

## Probability and Uncertainty - the Quantum Mechanical view of Nature

Richard P. Feynman (The Character of Physical Law, Chap. 6)  
<https://www.microsoft.com/en-us/research/project/tuva-richard-feynman/>  
に講演のクローズドキャプション付き動画あり

In the beginning of the history of experimental observation, or any other kind of observation on scientific things, it is intuition, which is really based on simple experience with everyday objects, that suggests reasonable explanations for things. But as we try to widen and make more consistent our description of what we see, as it gets wider and wider and we see a greater range of phenomena, the explanations become what we call laws instead of simple explanations. One odd characteristic is that they often seem to become more and more unreasonable and more and more intuitively far from obvious. To take an example, in the relativity theory the proposition is that if you think two things occur at the same time that is just your opinion, someone else could conclude that of those events one was before the other, and that therefore simultaneity is merely a subjective impression.

There is no reason why we should expect things to be otherwise, because the things of everyday experience involve large numbers of particles, or involve things moving very slowly, or involve other conditions that are special and represent in fact a limited experience with nature. It is a small section only of natural phenomena that one gets from direct experience. It is only through refined measurements and careful experimentation that we can have a wider vision. And then we see unexpected things: we see things that are far from what we would guess - far from what we could have imagined. Our imagination is stretched to the utmost, not, as in fiction, to imagined things which are not really there, but just to comprehend those things which *are* there. It is this kind of situation that I want to discuss.

Let us start with the history of light. At first light was assumed to behave very much like a shower of particles, of corpuscles, like rain, or like bullets from a gun. Then with further research it was clear that this was not right, that the light actually behaved like waves, like water waves for instance. Then in the twentieth century, on further research, it appeared again that light actually behaved in many ways like particles. In the photo-electric effect you could count these particles - they are called photons now. Electrons, when they were first discovered, behaved exactly like particles or bullets, very simply. Further research showed, from electron diffraction experiments and so on for example, that they behaved like waves. As time went on there was a growing confusion about how these things really behaved - waves or particles, particles or waves? Everything looked like both.

This growing confusion was resolved in 1925 or 1926 with the advent of the correct equations for quantum mechanics. Now we know how the electrons and light behave. But what can I call it? If I say they behave like particles I give the wrong impression; also if I say they behave like waves.

確率と不確定性 - 量子力学的な自然の見方  
リチャード ファインマン

[物理法則はいかにして発見されたか 岩波現代文庫](#) 江沢洋氏の訳が出ているが、もっとくだけた風に書きました。

実験で科学的な現象を観察するとき、最初で現象に適切な説明をつけるのは直感なんだ。その直感は日常の単純な経験に基づいているよね。実験で観測現象をどんどんひろげていって、見てきたことをちゃんと説明しようとする、ケースバイケースの説明ではなく、ぼくらが法則と呼ぶものに基づいて説明することになるん。おもしろいことは、そうすることによってどんどん訳がわからなくなり、「直感的に明らか」というところからどんどん遠ざかったいくのね。例をあげると、相対性理論では、2つの現象が同時に起こったと僕らが思っても、他人からみたら片方が先に起こってるよと言う。だから、同時性というのは単に主観的な印象の問題でしかないよ。

僕らは、直感から外れた説明をするということには、耐えられないんだよね。というのは、毎日経験する現象は、多くの粒子がからんでいたり、ゆっくり運動する粒子に関するものだったり、自然の限定されたところだけを見ている特別な条件がついてるからね。直接の経験から理解できる自然現象ってのは、そんなに多くないんだよね。精密な測定と慎重な実験を通してのみ、より広いところが見えてくるんだろうね。そして、予想もしなかったことが見えてきて、推測したのとはえらく違ったことが見えてきて、想像もしなかったことが見えてくるんだよね。僕らの想像力をマックスまでもって行って、でっ上げの実際にはない想像上の事で説明するのではなく、そこにある現象を理解しようとする。僕が今夜お話したいのはそんなようなことやねん。

光の歴史から始めようや。最初光は、雨や弾丸のような微粒子のシャワーのように振る舞うとされていたのよ。で、いろいろ調べていくと、これは正しくなく光は、例えば水の波のように、波として実際に振る舞うことが明らかになってきたのよ。そして、20世紀になって研究が進んだら、また粒子のようにふるまう現象が再びあらわれた。それは、光電効果で、これらの粒子を数えることができて、今や光子と呼ばれているんだよね。電子は、最初発見されたときから、まさに粒子や弾丸のように振る舞ったんだよね。非常に単純な話！さらなる研究がすすんで、例えば電子回折の実験等で、波のようにふるまうことが示されんよ。時がたつにつれて、どのようにふるまうのかが、だんだん混乱してきたのね。粒子なのか？波なのか？、波なのか？粒子なのか？ってね。どちらの性質ももってるようにみえた。

1925年か1926年に量子力学に対する正しい方程式が出現(降臨)してその混乱は解決したんよ。今や電子や光がどのように振る舞うのか我々はわかってるのね。しかし、それをどう呼んだらいいのか？もし、僕がそれは粒子のようにふるまうと言えば、間違った印象を与えてしまう。また、波のようにふるまうと言っても同じになるよね。それらは、自身の独特な方法でふるまい、量子力学的流という専門用語でよんでいいのかもしれない

electrons and light behave. But what can I call it? If I say they behave like particles I give the wrong impression; also if I say they behave like waves. They behave in their own inimitable way, which technically could be called a quantum mechanical way. They behave in a way that is like nothing that you have ever seen before. Your experience with things that you have seen before is incomplete. The behaviour of things on a very tiny scale is simply different. An atom does not behave like a weight hanging on a spring and oscillating. Nor does it behave like a miniature representation of the solar system with little planets going around in orbits. Nor does it appear to be somewhat like a cloud or fog of some sort surrounding the nucleus. It behaves like nothing you have ever seen before.

