

THAM SỐ HÓA ĐỘ PHÂN GIẢI CỦA MÁY ĐO VA CHẠM ATLAS TRONG PHÉP ĐO XUNG LƯỢNG NGANG CỦA HẠT BOSON Z TẠI MÁY GIA TỐC LHC

Đoàn Thị Kiều Oanh¹, Vũ Thị Hương², Tị Hơ Lià²
¹Trường Đại học Tây Bắc
²K55 Đại học Sư phạm Vật lý, Trường Đại học Tây Bắc

Tóm tắt: Phép đo xung lượng ngang của hạt boson Z phân rã thành cặp electron-positron trong va chạm proton-proton (p_T^Z) tại máy gia tốc LHC là một trong những phép đo cơ bản của vật lý hạt thực nghiệm. Các phép đo này được thực hiện bởi các máy đo va chạm của LHC như ATLAS, CMS. Kết quả của các phép đo này thường bị ảnh hưởng bởi độ phân giải của máy đo. Việc hiểu rõ ảnh hưởng của máy đo lên phép đo này sẽ đóng vai trò quan trọng trong việc hiệu chỉnh cho những phép đo phức tạp hơn. Trong nghiên cứu này chúng tôi tìm cách tham số hóa đồ thị độ phân giải của máy đo ATLAS trong phép đo p_T^Z . Hàm số mô tả sự phụ thuộc của độ phân giải máy đo vào p_T^Z có thể được sử dụng cho các chương trình mô phỏng khác nghiên cứu sâu hơn về ảnh hưởng của máy đo ATLAS lên phép đo p_T^Z .

Từ khóa: tham số hóa, độ phân giải, máy đo va chạm ATLAS, p_T^Z

1. Đặt vấn đề

Nhiệm vụ của các máy gia tốc hạt, trong đó có máy gia tốc LHC [1] là xác nhận sự tồn tại của một mô hình vật lý cho phép mô tả đúng đắn bản chất của các hạt và các lực cơ bản trong tự nhiên. Đây là một trong những mục đích quan trọng của vật lý hạt hiện đại nhằm tìm ra nguồn gốc hình thành vũ trụ. Mô hình được biết đến từ lâu cho phép mô tả tương đối đúng bản chất vật lý và mối quan hệ tương tác giữa các hạt cơ bản và các lực trong tự nhiên là Mô hình chuẩn. Việc tiến hành các phép đo trong thực nghiệm và so sánh các kết quả thu được với các dự đoán có thể rút ra từ mô hình vật lý là một trong những cách nghiên cứu hiệu quả nhằm xác định tính đúng đắn của một mô hình lý thuyết. Các phép đo được thực hiện tại các máy va chạm nhằm tìm hiểu các đặc tính động học của các hạt được sinh ra. Một ví dụ điển hình là phép đo xung lượng ngang của hạt boson Z phân rã thành cặp electron-positron p_T^Z .

Hạt boson Z là một trong những hạt cơ bản của Mô hình Chuẩn, đóng vai trò truyền tương tác yếu. Các phép đo các đại lượng vật lý của hạt boson Z đóng vai trò quan trọng trong việc đánh giá và hiệu chỉnh ảnh hưởng của độ phân giải máy đo lên các phép đo khác nhất là trong giai đoạn mới vận hành máy gia tốc LHC. Từ thời điểm vận hành máy năm 2009 đến nay, các phép đo thực hiện trên hạt boson Z vẫn liên tục được nghiên cứu nhằm tiến tới độ chính xác ngày một cao hơn [2, 3]. Do đó tiếp tục nghiên cứu trên đối tượng xung lượng ngang của hạt boson Z là một nội dung luôn có giá trị thực tiễn cao. Trong các va chạm proton-proton ở mức gần đúng thấp nhất (mức giản đồ cây), hạt boson Z được tạo ra trong quá trình Drell-Yan với

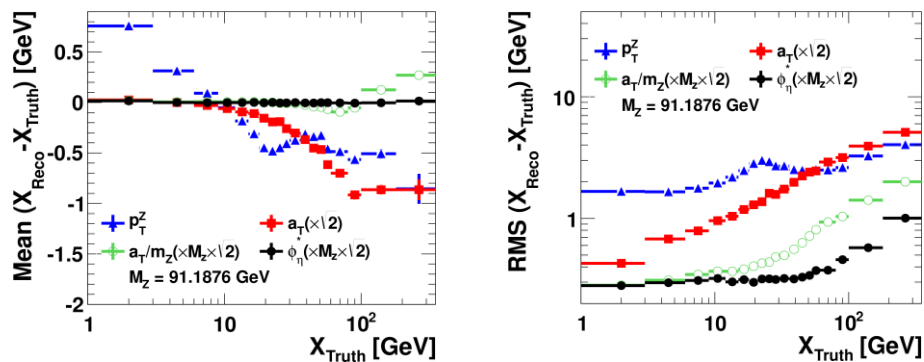
sự hủy cặp quark và phản quark và sau đó phân rã thành một cặp lepton, ví dụ cặp electron-positron. Ở gần đúng này, các parton (quark, phản quark) được xem như va chạm trực diện tại tâm của máy đo va chạm và do đó hạt boson Z được tạo ra với xung lượng ngang bằng không. Ở các gần đúng bậc cao hơn hạt boson Z được tạo ra với xung lượng khác không và cân bằng với xung lượng của các quark và gluon bổ chính vào giản đồ cây [4].

