



اقتصاد کوانتومی: یک اکتشاف پیشرفته

محمد خانی دهنوی

مرتضی خانی دهنوی

چکیده

اقتصاد کوانتومی یک حوزه میان رشته‌ای در حال ظهور است که اصول مکانیک کوانتومی را در تجزیه و تحلیل سیستم‌های اقتصادی ادغام می‌کند. این مقاله یک اکتشاف پیشرفته از اقتصاد کوانتومی را ارائه می‌دهد، و توسعه تاریخی آن را از نظریه‌های اقتصادی کلاسیک به چارچوب کوانتومی مدرن آن ردیابی می‌کند. این مقاله به مفاهیم اصلی اقتصاد کوانتومی مانند عدم قطعیت، قرار گرفتن در معرض و پیچیدگی می‌پردازد و معادل بین فیزیک کوانتومی و فرآیندهای اقتصادی را بررسی می‌کند. این مقاله همچنین تفسیرهای مختلفی از اقتصاد کوانتومی، از جمله تفسیرهای کپنهاگ را ارائه می‌دهد و پایه‌های ریاضی این زمینه، از جمله توابع موج، اپراتورها و احتمال کوانتومی را توضیح می‌دهد. کاربردهای عملی اقتصاد کوانتومی با تمرکز بر فن‌آوری‌های پیشرفته مانند محاسبات کوانتومی که وعده انقلابی در مدل‌سازی مالی را می‌دهد و رمزنگاری کوانتومی که امنیت بیشتری برای معاملات مالی ارائه می‌دهد، مورد بررسی قرار می‌گیرد. علاوه بر این، این مقاله نظریه بازی کوانتومی را به عنوان ابزاری برای درک تعاملات استراتژیک پیچیده در زمینه‌های اقتصادی مورد بحث قرار می‌دهد. این مقاله پیامدهای عمیق اقتصاد کوانتومی را برای نظریه اقتصادی مدرن و پتانسیل آن برای پیشبرد پیشرفت‌های آینده در تجزیه و تحلیل بازارهای مالی، فرآیندهای تصمیم‌گیری و ارتباط اقتصادی جهانی خلاصه می‌کند.

واژگان کلیدی: اقتصاد کوانتومی، عدم قطعیت اقتصادی، محاسبات کوانتومی

مقدمه‌ای بر اقتصاد کوانتومی

توسعه تاریخی

اقتصاد کوانتومی یک حوزه نوظهور است که هدف آن استفاده از اصول مکانیک کوانتومی در سیستم‌های اقتصادی است. ادغام این اصول در اقتصاد زمانی آغاز شد که محققان محدودیت‌های مدل‌های اقتصادی کلاسیک را که ریشه در چارچوب‌های تعیین‌کننده مکانیک نیوتنی دارند، به رسمیت شناختند. اقتصاد کلاسیک، که عمدتاً تحت تأثیر آثار آدام اسمیت و بعداً توسط اقتصاد نئوکلاسیک قرار گرفته است، فرض می‌کند که عوامل اقتصادی منطقی عمل می‌کنند و بازارها به تعادل می‌رسند (Samuelson and Nordhaus, 2009). با این حال، این فرضیات در توضیح پدیده‌های پیچیده مانند نوسانات بازار مالی، حباب‌ها و تصادفات ناکافی بوده است (Mandelbrot and Hudson, 2004).

مکانیک کوانتومی، که در اوایل قرن بیستم توسط فیزیکدانانی مانند مکس پلانک و نیلز بور توسعه یافت، مفاهیمی مانند عدم قطعیت، برهم‌نهی^۱ و پیچیدگی را معرفی کرد که نشان می‌دهد در سطح اساسی، واقعیت به جای تعیین‌گرایانه، احتمالاتی است (Dirac, 1930). این ایده که این اصول می‌توانند در سیستم‌های اقتصادی به کار گرفته شوند، زمانی مطرح شد که اقتصاددانان شروع به بررسی ماهیت احتمالی بازارها و نقش عدم اطمینان در تصمیم‌گیری کردند (Schaden, 2002).

