Journal of Awareness
Volume / Cilt: 9, Issue/Sayı: 1, 2024, pp.141-148
E-ISSN: 2149-6544
https://journals.gen.tr/joa
https://doi.org/10.26809/joa.2230

Received / Geliş: 12.10.2023
Accepted / Kabul: 22.11.2023

RESEARCH ARTICLE/ARAŞTIRMA MAKALESİ

Kuantum kuramı ve kuantum hesaplama

Quantum theory and quantum computation

Ali Can Günhan

Dr. Öğr. Üyesi, Mersin Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü, Türkiye, e-mail: alicangunhan@mersin.edu.tr

Öz

Kuantum kuramı fiziksel gerçekliği tutarlı bir şekilde tarif eder. Bir gizli değişkenler kuramı onun yerine geçemez. Bu doğrultuda bu çalışmada kuantum oluş için gerekli ölçütler tartışıldı. Burada, gözlenebilirlerin bağlamsallığı hayati önemdedir. Bu bağlamda hesaplama ve bilgi işlemenin kuantum mekaniksel yapılması için bilinen çözüm yolları değerlendirilerek yeni sorun ve yeni çözüm yolları için negatif Wigner fonksiyonu ölçütüne değinildi.

Anahtar kelimeler: Kuantum hesaplama, kuantum bilişim, bağlamsallık, negatif wigner fonksiyonu.

Abstract

Quantum theory describes physical reality in a consistent way. It cannot be replaced by a hidden variables theory. Accordingly, in this study, the criteria for quantumness is discussed. Here the contextuality of the observables is of crucial importance. In this manner, known solutions for quantum mechanical computation and information processing is investigated, and the negative Wigner function criterion is mentioned for new problems and new solutions.

Keywords: Quantum computation, quantum information, contextuality, negative wigner functions

Citation/Atıf: GÜNHAN, A, C. (2024). Kuantum kuramı ve kuantum hesaplama. *Journal of Awareness*. 9(1): 141-148, https://doi.org/10.26809/joa.2230

Corresponding Author/ Sorumlu Yazar:
Ali Can Günhan
E-mail: alicangunhan@mersin.edu.tr

1. GİRİŞ

2023 Ağustos'u itibarı ile bilinen en büyük asal sayı (1 ve kendinden başka 0'dan büyük tamsayı böleni olmayan sıfırdan büyük tamsayı) 10'luk tabanda yazıldığında 24.862.048 (yirmi dört milyon sekiz yüz altmış iki bin kırk sekiz) basamaklı $2^{82.589.933} - 1$ sayısıdır. Bu sayı 2018 Aralık Ayı'nda bulunmuştur. Her yeni asal sayı için, bulan kişilere farklı kuruluşlarca hatırı sayılır miktarlarda para ödülü verilmektedir (https://www.eff.org, 2023). Bilindiği kadarıyla ilk defa İskenderiyeli Öklid *Elemanlar* isimli eserinde (Euclid İ.Ö. 300 – Sertöz 2019) asal sayıların sayısının sonsuz olduğunu ispatlamıştır. Dizinin genel terimi bugüne kadar bulunamamıştır. İyi tanımlı böylesi bir genel terim en az 2400 yıllık bir matematik sorununa çözüm getirmesinin yanında, sayı kuramında, bilgisayar ve kriptoloji bilimleri ile bilişim teknolojileri uygulama alanlarında önemli gelişmelere sebep olacaktır. Doğadaki bazı döngülerin asal sayılarla ifade edilmesini de açıklaması muhtemeldir böyle bir dizinin. Ya da belki de sadece tesadüftür bazı ağustos böceklerinin sadece 12 bazılarının 16 yıl kuluçkada kalıp 13. ve 17. yıllarda birer koro oluşturmaları. Hiçbir uygulama alanında yeniliğe veya gelişmeye sebep olmasına gerek olmaksızın sadece estetik açıdan dahi yeteri kadar önemlidir bir asal sayılar örüntüsü. Asal sayılar dizisi ve elemanları arayışı bir yanda devam ediyorken yararcı[1] davranış bizi verilen bir sayıyı asal çarpanlarına makul sürede ayıracak çözüm yolu[2] arayışına götürür. Böyle bir çözüm yolu 1994 yılında Amerikalı matematikçi Peter W. Shor tarafından yazıldı (Shor 1994): b basamaklı bir tamsayı, b'nin bir polinomu kadar adımda asal çarpanlarına ayrılır. Burada bir not düşmekte fayda var. Bir bilgisayar, herhangi bir fiziksel hesaplama cihazını taklit edebilen bir evrensel hesaplama makinesi olarak ele alınır. Öyle ki, bu taklidi yapacağı süre, hesaplamadaki adımların en fazla bir polinom çarpanı olacak kadar olmalıdır ki, hesap uygulanabilir olsun. Bir kuantum çözüm yolu olan Shor'un çözüm yolu için de bu süre geçerlidir. Bu yol kullanılarak yapılan uygulama ile bugün asal çarpanlarına ayrılabilen sayılar 15 (on beş) ve 21 (yirmi bir). Pek bir işe yarıyormuş gibi görünmüyor! Birkaç on yıl günümüz teknolojisi düşünüldüğünde çok gibi görünse de böylesi bir kuramsal çözümün uygulamaya geçirilebilmesi için çok da fazla sayılmaz. Shor'un çözüm yolunun uygulamaya geçirilmesinin zorluğu bir kuantum çözüm yolu olmasıdır.[3] Kuantum çözüm yolları, üst-üste binme[4], dolaşıklık[5] ve kuantum paralellik gibi klasik karşılığı olmayan kuantum olguları kullanabilmeleriyle klasik çözüm yollarından ayrışırlar. Kuantum çözüm yollarını çalıştıracak hesaplama makineleri, yani kuantum bilgisayarlar çevresel etkenlere karşı oldukça duyarlı olduklarından, bu aygıtları vücuda getirmek kolay olmayacaktır. Ancak, ne kadar zor olursa olsun, 21 sayısını asal çarpanlarına ayırmak gibi, bir kere sonuç alınınca, sonrasına çok da uzak olmayan bir gelecekte tanık olacağımız düşünülmektedir.

