

SGC ライブラリ-80

# 超弦理論の基礎

弦とブレーンの導入から

今村 洋介 著

サイエンス社

# まえがき

本書の執筆のお話を数理学編集部より頂いたのは今から2年近く前、2009年のはじめのことであつた。喜んでお引き受けしたものの、弦理論についてはすでにいくつもの教科書が出版されており、そのような中でどうすれば読者の役に立つ本になるのか、前半の1年間はそのことで頭を悩ませた。

近年の弦理論の発展は多岐にわたるが、その中で中心的な役割を果たしているのはD-ブレーンである。D-ブレーンを初めとするブレーンの発見は、弦理論が単に「弦」の理論ではなく、様々な次元を持つものが揺らぎながら時空上に存在しているという新しい描像をもたらした。また、D-ブレーンは様々な双対性を通して弦理論そのものやゲージ理論などの理解に大きく役立っている。そこで本書でもD-ブレーンについて詳しく書きたいということは割と早い段階から考えていた。D-ブレーンの性質を調べる場合、多くの教科書ではまず弦の境界としてD-ブレーンを導入し、T-双対性に対する変換性などの情報を用いてブレーンの性質を導出するというのが一般的であるように思う。しかしそのような方法では説明することが多くなってしまい、ページ数が制限を越えそうであつたし、何よりも、他の教科書と同じような説明を与えても有用な本は書けないのではないかという不安があつた。そこで本書では、おそらく弦理論の本であればどんな本にでも書いてあるコンパクト化や双対性についての記述を（実は数十ページほどの下書きは書いてはいたのであるが）ばっさり削ることにした。そして、D-ブレーンの性質を（弦理論の本であるにもかかわらず）弦理論をできるだけ用いずに調べるために、D-ブレーンの「電磁気学」について詳しく述べることにした。つまり超重力理論から出発して、そこに含まれるゲージ場に関するゲージ不変性や保存則などを用いてブレーンの性質を決めていくという形を採用した。このような取り扱いをすることで、通常境界条件として導入される「硬い」ブレーンと違って、自由に形を変えることのできる「柔らかい」ブレーンのイメージを強調することができるのではないかと考えたのであるが、いかがであろうか。このような癖のある構成がどの程度成功しているかはわからないが、他の本にはあまり強調されない点を詳しく書いた部分が読者の役に立てば幸いである。

本書の執筆中には職場が東大から東工大へと移ることになり、ばたばたとしてなかなか本書に手をつけることのできない時期もあつた。そのような中で遅々として進まない私の執筆作業に付き合つて下さった編集部の平勢耕介氏にこの場を借りてお礼を申し上げたい。

2010年10月

今村 洋介

# 目次

第 1 章	はじめに	1
第 2 章	ボゾンの弦理論	6
2.1	二原子分子	6
2.2	弦の作用	11
2.3	弦の量子化	28
2.4	弦のスペクトル	36
2.5	零質量モード	39
2.6	背景場とワイル不変性	43
2.7	モジュラー不変性	47
第 3 章	超弦理論	53
3.1	Ramond–Neveu–Schwarz の定式化	53
3.2	Ramond セクター	60
3.3	高次元時空のスピンル	62
3.4	フェルミオン場と R-R 場	68
3.5	GSO 射影	72
3.6	超弦の零質量モード	77
3.7	Green–Schwarz の定式化	80
3.8	超重力理論	82
第 4 章	ブレーン	85
4.1	外微分形式	85
4.2	電磁気学の復習	89
4.3	高次元のゲージ場	96
4.4	チャージとブレーン	99
4.5	ディラックの量子化条件	103
4.6	IIA 型超重力理論	106
4.7	IIB 型超重力理論	109
4.8	弦理論におけるブレーン	114
4.9	境界を持つブレーン	115
4.10	ブレーンの束縛状態	122

4.11	ボルン・インフェルド作用	129
<b>第 5 章</b>	<b>開弦と D-ブレーン</b>	<b>137</b>
5.1	弦の境界条件と D-ブレーン	137
5.2	開弦の量子化	143
5.3	D3-ブレーン上のゲージ理論	147
5.4	複数枚の D-ブレーンと非アーベルゲージ群	150
5.5	ゲージ理論の量子効果と D-ブレーン	157
5.6	タキオン凝縮	165
5.7	D-ブレーンの張力	166
<b>付録 A</b>	<b>補遺</b>	<b>169</b>
A.1	次元ごとのスピノルの性質	169
A.2	$\gamma^{\bar{a}}$ に対するクリフォード代数の導出	172
A.3	$n$ 次元球面の表面積	173
	参考文献	175
	索引	177