مفاهیم کلیدی

مفاهیم بنیادی اقتصاد کوانتومی عبارتند از:

عدم قطعیت کوانتومی: با استفاده از اصل عدم قطعیت هایزنبرگ، این مفهوم نشان می‌دهد که نتایج اقتصادی به طور ذاتی نامشخص است و نمی‌تواند به طور دقیق پیش‌بینی شود، که منعکس‌کننده ماهیت احتمالی سیستم‌های اقتصادی است (Heisenberg, 1927).

برهم‌نهی: در مکانیک کوانتومی، یک ذره می‌تواند در چندین حالت به طور همزمان وجود داشته باشد تا زمانی که اندازه‌گیری شود. به طور مشابه، در اقتصاد کوانتومی، تصمیم‌گیری به عنوان یک ترکیب از انتخاب‌های بالقوه مدل‌سازی شده است، که پس از مشاهده به یک نتیجه واحد فرو می‌ریزد (Schaden, 2002).

¹ Superposition

پیچیدگی: پیچیدگی کوانتومی نشان می‌دهد که ذرات به گونه‌ای به هم متصل هستند که وضعیت یک نفر بلافاصله بر وضعیت دیگری تأثیر می‌گذارد، صرف نظر از فاصله. این مفهوم به اقتصاد برای توصیف ارتباط متقابل بازارها یا عوامل اعمال می‌شود، جایی که اقدامات فرد می‌تواند اثرات فوری و قابل توجهی بر دیگران داشته باشد (Schrödinger, 1935).

اقتصاد کوانتومی مفاهیم کلاسیک عقلانیت و تعادل را به چالش می‌کشد و در عوض نشان می‌دهد که عوامل اقتصادی تحت عقلانیت محدود عمل می‌کنند، جایی که تصمیمات بر اساس اطلاعات ناقص و نتایج احتمالی گرفته می‌شود (Kahneman, 2011).

معادل فیزیک کوانتومی و اقتصاد

مکانیک کوانتومی به عنوان یک چارچوب

مکانیک کوانتومی یک چارچوب ریاضی برای درک رفتار ذرات در سطح کوانتومی فراهم می‌کند. تابع موج، که در مرکز این چارچوب قرار دارد، احتمالات تمام حالت‌های ممکن را که یک سیستم می‌تواند اشغال کند، کدگذاری می‌کند. تکامل تابع موج توسط معادله شرودینگر، سنگ بنای مکانیک کوانتومی، اداره می‌شود (Schrödinger, 1926).

در اقتصاد کوانتومی، تابع موج به صورت استعاری برای توصیف احتمالات کشورهای مختلف اقتصادی یا نتایج استفاده می‌شود. سیستم اقتصادی به عنوان یک سیستم کوانتومی مدل سازی شده است که در آن نتایج بالقوه در ترکیب وجود دارد تا زمانی که یک "اندازه گیری" یا تصمیم‌گیری اقتصادی سیستم را به یک حالت واحد فروپاشی دهد (Orrell, 2020).

حالت‌های کوانتومی در اقتصاد

اقتصاد کلاسیک به طور معمول سیستم‌ها را با استفاده از متغیرهای تعیین کننده مانند قیمت ها ، مقادیر و ترجیحات مدل می‌کند. این متغیرها به طور قابل پیش بینی در طول زمان ، با پیروی از قوانین کلاسیک حرکت ، تکامل می‌یابند. در مقابل ، اقتصاد کوانتومی این متغیرها را به عنوان حالت کوانتومی نشان می‌دهد ، که اجازه می‌دهد تا چندین پیکربندی بالقوه به طور همزمان همزیستی داشته باشند (Schaden, 2002). گذار بین دولت‌ها توسط قوانین احتمالی کنترل می‌شود که منعکس کننده عدم اطمینان مشاهده شده در بازارهای مالی است.

این رویکرد کوانتومی چارچوبی پیچیده‌تر برای مدل سازی پدیده‌های پیچیده اقتصادی مانند نوسانات بازار ، حباب‌های گمانه زنی و بحران‌های مالی فراهم می‌کند ، جایی که نتایج به راحتی قابل پیش‌بینی نیستند (Orrell, 2018).

