



ImPACT Program Manager
山本 喜久 Yoshihisa YAMAMOTO

1978年 東京大学大学院博士課程修了（工学博士）
 1978～1992年 NTT（現在 R&Dフェロー）
 1992年～2014年 スタンフォード大学 教授（現在 名誉教授）
 2003年～2014年 国立情報学研究所 教授
 2013年～2014年 理化学研究所 グループディレクター
 2014年～ImPACT プログラム・マネージャー

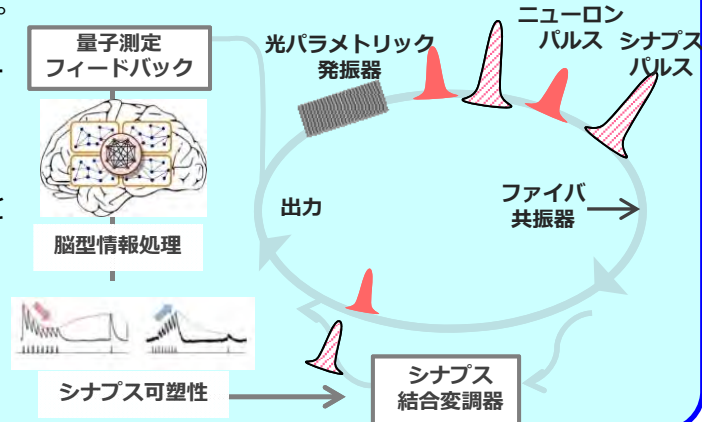
量子情報通信技術の研究グループをNTT基礎研究所内に設立し、以後30年以上にわたって、世界の量子情報通信研究の最先端を切り拓く。日本国内および米国内の大型国家プロジェクトを多数指揮。2009～2014年内閣府・最先端研究開発支援（FIRST）プログラム中心研究者。

＜研究開発プログラムの概要＞

脳型情報処理を量子コンピュータに取り込んだ量子人工脳を開発し、これを絶対に盗聴を許さない量子セキュアネットワークで結んだ高度知識社会の基盤を確立する。

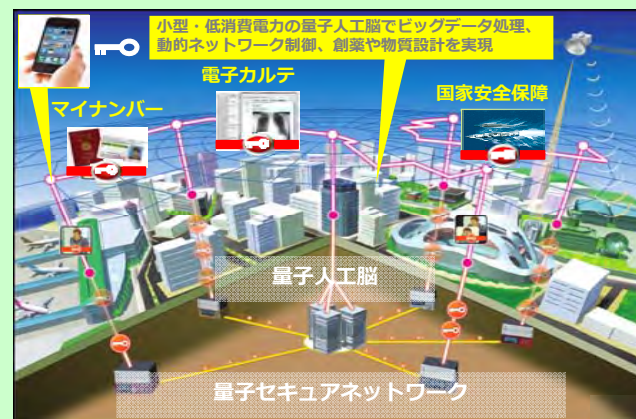
＜非連続イノベーションのポイント＞

ファイバリング・パラメトリック発振器に同時に生成される1～100万の光パルスをニューロンと見立て、これらを量子測定フィードバック回路で相互結合し、大規模シナプスネットワークを実現し、組み合わせ最適化問題を高速で解くイジングマシンとする。