# 第 1 章

## はじめに

この世界に存在する様々な物質が単純な構成要素からなるという仮説は古くから存在していたが、20 世紀に入るとすべての物質は原子核と電子からなる原子によって構成されていることが明らかになり、その原子核もさらに小さな粒子である核子（陽子と中性子）から構成されていることも判明した。今ではそれら核子もさらにクォークと呼ばれる粒子から構成されていることが分かっている。

クォーク模型が確立する以前、1960 年代の素粒子論における大きな問題は、陽子や中性子などのバリオンと、それらの間の相互作用を生み出す粒子であるメソンをどのように記述するかということであった。バリオン、メソンといった、強い相互作用をする粒子はまとめてハドロンと呼ばれるが、実験のエネルギーが増大するとともに、多くのハドロンが発見され、それらすべてが内部構造を持たない素粒子であると考えられるよりも、より基本的な粒子が存在し、その束縛状態としてハドロンが形成されているとするのが自然に思われた。これらの粒子の間の相互作用は強い相互作用と呼ばれ、電磁相互作用で大きな成功を収めた摂動論的な取り扱いを適用することが不可能であった。

実際、強い相互作用は電磁相互作用とは全く異なる性質をもっている。中でも強い相互作用の特色を表すものの一つに、ハドロンのスペクトルにおける、スピンとそのエネルギーの関係がある。ハドロンには様々な種類のものがあり、それらは固有のエネルギーとスピンをもっている。これらを横軸にスピン  $J$ 、縦軸にエネルギー  $E$  をとってプロットしてみると、その間に次のような特徴的な関係が存在することがわかった。

$$E^2 \geq \frac{J}{\alpha'}. \quad (1.1)$$

$\alpha'$  は定数であり、 $c = \hbar = 1$  の単位系において (長さ)<sup>2</sup> の次元をもつ。この性質は、例えばクーロンポテンシャルによる束縛状態としては現れない。

実は、(1.1) の関係式は、メソン粒子がある一定の張力を持つひもであり、そ

## 第 2 章

# ボゾンの弦理論

### 2.1 二原子分子

弦には様々な内部の振動状態があることに対応して、1つの弦によって様々な粒子を記述することができる。しかしこれは弦に限ったことではなく、内部構造を持つ系には一般に成り立つことである。弦については次の節から詳しく説明するが、まず練習問題として次のラグランジアンによって与えられる二原子分子を考えることから始めよう。

$$L = \frac{m_1}{2} \dot{\mathbf{r}}_1^2 + \frac{m_2}{2} \dot{\mathbf{r}}_2^2 - \frac{k}{2} |\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2|^2. \quad (2.1)$$

$\mathbf{r}_1$  と  $\mathbf{r}_2$  は分子を構成する 2つの原子それぞれの座標であり、それぞれの原子は内部構造を持たない質量  $m_1$  および  $m_2$  の質点であるとする。2つの原子を束縛しているポテンシャルは、計算を簡単にするために調和振動子ポテンシャルを用い、バネ定数を  $k$  とした (図 2.1)。

このような系は

$$\mathbf{R} = \frac{m_1 \mathbf{r}_1 + m_2 \mathbf{r}_2}{m_1 + m_2}, \quad \mathbf{r} = \mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2 \quad (2.2)$$

によって定義される重心座標  $\mathbf{R}$  と相対座標  $\mathbf{r}$  によって書き替えることで簡単に解くことができる。これらの変数を用いてラグランジアンを書き替えれば

$$L = \frac{M}{2} \dot{\mathbf{R}}^2 + \frac{\mu}{2} (\dot{\mathbf{r}}^2 - \omega^2 \mathbf{r}^2) \quad (2.3)$$

