0.1　ブラックホール熱力学と量子重力 Black hole thermodynamics and quantum gravity

本項目では，ブラックホールと熱力学の関係を通して，量子重力について我々が学びうることを概説する．

1　プランクスケールと量子重力

自然界には次元をもつ基本定数として，ニュートン定数 G，光速度 c，プランク定数 $\hbar$ の 3 つが存在する．これらの定数の適当な組み合わせによって，次元をもったあらゆる量を表現することができる．

これが可能なのは，物理の基本単位は長さ，質量，時間の 3 つであり，したがって，3 つの基本定数があれば表現できるからである．具体的には，

$$\boxed{\begin{aligned} l_{\rm pl} &= \sqrt{\frac{G\hbar}{c^3}} \approx 1.6\times 10^{-35}{\rm m}\ , \\ m_{\rm pl} &= \sqrt{\frac{\hbar c}{G}} \approx 2.2\times 10^{-8}{\rm kg}\ , \\ t_{\rm pl} &= \sqrt{\frac{G\hbar}{c^5}} \approx 5.4\times 10^{-44}{\rm s}\ . \end{aligned}}$$

これらの量をプランクスケールと言い，たとえば $l_{\rm pl}$ を**プランク長さ**と呼ぶ（Planck 1900）．

プランクスケールは桁外れな量である．$l_{\rm pl}$ は陽子のコンプトン波長 $\hbar/(m_p c) \approx 2.1\times 10^{-16}$m と比べると極端に小さく，$m_{\rm pl}$ は大きな量とは思えないかもしれないが，陽子の質量（$m_p \approx 1.7\times 10^{-27}$kg）などと比べると極端に重い．

プランクスケールは，重力効果を表す G，相対論的効果を表す c，量子効果を表す $\hbar$ を含むことから，量子重力効果の典型的なスケールを表すと見られている．以下で議論するブラックホールと熱力学の関係から，この量子重力効果が垣間見え，量子重力について有力な手がかりを得ることができる．

2　ブラックホールの熱力学量

ブラックホールからは光さえも逃れることはできない．この境界を**事象の地平面**と言う．もっとも単純なブラックホール，シュワルツシルド・ブラックホールの場合，地平面の半径 R は，

$$R = \frac{2GM}{c^2} \tag{1}$$

で与えられる．地平面の半径は，ブラックホールの質量 M に比例するため，物質がブラックホールに落ち込むと地平面の面積は増大する．また，古典論的にはブラックホールからは何も出てこない．従って，地平面の面積は減ることのない量であるが，これは熱力学のエントロピーを思い起こさせる【⇒ 3.7 節】．熱力学第二法則によれば，エントロピーもまた増大する一方である．

このことはブラックホールが熱力学的な物体であることを示唆する．そうであれば，ブラックホールは熱を発すると考えられるが，ブラックホールからは何も出てこないはずである．しかし，ブラックホールについての以上の記述は，純粋に古典論的なものである．ブラックホールはアインシュタイン方程式の解であり，物質も古典論的なものである．

そこで，ブラックホールは古典論的な扱いに留めたとしても，物質の量子効果を考える．すると，確かにブラックホールはエネルギーを放出する．これを**ホーキング放射**と言う【⇒ 3.10 節】．この放射は，温度をもつ物体が出す放射と同じである（熱放

射）．つまり，ブラックホールは温度をもつのである．

ブラックホールの熱力学量は，次元解析などからある程度見当をつけることができる．以下，$c = \hbar = k_{\rm B} = 1$ とおく自然単位系を使う（$k_{\rm B}$ はボルツマン定数）．こうすると，次元が 1 つだけ，たとえば質量だけに帰着して便利なので，相対論的量子力学ではよく使われる．つまり，

- 長さの次元と時間の次元 L, s は質量の次元 M で $\mathrm{L} = \mathrm{s} = \mathrm{M}^{-1}$.
- また，エネルギー E，温度 T は質量の次元を持ち，$[E] = [T] = \mathrm{M}$.