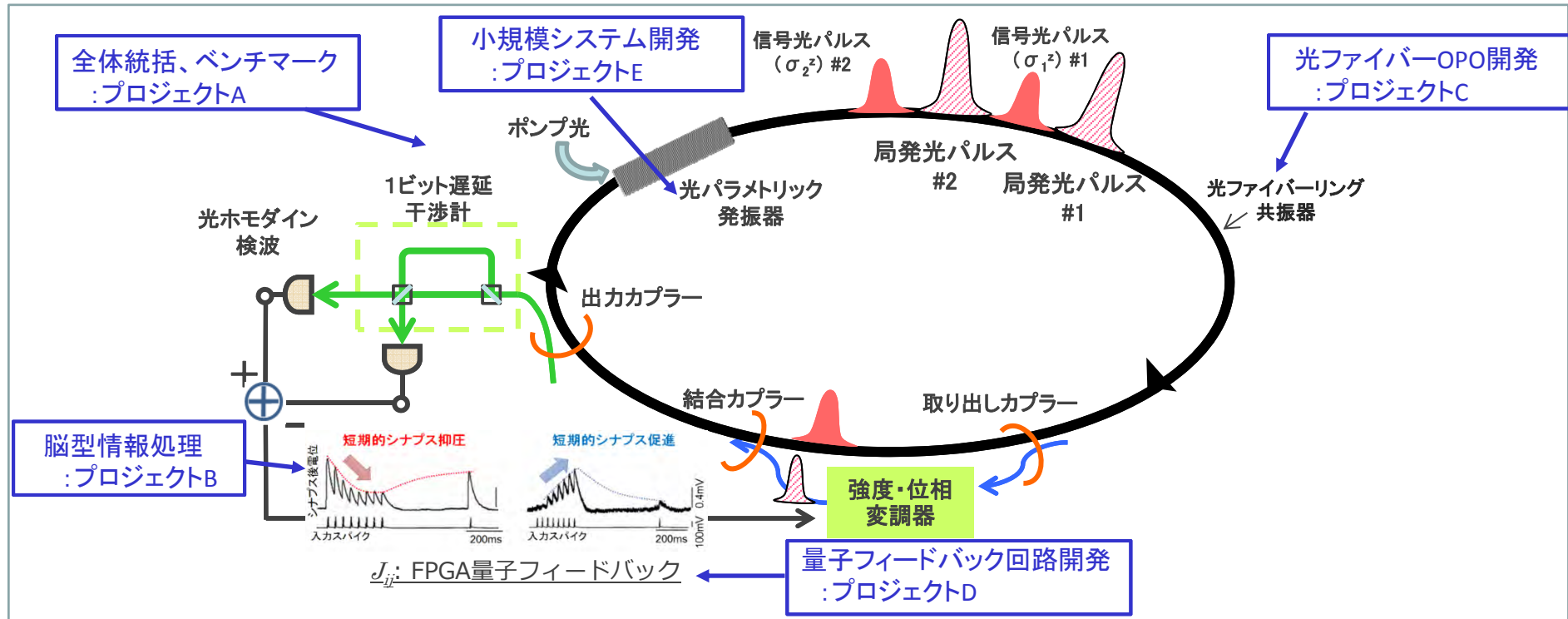


＜期待される産業や社会へのインパクト＞

将来のデータセンターやロボット・衛星に搭載可能な革新的な量子人工脳が誕生し、その恩恵を安全性脅威に怯えることなく享受できる高度情報社会の基盤技術を確認する。



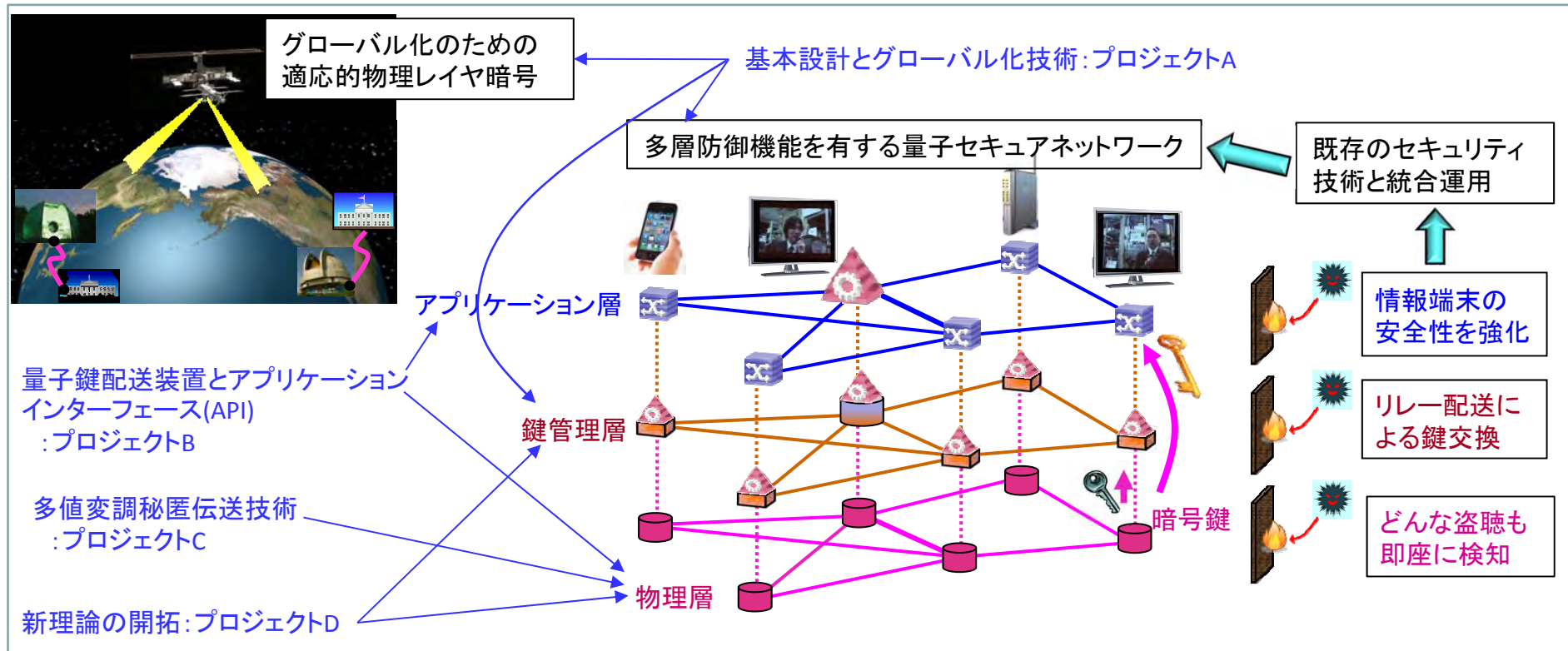
研究開発プログラム全体構成：量子人工脳



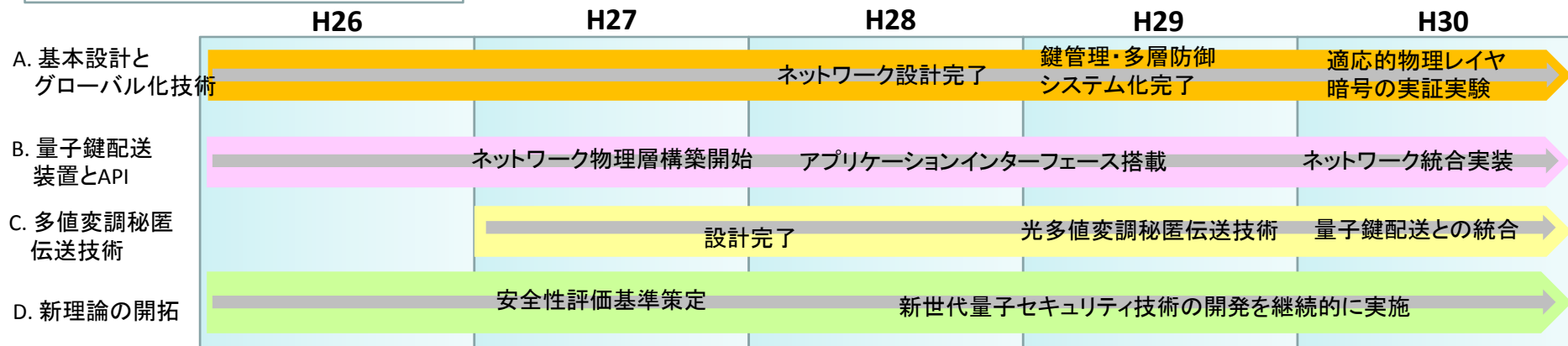
各克服すべき課題の実施時期

	H26	H27	H28	H29	H30
A. 全体総括、ベンチマーク	SDPIに対する優位性(理論)	コヒーレントイジングマシン量子論	古典アニーリングに対する優位性(理論)	SDP、古典アニーリングに対する優位性(実験)	
B. 脳型情報処理	分岐理論の導入	シナプス可塑性の導入		量子人工脳概念	ディープラーニングの応用
C. 光ファイバーOPO開発	1GHz、5000サイトマシン		10GHz、50,000サイトマシン		40GHz、500,000サイトマシン
D. 量子フィードバック回路開発	基本設計	1GHz、5000サイト用FPGA開発	評価、新規設計	10GHz、5000サイト用FPGA開発	評価
E. 小規模システム開発	100MHz、100サイトマシンとFPGA開発	ベンチマーク	1GHz、1000サイトマシンとFPGA開発	ベンチマーク	2.5GHz、5000サイトマシンとFPGA開発