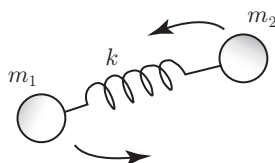


図 2.1 単純化された二原子分子のモデル。

# 第 3 章

## 超弦理論

### 3.1 Ramond–Neveu–Schwarz の定式化

#### 世界面上の超対称性

ボゾンの弦理論にはいくつかの困難があった。一つはタキオン場を含むことである。これは前に述べたように、理論の矛盾を意味するわけではなく、真空状態の不安定性を意味している。タキオンが凝縮することによって実現されると期待される真の真空がどのようになっているかということは興味深い問題であり、弦理論の背景時空の性質を理解する上で重要であるが、今のところ解決されておらず、そのためにボゾンの弦理論の応用範囲は限られたものとなる。

ボゾンの弦理論のもう一つの難点は、それがフェルミオンを含まないことである。我々の世界を構成する物質（クォークとレプトン）はフェルミオンであるから、現象論的な応用を考えるならば、フェルミオンの存在は不可欠であり、フェルミオンを含む新たな弦理論が望まれる。

これらの難点を解決するために、弦理論に超対称性を導入することによって生まれたのが超弦理論である。超対称性はボゾンとフェルミオンの間の対称性であり、ボゾンと対を成すフェルミオンの存在を要求する。ボゾンとフェルミオンはスピンの異なるため、それらをつなぐ超対称性の生成子は統計性がフェルミオンのように、0 でないスピンをもっていなければならない。超対称性は様々な次元の時空において定義することができるが、それらは一般的にスピノル添え字を持ち、次の反交換関係を満足する。

$$\{Q_a, Q_b\} = 2(C\Gamma_M)_{ab} P^M + \dots \quad (3.1)$$

“...” の部分は中心電荷と呼ばれる生成子を含む項であるが、ここでは省略した。  $Q_a$  はそれぞれの成分がエルミートであるようなスピノルである。  $C\Gamma^M$  は荷電共役行列とディラック行列の積であり、これらについては後で詳しく説明する。一般には  $Q_a$  はスピノル添え字以外の添え字を持つ場合もあるが、その

# 第 4 章

## ブレーン

### 4.1 外微分形式

この章では、超弦理論の低エネルギー有効理論に含まれる反対称テンソル場に注目し、それらに関するゲージ対称性や運動方程式からどのような結論が得られるかということについて議論する。超弦理論に現れる反対称テンソル場の中には添え字の数が多いものもあり、いちいちそれらの添え字を書いているのは式が見にくくなってしまふ。そこで、添え字を用いずに反対称テンソル場についての式を書く外微分形式と呼ばれる表記法を採用するのが便利である。

ある空間上の座標を  $x^\mu$  としよう。空間は曲がっていてもよいし、ローレンツ計量を持つ時空であってもよい。

空間の各点において、微分形式の基底  $dx^\mu$  を導入する。この基底に対して、“ $\wedge$ ” という記号で表されるウェッジ積を導入する。これは次のような反対称性および結合則を満足する。

$$dx^\mu \wedge dx^\nu = -dx^\nu \wedge dx^\mu, \quad (4.1)$$

$$(dx^\mu \wedge dx^\nu) \wedge dx^\rho = dx^\mu \wedge (dx^\nu \wedge dx^\rho). \quad (4.2)$$

結合則のために、3 つ以上の微分形式の積を表すときに括弧を用いる必要はない。

$n$  個の下付き添え字を持つ反対称テンソル場  $A_{\mu_1 \dots \mu_n}$  があるとしよう。このテンソル場に対応する  $n$  形式と呼ばれるものを次のように定義する。

$$A_n = \frac{1}{n!} A_{\mu_1 \dots \mu_n} dx^{\mu_1} \wedge \dots \wedge dx^{\mu_n}. \quad (4.3)$$

逆に、 $n$  形式  $A_n$  に対して反対称テンソル場  $A_{\mu_1 \dots \mu_n}$  のことを  $A_n$  の成分と呼ぶ。 $n$  形式であることが明らかである場合には添え字  $n$  を省略して単に  $A$  とも書く。 $n$  を  $A_n$  の次数と呼ぶ。

