

甲南大学 総合研究所報

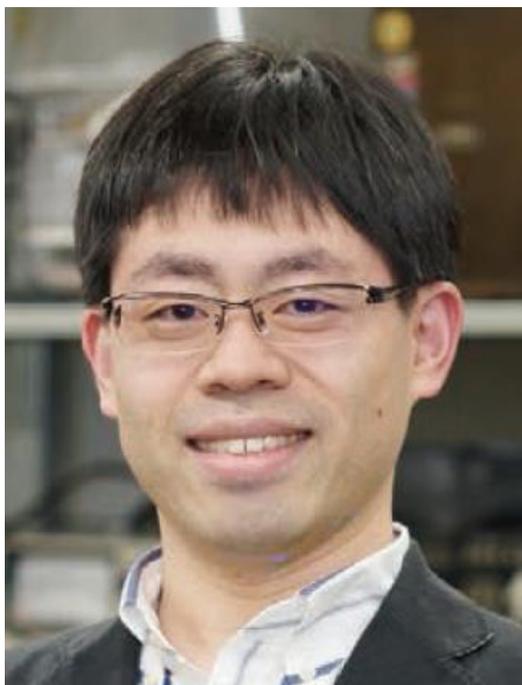
第 79 回 総合研究所公開講演会 (オンライン)

「甲南の教員が解説する Nobel Prize2022」

～ノーベル物理学賞～

講 師 高吉 慎太郎 (甲南大学 理工学部准教授)

2022 年 12 月 6 日 (火) 12 : 20～12 : 50 (Zoom 配信)



令和4年12月6日

甲南大学理工学部准教授 高吉 慎太郎

【司会】 それでは時間になりましたので、第21回甲南の教員が解説するノーベルプライズ2022ということで、今回、ノーベル物理学賞ということで、高吉先生に解説をお願いしたいと思います。詳しい中身は今日、即やっていただけと思うのですが。

実は高吉先生、去年もやっていただいてですね。非常に広い分野にわたって研究、活躍されているということが、これでよくわかると思いますが、今日は「量子論の発展、基礎理論から応用技術」ということで、よろしくをお願いいたします。

【高吉】 それでは、2022年のノーベル物理学賞の解説をしたいと思いますが、「量子論の発展、基礎理論から技術応用へ」というタイトルをつけさせていただきました。今日お話する内容は、もちろん基礎物理学の量子論の原理という非常に基礎的なところなのですが、それが、実は技術応用、次世代の技術の応用に、非常に深く結びついているということをお話しできればなというふうに思います。

まず、今年のノーベル物理学賞ですが、3氏に贈られました。左からアラン・アスペさん、ジョン・F・クラウザーさん、そして、アントン・ツァイリingerさんという3氏に贈られまして、贈られた理由は「ベル不等式の破れを確立し、量子情報科学の先駆けとなった光子エンタングル実験に対して」と書かれています。なので、とりあえず、これがテーマで、これを理解しないとイケないので、今日解説することは、まず量子論ですね。

量子論というのは、どういうものか、それでエンタングルというのが何か。特に光の粒子ですね。光子のエンタングルというのが何か、それでベル不等式の破れというのが何か、ということの説明していかなければならないということになるわけです。

まず、量子論を端的に言い表した標語として、よく使われるものが、粒子と波動の二重性という単語です。皆さん、日常生活をしていて、粒であるか、波であるか。「これ、全然違うものじゃないか」と思うかもしれないのですが、例えば「スリット」と、よく言いますが、2つの小さい穴の開いた壁を用意して、ここから粒子が、いっぱい飛んでくるというようなことを考えますと、普通、粒子は直進しかできませんから、穴を通過して、こちら辺と、こちら辺に、いっぱい粒の痕ができる。つまり粒が、ここに到着するわけですね。