古典論的なシュワルツシルド・ブラックホールの場合, 長さスケールは地平面半径 R のみである．温度は質量の次元をもつので,

$$T \simeq \frac{1}{R}$$

となるはずである．ここで $\simeq$ は，数係数を省いて等しいという意味である．次元量を復活させて数係数も含めた結果は,

$$\boxed{T = \frac{\hbar c}{4\pi R k_{\rm B}}\ .} \tag{2}$$

この温度は太陽質量（$\approx 2 \times 10^{30}$kg）のブラックホールに対して，$T \approx 6 \times 10^{-8}$K という微々たる効果だが，これから明らかになるように，理論的には極めて重要な帰結をもたらす．

他の熱力学量も求めることができる．エネルギー E は，ブラックホールの質量エネルギーである．エントロピー S は熱力学第一法則 $dE = TdS$ から求めることができる（dE, dS はそれぞれ E, S の変化分）．$E = M \simeq R/G$, $T \simeq 1/R$ を第一法則の左辺と右辺にそれぞれ代入すると，$dR/G \simeq dS/R$. したがって, ブラックホールは

$$S \simeq \frac{R^2}{G} \simeq \frac{A}{G}$$

で与えられるエントロピーをもつはずである．ここで $A = 4\pi R^2$ は地平面の面積である．次元量を復活させて数係数も含めた結果は,

$$\boxed{S = \frac{A}{4G\hbar} k_{\rm B} c^3 = \frac{1}{4}\frac{A}{l_{\rm pl}^2} k_{\rm B}\ .} \tag{3}$$

ここで，プランク長さ $l_{\rm pl}$ が顔を出していることに注意しよう．

式 (1)，(2)，(3) を使って，第一法則を確認することができる：

$$TdS = \frac{c^4}{2G} dR = d(Mc^2)\ .$$

3 ブラックホール・エントロピーが意味すること

間違いやすいが,

- ホーキング放射は物質の量子効果
- 一方，ブラックホール・エントロピーは，重力の量子効果

である．式 (2) で，古典論極限 $\hbar \to 0$ では $T \to 0$ になるので，ホーキング放射は量子効果である．しかし，ブラックホールそのものは古典論的であり，量子効果は物質のものである．この量子効果は比較的よく理解されている．

一方，ブラックホール・エントロピーは $l_{\rm pl} \to 0$ で発散することから，量子重力効果で未知の部分が多い．つまり，ブラックホール・エントロピーの「導出」には量子重力理論が不可欠である．

熱力学の量子論，統計力学では，熱力学量を系の微視的状態（分子や原子などの状態）の統計平均として説明する．エントロピーは，考えている系の微視的状態数（の対数）を表す．とすると，ブラックホール・エントロピーを導出するには，量子重力理論を完成させ，統計力学的にブラックホールの微視的状態数を数え上げる必要がある．

しかし，前節での議論は，微視的状態数から式 (3) を求めたわけではない．その意味で，ブラックホール・エントロピーの公式 (3) は，微視的導出ではなく，むしろ「予言」である．量子重力理論が完成した暁には，式 (3) が説明できるはず，という位置づけである．

言い換えると，**この公式は量子重力理論に対して，我々が知る数少ない手がかりであり，未だよくわかっていない量子重力について様々な性質を教えてくれる**．以下，そのような性質を議論する．

(i)　通常の統計力学系との違い　ブラックホール・エントロピーの一番の特徴は，地平面の「面積」（空間 2 次元量 V_2）に比例するという点である．これに対して，通常の（重力を含まない）統計力学系では，エントロピーは系の「体積」（空間 3 次元量 V_3）に比例する．