$m$  形式と  $n$  形式の間のウェッジ積は  $m+n$  形式になる。



## 第 5 章

# 開弦と D-ブレーン

### 5.1 弦の境界条件と D-ブレーン

この章では、開弦、すなわち端を持つ弦の性質を考える。第 2 章と第 3 章では閉弦のみを考えてきた。しかし弦理論の起源であるハドロンのモデルにおいては、メソン粒子は両端にクォークがくっついた開弦として解釈されるから、弦理論の誕生の経緯からも閉弦だけではなく開弦を考えることは自然なことである。

実際、第 4 章ではチャージの保存則と矛盾することなく弦は D-ブレーン上に端を持つことができることを見た。弦の結合定数  $g_{\text{str}}$  が十分小さい場合を考えると、D-ブレーンの張力  $T_{Dp} \propto g_{\text{str}}^{-1}$  は大きくなるから、ブレーンを動かない背景と考え、そこに端を持つ弦だけが運動するような状況を考えることができる (図 5.1)。その場合には閉弦について第 2 章や第 3 章で行ったのと同様な方法で開弦を量子化することが可能である。閉弦の量子化は背景時空を伝播する零質量の場を与えたが、D-ブレーンの上に両端をもち、その上に拘束された開弦の量子化は D-ブレーン上の場を与える。以下で見るように、これは D-ブレーンの振動モードを表すスカラー場や第 4 章においてゲージ対称性の考察から導入された D-ブレーン上のゲージ場を含む。

議論の出発点として開弦の作用を与えよう。まずはボゾンの部分について



図 5.1 D ブレーン上の開弦。

# 付録 A

## 補遺

### A.1 次元ごとのスピノルの性質

各次元でのディラック行列やスピノルの性質を調べるにはディラック行列  $\Gamma^M$  や 3.3 節において定義された行列  $C, D$  を具体的に構成してみるのが簡単である。ユークリッド空間の場合には  $\Gamma^I$  は式 (3.39) によって構成できる。もし時空の次元が  $d$  であり、計量  $\eta^{IJ}$  が  $d_+$  個の  $+1$  成分と  $d_-$  個の  $-1$  成分を持つ場合には  $-1$  成分に対応する  $d_-$  個の  $\Gamma^I$  の定義の際に虚数単位  $i$  を掛けておけばよい。さらに行列  $C$  は反対称なすべての  $\Gamma^I$  の積として、または対称なすべての  $\Gamma^I$  の積として定義することができる。(これは奇数次元では定数因子を除き同じものを与える。) また、 $D$  については、反エルミートなすべての  $\Gamma^I$  またはエルミートなすべての  $\Gamma^I$  の積として定義することができる。(これも奇数次元では定数因子を除き同じものを与える。)

ここでは、 $d_- = 1$  のミンコフスキー時空の場合のスピノルに関する性質についてまとめておく。この場合、 $D$  は常に  $\Gamma^0$  (添え字 0 は計量の  $-1$  成分に対応する時間方向を表す) に比例するように選ぶことができる。 $D$  はエルミートにも、反エルミートにも選ぶことができるが、それにより  $D\Gamma^I$  のエルミート性が決まる。次の 2 つの式は複合同順である。

$$D^\dagger = \pm D, \quad (D\Gamma^I)^\dagger = \mp (D\Gamma^I). \quad (\text{A.1})$$

