

## Atom size, a superstring theory.

Atom size, the superstring theory by the elementary particle pulsation principle.

- Size of "the strings" in the current superstring theory is  $10^{-33}$ cm Planck size.
- The expanse of the cloud of measurable probability, "the string" of atom size, the superstring theory are  $10^{-8}$ cm size.

### 「Current superstring theory」

- Not only the super string but also the D brany person (film). The image that an iron plate, the string are equivalent to a magnet as for the film.
- Boundary condition. I am connected in the state that a super string fails a film like a magnet. I can glide in a connected state.
- An opened string and a closed annular string. The ring of the string is equivalent to gravity.
- As for the supersymmetry particle of the boson, fermion, a supersymmetry particle of the fermion are boson.
- The boundary condition is equivalent to the panel point of a vibrating string.
- The D brany person vibrates, too. The outbreak of the = elementary particle that a string protrudes from D brany person now.
- A super string connects two pieces of D brany people. • • • this is a current superstring theory.
- As for the current superstring theory, the inspection by the experiment is impossible because of super tininess.

It is huge, and all may be a mathematical chimeric system.

"However, because can explain it so well mathematically; think with ...", and study it.

### Atom size, the superstring theory by the elementary particle pulsation principle.

- The figure of elementary particle pulsation principle energy wave pattern assumes the average energy density of dark energy the horizon and supposes the horizon to be energy zero.
- I assume a place of the dark energy a general place, and the energy of the negative wave offsets it plus every pulsation 1 cycle, and the energy grand total of a place pulsating by the supersymmetry that it is offers zero and the supersymmetry that it is to zero.
- I explain nuclear force, gravity, electromagnetism by the physics of the material wave to express by Schrodinger equation and explain a film (three-dimensional space) equivalent to D brany person as four dimensions space and the section and explain gravity as minus number energy space (equivalent to the

ring of the super string) of a pulsating wave.

□As for the super string of the atom size, the inspection by the experiment is possible, and atom and electron, proton, observation levels such as neutrons or  $\gamma$  is provided.

□It is the inspection experiment of the gravity wave, and, according to the gravity wave interpretation, the mystery of the double slit experiment suggests the existence of an existing wave.

□After the birth of the superstring theory or a primary revolution, I cannot explain dark energy and the real nature of the dark matter discovered in 1998 by space observation by the existing theory including a current superstring theory.

□The elementary particle pulsation principle explains them and foretells existence of the dark energy in 1980 and shows the temporary construction that I can inspect by physics of the dark energy based on it for the theory.

□The supersymmetry of the elementary particle pulsation principle is a particle and a minus number particle. Energy offsets it every pulsation 1 cycle.

□The energy grand total of the place of the darkness energy to pulsate is zero.

□Of the wave pattern which is innumerable in one of the quantum-mechanical characteristics put it on top of one another, and there is a state. It is equivalent to the image of a high waves surging rough sea; of the function that is innumerable as for it put it on top of one another, and is equivalent to a state.

□According to the Fourier transform, the wave pattern of every function is equivalent with the sum of infinite unit of a simple sine wave.

All the sine waves representing the elementary particle pulsation possess the supersymmetry that an energy grand total becomes zero by offset with original energy and the minus number energy every 1 cycle of the wave. Therefore, the energy grand total suffers from the friendship of the sine wave of the infinite unit with zero by the symmetricalness.

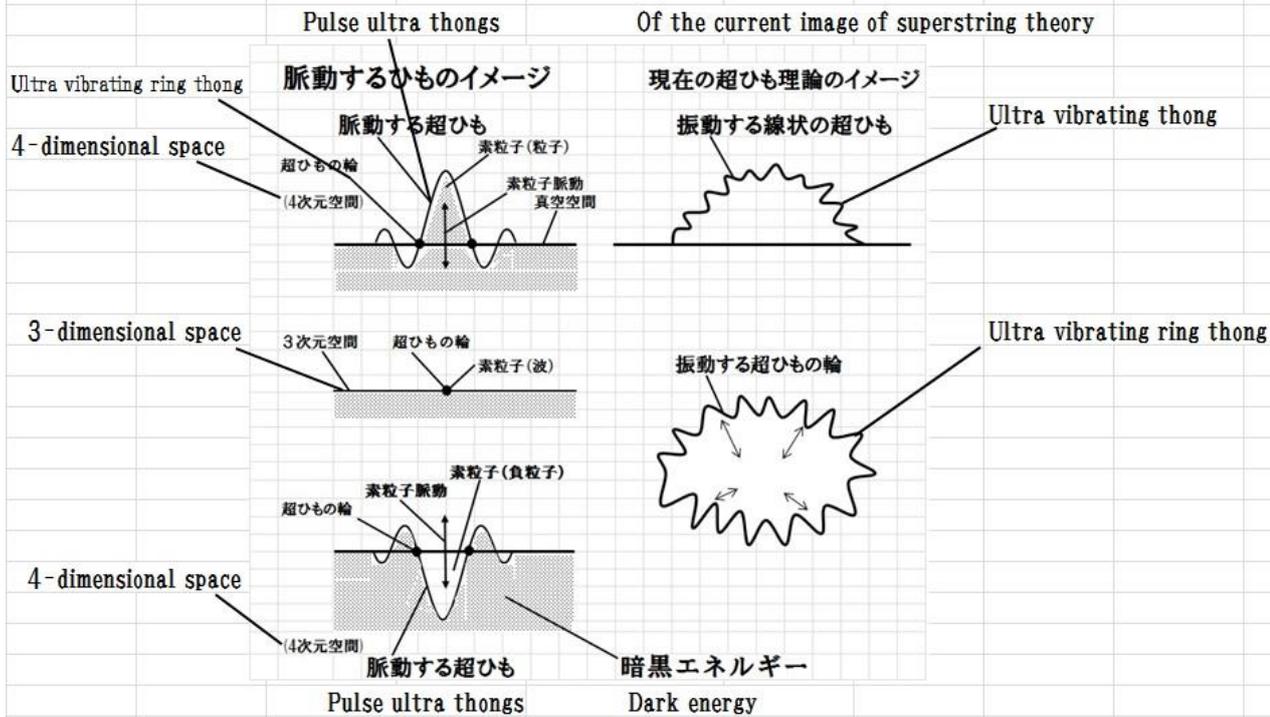
□An elementary particle pulsation principle is unified field theory to assume dark energy a place and unifies all quanta ground.

Electronic place, proton ground, nuclear force field, electromagnetic field, gravitational field, ...

In the current field theory, there is a place peculiar to every each effort in every each elementary particle, and innumerable places are mixed. I unify the dark energy pulsation principles by a place of the dark energy and realize unified field theory to express all places at one place.

□"There is not the numerical formula, but thinks because I can explain it so well geometrically that ..." this is genuine.