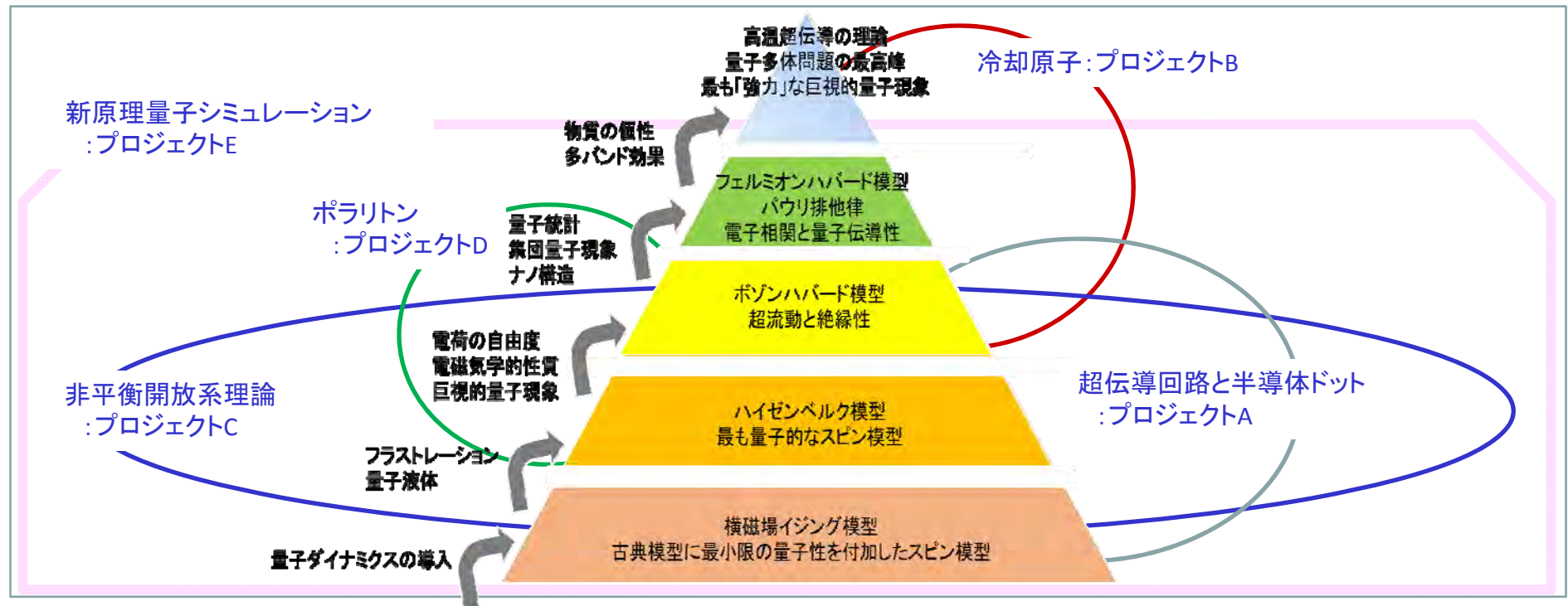
研究開発プログラム全体構成：量子セキュアネットワーク



各克服すべき課題の実施時期



研究開発プログラム全体構成：量子シミュレーション

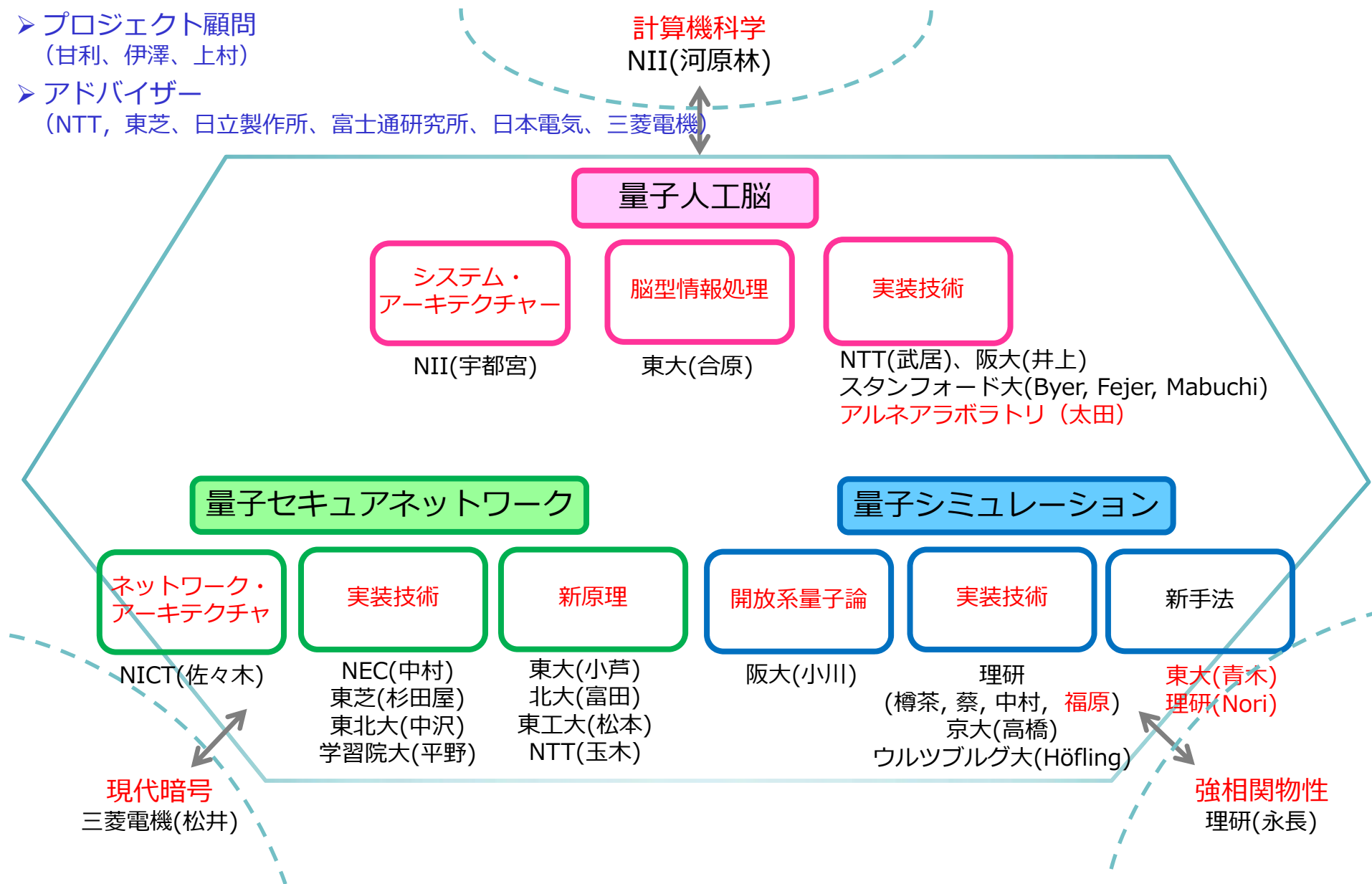


各克服すべき課題の実施時期

	H26	H27	H28	H29	H30
A. 強相関量子系	到達目標設定(理論)	超伝導回路設計・試作	半導体ドット量子スピン格子の作成	ボゾン系・スピン系非平衡実時間観測	
B. 冷却原子系	多原子の捕獲	光格子系の作成	ボゾン系非平衡実時間測定	フェルミオン系非平衡実時間測定	
C. 開放量子系理論	量子コヒーレンスの理論	開放系時空間ダイナミクスの理論		高次相関関数の理論	
D. 開放量子系実験	パラリトン量子ドット系の作成	励起・発光スペクトルの計測手法	パラリトンの量子凝縮相の非平衡ダイナミクス観測		
E. 新原理	公募グループ採択	新原理量子シミュレーション の提案(理論)	新原理量子シミュレータの 設計と試作(実験)	新規量子シミュレーション・ シミュレータの実装とベンチマーク	

研究開発プログラム全体の体制図

- 山本PM
- プロジェクト顧問
(甘利、伊澤、上村)
- アドバイザー
(NTT, 東芝、日立製作所、富士通研究所、日本電気、三菱電機)



課題の達成アプローチに応じた実施機関の考え方（追加機関のみ）

研究開発機関選定に際して重要視するポイント等

プロジェクト: 量子人工脳「レーザネットワーク型コヒーレントイジングマシンの開発」
高次高調波モード同期ファイバーレーザと量子測定フィードバック制御によるコヒーレントイジングマシンの装置開発を行なう。



選定に至る背景・経緯

◆ 選定方法: 非公募指名、株式会社アルネアラボラトリ
追加を予定していた研究ではない。当初は、光パラメトリック発振器(OPO)を用いたコヒーレントイジングマシンの開発をNTT、大阪大学およびスタンフォード大学のグループが担当し、この装置を量子人工脳を中心に据える計画であった。しかしながら、その後の理論研究により、コミュニティ検出や連想記憶メモリーなどの応用にはOPOネットワークよりもレーザネットワークの方が適していることが明らかになった。これを実装する最良の方法は、多重パルスモード同期ファイバーレーザであり、国内では株式会社アルネアラボラトリが最も優れた開発技術を有していると判断し、今回の機関選定に至った。

