

Hạt HIGGS - Cầu nối nhiều lĩnh vực vật lý

Như chúng ta đã biết, Giải Nobel Vật lý 2013 đã được trao cho hai nhà vật lý François Englert và Peter W. Higgs vì phát hiện ra lý thuyết của cơ chế hạt Higgs tạo khối lượng cho các hạt cơ bản. Sau 50 năm truy tìm, cuối cùng hạt Higgs đã được tìm ra. Điều quan trọng là việc phát hiện ra hạt Higgs tiếp tục mở ra những trang mới cho vật lý các hạt cơ bản và vũ trụ học. Bài viết của Roland E. Allen công bố trên tạp chí Physica Scripta số 89 năm 2014 đề cập đến những cầu nối giữa hạt Higgs với các lĩnh vực khác nhau của vật lý. Tạp chí KH&CN Việt Nam xin giới thiệu cùng bạn đọc.

Các nhà vật lý làm việc tại LHC đã tìm ra hạt Higgs, đúng là hạt Higgs mong đợi của mô hình chuẩn (Standard Model - SM). Đây là thành tích của khoảng 6.000 cộng tác viên khoa học làm việc trên hai thí nghiệm ATLAS và CMS tại LHC. Điều quan trọng là các nhà vật lý hạt ngày càng thấy rõ hạt Higgs là cầu nối [1] giữa SM với những phát hiện mới của vật lý ở năng lượng cao và vật lý ở nhiệt độ rất thấp. Sự tồn tại của một hạt cơ bản là hạt Higgs với spin 0 có thể đòi hỏi sự xuất hiện một vật lý mới dựa trên một siêu đối xứng [2].

Những hiện tượng tương tự với Higgs đã được quan sát trong kim loại siêu dẫn và khí siêu chảy ở nhiệt độ thấp (1 phần triệu hay phần tỷ độ Kelvin). Như thế, hạt Higgs cơ chừng sẽ là trung tâm của những thách thức để đạt đến một sự hiểu biết và chế ngự thiên nhiên sâu hơn.

Sắp xếp các hạt trong SM

Trong SM, các hạt được sắp xếp như ở hình 1.

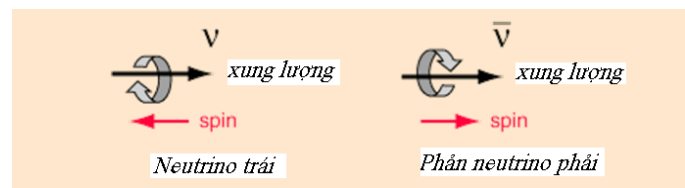
	Các hạt fermion			Các loại tích		
	1	2	3	Q	I_w	Y_w
$\Psi_- = \gamma_- \Psi$ Hạt trái L	$\begin{bmatrix} u \\ d \end{bmatrix}_L$	$\begin{bmatrix} c \\ s \end{bmatrix}_L$	$\begin{bmatrix} t \\ b \end{bmatrix}_L$	$+\frac{2}{3}$ $-\frac{1}{3}$	$+\frac{1}{2}$ $-\frac{1}{2}$	$+\frac{1}{3}$ $+\frac{1}{3}$
	$\begin{bmatrix} \nu_e \\ e^- \end{bmatrix}_L$	$\begin{bmatrix} \nu_\mu \\ \mu^- \end{bmatrix}_L$	$\begin{bmatrix} \nu_\tau \\ \tau^- \end{bmatrix}_L$	0 -1	$+\frac{1}{2}$ $-\frac{1}{2}$	-1 -1
	$\begin{bmatrix} u_R \\ d_R \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} c_R \\ s_R \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} t_R \\ b_R \end{bmatrix}$	$+\frac{2}{3}$ $-\frac{1}{3}$	0 0	$+\frac{4}{3}$ $-\frac{2}{3}$
$\Psi_+ = \gamma_+ \Psi$ Hạt phải R	$\begin{bmatrix} e_R^- \\ \nu_{eR} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \mu_R^- \\ \nu_{\mu R} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \tau_R^- \\ \nu_{\tau R} \end{bmatrix}$	-1 0	0 0	-2 0

Hình 1: sự sắp xếp các hạt trong mô hình chuẩn SM

Trên hình 1 ta thấy, các hạt fermion trái L (left) sắp xếp theo song tuyến (tức theo cặp), còn các hạt

fermion phải R (right) là những đơn tuyến (tức đứng riêng lẻ). Trong bảng xếp đặt trên cần chú ý đến đại lượng gọi là siêu tích Y_w (ở cột cuối cùng). Đại lượng Y_w gắn liền với điện tích Q và spin đồng vị yếu I_w bởi công thức $Q = I_w + 1/2 Y_w$. Ví dụ, với e^-_L ta có $-1 = -1/2 + 1/2 \cdot (-1)$.