また、偶数次元であればカイラリティ行列に対して

$$(D\Gamma)^\dagger = \mp (D\Gamma) \quad (\text{A.2})$$

も成り立つ。

2 つ以上のディラック行列を含む  $D\Gamma^I\Gamma^J$  のような行列のエルミート共役はこれらを組み合わせる

## 参考文献

- [1] Y. Nambu, Lecture notes at the Copenhagen symposium (unpublished, 1970),
- [2] T. Goto, *Prog. Theor. Phys.* **46** (1971) 1560.
- [3] M. B. Green and J. H. Schwarz, *Phys. Lett.* **149B** (1984) 117.
- [4] J. Polchinski, *Phys. Rev. Lett.* **75** (1995) 4724.
- [5] A. M. Polyakov, *Phys. Lett.* **103B** (1981) 207–211.
- [6] M. Virasoro, *Phys. Rev.* **D1** (1970) 2933.
- [7] P. Ramond, *Phys. Rev.* **D3** (1971) 2415.
- [8] A. Neveu, J. H. Schwarz, *Nucl. Phys.* **B31** (1971) 86.
- [9] W. Rarita and J. Schwinger, *Phys. Rev.* **60** (1941) 61.
- [10] F. Gliozzi, J. Scherk, and D. Olive, *Nucl. Phys.* **B122** (1977) 253.
- [11] M. Huq and M. A. Namazie, *Class. Quantum Grav.* **2** (1985) 293.
- [12] L. Romans, *Phys. Lett.* **169B** (1986) 374.
- [13] E. Cremmer, B. Julia and J. Scherk, *Phys. Lett.* **76B** (1978) 409.
- [14] E. Witten, *Nucl. Phys.* **B443** (1995) 85. [arXiv:hep-th/9503124].
- [15] P. Pasti, D. Sorokin, M. Tonin, *Phys. Lett.* **B352** (1995) 59–63; *Phys. Rev.* **D52** (1995) 4277–4281.
- [16] C. Vafa, *Nucl. Phys.* **B469** (1996) 403. [arXiv:hep-th/9602022].
- [17] M. K. Prasad and C. M. Sommereld, *Phys. Rev. Lett.* **35** (1975) 760.
- [18] E. B. Bogomolny, *Sov. J. Nucl. Phys.* **24**, 449 (1976) [*Yad. Fiz.* **24** (1976) 861].
- [19] G. 't Hooft, *Nucl. Phys.* **B79** (1974) 276.
- [20] A. M. Polyakov, *JETP Lett.* **20** (1974) 194 [*Pisma Zh. Eksp. Teor. Fiz.* **20** (1974) 430].
- [21] J. D. Bekenstein, *Phys. Rev.* **D7** (1973) 2333; *Phys. Rev.* **D9** (1974) 3292.
- [22] S. W. Hawking, *Phys. Rev.* **D14** (1976) 2460; *Comm. Math. Phys.* **43** (1975) 199; *Comm. Math. Phys.* **87** (1982) 395; *Phys. Rev.* **D18** (1978) 1747.
- [23] A. Strominger and C. Vafa, *Phys. Lett.* **B379** (1996) 99. [arXiv:hep-th/9601029].
- [24] N. Seiberg and E. Witten, *Nucl. Phys.* **B431** (1994) 484. [arXiv:hep-th/9408099].
- [25] N. Seiberg and E. Witten, *Nucl. Phys.* **B426** (1994) 19. [Erratum-*ibid.* **B430** (1994) 485] [arXiv:hep-th/9407087].
- [26] A. Sen, *Nucl. Phys.* **B475** (1996) 562. [arXiv:hep-th/9605150].
- [27] G. Veneziano, *Nuovo Cim.* **A57** (1968) 190.
- [28] Y. Nambu, “Quark model and the factorization of the Veneziano amplitude”, in *Symmetries and quark models*, ed R. Chand (Gordon and Breach), p.269 (1970).
- [29] P. Goddard, J. Goldstone, C. Rebbi and C. B. Thorn, *Nucl. Phys.* **B56** (1973) 109.