**Hypothesis:  
Pulsating waves of dark energy "Super cord" is.**



**Table of properties**

Properties	Particles travel	Wave travel	Negative particles
Energy value	$mc^2$	0	$(-)mc^2$
Quality	$m$	0	$(-)m$
Size	Measured values	Point	Measured values
Distortion of the space	Positive strain	No distortion	Negative distortion
Force	No	Electromagnetic force	Gravity · Nuclear force
Dimensions	3-Dimensions	3-Dimensions	3-Dimensions
State	Object	Vacuum	Empty space
The size of the Super string	Particle Measurement	Point	Particle Measurement
Time	For	Stop	For
Spin	Fermions	Bose particles	
Elementary particle physics	Electronic, Proton, Neutron	Photon	Graviton, Meson
Space	4-dimensional space	3-dimensional space	4-dimensional space
The laws of physics	Quantum mechanics	Quantum mechanics	The theory of gravity
Uncertainty	Location	Exercise	Location

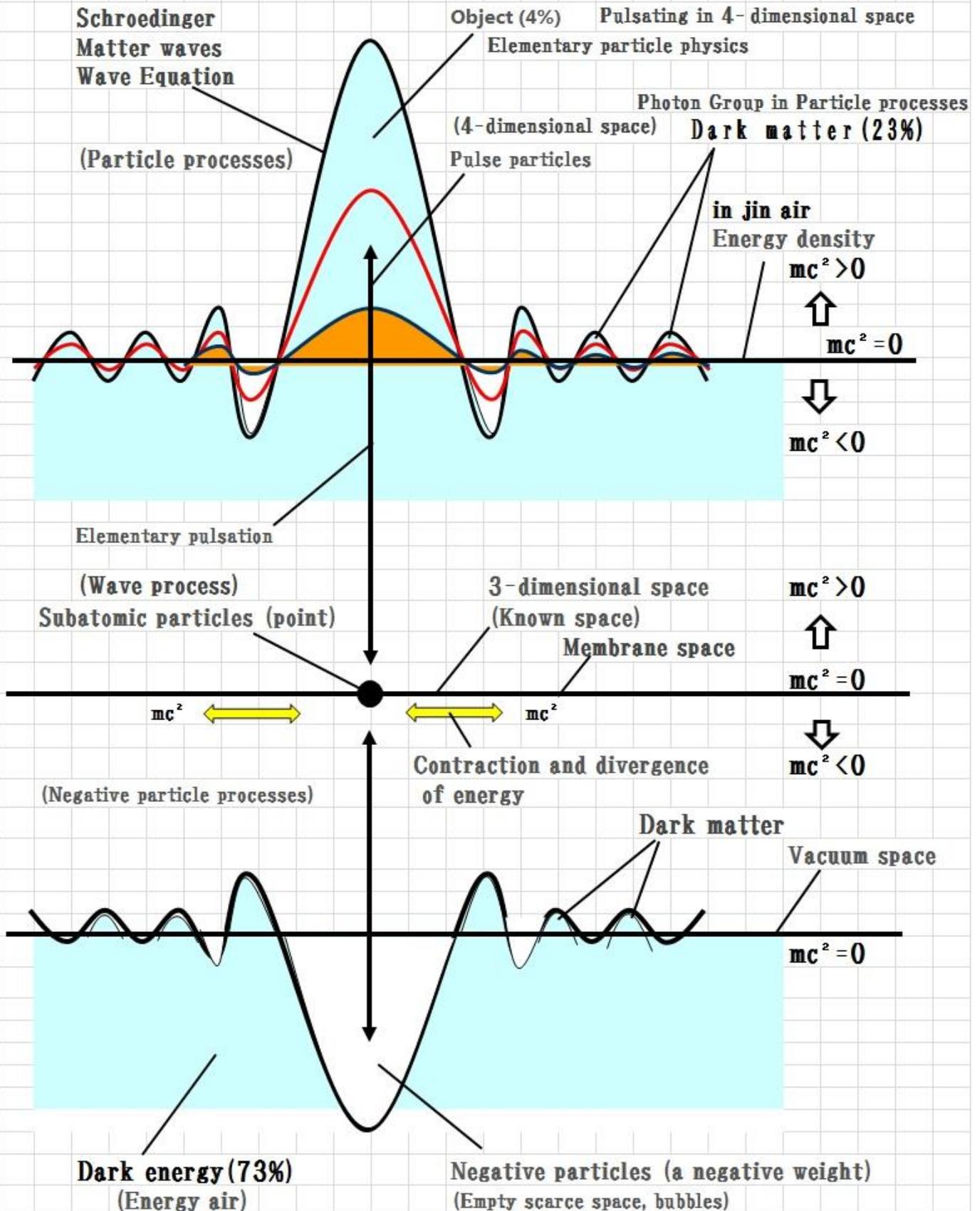
# Finding that dark energy and dark matter.

Space is filled on pulse Photon Group.

The 4-dimensional space formed by the Photon Group pulse.

Photon's particle has a mass in four-dimensional space. It is a dark matter.

Configuration of Space	Object (4%)	Dark matter (23%)	Dark energy (73%)
------------------------	-------------	-------------------	-------------------



# Dark energy pulsating principle. Image picture.

In 1980, presented at the physical society.  
 Found the presence of dark energy in 1998, after 18 years, but what's the mystery.  
 Nature is constantly in flickering at ultra high speeds cannot be observed.  
 Filled with dark energy space, bring the flickering and pulsating.

**Particle size-black hole hypothesis**  
 Equivalent pulse hypothesis empty dead space and micro black holes.  
 Photon micro-black hole is in the graviton.  
 Elementary particle physics  
 And the pulse of the universe scale constant.

Schrodinger  
 Matter waves of the wave equation  
 (Particle processes)  
 Elementary pulsation  
 (4-dimensional space)

$mc^2 > 0$   
 $mc^2 = 0$   
 $mc^2 < 0$

(Wave process) Speed of light  
 Dark energy  
 Energy density  
 Namespace aware (3-dimensional space)  
 Membrane space  
 Vacuum  
 Convergence and divergence of energy

$mc^2 > 0$   
 $mc^2 = 0$   
 $mc^2 < 0$

(Negative particles travel)  
 (4-dimensional space) Vacuum  
 Dark energy  
 Micro-black hole (Pulsating hypothesis empty scarce space)  
 (Black holes in the universe)

$mc^2 > 0$   
 $mc^2 = 0$   
 $mc^2 < 0$

4-dimensional space (the invisible world)  
 Micro White Hall is filled.

3-dimensional space (Visible world)

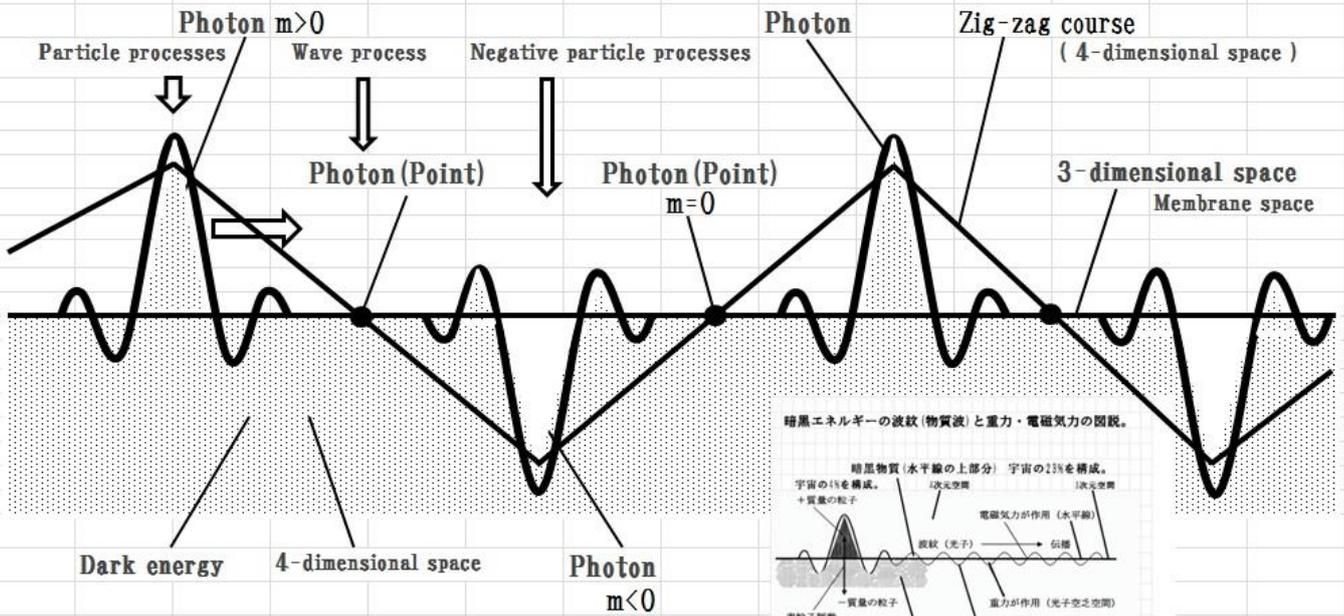
Movie film (switching piece)

4-dimensional space (the invisible world)  
 Micro Black hole is filled.