ところが、波動の場合は、こういうスリットに向けて、ここから波が発生していると考えたと、こういうふうに広がりながら進みまして、この穴を通過しますと、また、この穴を中心として、ここから広がりながらというわけで、このスクリーンに到着する頃には、この2つの穴から来た波同士が強め合うところ、弱め合うところが存在しますので、光の場合ですと、例えば、明るい暗い、明るい暗いという、明暗の縞ができるというふうになるわけです。このような現象は「干渉」と呼ばれていますが、光は干渉の他にも回折、物があっても、その後ろに回り込めるという性質があり、光だと、よく分からないかもしれませんが、音だと回り込めるということが、よく分かりますね。障害物があっても、音が聞こえます。あるいは屈折ですね。違う屈折率のもの、例えば、空気から水に入ると光が曲がるというような現象。このようなものは、波動的な性質になるわけです。

一方で、実は、光には粒子的な側面もありまして、これを抽出する実験の一つが、光電効果と呼ばれている実験です。金属の表面に光が入射すると、金属の中には、いっぱい電子がいますから、その電子が叩き出されるという現象が光電効果ですが、実は、この時に叩き出される電子のエネルギーというのは、当てる光の強さなどには、全く依存しない。何で決まるかという、当てる光の振動数で決まるということが、実験から分かります。この実験を解釈しようと思うと、光は粒であり、光の粒が振動数に関するエネルギー、「 $h\nu$ 」と、よく書かれていますので、こういうエネルギーを持った光の粒が電子に当たって、それが飛び出してきた、

というように解釈しないと、どうにも解釈は難しいということになります。光は、さっき言ったように干渉もしますし、屈折などもしますから、波動的な側面もあるし、粒子的な側面もあるということになるわけです。

この2つの性質を、どのように共存させるのか、共存して解釈するのかということですが、光は、基本的に粒だと思ひましょう。ここから粒がいっぱい出てきます。そして明るさというのは、光の粒の数です。光の粒のことを光子（フォトン）と言いますが、光の粒が、ここから、いっぱい出てくる。明るいところ、暗いところ、というのが出来るのだけれども、これは、明るいところに光の粒が、いっぱいいるのだというふうに考えるわけです。暗いところには、あまり光の粒がないというふうに考えて、明暗を、光子が多い、少ないというふうに解釈すると、このスクリーン上で明るいところは光子の存在確率が高い。いっぱいいるということは、つまり、存在する確率が高い。暗いところには存在確率は低いとなるわけです。つまり、粒子の存在する確率というのが、波のように振る舞うのだと。粒子は基本的に粒だと解釈して、その粒のいる確率というのが、波みたいに振る舞っているというふうに解釈することができるわけです。

このことは、実は、光以外の粒子についても成り立ちます。この世の中に色々な種類の粒子があるのですが、それについても二重性があるということが、実験的に確かめられる。例えば、電子ですね。先程言った、叩き出される側の電子。電子は、どう見ても粒子にしか見えないのですが、実は、電子の存在確率というのが、波のように振る舞うという実験がなされています。

これは、実験映像ですが、粒子がポツポツ当たって、跡が出来てきました。これは、電子が次々にスクリーンに当たっている様子ですが、これ、しばらく当てていると、こういうような感じで、縞が見えますよね。ここら辺に粒子がいっぱい当たって、その間には、あまり粒子が当たっていないのが見えると思います。これ実は、光と同じ実験をしています。だから、これはまさに、光の明るい暗い、明るい暗いという縞に対応していて、電子でも、やはり存在確率の縞、電子が、いっぱいいるところと、あまりいないところという縞ができる。つまり、電子の存在確率というのが、波のように振る舞っているのだということが分かります。

