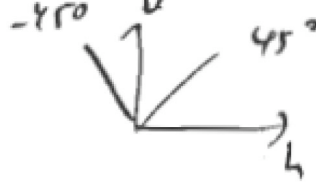


Foton Kutuplanma durumlarının Dirac yazılımı

Yatay Kutuplanmış bir foton $|h\rangle$ ve düşey kutuplanmış bir foton ise $|v\rangle$ ile verilmiştir.



Şekil I: Foton kutuplanma bazları $|h\rangle, |v\rangle$ ve $|+45^\circ\rangle, |-45^\circ\rangle$ 'in tanımı.

$|+45^\circ\rangle$ boyunca kutuplanmış bir foton şu durumda bulunur.

$$|+45^\circ\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|h\rangle + |v\rangle). \quad (24-1)$$

Sağ ve sol çembersel kutuplanmış fotonlar şu durumlarla betimlenmiştir.

$$|R\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|h\rangle + i|v\rangle) \quad (24-2)$$

$$|L\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|h\rangle - i|v\rangle) \quad (24-3)$$

θ açısıyla kutuplanmış bir foton

$$|\theta\rangle = \cos \theta |h\rangle + \sin \theta |v\rangle. \quad (24-4)$$

ile verilir.

Düşey kutuplanmış bir fotonun θ açısındaki bir kutuplayıcıdan geçme olasılığının genliği şu izdüşüm ile verilmiştir.

$$\langle \theta | v \rangle = (\cos \theta \langle h | + \sin \theta \langle v |) \cdot |v\rangle = \sin \theta \langle v | v \rangle = \sin \theta. \quad (24-5)$$

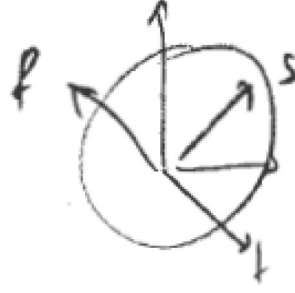
olasılık $\sin^2 \theta$ vs. ile verilmiştir.

Kırılım indisinin kutuplanma yönüne bağlı olması halindeki malzemeyi kullanarak farklı kutuplanma durumları birbirlerine dönüştürülebilir.

• $\frac{\lambda}{4}$ levha: bir eksen (“yavaş” eksen) boyunca toplanmış fazın diğer (hızlı) ekseninden $\frac{\pi}{2}$ kadar daha az olduğu nesnedir. Eğer yavaş ve hızlı eksenler $\pm 45^\circ$ de yönlenmiş iseler, bu takdirde

$$|h\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|45^\circ\rangle + |-45^\circ\rangle) \rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}}(|45^\circ\rangle + e^{i\frac{\pi}{2}}|-45^\circ\rangle) = |R\rangle \quad (24-6)$$

$$|v\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|45^\circ\rangle - |-45^\circ\rangle) \rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}}(|45^\circ\rangle + e^{-i\frac{\pi}{2}}|-45^\circ\rangle) = |L\rangle \quad (24-7)$$



Şekil II: Bir $\lambda/4$ levhada hızlı veya yavaş eksen.

- $\frac{\lambda}{2}$ levha: yavaş ve hızlı eksenler boyunca toplanmış fazın π kadar farklı olduğu nesnedir. Bir $\frac{\lambda}{2}$ levhası θ açısında h 'yi 2θ açısında doğrusal kutuplanmış ışığa dönüştürür.

Gizlenmiş-değişken kuramları ve KM'nin standard yorumunda belirsizlik kavramı

KM'nin standard yorumunda, ölçülür niceliklerin bazı bileşimleri (birbiriyle sıra değiştirmeyenler) “eş zamanlı öngörülemez”ler, yani bir konum ve momentum ölçümünün her ikisinin sonucunu belirgin olarak öngöremeyiz. Bu standard yorumun has bir özelliği olup, ölçüm aletinden ileri gelen bir durumların vektör uzayı yapısından ileri gelen bir özelliktir.