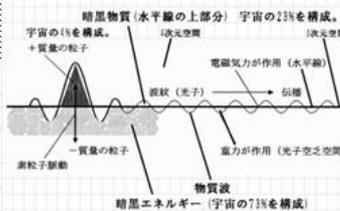
Meet the space light (Photon Group)

# Pulsating hypothesis reveals Higgs mechanism

- \* Photons are pulsating and getting forward. In the 4-dimensional space
- \* Zigzag progress of photons is same as the Higgs mechanism. \* Particle acquires mass.
- \* Dark energy is equivalent to the Higgs field and the mass of small amplitude of the zig-zag.



暗黒エネルギーの波紋(物質波)と重力・電磁力の図説。



宇宙空間に充滿する光(光子群)が空間を歪めて重力を発生。  
 宇宙の真空空間全域が物質波の山成分にて形成される暗黒物質に満たされ、その暗黒物質が空間を歪めて重力を発生させている。

## The source: Wikipedia. A string theory.

String theory ( string theory) is a theory, a hypothesis to treat a particle as a one-dimensional string not 0 dimensions of points. I am called a string theory, the string theory.

## History[edit]

*Main article: History of string theory*

### Early results[edit] ······String theory of the hadron ?

Some of the structures reintroduced by string theory arose for the first time much earlier as part of the program of classical unification started by Albert Einstein. The first person to add a fifth dimension to a theory of gravity was Gunnar Nordström in 1914, who noted that gravity in five dimensions describes both gravity and electromagnetism in four. Nordström attempted to unify electromagnetism with his theory of gravitation, which was however superseded by Einstein's general relativity in 1919. Thereafter, German mathematician Theodor Kaluza combined the fifth dimension with general relativity, and only Kaluza is usually credited with the idea. In 1926, the Swedish physicist Oskar Klein gave a physical interpretation of the unobservable extra dimension—it is wrapped into a small circle. Einstein introduced a non-symmetric metric tensor, while much later Brans and Dicke added a scalar component to gravity. These ideas would be revived within string theory, where they are demanded by consistency conditions.

String theory was originally developed during the late 1960s and early 1970s as a never completely successful theory of hadrons, the subatomic particles like the proton and neutron that feel the strong interaction. In the 1960s, Geoffrey Chew and Steven Frautschi discovered that the mesons make families called Regge trajectories with masses related to spins in a way that was later understood by Yoichiro Nambu, Holger Bech Nielsen and Leonard Susskind to be the relationship expected from rotating strings. Chew advocated making a theory for the interactions of these trajectories that did not presume that they were composed of any fundamental particles, but would construct their interactions from self-consistency conditions on the S-matrix. The S-matrix approach was started by Werner Heisenberg in the 1940s as a way of constructing a theory that did not rely on the local notions of space and time, which Heisenberg believed break down at the nuclear scale. While the scale was off by many orders of magnitude, the approach he advocated was ideally suited for a theory of quantum gravity.

Working with experimental data, R. Dolen, D. Horn and C. Schmid developed some sum rules for hadron exchange. When a particle and antiparticle scatter, virtual particles can be exchanged in two qualitatively different ways. In the s-channel, the two particles annihilate to make temporary intermediate states that fall apart into the final state particles. In the t-channel, the particles exchange intermediate states by emission and absorption. In field theory, the two contributions add together, one giving a continuous background contribution, the other giving peaks at certain energies. In the data, it was clear that the peaks were stealing from the background—the authors interpreted this as saying that

the t-channel contribution was dual to the s-channel one, meaning both described the whole amplitude and included the other.

The result was widely advertised by Murray Gell-Mann, leading Gabriele Veneziano to construct a scattering amplitude that had the property of Dolen-Horn-Schmid duality, later renamed world-sheet duality. The amplitude needed poles where the particles appear, on straight line trajectories, and there is a special mathematical function whose poles are evenly spaced on half the real line— the Gamma function— which was widely used in Regge theory. By manipulating combinations of Gamma functions, Veneziano was able to find a consistent scattering amplitude with poles on straight lines, with mostly positive residues, which obeyed duality and had the appropriate Regge scaling at high energy. The amplitude could fit near-beam scattering data as well as other Regge type fits, and had a suggestive integral representation that could be used for generalization.

Over the next years, hundreds of physicists worked to complete the bootstrap program for this model, with many surprises. Veneziano himself discovered that for the scattering amplitude to describe the scattering of a particle that appears in the theory, an obvious self-consistency condition, the lightest particle must be a tachyon. Miguel Virasoro and Joel Shapiro found a different amplitude now understood to be that of closed strings, while Ziro Koba and Holger Nielsen generalized Veneziano's integral representation to multiparticle scattering. Veneziano and Sergio Fubini introduced an operator formalism for computing the scattering amplitudes that was a forerunner of world-sheet conformal theory, while Virasoro understood how to remove the poles with wrong-sign residues using a constraint on the states. Claud Lovelace calculated a loop amplitude, and noted that there is an inconsistency unless the dimension of the theory is 26. Charles Thorn, Peter Goddard and Richard Brower went on to prove that there are no wrong-sign propagating states in dimensions less than or equal to 26.

In 1969, Yoichiro Nambu, Holger Bech Nielsen, and Leonard Susskind recognized that the theory could be given a description in space and time in terms of strings. The scattering amplitudes were derived systematically from the action principle by Peter Goddard, Jeffrey Goldstone, Claudio Rebbi, and Charles Thorn, giving a space-time picture to the vertex operators introduced by Veneziano and Fubini and a geometrical interpretation to the Virasoro conditions.

In 1970, Pierre Ramond added fermions to the model, which led him to formulate a two-dimensional supersymmetry to cancel the wrong-sign states. John Schwarz and André Neveu added another sector to the fermi theory a short time later. In the fermion theories, the critical dimension was 10. Stanley Mandelstam formulated a world sheet conformal theory for both the bose and fermi case, giving a two-dimensional field theoretic path-integral to generate the operator formalism. Michio Kaku and Keiji Kikkawa gave a different formulation of the bosonic string, as a string field theory, with infinitely many particle types and with fields taking values not on points, but on loops and curves.

In 1974, Tamiaki Yoneya discovered that all the known string theories included a massless spin-two particle that obeyed the correct Ward identities to be a graviton. John Schwarz and Joel Scherk came to the same conclusion and made the bold leap to suggest that string theory was a theory of gravity, not a theory of hadrons. They reintroduced Kaluza-Klein theory as a way of making sense of the extra dimensions. At the same time, quantum chromodynamics was recognized as the correct theory of

hadrons, shifting the attention of physicists and apparently leaving the bootstrap program in the dustbin of history.

