

NĂNG LƯỢNG CỦA PHOTON TRONG TƯƠNG TÁC HẤP DẪN

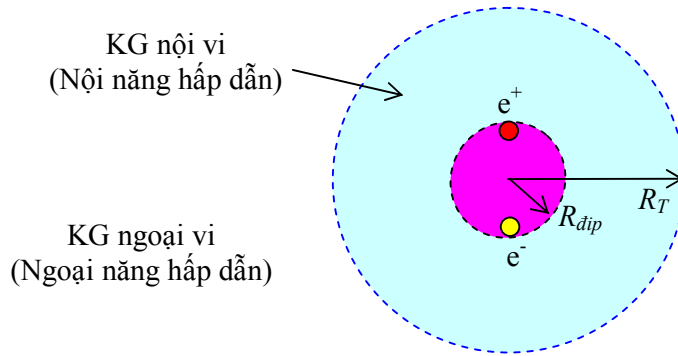
Vũ Huy Toàn

Công ty CONINCO-MI, 4 Tôn Thất Tùng, Hà Nội

vuhuytoan@conincomi.vn

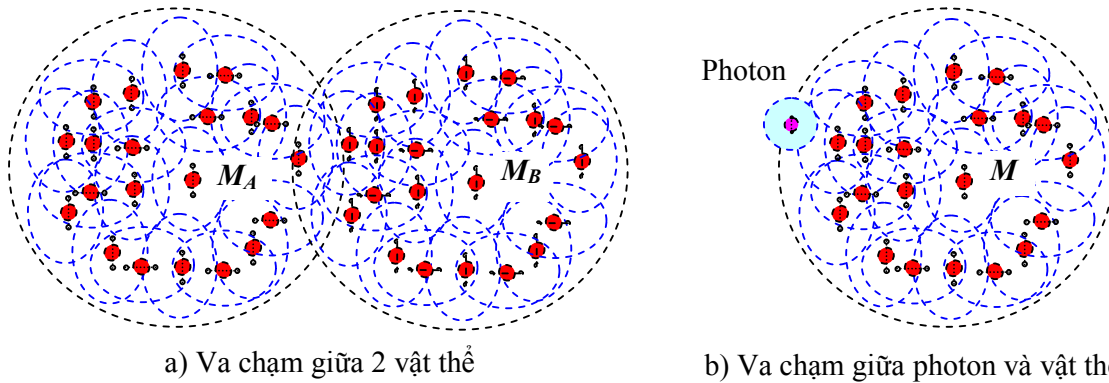
1) Động năng hấp dẫn của photon

Thực thể vật lý photon có ngoại năng tương ứng với phần không gian bên ngoài bán kính tác dụng ($R_T < R_h < \infty$), nhưng nội năng của nó ở trong phạm vi $< R_T$ lại không phải là năng lượng hấp dẫn mà chỉ là năng lượng điện thuần túy như đã biết – đây là đặc thù của photon với tư cách là một “lượng tử hấp dẫn” được hình thành từ tương tác điện tàn dư vừa nói ở trên khác với các dạng thực thể vật lý khác (xem Hình 1).



Hình 1. Mô hình photon trong tương tác hấp dẫn

Sự khác biệt này thể hiện rất rõ trong tương tác: khi các thực thể vật lý khác vốn được cấu tạo nên từ các nguyên tử va chạm nhau, tức là có sự tiếp xúc trực tiếp giữa các “không gian nội vi” của chúng với nhau (xem Hình 2a), trong các không gian nội vi ấy luôn bao hàm cả năng lượng hấp dẫn (tượng trưng bởi vùng bên ngoài các elíp) lẫn năng lượng điện (tượng trưng bởi vùng bên trong các elíp).



Hình 2. Mô hình va chạm giữa các vật thể

Trong khi đó, sự “va chạm” của photon lại chỉ xảy ra được với tương tác điện, vì trong “không gian nội vi” $< R_T$ của nó không có tương tác hấp dẫn. Điều này dẫn đến một hệ quả là: dường như động năng hấp dẫn của photon không thể hiện được trong va chạm với các thực thể vật lý khác? Nhưng nếu vậy thì động năng hấp dẫn sẽ biến đi đâu? Vấn đề là ở chỗ, động năng của một vật thể trong một trường lực thế (ở đây là trường điện) là năng lượng của vật thể chuyển

