
14	Nord Quantique	캐나다	2020	• 개별 초전도 회로로 구현된 내결함성 양자 컴퓨팅 코드를 제공함
15	ORCA Computing	영국	2019	• 비행 기술 기반의 포토닉 모듈식 양자 컴퓨팅 플랫폼을 개발함 • ORCA 양자 메모리를 사용하여 단일 광자를 필요에 따라 저장하고 검색할 수 있는 기능을 제공함
16	Origin Quantum	중국	2017	• 쿼텀 닷 기반의 2큐비트 칩과 초전도 6큐비트 칩을 개발함 • 프레임워크, 프로그래밍 언어, 개발 키트 Qpanda 2.0을 출시함
17	Oxford Ionics	영국	2019	• 고성능 양자 컴퓨터 및 양자 오류를 줄이기 위한 전자 큐비트 제어(EQC) 기술을 구축함
18	Oxford Quantum Circuits	영국	2017	• 오프칩 3차원 구조의 큐비트인 'Coaxmon'을 개발함
19	PASQAL	프랑스	2019	• 100+ 큐비트의 양자 컴퓨팅 시뮬레이션 인프라를 구축함 • 2D 및 3D 배열의 정렬된 중성 원자로 양자 컴퓨터를 구축하여 고객에게 실질적인 문제 해결책을 제공함
20	Photonic	캐나다	2019	• 실리콘 기반의 전자스핀 양자 큐비트 기술을 개발함
21	PlanQC	독일	2022	• 2000개 이상의 원자를 실온에서 제어할 수 있는 양자 시뮬레이터를 구축함
22	PsiQuantum	미국	2016	• 내결함성과 오류 수정을 위한 최대 1만 큐비트 양자 컴퓨팅 구축을 목표로 함
23	QUODOOR	중국	2018	• 양자키 통신 하드웨어를 개발 및 상용화함
24	Qilimanjaro	스페인	2019	• 슈퍼컴퓨터 센터, 대학 및 연구소 기업으로 양자 알고리즘, 양자 시뮬레이션 및 양자 어닐링 기술을 개발함
25	QuEra Computing	미국	2019	• 중성 원자를 기반으로 하는 양자 컴퓨팅 'Aquila'을 개발하여 Amazon Braket과 협업 체계를 구축함
26	Quandela	프랑스	2017	• 양자 암호화, 양자 계산 및 양자 센서 등 다양한 분야를 아우르며 세계 최초의 포토닉 큐비트를 만드는 'Prometheus'를 개발함