ブラックホールと通常の統計力学系では，エントロピーの振るまいが違うため，4 次元時空のブラックホールは 4 次元の統計力学系とは対応しない．しかし，5 次元時空の「面積」は，空間 3 次元量であり，4 次元の「体積」にあたる．したがって，5 次元のブラックホールは，4 次元の統計力学系に対応しうる（図 0.1）．このことから，超弦理論の**ホログラフィー**という考えが生まれた．すなわち，**重力系が，重力を含まない一次元低い時空の統計力学系で記述できる**という考えである．ちょうど，通常のホログラムが 2 次元面に 3 次元の映像を記録しているように，ホログラフィー理論では，4 次元の理論が 5 次元重力理論を記録しているのである【⇒ 8.9 節】．

(ii)　事象の地平面の「量子化」　また，ブラックホール・エントロピーは，プランク面積を単位とした地平面面積 l_{pl}^2 で与えられる．これは，古典論的には連続的な量である面積が，量子化されているように見える（図 0.2）．量子論の特徴は，様々な量が離散的になることである（量子化）．このため，量子重力では，時空が何らかの意味で量子化されると考えるのは自然である．量子重力理論の最有力候補，超弦理論もこの点を示唆する【⇒ 8.3 節】．

	ブラックホール		統計力学系
4 次元時空：	$A = V_2$	$\xrightarrow{\times}$	V_3
		$\nearrow$	
5 次元時空：	$A = V_3$		

図 0.1　ブラックホールと（重力を含まない）通常の統計力学系でのエントロピーの振るまい．

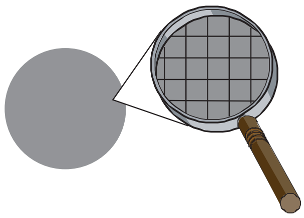

図 0.2　事象の地平面の「量子化」

(iii)　莫大な微視的状態数　もっとも，地平面面積が量子化されても，その単位はきわめて小さいプランク面積である．このため，ブラックホール・エントロピーは莫大な数である．太陽質量のブラックホールに対しては，$S \simeq 10^{77} k_{\mathrm{B}}$ となる．一方，太陽のエントロピーは $S_{\odot} \simeq 10^{58} k_{\mathrm{B}}$ なので，ブラックホールのエントロピーは実に太陽 10^{19} 個分にあたる．したがって，ブラックホールは莫大な微視的状態数をもつことが示唆される．

4　情報のパラドックス

さて，ホーキング放射そのものにも残る謎がある．物体をたくさん集めてブラック

ホールを作ったとしよう．ブラックホールはホーキング放射でエネルギーを失い，しだいに蒸発していく．しかし，ホーキング放射は温度以外に特徴がない熱放射である．ブラックホールを作り出した物体がどんなものでも，放射は同じである．ブラックホールが放射以外何も残さずに完全に蒸発したとすると，物体の情報が消えてしまったことになる．しかし，量子力学では，ユニタリ性と呼ばれる性質から情報の消失は禁じられている．この問題は**情報のパラドックス**と呼ばれ，重力の未解決問題の中でも最難問である．（この問題についての詳細は，文献[1,2] を参照．）

しかし，この問題は太陽とどう違うのだろう？　物体を太陽に落としたとする．すると物体は燃え尽き，熱放射が観測される．このため，ブラックホールと同じく物体の情報は失われてしまう．しかし，これが問題だとは誰も思わない．何が違うのだろうか？

これは太陽の場合は，原理的には微視的状態を解析でき，情報をどこまでも追跡できるからである．そして，太陽の放射は厳密には熱放射ではなく，熱放射との違いから物体の情報を再構成できるはずである．太陽の放射を熱放射と言うのは，太陽の微視的状態について統計平均を取った上のことである．一方，ブラックホールの場合はそうはいかない．量子重力が完成していない以上，ブラックホールの微視的状態は追跡できないからである．