このような考え方のことを量子力学と言いますが、皆さん、普通に普段暮らしている考え方からすると、各時刻、どんな時刻においても、物理量を取る値というのは決まっていますよね。例えば、代表的な物理量として、位置がありますけれども、この椅子は、ここにあるということは、当然決まっていますよね。あるいは、速度という物理量もありますが、どのくらいのスピードで動いているかというのは各時刻で決まっています。そのような物理量の値の一覧表というのが、物理状態になるわけなのですが、要は、量子力学での考え方は、そうはなっていて、物理量を取る値というのは、決まっていないのだと。その確率分布だけが分かる。確率分布、さっきみたいに、ここら辺にいっぱいいて、ここら辺には、あまりいないような状況ですね。そういう確率分布だけが決まっていて、実は、どこにあるかということは、測ってみるまで分からない。先程の例でも、粒子1つ1つは、あっちこっち、ランダムに打ちつけられていますよね。だから、あれがどこにくるかという予言をすることはできない。ただ、ここら辺に、たくさん来そうか「確率」というものだけが分かるというのが、量子力学の考え方になる。

量子力学で、物理状態というのは何なのかと言われると、実は、これベクトルという、すごく抽象的な、矢印のことをベクトルと言いますが、それに似た感じの抽象的なものが物理状態になっていて、実は、このベクトルから確率分布というのを導くことができるというようになっています。こういう考え方って、すごく、もちろん気持ち悪くて、アインシュタインなども、すごく受け入れ難かったようで、有名な「God does not play dice」という言葉があります。つまり「神はサイコロを振らない」測るまで状態が決まっていないということが本当にあるのだろうかというふうに、少し懐疑的な立場だったと言われています。

普通、例えば、トランプを机にパツと伏せて、これを表返すまで何のカードか決まっていないと言われたら、「そんな馬鹿なことはない」と普通は思いますよね。決まっているけれど、単に我々が見ていないだけなのだ、というのが普通の考え方です。そういうものを実在論と言います。我々が見ていようが見ていまいが、物理量の値というのは定まっているはずだというのが実在論の考え方です。

なので、この量子論でも確率的と言っているのだけれども、単に我々の能力が足りていなくて、何か測れていない物理量があって、そのような、我々の知らない変数というのが物理量を決めているのではないかという考え方がありました。このような考え方のことを「隠れた変数理論」と呼びます。本当に、見るまで定まっていないのか、それとも単に隠れた変数があって、それを我々が知らないだけなのかというのは、もし、導かれる結果が、実験して、この2つを区別できないなら、単なる思想の違いに過ぎないわけですね。それだと、どちらでもいい話になるわけなのですが、物理というのは実証学問なので、もし、この2つの考え方に違いがあるとすると、何か実験で測ったりして実証しないとイケない。単なる思想の違いなのか、それとも、単に測っていないだけなのか、真に確率的なのかというのを区別する術があるのだろうか、ということが当然、次に気になるわけです。そのことを説明する前に、幾つか準備が必要でして、まず、不確定性原理というお話をしたいと思います。

不確定性原理。先程確率分布しか決まらないという話をしましたよね。確率分布と言われると、例えば、ここにいる確率が100%で、残りは0%みたいなものも、確率分布です。ここに100%出るといって、確定している状態も、あり得るのではないかと思うかもしれませんが、実は量子力学では、同時に絶対確定できない物理量の組というのが存在する。例えば、位置と運動量、質量に速度をかけたものですね。知らない方は、速さみたいなものと思ってください。位置と運動量って、古典力学だと当然、例えば、物体が、ここにある、速さはいくらであるとか、そういうことが同時に決められるのですが、量子論では、実は、この2つは同時に決めることができません。だから位置が、例えば、ここに100%、ここにいるということになると、それが、どれぐらいの速さを持っているのかということは全く定まっていないとなっていて、逆に速さを完全に決めてしまうと、位置が完全に、どこにあるか分からないというふうになり、同時に確定できない。つまり、同時に100%にできない物理量の組というのが存在します。