پیچیدگی و بازارهای متصل به هم

پیچیدگی کوانتومی سناریویی را توصیف می‌کند که در آن وضعیت یک ذره به طور فوری با وضعیت ذره دیگر صرف نظر از فاصله بین آنها، ارتباط دارد. این مفهوم مشابه ماهیت متصل بازارهای جهانی است، جایی که رویدادهای اقتصادی در یک منطقه می‌تواند به سرعت بر دیگران تأثیر بگذارد.

در اقتصاد کوانتومی، پیچیدگی نشان می‌دهد که بازارها و عوامل اقتصادی مستقل نیستند؛ در عوض، آنها عمیقاً به هم متصل هستند. این ارتباط متقابل می‌تواند منجر به اثرات پراکنده شود، جایی که تغییرات کوچک در یک بخش از سیستم اثرات گسترده‌ای بسیار شبیه به اثر پروانه در نظریه هرج و مرج در جای دیگر دارد (Sornette, 2003).

تفسیرهای اقتصاد کوانتومی

تفسیر کپنهاگ

تفسیر کپنهاگ از مکانیک کوانتومی فرض می‌کند که سیستم‌های کوانتومی تا زمانی که اندازه‌گیری نشوند، خواص مشخصی ندارند (Bohr, 1928). این تفسیر که در مورد اقتصاد اعمال می‌شود، نشان می‌دهد که نتایج اقتصادی تا زمانی که مشاهده یا اندازه‌گیری نشود، در یک حالت ثابت وجود ندارد.

در این چارچوب، تصمیمات اقتصادی شبیه به اندازه‌گیری‌های کوانتومی است. قبل از تصمیم‌گیری یا معامله، سیستم اقتصادی در یک ترکیب از نتایج بالقوه وجود دارد. هنگامی که تصمیم‌گیری انجام می‌شود، این ترکیب به یک نتیجه خاص تبدیل می‌شود و ماهیت احتمالی رویدادهای اقتصادی را منعکس می‌کند (Orrell, 2020).

تفسیر جهان‌های مختلف

تفسیر چند جهان^۲ نشان می‌دهد که تمام نتایج احتمالی یک رویداد کوانتومی رخ می‌دهد، اما در شاخه‌های جداگانه و غیر ارتباطی جهان (Everett, 1957). در اقتصاد کوانتومی، این تفسیر نشان می‌دهد که هر نتیجه اقتصادی ممکن در واقعیت‌های موازی رخ می‌دهد.

² MWI

این تفسیر راهی جدید برای مدل سازی سناریوهای اقتصادی فراهم می کند که در آن تصمیمات مختلف منجر به نتایج مختلف می شود. در چارچوب جهان های مختلف، همه این نتایج هر کدام در شاخه خود از "چند جهان" واقعیت های اقتصادی، در کنار هم وجود دارند. این رویکرد به ویژه در نظریه بازی و تجزیه و تحلیل تصمیم گیری مفید است، جایی که استراتژی ها و نتایج متعدد به طور همزمان در نظر گرفته می شوند (Deutsch, 1999).

بیزینیس^۳ کوانتومی

بیزینیس کوانتومی یا QBism، مکانیک کوانتومی را با نظریه احتمال بایسی ترکیب می کند (Fuchs et al, 2014). در این تفسیر، تابع موج نشان دهنده اعتقاد ذهنی فرد در مورد وضعیت یک سیستم است نه یک واقعیت عینی.

در اقتصاد کوانتومی، QBism پیشنهاد می کند که عوامل اقتصادی باورهای خود را بر اساس اطلاعات جدید، شبیه به به روزرسانی بایزی، اما در یک چارچوب کوانتومی به روز کنند. تصمیمات فقط واکنش به یک وضعیت بازار عینی نیستند بلکه تحت تأثیر باورهای ذهنی عامل و ماهیت احتمالی محیط اقتصادی هستند (Fuchs et al, 2014).

مبانی ریاضی اقتصاد کوانتومی

توابع موج در اقتصاد

در مکانیک کوانتومی، عملکرد موج $\psi(x, t)$ نشان دهنده حالت کوانتومی یک سیستم است که شامل تمام حالت های ممکن سیستم است. مربع اندازه تابع موج، $|\psi(x, t)|^2$ ، تراکم احتمال یافتن سیستم را در یک حالت خاص می دهد (Schrödinger, 1926). در اقتصاد کوانتومی، تابع موج به صورت استعاری وضعیت یک سیستم اقتصادی را نشان می دهد. برای مثال، $\psi(x, t)$ می تواند توزیع احتمال قیمت دارایی ها را در طول زمان را توصیف کند. تکامل این تابع موج، که توسط معادله مشابه معادله شرودینگر اداره می شود، چگونگی تکامل شرایط بازار تحت تأثیرات مختلف را مدل می کند (Orrell, 2020).