Teknolojinin gelişimine bağlı olan uygulamaya geçme kısmındaki zorluklardan başka, cevaplanması gerekli sorular da var. Ki bu araştırmanın aslî amacı bu soruların önemli olan bazılarını mümkün olduğunca farklı disiplinlerden uzmanların ve uzman olmayanların dikkatine sunmak ve küçük de olsa yenilik adına bir katkıda bulunmaktır.

2. KUANTUM BİLGİSAYAR NEDİR?

Klasik hesaplama makinelerinin dayandığı çalışma ilkelerinden farklı ilkelerle çalışan hesaplama makineleridir. Farklılık temelde iki sınıfa ayrılabilir.

2.1. Kuantum Bilgi Kodlama

Birincisi bilgiyi kodlamadadır. Klasik, yani kuantum olmayan, bilgisayarlarda bilgiyi ikili birim sistemi ya '0' ya da '1' olabilen bitlerle kodlarken, kuantum bilgisayarlarda bilgi, kubitlerle (kuantum bit) kodlanır. Kubit, en yalın kuantum sistem olan iki seviyeli bir kuantum sistemdir ve durumu 2 boyutlu Hilbert uzayı[1] $\mathcal{H}^2$'de bir durum vektörü, $|\psi\rangle$, ile temsil edilir;

$$|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle. \quad (1)$$

Burada $\alpha, \beta \in C$ ve $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$'dir. Bir kuantum bit ile bir klasik biti ayıran en önemli özellik, ifade edildikleri bağlaç ile görünür hale gelir; klasikteki 'ya – ya da' yerine kuantumda 'hem – hem de' kullanılır. Yani, bir kuantum bit $|\alpha|^2$ kadar $|1\rangle$ olduğunda eş zamanlı olarak $|\beta|^2$ kadar da $|1\rangle$ olur. α ve β karmaşık sayılarının dört tane gerçel parametresi vardır. Bunlardan bir tanesi 1'e boylandırma ile, bir tanesi de fiziksel olarak anlamlı olmayan toplam evre (faz) çarpanı ile elde edilebilir. Geriye 2 tane gerçel serbest parametre kalır. Bu iki sayı, yarıçapı sabit bir küre yüzeyindeki noktalarla temsil edilebilir. Bu küreye Bloch-Poincaré küresi denir. Geleneksel olarak kuzey kutbu $|0\rangle$ durumunu, güney kutbu $|1\rangle$ durumunu temsil eder. (1) eşitliğinden görüleceği üzere bir kubit -genelde- $|0\rangle$ ve $|1\rangle$ durumlarının bir üst-üste binmesi durumudur. İki kubiti ayrı ayrı iki kuantum sisteme kodlarız. Böyle olduğunda toplam sistemi temsil edeceğimiz durum vektörü, iki türlü ifade edilebilir. İlkinde iki alt-sistemin durum vektörlerinin tensör çarpımı olarak yazılabilir,

$$|\psi_{12}\rangle = |\psi_1\rangle \otimes |\psi_2\rangle \equiv |\psi_1\rangle|\psi_2\rangle = |\psi_1\psi_2\rangle. \tag{2}$$