번호	기업명	국가	설립년도	내용
27	QuantWare	네덜란드	2021	• 25큐비트의 QPU 및 양자 하드웨어를 개발 및 판매함
28	Quantinuum	미국	2021	<ul style="list-style-type: none"> • 트랩 이온 양자 하드웨어와 오픈소스 소프트웨어를 결합하여 풀스택 양자 컴퓨팅 프로세스를 제공하고 있음 • 양자 하드웨어에서 화학 알고리즘을 수행하는 양자 화학 소프트웨어 플랫폼인 'InQuanto'를 출시함
29	Quantum Brilliance	호주	2019	• 2큐비트 다이아몬드 양자 가속기 개발 및 실온에서 구동 가능한 양자 컴퓨팅 플랫폼을 제공함
30	Quantum Circuit, Inc	미국	2015	• 초전도 장치 및 모듈식 구조의 풀스택 양자 컴퓨팅을 개발함
31	Quantum Motion	영국	2017	• 실리콘 및 CMOS를 활용한 고밀도 양자 컴퓨팅 큐비트를 구축함
32	Quantum Source	이스라엘	2021	• 수백만 큐비트의 상온 구동 양자 컴퓨터 칩 개발을 목표로함
33	Rigetti Computing	미국	2013	• 80 큐비트의 멀티 칩 양자 프로세서 개발 및 'Rigetti QCS' 클라우드를 제공함
34	Seeqc	미국	2019	• 초전도 시스템 온 칩을 통해 고전 컴퓨팅과 양자 컴퓨팅을 결합하는 완전한 디지털 양자 컴퓨팅 솔루션을 개발함
35	Silicon Quantum Computing	호주	2017	• 호주 양자 컴퓨팅 및 통신 기술 센터의 연구결과를 상업화하며 '23년까지 실리콘으로 된 10큐비트 양자 집적 회로 프로토타입 개발을 목표로 함
36	TuringQ	중국	2021	<ul style="list-style-type: none"> • 자체 개발한 최초의 광학 양자 컴퓨팅 시뮬레이션 소프트웨어인 'FeynmanPAQS'을 구축함 • 'LNOI(lithium niobate on insulator) 광자 칩 기술'을 기반으로 광학 양자 컴퓨터 칩을 개발함 • TuringQ Gen 1, 3D 광학 양자 칩, 초고속 프로그래밍 가능 양자 칩 제품을 출시함
37	Universal Quantum	영국	2018	• 마이크로웨이브 기술을 사용한 개발 양자 컴퓨팅 회사이며, 200도 온도에서 작동 가능한 실용적인 성능의 양자 컴퓨터를 개발함
38	XANADU	캐나다	2016	<ul style="list-style-type: none"> • 오픈소스 양자 소프트웨어 플랫폼인 'Strawberry Fields'를 구축함 • 216개 압착 상태의 큐비트가 있는 양자 컴퓨터 'Borealis'를 개발함

3 Top Software-Focused Quantum Technology Companies

번호	기업명	국가	설립년도	내용
1	1QBit	캐나다	2012	<ul style="list-style-type: none"> 양자 컴퓨팅 하드웨어를 위한 알고리즘 개발 회사로, 의료기술 솔루션 및 분산 방사선학 및 계산화학을 위한 양자 컴퓨팅 활용을 연구함
2	Agonstiq	캐나다	2018	<ul style="list-style-type: none"> 캐나다의 양자 소프트웨어 스타트업으로, 양자 및 고성능 컴퓨팅 소프트웨어를 개발하고 오픈소스 플랫폼 'Covalent'를 제공함
3	Aliro Quantum	미국	2019	<ul style="list-style-type: none"> IBM, Honeywell 과 유사한 하드웨어 공급 양자 네트워킹 기업으로, 양자 보안 네트워크 및 인터넷을 연구함
4	Algorithmiq	핀란드	2020	<ul style="list-style-type: none"> 분자 구조 예측, 약물 개발 및 재료 설계에 중점을 둔 양자 알고리즘을 개발함 '22년 5월 300개 이상의 논문을 발표하며 양자분야의 연구개발을 주도하고 있다고 평가됨
5	A Star Quantum	일본	2018	<ul style="list-style-type: none"> 어닐링과 게이트 방식을 모두 활용하는 양자 컴퓨팅 소프트웨어를 제공하며 물류 및 광고 분야에 중점을 두고 있음
6	ARQIT	영국	2017	<ul style="list-style-type: none"> 양자 암호화 플랫폼인 'QuantumCloudTM'를 개발하여 정부/방위, 통신, 금융 서비스 및 IoT 부문의 양자 공격에 대비하기 위한 기술을 개발함
7	BEIT	폴란드	2016	<ul style="list-style-type: none"> 양자 컴퓨터에서 NP 난해 문제를 해결하기 위한 알고리즘을 개발함
8	BosonQ Psi	인도	2020	<ul style="list-style-type: none"> 시뮬레이션 분야에서 SaaS 기반의 소프트웨어를 제공함 양자 알고리즘이 내장된 시뮬레이션 소프트웨어 'BQPhy'는 자동차, 항공 우주, 에너지, 건설, 제약, 소비재 및 전자 제품과 같은 다양한 산업 분야에서 활용되고 있음
9	Classiq	이스라엘	2018	<ul style="list-style-type: none"> 양자 알고리즘 개발 스타트업으로 플랫폼에서 Amazon Web Services(AWS)의 양자 알고리즘을 실험할 수 있는 기술을 연구함
10	Dirac	미국	2022	<ul style="list-style-type: none"> 양자 컴퓨팅 분야에서 특히 로봇공학의 기술 개발을 위한 소프트웨어 및 알고리즘을 제공함
11	Entropica Labs	싱가포르	2018	<ul style="list-style-type: none"> 양자 알고리즘을 테스트하기 위한 프레임워크를 제공하며 양자 컴퓨팅 최적화 연구를 수행할 수 있는 Python 라이브러리인 'EQAOA'를 개발함
12	Horizon Quantum Computing	싱가포르	2018	<ul style="list-style-type: none"> 양자 컴퓨팅 프로그래밍을 위한 소프트웨어를 개발함 양자 알고리즘을 자동으로 구성하는 컴파일러를 제공함