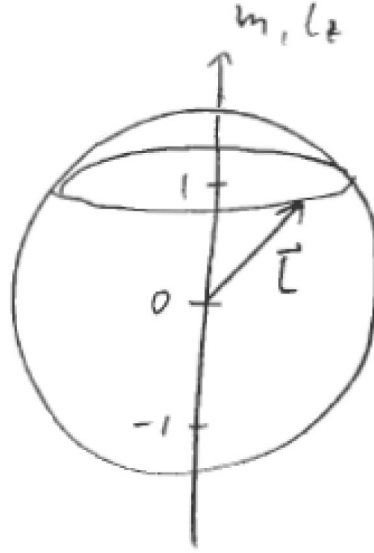
Bunun aksine, bir “gizlenmiş-değişkenler” kuramı bu geliş güzellüğün sistemin tamamını bilmediğimizden dolayı ortaya çıktığı önerilebilir (sistem hakkında biraz bilgi mevcut olup, bu dalga fonksiyonunda bulundurulmaz, ancak bu bilgi ilke olarak mevcuttur.) bu klasik istatistik mekanikte karşılaştığımız benzer bir keyfiliğe karşı gelir. Gizlenmiş-değişkenler kuramlarına göre, kuantum mekaniksel betimleme böylece fiziksel gerçekliğin eksik bir temsildir. Gelişi güzellik böylece fiziksel gerçeğin kalıtsal bir özelliği değil, ancak gerçeğin KM betimlemesinden ortaya çıkar.

Bu klasik istatistik mekaniğe benzer olup, burada 10^{23} değişkene giriş yapamama ve bunları takip edememekten dolayı biz ortalama değerlere başvururuz. Bu takdirde, bu ortalama değerler etrafındaki sapmalar doğal olarak bizim mikroskopik dinamik bilgimizin eksikliğinden ortaya çıkar.

Onlarca yıllar boyunca, gizlenmiş-değişkenler kuramlarının öngörülerinin, sadece deneysel olsalar bile, KM'nin standard yorumundan ayırdedilmediği inancı yaygındır. John Bell basit bir durumla karşılaştı ki burada öngörüler farklı olmakta ve deneyler bu iki görüş arasında karar verebilmektedir.

Örnek: açısal momentum ve belirsizlik

Standart bir durumda ($m = 1$), $l = 1$ olan bir sistemi ele alalım. KM'nin yorumuna göre,



Şekil III: Manyetik ve z-yönü açısal momentum

bu durumda, L_x ve L_y bileşenleri (ve böylece $\mathbf{L}$ 'nin yönü) “bilinemez” veya “öngörülemez” anlamında belirsiz oldukları ve sıra değişen ($\mathbf{L}$, L_z) işlemcilerinin kuantum sayılarının belirlenmesi bize sistem hakkında tüm bilinmesi mümkün olanların:

l , m aynı kuantum sayılı iki sistem, bunlarda örneğin bir L_x ölçümü farklı sonuçlar ortaya çıkarsa bile, özdeşirler. Buradaki belirsizlik kalıtsal olup, bu sistemin hazırlanmasındaki “tamlik”tan bağımsızdır.

İstatistik mekanik veya klasik kaotik sistemlerde farklı türde bir belirsizlik gözükür. Başlangıç hazırlığındaki küçük bir ϵ belirsizliği zamanla üssel olarak büyüyen bir belirsizliğe yol açar ki çok kısa bir zaman sonra sistemin durumu öngörülemez hale gelir:

Farklı ölçüm sonuçları veren iki sistem özdeş olarak hazırlanmamıştı, tam hazırlık parametrelerini bilmiş olsaydık, ölçüm sonucunu öngörebilirdik ve yeterince özdeş hazırlanmış sistemler bazı deneylere tabi tutulduklarında aynı sonuçları ortaya çıkarabilirlerdi.

