

PRESS RELEASE (2026/02/13)

連星ブラックホールからの重力波に潜む量子性

～量子重力理論への第一歩～

ポイント

- ① 物理学の長年の課題である量子重力理論の構築に向けて、量子重力理論(※1)が示唆する未発見粒子、グラビトン(※2)の発見が強く望まれている
- ② 連星ブラックホールからの重力波(※3)の量子力学的記述に世界で初めて成功
- ③ 今後、グラビトンの発見につながる事が期待される

概要

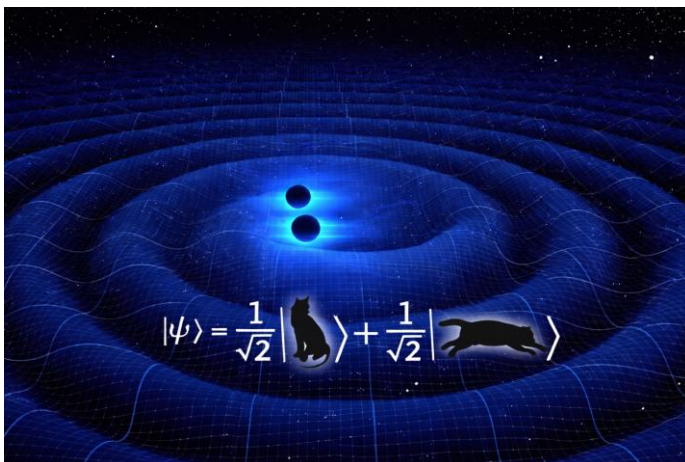
これまで連星系(※4)からの重力波は、古典的に記述されると信じられてきました。

研究グループは、連星系が生成するグラビトンの量子状態を定量的に評価し、 10^{-4} のオーダーで、古典的な重力波に最も近いコヒーレント状態(※5)からのズレが存在することを明らかにしました。

九州大学大学院理学研究院の菅野優美准教授、神戸大学大学院理学研究科の早田次郎教授および九州大学大学院理学府博士課程1年の谷口彰らの研究グループは、連星系からの重力波の解析を行い、重力波に潜む量子性の存在を明らかにしました。

最後の未発見粒子であるグラビトンの発見に貢献することが期待されます。

本研究成果は米国の雑誌「Physical Review Letters」に2026年2月12日(木)に掲載されました。



連星系からの重力波に潜む量子性のイメージ

本研究グループからひとこと：

本研究は、連星系からの重力波に、初めて量子論を適用した斬新な成果であると評価されています。この研究が、将来グラビトンの発見につながれば嬉しいです。

【研究の背景と経緯】

重力と量子論の統一的理解はできるのでしょうか？重力を量子論の枠組みに取り入れ、量子重力理論を構築することは物理学における長年の課題です。近年の量子技術の発展を考慮すると、超弦理論に代表されるような、これまでの数理物理学的なアプローチではなく、実験可能性を重視した現象論的なアプローチが重要となっています。2015年、LIGOの研究チームは時空の揺らぎである重力波を直接観測することに初めて成功しました。重力と量子論が統一されるとすれば、この重力波の量子論的な励起状態であるグラビトンが存在することになります。このグラビトンは未だ発見されていません。私たちの研究は、このグラビトンの発見を目指したものです。

【研究の内容と成果】

研究グループは、重力の量子論を研究するための指針として、良く知られている電磁場の量子論を参考にしました。電磁場の量子論的な励起状態は、フォトンと呼ばれています。フォトン量子力学的に記述される粒子ですが、古典的電磁波を量子論の枠組みで、どのように記述されるかが研究の参考になります。

フォトンの量子状態の中で、古典的な電磁波に最も近い状態は、コヒーレント状態という量子状態であると考えられています。古典的電流 $\mathbf{j}(t, \mathbf{x})$ が存在するとき、量子状態の時間発展演算子は

$$\exp[-i \int dt d^3x \{ \mathbf{j}(t, \mathbf{x}) \cdot \hat{\mathbf{A}}(t, \mathbf{x}) \}]$$