اپراتورها و قابل مشاهده ها

³ Bayesianism

در مکانیک کوانتومی، اپراتورها با مشاهدات فیزیکی مانند موقعیت و حرکت مطابقت دارند و برای استخراج اطلاعات در مورد سیستم به تابع موج اعمال می‌شوند (Dirac, 1930). به عنوان مثال، اپراتور موقعیت \hat{x} به یک تابع موج اعمال می‌شود و موقعیت مورد انتظار یک ذره را به ارمغان می‌آورد.

در اقتصاد کوانتومی، اپراتورها برای مدل‌سازی مشاهدات اقتصادی مانند قیمت، تقاضا یا خدمات استفاده می‌شوند. این اپراتورها بر اساس عملکرد موج اقتصادی عمل می‌کنند تا اطلاعات مربوط به ارزش‌های مورد انتظار این قابل مشاهده‌ها را استخراج کنند. به عنوان مثال، استفاده از یک اپراتور قیمت به یک تابع موج اقتصادی می‌تواند قیمت مورد انتظار یک دارایی مالی را در شرایط بازار داده شده به ارمغان بیاورد (Haven & Khrennikov, 2013).

معادله شرودینگر و پویایی اقتصادی

معادله شرودینگر یک معادله اساسی در مکانیک کوانتومی است که نحوه تکامل حالت کوانتومی یک سیستم را در طول زمان توصیف می‌کند (Schrödinger, 1926). در اقتصاد کوانتومی، از یک معادله مشابه برای مدل‌سازی تکامل سیستم‌های اقتصادی استفاده می‌شود.

این معادله اقتصادی کوانتومی شرودینگر را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$i\hbar \frac{\partial \psi(x, t)}{\partial t} = \hat{H} \psi(x, t)$$

جایی که $\psi(x, t)$ تابع موج اقتصادی را نشان می‌دهد، \hbar یک ثابت است (که ممکن است در کاربردهای اقتصادی نرمال شود)، و \hat{H} عملگر همیلتونی است که کل "انرژی" یا ارزش سیستم اقتصادی را نشان می‌دهد. این معادله چگونگی تغییر متغیرهای اقتصادی مانند قیمت دارایی یا نرخ بهره را در طول زمان در پاسخ به عوامل مختلف خارجی و داخلی مدل می‌کند (Orrell, 2020).

احتمال کوانتومی و تصمیم‌گیری اقتصادی

احتمال کوانتومی اجازه می‌دهد تا حالت‌ها و تداخل احتمالات، که با نظریه احتمال کلاسیک متناقض است (Feynman, 1985). در اقتصاد کوانتومی، این رویکرد به مدل‌های احتمال تصمیم‌گیری تحت عدم اطمینان است.

به عنوان مثال، هنگامی که یک عامل اقتصادی با انتخاب های متعدد روبرو می شود، احتمال نتایج مختلف ممکن است با یکدیگر تداخل داشته باشد، که منجر به توزیع احتمال غیر کلاسیک می شود. این دیدگاه کوانتومی می تواند پدیده هایی مانند معکوس کردن ترجیحات را توضیح دهد، جایی که انتخاب یک عامل بین گزینه ها بسته به چگونگی شکل گیری سوال تغییر می کند (Tversky & Kahneman, 1981).

کاربردهای اقتصاد کوانتومی

محاسبات کوانتومی در اقتصاد

محاسبات کوانتومی که از بیت های کوانتومی^۴ استفاده می کند که قادر به نشان دادن هر دو ۰ و ۱ به طور همزمان است، مزایای محاسباتی قابل توجهی نسبت به رایانه های کلاسیک ارائه می دهد (Nielsen & Chuang, 2000). الگوریتم های کوانتومی مانند الگوریتم Shor برای فاکتورسازی عدد صحیح و الگوریتم Grover برای جستجوی پایگاه داده، سرعت های نمایی را برای مشکلات خاص فراهم می کنند.