Aralarında Einstein'ında bulunduğu bazı fizikçiler, esas olarak filozofik temellere dayanan, belirsizliğin **KM**'de aynı türde olduklarına inanmışlardı:

Ölçüm yapılmadan **önce** ölçülecek olan L_x açısal momentum bileşenine “fiziksel gerçek”liği atfetmek olasıdır. Bu “yerel gerçeklik” görüşüne göre, eğer iki sistem aynı $|l, m\rangle$ durumunda hazırlanmış ise, L_x ölçüldüğünde farklı sonuçlar verirler ki bunun sebebi bunların gerçekten özdeş olarak hazırlanmadıklarıdır.

Yerel gerçekli gizlenmiş kuramlar, **KM**’de bulundurulmayan bir “gizlenmiş-değişken” var olduğunu kabul ederler ve bu açısal momentumun L_x bileşenini belirler. Bu gizli-değişkenin değerini bilmiş olsaydık, L_x ’i öngörebilirdik. Bu görüşe göre, **KM** eksik sayılır ve sistemin durumunu tam olarak belirleyemez ve aynen istatistik mekanikte olduğu gibi bir nevi “ortalama kuram” gibidir. Bu sorun aşağıdaki bölümün ele alınması halinde dahada belirginleşir:

İki parçacığın dolaşık durumları

İki parçacıklı bir sistemde, **KM** her bir parçacığın ölçümünün belirsiz bir sonuç ortaya çıkaracağı dolaşık durumları hazırlamamıza izin verir, ancak burada iki ölçümün sonuçları bağıdaştır. Basit bir örnek olarak, iki fotonun aşağıdaki kutuplanma durumlarını ele alalım:

$$|\text{Bell}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|h\rangle_A |v\rangle_B - |v\rangle_A |h\rangle_B) \quad (24-8)$$

Bu durumu bir Bell durumu olarak adlandırırız. Bell, irlandalı bir fizikçi olup, ilk kez gizlenmiş-değişken kuramları ve **KM**’nin standart yorumunun eşdeğer olmadığını ortaya koymuştur. Burada A , B iki fotonu etiketler. İki parçacığın bir durumu birbirine **dolaşmıştır** diye tanımlanmıştır (bu ifade Schrödinger tarafından icat edilmiştir, Almanca: ‘Verschränkung’) ki eğer hiçbir bazın mevcut olmaması halinde ilgili durum $|\dots\rangle_A |\dots\rangle_B$ çarpım durumu olarak yazılabilir. Fotonun bu iki durumu, eğer A şahsı (Alice) kendi fotonunu yatay kutuplanmış olarak ölçerse, bu takdirde B şahsı (Bob) kendi fotonunu düşey olarak ölçebilir, ve bunun terside olabilir, bağıdaştır denilir. Alice’nin kendi ölçümüne dayanarak, sonucu tamamen belirsizdir, Alice Bob’un ölçümünün sonucunu öngörebilir. Bununla beraber, durum klasik bir sistemden daha fazla bağıdaştır, örneğin, Alice ve Bob arasında dağıtılmış bir mavi birde kırmızı top olsun, ancak hangi topun kimde olduğunu bilmiyoruz. Bunu anlamak için $|+45^\circ\rangle$ bazında Bell durumunu yazalım.

$$|h\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|+45^\circ\rangle + |-45^\circ\rangle) = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\nearrow\rangle + |\nwarrow\rangle) \quad (24-9)$$

$$|v\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|+45^\circ\rangle - |-45^\circ\rangle) = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\nearrow\rangle - |\nwarrow\rangle) \quad (24-10)$$

olduğundan,

$$|\text{Bell}\rangle = \{|h\rangle_A |v\rangle_B - |v\rangle_A |h\rangle_B\} \quad (24-11)$$

$$= \frac{1}{2\sqrt{2}} \left\{ (|\nearrow\rangle_A + |\nwarrow\rangle_A) (|\nearrow\rangle_B + |\nwarrow\rangle_B) - (|\nearrow\rangle_A - |\nwarrow\rangle_A) (|\nearrow\rangle_B + |\nwarrow\rangle_B) \right\} \quad (24-12)$$

$$= \frac{1}{2\sqrt{2}} \left\{ 2|\nwarrow\rangle_A |\nearrow\rangle_B - 2|\nearrow\rangle_A |\nwarrow\rangle_B \right\} \quad (24-13)$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2}} \left\{ |-45^\circ\rangle_A |+45^\circ\rangle_B - |+45^\circ\rangle_A |-45^\circ\rangle_B \right\} \quad (24-14)$$

yazılır.