động trong trường lực thế đó; nó chỉ có nghĩa khi có thể xảy ra tương tác. Khi lan truyền trong trường hấp dẫn, photon vẫn có khối lượng quán tính trong trường hấp dẫn $m_T = M_T$ và vẫn có đặc tính bảo toàn hướng chuyển động và chỉ bị lệch hướng khi chịu tác động của nguồn hấp dẫn mạnh. Nhưng khi xuất hiện điều kiện “va chạm” (xem Hình 2b – phần màu xanh dương là vùng bán kính tác dụng điện của photon), tức là các “không gian nội vi” tiếp xúc được với nhau, thì với photon lại chỉ có tương tác điện với vật mà nó va chạm mà không “đính dáng” gì đến tương tác hấp dẫn (xem Hình 2a), không giống như đối với các vật thể có khối lượng hấp dẫn khác. Tuy nhiên, có thắc mắc cho rằng nếu không gian nội vi của photon không có tương tác hấp dẫn, thì trong trường hấp dẫn, nó phải không có “nội năng hấp dẫn”, tức là nội năng của nó trong trường hấp dẫn phải bằng 0 mới đúng chứ? Tuy nhiên, như chúng ta đã biết ở [1], đối với bất kể một thực thể vật lý nào, không thể nào có ngoại năng mà lại không có nội năng và hơn thế nữa, ngoại năng không thể nào lại có thể lớn hơn nội năng được, vì vậy, khái niệm nội năng bằng 0 là vô nghĩa. Hơn nữa, cái được gọi là “ngoại năng hấp dẫn” của photon chỉ là một phần năng lượng “tàn dư” của chính năng lượng điện đã tạo nên “nội năng” đó mà thôi; nếu nội năng ấy mà bằng 0 thì còn làm sao hình thành được photon nữa? Ở đây chỉ có vấn đề với cách gọi thôi: tuy được gọi là “nội năng hấp dẫn”, nhưng chỉ là xuất phát từ cặp phạm trù đối nghịch nhau “nội-ngoại” mà thôi; vì ngoại năng đã gọi là “hấp dẫn” rồi, nên phần đối nghịch kia (nội năng) cũng mới gọi là “hấp dẫn”, trong khi bản thân nó chỉ là năng lượng điện thuần túy. Nói tóm lại, cả nội năng và ngoại năng của photon (trong tương tác hấp dẫn) đều là từ cùng một nguồn sinh ra – năng lượng điện của cặp electron-positron, cách gọi thế nào chỉ là quy ước, không quan trọng.

Tuy nhiên, việc photon giảm tốc độ khi đi từ chân không vào trường điện (của môi trường) khiến tốc độ chuyển động của nó giảm xuống, mà theo lô gíc, động năng hấp dẫn của nó cũng phụ thuộc vào tốc độ chuyển động nên cũng phải giảm theo: một phần động năng hấp dẫn lúc này tự động chuyển hoá vào nội năng của photon (trong bán kính R_T) tương ứng với sự giảm tốc độ của photon từ c xuống đến u mà ta sẽ xem xét cụ thể ở chuyên đề “Photon với tương tác điện”.

2) Năng lượng toàn phần của photon

Trong trường hấp dẫn, photon có không gian nội vi ($< R_T$) tương ứng với “nội năng hấp dẫn” W_{nh} , và không gian ngoại vi ($> R_T$) tương ứng với năng lượng điện tàn dư – là ngoại năng hấp dẫn W_{ngh} gồm động năng hấp dẫn K_h và thế năng hấp dẫn $U_h(R_h)$:

$$K_h = \frac{m_T c^2}{2} = \text{const}, \quad (1)$$

$$U_h(R_h) = \gamma \frac{MM_T}{R_h}. \quad (2)$$

$$W_{ngh} = K_h + U_h(R_h). \quad (3)$$

ở đây $m_T = M_T$ – tương ứng là khối lượng quán tính và khối lượng hấp dẫn của photon. Năng lượng toàn phần của photon trong trường hấp dẫn thuần túy có thể viết dưới dạng tổng của “nội năng hấp dẫn” W_{nh} và “ngoại năng hấp dẫn” W_{ngh} :