- [30] M. B. Green and J. H. Schwarz, *Nucl. Phys.* **B181** (1981) 502.
- [31] M. B. Green and J. H. Schwarz, *Phys. Lett.* **B109** (1982) 444.
- [32] M. B. Green and J. H. Schwarz, *Phys. Lett.* **B136** (1984) 367.
- [33] A. Neveu and J. Scherk, *Nucl. Phys.* **B36** (1972) 155.
- [34] T. Yoneya, *Lett. Nuovo Cim.* **8** (1973) 951.
- [35] T. Yoneya, *Prog. Theor. Phys.* **51** (1974) 1907.
- [36] J. Scherk and J. H. Schwarz, *Nucl. Phys.* **B81** (1974) 118.
- [37] J. Dai, R. G. Leigh and J. Polchinski, *Mod. Phys. Lett.* **A4** (1989) 2073.
- [38] R. G. Leigh, *Mod. Phys. Lett.* **A4** (1989) 2767.
- [39] P. Hořava, *Nucl. Phys.* **B327** (1989) 461.
- [40] E. Witten, *Nucl. Phys.* **B460** (1996) 335. [arXiv:hep-th/9510135].
- [41] A. Hanany and E. Witten, *Nucl. Phys.* **B492** (1997) 152. [arXiv:hep-th/9611230].
- [42] R. C. Myers, *JHEP* **9912** (1999) 022. [arXiv:hep-th/9910053].
- [43] A. Sen, *JHEP* **9808** (1998) 012. [arXiv:hep-th/9805170].
- [44] N. Berkovits, A. Sen and B. Zwiebach, *Nucl. Phys.* **B587** (2000) 147.  
[arXiv:hep-th/0002211].
- [45] A. Sen and B. Zwiebach, *JHEP* **0003** (2000) 002. [arXiv:hep-th/9912249].
- [46] L. Brink, J. H. Schwarz and J. Scherk, *Nucl. Phys.* **B121** (1977) 77.
- [47] M. B. Green, C. M. Hull and P. K. Townsend, *Phys. Lett.* **B382** (1996) 65.  
[arXiv:hep-th/9604119].
- [48] M. Fukuma, T. Oota and H. Tanaka, *Prog. Theor. Phys.* **103** (2000) 425.  
[arXiv:hep-th/9907132].
- [49] A. Strominger, *Phys. Lett.* **B383** (1996) 44. [arXiv:hep-th/9512059].
- [50] H. M. Chan, *Phys. Lett.* **B28** (1969) 425.
- [51] J. E. Paton and H. M. Chan, *Nucl. Phys.* **B10** (1969) 516.
- [52] N. Arkani-Hamed, S. Dimopoulos and G. R. Dvali, *Phys. Lett.* **B429** (1998) 263.  
[arXiv:hep-ph/9803315].
- [53] L. Randall and R. Sundrum, *Phys. Rev. Lett.* **83** (1999) 3370. [arXiv:hep-ph/9905221].

# 索引

## ア

アインシュタイン計量, 112, 131  
アクシオン, 149  
アクシオン場, 110  
穴の数, 46  
アノマリー, 2  
色量子力学, 2  
因子化, 7  
ウィック回転, 23  
ウェッジ積, 85  
エントロピー, 3

## カ

開弦, 17, 137  
解析接続, 35  
外微分演算子, 86  
外微分形式, 85  
カイラリティ, 62, 63  
カイラリティ行列, 62, 63  
ガウス・ボンネの定理, 46  
荷電共役行列, 64  
換算質量, 7  
ガンマ関数, 168  
基底状態の縮退, 60  
基本領域, 50  
共形ゲージ, 22  
共形対称性, 3, 13  
共形場理論, 13  
共変的な量子化, 31  
グラビティノー, 83  
クリフォード代数, 62  
形式, 85  
弦計量, 112, 131

弦の結合定数, 45  
弦の張力, 14  
光錐ゲージ, 31  
光錐ゲージ量子化, 31  
光錐座標, 25, 31  
固定端条件, 139  
固有計量, 14, 21  
コンパクト化, 11

## サ

サイバーク・ウィッテン解, 3  
ジーナス, 46  
磁気的な結合, 101  
次元簡約, 107  
質量公式, 28  
シュウィンガー効果, 133  
自由エネルギー, 47  
自由端条件, 139  
小群, 38  
シンプレクティック・マヨラナススピノル, 172  
ストークスの定理, 89  
静的ゲージ, 15  
成分, 85  
 $\zeta$  関数, 35  
 $\zeta$  (ゼータ) 関数正則化, 35  
世界線, 12  
世界面, 4, 12  
ゼロモード, 60  
双対性, 54  
測地的, 46

## タ

楕円  $\theta$  関数, 75  
タキオン, 36

ダブリングトリック, 144  
チャージ, 3  
チャン・ペイトン因子, 150  
中心電荷, 53  
超共形対称性, 55  
超弦理論, 53  
超重力理論, 54  
超対称ゲージ理論, 3  
超対称性, 3, 53  
低エネルギーの有効理論, 83  
ディラック共役, 56, 65  
ディラック行列, 55, 56, 62  
ディラックスピノル, 63  
ディラックの量子化条件, 103, 104  
ディラトン場, 41, 110  
ディリクレ境界条件, 139  
ディンキン図形, 66  
デデキンド  $\eta$  関数, 51  
電氣的な結合, 101  
テンソル密度, 87  
転置, 117  
トーラス, 46  
トーフフト・ポリヤコフモノポール, 157  
トライアリティ, 66