以上みてきたように，ブラックホールと熱力学の関係については，大きくわけて

- ブラックホール・エントロピーの微視的導出
- 情報のパラドックスの解決

という 2 つの問題がある．

5　超弦理論とブラックホール

超弦理論は，量子重力理論の最有力候補であり，これまで議論してきた謎に答えられるはずである【⇒ 8.3 節】．

超弦理論では，素粒子のかわりに基礎的な物体としてプランク長さ程度の弦を考える．自然界には様々な素粒子が存在するが，超弦理論ではこれら素粒子は弦の様々な固有振動だと解釈する．振動のエネルギーは，素粒子の質量 M に寄与するため，既知の素粒子は弦の比較的単純な振動である．

しかし，今 M の大きな状態を考えよう．この場合，様々な固有振動が許され，微視的状態数は指数関数的に増大する．この微視的状態数の計算から，ブラックホール・エントロピーの式 (3) が導出されている．長年謎であったブラックホール・エントロピーが，統計力学的に理解できることが示されたのである．

超弦理論はホーキング放射の導出にも成功しているその際，熱放射が得られるのは，微視的状態についての統計平均を取った上でのことである．その意味で，ブラックホールも太陽も同じである．このため，ブラックホール蒸発の過程で，情報は失われないと考えられている．このことはホログラフィーの考えからも支持される【⇒ 3.9 節】．ホログラフィー理論によれば，量子重力理論はある種の**ゲージ理論**と等価だと考えられている．ゲージ理論は重力以外の 3 つの力，電磁気力・弱い力・強い力を記述する理論であり，ユニタリ性は保たれる．このため，重力理論もユニタリ性を保つと考えられている．ただし，ブラックホールでユニタリ性が実際にどう保たれているのかは難問であり，超弦理論を使っても現在のところ未解決のままである．

（夏梅誠）

文献

1) D. Harlow, "Jerusalem Lectures on Black Holes and Quantum Information," arXiv:1409.1231 [hep-th].
2) 夏梅誠,「ブラックホールと時空」,『現代物理最前線 7』（共立出版，2002）.

0.2 量子重力と超弦理論 Quantum gravity and superstring theory

本項目では，量子重力理論がなぜ必要か，理論完成の暁にはどのような物理が期待されるのか，そして量子重力理論の最有力候補，超弦理論について概説する．

1 量子重力はなぜ必要か？

素粒子の標準模型によると，自然界には重力・電磁気力・弱い力・強い力の 4 つの基本的な相互作用がある．原理的には，すべての現象はこれらの相互作用で理解できるはずだが，標準模型にはさまざまな問題がある．最大の問題が，4 つの力の立場が違うという点である．重力以外の 3 つの力は**ゲージ理論**によって記述され，これは量子化が可能である．一方，重力は一般相対論によって記述される古典論であり，一般相対論の量子化には誰も成功していない．したがって，重力とその他の力は，理論的な基礎や概念が大きく異なる．

重力の量子化，**量子重力**を考えるのは，単に他の力は量子化されているから，といった理由ではない．量子重力の必要な理由の一端は，

- 重力理論の典型的な物体であるブラックホールと，
- 量子論の典型的な物体である素粒子

を比べることでわかる．

ブラックホールの典型的な長さスケールは**シュワルツシルド半径** $R \simeq Gm/c^2$ である．（ここで G はニュートン定数，m は質量，c は光速度であり，$\simeq$ は，数係数を省いて等しいという意味である．）一般に，質量 m を R 以下の領域に閉じこめると，その物体はブラックホールになってしまう．

素粒子は点状の物体であり，一見するとシュワルツシルド半径内にある，つまりブラックホールになってしまうと思いがちである．しかし，素粒子にも典型的な長さスケール，**コンプトン波長** $\lambda = \hbar/(mc)$ がある．一般に，コンプトン波長は一粒子として閉じこめられる最小の長さを表す．(不確定性関係 $\Delta x \Delta p \gtrsim \hbar$ より，粒子を $\Delta x \lesssim \hbar/(mc)$ の領域に閉じこめようとすると，$(\Delta p)^2/(2m) \gtrsim mc^2$ となり，エネルギーの不確定性が粒子の静止エネルギーを上回り，新たな粒子が生成されてしまう．）通常の素粒子では，λ は粒子のシュワルツシルド半径 R 以上，$\lambda \gg R$ であり，ブラックホールにはならない．