İki parçacığın durumları $\pm 45^\circ$ bazında da dik olarak kutuplanmıştır! Gerçekten, bunların herhangi bazda dik oldukları gösterilebilir. Bu, eğer Alice kendi fotonunu $\pm 45^\circ$ bazında ölçmeyi seçerse, Bob'un o bazdaki ölçümünü öngörebilir.

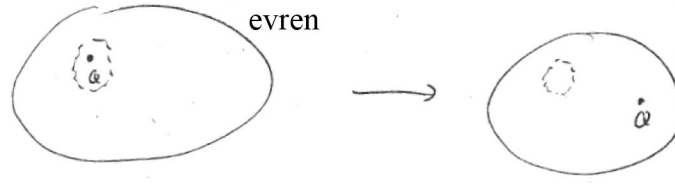
Not. Alice'in bir $|h\rangle$ -kutuplanmış fotonunu ölçmesinden hemen sonra, Bob'un fotonunun durumu $|v\rangle$ olurken, Alice'in $|45^\circ\rangle$ bazındaki ölçümünden hemen sonra, örneğin $|+45^\circ\rangle$ sonucu olsun, Bob'un foton durumu, kendisi ışık yılları kadar uzakta olsa bile, $|-45^\circ\rangle$ olacaktır.

Alice'in bu gerçeği kullanamayıp, bilgiyi ışık hızından daha hızlı iletemeyeceğine göre (eğer Bob, Alice ile iletişim yapamazsa, herhangi bazda ölçümlerinin olasılıkları $\frac{1}{2}$ olup, hiçbir bilgi elde edemez) bu bizi güvenilmez bir zemine yaklaştırır: Alice uzaktan yapılmış acil bir ölçümü oluşturabilirmi, yani **KM** yerel değildir? Tüm bunlardan sonra, Bob Alice'den hemen sonra ölçüm yapabilir (başlangıçta kendi saatlerini ayarlayabilirlerdi) her ikiside $|h\rangle, |v\rangle$ veya $|+45^\circ\rangle$ in birinde keyfi ölçüm yapabilirler ve daha sonra notlarını karşılaştırırlarsa, daha sonra aynı bazda ölçüm yapmış olduklarını bulacaklardır ki, Bob, Alice'ninkinden zıt bir kutuplanmaya sahip olmuştur. Yerel kuramlar fizikçilerce çok saygındır ve yerellik kavramından kolayca vazgeçemezler.

Örnek: Global korunum yasalarına karşın yerellik

Global yük korunum yasası

“Evrendeki toplam yük korunmuştur.” Bu tür korunum kuralları tüm pratik amaçlar için faydasızdır (değiştirilemez).



Şekil IV: Yerel bir korunum yasası geçerli ise, bir hacimden ayrılan yük bunun kapalı yüzeyinden geçmek zorundadır. Global korunum yasaları, burada yüzeyden geçmeden bir hacmi terkedebilir ve evrende başka bir yerde bulunması, faydasızdır.

Yerel yük korunum kuralı

Eğer yük bir hacimden kaybolursa, yüzeyden komşu bir hacme doğru akması zorundadır. Yerel yük korunumunu betimleyen süreklilik denkleminin iki ayrı şekli şöyle yazılır:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{j} = 0 \quad \rightarrow \text{diferansiyel şekli} \quad (24-15)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int \rho dV + \int \mathbf{j} \cdot d\mathbf{A} = 0 \quad \rightarrow \text{integral şekli} \quad (24-16)$$