$$W_{ph} = W_{nh} + W_{ngh} = W_{nh} + K_h + U_h(R_h). \quad (4)$$

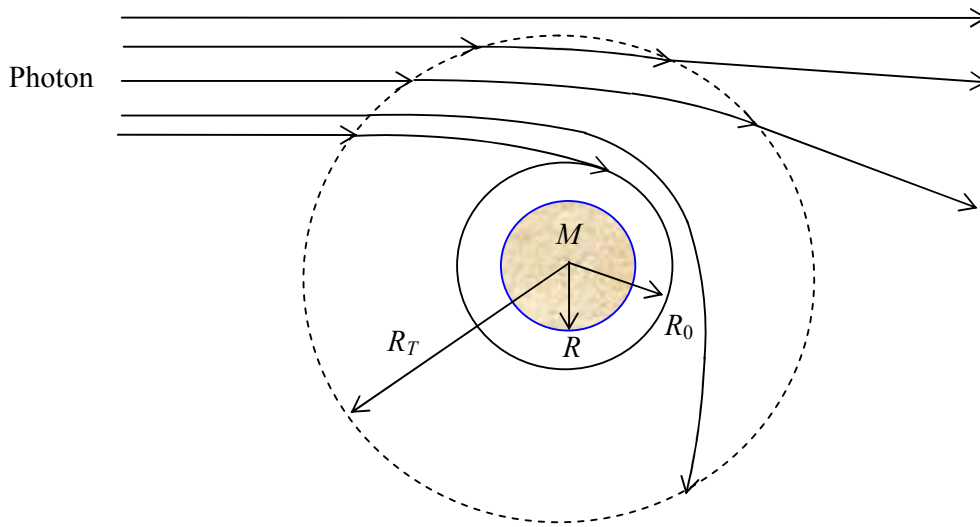
Có thể thấy ngoại năng của photon thay đổi chỉ do thế năng trong trường hấp dẫn, vì động năng của nó luôn là hằng số.

3) Tương tác của photon với nguồn hấp dẫn

Khi photon bay gần nguồn hấp dẫn mạnh có khối lượng hấp dẫn M , nó sẽ bị lệch hướng chuyển động như được chỉ ra trên Hình 3 – các photon không xảy ra va chạm với vật thể có khối lượng M . Cũng giống như đối với các vật thể khác, ta có thể giả thiết rằng quỹ đạo trong cùng ứng với bán kính R_0 khi lực hướng tâm của vật thể ấy tác động lên photon cân bằng với lực ly tâm của nó:

$$\gamma \frac{MM_T}{R_0^2} = \frac{m_T c^2}{R_0}, \quad (5)$$

ở đây $\gamma \approx 6,67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$.



Hình 3. Sự lệch hướng của photon gần nguồn hấp dẫn mạnh

Sau khi giản ước cả 2 vế của (5) ta được:

$$\gamma \frac{M}{R_0} = c^2, \quad (6)$$

hay:
$$\frac{M}{R_0} = \frac{c^2}{\gamma}. \quad (7)$$

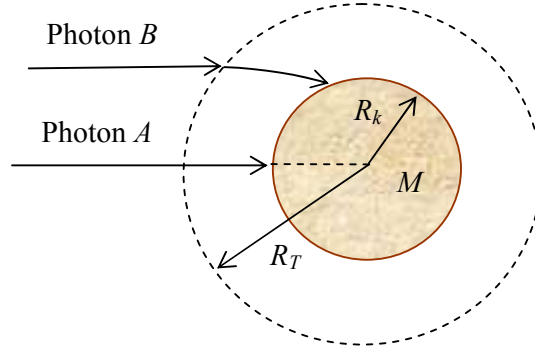
Điều gì sẽ xảy ra với photon khi chúng va chạm trực tiếp với vật thể M , dù là theo hướng thẳng vào tâm như photon A , hay dưới một góc bất kỳ như photon B như được chỉ ra trên Hình 4? Nếu giả thiết bán kính tại điểm va chạm có thể nhỏ tới mức sao cho nó không thể phản xạ trở lại được nữa, tức là thế năng hấp dẫn $U_h(R_k)$ cân bằng được với động năng K_h của photon A :

$$\gamma \frac{MM_T}{R_k} = \frac{m_T c^2}{2}. \quad (8)$$

Từ đây có thể rút ra được:

$$\frac{M}{R_k} = \frac{c^2}{2\gamma} = \text{const.} \quad (9)$$

Tỷ lệ này là một hằng số với mọi vật thể và bằng: $9 \times 10^{16} / 2 \times 6,67 \times 10^{-11} \approx 6,75 \times 10^{26}$ ($\text{kg}^2/\text{N} \cdot \text{s}^2$). So sánh (9) với (7) ta thấy $R_k = 2R_0$, tức là bán kính tới hạn lớn gấp 2 lần bán kính để có thể hình thành được quỹ đạo tròn của photon vừa xét ở trên. Điều này có nghĩa là nếu không xảy ra va chạm tại R_k , photon có thể sẽ chuyển động tiếp vào cho đến R_0 ? Ta sẽ làm rõ việc này.



