

# 素粒子論研究 Vol.16 「時間とエネルギーの不確定性 関係- 腑に落ちない関係」に対するコメント

堀田昌寛

東北大学大学院理学研究科

hotta[at]tuhep.phys.tohoku.ac.jp

Comment on "Uncertainty Relation between Time and Energy - An  
Uncertain Relation"

Masahiro Hotta

*Graduated School of Science, Tohoku University, Japan*

素粒子論研究電子版 Vol.16 に、谷村氏による光子箱の解説記事が掲載されている [1]。時間とエネルギーの不確定性関係についてアインシュタインとボーアが行った有名な論争を再検討した内容である。ボーアのアインシュタインに対する反論は議論のすり替え・筋違いという谷村氏の主張に筆者は全く同意する。しかし同時に谷村氏は P16 の 7.3 光子箱論争の解決の節において、「シャッターの開閉前後で箱のエネルギーをいかなる方法で測ってもよいが、箱のエネルギー損失  $E_a^i - E_a^f$  と、光子が持ち去るエネルギー  $E_s^f - E_s^i$  は必ずしも一致しないことを (53) や (60) 式は物語っている。シャッターの開放時間が短ければ短いほど、この不一致は大きくなる。アインシュタインは箱の重さ（すなわち  $E_a^i$  と  $E_a^f$ ）を正確に測れると仮定したが、そうしたところで、出た光子のエネルギーを正確に測ったことにはならないのである。アインシュタインが提起したパズルは、不確定性関係が間違っていることを立証するものではなく、不確定性関係を顕在化させるデモンストレーションだったのである。」とも主張されている。この主張に関しては異を唱えたい。

谷村氏は 7.1 節と 7.2 節で「箱・ばね秤・重力源としての地球および箱内部の電磁場」の測定器系  $a$  と、「箱の外の電磁場」という対象系  $s$  を考えている。そしてアインシュタインの主張は測定器系のエネルギー減少  $E_a^i - E_a^f$  が対象系のエネルギー増加  $E_s^f - E_s^i$  に一致するという内容であるとしている。しかし窓の開閉に伴う相互作用を無視した  $a$  と  $s$  の無摂動ハミルトニアンは時間的に保存せず、窓の開閉時間と同定されている相互作用時間  $t$  を用いて  $(2\pi\hbar)/t$  ( $= \hbar/t$ ) 程度の不確定さを伴うことを谷村氏は示した。谷村氏の解釈が正しければ、アインシュタインは時間とエネルギーの不確定性関係をやはり見逃したことになる。

しかし果たして谷村氏の主張はアインシュタインが本当に伝えたかった主旨に対するものになっているのだろうか。谷村氏の解析では、箱に備え付けられている可動窓の開閉を行う装置は別扱いにし、その相互作用  $V$  はある時間  $t$  の間だけ摂動的に  $a$  と  $s$  の間に働くという扱いを行っている。一方、谷村氏はこの相互作用項まで入れた全エネルギーは保存することも認めている。

アインシュタインの基本的アイデアの中でも当然この時間的に保存する全エネルギーの保存則を重視していたと考えるのが自然であろう。彼は議論を簡略化して、出ていく光子と光子箱だけでエネルギーが保存すると仮定しただけであって、光子とそれ以外の系とのエネルギー保存則が重要であると言いたかったのではないか。そうであればアインシュタインの主張通り、相互作用時間と対象系のエネルギー増加量の誤差の間には不確定性関係は現れない。図1にこの設定を表した。「箱・ばね秤・重力源としての地球および箱内部の電磁場」に加えて、窓の開閉を行う機器、そのエネルギー源であるバッテリー及びバネ振動の緩和の熱を吸収する空気まで入れて合成系を作り、それを測定器系  $A$  としてある。また対象系  $S$  は可動窓との電磁相互作用が十分に無視できるようになる波動帯領域にまで達した自由光子としてある。谷村氏の設定と同様に、窓開閉装置はある一定時間  $t$  だけ窓が開くようにプログラミングされている。全エネルギー保存則から、測定器系のエネルギー  $E_A$  と対象系のエネルギー  $E_S$  の合計は任意の時刻で保存する。各始状態でのエネルギー期待値を  $E_A^i, E_S^i$  とし、時刻  $t$  での各終状態でのエネルギー期待値を  $E_A^f, E_S^f$  とすれば

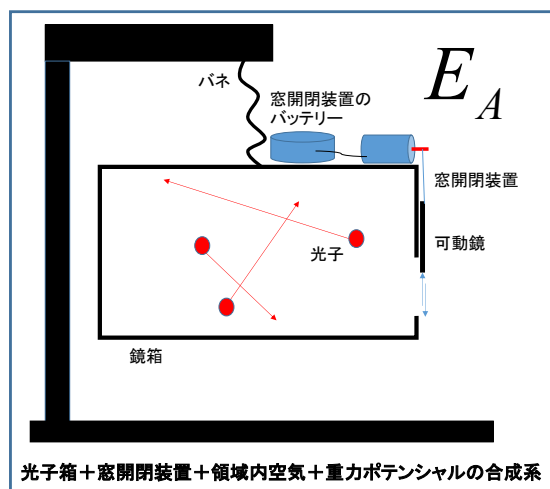
$$E_S^f - E_S^i = -(E_A^f - E_A^i)$$

が正確に成り立ち、不確定性関係による誤差は確かに現れない。

谷村氏は「相互作用時間とエネルギー移動量の不確定性関係」という名前前で、無摂動ハミルトニアンでの関係式 (P16 の (60) 式)

$$E_s^f - E_s^i \pm \frac{\hbar}{t} = -(E_a^f - E_a^i)$$

を論じたが、これは誤解を与える呼称かと思われる。例えば、相互作用をする2粒子  $A$  と  $B$  を衝突させてエネルギー交換をさせる場合、相互作用時間  $t$  は  $A$  から  $B$  に移動するエネルギー移動量  $\Delta E_{A \rightarrow B} = E_B^f - E_B^i$  の誤差とは全く関係がない。通常エネルギー移動量は、 $t$  とは無関係に十分時間が経って相互作用が切れる段階で測定されているためである。仮に強い相互作用を考えると典型的に  $t = O(10^{-23})$  秒の相互作用時間でエネルギー交換をするわけだが、 $\Delta E_{A \rightarrow B}$  は  $O(\hbar/t)$  から評価される  $GeV$  オーダーの量でも、その誤差は  $GeV$  よりはるかに小さくできる。一方、相互作用中の  $A$  と  $B$  の個々の単体エネルギー自身には、自然で一意的な定義は存在しない。全ハミルトニアンを無摂動項部分と相互作用項部分に分けることも摂動論的取り扱いができる範囲で自由にできるため、特定の無摂動ハミルトニアンを選択する理由はない。また繰り込み的視点から相互作用項を適当に半分に分けて  $A$  と  $B$  の単体エネルギーへの寄与に割り当てることさえも可能である。この設定で定義されるエネルギー移動量には、上の議論と同様に、相互作用をしている間でも  $O(\hbar/t)$  の不確定さは現れない。従って、光子箱の思考実験から相互作用時間とエネルギー移動量の不確定性関係が導かれるという谷村氏の主張は、誤解を招く表現になっている。



波動帯領域

自由光子

$E_S$

図1

### 参考文献

- [1] 谷村省吾, 「時間とエネルギーの不確定性関係-腑に落ちない関係」, 素粒子論研究電子版 Vol.16 (2013) No. 3.