String theory eventually made it out of the dustbin, but for the following decade all work on the theory was completely ignored. Still, the theory continued to develop at a steady pace thanks to the work of a handful of devotees. Ferdinando Gliozzi, Joel Scherk, and David Olive realized in 1976 that the original Ramond and Neveu Schwarz–strings were separately inconsistent and needed to be combined. The resulting theory did not have a tachyon, and was proven to have space–time supersymmetry by John Schwarz and Michael Green in 1981. The same year, Alexander Polyakov gave the theory a modern path integral formulation, and went on to develop conformal field theory extensively. In 1979, Daniel Friedan showed that the equations of motions of string theory, which are generalizations of the Einstein equations of General Relativity, emerge from the Renormalization group equations for the two–dimensional field theory. Schwarz and Green discovered T–duality, and constructed two superstring theories—IIA and IIB related by T–duality, and type I theories with open strings. The consistency conditions had been so strong, that the entire theory was nearly uniquely determined, with only a few discrete choices.

Source 1. “The superstring theory what” an article in written by Takeuchi.

- The beginning of string theory. The 1960s.
- I was able to do it from a quark with the hadron. The component of the 75P elementary particle.
- A figure of elementary particle pulsation energy wave pattern is physics of the big string of the hadron size.
- Size of “the strings” in the current superstring theory is much more minute Planck size and is equivalent to the point that there is not of the size. With a thing compactified to the size that I cannot observe, it is supposed to be impossible of observation.
- On the other hand, the elementary particle pulsation model is a superstring theory of the size that I can observe. The size is observed, and an electron and a proton, the neutron are known as an actual value.
- In the pulsation principle, it is a model pulsating at the ultraspeed that I cannot observe while bigger atom and molecules, all things possess supersymmetry. It is the geometry representing all things to the Planck size – elementary particle size – space in the physics of the superstring theory.

Source 2. Written by “elementary particle Kaoru Takeuchi which it is interesting, and cannot be idle”

- The elementary particle is the same as a black hole. Size is different.

- In the superstring theory, the elementary particle has a lot of articles to be a black hole basically.
- The fundamental property of the elementary particle only as for weight, turn, three of the electric charge. ▪If ▪ ▪ three are the same, I cannot distinguish it.
- As for the fundamental property of the black hole only as for weight, turn, three of the electric charge.
- The hole where the black hole became vacant in space–time.
- In a superstring theory, the elementary particle is the hole which became vacant in space–time.
- In the present theory of elementary particles, the hole, the elementary particle are considered to be a point without the size.
- When leading, I force it, and the gravity of the heavenly bodies such as the earth calculates even astrodynamics. Even if I force it with a point and calculate, I accord with an exact calculation result.
- As for the proton, three quarks are close together. Gluon has property “strong power” same as a spring.
- Infinity occurs in a reason a point particle. The theory with the expanse is necessary for an elementary particle.
- I open with the dimension with a direction.
- The expanse of the atom, the size of “the cloud of the probability” are  $10^{-8}$  乗 cm>
- The expanse of the super string is  $10^{-33}$  乗 cm.
- As for the electron and the quark preparing the material into, as for the photon and the weak boson that a turn conveys  $1/2$ , power, a turn is 1.
- The image that the edge of super string sticks to the iron plate with a magnet, and glides film “D brainy person.” Boundary condition.
- The D brainy person vibrates.

# 原子サイズ・超ひも理論。

## 素粒子脈動原理による原子サイズの超ひも理論。

- 現在の超ひも理論における「ひも」のサイズは  $10^{-33}$ cm プランクサイズ。
- 測定可能な確率の雲の広がり、原子サイズ・超ひも理論の「ひも」は  $10^{-8}$ cm サイズ。

### 現在の超ひも理論)

- 超ひもだけではなく、D プレーン(膜)。膜は鉄板、ひもは磁石に相当するイメージ。
- 境界条件。超ひもが膜に磁石のようにすべる状態で接続している。接続した状態ですべれる。
- 開いたひもと閉じた輪状のひも。ひもの輪は重力に相当する。
- ボソンの超対称性粒子はフェルミオン、フェルミオンの超対称性粒子はボソン。
- 境界条件は振動するひもの節点に相当する。
- D プレーンも振動している。今は D プレーンからひもが飛び出す=素粒子の発生。
- 2 枚の D プレーンを超ひもが繋いでいる。…これが現在の超ひも理論。
- 現在の超ひも理論は超微細ゆえに、実験による検証は不可能。  
すべては、巨大で数学的な妄想体系かもしれない。  
「しかし、数学的にはこんなにうまく説明できるのだから……」と考えて研究している。

### 素粒子脈動原理による原子サイズ超ひも理論)

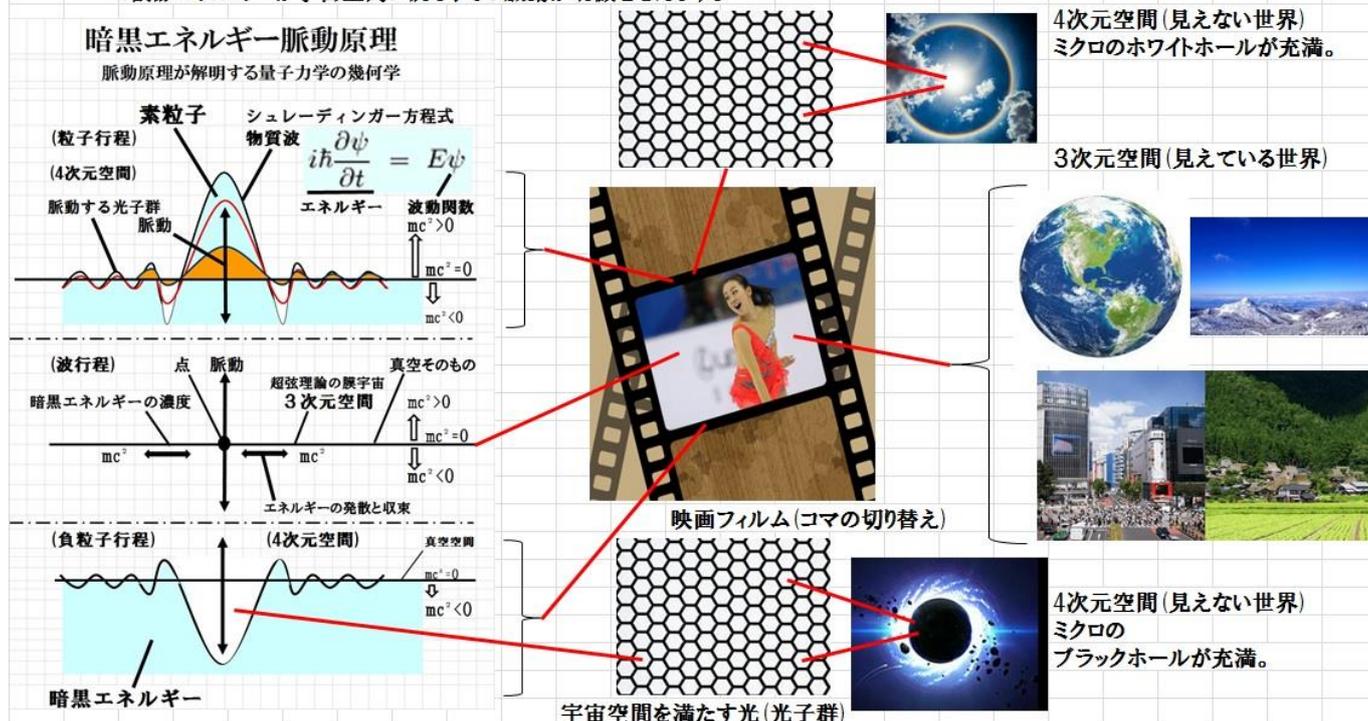
- 暗黒エネルギーの平均エネルギー濃度を水平線とし、その水平線をエネルギーゼロと仮定した脈動原理エネルギー波形図において、
- 暗黒エネルギーの場を統一場とし、脈動 1 サイクル毎に正・負の波のエネルギーが相殺してゼロになる超対称性によって、脈動する場のエネルギー総和はゼロとなる超対称性をそなえている。
- シュレーディンガー方程式で表わす物質波の物理によって核力・重力・電磁気力を説明し、4 次元空間とその切断面として D プレーンに相当する膜(3 次元空間)を説明し、脈動する波の負エネルギー空間(超ひもの輪に相当)として重力を説明する。
- 原子サイズの超ひもは実験による検証が可能であり、原子や電子、陽子、中性子などの観測値が得られている。
- 二重スリット実験の謎は重力波解釈によれば、重力波の検証実験であり、実在する波の存在を示唆している。
- 超ひも理論の誕生や 1 次革命等の後、1998 年に宇宙観測によって発見された暗黒エネルギーや暗黒物質の正体を現在の超ひも理論も含めて既存理論では説明できない。
- 素粒子脈動原理はそれらを説明し、暗黒エネルギーの存在を 1980 年に予言し、それを理論の基礎として暗黒エネルギーの物理によって、検証可能な仮説を提示している。
  