Hình 4. Photon va chạm với nguồn hấp dẫn mạnh

Từ [2] ta cũng đã biết rằng động năng và thế năng của một vật thể rơi tự do trong trường hấp dẫn luôn luôn bằng nhau và biểu thức (8) chỉ là một trường hợp đặc biệt khi vật rơi đạt tới trạng thái cân bằng giữa nội năng và ngoại năng của nó (khi đó, bán kính R_k được gọi là bán kính tới hạn):

$$W_{nd} = W_{ngh} = K_h + U_h(R_k). \quad (10)$$

Gọi là “tới hạn” bởi vì nếu có thể tồn tại bán kính nhỏ hơn nữa, thì việc photon tiến sâu hơn vào tâm trường hấp dẫn sẽ khiến ngoại năng của nó tăng vượt lên trên nội năng, và kết quả là photon sẽ bị trường hấp dẫn mạnh của vật thể khối lượng M “bóp nát” – photon sẽ bị phân rã thành electron và positron.

Điều này cũng vẫn đúng với photon A , vì đối với trường hấp dẫn của vật thể có khối lượng M này, nó vẫn có thể được coi là “rơi tự do” vì hai lẽ: thứ nhất, như trên đã nói rồi, dù là được hình thành ở đâu thì trạng thái ban đầu của photon cũng là cả động năng và thế năng trong trường hấp dẫn đều bằng không cả, và thứ hai, động năng của nó như đã biết luôn luôn tương ứng với tốc độ tới hạn c , nên ngay tại bán kính “tới hạn” R_k vẫn tương ứng với c là lẽ đương nhiên. Khi đó, năng lượng toàn phần của photon có thể được viết lại dưới dạng:

$$W_{phh} = 2(K_h + U_h(R_k)) = 4K_h = 2m_T c^2. \quad (11)$$

Từ đây có thể tính được nội năng của photon trong trường hấp dẫn bằng:

$$W_{nd} = 2m_T c^2 - \frac{m_T c^2}{2} - \gamma \frac{MM_T}{R_h} = \frac{3}{2} m_T (c^2 - \gamma \frac{M}{R_h}). \quad (12)$$

Có thể nhận thấy:

$$\gamma \frac{M}{R_h} = GR_h = V_I^2 \quad (13)$$

chính là bình phương tốc độ vũ trụ cấp I (chuyển động theo quỹ đạo tròn) đối với các vật thể thông thường trong trường hấp dẫn có cường độ là G . Vì vậy, có thể viết gọn (12) lại dưới dạng:

$$W_{nd} = \frac{3}{2} m_T (c^2 - V_I^2). \quad (14)$$

Từ biểu thức (14) cho thấy từ điều kiện cân bằng giữa nội năng và ngoại năng của photon:

$$W_{nh} = W_{gnh} = \frac{1}{2} W_{phh} = m_T c^2, \quad (15)$$

Ta có thể viết:

$$\frac{3}{2} m_T (c^2 - V_I^2) = m_T c^2 \quad (16)$$

Từ đây rút ra được tốc độ vũ trụ cấp I tối đa đối với photon chỉ có thể là:

$$V_I = \frac{1}{\sqrt{3}} c < c. \quad (17)$$

Điều đó có nghĩa là photon không thể chuyển động được theo quỹ đạo tròn như đã giả thiết ở trên, vì trước khi vào được đến quỹ đạo ứng với bán kính R_0 , nó đã bị phân rã hoàn toàn thành các hạt không có tương tác hấp dẫn nữa rồi.

Từ một thực tế là đối với các thiên thể thông thường, tốc độ vũ trụ cấp I này rất nhỏ so với tốc độ ánh sáng: $V_I \ll c$, nên (14) có thể viết gần đúng:

$$W_{nd} \approx \frac{3}{2} m_T c^2. \quad (18)$$

Có nghĩa là photon luôn có dự trữ về nội năng để đảm bảo bền vững trước các tác động từ bên ngoài so với giá trị tới hạn là $\frac{1}{2}$ năng lượng toàn phần theo công thức (11), cụ thể là bằng:

$$\frac{W_{nd}}{W_{phh} / 2} \leq \frac{3m_T c^2}{2m_T c^2} = 1,5. \quad (19)$$

Đó cũng là lý do vì sao photon là một hạt sơ cấp bền vững, không thể bị phân rã trong các va chạm thông thường như các hạt sơ cấp khác. Như trên chúng ta vừa thấy chỉ khi rơi vào vật thể có bán kính đạt tới giá trị tới hạn R_k , thực chất phải là các hố đen trong vũ trụ, photon mới bị phân rã. Trở lại với biểu thức (9), có thể thấy đây cũng chính là điều kiện để hình thành nên hố đen như đã biết [3] và từ đây có thể rút ra được bán kính tới hạn để một ngôi sao khối lượng M có thể trở thành hố đen:

$$R_k = \frac{2\gamma M}{c^2}. \quad (20)$$

Đối với photon B , mặc dù không rơi thẳng đứng như photon A mà xiên đi một góc $< 90^\circ$ (xem Hình 4), nhưng vì ngay tại điểm rơi, ngoại năng đã bằng nội năng rồi, nên khi xảy ra va chạm, dù là dưới góc độ nào, nó cũng sẽ bị phân rã ngay lập tức thì làm sao còn phản xạ trở lại được? Tóm lại, khi đạt tới bán kính tới hạn R_k thì không có photon nào phản xạ trở lại được nữa.

Còn vấn đề cuối cùng là các thành phần năng lượng của photon thay đổi thế nào khi nó chuyển động trong trường hấp dẫn? Từ phương trình năng lượng toàn phần của photon trong trường hấp dẫn (11) ta thấy rằng vì động năng của nó theo (1) luôn luôn không thay đổi, nên ngoại năng hấp dẫn chỉ có thể thay đổi do thế năng hấp dẫn của photon mà thôi. Mặt khác, như

trên ta vừa phân tích, đối với photon không thể tồn tại được chuyển động theo quỹ đạo “tròn” (theo quán tính) như những vật thể thông thường khác, nên chuyển động của nó chỉ có thể là một dạng duy nhất: chuyển động phi quán tính, tức là với trạng thái năng lượng thay đổi, ở đây là sự chuyển hoá từ nội năng sang thế năng, và ngược lại, từ thế năng về nội năng của photon, tùy theo từng trường hợp cụ thể. Nghĩa là khi photon đi gần vào trường hấp dẫn với thế năng lớn lên, nội năng của nó phải giảm đi, và ngược lại, khi photon đi ra xa trường hấp dẫn với thế năng nhỏ đi, nội năng của nó phải tăng lên. Sự thay đổi thế năng của photon tương ứng với sự thay đổi khoảng cách tới tâm trường hấp dẫn R_{h1} và R_{h2} :

$$R_{h2} = R_{h1} + \Delta R_h . \quad (21)$$

$$\Delta U_h = U_h(R_{h2}) - U_h(R_{h1}) = \gamma M M_T \left(\frac{1}{R_{h2}} - \frac{1}{R_{h1}} \right) . \quad (22)$$

Từ các biểu thức (21) và (22), có thể rút ra được sự thay đổi thế năng tuyệt đối ΔU_h và tương đối δU_h của photon:

$$\Delta U_h = -\gamma M M_T \frac{\Delta R_h}{R_{h1} R_{h2}} , \quad (23)$$

$$\delta U_h = \frac{\Delta U_h}{U_h(R_{h1})} = \frac{-\Delta R_h}{R_{h2}} \approx -\delta R_h . \quad (24)$$

Mặt khác, cũng chính vì photon không thể chuyển động theo quán tính (quỹ đạo tròn) được, nên trong quá trình chuyển động trong trường hấp dẫn, năng lượng toàn phần của nó không thể bảo toàn mà sẽ phải tiêu hao dần đi. Đây chính là nguyên nhân dẫn đến hiện tượng “dịch chuyển đỏ” được quan sát thấy trong thiên văn mà bị nhầm tưởng là do hiệu ứng Doppler để rồi cho rằng “vũ trụ giãn nở”.

Vì nội năng của photon là năng lượng điện từ thuần túy như đã biết, nên để hiểu rõ hơn cơ chế thay đổi nội năng của photon, ta sẽ xem xét cụ thể chuyên đề tiếp theo: “Năng lượng của photon trong tương tác điện”.

Tài liệu tham khảo

- [1] Vũ Huy Toàn. *Con đường mới của vật lý học*, NXB Khoa học & Công nghệ, Hà nội, 2007.
- [2] Vũ Huy Toàn. *Xét lại định luật bảo toàn cơ năng của thực thể vật lý trong trường lực thế*. 2009. <http://vuhuytoan.files.wordpress.com/2008/12/xet-lai-dinh-luat-bao-toan-co-nang5.pdf>
- [3] Новиков И.Д. *Эволюция вселенной*. Физматлит. “Наука”, Москва, 1990.