Diğerinde ise toplam sistem eşitlik (2) şeklinde yazılamayan dolaşık durumdadır (Schrödinger 1935). Örnek olarak

$$|\psi'_{12}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|01\rangle - |10\rangle) \tag{3}$$

durumu verilebilir (Einstein 1935, Bohm 1951). Eşitlik (3)'teki durumda bulunan bir ikili-sistemin alt sistemlerinden birinin üzerinde bir ölçüm yapılıncaya kadar alt sistemlerden hangisinin $|0\rangle$'da hangisinin $|1\rangle$'de olduğu bilgisi sadece bizim tarafımızdan bilinmiyor değildir, böyle bir bilgi 'yok'tur. Böyle bir bilgi ancak ölçüm anında oluşur, ölçüm ile 'var' olur. Kuantum mekaniksel tanımından Doğa'nın uzayda yerel-olmadığını görebilmemizi sağlayan bu özellik 1964 yılında John S. Bell tarafından gösterilmiştir ve şu şekilde ifade edilebilir; ***öngörüleri deneysel sonuçları karşılayan kuantum kuramının yerine herhangi bir yerel gizli değişkenler kuramı geçemez*** (Bell 1964). Kuantum kuramının 'eksikleri'nin olduğu ve tamamlanması gerektiğini düşünenler olagelmiştir (Einstein 1935). Kuramın bir olasılıksal-kuram olmasından kaynaklanan bu 'gerçekçi'[7] bakış açısı şu şekilde özetlenebilir:

Kuramın 1. varsayımı *''bir durum vektörü, temsil ettiği kuantum sistemle ilgili tüm bilgiyi içerir''* dir. Madem (3) durumundaki sistem, ölçüm sonucunda belirli olasılıklarla farklı sonuçları veriyor, o halde (3) durumunun sistemle ilgili içerdiği bilgi tam değil, eksik. Bu eksikliği giderecek birtakım değişkenler olmalı. Şu anda bilmediğimiz için gizli değişkenler diyelim. Bu değişkenler ayrıca yerelliği de sağlamalıdırlar. Şöyle ki; (3) durumundaki bir ikili-sistemi oluşturan alt sistemlerin arasında ne kadar mesafe olduğunun önemi yoktur. İki alt sistem, aralarındaki mesafeden bağımsız, toplam sistemin bileşenleridirler. Dolayısıyla birbirilerinden 'an'lık olarak haberdardırlar. Biri üzerinde yapılan ölçümün, sonuç elde edildiği an, diğerini de etkilemesi bilginin ışıktan daha hızlı -sonsuz hızda- iletildiği anlamına geleceğinden özel görelilik kuramı ile çelişir. Einstein'ın uzaktan-ürkütücü-etki[8] dediği bu etkiyi de ortadan kaldırması gerekiyor gizli değişkenlerin. Dolayısıyla, kuantum kuramının yerine geçmesi beklenen kuram, yerel gizli değişkenler kuramı olarak adlandırılabilir.

Daha sonra bulunacağı umulan, neden veya kimden gizlendikleri hâlâ bir muamma olan bu gizli değişkenleri geçmişte olduğu gibi (Bohm 1951) aramaya devam edenler olacaktır. Bu arayış devam ederken eldeki verilere bakmakta fayda var. Bir kuramı geçerli yapan özelliği, deneysel ve/ya gözlemsel verilerle uyumlu olup olmamasıdır. Kuantum kuramının öngörüleri deneysel sonuçlarla örtüşüyor. Kimse inkâr da etmiyor. Gizli değişkenler arayanları rahatsız eden bir şey, kuantum sistemlerin gerekirci[9] davranmamalarıdır: Bir bilardo topuna koşullar aynı olacak şekilde her vurulduğunda hep aynı yolu izleyecektir, aynı yoldan gitmesi gerekir. Bilardo topunun hangi yoldan gideceğini koşullar belirler. Kuantum olmayan -klasik- dünya gerekircidir, belirlenimcidir. Olmasaydı eğer, yaşam ve uygarlık bildiğimizden daha farklı olurdu. *'Uyum sağlayabilen karmaşıklık, ancak değişim ve seçilimle ortaya çıkabilir'* (Deutsch 1998) şeklinde özetlenebilecek evrim kuramına gelene kadar, canlılık bugün bildiğimiz gibi olmazdı.