Hình 2 cho chúng ta hình ảnh về neutrino trái L và phản neutrino phải R.

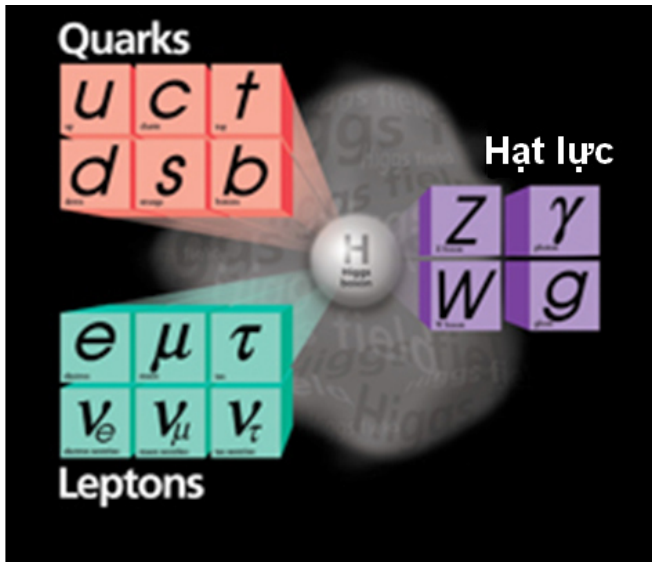


Hình 2: neutrino trái và phản neutrino phải

Hãy chú ý đến các neutrino phải $\nu_R = (1, 1)_0$, các neutrino này là những neutrino không hoạt tính (sterile neutrino), ν_R là đơn tuyến trong $SU(3)_c$, trong $SU(2)_w$ và có $Y_w = 0$. Neutrino không hoạt tính là những neutrino phải R (hoặc phản neutrino trái L) không tương tác với các neutrino hoạt tính (active neutrino) trong SM và chỉ có tương tác hấp dẫn.

Phát hiện hạt Higgs

Ngày 4.7.2012, sau nhiều thập kỷ và nhiều thế hệ, nhờ sự đóng góp của hàng nghìn nhà khoa học, hạt Higgs đã được tìm ra. Trong SM, hạt Higgs là một boson không có spin, điện tích và sắc tích (color charge - tính tương tác mạnh). Hình 3 cho thấy, vị trí trung tâm của các hạt chính là hạt Higgs. Hạt Higgs là một kích thích của trường Higgs bao trùm toàn bộ không gian, có thể nói đó là ngưng tụ Higgs (Higgs condensate). Thường người ta xem hạt Higgs chỉ là một hạt, song có thể đó là 2 hạt khi nghĩ đến siêu đối xứng [2].



Hình 3: hạt Higgs là hạt cơ bản đầu tiên không có spin là kích thích của trường Higgs. Higgs tạo nên khối lượng cho một số hạt trong SM. Các hạt photon, gluon và W và Z (xem phía phải hình) chuyển tải lực điện từ, lực mạnh và lực hạt nhân yếu

Vì ngưng tụ Higgs chiếm đầy không gian nên chúng ta luôn sống và chuyển động trong chất lỏng đặc biệt đó. Chúng ta không nhận thấy điều này vì đó là một chất lỏng với độ nhớt bằng 0. Muốn tạo nên một kích thích của ngưng tụ Higgs, nói cách khác, một hạt Higgs boson - chúng ta phải có những va chạm các hạt ở năng lượng rất cao mà hiện nay chỉ có ở Tevatron gần Chicago và LHC gần Geneva. Cơ chế Englert - Higgs giúp giải thích phương thức theo đó các hạt W và Z (hình 3) thu được khối lượng và điều này đóng vai trò chủ đạo trong sự phát triển mô hình SM của các hạt cơ bản.