課題の達成アプローチに応じた実施機関の考え方（追加機関のみ）

研究開発機関選定に際して重要視するポイント等

プロジェクト：量子人工脳「レーザネットワーク型コヒーレントイジングマシンの開発」
 高次高調波モード同期ファイバーレーザと量子測定フィードバック制御によるコヒーレントイジングマシンの装置開発を行なう。

脳における情報処理では、目的に応じて異なったミッションを持つ神経回路モジュールをリンクして、最適な計算機を構成している。



J.M. Beggs et al., J. Neuroscience 23, 11167 (2003)

量子人工脳においても、異なったミッションを持つレーザー/OPOネットワークを制御用コンピュータを介してその都度再構成して最適な計算機を実現する。

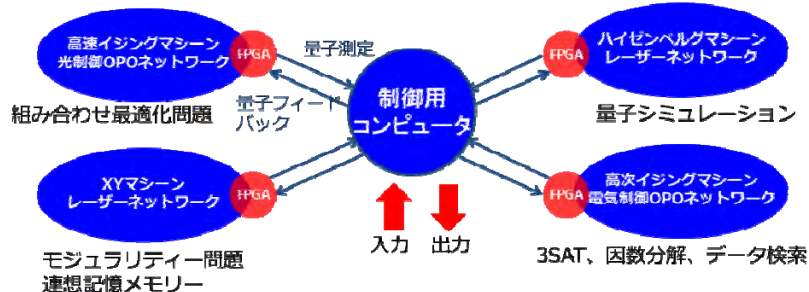


図1. 脳型情報処理

選定理由

必要性

将来の量子人工脳のアーキテクチャーを考えると、離散的な位相(0または π)を取り、雑音に対する耐性と安定性に優れたOPOネットワークというデジタルシステムと、連続的な位相(0から 2π まで)を取り、自由度と速度に優れたレーザネットワークというアナログシステムを同時に開発しておくことが適切である。与えられたタスクに応じて、デジタル的処理が有利か、アナログ的処理が有利か、によって両者を使い分けるシステム(図1)が望ましい量子人工脳の姿と考える。

合理性

株式会社アルネアラボラトリには、モード同期ファイバーレーザの商品化のみならず、デジタルコヒーレント検波技術、位相安定化技術、FPGA回路技術、モジュール化技術など周辺技術があり、国内では本研究開発を行なわせるのに最も適した機関である。

妥当性

レーザネットワーク型コヒーレントイジングマシンの開発には、計測器購入費、部品費、材料費、人件費が発生する。そのため、研究費と研究期間は総額6,000万円と2年とする。2年後に、研究開発の進捗を見て、継続の可否を判断する。

課題の達成アプローチに応じた実施機関の考え方（追加機関のみ）

研究開発機関選定に際して重要視するポイント等

プロジェクト: 量子シミュレーション
強相関電子系の非平衡状態を数値シミュレーションにより明らかにすることを目指して、動的クラスター理論をはじめとする新しい理論手法を開拓する。



選定に至る背景・経緯

◆ 選定方法: 公募、東京大学(青木 秀夫)
室温超伝導体があり存在するとすれば、それは外界からのエネルギー注入下の非平衡状態で実現される可能性が高い。しかし、現在の強相関電子物性理論で使われている数値シミュレーション手法は、系の基底状態を求めるために開発されたものが多く、上記の非平衡状態を記述するのに適しない。青木氏は、この問題を回避するため、非平衡動的平均場理論をはじめとする新しい数値シミュレーション手法を開発するユニークな提案を行なっている。この提案は、本プログラムの方向性と一致しており、今回の機関選定に至った。

選定理由

必要性

室温超伝導体があり存在するとすれば、電子集団が生成するコヒーレントな波動関数が室温の熱エネルギー(24meV)により壊されないことが必須条件である。そのような電子状態は恐らく非平衡の励起状態として実現されるだろうと予測される。しかしながら、現在の強相関電子系に対する数値シミュレーション手法では、そのような非平衡状態を記述することはできない。従って、非平衡の強相関電子系をシミュレートできる本提案にある数値手法の開発がImPACTプログラムにとって喫緊の課題となっている。

合理性

動的平均場理論は、強相関電子多体系を記述する優れた近似解法であるが、基本的には多体系の相互作用を平均場中の1体不純物問題に帰着させてしまうため、定常的な平均場を考えにくい非平衡系を記述するには限界がある。青木氏は、この問題をクリアする動的クラスター理論を最近創始し、この手法で世界をリードする強力な研究者集団を組織している。上記目標に世界で最も近いポジションにいる研究グループである。