他にも色々な例がありまして、例えばスピン。このスピンというのを以下に説明に、いっぱい使っていくのですが、スピンは、どういうものかと言うと、極めて微小な磁石の素だと思ってください。だから、磁石を細かく砕いていって、粒1個、磁石の中の粒1個みたいなものが、スピンだと思ってください。そのままN、Sです。磁石ってN、Sですよ。このN、Sの、すごく小さい磁石の素のN、Sを矢印で書くことにします。こっち、矢印の先がN極だとしましょうか。こういうN、Sの大きい磁石をよく見てみると、小さい磁石の素が、いっぱい集まって出来ているのですけれども、こういう向きに向いているということは、上向きの磁石が多いわけですね。全部が揃っているわけではなくて、たまに逆向きのもんとかもいるのですが、トータルで見ると、上向きのものが多いから、大きい磁石は見ると、こういう感じになっているのですけれども。

磁石って、3次元空間で向く方向は、3方向の成分がありますよね。X成分、Y成分、Z成分です。だから、大きい磁石だと、こっち向きというのが確定できるわけなのですけれども、実は、極めて小さい磁石の素、スピンになってくると、例えば、Z成分というのを決めてしまうと、X成分が全く確定しないということになります。確定しないというのは、どういう意味かと言うと、プラス方向を向いているのか、マイナス方向を向いているのかの確率は半々になってしまう。Z方向は、例えば、上向き100%だとすると、X方向の成分というのは、半々になるということが分かります。

これ実際、実験がなされていて、シュテルン=ゲルラッハの実験と呼ばれています。ここの炉で銀を加熱して蒸発させて、銀の蒸発した物、ここに、こういう磁石があって、それに通すのです。この磁石、実はNが上を向いていると下向きに動いて、Nが下を向いていると上向きに動くみたいな構造を取っている磁石なのですが、これ実は、向きに応じて、かかる力が違うので、向きによって進行方向を分ける装置なのです。普通に考えると、色々な向きの磁石が来ますから、装置を通過した後の位置は連続的に分布しそうです。これを古典的予測といいます。こういうふうになり、連続的に分布しそうなものなのですが、実際これをやってみると、連続的ではなく、こういう2本に完全に分かれてしまっている。だから中途半端な向きを向いている状態というのが、実は小さい磁石だと、ないということが分かるのです。

こういうのを量子化と言います。飛び飛びになっているという意味なのですけれども。なので、これ実際、磁石

が、どちらの方向にせよ、量子化というのが起こっていることが実験的にも確かめられます。さらに、実験事実として、さっき言ったように、こういう装置を通すと、この向きが上に行くか、下に行くかの半々だと言ったのですけれども、こっち上向きはZ方向としてZ方向に測定して、だから、こっちに来るか、こっちに来るか半々で、この上に来たものだけを取り出して、もう一回測定すると、確率1、0、100%、上に出来るわけですね。

一方で、Z方向に測って上向きだったとします。上向きになったものを、もう1回、今度はX方向に装置を傾けてX方向に測定すると、ここに確率半々になっています。つまり、Z方向100%というものをX方向に通すと確率半々ということになる。これが、さっき言った、Z方向が100%上を向いていると、X方向は全く定まっていないということになります。これが、それに対応する実験です。

最初に、エンタングルメント、エンタングルした状態という単語が出てきたのですけれども、エンタングルメント「量子もつれ」とも言われますが、個人的には、この単語は非常に良くないと思っています。やはり、もつれと言うと、すごいグチャグチャになっていて、何かよく分からない状態というようなイメージを持ちがちですけれども、実は、エンタングルメントは、そういう状態ではなくて、むしろ、逆に情報量の多い状態なので、正しいイメージは量子腕組みで、量子と量子が腕組みをしていて、右の人が手を挙げたら、左の人も手を挙げないといけなし、右の人が下げていたら、左の人も下げないといけなしという感じで、もつれているというよりは、量子同士が腕組みしているみたいなイメージが正しい。