Şekil V: Bir A yüzeyi ile sınırlı bir hacimdeki yük

Bell'in iddiası ve eşitsizliği

Alice ve Bob'un ölçümlerinin sonuçlarını tam olarak belirleyen yerel bir gizlenmiş parametre varsa, Alice'nin ölçümleri için değerleri $A(\lambda, \hat{e}_A) = \pm 1$ ve Bob'un ölçümleri içinse $B(\lambda, \hat{e}_B) = \pm 1$ olan bir $A(\lambda, \hat{e})$ fonksiyonu olmalıdır. Burada $\hat{e}_A$, Alice (Bob)'un ölçüm yapacakları yönü belirler (kendileri kutuplayıcılarını kurarlar) ve Alice'nin (Bob'un) fonksiyon değerini foton kutuplayıcıdan geçerse +1 ve geçemezse -1 olarak adlandırırız.

Buradaki esas nokta, yerel gizlenmiş-değişkenler kuramının Bob'un sonuç fonksiyonunun, Alice'in kendi kutuplayıcısının kurulum yönü veyahut hangi sonucu ölçtüğüne bağlı olmasıdır. Bağdaşıklık fonksiyonu $E(\hat{e}_A, \hat{e}_B)$ yi, Alice ve Bob'un sonuç fonksiyonlarının çarpımı olarak tanımlarız.

λ değişkeni için $P(\lambda)$ dağılım fonksiyonu $P(\lambda) \geq 0$, $\int d\lambda P(\lambda) = 1$ olmak üzere gizlenmiş-değişken kuramı için

$$E(\hat{e}_A, \hat{e}_B) = \int P(\lambda) A(\lambda, \hat{e}_A) B(\lambda, \hat{e}_B) \quad (24-17)$$

yazabiliriz.

Not. $P(\lambda)$, Alice ve Bob tarafından seçilen $\hat{e}_A, \hat{e}_B$ analiz açılarına bağlı değildir: Foton çifti, Alice ve Bob'un kendi kutuplayıcılarını kurmaya karar vermeden önce hazırlanabilirler.

Bell Kuramı

Yerel bir gizlenmiş-değişken kuramında

$$S = E(\hat{e}_A, \hat{e}_B) + E(\hat{e}'_A, \hat{e}'_B) + E(\hat{e}_A, \hat{e}'_B) - E(\hat{e}'_A, \hat{e}_B) \quad (24-18)$$

niceliği herhangi ölçüm açıları $\hat{e}_A, \hat{e}'_A, \hat{e}_B, \hat{e}'_B$

$$|S| \leq 2. \quad (24-19)$$

eşitsizliğini sağlar.

Bu eşitsizlik **KM**'nin öngörülleri tarafından ihlal edilebilir.

İspat. Gizlenmiş-değişkenler kuramları için $S = \int d\lambda P(\lambda) S(\lambda)$ olacak şekilde

$$S(\lambda) = A(\lambda, \hat{e}_A)B(\lambda, \hat{e}_B) + A(\lambda, \hat{e}'_A)B(\lambda, \hat{e}_B) + A(\lambda, \hat{e}_A)B(\lambda, \hat{e}'_B) - A(\lambda, \hat{e}'_A)B(\lambda, \hat{e}_B) \quad (24-20)$$

bağıntısını tanımlayalım. $S(\lambda)$ aynı zamanda

$$S(\lambda) = A(\lambda, \hat{e}_A)[B(\lambda, \hat{e}_B) + B(\lambda, \hat{e}'_B)] + A(\lambda, \hat{e}'_A)[B(\lambda, \hat{e}'_B) - B(\lambda, \hat{e}_B)] \quad (24-21)$$

olarak yazılabilir.