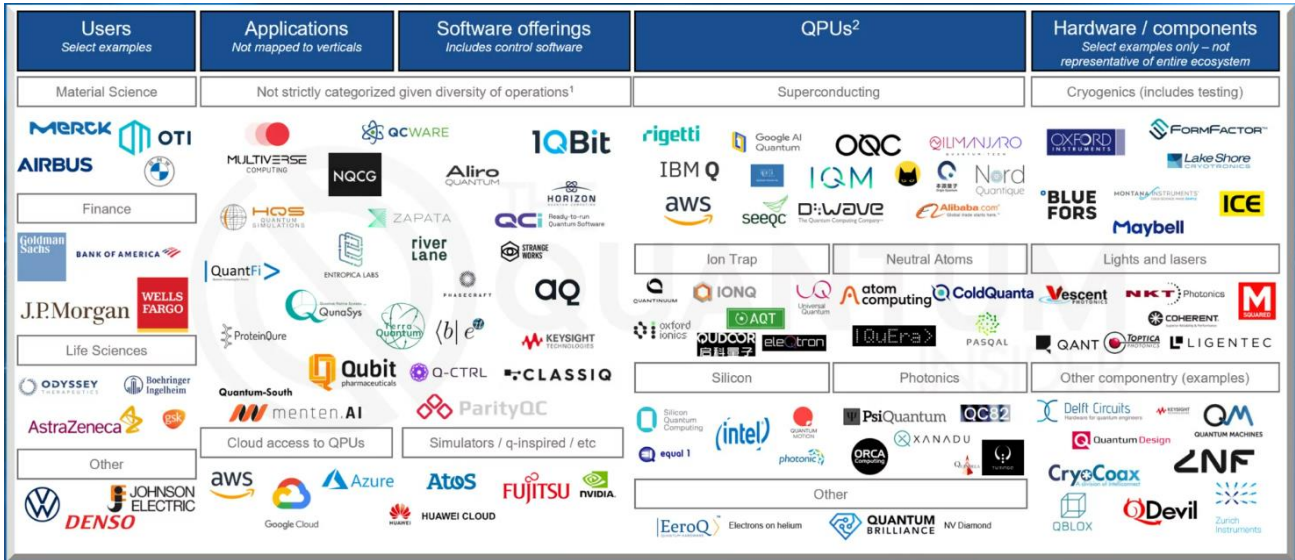
번호	기업명	국가	설립년도	내용
13	HQS Quantum Simulations	독일	2017	<ul style="list-style-type: none"> 소재, 특수 화학 물질 및 제약 회사의 분자 특성을 예측하는 양자 알고리즘을 개발하여 양자역학 문제 해결 솔루션을 구축함
14	JiJ	일본	2018	<ul style="list-style-type: none"> 양자 어닐링을 지원하는 소프트웨어를 제공함 어닐링 머신을 활용하여 프로그램 및 알고리즘을 개발하고 기술 관련 컨설팅을 제공함
15	Kuano	영국	2020	<ul style="list-style-type: none"> 분자 화학 설계를 위한 양자 및 AI 솔루션을 공급함
16	Menten AI	미국	2018	<ul style="list-style-type: none"> 양자 시뮬레이션과 머신러닝 기술을 융합하여 펩타이드 및 단백질 치료제를 개발함
17	Multiverse Computing	스페인	2019	<ul style="list-style-type: none"> 양자컴퓨팅과 인공지능으로 금융산업 분야의 초고효율 소프트웨어를 제공함
18	PolarisQb	미국	2020	<ul style="list-style-type: none"> 양자 컴퓨팅, AI 및 정밀 의학을 사용하여 특정 단백질 및 질병에 대한 새로운 약물을 만드는 것을 목표로함
19	ProteinQure	캐나다	2017	<ul style="list-style-type: none"> 생물 물리학 모델과 통계 및 머신러닝 기술을 결합하여 단백질 치료제의 설계를 위한 전산 플랫폼을 구축함
20	QC Ware	미국	2014	<ul style="list-style-type: none"> 양자 컴퓨터용 엔터프라이즈 애플리케이션을 개발하여 소비자에게 양자 컴퓨팅 하드웨어 및 시뮬레이터를 제공함
21	Q-CTRL	호주	2017	<ul style="list-style-type: none"> 양자 하드웨어 제어를 통한 소프트웨어 최적화 및 안정성을 제공하여 양자 센싱 기술 발전을 위한 연구를 진행함
22	Quantastica	핀란드	2019	<ul style="list-style-type: none"> 하이브리드 양자 컴퓨팅으로의 전환을 위한 소프트웨어 도구 및 솔루션 제공함 Rigetti와 협력하여 양자 컴퓨터에서 실행하기 위한 웹 기반 그래픽 사용자 인터페이스인 'Quantum Programming Studio'를 개발함
23	Quantum Benchmark	캐나다	2017	<ul style="list-style-type: none"> 양자 컴퓨팅 하드웨어에 대한 오류 수정 및 성능 검증을 지원하는 소프트웨어 솔루션 'True-Q'를 개발함
24	Quantum Computing Inc	미국	2018	<ul style="list-style-type: none"> 클라우드 기반의 양자 소프트웨어를 공급함