エンタングルメントというのは何かと言いますと、さっき言ったスピンというのを2個用意します。2個用意すると、取り得る状態というのは4通りですけれども、それぞれが、例えば、上を向いているか、下を向いているかというので、上上、上下、下上、下下という4通りの組み合わせが、あり得ますよね。スピンAとBで、もちろん、だから、それは、さっき言ったように、確率分布しか分かりませんから、量子力学では。なので、上上、上下、下上、下下という4つの組み合わせが4分の1ずつの確率という状態が、あり得るわけですね。これは、AとBの間に相関がないわけです。だから、Aを測って上だったとしても、Bが、どっちかというのは全く分かりません。これは、AとBの間に関連性、相関というのが全くない状態ということになります。

それに対して、例えば、上下というのが50%で、下上というのが50%、上上とか上下という確率はゼロですよ、という分布も、あり得ます。こういう時には、Aが上を向いていたならBは下ですし、Aが下を向いていたならBは上なので、これ、AとBが完全に相関している「逆相関」です。上と下、下と上という。この場合、AとBの間の相関は最大になっているわけですね。この状態のことを、エンタングルした状態、エンタングルメントがあるというふうに言います。

つまり、エンタングルメントというのは何かというと、量子的な相関があることをエンタングルメントというふうに言います。こういうエンタングルした相関を持った2つのスピンを、そのままビヨーンと引き離すことができます、こういうのを非局所相関というふうに言います。

ここで、またちょっと気持ち悪いことが出てきて、相関したものが、空間的に完璧に離れた場所に存在するということができるわけですね。そうすると、つまり、同時に測定した結果が相関しているということなので、相対性理論に反するようになります。相対性理論は、物事の因果が光の速度を超えることができないという理論なので、相対性理論に反しているのではないかと。この点でも、やはりアインシュタインは非常に気持ち悪いと思ったようで、同時に測定したときの結果が相関しているというのをアインシュタイン＝ポドルスキー＝ローゼンのパラドックス、略して「EPRパラドックス」と言うのですけれども、これは相対性理論に反しているのではないかと、アインシュタインは思ったわけです。

現在の考え方から言うと、これは相対論には反していなくて、なぜかと言うと、これ相関はしているのですね。確かにAさんが、AとBの代わりに、よくアリスとボブと言うのですけれども。アリスが例えば上だったら、ボブは下を得るのですけれども、だからと言って、このことを使って情報を伝達することというのは、どう頑張っても、できないということが示されている。どんなに事前に、例えば「こういう測定をして、こうなった時には、こうしよう」と2人が、どんなに綿密に打ち合わせをしても、この相関をしている事実を利用して情報伝達

というのは、できないということが知られている。なので、このこと自体が相対性理論に反しているというわけではありません。

先程の話に戻ってくるのですが、確率的になるのは、我々が見ていないだけなのか、本当に定まっているのか、どっちだという話をしたと思うのですが、その2つを、実は区別する手法があるよというのを提案したのが、ベルさんです。ベルさんの、ある不等式があるのですが、局所实在論と量子論というのを区別することができるよという。局所实在論には、実は満たすべき不等式があって、これはベル不等式と呼ばれています。これは1964年の論文で、EPRパラドックスについてという、アインシュタイン＝ポドルスキー＝ローゼンのパラドックスについての、ベルさんの論文です。ここで、ベル不等式という不等式が導かれました。

ただ、この論文は、すごく実験するのが難しい形で書かれていたもので、これを実際に実験できる形に改良した理論にしたのが、受賞者の1人である、クラウザーさんです。Clauser-Horne-Shimony-Holtという論文ですが、頭文字を取って「CHSH不等式」と呼ばれているのですが、両者合わせて「ベル・CHSH不等式」というふうにも呼ばれています。ベル不等式を実験可能な形に改良したのがクラウザーさんということになります。