しかし，十分重い素粒子では，$\lambda \ll R$ になってしまう．この場合，素粒子はブラックホールになってしまうと期待される．つまり，**素粒子といえども重力を無視できない**．これが起こるのは，質量スケールで

$$\frac{\hbar}{mc} \lesssim \frac{Gm}{c^2}$$
$$\to m \gtrsim \sqrt{\frac{\hbar c}{G}} = m_{\rm pl}$$

という素粒子である．$m_{\rm pl}$ を**プランク質量**と言い，素粒子の質量としては極端に重い（$m_{\rm pl} \approx 2.2 \times 10^{-8}$kg．陽子の質量 $m_p \approx 1.7 \times 10^{-27}$kg）．また，長さスケールでは，

$$\lambda \simeq R \sim \sqrt{\frac{G\hbar}{c^3}} = l_{\rm pl}$$

$l_{\rm pl}$ を**プランク長さ**と言い，素粒子のコンプトン波長としては極端に小さい（$l_{\rm pl} \approx 1.6 \times 10^{-35}$m．陽子のコンプトン波長は $\hbar/(m_p c) \approx 2.1 \times 10^{-16}$m）．ここで，さらに重い素粒子を考えても R が大きくなるだけだから，$l_{\rm pl}$ 以下の長さには到達できない (図 0.3)．

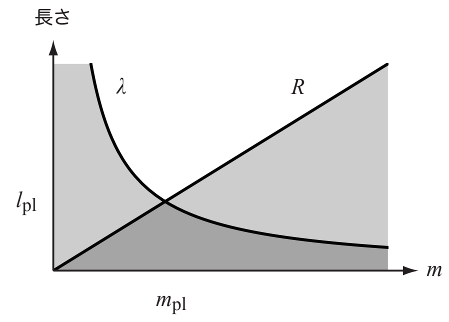

図 0.3　素粒子を使ってもブラックホールを使っても $l_{\rm pl}$ 以下の長さには到達できない．

逆に，通常のブラックホールでは，R はブラックホールのコンプトン波長 λ 以上，$R \gg \lambda$ なので，古典論的なブラックホールの扱いが正当化される．しかし，十分軽いブラックホールでは，$R \ll \lambda$ になってしまう．この場合，**古典論的なブラックホールの記述は破綻し，量子論的に扱う必要がある**．これが起こるのは，$m \lesssim m_{\rm pl}$ の場合である．また，さらに軽いブラックホールを考えても λ が大きくなるだけだから，$l_{\rm pl}$ 以下の長さには到達できない．

結局，$m \gtrsim m_{\rm pl}$ の素粒子，$m \lesssim m_{\rm pl}$ のブラックホールで量子重力効果を考える必要がある．また，素粒子を使ってもブラックホールを使っても $l_{\rm pl}$ 以下のスケールには到達できない．このことから，**何らかの意味で $l_{\rm pl}$ 以下の長さには意味がなく，$l_{\rm pl}$ は自然界の最小の長さを表すと考えられる**．

また，ブラックホールはエントロピーをもち【⇒ 3.8 節】，そのエントロピー S はプランク面積を単位とする地平面面積 $A = 4\pi R^2$ で与えられる：

$$S = \frac{1}{4}\frac{A}{l_{\rm pl}^2}k_{\rm B} \tag{4}$$

($k_{\rm B}$ はボルツマン定数)．このことも，長さの最小単位としてのプランク長さを示唆する．

そもそも量子論の特徴は，スペクトルのようにマクロには連続的な量も，ミクロでは離散的になることである．一般相対論によれば，時空はなめらかで連続的な多様体とされるが，量子重力理論では時空が何らかの離散的構造をもつ，と考えるのは自然である．ただし，実際の理論でこの性質を矛盾なく反映させることは困難であり，現在のところこの点で成功していると言えるのは超弦理論だけである．

