

特集 / 量子重力理論最前線

量子重力理論

検証に向けた新たな展開

小玉 英雄

超弦理論を中心として、20 世紀末の 20 年間に
おける量子重力理論の発展は目覚ましいものであ
ったが、その成果の多くは純理論的な色彩の強いも
ので、実験や観測と直接結び付く検証可能な予言
を与えるには至らなかった。しかし、ここ数年間
における研究、特に量子重力の非摂動論の効果に
関する研究は、宇宙論、ブラックホール物理、加
速器実験、宇宙線反応など様々な領域において検
証可能な予言を与えつつあり、状況は大きく変化
している。本特集では、これら量子重力の非摂動
理論およびその検証と関連した研究の最前線を紹
介する。

この総論では、個々のトピックの解説に先立ち、
理論的にも現象的にも多岐にわたる量子重力研究
についての全体像を持ってもらうために、研究の
背景と相互の関係について概説する。

1. 量子重力理論の困難

一般相対論は、天体現象から宇宙全体にわたる
巨視的なスケールでの重力現象を記述する基礎理
論として不動の地位を得ている。しかし、重力源
となる物質の量子性が重要となるミクロのスケ
ールでは事情が異なる。Einstein 方程式

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \kappa^2 T_{\mu\nu}$$

において (Λ は宇宙定数, $\kappa^2 = 8\pi G$, 光速 $c = 1$),
ミクロのスケールでは右辺のエネルギー・運動量
テンソルは量子論的ゆらぎを持ち、これは左辺を通
して時空計量の量子ゆらぎを生み出す。したがっ
て、ミクロの世界での重力相互作用を正しく記述
するには、量子化された重力理論、すなわち量子
重力理論が必要となる。

重力場が弱く、計量が Minkowski 計量 $\eta_{\mu\nu}$ か
らわずかにずれているとき、 $g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + \kappa h_{\mu\nu}$ と
おいて、 $h_{\mu\nu}$ に関して 1 次近似すると、Einstein
方程式は重力波を表す波動方程式を与える。この
線形化された理論は、電磁場の量子化と同じ方法
で容易に量子化することができ、重力波は重力子
の集まりとして記述される。したがって、例えば
物質場が存在しないとき、Einstein 方程式に対応
する Einstein-Hilbert 作用積分

$$S_{\text{EH}} = \frac{1}{2\kappa^2} \int d^4x \sqrt{-g} (R - 2\Lambda) \quad (1)$$

を $h_{\mu\nu}$ について展開し、3 次以上の項をこの重力
子の相互作用と見なすことにより、通常の場合の理
論の方法を用いて重力の摂動論的量子論を構成で
けることが期待される。ただし、よく知られてい
るように相互作用する場の量子論では粒子の散乱
振幅は一般に発散する積分で与えられる。量子電