これは、どういう不等式かというと、局所实在論で成り立つものです。アリスもボブも2種類の物理量を測定することにします。アリスもボブも2種類ずつ物理量があって、ランダムに、どちらか選んで測定するのですが、測定値の結果は、プラスマイナス1だとします。その時に、こういうややこしい相関、2種類の物理量を持っているので、アリスが1を測って、ボブが1を測った時の相関、アリスが2を測って、ボブが1を測った時の相関、同じようにアリスが1、ボブが2、そしてアリスが2、ボブが2を、それぞれ測った時の相関を、足す、足す、引く、足すとしなさいという、こういう複雑な量を考えるわけですね。

こういう量を考えると、実は、これというのは因数分解というのが出来まして、B1で括ると、A1足すA2、B2で括ると、A1引くA2、というふうになるのですが、A1とA2は出る値というのは、プラスマイナス1なので、この組み合わせにしても、実は、このA1足すA2と、A1引くA2の、どちらか必ず0。これ、表にしましたが、A1とA2が1、1、1、1、1、マイナス1、マイナス1、マイナス1、マイナス1。どの組にしても、足したものと引いたものが、この列ですけれども、どちらか必ず0、もう片方は、2かマイナス2ということになるわけですね。例えば、これで、こっちが2で、こっちが0というふうに、どちらか必ずです。

なので、B1とB2も、やはり1かマイナス1しか出ないから、この値というのは、プラスマイナス2しか出ないわけですね。この組み合わせの値というのは、それは、やはりプラスマイナスの2です。その期待値が、これ、相関になりますので、当然プラスマイナス2が、ランダムにというか、どちらか出るものを平均すると、2とマイナス2の間にありますよね。この2つの値しか出ないので、平均したら、当然この間にある。これは、局所实在論。今言ったことは、2種類の物理量を測ったということしか言っていないので、これ局所实在論なら、いつでも成り立つ等式になります。値が定まっているという状況だと、いつでも成り立つ等式になります。

ところが量子論で、今言った状況を計算してみると、詳しい計算の仕方を今日は説明できないのですが、実はさっき言ったスピンのZ成分とX成分というのを、アリスはZとX軸に沿って測ります。さっき言った、シュテルンゲルラッハの装置というのを、こっちに向けていると思うのです。あるいは、こっちに向けている。ボブは、こっち方向か、こっち方向の、どちらかに向いているというふうに測定すると、実は計算してみると、量子論を使っても、これを計算することができて、計算してみると $2\sqrt{2}$ という値になって、2より大きいのです。つまり、ベル不等式が破れていることが分かります。

なので、量子論で計算すると、こうなったということは、つまり量子論の理論体系というのは、さっき言った局所实在論、単に我々が見ていないだけ、変数が、我々の知らない変数があるだけなのだという枠組みでは収まらない量子理論体系なのだということが、実は、この不等式の破れから分かる。なので、確率的に実際に定まっているのと我々が知らないだけというのは、ちゃんと実験的に測って区別ができる事実なのだということが分かるわけです。これを実際に実験したのが、受賞者の1人のアスペですね。アスペの実験と呼ばれています。この論文ですが、さっき言ったフォトン、光の粒ですね、その偏光をスピンとして使います。エンタング

ルした 2 光子は、2 光子発光と言って、連続して 2 つの光子が出てくるという過程で、しかも偏光、電磁波なので、横振動か縦振動かという自由度があるのですけれども、その自由度を使って、アスペは、エンタングルした 2 つの光子を生成しました。相関を特定したところ、実際に、この「ベル・CHSH 不等式」というのが破れている。つまり量子論が正しくて、それは局所实在論ではないということを、実験的にも確かめることができたわけです。

アスペは最初、このような 2 光子発光という手法を使ったのですが、最近では、もっと良い手法も、いっぱいありまして、例えば、 β -メタホウ酸バリウムという物質があるのですけれども、光の粒を 1 個入れると、エネルギーが半分になった粒が 2 つできるという性質があるので、これを通すだけで、エンタングルした 2 光子ができます。もちろん実験的には、色々しなければいけないのですけれども、通すだけで比較的簡単にエンタングルした光子を作ることができるようになっています。