## ナ

南部-後藤作用, 14  
ノイマン境界条件, 139

## ハ

背景時空, 11  
パウリ行列, 62  
ハドロン, 1  
ハナニー・ウィッテン効果, 127  
バリオン, 1  
反対称テンソル場, 3  
引き戻し, 88  
左回り部分, 25  
標準模型, 2  
標準理論, 2  
標的空間, 13  
ピラソロ条件, 26  
フィルツ変換, 173

フェルミオン, 3  
微分形式, 85  
部分積分, 89  
フラックスの量子化条件, 104  
ブラックホール, 3  
ブレーン, 3, 101  
ブレーンワールドモデル, 3  
閉弦, 17  
 $\beta$  関数, 44  
 $\beta$  汎関数, 44  
ボゴモルニーバウンド, 156  
ボゾン, 3  
ホッジ双対演算子, 86  
ポリヤコフ作用, 21  
ボルン・インフェルド作用, 129

## マ

マイヤー効果, 126  
マヨラナ共役, 65  
マヨラナスピノル, 66  
マヨラナ・ワイルスピノル, 66  
右回り部分, 25  
向き付け, 87  
メソン, 1  
モジュラー不変性, 51  
モジュラー変換, 50  
モノポール, 154

## ヤ

ヤコビ恒等式, 76  
ヤン・ミルズ理論, 3  
誘導計量, 14

## ラ

ラリタ・シュウインガー場, 70  
力学変数, 11  
臨界次元, 11, 39, 59  
レベル一致条件, 32

## ワ

ワイルアノマリー, 23  
ワイルスピノル, 64  
ワイル対称性, 22

ワイル変換, 23

ワインバーグ・サラム理論, 2

## 欧字

11 次元超重力理論, 108

I 型超弦理論, 54

II 型超弦理論, 54, 56

IIA 型超弦理論, 54, 77

IIB 型超弦理論, 54, 77

IIB 型超重力理論, 110

D1-ブレーンの張力, 131

D-ブレーン, 3, 114

$E_8 \times E_8$  ヘテロ型超弦理論, 54

F1-ブレーン, 114

F 理論, 114

Green-Schwarz (GS) の定式化, 54, 80

GSO 射影, 55, 74

Kalb-Ramond 場, 42

M 理論, 54, 109

Neveu-Schwarz(NS) セクター, 56

NS-NS セクター, 57

NS5-ブレーン, 114

PST 定式化, 110

$p$ -ブレーン, 101

Ramond-Neveu-Schwarz (RNS) の定式化, 55

Ramond(R) セクター, 56

R-R 場, 3

$SO(32)$  ヘテロ型超弦理論, 54

$W$ -ボゾン, 154

著者略歴

今村 洋介

いまむら ようすけ

1970 年生

1998 年 京都大学大学院理学研究科物理学・宇宙物理学専攻博士課程修了  
博士（理学）（1998 年 3 月京都大学）

2010 年 東京工業大学大学院理工学研究科准教授

現在 東京工業大学理学院物理学系准教授

専門 素粒子物理学

主要著書

岩波講座 物理の世界 素粒子と時空 5『素粒子の超弦理論』

江口徹・今村洋介（岩波書店，2005）

---

臨時別冊・数理学 SGC ライブラリ- 80

『超弦理論の基礎 弦とブレーンの導入から』（電子版）

著者 今村 洋介

2017 年 3 月 10 日 初版発行 ISBN 978-4-7819-9922-7

この電子書籍は 2011 年 1 月 25 日初版発行の同タイトルを底本としています。

---

数理学編集部

発行人 森平敏孝

TEL.(03)5474-8816

FAX.(03)5474-8817

ホームページ <http://www.saiensu.co.jp>

ご意見・ご要望は [sk@saiensu.co.jp](mailto:sk@saiensu.co.jp) まで。

---

発行所 © 株式会社 サイエンス社

TEL.(03)5474-8500 (代表)

〒151-0051 東京都渋谷区千駄ヶ谷 1-3-25

---

本誌の内容を無断で複写複製・転載することは、著者および出版者の権利を侵害することがありますので、その場合にはあらかじめサイエンス社著作権担当者あて許諾をお求めください。

組版 クオンタ