번호	기업명	국가	설립년도	내용
25	Quantum Generative Materials(GenMat)	미국	2021	• 리튬 및 기타 희소 금속으로 성능이 개선된 배터리 부품을 설계하고 생산하기 위한 연구를 진행하고 있음
26	Quantum Machines	이스라엘	2018	• 양자 알고리즘 및 양자 컴퓨팅 기술 개발을 위한 하드웨어 및 소프트웨어 플랫폼을 구축함
27	Qu & Co	네덜란드	2017	• AI 및 화학분야에 활용할 수 있는 양자컴퓨팅을 구축하고 관련된 알고리즘 컨설팅을 제공함
28	QuantrolOx	영국	2021	• 머신러닝 기술 기반의 대규모 큐비트 제어 소프트웨어를 개발함
29	Qubit Pharmaceuticals	프랑스	2020	• 신약 개발을 위한 시뮬레이션 소프트웨어인 'ATLAS'를 개발하여 약물개발을 위한 플랫폼을 구축함
30	Qunasys	일본	2018	• 양자 회로의 고속 시뮬레이터인 'Qulacs'를 제공하여 양자 회로 연구를 위한 어플리케이션을 제공함
31	Riverlane	영국	2017	• University of Wisconsin-Madison과 함께 중립 원자 양자 컴퓨터에서 다중 큐비트 얽힘 및 알고리즘을 개발함
32	SandboxAQ	미국	2016	• 양자 기술과 AI기술을 결합하여 센싱, 보안, 최적화에 중점을 둔 사이버 보안 모듈 'PQC(Post-Quantum Cryptography)'를 구축함
33	Strangeworks	미국	2018	• 양자컴퓨팅 기술을 워크플로우에 적용할 수 있는 하드웨어, 소프트웨어 및 교육 서비스를 제공함
34	Terra Quantum	스위스	2019	• 양자 컴퓨팅, 하드웨어, 소프트웨어 및 알고리즘을 기반으로 하는 심층 기술 응용 프로그램을 개발함
35	Zapata Computing	미국	2017	• 비즈니스용 양자 소프트웨어 및 알고리즘 개발함