در اقتصاد کوانتومی، محاسبات کوانتومی می تواند برای بهینه سازی نمونه کارها، مدیریت ریسک و مشتقات قیمت کارآمدتر از روش های کلاسیک استفاده شود. الگوریتم های کوانتومی می توانند این مشکلات پیچیده و با ابعاد بالا را سریع تر حل کنند و آنها را به ویژه در بازارهای مالی ارزشمند کنند، جایی که محاسبات سریع بسیار مهم است (Orrell, 2020).

رمزنگاری کوانتومی و امنیت مالی

رمزنگاری کوانتومی، به ویژه توزیع کلید کوانتومی^۵، ارتباطات امن را با استفاده از اصول مکانیک کوانتومی تضمین می کند (Bennett and Brassard, 1984). امنیت QKD بر اساس قضیه عدم شبیه سازی و این واقعیت است که هر گونه تلاش برای ردگیری کلید سیستم را مختل می کند و شنود را قابل تشخیص می کند (Wootters & Zurek, 1982).

⁴ Qubits

⁵ QKD

در اقتصاد کوانتومی، QKD می تواند برای تضمین معاملات مالی و محافظت از داده های حساس اقتصادی استفاده شود. از آنجا که روش های رمزنگاری کلاسیک با تهدیدات فزاینده ای از رایانه های کوانتومی مواجه هستند، رمزنگاری کوانتومی راه حل قوی برای اطمینان از محرمانه بودن و یکپارچگی ارتباطات مالی ارائه می دهد (Scarani et al, 2009).

نظریه بازی کوانتومی

نظریه بازی کوانتومی نظریه بازی کلاسیک را با ترکیب استراتژی های کوانتومی مانند قرار دادن و پیچیدگی گسترش می دهد که می تواند منجر به تعادل و نتایج جدید شود (Meyer, 1999). استراتژی های کوانتومی می توانند در شرایط رقابتی مانند رقابت بازار یا مذاکرات، با فعال کردن حرکاتی که در بازی های کلاسیک غیرممکن است، مزایای خود را ارائه دهند (Eisert et al, 1999). در اقتصاد کوانتومی، نظریه بازی کوانتومی می تواند تعاملات بین عوامل اقتصادی را مدل سازی کند، جایی که نظریه بازی سنتی نمی تواند پیچیدگی کامل تصمیم گیری استراتژیک را به تصویر بکشد. این رویکرد به ویژه در درک رفتارهای همکاری، اتحاد استراتژیک و پویایی بازار رقابتی مفید است (Orrell, 2020).

مدل سازی بازارهای مالی با تکنیک های کوانتومی

بازارهای مالی رفتارهای پیچیده ای را نشان می دهند که اغلب رویکردهای مدل سازی کلاسیک را به چالش می کشد. تکنیک های کوانتومی، مانند فرآیندهای تصادفی کوانتومی و پیاده روی کوانتومی، راه های جدیدی برای مدل سازی این پویایی ها ارائه می دهند. این تکنیک ها ماهیت احتمالی و مرتبط بازارها را در نظر می گیرند و نمایش دقیق تری از رفتار بازار را به ویژه در شرایط عدم اطمینان یا نوسانات بالا ارائه می دهند (Schaden, 2002).

به عنوان مثال، مدل های کوانتومی می توانند نوسانات سریع و حلقه های بازخورد را که حباب های گمانه زنی و سقوط بازار را مشخص می کنند، بهتر جذب کنند و بینش هایی را در مورد شکل گیری و کاهش بالقوه آنها ارائه دهند (Orrell, 2020).

نتیجه گیری

اقتصاد کوانتومی نشان دهنده تغییر قابل توجهی در نحوه درک و مدل سازی سیستم های اقتصادی است، ارائه یک دیدگاه تازه که فراتر از محدودیت های نظریه های اقتصادی کلاسیک است. با گنجاندن اصول مکانیک کوانتومی مانند عدم قطعیت، قرار گرفتن در



معرض و پیچیدگی اقتصاد کوانتومی چارچوبی با تفاوت‌های ظریف‌تر و پویاتر برای تجزیه و تحلیل پدیده‌های پیچیده اقتصادی، به ویژه در شرایطی که با عدم قطعیت بالا و اتصال مشخص می‌شود، فراهم می‌کند.