Bob'un sonuç fonksiyonu daima $B = +1$ veya $B = -1$ dir veya ilki veyahut ikinci terim daima ortadan kaybolur. Sonuç olarak,

$$S = \int d\lambda P(\lambda) S(\lambda) = \int d\lambda P(\lambda) 2A(\lambda, \hat{e}'_A). \quad (24-22)$$

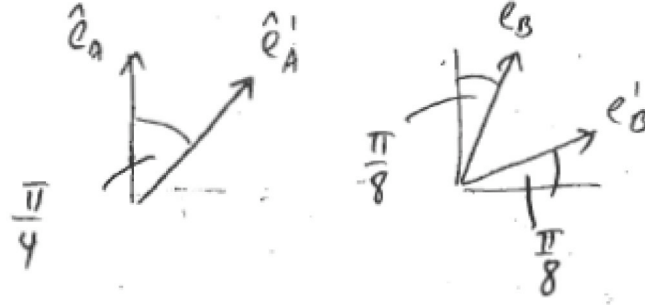
yazılır.

A sadece ± 1 değerini alacağından, $-2 \leq S \leq 2$ olur, böylece gizlenmiş-değişkenler kuramlarında $|S| \leq 2$ olur.

KM'de Bell durumu ve kutuplayıcı açıları ele alalım.

$$|\text{Bell}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \left\{ |h\rangle_A |\nu\rangle_B - |\nu\rangle_A |h\rangle_B \right\} \quad (24-23)$$

Bağdaşıklık fonksiyonu için **KM**'nin öngörüsü nedir? Alice'nin $\hat{e}_A$ boyunca ölçümünü ele alalım:



(a) Alice'nin kutuplayıcı açısı (b) Bob'un kutuplayıcı açısı

Şekil VI: Kutuplayıcı açılar

Alice kendi kutuplanmasını $\hat{e}_A$ boyunca ($\frac{1}{2}$ olasılıkla) ölçerse, kendi fotonunun ν kutuplanmış olmasına karşı gelir ve kendi sonuç fonksiyonunun $A = \pm 1$ olmasına karşın, Alice, Bell durumu

$$|\text{Bell}\rangle \rightarrow -\frac{1}{\sqrt{2}}|\nu\rangle_A|h\rangle_B \quad (24-24)$$

bağıntısına izdüşürür.

Sonuç olarak, Bob yatay kutuplanmış bir fotona sahip olur ve ölçüm eksenini $\hat{e}_B$ olacak şekilde seçerse, Bob bu eksen boyunca ($B = 1$) bir foton bulur ki bunun olasılığı $\cos^2 \frac{3\pi}{8} = \sin^2 \frac{\pi}{8}$ olur. Eğer, Bob bunun yerine $\hat{e}_B$ seçerse, olasılığı $\cos^2 \frac{\pi}{8}$ vs. olacak şekilde $B = 1$ bulacaktır. Genel olarak, aynı eksene bağlı olarak Alice'nin kutuplayıcısının α açısını $\alpha_\perp = \alpha + \frac{\pi}{2}$, $\beta_\perp = \beta + \frac{\pi}{2}$ yazılımı ile şunları yazabiliriz:

$$|h\rangle_A = \cos \alpha |\hat{e}_\alpha\rangle_A + \sin \alpha |\hat{e}_{\alpha_\perp}\rangle_A \quad (24-25)$$

$$|\nu\rangle_A = -\sin \alpha |\hat{e}_\alpha\rangle_A + \cos \alpha |\hat{e}_{\alpha_\perp}\rangle_A \quad (24-26)$$

$$|h\rangle_B = \cos \beta |\hat{e}_\beta\rangle_B + \sin \beta |\hat{e}_{\beta_\perp}\rangle_B \quad (24-27)$$

$$|\nu\rangle_B = -\sin \beta |\hat{e}_\beta\rangle_B + \cos \beta |\hat{e}_{\beta_\perp}\rangle_B \quad (24-28)$$