Aynı örneği ölçeğimizi küçültüp ele alalım. Bir kuantum bilardo topuna koşullar aynı olacak şekilde her vurulduğunda belirli olasılıkla bir yoldan, belirli olasılıklarla başka yollardan gidiyor. Bu ''belirlenimci olmayış''a bir son vermek gerekmiyor, doğa böyle işliyor. Büyük ölçekte doğa gerekirci davranış sergiliyor diye küçük ölçekte de aynı şekilde davranacağını düşünmek ilk beklenti olabilir. Ancak, doğa, bizlerin beklentilerini karşılamak üzere işleyen bir düzenek değildir. Merak edenler, bu düzeneğin nasıl işlediğini anlayabilmek için gerektiğinde sağduyularından sıyrılabilmelidir. Örnekteki gibi gidilecek yolların olasılıklarını doğru hesaplayan kuantum kuramı, doğumunun ilan edildiği 14 Aralık 1900 tarihinden (Planck 1900) günümüze kadar burnu dahi kanamadan gelmiştir. Diğer rahatsız edici sebep, bilginin sonsuz hızda gitmesi, sadece gizli değişkenler arayanlar için değil herkes için daha özenli olunmasını gerektiren bir uyarı olurdu, eğer özel görelilik kuramına aykırı olsaydı. Ancak bu duruma biraz dikkatli bakıldığında bir sorun olmadığı görünür. Şöyle ki; alt sistemlerinden birinden diğerine 'an'lık olarak iletilen bilgi işlenebilir bir bilgi değildir. Tıpkı bir cismin gölgesinde olduğu gibi, üzerinde değişiklik yapılamaz. Bu da özel görelilik kuramı ile çelişik bir durum olmadığını gösterir.

Kuantum mekaniğinin temel bir taşı olan (Popescu http://www.sandupopescu.com/more Popescu & Rohrlich 1994.) Doğa'nın yerel-olmayışını göstererek gizli değişkenler arayışının beyhude olduğunu gösteren Bell'in savının[10] "bilimin en derin keşfi" olduğu görüşü pek de haksız sayılmaz gibi görünüyor (Stapp 1975). Bu iddiayı kanıtlayan deneyleri yapan öncüler 2022 yılında Fizikte Nobel Ödülü ile payelendirilmişlerdir (Nobel Komitesi 2022, Clauser vd. 1969, Aspect vd. 1982a, Aspect vd. 1982b, Żukuwski vd. 1993, Pan vd. 1998, Bouwmeester vd. 1997, Pan vd. 2003, Max vd. 2012). Aralarında 144 km olan iki kaynak arasında kubit *kuantum tele-nakili*[11] gerçekleşmiştir.

2.2. Kuantum Paralellik

Kuantum hesaplama makinelerini klasik olanlardan ayrıştıran diğer temel fark kuantum paralelliktir. Klasik karşılığı olmayan bu olgu, bir kuantum sistem üzerinde istediğimiz sayıda ölçme işlemini tek seferde yapabiliyor olmamız demektir. Ölçüm yapılacak nicelikleri, yani gözlenebilirleri, istediğimiz gibi sıralayabiliriz. Ancak bu keyfiliğin bir bedeli vardır, belirsizlik. Klasik mekaniğin geçerli olduğu ölçekte yapılan ölçümlerin kesinliği, kuantum mekaniksel sistemlerde her zaman yoktur. Çünkü gözlenebilirlerin hepsi birbirileri ile uyumlu[12] değildirler ve sıra değiştirmeleri durumunda elde edilecek sonuçlar farklı olur.[13] Bu durumları şöyle ifade edebiliriz. $\boldsymbol{G_1}$ ve $\boldsymbol{G_3}$ iki farklı gözlenebilir olsun.

$$[\boldsymbol{G_1},\boldsymbol{G_3}] \equiv \boldsymbol{G_1G_3} - \boldsymbol{G_3G_1}, \tag{4}$$

diye tanımlanan işlem, sistem üzerinde (önce $\boldsymbol{G_3}$ sonra $\boldsymbol{G_1}$ ölçülmesi ile edilecek sonuçların çarpımı) - (önce $\boldsymbol{G_1}$ sonra $\boldsymbol{G_3}$ ölçülmesi ile edilecek sonuçların çarpımı) demektir. Dolayısıyla

$$[\boldsymbol{G_1},\boldsymbol{G_3}]\begin{cases} = \boldsymbol{0}, & \boldsymbol{G_1 ve\ G_3 uyumlu\ ise} \\ \neq \boldsymbol{0}, & \boldsymbol{G_1 ve\ G_3 uyumlu\ degilse} \end{cases} \tag{5}$$

olur. Uyumlu olmayan gözlenebilirleri ölçtüğümüzde elde edeceğimiz sonuçlar en fazla Heisenberg belirsizlik ilişkilerinin müsaade ettiği kadar hassas olabilir (Heisenberg 1925). Bu belirsizlik ilişkilerinin kuantum kuramının kalbinin attığı yer olduğunu ifade edenler vardır (Sakurai & Napolitano 2017:33).

Böylesi nicelikler kuantum sistem üzerinde yapılacak ölçümlerde *bağlamsal* oluşun göstergesidir. Diğer bir deyişle bir niceliğin ölçüm sonucu, birlikte ölçüm yapılabilecek diğer niceliklere bağlı olarak farklılıklar gösterebilir.