ابزارهای ریاضی اقتصاد کوانتومی، از جمله توابع موج، اپراتورها و احتمال کوانتومی، اجازه می‌دهد تا مدل سازی سیستم‌های اقتصادی به عنوان احتمال ذاتی به جای تعیین کننده باشد. این رویکرد نه تنها پیچیدگی‌های دنیای واقعی بازارهای مالی مانند نوسانات، حباب‌های گمانه زنی و سقوط بازار را به تصویر می‌کشد، بلکه نمایش دقیق‌تری از فرآیندهای تصمیم‌گیری را فراهم می‌کند که در آن نتایج تحت تأثیر عوامل متعدد و تعاملی قرار می‌گیرند.

کاربردهای عملی اقتصاد کوانتومی به ویژه امیدوار کننده است. محاسبات کوانتومی با توانایی پردازش مقادیر زیادی از اطلاعات و حل مشکلات پیچیده به طور نمایی سریع‌تر از رایانه‌های کلاسیک، پتانسیل انقلابی در زمینه‌هایی مانند بهینه‌سازی نمونه کارها، مدیریت ریسک و قیمت‌گذاری مشتق شده را دارد. رمزنگاری کوانتومی امنیت بی‌سابقه‌ای در معاملات مالی ارائه می‌دهد و از داده‌های حساس در برابر تهدید رو به رشد ناشی از محاسبات کوانتومی محافظت می‌کند. علاوه بر این، نظریه بازی کوانتومی استراتژی‌های جدید و تعادل را در سناریوهای رقابتی معرفی می‌کند، درک ما از پویایی بازار و تعاملات استراتژیک بین عوامل اقتصادی را افزایش می‌دهد. با ادامه تکامل فناوری‌های کوانتومی، تأثیر اقتصاد کوانتومی بر اقتصاد مدرن احتمالاً گسترش می‌یابد، که به طور بالقوه منجر به ابزارهای مالی جدید، معاملات اقتصادی امن‌تر و مدل‌های پیچیده‌تر برای پیش‌بینی و کاهش خطرات اقتصادی می‌شود. ادغام اصول کوانتومی در اقتصاد همچنین می‌تواند همکاری بین رشته‌ای بیشتری را تقویت کند، زیرا اقتصاددانان، فیزیکدانان و دانشمندان کامپیوتر با هم کار می‌کنند تا نظریه‌ها، مدل‌ها و کاربردهای جدید را توسعه دهند.

با نگاه به آینده، آینده اقتصاد کوانتومی پر از امکانات است. تحقیقات مداوم در این زمینه ممکن است بینش عمیق‌تری را در مورد ماهیت سیستم‌های اقتصادی و ارائه راه حل‌های نوآورانه برای برخی از چالش‌های مهم در امور مالی و اقتصاد امروز کشف کند. همانطور که اقتصاد جهانی به طور فزاینده‌ای پیچیده و به هم متصل می‌شود، رویکرد کوانتومی می‌تواند نه فقط به عنوان یک چارچوب نظری، بلکه به عنوان یک ابزار عملی برای حرکت در عدم قطعیت‌های اقتصاد قرن ۲۱ ضروری باشد.

در نتیجه، اقتصاد کوانتومی چیزی بیش از یک رویکرد جدید به نظریه اقتصادی است؛ این یک تغییر پارادایم است که پتانسیل تغییر اساسی درک ما از سیستم‌های اقتصادی را دارد. اقتصاددانان با پذیرفتن اصول مکانیک کوانتومی می‌توانند مدل‌های دقیق‌تری را

توسعه دهند، ابزارهای مالی موثرتری را طراحی کنند و در نهایت به اقتصاد جهانی مقاومتر و سازگارتر کمک کنند. ادامه اکتشاف و کاربرد اقتصاد کوانتومی در مقابله با پیچیدگی‌های چالش‌های اقتصادی آینده ضروری خواهد بود، و آن را به یک زمینه مطالعه تبدیل می‌کند که هم به موقع و هم بسیار مهم است.