Theo John Ellis, cơ chế tạo khối lượng cho các hạt tương tự như sự chuyển động của một nhân vật có danh tiếng trong sảnh lễ đường giữa một đám đông, đám đông đóng vai trò ngưng tụ Higgs. Nhân vật (hạt) càng có danh tiếng (hạt có khối lượng càng lớn) thì sự chuyển động trong đám đông càng khó khăn vì sự bao vây của người hâm mộ. Đây chỉ là một hình dung đơn giản của cơ chế tạo khối lượng, tuy nhiên giúp phản ánh được vấn đề. Khối lượng của các hạt W và Z đặc biệt quan trọng vì nó giải thích được tầm ngắn lực hạt nhân yếu trong phân rã beta. Theo nguyên lý bất định của cơ học lượng tử, một hạt ảo có thể “mượn” từ chân không một năng lượng ΔE trong một thời gian Δt thỏa mãn điều kiện $\Delta E \Delta t \sim \hbar$ và $\hbar$ là hằng số Planck chia cho 2π . Một hạt với khối lượng lớn M phải mượn một năng lượng lớn Mc^2 vì thế nó có thể đi được một quãng đường ngắn trong một thời gian ngắn.

Một khả năng đầy triển vọng của sự phát hiện hạt Higgs là chứng minh sự thống nhất (unity) của vật lý. Qua cơ chế Higgs, người ta thấy rằng *những hiện tượng ở năng lượng và nhiệt độ siêu cao về mặt định tính lại tương tự như các hiện tượng của môi trường đông đặc và vật lý nguyên tử ở năng lượng và nhiệt độ thấp*. Một ví dụ minh họa: chất He4 trở thành một siêu chảy khi bị lạnh đến 2,17K. Chất siêu chảy He4 có độ nhớt bằng 0, do đó mọi vật chuyển động trong đó dường như cảm thấy không có sức cản nào, chỉ khi nào vật chuyển động vượt một vận tốc tới hạn nào đó mới bắt đầu xuất hiện một kích thích gây nên sức cản. Trong nghĩa đó, đi xuyên qua He4 gần nhiệt độ 0K giống như chuyển động xuyên qua ngưng tụ Higgs và ta không cảm nhận được ngưng tụ Higgs.

Hạt Higgs là cầu nối nhiều lĩnh vực vật lý

Hạt Higgs là một hạt thực hiện cầu nối nhiều lĩnh vực khác nhau của vật lý. Xem hình 3 ta thấy, hạt Higgs bắc cầu giữa các hạt vật chất ở phía trái và các hạt chuyển tải lực ở phía phải và tạo cho các hạt những khối lượng theo những cách khác nhau. Hạt Higgs còn là cầu nối giữa toàn bộ SM ở hình 1 với nhiều hiện tượng và khái niệm mới của vùng năng lượng cao. Sự tồn tại của một hạt boson vô hướng (scalar boson) - một hạt không có spin - đòi hỏi một vật lý mới. Spin giống như moment góc của một đối tượng quay thông thường như bánh của một chiếc xe đạp. Song spin các hạt bị lượng tử hóa theo công thức $S = \sqrt{s(s+1)}\hbar$;

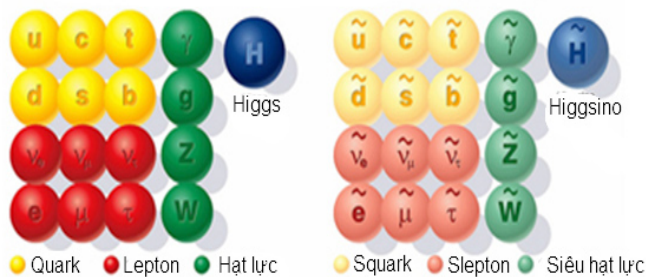
trong đó s là một bội số của $1/2$, ví dụ như 0, $1/2$, 1, $3/2$.

Các hạt vật chất và các hạt lực chuyển tải ở hình 1 và 3 cũng tuân theo công thức đó. Lý thuyết về các hạt electron và photon đã được xây dựng từ những năm 50 của thế kỷ XX và cách hành xử của chúng cũng đã được hiểu tường tận. Đặc biệt, những điều chỉnh lượng tử về khối lượng đã dẫn đến những đại lượng vô cực với dáng điệu logarithmic yếu mà người ta có thể chế ngự được theo nghĩa là có thể loại trừ các đại lượng vô cực đó, không cho chúng xuất hiện trong kết quả cuối cùng của các đại lượng vật lý. Kết quả là các tính toán lý thuyết và các kết quả thực nghiệm đã trùng nhau với một độ chính xác có thể so sánh với việc đo khoảng cách giữa New York City và Los Angeles chỉ sai lệch nhau ít hơn độ dày của một sợi tóc.