2　統一理論と超弦理論

超弦理論は，

- 重力を量子化し，
- かつ 4 つの力を統一的に記述する統一理論

の最有力候補である．

これまで素粒子は点粒子とみなされてきた．一方，超弦理論での基本的な物体は，伸び縮みするきわめて小さい長さの相対論的な弦である（図 0.4)．弦の典型的な長さスケールを**ストリング長さ** l_s と呼ぶが，超弦理論が量子重力理論でもあることから，この長さスケールはプランク長さ程度と考えてよい．弦には，端点をもった**開弦**と，端点をもたない**閉弦**の二種類がある．

弦と点状の素粒子との大きな違いは，弦がさまざまな固有振動をもつという点である．素粒子論ではさまざまな素粒子が存在するが，超弦理論ではこれら素粒子は弦のさまざまな固有振動であると解釈する．つまり，超弦理論はまず素粒子を統一的に理解する．

弦の固有振動は無限にあるので，超弦理論は無数の素粒子の存在を予言する．もっとも，それらの素粒子のほとんどは，プランク質量以上という素粒子としては極端に

図 0.4　超弦理論の基本的な物体，開弦（左）と閉弦（右）.

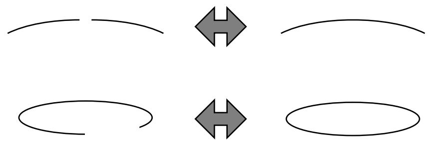

図 0.5　開弦のもっとも簡単な相互作用.

重いため，現在のところ未発見だと考えられる.

例外は，弦の比較的単純な振動だけであり，これらが既知の素粒子に対応する．特に，開弦の場合はゲージ場の素粒子，光子などをあらわし，閉弦は重力場の素粒子，グラビトンをあらわす．ゲージ理論は重力以外の 3 つの力を記述することから，超弦理論は 4 つの相互作用を統一的に理解できる.

もっとも，開弦と閉弦，2 種類の弦が必要というのでは，完全に統一されていないように思えるかもしれない．しかし，実際にはこれらはある意味同じ物体である．このことは，弦同士の相互作用からわかる.

図 0.5 は開弦のもっとも簡単な相互作用を描いたものであり，2 つの開弦が 1 つにくっついたり離れたりする（上）．しかし，2 つの開弦の端点がくっつくのであれば，1 つの開弦の端点同士もくっつくはずである（下）．そうでなければ，弦のダイナミクスに非局所的な拘束を仮定しなければならない．したがって，1 つの開弦の端点はくっつくことができて，閉弦を作り出すはずである．つまり，開弦があると，閉弦もなければいけない．開弦と閉弦の 2 種類が存在するのは，このためである.

開弦はゲージ理論，閉弦は重力をあらわすのだから，超弦理論はゲージ理論も重力理論も含まなければいけないことになる．このように，超弦理論はゲージ理論も重力理論も自然に統一する.

3　超弦理論と時空構造

(i)　高次元時空　　さて，弦は張力 T をもち，この大きさもプランク・スケールから決まる．もっとも，弦が張力をもつため，そのままでは一点につぶれてしまう．つぶれないためには，弦が角運動量（スピン）J をもち（あるいは振動し），張力と遠心力がつり合っていればよい．しかし，これら回転・振動のエネルギーは，質量 m に寄与する．したがって J と m のあいだに関係がつく.

この関係は次元解析から理解できる．以下，$c = 1$ とおく．こうおくと，角運動量は $\boldsymbol{J} = \boldsymbol{r} \times \boldsymbol{p}$ なので $[J] = \mathrm{ML}$，張力は力なので $[\mathsf{T}] = \mathrm{ML}^{-1}$ の次元をもつ．したがって，

$$J \simeq \frac{1}{\mathsf{T}} m^2 + \hbar \tag{5}$$

となる．ここで，第二項は量子効果である（$\hbar$ は角運動量と同じ次元をもつ）.