별첨 2. 양자 컴퓨팅 마켓 맵

[그림] 양자 컴퓨팅 마켓 맵



※출처: Quantum Insider

※ 본 자료는 하드웨어 공급업체 위주로 포함되어 있으며, 양자 보안 및 양자 센싱에 대한 내용은 포함하고 있지 않음

※ 또한, 기업의 로고로만 본 자료를 해석하기에는 다소 무리가 있을 수 있음

- 예를 들어 Classiq의 기술/제품은 1Qbit과 매우 다르지만 둘 다 광범위하게 소프트웨어로 분류됨





별첨 3. 구간별 논문 검색결과

1 제 1구간: 2006-2010

[표] SCOPUS 양자 관련 문서별/분야별 논문 검색결과 (1구간, 2006-2010)

연도	문서타입	번호	분야	Raw Data
2023	아티클	1	Physics and Astronomy	1,065
		2	Chemistry	163
		3	Computer Science	183
		4	Engineering	220
		5	Material Science	216
		6	Mathematic	212
		7	Chemical Engineering	28
		8	Multidisciplinary	34
		9	Medicine	5
		10	Decision Science	4
		11	Environmental Sciences	3
		12	Agricultural and Biological Sciences	1
		13	Neurosciences	3
	컨퍼런스	1	Physics and Astronomy	171
		2	Chemistry	266
		3	Computer Science	356
		4	Engineering	203
		5	Material Science	75
		6	Mathematic	170
		7	Chemical Engineering	5
		8	Multidisciplinary	1
		9	Medicine	11
		10	Decision Science	6
		11	Environmental Sciences	2
		12	Agricultural and Biological Sciences	4
		13	Neurosciences	-
2022	아티클	1	Physics and Astronomy	909
		2	Chemistry	128
		3	Computer Science	176
		4	Engineering	162
		5	Material Science	140
		6	Mathematic	229
		7	Chemical Engineering	18
		8	Multidisciplinary	37

연도	문서타입	번호	분야	Raw Data	
2022	아티클	9	Medicine	6	
		10	Decision Science	7	
		11	Environmental Sciences	4	
		12	Agricultural and Biological Sciences	2	
		13	Neurosciences	4	
	컨퍼런스	1	Physics and Astronomy	249	
		2	Chemistry	5	
		3	Computer Science	281	
		4	Engineering	154	
		5	Material Science	95	
		6	Mathematic	162	
		7	Chemical Engineering	3	
		8	Multidisciplinary	2	
		9	Medicine	2	
		10	Decision Science	2	
		11	Environmental Sciences	3	
		12	Agricultural and Biological Sciences	2	
		13	Neurosciences	-	
	2021	아티클	1	Physics and Astronomy	885
			2	Chemistry	104
			3	Computer Science	176
			4	Engineering	134
			5	Material Science	116
			6	Mathematic	229
			7	Chemical Engineering	15
			8	Multidisciplinary	29
9			Medicine	4	
10			Decision Science	3	
11			Environmental Sciences	4	
12			Agricultural and Biological Sciences	4	
13			Neurosciences	2	
컨퍼런스		1	Physics and Astronomy	199	
		2	Chemistry	4	
		3	Computer Science	274	
		4	Engineering	199	
		5	Material Science	89	
		6	Mathematic	148	
		7	Chemical Engineering	-	