Việc tính toán đối với các hạt vật chất và hạt chuyển tải lực cũng được tiến hành theo cách trên và các đại lượng vô cực cũng được chế ngự tương tự. Song đối với hạt cuối cùng của cộng đồng các hạt trong hình 2

- tức hạt Higgs với spin 0 thì các tính toán dẫn đến một đại lượng vô cực rất mạnh, làm cho việc điều chỉnh khối lượng của hạt Higgs đòi hỏi phải có một vật lý mới can thiệp vào để triệt tiêu đại lượng vô cực của khối lượng hạt này. Người ta hy vọng vào việc nhờ SUSY (Supersymmetry - siêu đối xứng), chúng ta có thể làm triệt tiêu đại lượng vô cực đó (vì nhờ SUSY sẽ xuất hiện nhiều đại lượng vô cực trái dấu triệt tiêu nhau).

Nếu LHC sẽ phát hiện SUSY khi năng lượng của LHC tăng lên từ 8 đến 14 TeV thì điều này có ý nghĩa là, một đối xứng mới cơ bản ra đời và xuất hiện một cộng đồng mới của nhiều hạt (s chỉ hạt siêu đối xứng) đi song đôi với các hạt đã biết như trong hình 4.



Hình 4: trên hình - bên trái là các hạt trong SM, bên phải là các hạt s (hạt siêu đối xứng) tương ứng. Hạt Higgs với spin 0 sẽ có hạt s tương ứng là higgsino với spin bằng 1/2. Hạt photon có hạt s đồng hành là photino, còn hạt Z có siêu đồng hành là zino

Một chú ý quan trọng là, ta có thể kết hợp các hạt siêu đối xứng higgsino + zino + photino để có một hạt có tên là *neutralino*. Neutralino là một ứng viên đắt giá cấu thành vật chất tối (dark matter) của vũ trụ. Hạt Higgs là trung tâm quan trọng vì nhiều lý do khác. Hạt Higgs liên quan tới một lý thuyết Đại thống nhất (GUT = Grand unified theory) của các tương tác chưa có hấp dẫn: tương tác điện từ, tương tác hạt nhân mạnh vốn giam giữ quark với nhau trong một proton hay neutron (hay proton và neutron trong hạt nhân), tương tác hạt nhân yếu vốn gây nên phân rã phóng xạ (khi một neutron trong chân không hoặc trong một hạt nhân phân rã thành proton, một electron và một phản neutrino).

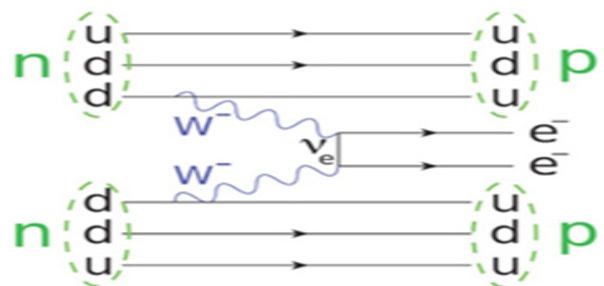
Cuối cùng, một số bài toán lớn trong vũ trụ học cũng liên quan chặt chẽ với hạt Higgs. Một bài toán trong số đó là bài toán hằng số vũ trụ (cosmological constant problem). Người ta quan tâm đến bài toán này khi thấy rằng, chân không lại bị chiếm bởi một ngưng tụ Higgs mật độ cao. Một bài toán khác liên quan đến Higgs là nguồn gốc lạm phát ở các thời điểm sơ sinh của vũ trụ. Hiện chưa có một lý thuyết hoàn chỉnh về lạm phát, song dường như có một ngưng tụ

của một trường inflation tương tự như quá trình ngưng tụ của trường Higgs.