弦のさまざまな固有振動がさまざまな素粒子に対応するが，式 (5) より素粒子のスピン J が質量 M に寄与するため，それら素粒子の典型的質量はプランク質量程度になる．これでは既知の素粒子さえ説明できなくなってしまう．たとえば，光子は $J = 1, m = 0$ であるべきである．この点を解決するのが，式 (5) 第 2 項の量子効果である．量子効果により，$J = 1$ でも $m = 0$ が可能となる.

ただし，これが可能なのは 10 次元時空に限られる．したがって，超弦理論は，自然界が 4 次元時空ではなく，高次元時空で

あることを予言する．これは明らかに経験と矛盾するように思われる．しかし超弦理論は重力理論でもある．高次元時空は，単なる平坦な時空である必要はなく，さまざまな可能性がある．そこで「余分な」次元は，典型的にはプランク長さ程度の大きさに「丸まっている」（コンパクト化）と考えられている．

(ii)　時空の離散構造？　通常の超弦理論の扱い（摂動論的定式化）では，たとえば平坦ななめらかな時空中の弦を考える．これは，一般相対論の時空構造と本質的に同じであるが，あまり字句通りに捉えるべきではない．なぜなら，閉弦の振動がグラビトンに対応し，グラビトンの「集まり」によって曲がった時空が構成されるからである．実際の時空には，何らかの形で弦っぽい証がみられるはずである．一種の時空の離散構造がその一つである．

量子重力理論に期待される特徴として，何らかの意味での時空の離散構造，を議論した．実際，超弦理論では，ストリング長さ以下の長さに意味がないと考える根拠がいくつかある．たとえば，空間の一次元部分が丸まっており，R をその円周の半径とする（図 0.6）．超弦理論によると，半径 R の場合と，半径 $R' = l_s^2/R$ の場合は同等であることが示せる（たとえば，弦の固有振動，つまりスペクトルが同じ）．この性質を T 双対性と言う．$R > l_s$ の場合，$R' < l_s$ となるので，ストリング長さ以上と，ストリング長さ以下は区別できない．だとすると，ストリング長さ以上と以下を別々に扱うのは適切ではなく，区別できる長さは $R \geq l_s$ だけである．

また，量子重力理論では，通常散乱振幅に紫外発散の問題がある．場の量子論では，紫外発散はくり込みによって処理できるが，

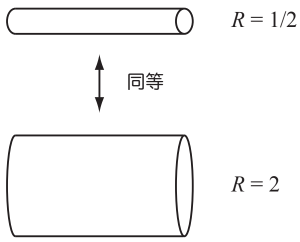

図 0.6　空間 1 次元方向を半径 R の円周にコンパクト化する．超弦理論によると，たとえば半径 $R = 1/2$ は $R = 2$ と区別できない（$l_s = 1$ とおいた）．

量子重力の場合くり込みができない．しかし，超弦理論ではそのような困難はなく，散乱振幅は有限にとどまる．これも一種の離散構造と関係する．

超弦理論では，直接時空に離散構造を入れるわけではない．これは回りくどいもって回った方法に思えるかもしれない．しかし，直接時空に離散構造を持ち込むと，種々の困難が生じることが知られている．超弦理論は，間接的にそのような構造を持ち込むことで，この問題をうまく回避している．

(iii)　ブラックホール　1 節で議論したように，量子重力効果が期待される場所の一つがブラックホールである．ブラックホールを巡っては，**ブラックホール・エントロピー** (4) や**情報のパラドックス**といった難問が存在する．これらの問題を解決するには，量子重力理論が欠かせないのだが，超弦理論はこれらの問題についてもある程度答えてくれる【⇒ 3.8 節】．

（夏梅誠）