- 素粒子脈動原理の超対称性は粒子と負粒子。脈動 1 サイクル毎にエネルギーが相殺。
- 脈動する暗黒エネルギーの場のエネルギー総和はゼロ。
- 量子力学の特徴の一つに無数の波形の重ね合わせ状態がある。それは波濤さかまく荒海のイメージに

相当し、それは無数の関数の重ね合わせ状態に相当する。

- フーリエ変換によれば、あらゆる関数の波形は、単純な正弦波の無限個の和と等価である。  
素粒子脈動を表わす正弦波は全て、波の1サイクル毎に正エネルギーと負エネルギーとの相殺により、エネルギー総和がゼロとなる超対称性を具備している。従って、無限個の正弦波の和も、その対称性によって、エネルギー総和はゼロとなる。
- 素粒子脈動原理は暗黒エネルギーを場とする統一場理論であり、全ての量子場を統一する。  
電子場、陽子場、核力場、電磁場、重力場……。  
現在の場の理論においては、各々の素粒子毎に、各々の作用力毎に固有の場が存在し、無数の場が混在している。暗黒エネルギー脈動原理は、暗黒エネルギーの場によって統一し、全ての場を一つの場で表す統一場理論を実現する。
- 「数式は無いが、幾何学的にはこんなにうまく説明できるのだから……」真理に違いないと考えている。

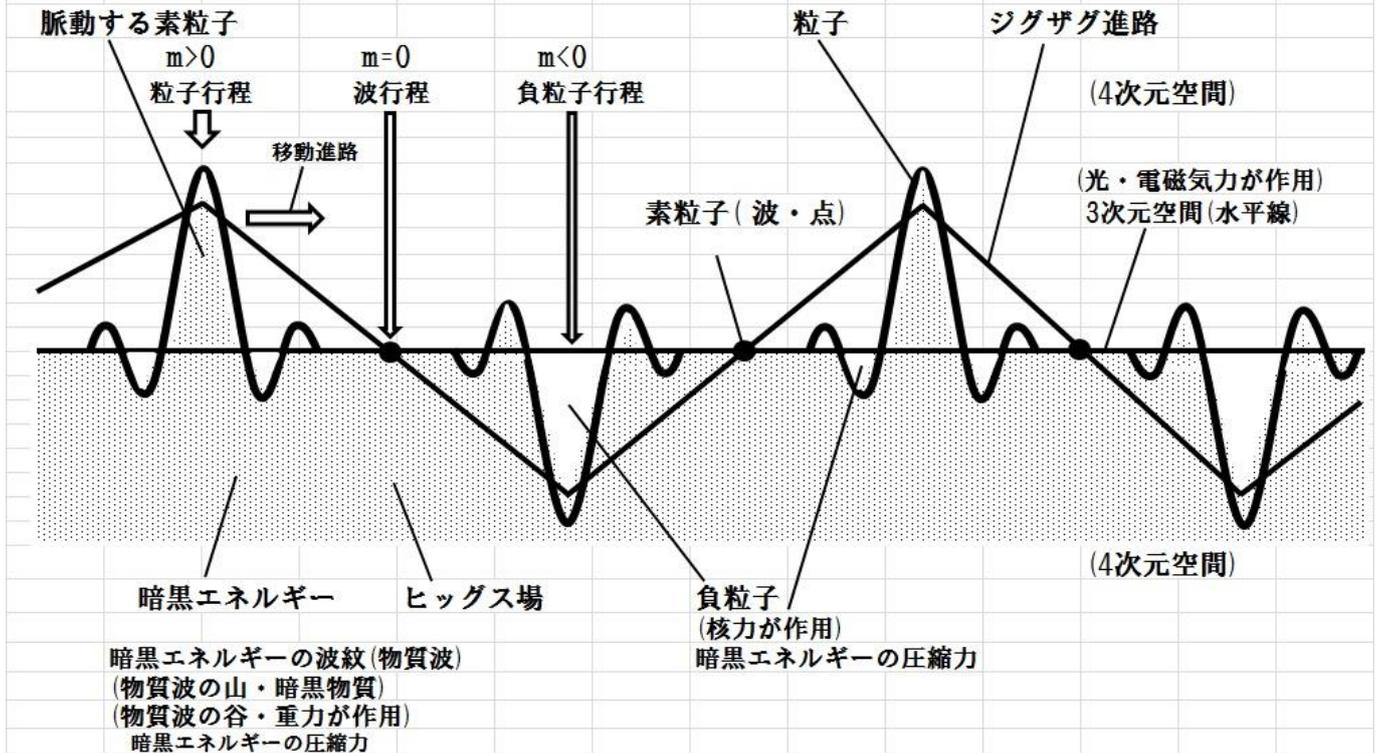
### 暗黒エネルギー脈動原理のイメージ図。

1980年、物理学会で発表した理論物理の仮説。 18年後の1998年に暗黒エネルギーの存在が発見されたが、その正体は謎。  
自然は観測できない超高速で明滅を繰り返している。  
暗黒エネルギーが宇宙空間に満ち、その脈動が明滅をもたらす。



## 素粒子脈動原理が現すヒッグス機構

- \* 素粒子は4次元空間の暗黒エネルギーの中を脈動しながらジグザグに進む。
- \* 脈動によるジグザグ進行はヒッグス機構のジグザグに相当し、素粒子に質量を与える。
- \* 暗黒エネルギーはヒッグス場に相当し、ジグザグの振幅の大小が質量の大小となる。



