

量子ゼノン効果と空間的に離れた装置による非直接測定

東北大学大学院 理学研究科 堀田 昌寛¹

この報告はお茶の水女子大学の森川雅博氏との共同研究 [1] に基づいている。

量子ゼノン効果は量子論の基礎に深く関わった問題であることから現在広く興味を持たれており、また量子制御などの工学的応用に関しても将来重要な役割が期待されている。このように多くの人々に注目されている状況の中においても、連続的に「観測」される量子系は時間発展が凍結してしまうというこの効果に対して、どのような条件を伴った「観測」で起こるのかということが必ずしも深く認識されていなかった。例えば量子系に対して直接プローブを接触させて系の動力学的性質を変える直接測定はもとより、系から出てくる信号を捕まえる非直接測定においても量子ゼノン効果を期待する考察も現存している。しかし非直接測定においていつでも量子ゼノン効果が起きるわけではないということを我々は今回明らかにした。

例えば励起状態にある原子から放出される光子を捉えることで、その励起状態の生き残り確率が増えるかどうかを考える。その光子の完全吸収型測定が、我々が論文において数学的に明確に定義した「波動帯」においてなされた時には、生き残り確率の時間発展になんらの影響がないことが証明される。従って、陽子崩壊など、不安定粒子から出てくる信号を離れた完全吸収型測定器で連続的にモニターしてもその崩壊速度は測定によってなんら乱されないことも保障される。その崩壊則が時間に関して指数型からずれていても、ずれていなくても「波動帯」領域において吸収型測定（量子系へ向けての反射波を生じない）であれば、量子ゼノン効果が全く起きない。この重要な条件は従来明確にされていなかった。非直接的信号吸収型観測においては、これまでの解析のように崩壊則の具体的時間依存を解かなくても量子ゼノン効果がないことが言えるのである。

ここで論文で証明される定理を紹介しておく。くわしくは論文を参照されたい。注目している状態空間 $\mathcal{H}_Z$ において、生き残り確率を評価する状態を含んだ核帯部分空間 $\mathcal{H}_C$ と、放出されて自由に伝播するようになった信号を記述する波動帯部分空間 $\mathcal{H}_W$ の和に分解する。

$$\mathcal{H}_Z = \mathcal{H}_C \oplus \mathcal{H}_W. \quad (1)$$

¹ E-mail: hotta@tuhep.phys.tohoku.ac.jp

ここで波動帯部分空間 $\mathcal{H}_W$ は次の性質を満たすものと定義する。 $\mathcal{H}_W$ に属する任意の状態ベクトル $|W\rangle$ は正の時間方向に発展させても必ず同じ波動帯部分空間 $\mathcal{H}_W$ に属する。

$$|W(t > 0)\rangle := U_+(t)|W\rangle \in \mathcal{H}_W. \quad (2)$$

このとき次の定理が証明される。

定理：核帯部分空間 $\mathcal{H}_C$ に属する注目励起状態の生き残り確率は、波動帯部分空間の吸収型測定（波動帯から再び核帯領域に反射波を返さない測定）になんら影響を受けない。

このような波動帯部分空間を厳密に持っているモデルとして次のようなものもある。

$$H = H_{atom} + H_\Phi + H_{int}. \quad (3)$$

$$H_{atom} = \hbar\omega a^\dagger a. \quad (4)$$

$$\begin{aligned} H_\Phi &= -i\hbar c \int_{-\infty}^{\infty} \Phi^\dagger \sigma_3 \partial_x \Phi dx \\ &= -i\hbar c \int_{-\infty}^{\infty} [\Phi_R^\dagger \partial_x \Phi_R - \Phi_L^\dagger \partial_x \Phi_L] dx, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} H_{int} &= \hbar \int_{-d/2}^{d/2} dx \int_{-d/2}^{d/2} dx' \\ &\quad \times [g(x, x') \Phi_R^\dagger(x) \Phi_L^\dagger(x') a + g(x, x')^* a^\dagger \Phi_R(x) \Phi_L(x')]. \end{aligned} \quad (6)$$

ここで $a^\dagger$ で生成される原子の励起状態の生き残り確率はそこから放出される信号 Φ を原子の外に広がる波動帯領域で捕まえる測定に全く依存しないことが定理から保障されている。

参考文献

- [1] M.Hotta and M. Morikawa, quant-ph/0310090, to appear in Phys.Rev.A..