Bağlamsallık[14], üç ve daha yüksek boyutlu sistemlerde gözlenebilir (Gleason 1957, Specker 1960, Jauch & Piron 1963, Bell 1966, Kochen & Specker 1967). (Çünkü iki boyutlu kuantum sistemler $(\in \mathcal{H}^2)$ klasik taklidi yapılabilen sistmelerdir (Sakurai & Napolitano 2017:241).) Bu sistemlerde **üç gözlenebilir** , $\boldsymbol{G_1}, \boldsymbol{G_2}$ ve $\boldsymbol{G_3}$ **arasında**

$$[\boldsymbol{G_1},\boldsymbol{G_2}] = \boldsymbol{0},\ \ [\boldsymbol{G_2},\boldsymbol{G_3}] = \boldsymbol{0},\ \ [\boldsymbol{G_1},\boldsymbol{G_3}] \neq \boldsymbol{0} \tag{6}$$

sıra değişme bağıntıları varsa, gözlenebiliri bağlamsaldır. Bağlamsallık, kuantum kuramının en ilginç yönlerini bir araya getirir; gözlenebilirlerin uyumsuzluğu (Bell 1966, Popescu & Rohrlich 1994), **kuantum dolaşıklık** (Schrödinger 1935, Einstein 1935, Bohm 1951) ve **yerel-olmayış** (Bell 1964, Stapp 1975, Bell 2004, Gisin 1996) gibi. Bu yönüyle bağlamsallık, bilgi işleme ve hesaplamanın kuantum mekaniksel olarak yapılabilmesinin sebebidir (Heywood & Redhead 1983, Bechmann & Peres 2000, Aharon & Vaidmann 2008, Spekkens 2008, Svozil 2009, Cabello 2010, Raussendorf 2013, Waegell & Aravind 2013, Frembs vd., 2018, Abramsky vd., 2013).

Kuantum bilgi işlemenin üstünlüğü bir sonraki bölümde ele alınacak.

3. KUANTUM BİLGİSAYARLAR NE İŞE YARAR?

Kuantum bilgisayarlar, hesaplamanın cevap aradığı herhangi bir soruna cevap aramak üzere tasarlanan aygıtlardır. Örneğin, üçüncü tarafın olduğu ortamlarda güvenli iletişim için şifreleme, üçüncü taraf olarak şifre kırma, yapılandırılmamış bir veri-tabanında arama yapma, optimizasyon (Montanaro 2016) gibi sorunlar hesaplama ve bilgi işlemenin konusudur. Akla hemen gelecek sorular, klasik bilgisayarlarla aynı işlere yarıyor ise eğer, neden kuantum bilgisayarlara gerek duyuyoruz? Ve aynı sorunu bir klasik bilgisayarın çözmesi ile bir kuantum bilgisayarın çözmesi arasındaki farklar nedir? Bir sorunun çözümü, genelde, birden fazla işlem gerektirir. Klasik bilgisayarlar çözüme bu işlemleri sırasıyla takip ederek ulaşırlar. Sırasıyla takip etmenin, işlemlerin bazılarının daha hızlı yapılmasını sağlayacağı açıktır. Bunun yanında başka bazı işlemlerin sırasıyla değil, eş zamanlı yapılması, çözüme ulaşmada hız kazandırır. Paralel hesaplama yöntemlerinin dayandığı temel, bu çözüm yollarıdır. Eldeki bir $\boldsymbol{S}$ sorununu $\boldsymbol{n}$ tane alt-soruna ayırabiliyor olalım,

$$\boldsymbol{S} = \boldsymbol{S_1} + \boldsymbol{S_2} + \boldsymbol{S_3} + \boldsymbol{S_4} + \cdots + \boldsymbol{S_n}. \tag{7}$$

K_1 bilgisayarının görevi 1. alt-sorunu çözmek, K_2 bilgisayarının görevi 2. alt-sorunu çözmek, …, K_n bilgisayarının görevi n. alt-sorunu çözmek olsun. Bu bilgisayarlar eş-zamanlı, yani paralel, çalışabilirler. Ancak, çözmekle görevli oldukları alt-sorunu çözerken klasik davranış sergileyecekler, yani sorunun çözümüne giden yolda basamakları sırasıyla takip edeceklerdir. Çünkü bunlar birer klasik hesaplama aygıtlarıdır ve klasik çözüm yolları (algoritmalar) kullanırlar. Sonuçta, $\boldsymbol{S}$ sorununun çözüm süresi $\boldsymbol{n}$ tane görevden en uzun süren tarafından tayin edilir. Tıpkı bir kimyasal tepkimede tepkime hızını en yavaş adımın belirlemesi gibi. Ya da bir arı kovanının yeni yerinin belirlenmesi için keşfe gidenlerden en sonuncunun da geri dönmesinin gerektiği gibi.