出典 1。「超ひも理論とはなにか」竹内 著 内記事。

- ひも理論の始まり。1960年代。
- ハドロンとはクォークからできたもの。75P 素粒子の構成要素。
- 素粒子脈動エネルギー波形図はハドロン・サイズの大きなひもの物理である。
- 現在の超ひも理論における「ひも」のサイズははるかに微細なプランク・サイズであり、大きさのない点に相当する。観測不能なサイズにコンパクト化されたもので、観測不可能と仮定されている。
- 一方、素粒子脈動モデルは観測可能なサイズの超ひも理論である。電子や陽子、中性子等はそのサイズが観測されており、実測値として知られている。
- 脈動原理においては、もっと大きな原子や分子、万物が超対称性を具備しつつ観測不可能な超高速にて脈動しているモデルである。超ひも理論の物理をプランク・サイズ～素粒子サイズ～宇宙までの万物を表わす幾何学である。

出典 2。「面白くて眠れなくなる素粒子」竹内 薫 著

- 素粒子はブラックホールと同じ。大きさが違うだけ。
- 超ひも理論では、素粒子は基本的にブラックホールであるとする論文が多数ある。
- 素粒子の基本的特性は重さ、回転、電荷の三つだけ。…三つが同じなら区別できない。
- ブラックホールの基本的特性も重さ、回転、電荷の三つだけ。
- ブラックホールは時空に空いた穴。
- 超ひも理論では、素粒子は時空に空いた穴である。
- 現状の素粒子論では、その穴、素粒子は大きさの無い点とされている。
- 天体力学でも、地球等の天体の重力が中心にあるとしい計算している。点としい計算しても精密な計

算結果と一致する。

- 陽子はクォークが三つくっついている。グルーオンがバネと同じ性質「つよい力」を持っている。
- 点粒子が故に無限大が発生する。素粒子には広がりを持った理論が必要。
- 次元とは方向と広がり。
- 原子の広がり、「確率の雲」の大きさは  $10^{-8}$  乗 cm
- 超ひもの広がり  $10^{-33}$  乗 cm。
- 物質をつくっている電子やクォークは回転が  $1/2$ 、力を伝える光子やウイークボソンは回転が  $1$ 。
- 超ひもの端が磁石で鉄板にくっついてすべっているイメージが膜「D ブレーン」。境界条件。
- D ブレーンは振動する。

出典: Wikipedia。 弦理論。

## 目次

- [1 概要](#)
- [2 歴史](#)
  - [2.1 弦理論以前](#)
  - [2.2 ハドロンの弦理論](#)
  - [2.3 弦理論の衰退](#)
  - [2.4 超弦理論へ](#)
- [3 登場する粒子](#)
- [4 背景時空と真空状態](#)
- [5 弦の場の理論](#)
- [6 参考文献](#)
- [7 脚注](#)

## 概要

1970 年に南部陽一郎、レオナルド・サスキンド、ホルガー・ベック・ニールセン (Holger Bech Nielsen<sup>[en]</sup>)<sup>[1]</sup> が独立に発表したハドロンに関する理論によって登場したものの、量子色力学にその座を譲った。しかし、1984 年にマイケル・グリーンとジョン・シュワルツ (John Henry Schwarz) が発表した超対称性及び、カルツァ=クライン理論を取り入れた超弦理論 (superstring theory) によって、再び表舞台に現れた。4 つの基本相互作用を統一する試みとして注目されている。

最近では、超弦理論や M 理論を含む広い意味で「弦理論 (string theory)」と呼ぶことも多い<sup>[2]</sup>が、ここでは超対称性を持たないボゾン弦 (bosonic string) について記述する。

## 歴史

### 弦理論以前

## S 行列理論

弦理論はヴェルナー・ハイゼンベルクによって 1943 年に始められた研究プログラムに由来している。そのプログラムは S 行列理論と呼ばれ、物理法則を根本的に考えなおすものであった。この理論は、1950 年代から 1960 年代に渡って著名な理論家たちによって支持され発展を見せたが、1970 年代に評価が薄れ、1980 年代に研究は途絶えた。いくつかのアイデアは根本的に間違っており、量子色力学が強い相互作用を説明する理論として取って代わったため、この理論は現在は使われていない。

1940 年代までに陽子および中性子は電子のような点様粒子ではないことが明らかになっていた。それら粒子の磁気モーメントはスピン-1/2 のチャージを持つ点様粒子のものとは大きく異なっていて、この違いは小さな摂動が原因と考えるには大きすぎた。それらの粒子間の相互作用は非常に強かったので、その散乱特性は点様ではなく小さな球体のような振る舞いをした。ハイゼンベルクは強い相互作用をする粒子は事実上広がりを持つ物体であると提唱し、広がりのある相対論的粒子については物理法則の適用に困難があるため、彼は時空点の観念は原子核スケールでは成立しないとすることを提案した。

しかし、時空の仮定なしに物理理論を形式化することは困難である。ハイゼンベルクは、この問題に対する解決策は実験によって計測される観測可能な量に焦点を当てることであると考えた。もしミクロな物理量を古典的な検出素子に転送できるなら、実験はミクロな量しか観測しない。異なる運動量状態の量子重ね合わせが無限大に発散する物体は安定な粒子である。

ハイゼンベルクは、時空が信頼できないときでさえ、実験と無関係に定義される運動量状態の概念は依然として機能するとした。彼が根本的であると定義した物理量は入射する粒子集団(散乱前)が反射した粒子集団(散乱後)へと変化する量子力学的な振幅(散乱振幅: 反応の起こりやすさ)であり、彼はその間にどんな段階も存在しないとされた。

S 行列は散乱前の粒子の重ね合わせがどのように散乱後の粒子に変化するかの遷移状態を記述する。ハイゼンベルクは S 行列を直接研究することで時空の構造についてはどんな仮定もしないでおくことを提案した。しかし、中間的な段階なしに一段階で遠い過去から遠い未来への遷移が起こるとき、どんな量も計算することが困難となる。場の量子論において、その中間的な段階は場のゆらぎまたは等価な仮想粒子のゆらぎである。この提案された S 行列理論では、局所的な量は一切存在しない。

ハイゼンベルクは S 行列を決定するためにユニタリ作用素を用いることを提案した。このとき考える全ての状況において、振幅の二乗の総和は 1 となる。場の量子論において、基本的な相互作用が与えられると、この性質を用いて摂動級数によって順々に振幅を決定することができる。しかし、多くの場の量子論において、その振幅は高エネルギーへ急速に増加するためユニタリ S 行列を作ることができない。ユニタリ性は散乱を決定するのに高エネルギーの振る舞いに関する余分な仮定を必要としたため、この提案はあまり注目されなかった。

ハイゼンベルクの提案は 1950 年代後半になって、ヘンリック・クラマースおよびラルフ・クローニツヒ (en)によって発見されたような分散関係が形式化されるべき因果律の考えを許容するということが認識されてきたことで、再び注目を浴びることになった。因果律とはすなわち、ミクロのスケールでは過去と未来の観念が明確に定義されていないとしても、未来の出来事が過去の出来事に対して影響を及ぼさないであろうという観念である。その分散関係は S 行列の解析的性質であり、それらの性質はユニタリ性単独から得られる条件よりも厳しいものであった。

この方法の著名な賛同者は Stanley Mandelstam (en) および ジェフリー・チュー (en) であった。Mandelstam は新しい強力な解析形式である二重分散関係を 1958 年に発見し、これが解決困難な強い相互作用における発展の鍵となるだろうと考えた。