妥当性

理論研究であるので、ポスドク1名の人件費、海外の研究者との共同研究を可能にする旅費など、総額3,800万円をImPACTから支援すれば、提案された研究計画を実施できる、と考えている。

課題の達成アプローチに応じた実施機関の考え方（追加機関のみ）

研究開発機関選定に際して重要視するポイント等

プロジェクト:量子シミュレーション「現代コンピュータに実装できる量子多体系の新計算手法の開発」
強相関電子系および非線形量子光学系を記述する様々な理論モデルを数値シミュレーションするsolverを開拓し、インターネット上で公開し、誰でも使用できる便利なツールボックスとして提供する。



選定に至る背景・経緯

◆ 選定方法: 公募、理化学研究所 (Franco NORI)
強相関電子系や非線形量子光学系の理論グループは、それぞれ独自の理論モデルを構築し、これを解くsolverも自前で開発するのが常である。そのため、非常に優れたsolverが開発されても、その恩恵に浴するのは少数の研究者にとどまっているのが実情である。Nori氏は、QuTIPと呼ばれる量子光学ツールボックスをインターネット上に公開し、世界中の研究者に提供してきた。この方向性は、上記問題の解決を目指す本プログラムの進むべき1つの方向と一致しており、今回の機関選定に至った。

選定理由

必要性

強相関電子物性理論や非線形量子光学理論は、室温超伝導体の実現を目指す材料研究者や量子情報処理システムの実現を目指す原子・超伝導・光研究者にとって、有用な指針を与えるべき重要なツールである。しかし、現実には実験家がこれらの理論を数値シミュレーションの手法として手軽に使えるツールボックスとしては整備されていない。各理論グループには独自の理論モデルとsolverがあるが、外部の研究者がアクセスできる形には必ずしもなっていない。本ImPACTプログラムにおいても複数の理論グループが量子シミュレーション領域に参加し、新しい数値シミュレーション手法の開拓に取り組んでいるが、その研究開発の成果を社会へ還元する仕かけがImPACTプログラムにとって喫緊の課題となっている。

合理性

Nori氏は、量子光学の様々なハミルトニアンをpythonを用いて開発し、これをインターネット上で公開してきた。世界中のこの分野の研究者がこれを利用して研究を行ない、多くの論文がこのsolverを引用する形で発表されている。これを強相関電子系の様々な理論モデルへ拡張できれば、そのインパクトは格段に大きなものとなる。Nori氏は本ImPACTプログラムで開発を進めることになる位相空間理論(量子軌跡法)やクラスター動的平均場理論など最先端の理論モデルをpython上のツールボックスとして提供できる最短のポジションにいる。

妥当性

研究インフラは理化学研究所の内部経費でカバーされている。理論研究であるので、ポスドク1名の人件費と旅費を中心とし、総額3,000万円の支援をImPACTから行なえば、提案された研究計画を実施できる、と考えている。

特記事項: 2013年～2014年のPMの雇用主

課題の達成アプローチに応じた実施機関の考え方（追加機関のみ）

研究開発機関選定に際して重要視するポイント等

プロジェクト: 量子シミュレーション「局所操作を用いた光格子量子シミュレータの開発」
2次元光格子にトラップされたRb冷却原子集団で量子スピンモデルを実装し、これを用いて、強相関電子系物性を解明する量子シミュレータを開発する。



選定に至る背景・経緯

◆ 選定方法: 公募、理化学研究所(福原 武)
量子シミュレータ開発の重要な目標の一つに“室温超伝導体の発見につながる物性学上の知見を得る”がある。このためには、いわゆる強相関電子系の多体効果を効率よくシミュレートできる専用アナログ計算機の開発が不可欠である。ImPACTのプログラムにおいては、電子と同じ量子統計性を持つYbフェルミ原子を用いて、これを実現する研究開発が京都大学高橋グループで行なわれている。ただ、フェルミ原子を用いて強相関電子物性を発現させるには効率のよい冷却手法を新たに開発しなければならない。福原氏はこの問題を回避するため、ボーズアインシュタイン凝縮が使えるボーズ粒子を用いて、またフェルミ/ボーズの量子統計性の違いを回避するため、光格子の各サイトに原子を一つずつ閉じ込めるモット絶縁相量子スピン状態を使って、強相関電子系量子シミュレータを開発するユニークな提案を行なっている。この提案は、本プログラムの方向性と一致しており、今回の機関選定に至った。