연도	문서타입	번호	분야	Raw Data
2021	컨퍼런스	8	Multidisciplinary	-
		9	Medicine	-
		10	Decision Science	6
		11	Environmental Sciences	1
		12	Agricultural and Biological Sciences	-
		13	Neurosciences	-
2020	아티클	1	Physics and Astronomy	874
		2	Chemistry	102
		3	Computer Science	154
		4	Engineering	161
		5	Material Science	154
		6	Mathematic	199
		7	Chemical Engineering	21
		8	Multidisciplinary	26
		9	Medicine	11
		10	Decision Science	3
		11	Environmental Sciences	5
		12	Agricultural and Biological Sciences	2
		13	Neurosciences	7
	컨퍼런스	1	Physics and Astronomy	334
		2	Chemistry	6
		3	Computer Science	269
		4	Engineering	232
		5	Material Science	155
		6	Mathematic	206
		7	Chemical Engineering	2
		8	Multidisciplinary	-
		9	Medicine	2
		10	Decision Science	2
		11	Environmental Sciences	5
		12	Agricultural and Biological Sciences	3
		13	Neurosciences	-
2019	아티클	1	Physics and Astronomy	731
		2	Chemistry	102
		3	Computer Science	124
		4	Engineering	131
		5	Material Science	115
		6	Mathematic	149

연도	문서타입	번호	분야	Raw Data
2019	아티클	7	Chemical Engineering	20
		8	Multidisciplinary	24
		9	Medicine	5
		10	Decision Science	7
		11	Environmental Sciences	3
		12	Agricultural and Biological Sciences	2
		13	Neurosciences	2
	컨퍼런스	1	Physics and Astronomy	246
		2	Chemistry	4
		3	Computer Science	223
		4	Engineering	199
		5	Material Science	108
		6	Mathematic	173
		7	Chemical Engineering	1
		8	Multidisciplinary	-
		9	Medicine	-
		10	Decision Science	3
		11	Environmental Sciences	8
		12	Agricultural and Biological Sciences	4
		13	Neurosciences	-



2 제 2구간: 2011-2015

[표] SCOPUS 양자 관련 문서별/분야별 논문 검색결과 (2구간, 2011-2015)

연도	문서타입	번호	분야	Raw Data
2023	아티클	1	Physics and Astronomy	1,781
		2	Chemistry	208
		3	Computer Science	407
		4	Engineering	436
		5	Material Science	389
		6	Mathematic	480
		7	Chemical Engineering	49
		8	Multidisciplinary	156
		9	Medicine	7
		10	Decision Science	9
		11	Environmental Sciences	8
		12	Agricultural and Biological Sciences	9
		13	Neurosciences	6
	컨퍼런스	1	Physics and Astronomy	241
		2	Chemistry	-
		3	Computer Science	392
		4	Engineering	304
		5	Material Science	180
		6	Mathematic	218
		7	Chemical Engineering	1
		8	Multidisciplinary	1
		9	Medicine	2
		10	Decision Science	11
		11	Environmental Sciences	1
		12	Agricultural and Biological Sciences	-
		13	Neurosciences	2
2022	아티클	1	Physics and Astronomy	1,570
		2	Chemistry	212
		3	Computer Science	375
		4	Engineering	332
		5	Material Science	303
		6	Mathematic	446
		7	Chemical Engineering	46
		8	Multidisciplinary	86
		9	Medicine	6