Kuantum bilgisayarlar ise bölüm (2)'de açıklandığı gibi kuantum çözüm yollarını temel aldıklarından paralellik doğalarında var. İşlemleri eş zamanlı yapmaları için başka bileşen bilgisayarlara ihtiyaç duymazlar. Bu da onlara bir *kendiliğinden hız* kazandırır. Bazı sorunların çözümüne ulaşmada klasik bilgisayarlar daha hızlı olabilirler. Ancak, çoğunluk sorunların çözümünde kuantum bilgisayarlar daha öndedir. Bazılarında ise bugünkü bütün bilgisayarların bir araya gelmesiyle oluşturulacak bir-klasik-bilgisayarlar kümesinin birlikte çalıştırılmasıyla ulaşılacak sonuca bir kuantum bilgisayar daha kısa sürede ulaşacaktır.

Kuantum çözüm yolları hayati önemde olmalarının yanı sıra klasik olanlardan da ayrılabilmeleri gerekmektedir.

4. HANGİ ÇÖZÜM YOLU BİR KUANTUM ÇÖZÜM YOLUDUR?

Bölümü oluşturan soruyu cevaplamak üzere tersten soralım, ***hangi çözüm yolu bir kuantum çözüm yolu değildir?*** Cevap için gerekli olduğu kadarıyla Wigner fonksiyonundan bahsedeceğiz. Daha fazla ayrıntı için kaynakça yeterli olacaktır. Bir parçacığın konumu x'in ve momentumu p'nin oluşturduğu faz uzayında tanımlı bir fonksiyon $W(x,p)$ olsun. Öyle ki, bu fonksiyonun x eksenine izdüşümü parçacığın momentum olasılık dağılımını, p eksenine izdüşümü parçacığın konum olasılık dağılımını versin (Case 2008). Bu fonksiyon bir klasik parçacık için negatif olamaz (Raussendorf & Briegel 2001, Gross & Eisert 2007). O halde aradığımız cevap kendisini gösterdi; **bütün aşamaları negatif olmayan Wigner fonksiyonları cinsinden ifade edilebilen çözüm yolu bir klasik çözüm yoludur.** Diğer bir deyişle, herhangi bir basamağı negatif Wigner fonksiyonu cinsinden ifade edilen çözüm yolu bir kuantum çözüm yoludur (Mari & Eisert 2012). Kuantum olmaması demek, çözüm yolunun klasik taklidi yapılabilir, yani klasik bilgisayarlarda çalıştırılabilir demektir.

5. SONUÇ VE TARTIŞMA

Kuantum oluş, bağlamsallık ile açıklanabilir. Bu doğrultuda bağlamsallık ölçüsü tanımlamaları yapılmıştır. Bunlardan birkaçı kaynaklarda bulunabilir (Svozil 2012, Kleinmann vd. 2011, Grudka vd. 2014, Abramsky vd. 2017, Kujala & Dzahafarov 2019). Bu çalışmalarda önerilen bağlamsallık ölçülerinden başka, belki daha kullanışlı olabilecek bir bağlamsallık ölçüsü, doğayı kuantum mekaniği penceresinden daha yakından görmemizi sağlayacaktır.

Klasik mekanik nerede işlemez hale gelir de kuantum mekaniği geçerli olur, sorusu yeni bir soru değil. Bu sorunun bir türünü, hangi çözüm yollarının klasik, hangilerinin kuantum olduğunu bilmemizi sağlayan ölçütü, bir önceki bölümde gördük. Klasik ile kuantum ayrımı bu kadar keskin yapılabilen başka bir yapı bugün bilinmiyor. Bu ölçüt bir sonraki aşamada en yalın kuantum çözüm yolu arayışında rehber olacaktır.

NOTLAR

Pragmatik

Harezmi yolu, algoritma

Bilinen ve hemen ulaşılabilecek birkaç tane kuantum ve karma (hibrit) çözüm yolları için uygun bir kaynak (Montanaro 2016).

Süperpozisyon

Entanglement (İng.), Verschränkung (Alm.)

Karmaşık, doğrusal vektör uzayı.

Realist

Spooky-action-at-a-distance (İng.)

Determinist, belirlenimci

Teorem

Teleportation (İng.), uz-aktarım

Geçimli, sıra değişen, Commuting (İng.)

Burada not etmekte fayda var; ölçüm sonucu

denildiğinde bir ortalama değerden bahsediliyor. Ölçüm sonucu, deney yeteri kadar tekrarlandıktan sonra elde edilen sonuçların istatistiksel (sayımbilimsel (Tr.)) yani ağırlıklı bir ortalama değeridir. Bu ortalama değeri veren her sonucun ağırlığı, deney tekrarlandığında o sonucu elde etme olasılığıdır.

Contextuality (İng.)