Bu kutuplaşma durumları cinsinden, Bell durumu şöyle yazılabilir (bunu Bell durumunun tanımında yerine yazalım)

$$|\text{Bell}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|h\rangle_A|\nu\rangle_B - |\nu\rangle_A|h\rangle_B):$$

$$\begin{aligned}
|\text{Bell}\rangle = & \frac{1}{\sqrt{2}} \left\{ (-\cos\alpha \sin\beta + \sin\alpha \cos\beta) |\hat{e}_\alpha\rangle_A |\hat{e}_\beta\rangle_B \right. \\
& + (-\sin\alpha \sin\beta - \cos\alpha \cos\beta) |\hat{e}_{\alpha_\perp}\rangle_A |\hat{e}_\beta\rangle_B \\
& + (\cos\alpha \cos\beta + \sin\alpha \sin\beta) |\hat{e}_\alpha\rangle_A |\hat{e}_{\beta_\perp}\rangle_B \\
& \left. + (\sin\alpha \cos\beta - \cos\alpha \sin\beta) |\hat{e}_{\alpha_\perp}\rangle_A |\hat{e}_{\beta_\perp}\rangle_B \right\} \quad (24-29)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
= & \frac{1}{\sqrt{2}} \left\{ \sin(\alpha - \beta) |\hat{e}_\alpha\rangle_A |\hat{e}_\beta\rangle_B - \cos(\alpha - \beta) |\hat{e}_{\alpha_\perp}\rangle_A |\hat{e}_\beta\rangle_B \right. \\
& \left. + \cos(\alpha - \beta) |\hat{e}_\alpha\rangle_A |\hat{e}_{\beta_\perp}\rangle_B - \sin(\alpha - \beta) |\hat{e}_{\alpha_\perp}\rangle_A |\hat{e}_{\beta_\perp}\rangle_B \right\} \quad (24-30)
\end{aligned}$$

$\hat{e}_\alpha$ ($\hat{e}_\beta$), sonuç fonksiyonu $A = 1$ ($B = 1$) ve $\hat{e}_{\alpha_\perp}$ ($\hat{e}_{\beta_\perp}$) ise $A = -1$ ($B = -1$) ile ilgili olduklarından, Bell durumu bağdaşıklık fonksiyonu için

$$\begin{aligned}
E(\hat{e}_A, \hat{e}_B) &= \frac{1}{2} \sin^2(\alpha - \beta)(+1) \cdot (+1) \\
&+ \frac{1}{2} \cos^2(\alpha - \beta)(-1) \cdot (+1) \\
&+ \frac{1}{2} \cos^2(\alpha - \beta)(+1) \cdot (-1) \\
&+ \frac{1}{2} \sin^2(\alpha - \beta)(-1) \cdot (-1) \\
&= \frac{1}{2} [\sin^2(\alpha - \beta) - \cos^2(\alpha - \beta)] \\
&= -\cos(2\alpha - 2\beta) \quad (24-31)
\end{aligned}$$

ortaya çıkarır.

Sonuç olarak, Bell parametresi

$$S = E(\hat{e}_A, \hat{e}_B) + E(\hat{e}'_A, \hat{e}'_B) + E(\hat{e}'_A, \hat{e}_B) - E(\hat{e}_A, \hat{e}'_B) \quad (24-32)$$

$$= -\cos(2\alpha - 2\beta) - \cos(2\alpha' - 2\beta') - \cos(2\alpha' - 2\beta) + \cos(2\alpha - 2\beta') \quad (24-33)$$

olur.

Önerilmiş açıların seçimi için (s. XXIV-8).

$$S = -\cos\left(\pi - \frac{3\pi}{4}\right) - \cos\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{4}\right) - \cos\left(\frac{\pi}{4} - \frac{3\pi}{4}\right) + \cos\left(\pi - \frac{\pi}{4}\right) \quad (24-34)$$

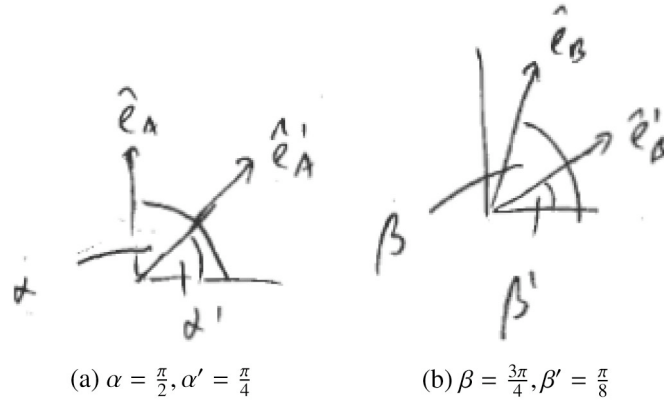
$$= -\cos\left(\frac{\pi}{4}\right) - \cos\left(\frac{\pi}{4}\right) - \cos\left(-\frac{\pi}{4}\right) + \cos\left(\frac{3\pi}{4}\right) \quad (24-35)$$