Vấn đề khối lượng hạt neutrino

Trong SM, neutrino không có khối lượng song nhiều thí nghiệm đều chứng tỏ neutrino có một khối lượng nhỏ. Mặt trời được quan sát qua bức xạ neutrino. Thí nghiệm đầu tiên chứng tỏ khối lượng của neutrino là thí nghiệm của Ray Davis (thực hiện từ năm 1970 đến 1994) song song với John Bahcall thực hiện những tính toán về mặt lý thuyết. Khi proton tổng hợp để thành He4 sau một dãy phản ứng thì xuất hiện bức xạ electron và neutrino ν_e . Theo các tính toán của Bahcall, thì số neutrino ν_e phải bằng 3 lần số ν_e thu đo được trên thí nghiệm của Davis. Điều quan trọng là sự chênh lệch này không phải do sai sót của thí nghiệm hoặc lý thuyết hoặc khiếm khuyết của mô hình trong bức xạ neutrino của mặt trời, mà nguyên nhân nằm ở sự dao động (oscillation) của ν_e thành 3 loại neutrino ν_e trong hình 3. Sự dao động này chỉ xảy ra được nếu neutrino có khối lượng.

Các hạt neutrino có thể có 2 loại khối lượng: khối lượng Dirac và khối lượng Majorana [3] hoặc cả hai loại. Hạt neutrino phải R có thể có một khối lượng Majorana lớn, song khối lượng Majorana của neutrino thường lại nhỏ do cơ chế cầu bập bênh (seesaw mechanism) [4]. Cho nên, nếu dùng hình tượng các hạt trái phải như hai cánh tay của chúng ta thì các trường neutrino trông giống như một con tôm hùm với càng bên phải rất lớn và càng bên trái rất nhỏ. Một quá trình liên quan đến khối lượng neutrino (Dirac hay Majorana?) là hiện tượng phân rã kép beta không tạo nên neutrino ở hình 5. Nếu quan sát được hiện tượng này thì neutrino quả là một hạt Majorana.



Hình 5: giản đồ Feynman của quá trình phân rã beta đôi không có neutrino

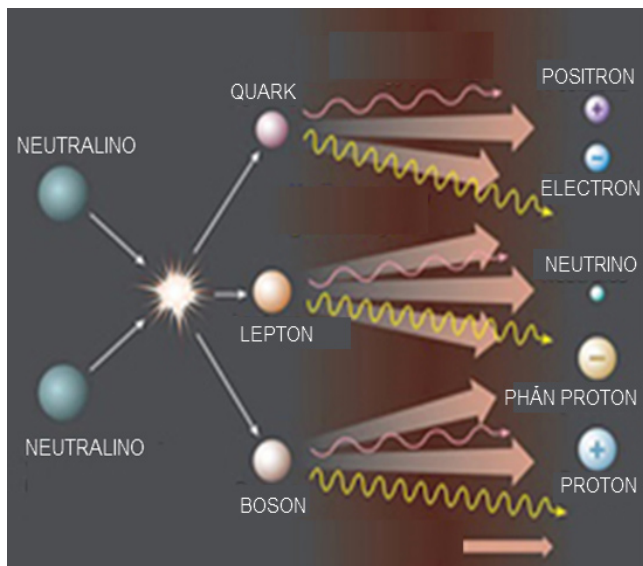
Trong hình trên các fermion là quark, electron và neutrino và neutron (neutron được cấu thành bởi quark u với tích là 2/3 và 2 quark d với tích là -1/3). Ở đây ta thấy xuất hiện 2 quá trình tương tác yếu trung gian

$d \rightarrow u + W^-$ và sau đó $W^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}$ ($W^- + \nu \rightarrow e^-$)

Chúng ta có thể diễn dịch như sau: phản neutrino ν bức xạ từ phản ứng thứ nhất tương đương với neutrino ν bị hấp thụ trong quá trình thứ hai nếu neutrino cũng là phản neutrino (hạt Majorana) thì phản neutrino phát sinh từ phân rã đầu sẽ bị hấp thụ bởi phân rã thứ hai (phân rã thứ hai hấp thụ neutrino tương đương với việc phát ra phản neutrino). Kết quả là phân rã kép beta không phát ra neutrino hoặc phản neutrino nào cả. Theo cách thức tạo khối lượng của hạt Higgs, ta có thể giả định có thể tồn tại một cơ chế cho nguồn gốc khối lượng Majorana, trong đó neutrino tương tác với một ngưng tụ khác ngưng tụ Higgs thành hình ở những thời điểm sơ khai của vũ trụ.