## くりこみ理論

ニュートン 以来の質点の概念をそのまま用いて場の量子論を取り扱う場合、しばしば無限大の発散による困難を伴う。この問題に対して、朝永-シュウィンガー-ファインマンらがそれぞれ独立に、くりこみ理論によってこの発散を防ぐ技法を創出し、点粒子のままでの電磁力場の量子論的計算を可能にした。これ以後も弱い相互作用、強い相互作用にくりこみ理論を適用する数学的技法が見い出され、点粒子による表現はその後も継続されることとなった。

## ハドロンの弦理論[編集]

### レッジェ理論

1950 年代から 1960 年代に渡って、強い相互作用をするかつてなく高いスピンスピンの粒子が多く発見された。そして、それらはすべて基本粒子ではないことが明らかになった。坂田昌一らは、それらの粒子を複合粒子として理解するモデルを提唱した(坂田模型)。坂田模型は、1960 年代になって マレー・ゲルマン および ジョージ・ツワイク による クォーク模型 へと発展し、実験との矛盾が解消された。クォーク模型は、複合粒子を構成する基本粒子の チャージ を分数にすること、およびそれらの基本粒子はまだ観測されていない粒子であると考えることによって完成した(坂田模型は、すでに観測されていた 陽子、中性子 および ラムダ粒子 を基本粒子と考えていた)。一方、ジェフリー・チューのアプローチは分数チャージを導入せず、仮説上の点様の基本粒子ではなく実験的に計測可能な S-行列要素にのみ焦点を当ており、坂田模型やクォーク模型よりも主流とみなされていた。チューは、ハドロンには基本粒子はなく、お互いがその他のハドロン粒子を構成しあっていると考えていた(ブーツストラップ模型)。

1958 年、イタリアの若い理論家の トゥーリオ・レッジェ は、ハドロンの 散乱実験 において、共鳴状態の 静止質量 の 2 乗と スピン角運動量 との間に直線関係があることを見出した(直線レッジェ軌道)。そして、量子力学における 束縛状態 はこの 角運動量 のレッジェ軌道によって分類できることを発見した。この考えは Mandelstam、Vladimir Gribov (en) および Marcel Froissart (en) による 相対論的量子力学 として一般化された。このとき使用された数学的方法は、アルノルト・ゾンマーフェルト および Kenneth Watson (en) によって十年前に発見されていた。

ジェフリー・チュー および Steven Frautschi (en) は 中間子 は直線状のレッジェ軌道を作ることを認識した。レッジェ理論によれば、直線状のレッジェ軌道を持つこれらの粒子の散乱は大きな角度で指数関数的に急速に落ち込むというとても奇妙な振る舞いすることが示唆された。そして、散乱振幅がレッジェ理論の要請により漸近的な形を取るような複合粒子の理論を構築することが望まれた。大きな角度においてその相互作用の力は急速に落ち込むので、その散乱理論はいくぶん全体論的 (holistic) でなければならぬと推測された。粒子が点様でない場合の散乱は、高エネルギーで大きな角度の偏差を導く。

### 双対共鳴模型

この種の最初の理論である 双対共鳴模型 は、ガブリエーレ・ヴェネツィアーノ によって構築された。1968 年にヴェネツィアーノが発表したこの共鳴モデルは、レッジェ軌道を説明する公式を「散乱振幅」として表現し

た(ヴェネツィアーノ振幅)。それには s チャンネルと t チャンネルという二通りの記述が可能であった。しかし、その双対性の物理的な意味は不明であった。

ヴェネツィアーノは、オイラーの ベータ関数をレジュエ軌道上の粒子について 4 粒子散乱振幅データを記述するために使うことができるであろうと記した。ヴェネチアーノ散乱振幅は木庭二郎およびホルガー・ベック・ニールセンによってすぐに N 粒子の散乱振幅に一般化された。これは現在、Miguel Virasoro ([en](#)) および Joel A. Shapiro ([en](#)) によって閉じた弦として認識されているものに当たる。強い相互作用の双対共鳴モデルは 1968 年から 1974 年までは主要な研究テーマであった。

## 弦理論。

南部、サスキンド、ニールセンによって独立に発表されたハドロンの弦理論は、この s チャンネルと t チャンネルの双対性を説明可能なモデルとして登場した。彼らは、核力を表現したオイラー形式のモデルを振動する一次元の弦とする物理的解釈を提示した。この理論では、長さ  $10^{-15}$ m オーダーの一次元の弦が回転、振動しており、モード、エネルギーの異なる弦の運動が、それぞれ異なるハドロンの粒子として観察される。また、上記の s チャンネルと t チャンネルはトポロジー的に同一のものと思なす事ができる。

南部はブルーボックスにおいて、一般にもわかりやすい説明を行っている<sup>[3]</sup>。それによると、1964 年にゲルマンとツワイクによって提唱されたクォークは、点としての粒子ではなく、弦(ひも)の端部に相当するとみなす。ハドロンは 3 個(バリオン)または 2 個(メソン)のクォークから構成されていると考えられているが、ハドロンから単体のクォークを分離する事はできない(クォークの閉じ込め)。弦理論によってこれを定性的に説明可能である。仮に弦(ひも)を切断する事ができたにせよ、「弦(ひも)の先端」を単独で取り出す事は不可能であり、切断された弦(ひも)にはいつまでも端部が存在する。

1974 年、ジョン・シュワルツおよび Joel Scherk ([en](#))、そして独立に米谷民明は、弦振動のボース粒子の様な振る舞いを研究し、それらの性質が厳密に重力(仮説上の重力の“メッセンジャー”粒子である重力子)の性質と合致することを発見した。物理学者たちはこの弦理論の発展の余地を過小評価していたため、シュワルツおよび Scherk は弦理論は流行するのに失敗したと議論していた。この議論の結果、ボソン弦理論は弦理論として最初に多くの生徒に教えられることとなり、後の発展につながった。

## 弦理論の衰退[編集]

しかし、ハドロンの弦理論は様々な欠陥を含んでいた。この弦に基づく強い力の記述は、実験結果と直接矛盾する多くの予測を算出した。まず、弦の運動が安定して維持可能な時空は 26 次元に限られていた。また、弦のスピンは整数であり、ハドロンの理論にもかかわらずボース粒子的な性質を有していた。この他に閉じた弦の振動の種類には重力子や、理論の不安定性を表すタキオンの存在が要請された。

これらの欠陥が判明し出した頃に、ゲージ場の粒子であるグルーオンによって力が媒介されるとする量子色力学の発展が 1974 年に始まり、強い相互作用の特性を正確に記述できることがわかってきた。南部はクォークの閉じ込めについて、弦をいくら切断しても端部を取り出せず、新たな端を形成するだけとイメージした。これに対して、量子色力学においては、二つのクォークが引き離されると、単純にそれ以上引き離すよりも、その間の真空から新たにクォークと反クォークの対を生成し、新たな 2 個のクォークにより構成される粒子になる方が、必要なエネルギーが低いと考える。

このため、ほとんどの研究者が弦理論から撤退していった。当時の状況に関して南部は「結局は、紐理論、いわゆるハドロンの紐模型はだめだということが結論されたのは 1974 年ごろだと思っているのです。1974 年夏、アスペンのいわゆる合宿の研究会にそのころの研究家のほとんど全部が集まったのです。そのときの結論として、どうもこれはだめだろうということになったということ、吉川(圭二)さんから聞きました」と述べている<sup>[4]</sup>。現在ではハドロンの弦理論は、クォーク間のゲージ場の力線を半定量的に表現した現象論的モデルと考えられている。