연도	문서타입	번호	분야	Raw Data	
2022	아티클	10	Decision Science	15	
		11	Environmental Sciences	11	
		12	Agricultural and Biological Sciences	6	
		13	Neurosciences	11	
	컨퍼런스	1	Physics and Astronomy	308	
		2	Chemistry	4	
		3	Computer Science	366	
		4	Engineering	294	
		5	Material Science	202	
		6	Mathematic	208	
		7	Chemical Engineering	2	
		8	Multidisciplinary	1	
		9	Medicine	2	
		10	Decision Science	2	
		11	Environmental Sciences	6	
		12	Agricultural and Biological Sciences	3	
		13	Neurosciences	2	
	2021	아티클	1	Physics and Astronomy	1,575
			2	Chemistry	182
			3	Computer Science	321
			4	Engineering	337
			5	Material Science	339
			6	Mathematic	394
			7	Chemical Engineering	36
			8	Multidisciplinary	84
			9	Medicine	3
10			Decision Science	11	
11			Environmental Sciences	7	
12			Agricultural and Biological Sciences	3	
13			Neurosciences	11	
컨퍼런스		1	Physics and Astronomy	245	
		2	Chemistry	266	
		3	Computer Science	382	
		4	Engineering	364	
		5	Material Science	165	
		6	Mathematic	221	
		7	Chemical Engineering	5	
		8	Multidisciplinary	-	

연도	문서타입	번호	분야	Raw Data
2021	컨퍼런스	9	Medicine	2
		10	Decision Science	-
		11	Environmental Sciences	-
		12	Agricultural and Biological Sciences	-
		13	Neurosciences	4
2020	아티클	1	Physics and Astronomy	1,317
		2	Chemistry	150
		3	Computer Science	273
		4	Engineering	261
		5	Material Science	218
		6	Mathematic	308
		7	Chemical Engineering	36
		8	Multidisciplinary	57
		9	Medicine	3
		10	Decision Science	9
		11	Environmental Sciences	12
		12	Agricultural and Biological Sciences	10
		13	Neurosciences	9
	컨퍼런스	1	Physics and Astronomy	261
		2	Chemistry	7
		3	Computer Science	357
		4	Engineering	280
		5	Material Science	169
		6	Mathematic	218
		7	Chemical Engineering	3
		8	Multidisciplinary	-
		9	Medicine	2
		10	Decision Science	1
		11	Environmental Sciences	3
		12	Agricultural and Biological Sciences	2
		13	Neurosciences	5
2019	아티클	1	Physics and Astronomy	1,106
		2	Chemistry	151
		3	Computer Science	202
		4	Engineering	332
		5	Material Science	205
		6	Mathematic	250
		7	Chemical Engineering	30

연도	문서타입	번호	분야	Raw Data
2019	아티클	8	Multidisciplinary	48
		9	Medicine	3
		10	Decision Science	7
		11	Environmental Sciences	12
		12	Agricultural and Biological Sciences	8
		13	Neurosciences	7
	컨퍼런스	1	Physics and Astronomy	331
		2	Chemistry	7
		3	Computer Science	342
		4	Engineering	317
		5	Material Science	146
		6	Mathematic	225
		7	Chemical Engineering	12
		8	Multidisciplinary	-
		9	Medicine	1
		10	Decision Science	3
		11	Environmental Sciences	4
		12	Agricultural and Biological Sciences	2
		13	Neurosciences	7



3 제 3구간: 2019-2023

[표] SCOPUS 양자 관련 문서별/분야별 논문 검색결과 (3구간, 2019-2023)

연도	문서타입	번호	분야	Raw Data
2023	아티클	1	Physics and Astronomy	5
		2	Chemistry	-
		3	Computer Science	5
		4	Engineering	9
		5	Material Science	5
		6	Mathematic	5
		7	Chemical Engineering	2
		8	Multidisciplinary	-
		9	Medicine	-
		10	Decision Science	-
		11	Environmental Sciences	2
		12	Agricultural and Biological Sciences	1
		13	Neurosciences	-
	컨퍼런스	1	Physics and Astronomy	-
		2	Chemistry	-
		3	Computer Science	5
		4	Engineering	6
		5	Material Science	-
		6	Mathematic	-
		7	Chemical Engineering	-
		8	Multidisciplinary	-
		9	Medicine	-
		10	Decision Science	-
		11	Environmental Sciences	-
		12	Agricultural and Biological Sciences	-
		13	Neurosciences	-
2022	아티클	1	Physics and Astronomy	3,104
		2	Chemistry	429
		3	Computer Science	1,212
		4	Engineering	1,224
		5	Material Science	1,094
		6	Mathematic	961
		7	Chemical Engineering	122
		8	Multidisciplinary	200