$$= -3\frac{1}{2}\sqrt{2} - \frac{1}{2}\sqrt{2} \quad (24-36)$$

$$= -2\sqrt{2} \quad (24-37)$$

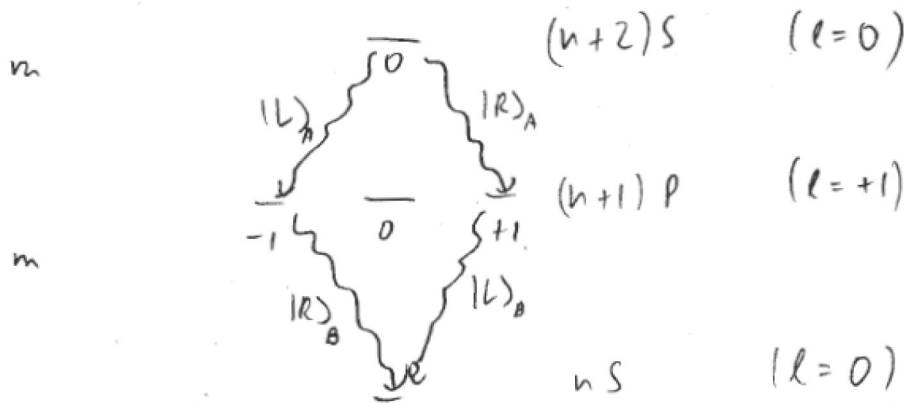
$$\leq -2 \quad (24-38)$$

bulunur.



Şekil VII: Kutuplayıcı açıları

Böylece **KM**, Bell eşitsizliğini ihlal eder. Gizlenmiş-değişkenler kuramlarıyla farklı öngörüler ($|S| \leq 2$ daima) ve **KM**'de ($|S| > 2$ olasıdır, bununla beraber, birisi **KM**'de $|S| \leq 2\sqrt{2}$) olduğunu gösterebilir ki şayet birisi bir dolaşık fotonlar kaynağına sahipse. Bu tür kaynaklar vardır, yani, çift uyarılmış bir atom taban durumuna iki farklı yolla bozunarak, dolaşık foton çiftleri yayabilir. Böyle bir şelelede A ve B fotonları daima zıt kutuplanmalıdır,



Şekil VIII: Bir atomdaki bir ikinci uyarılmış durumdan iki olası bozunma yoluyla yapılan bozunma yolları dolaşık fotonlar üretebilir.

ancak bunlardan herbiri sol veya sağ çembersel kutuplanmış olmalıdır. Bu ele aldığımız biri gibi, bir Bell durumuna karşı gelir. Yapılan deneyler $|S| \leq 2$ gizli-değişkenler öngörüsünü, 20 standart sapmaya kadar, ihlal edebilirler ancak bunlar **KM**'le tam uyuşma halindedir.

Bu ne demektir?

Alice'nin seçtiği ölçüm yönü ve sonucu Bob'un ölçüm sonucunu 'etkiler' ve eğer Bob fotonuna sahip olur olmaz Bob'un ölçüm sonucunun ötesinde, fotonun özellikleri sabitlenir. Bu Bob'un ölçümü, Alice'nin ölçüm ışık konisinin dışında kalsa bile geçerlidir. Dolaşıklık ışık hızından daha büyük iletişim için kullanılamaz, ancak o kuantum kriptografisinde yani **KM**'in kuramlarıyla korunmuş kriptografide kullanılabilir.