必要性

冷却フェルミ原子を用いた量子シミュレータは、強相関電子系と同じ量子統計性を持つため、自然なマッピングができるが、強相関電子物性を発現させるためには原子温度をフェルミ温度の1/100以下に冷却しなければならない。現在、これを実現できる目処は立っていない。一方、冷却ボーズ原子を用いた量子シミュレータは、ボーズアインシュタイン凝縮を用いて十分に低い温度にまで冷却できるが、電子とは異なるボーズ量子統計に従う。従って、強相関電子系への自然なマッピングは存在しない。この問題をクリアすることが冷却原子を用いた量子シミュレータ開発の要である。この点、モット絶縁相を用いて量子スピンモデルへマッピングする本提案は有望なものである。

合理性

光格子の閉じこめポテンシャルを強くして、各サイトに閉じ込められる原子を一つにすれば、ボーズ原子をスピン-1/2を持つフェルミ原子を見立てることができ、強相関電子系と冷却原子のマッピングが成立する。福原氏は、マックスプランク量子光学研究所で、この2次元光格子中の単一原子操作・観察技術を開発してきた実績を持ち、国内で唯一人このテーマに挑戦できる人材である。

妥当性

実験系のインフラは、この1年の間に理化学研究所の内部経費でほぼ立ち上がっている。従って、ImPACTでは、ポスドク1名の人件費、ランニングコスト、理論(理研上田正仁)グループのサポートへ対する支援、など総額7,000万円で研究計画を実施できると考えている。

特記事項: 2013年~2014年のPMの雇用主

課題の達成アプローチに応じた実施機関の考え方（追加機関のみ）

研究開発機関選定に際して重要視するポイント等

プロジェクト: 量子シミュレーション「非平衡アナログ量子シミュレーション超伝導量子ビットシステム」
超伝導量子ビット固体素子システムを使い、各種量子モデルを実装し、これを用いて強相関係物性や非平衡開放系を解明する量子シミュレータを開発する。



選定に至る背景・経緯

◆ 選定方法: 非公募指名、理化学研究所(蔡 兆申)
量子シミュレータ開発の重要な目標の一つに、高温超伝導体発現のメカニズムの知見を得る強相関係物性の理解や、環境の振動モードと結合した量子系である量子化学や固体物理で重要な研究対象である非平衡開放量子系の物理の解明がある。このためには、これらの重要な量子系の多体効果を効率よくシミュレートできる専用アナログ計算機の開発が不可欠である。ImPACTのプログラムにおいては、超伝導量子回路を用いて、これを実現する研究開発が理研中村チームで行なわれている。ただ対象の量子システムの基底状態を観測するのみではなく、平衡状態より逸脱した励起状態を調べることも重要な課題である。蔡グループは、固体素子である超伝導量子ビット回路の特長を生かし、量子システムを全体的または局所的に非平衡に駆動し、そして局所的に読み出すことにより、システムの非平衡ダイナミクスの研究を重点的に進める提案を行っている。この提案は、本プログラムの方向性と一致しており、今回の機関選定に至った。

選定理由

必要性

超伝導量子ビットは、原子のような従来の量子系に比べ、設計性、集積性、光との強い結合などの多くの利点を持っており、比較的複雑な回路を構築することに適している。さらに多数の量子ビットを集積した量子シミュレータシステムの、局所的な量子ビットの駆動や局所的な量子ビットの読み出しは比較的簡単にできる特徴を持っている。従って、超伝導量子ビットシステム量子シミュレータは、量子系の非平衡ダイナミクスの研究には大変適しており、本提案は有望なものである。

合理性

非平衡アナログ量子シミュレーションを超伝導量子ビットシステムを用いて実現するには、超伝導量子ビットと超伝導共振器や超伝導導波路と結合した量子系を使った高度な実験系を組み立てる必要がある。蔡グループはこの方面で、世界に先駆け数々の成果をあげてきた実績を持ち、このテーマに十分挑戦できる実力を持っている。

妥当性

これまでに実績を積み上げてきた蔡氏の実験系のインフラは、現在和光の理化学研究所内に移設が完了しつつある。従って、ImPACTでは、ポスドク2名の人件費、ランニングコスト、など総額8,540万円で研究計画を実施できると考えている。

特記事項: 2013年～2014年のPMの雇用主

研究開発プログラム予算（予定）