SUSY và vật chất tối

Như chúng ta thấy ở trên, hạt Higgs có thể dẫn đến một đối xứng là SUSY. SUSY tạo nên một ứng viên tuyệt hảo gọi là neutralino (fermion spin 1/2 với điện tích 0) cho vật chất tối (dark matter). Người ta có thể truy tìm neutralino theo phản ứng tự hủy của neutralino biểu diễn ở hình 6.



Hình 6: từ trái sang phải là quá trình tự hủy của neutralino, ở giai đoạn trung gian có quark, lepton, boson và sản phẩm cuối cùng là positron, electron, neutrino, phản proton và proton

Sự thống nhất của vật lý từ những vùng năng lượng rất cao đến những vùng nhiệt độ rất thấp

Qua những điều trình bày ở trên, chúng ta thấy rằng các quá trình tạo khối lượng đều là hệ quả tương tác của các hạt với những ngưng tụ của các trường boson.

Hiện tượng này đã xảy ra trong vật lý môi trường đông đặc trong nhiều thập kỷ và trong vật lý nguyên tử gần đây. Điều lý thú là tầm ngắn của tương tác hạt nhân yếu (do boson ảo W có khối lượng chuyển tải) có cùng một nguyên lý như trong hiện tượng Meissner của siêu dẫn. Trong một chất siêu dẫn thì từ trường không thể xâm nhập sâu và lịm dần ở một khoảng cách nhất định cỡ chục micron. Vì sao? Mọi việc xảy ra như là photon trong siêu dẫn tự nhiên thu được khối lượng (giống như các hạt gặp phải trường Higgs thu được khối lượng) nên không còn có tương tác tầm xa (long-range) nữa mà lại có tương tác tầm gần (short-range) vì đã có khối lượng. Vậy trường các cặp Cooper đóng vai trò như trường Higgs. Và ta có hiện tượng dường như photon tương tác với trường các cặp Cooper mà trở nên có khối lượng. Điều này làm cho từ trường mất tương tác tầm xa nên không thâm nhập vào chất siêu dẫn được.

Kết luận

Chúng ta sống trong một vũ trụ nhiều bí ẩn. Một hạt cơ bản với spin 0 là hạt Higgs xuất hiện dường như giúp chúng ta tổng quát hóa được vấn đề tạo khối lượng và hiểu được một bí ẩn cơ bản trong nhiều bí ẩn khác. Cũng đáng chú ý là quá trình lạm phát [5] có thể xảy ra ở thời điểm sơ sinh xuyên qua một ngưng tụ của trường inflation tựa Higgs (có khả năng hạt Higgs chính là inflation [6]). Việc phát hiện ra hạt Higgs là một bước tiến bộ vĩ đại trong lịch sử vật lý. Hạt Higgs trở thành trung tâm làm cầu nối nhiều lĩnh vực vật lý ■

CC. biên dịch và chú thích

Tài liệu tham khảo và chú thích

- [1] Roland E. Allen, The Higgs bridge, Physica scripta 89 018001, 2014 doi:10.1088/0031-8949/89/01/018001
- [2] Siêu đối xứng = đối xứng nối liền các hạt fermion với các hạt boson.
- [3] Khối lượng Dirac và khối lượng Majorana: nếu neutrino là một hạt Dirac (như các hạt trong SM) thì neutrino và phản neutrino là hai hạt khác nhau. Song nếu neutrino là một hạt Majorana thì neutrino và phản neutrino trùng nhau và là cùng một hạt. Không giống như hạt Dirac (hạt và phản hạt khác nhau), các hạt Majorana đồng nhất với phản hạt.
- [4] Cơ chế bập bênh (Seesaw mechanism) là cơ chế theo đó nếu khối lượng của neutrino không hoạt tính là lớn thì khối lượng của neutrino hoạt tính lại nhỏ và ngược lại. Đó là lý do vì sao cơ chế này được gọi là cơ chế bập bênh.
- [5] Lạm phát (inflation) là hiện tượng vũ trụ giãn nở cực nhanh trong một thời đoạn vào buổi sơ sinh của vũ trụ.
- [6] Michael Atkins, Could the Higgs Boson be the Inflaton? Phys. Lett. B697 (2011) 37-40 (arXiv:1011.4179)