## 超弦理論へ[編集]

詳細は「超弦理論#歴史」を参照

ハドロンの弦理論が失敗に終わった後も、ごく一部の研究者は重力を含んだ系を記述できる弦理論に魅力を感じ、研究を継続していた。1970 年代前半、ジョン・シュワルツとアンドレ・ヌボー (en) は、整数スピンのボソンの弦に半整数スピンのフェルミ粒子の性質をつけ加えた、超対称性の弦理論を作った。しかし同時期にゲージ理論による大統一の研究が盛んになっており、弦理論は忘れられた存在となった。

この間にもジョン・シュワルツとマイケル・グリーンは粘り強く研究を継続し、1984 年には相対論と整合性があり、量子化された超対称性などをとりいれて超弦理論を打ち立てた。彼らは弦の長さを  $10^{-35}$ m オーダーの微小なものとし、弦の運動する時空を 10 次元とした。また、特殊な内部対称性を用いることで、数学的矛盾の無い物質の最小単位の理論とすることに成功した。

尚、1995 年、エドワード・ウィッテンにより提唱された M 理論では、5 つの超弦理論が 11 次元の一つの理論に統合されている。

## 登場する粒子[編集]

場の量子論では、クォーク・レプトン・ゲージ場といった多くの種類の量子場が存在する事を前提としている。弦理論の描像では対照的に、全ての物理的実体は、ただ一種類の弦の様々な状態に対応する。

弦は自然長ゼロ、自然長の状態での質量もゼロ(だが特殊相対性理論から、弦が振動エネルギーを持つ

時には  $E=mc^2$  の関係式で質量を持つ)で、張力  $T_0 = \frac{1}{2\pi\alpha'\hbar c}$  のみを手で与える。張力はたとえ変えても系全体が相似に拡大縮小されるだけなので、内部で起こる物理には影響を及ぼさない。 $\alpha'$ はレッジェの傾きパラメータと呼ばれ、歴史的な理由から張力そのままではなくこのパラメータが用いられる。あるいは、

長さの次元を持ったパラメータ  $l_s = \hbar c \sqrt{\alpha'}$  を代わりに用いる事がある。ハドロンの弦理論では核子の大きさ程度、量子重力理論としての弦理論ではプランク長程度に取られる事が一般的である。作用(≡弦の持つエネルギー)は、空間に時間を加えた二次元面の表面積に比例し、南部＝後藤作用と呼ばれる。あるいは同値であるが経路積分での扱いが容易なポリヤコフ作用が用いられる事もある。

観測される粒子は、ごく短い弦が振動しながら飛び回る状態として記述される。以下最も簡単な例として、26 次元時空の平坦な時空について、閉じた弦と開いた弦の振る舞いを見る。

まず開いた弦について、最も低いエネルギーの状態は振動せず飛ぶ弦である。次の状態として、ある一つの方向に自由端定在波一倍振動をする弦がある。量子的な弦なので振幅は量子化され、1量子分のエネルギーを持った状態が第一励起状態となる。さらに、量子効果として振動の零点エネルギーへの寄与がある。相対論的な弦の場合、この量子効果はマイナスに働き、最低エネルギーの開弦は負の質量二乗(虚数質量)を持つスカラー粒子、開弦タキオンとなる。一方、第一励起状態の弦は質量ゼロとなり、横波 24 成分を持つゲージ粒子となる。

閉じた弦は定在波だけでなく進行波を許すので、物理的自由度は二倍となる。ただし、弦が内部構造を持たない実体であるという制限から、状態の数は減る。その結果、基底状態は閉弦タキオン、第一励起状態は  $24^2$  の成分を持ったゼロ質量テンソル粒子で、うち対称な成分が重力子、トレース成分がディラトン、反対称な成分が 2-形式ゲージ粒子となる。2-形式ゲージ粒子は、粒子が持つ電荷と結合するゲージ粒子の拡張で、弦が持つストリングチャージと結合する。

これより重い状態は、 $l_0$  をプランク長程度とすると最低でも  $1/\sqrt{\alpha'} = \text{プランク質量}$  の質量を持つため、とらえず無視される場合が多い。

## 背景時空と真空状態[編集]

弦は空間的広がりを持つため、空間の形によって運動の形態が変わりやすいという特徴がある。たとえばカルツァ=クライン理論のような空間座標の巻き込みコンパクト化を、特に小半径の場合で考えると、粒子の場合は波長が短くなる事によってそちら側への励起が単純に起こりづらくなるが、弦の場合は「巻き付き」という、半径が小さいほど励起しやすいモードが存在する。結果的に、半径が  $R$  の時と  $1/R$  の時の物理的自由度の数が等しくなる(T 双対性)

これに加え、重力子の見かけ上の運動方程式はほぼアインシュタイン方程式になり、一般相対性理論が与える重力場の解が弦理論の古典解となる。

特に重要なのはブラックブレンと呼ばれる「質量を持った膜」の解である。一般相対論とは独立に、弦理論から T 双対性を用いて、通常空間方向を体積 0 の空間と対応させる事によって得られる D ブレン は、ブラックブレンの弦理論による説明であるとされる。弦理論からの解釈によれば、D ブレンは開弦の端点が「繋がる」事ができ、開弦の運動がその空間に制限される。N 枚の D ブレンが重なっていた場合、開弦から得られるゲージ場はどのブレンに端点を持つかによって  $N^2$  の種類を持ち、 $U(N)$  の 非可換ゲージ理論を再現する。T 双対性との兼ね合いから、全く自由に見える開弦も、全空間を満たす D25 ブレンに繋がる事を要請される。

ディラトン場は結合定数の強さを与える。

弦理論は場の種類はおろか、調節可能なパラメータすらない「唯一の理論」である。しかしこれら空間のコンパクト化やブレンの配位などを用いて、一つの理論に対して無数ともいえる「真空状態」が導かれ、弦はそれぞれの真空で異なった振る舞いをする。ただし後述するが、ボソン弦理論では全ての D ブレンは安定した存在ではない。ブレン配位が威力を発揮するのは超弦理論においてである。どのような理論が得られるか、特に我々の 4 次元時空に相当するものが得られるのか、については、弦理論の主要な関心事である。

# 弦の場の理論

現在の定式化では、南部＝後藤作用もしくはポリヤコフ作用から出発し、弦の単一過程の確率振幅を求める事が出来る。場の量子論とのアナロジーで言えば、これはファインマンダイアグラムの一つ分に相当する。全ての過程のダイアグラムを足し合わせる事によって振幅を求める事は可能とされるが、これは理論が摂動論で定義されたに過ぎない。場の量子論では場というもので作用を書き下し、それを摂動展開する事によってファインマンルールを得るが、弦理論でのこれに相当する定式化、弦の場の理論はミチオ・カクと吉川圭二による提唱以来、様々な研究が重ねられてきたが、未完成である。

例えばDブレーンは、非摂動的な対象の一つである。Dブレーンは開弦から出来ており、ボソン弦理論の全てのDブレーンは開弦由来のタキオンを含む。タキオンの存在は場の理論においては、その状態が不安定である事を意味し、結論としてボソン弦理論の全てのDブレーンは崩壊する。崩壊後の状態は、Dブレーンがないため開弦が存在できず、もはや弦での記述が不可能となる。弦の場の理論はこのような状態の記述が出来ると期待され、実際に数値計算でならばポテンシャルが求められている。極めて小さいエネルギーで安定状態が存在するとされる(タキオン凝縮, en)。

閉弦タキオンに関してはこのような物理的解釈すら出来ない。これをもってボソン弦理論は不完全であり、弦の完全な定式化のためには超対称性が必要不可欠であるとする立場がある一方、弦の場の理論の研究はなおも続けられている。