KAYNAKÇA

ABRAMSKY, S., BARBOSA, R. S., KISHIDA, K., LAL, R., & MANSFIELD, S. (2013). Contextuality, Cohomology and Paradox, *24th EACSL Annual Conference on Computer Science Logic (CSL 2015) (S. Kreutzer, ed.),* vol. 41 of Leibniz International Proceedings in Informatics (LIPIcs), (Dagstuhl, Germany), 211–228, Schloss Dagstuhl–Leibniz-Zentrum fuer Informatik.

ABRAMSKY, S., BARBOSA, R. S. & MANSFIELD, S. (2017). Contextual Fraction as a Measure of Contextuality, *Phys. Rev. Lett.,* 119, 050504.

AHARON, N. & VAIDMAN, L. (2008). Quantum advantages in classically defined tasks, *Phys. Rev. A,* 77, 052310.

ASPECT, A., DALIBARD, J., & ROGER, G. (1982). Experimental Test of Bell's Inequalities Using Time-Varying Analyzers, *Phys. Rev. Lett.,* 49, 1804–1807.

ASPECT, A., GRANGIER, P. & ROGER, G. (1982). Experimental Realization of Einstein-Podolsky-Rosen-Bohm Gedankenexperiment: A New Violation of Bell's Inequalities, *Phys. Rev. Lett.,* 49, 91–94.

BECHMANN-PASQUINUCCI, H. & PERES, A. (2000). Quantum Cryptography with 3-State Systems, *Phys. Rev. Lett.,* 85, 3313–3316.

BELL, J. S. (1964). On the Einstein Podolsky Rosen paradox. *Physics Physique Fizika*, 1, 195–200,

BELL, J. S. (1966). On the Problem of Hidden Variables in Quantum Mechanics, *Rev. Mod. Phys.,* 38, 447–452.

BELL, J. S. & ASPECT, A. (2004). *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics: Collected Papers on Quantum Philosophy.* Cambridge University Press, 2 ed.

BOHM, D. (1951). *Quantum Theory*. Prentice-Hall, 1 ed.

BOUWMEESTER, D., PAN, J.-W., MATTLE, K., EIBL, M., WEINFURTER, H. & ZEILINGER, A. (1997). Experimental quantum teleportation, *Nature,* 390(6660), 575–579.

CABELLO, A. (2010). Proposal for Revealing Quantum Nonlocality via Local Contextuality, *Phys. Rev. Lett.,* 104, 220401.

CASE, W. B. (2008). Wigner functions and Weyl transforms for pedestrians, *American Journal of Physics*, 76, 937–946.

CLAUSER, J. F., HORNE, M. A., SHIMONY, A. & HOLT, R. A. (1969). Proposed Experiment to Test Local Hidden-Variable Theories, *Phys. Rev. Lett.*, 23, 880–884.

DEUTSCH, D. E. (1998). *The Fabric of Reality: The Science of Parallel Universes–and Its Implications.* Penguin Books, illustrated edition ed.

EINSTEIN, A., PODOLSKY, B., & ROSEN, N. (1935). Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?. *Phys. Rev.* 47, 777–780.

Electronic Frontier Foundation (2023) [online]. https://www.eff.org, [Erişim Tarihi: 03.09. 2023]

EUCLID (İ.Ö. 300). Euclid's 'Elements' [online]. https://www.claymath.org/library/historical/euclid/, [Erişim Tarihi: 03.09. 2023]

EUCLID (İ.Ö. 300). Euclid's 'Elements' [online]. https://www.loc.gov/item/2021667076/ , [Erişim Tarihi: 03.09. 2023]

FREMBS, M., ROBERTS, S. & BARTLETT, S. D. (2018). Contextuality as a resource for measurement-based quantum computation beyond qubits, *New Journal of Physics*, 20, 103011.

GISIN, N. (1996). Hidden quantum nonlocality revealed by local filters, *Physics Letters A*, 210, no. 3, 151–156.

GLEASON, A. M. (1957). Measures on the Closed Subspaces of a Hilbert Space, *Journal of Mathematics and Mechanics*, 210(3), 885–893.

GROSS, D. & EISERT, J. (2007). Novel Schemes for Measurement-Based Quantum Computation, *Phys. Rev. Lett.*, 98, 220503.

GRUDKA, A., HORODECKI, K., HORODECKI, M., HORODECKI, P., HORODECKI, R., JOSHI, P., KLOBUS, W. & WOJCIK, A. (2014). Quantifying Contextuality, *Phys. Rev. Lett.*, 112, 120401.

HEISENBERG, W. (1925). **Ü**ber quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen, *Zeitschrift für Physik*, 33(1), 879–893.

HEYWOOD, P. & REDHEAD, M. L. G. (1983). Nonlocality and the Kochen-Specker paradox, *Foundations of Physics*, 13(5), 481–499.