光ではなくて実際、電子のスピンを使った実証実験というのもなされました。今、言ったようなことは、量子論の原理の話なので「何だ、基礎物理学の話か」と思うかもしれませんが、実は、技術応用的にも、非常に重要な側面を持っています。例えば、量子テレポーテーションと呼ばれている現象がありまして、アリスとボブに量子状態を送りたいのですが、どういう状態を持っているか、自分は知りません。量子論では、測定をすると状態を壊してしまうので、測ったらこうだったよとボブに伝えるということではできません。状態がいっぱいあると確率的に評価して、状態を測定するというのも可能なのですが、1 個しか状態がないものを多数複製するということが、実は、量子論的には禁止されています。定理があって、クローン禁止定理という、状態は複製できないという定理がある。

ボブに状態を送るためには、どうしたらいいかと言うと、あらかじめ、さっき言ったエンタングルしたスピン、つまり、量子相関のあるスピン対というのを共有しておくわけですね。アリスとボブの間で、今、送りたい状態と片割れが、エンタングルするような測定を行うのです。エンタングルすると、アリスの状態が、ボブの状態に転写されます。エンタングルしたもので送りたいものと、このエンタングルしていない送りたい状態のスピンを、対の片割れとエンタングルさせると、実は、アリスの状態が、ボブの状態に転写される、というようなことが起きて、ここで測ると値が出ますので、それに応じて変換すると、実は、送りたい状態と全く同じ状態を実現することができる。実験では、こういう感じなのですけれども、何をしているか、詳しくは説明できないのですが、これが受賞者の最後の 1 人のツァイリンガーさんの実験結果になります。

ポイントは、スピンの量子状態というのは分からないわけですね。分からないけれども、分からないまま瞬時に転送するということができたということになります。これには色々な応用例がありまして、例えば、量子暗号。量子暗号というのは、秘密鍵という 0 と 1 の乱数を共有しておくのです。そうしておく、0 と 1 の列に乱数を足して、足すと、もはや、わからない数になりますから、これは安全に送れるわけですね。送ったあと、ボブも秘密鍵を持っていて、秘密鍵の乱数を足して、また元に戻せるという、暗号と呼ばれているシステムです。ここでは、秘密鍵というものを安全に共有することというのが必要になっています。これも実は、エンタングルメントというのを使って、エンタングル対がアリスとボブに手元が来たら、ランダムに X または Z 方向を選んで測定しています。そうすると、測定方向が揃った時には必ず同じ値が出るのですが、違うところを選ぶと、つまり、X 方向と Z 方向という違うペアを選ぶと、同じかもしれないし、違うかもしれない。ただ、あとから、どちら方向に測りましたかというのを照合して、一致するところだけ取り出して、秘密鍵にすれば秘密鍵がつかれるということになります。しかも、これの一部を取り出して、あとから 0 と 1 が一致しているかというのをチェックすれば、その結果が異なっていると、何か間で測定が行われたということになりますので、盗聴されているということもバレるということになります。

他にも量子コンピューターですね。最近話題の量子コンピューターなども量子論の応用としてなされていますが、ちょっと時間になりましたので、ここら辺を飛ばしまして、まとめとして、量子論というのは、本質的に確率的であり、未知の変数が、すなわち、我々が知らない変数があるというわけではありません。また、エンタ

グルメントと呼ばれている非局所的な相関というものも存在します。局所实在論ではないということは、実は、「ベル・CHSH 不等式」を用いることで分かります。この不等式の破れが実際に実験で実証されています。あとは、量子論の原理の探求という基礎物理の点だけではなく、次世代技術への応用も色々と期待されています。特に、量子テレポーテーションが、ツァイリンガーさんによって実現されているということでした。

以上になります。ありがとうございました。

— 了 —