연도	문서타입	번호	분야	Raw Data	
2022	아티클	9	Medicine	33	
		10	Decision Science	25	
		11	Environmental Sciences	26	
		12	Agricultural and Biological Sciences	10	
		13	Neurosciences	19	
	컨퍼런스	1	Physics and Astronomy	238	
		2	Chemistry	29	
		3	Computer Science	676	
		4	Engineering	484	
		5	Material Science	229	
		6	Mathematic	294	
		7	Chemical Engineering	3	
		8	Multidisciplinary	13	
		9	Medicine	21	
		10	Decision Science	68	
		11	Environmental Sciences	28	
		12	Agricultural and Biological Sciences	3	
		13	Neurosciences	-	
	2021	아티클	1	Physics and Astronomy	3,245
			2	Chemistry	393
			3	Computer Science	1,082
			4	Engineering	1,127
			5	Material Science	1,051
			6	Mathematic	844
			7	Chemical Engineering	105
			8	Multidisciplinary	177
9			Medicine	29	
10			Decision Science	26	
11			Environmental Sciences	22	
12			Agricultural and Biological Sciences	9	
13			Neurosciences	16	
컨퍼런스		1	Physics and Astronomy	426	
		2	Chemistry	4	
		3	Computer Science	1,021	
		4	Engineering	658	
		5	Material Science	361	
		6	Mathematic	442	
		7	Chemical Engineering	3	

연도	문서타입	번호	분야	Raw Data
2021	컨퍼런스	8	Multidisciplinary	7
		9	Medicine	27
		10	Decision Science	141
		11	Environmental Sciences	7
		12	Agricultural and Biological Sciences	-
		13	Neurosciences	-
2020	아티클	1	Physics and Astronomy	2,826
		2	Chemistry	333
		3	Computer Science	813
		4	Engineering	929
		5	Material Science	911
		6	Mathematic	667
		7	Chemical Engineering	115
		8	Multidisciplinary	151
		9	Medicine	17
		10	Decision Science	21
		11	Environmental Sciences	28
		12	Agricultural and Biological Sciences	4
		13	Neurosciences	7
	컨퍼런스	1	Physics and Astronomy	240
		2	Chemistry	1
		3	Computer Science	859
		4	Engineering	571
		5	Material Science	270
		6	Mathematic	403
		7	Chemical Engineering	3
		8	Multidisciplinary	-
		9	Medicine	19
		10	Decision Science	99
		11	Environmental Sciences	10
		12	Agricultural and Biological Sciences	-
		13	Neurosciences	-
2019	아티클	1	Physics and Astronomy	2,046
		2	Chemistry	315
		3	Computer Science	701
		4	Engineering	766
		5	Material Science	757
		6	Mathematic	596

연도	문서타입	번호	분야	Raw Data
2019	아티클	7	Chemical Engineering	100
		8	Multidisciplinary	176
		9	Medicine	17
		10	Decision Science	24
		11	Environmental Sciences	20
		12	Agricultural and Biological Sciences	9
		13	Neurosciences	11
	컨퍼런스	1	Physics and Astronomy	444
		2	Chemistry	118
		3	Computer Science	909
		4	Engineering	748
		5	Material Science	549
		6	Mathematic	389
		7	Chemical Engineering	9
		8	Multidisciplinary	6
		9	Medicine	53
		10	Decision Science	91
		11	Environmental Sciences	34
		12	Agricultural and Biological Sciences	-
		13	Neurosciences	-

