論文の内容の要旨

申請者　松本　隆志

論文題目

Unruh 効果と相対論的量子縺れの空間的構造

量子縺れとは、合成系の状態ベクトルが構成要素の状態ベクトルの直積として因子化されないことをいう。すなわち、古典論では構成要素が局在化され相互に独立と思えても、量子論では状態ベクトルの因子化が出来ず、そのため構成要素間に相関が現れる。一方、量子縺れは構成要素の取り方に依るので、構成要素は局在的だけでなく、その取り方に物理的意味を与えねばならない。そのため、この局在性が抽象的なものでも、空間の古典的局在性を絡め議論されることが多い。

本稿の目的の一つは、構成要素の空間的局在性と合成系の空間的大局性を直接結びつけ、量子縺れを相対論的に調べることにある。非相対論的議論とは異なり、相対論的量子論での空間的局在性は自明なことではない。

相対論的な量子縺れ現象の一つが、Unruh 効果である。Rindler 系（一定加速度系）のように事象の地平線がある座標系では、時空は分割される。Unruh 効果とは、全時空で定義されている状態ベクトルを分割された時空での状態ベクトルで記述した時の量子縺れ現象である。そこで、どちらにあるかといった位置の概念が重要であり、また、この現象には座標系の選択によるという問題がある。本稿の目的のもう一つは、基本的構成要素と座標系の選択との関係を調べ、その痕跡を見いだすことである。

そこで、座標系の選択と基本的構成要素との関係、そして基本的構成要素の空間的局在性と合成系の大局的状態の空間的構造を Unruh 効果を通し調べる。

相対論的量子論における基本的構成要素とその局在性を調べるため、本稿では Wigner の方法と呼ぶ手順を採用する。空間的位置を議論するには古典論との対応が必要で、古典論、量子力学そして場の量子論を一貫して扱うことが重要である。そのため、対称性変換群の表現論を使う。ある変換群の余随伴軌道として、古典的粒子の位相空間を構成する。次に、その余随伴軌道に対応する変換群のユニタリー表現より量子力学が構成され、量子論的観測量と古典的位相空間との対応が取れる。そして、これを多体系に拡張し基本的粒子描像（生成、消滅演算子とそれに伴う Fock 空間）が決まる。これにより、基本的粒子描像を特徴付けるパラメータの物理的意味とそれの局在性が明確になる。

本稿の解析に必要な対称性変換群は、Poincaré 群と半直積群 $R \circledS R_+$ である。Poincaré 群では Minkowski 空間での通常の場の量子論が再現され、そこでの基本的粒子描像は運動量によって特徴付けられる。そのため、Newton と Wigner の空間的局在性の議論とそれの場の量子論への拡張が必要となる。

また、２つの Rindler wedge を持つ Rindler 空間では、各々の wedge での配位空間は半直線で、対称性変換群は $R \circledS R_+$ である。これから Wigner の方法により量子論を構成すると基本的粒子描像は空間的位置で特徴付けられる。この粒子描像を基にして場の量子論が構成される。一方、Minkowski 空間での加速度運動の世界線より構成する座標系を導入し、そこでの場の量子論へ、Newton-Wigner の議論を拡張する。特に、Rindler 座標につ

いては、局在性の証明を具体的な計算によって示し、対称性変換群の表現論を基にしたものと一致することを示す。

これらの考察を基に、基本的構成要素として空間的位置で特徴付けられた Rindler 空間での粒子描像を、合成状態として Minkowski 空間の真空をそれぞれ用い、量子纏れ及びその空間的構造を調べる。

Minkowski 空間の真空に、左と右の wedge に一つずつ構成要素としての粒子が発見される場合について、この対の位置に関する相対的確率振幅を計算する。空間的特徴は、原点からの距離が左右等しいところに大きな値を持ち、この距離がある点に達すると急減する。この急減する点は質量に依存し、軽いほど遠方まで達する。この性質を直接量子纏れと関係した量で見るため、対が等距離にいる場合に注目しネガティビティを計算する。これは、原点から離れると急激に纏れは解け、その距離は質量によることを示す。

これらの量子纏れの様子を、粒子数によらず調べるため、真空のネガティビティを計算する。この計算のため、基本的粒子描像から正準量を導入し、この正準量の左右 wedge の相関をみる。原点からの距離に関し、左右等距離でこの相関は大きな値を持ち、また原点から離れると急減する。これらの特徴は上記対の場合と変わらないが、数値的には緩慢となる。

次に、左右の Rindler wedge の原点をずらし、異なった Rindler 座標系を導入した場合を調べる。同時に同じようにずらすと、一つの Rindler 座標であることは変わらず、その違いは相殺する。これは Minkowski 空間の真空が並進対称であることを示す。

原点がずれた２つの Rindler 座標の場合、左右領域の重ならない領域での基本的粒子描像は独立である。そこで、左右の量子纏れとして扱うことができ、原点のずれで見ると、上記対の場合に比べより長距離に及ぶことが分かる。

より物理的な量を導入し、座標系の選択と構成要素の関係を調べる。座標系の選択は観測者が等速運動しているか一定固有加速度運動しているかによって決まる。この状況を反映させるため、観測者とともに動く検出器系を導入する。検出器系は検出器場と間接的に観測する対象場からなり、相互作用項はこれらの場を共変的に結合させる。座標系の選択に対応させ検出器場の状態ベクトルを制限する。対象場はそれを通し間接的に制御する。このような検出器系を、Minkowski 空間の対象場の真空の密度演算子を通した期待値と瞬間近似を使った遷移振幅に適用し、左右の Rindler wedge ごとの位置に対応した相関を調べる。

真空の密度演算子に適用する場合は、左右の領域に対応させ２つの検出器場を導入する。そして各々座標の選択に対応させ状態ベクトルを決める。座標選択による相関への影響は、左右の相関が消失する点に現れる。左右両方の検出器が共に一定固有加速度運動している方が、一つは等速運動し他方は等固有加速度運動している場合より相関は短い。これは後者の方は左右独立な粒子描像でないことに起因すると思われる。これは、構成要素の状態で書き直すことにより確認できる。

遷移振幅への適用については、初期状態は Minkowski 空間の真空で、一つの検出器場で摂動を加える。終状態に左領域に構成要素としての粒子が一つ存在する振幅を計算し、右領域に制御した検出器場の位置との相関を見る。結果は、原点からの距離が、摂動の位置と同じところに大きな値を持ち、距離が大きくなると減衰する。上記２つの結果と同じ傾向ではあるが、数値的にはより緩慢になる。