と表されます。 $\hat{\mathbf{A}}(t, \mathbf{x})$ は電磁場で、この演算子がコヒーレント状態を生成します。研究グループは、このような考え方を重力波に当てはめることで、次のような重要な発見をしました。

古典的なエネルギー運動量テンソル $T_{ij}(t)$ が存在するとき、重力場を $\hat{h}_{ij}(t, \mathbf{x})$ として、量子状態の時間発展演算子は

$$\exp[-i \int dt d^3x \{ T_{ij}(t) \hat{h}_{ij}(t, \mathbf{x}) + \Lambda_{ijk\ell}(t) \hat{h}_{ij}(t, \mathbf{x}) \hat{h}_{k\ell}(t, \mathbf{x}) + \dots \}]$$

と表されます。この時間発展演算子によりグラビトンのコヒーレント状態が生成されることが分かります。電磁場の場合と違って、重力場の場合には一般に非線形係数 $\Lambda_{ijk\ell}(t)$ があることに着目しました。この項は量子論特有の性質を持つスクイーズド状態(※6)を生成します。

研究グループは、連星系が生成するグラビトンの量子状態を定量的に評価し、どの程度コヒーレント状態からずれているのかを明らかにすることに成功しました。

これまで連星系からの重力波は、古典的に記述されると信じられてきました。しかし、私たちの発見によって、 10^{-4} のオーダーで、古典的な重力波に最も近いコヒーレント状態からのズレが存在することが明らかになりました。この発見は、量子重力理論への確実な一步を踏み出したことを意味します。

【今後の展開】

本研究成果は、グラビトンの発見に迫るための画期的なステップです。今後は、このスクイーズド状態を検証するために、ハンブリー・ブラウンとトゥイスの強度干渉計(※7)を利用した重力波観測が必要になってきます。

さらに初期宇宙のインフレーション中に生成される原始重力波の量子性検出にも応用できることが期待されます。

【用語解説】

(※1) 量子重力理論

重力を量子論で説明し、時空の最も根本的な性質を明らかにしようとする理論。

(※2) グラビトン

重力を伝える粒子で、重力子とも呼ばれる。重力波もグラビトンの集合として理解できる。

(※3) 重力波

大きな質量の天体が激しく動いたときに生じる“時空のさざ波”である。

(※4) 連星系

2つの恒星が互いの重力で結びつき、共通の中心のまわりを回っている天体の組のことである。

(※5) コヒーレント状態

量子でありながら、古典的な波に最も近い振る舞いをする特別な量子状態のことである。

(※6) スクイズド状態

量子ゆらぎを一方向だけ押し縮めた量子状態のことである。

(※7) ハンブリー・ブラウンとトゥイスの強度干渉計

天体の大きさを測るために、ハンブリー・ブラウンとトゥイスによって考え出された装置・方法であったが、現在では量子性を検証するために使われている。

【謝辞】

本研究は JSPS 科研費（JP22H01220, JP24K21548, JP24H00967, JP23K22491, JP25H02186, JP25KJ1912.）の助成を受けたものです。

【論文情報】

掲載誌：Physical Review Letters

タイトル：Coherent State Description of Gravitational Waves from Binary Black Holes

著者名：Sugumi Kanno, Jiro Soda, Akira Taniguchi

D O I : 10.1103/kv1t-j27m

【お問合せ先】

<研究に関すること>

九州大学大学院理学研究院 准教授 菅野 優美（カンノ スグミ）

TEL：092-802-4048

Mail：kanno.sugumi@phys.kyushu-u.ac.jp

<報道に関すること>

九州大学 広報課

TEL：092-802-2130 FAX：092-802-2139

Mail：koho@jimu.kyushu-u.ac.jp