There is one simplification at least. Electrons behave in this respect in exactly the same way as photons; they are both screwy, but in exactly the same way.

How they behave, therefore, takes a great deal of imagination to appreciate, because we are going to describe something which is different from anything you know about. In that respect at least this is perhaps the most difficult lecture of the series, in the sense that it is abstract, in the sense that it is not close to experience. I cannot avoid that. Were I to give a series of lectures on the character of physical law, and to leave out from this series the description of the actual behaviour of particles on a small scale, I would certainly not be doing the job. This thing is completely characteristic of all of the particles of nature, and of a universal character, so if you want to hear about the character of physical law it is essential to talk about this particular aspect.

It will be difficult. But the difficulty really is psychological and exists in the perpetual torment that results from your saying to yourself, But how can it be like that? ' which is a reflection of uncontrolled but utterly vain desire to see it in terms of something familiar. I *will not* describe it in terms of an analogy with something familiar; I will simply describe it. There was a time when the newspapers said that only twelve men understood the theory of relativity. I do not believe there ever was such a time. There might have been a time when only one man did, because he was the only guy who caught on, before he wrote his paper. But after people read the paper a lot of people understood the theory of relativity in some way or other, certainly more than twelve. On the other hand, I think I can safely say that nobody understands quantum mechanics. So do not take the lecture too seriously, feeling that you really have to understand in terms of some model what I am going to describe, but just relax and enjoy it. I am going to tell you what nature behaves like. If you will simply admit that maybe she does behave like this, you will find her a delightful, entrancing thing. Do not keep saying to yourself, if you can possibly avoid it, 'but how can it be like that? ' because you will get 'down the drain', into a blind alley from which nobody has yet escaped. Nobody knows how it can be like that.

いよね。(笑) それらは皆さんが以前に見たこともないようにふるまうのね。(笑) 皆さんがこれまでに見てきた経験は不完全なんだよ。非常に小さいスケールの現象の振る舞いは、ただただ違うのね。一つの原子はバネにつるされたおもりのようには振る舞わない。あるいは、小さい惑星が軌道上をまわっている太陽系のミニチュアのようにも振る舞わない。さらには、核の周りに雲とか霧のようになっているわけでもない。それは、あなたが以前に見たものではないのよ。

少なくともひとつだけ単純化すれば、電子はこの点において光子と全く同じように振る舞う、両方とも「へんこ」だけど、(大笑い) 正確に同じように振る舞うんだよね。

皆さんが知ってることとは全く異なる何者かを記述していきたいので、どのように振る舞うのかを理解するには想像力をものすごく働かせてほしいのね。そういう意味で今度の講義は、シリーズのなかで最も難しいものになるね。と、いうのは、抽象的だし、経験に基づいてないからね。しかし、避けないようにするよ。物理法則の性質の一連の講義をしてきたんだけど、もし微少なスケールでの粒子の実際の挙動の話をしなければ、講演というお仕事を確実にしないことになるしね。それは自然界のすべての粒子の特性を完全に説明し、普遍的なんだ。それで、「物理法則の特性」のことを聞きたかったら、この特別なことについて話すことはとても大事なことなんだ。

それは難しいんだよ。難しいのは実際は心理的な問題で、ずっとこれからも自問自答していくことになるであろう以下の苦しみからくるんだよね。それは、量子がどのようなものになるのか？ 考え方には無限の可能性があるにせよ、なにか見慣れたものとして見ることを全く望まない理解でねとか。何かよく知ってるものの類推で説明したくなくて、ありのままを説明したいんだよ。新聞が相対性理論を理解しているのは1 ダースの人だけだって書いてた時代があったけど、そんなことはないと思ってるね。確かに、アイデアを捉えた男が論文を書く前には、その男だけが理解してたという時期はあったかと思う。しかし、人々が論文を読んだあとでは、多くの人が相対性理論をいろんなレベルで(笑) 理解したと思うよ。少なくとも12名以上はね。一方で、誰も量子力学を理解してないって言ってもいいと僕は思うね。(大笑) だから講義をあまり真剣にとらえないで、リラックスして楽しんでほしいな。自然はどのように振る舞うのかお話ししたいのね。自然がこのように振る舞うということを単に受け入れてくれるとしたら、自然は楽しくうっとりとしたものだとわかるよ。おそらく避けることはできると思うけど、どのようにしたらそうなるか自問自答し続けるのはしないよね。というの、これまでだれも逃れられなくなった袋小路におちこんでドツボにはまるからなんだ。誰もどうしたらそのようになるかわかんないんだからね！