JAUCH, J. M. & PIRON, C. (1963). Can hidden variables be excluded in quantum mechanics?, *Helvetica Physica Acta*, 36, p827–837.

KLEINMANN, M., GÜHNE, O., PORTILLO, J. R., LARSSON, J. Åke & CABELLO, A. (2011). Memory cost of quantum contextuality, *New Journal of Physics*, 13, 113011.

KOCHEN, S. B. & SPECKER, E. P. (1967). The Problem of Hidden Variables in Quantum Mechanics, *Journal of Mathematics and Mechanics*, vol. 17(1), 59–87.

KUJALA, J. V. & DZHAFAROV, E. N. (2019). Measures of contextuality and non-contextuality, *Phil. Trans. R. Soc. A.*, 377, 2019.0149

MA, X.-S., HERBST, T., SCHEIDL, T., WANG, D., KROPATSCHEK, S., NAYLOR, W., WITTMANN, B., MECH, A., KOFLER, J., ANISIMOVA, E., MAKAROV, V., JENNEWEIN, T., URSIN, R., & ZEILINGER, A. (2012). Quantum teleportation over 143 kilometres using active feed-forward, *Nature*, 489 (7415), 269– 273.

MARI, A. & EISERT, J. (2012). Positive Wigner Functions Render Classical Simulation of Quantum Computation Efficient, *Phys. Rev. Lett.*, 109, 230503.

MONTANARO, A. (2016), Quantum algorithms: an overview, *npj Quantum Information*, 2, 15023,

NOBEL KOMİTESİ (2022). '2022 Nobel Fizik Ödülü, "Bell eşitsizliklerinin ihlalini ortaya koymaları ve kuantum bilgi bilimine öncülük etmeleri nedeniyle dolaşık fotonlarla yapılan deneyler için" Alain Aspect, John F. Clauser ve Anton Zeilinger'e ortaklaşa verilmiştir."', https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2022/summary/ .

PAN, J.-W., BOUWMEESTER, D., WEINFURTER, H. & ZEILINGER, A. (1998). Experimental Entanglement Swapping: Entangling Photons That Never Interacted, *Phys. Rev. Lett.*, 80, 3891– 3894.

PAN, J.-W., GASPARONI, S., ASPELMEYER, M., JENNEWEIN, T. & ZEILINGER, A. (2003). Experimental realization of freely propagating teleported qubits, *Nature*, 421(6924), 721–725.

PLANCK, M. (1900). Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung im Normalspectrum. *Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft im Jahre 1900. Zweiter Jahrgang*, 237–245,

POPESCU, S. (2023) Non Locality [online]. http://www.sandupopescu.com/more [Erişim Tarihi: 03.09. 2023]

POPESCU, S. & ROHRLICH, D. (1994). Quantum nonlocality as an axiom, *Foundations of Physics*, 24(3), 379–385.

RAUSSENDORF, R. (2013). Contextuality in measurement-based quantum computation, *Phys. Rev. A*, 88, 022322.

RAUSSENDORF, R. & BRIEGEL, H. J. (2001). A One-Way Quantum Computer, *Phys. Rev. Lett.,* 86, 5188–5191.

SAKURAI, J. J. & NAPOLITANO, J. (2017). *Modern Quantum Mechanics*. Cambridge University Press, 2 ed.

SCHRÖDINGER, E. (1935). Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik, *Naturwissenschaften*, 23, no. 48, 807–812.

SERTÖZ, A.S. (2019) Öklid'in Elemanları: Ciltli. TÜBİTAK Popüler Bilim Kitapları, TÜBİTAK.

SHOR, P.W. (1994). Algorithms for quantum computation: discrete logarithms and factoring. *Proceedings 35th Annual Symposium on Foundations of Computer Science*, 124–134.

SPECKER, E. (1960). Die Logik Nicht Gleichzeitg Entscheidbarer Aussagen, *Dialectica,* 14(2-3), 239–246.

SPEKKENS, R. W. (2008). Negativity and Contextuality are Equivalent Notions of Nonclassicality, *Phys. Rev. Lett.,* 101, 020401.

STAPP, H. P. (1975). Bell's theorem and world process, *Il Nuovo Cimento B* (1971-1996), 29(2), 270–276.

SVOZIL, K. (2009). Three criteria for quantum random-number generators based on beam splitters, *Phys. Rev. A,* 79, 054306.

SVOZIL, K. (2012). How much contextuality?, *Natural Computing,* 11(2), 261–265.

WAEGELL, M., & ARAVIND, P. (2013). GHZ paradoxes based on an even number of qubits., *Physics Letters A*, 377(7), 546–549.

ŻUKOWSKI, M., ZEILINGER, A., HORNE, M. A. & EKERT, A. K., (1993). 'Event-ready-detectors' Bell experiment via entanglement swapping, *Phys. Rev. Lett.*, 71, 4287–4290.