منابع

- Aharonov, Y., Davidovich, L., & Zagury, N. (1993). Quantum random walks. *Physical Review A*, 48(2), 1687.
- Bennett, C. H., & Brassard, G. (1984). Quantum cryptography: Public key distribution and coin tossing. *Proceedings of IEEE International Conference on Computers, Systems and Signal Processing*, 175-179.
- Bohr, N. (1928). The quantum postulate and the recent development of atomic theory. *Nature*, 121(3050), 580-590.
- Dirac, P. A. M. (1930). *The principles of quantum mechanics*. Oxford University Press.
- Deutsch, D. (1999). Quantum theory of probability and decisions. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 455(1988), 3129-3137.
- Eisert, J., Wilkens, M., & Lewenstein, M. (1999). Quantum games and quantum strategies. *Physical Review Letters*, 83(15), 3077.
- Everett, H. (1957). "Relative state" formulation of quantum mechanics. *Reviews of Modern Physics*, 29(3), 454-462.
- Feynman, R. P. (1985). *QED: The strange theory of light and matter*. Princeton University Press.
- Fuchs, C. A., Mermin, N. D., & Schack, R. (2014). An introduction to QBism with an application to the locality of quantum mechanics. *American Journal of Physics*, 82(8), 749-754.
- Haven, E., & Khrennikov, A. Y. (2013). *Quantum social science*. Cambridge University Press.
- Heisenberg, W. (1927). Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik. *Zeitschrift für Physik*, 43(3-4), 172-198.
- Kahneman, D. (2011). *Thinking, fast and slow*. Farrar, Straus and Giroux.
- Mandelbrot, B. B., & Hudson, R. L. (2004). *The (mis)behavior of markets: A fractal view of financial turbulence*. Basic Books.
- Meyer, D. A. (1999). Quantum strategies. *Physical Review Letters*, 82(5), 1052.
- Nielsen, M. A., & Chuang, I. L. (2000). *Quantum computation and quantum information*. Cambridge University Press.
- Orrell, D. (2018). *Quantum economics: The new science of money*. Icon Books.

Orrell, D. (2020). Quantum economics: The new science of money. Icon Books.

Samuelson, P. A., & Nordhaus, W. D. (2009). Economics (19th ed.). McGraw-Hill Education.

Scarani, V., Bechmann-Pasquinucci, H., Cerf, N. J., Dušek, M., Lütkenhaus, N., & Peev, M. (2009). The security of practical quantum key distribution. *Reviews of Modern Physics*, 81(3), 1301-1350.

Schaden, M. (2002). Quantum finance: A quantum approach to stock price fluctuations. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 316(1-4), 511-538.

Schrödinger, E. (1926). An undulatory theory of the mechanics of atoms and molecules. *Physical Review*, 28(6), 1049.

Schrödinger, E. (1935). Discussion of probability relations between separated systems. *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 31, 555-563.

Sornette, D. (2003). *Why stock markets crash: Critical events in complex financial systems*. Princeton University Press.

Tversky, A., & Kahneman, D. (1981). The framing of decisions and the psychology of choice. *Science*, 211(4481), 453-458.

Wootters, W. K., & Zurek, W. H. (1982). A single quantum cannot be cloned. *Nature*, 299(5886), 802-803.

Quantum Economics: An Advanced exploration

Mohammad Khani Dehnavi

Morteza Khani Dehnoi

Abstract

Quantum economics is an emerging interdisciplinary field that integrates the principles of quantum mechanics into the analysis of economic systems. This paper presents an advanced exploration of quantum economics, tracing its historical development from classical economic theories to modern quantum frameworks. This paper deals with the main concepts of quantum economics such as uncertainty, exposure, and complexity, and examines the equivalence between quantum physics and economic processes. The paper also provides various interpretations of quantum economics, including those of Copenhagen, and explains the mathematical foundations of the field, including wave functions, operators, and quantum probability. Practical applications of quantum economics are explored by focusing on advanced technologies such as quantum computing that promise to revolutionize financial modeling and quantum cryptography that offers greater security for financial transactions. In addition, the paper discusses Quantum Game Theory as a tool for understanding complex strategic interactions in economic contexts. This paper summarizes the profound implications of quantum economics for modern economic theory and its potential to advance future advances in the analysis of financial markets, decision-making processes, and global economic relevance.

Keywords: quantum economy, economic uncertainty, quantum computing