Trong các phép đo p_T^Z , giá trị đo được của p_T^Z thực chất được xây dựng dựa trên việc đo các xung lượng ngang p_T^e của các electron và positron mà thực chất thông qua vị trí và năng lượng của các hạt này thu thập được trong máy đo. Các tín hiệu của máy đo có thể bị sai lệch nhỏ tùy theo độ chính xác của máy đo và do đó góp phần tạo ra sai số cho phép đo p_T^e . Cuối cùng các sai số này sẽ góp phần ảnh hưởng đến kết quả của phép đo p_T^Z mà người ta thường nói là ảnh hưởng độ phân giải của máy đo. Thông thường độ phân giải của máy đo va chạm thường được nghiên cứu như là hàm phụ thuộc vào các giá trị của p_T^e , ví dụ xem tài liệu [5]. Việc nghiên cứu riêng rẽ sự phụ thuộc của độ phân giải máy đo vào chính đại lượng cần đo, ví dụ như p_T^Z ít được khảo sát. Tài liệu [4] cũng đã đề cập đến vấn đề này tuy nhiên các nhận xét về đáng điệu của sự phụ thuộc cũng như khả năng tham số hóa đồ thị phụ thuộc này chưa được thảo luận chi tiết. Đó là nội dung mà bài báo này sẽ tập trung phân tích sâu hơn.

2. Nội dung

2.1. Phạm vi và phương pháp nghiên cứu

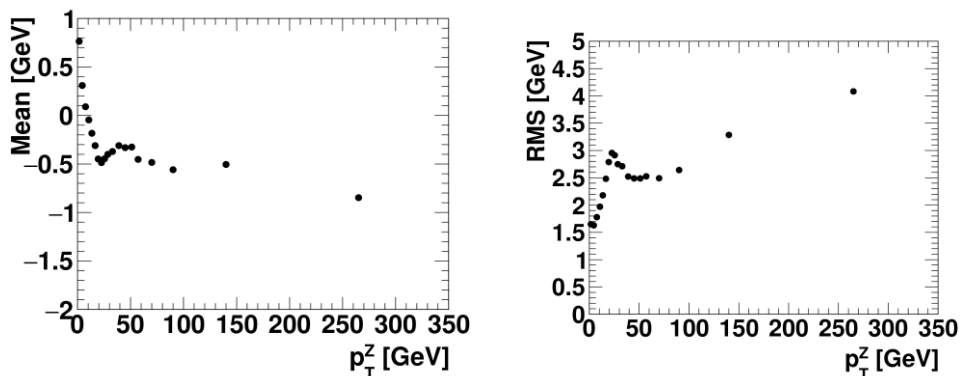
Với mục đích là tham số hóa đồ thị mô tả sự phụ thuộc độ phân giải của máy đo va chạm ATLAS vào giá trị p_T^Z , bài báo sẽ khai thác các số liệu về độ phân giải của máy đo đã được cung cấp bởi tài liệu [4]. Cụ thể Hình 1 trình bày lại các thông tin về độ phân giải máy đo trích ra từ tài liệu [4], trong đó các điểm hình tam giác biểu diễn đồ thị độ phân giải máy đo theo giá trị thực $X_{truth} \equiv p_{T,thực}^Z$. Giao diện phân tích số liệu ROOT sẽ được sử dụng để tham số hóa dữ liệu thu được thông qua các đoạn mã đơn giản dựa trên lập trình C++. Thông tin chi tiết về giao diện phân tích số liệu ROOT có thể được tìm thấy tại các nguồn tham khảo [6, 7].



Hình 1. Sự phụ thuộc giá trị trung bình (trái), bề rộng (phải) của độ phân giải của máy đo va chạm ATLAS vào xung lượng ngang của hạt boson Z [4]

2.2. Độ phân giải của máy đo va chạm ATLAS trong phép đo p_T^Z

ATLAS là một trong hai máy đo va chạm lớn nhất của hệ thống máy gia tốc LHC [1] được quản lý bởi Tổ chức nghiên cứu hạt nhân Châu Âu CERN thuộc khu vực giáp ranh giữa Thụy Sĩ và Pháp, gần thành phố Geneva của Thụy Sĩ. Máy gia tốc LHC được lắp đặt ở độ sâu từ 50 đến 175 m trong đường hầm có chu vi 27 km, được thiết kế để thực hiện các cuộc va chạm giữa các chùm proton với năng lượng lớn cỡ TeV^(*). Thí nghiệm ATLAS gồm rất nhiều bộ phận được dùng để thu thập tín hiệu của rất nhiều loại hạt khác nhau được tạo ra bởi các va chạm này. Máy đo va chạm ATLAS có dạng một khối hình trụ nằm ngang nặng 7000 tấn, dài 42 m, đường kính 25 m. Máy được lắp đặt sao cho trục gia tốc của hai chùm proton gần như trùng với trục của khối hình trụ và va chạm trực diện giữa các chùm proton-proton xảy ra tại tâm của máy. Cấu tạo chính của máy gồm các bộ phận để thu thập vị trí di chuyển và năng lượng của các hạt electron, photon, proton, neutron, muon,... Như vừa đề cập xung lượng ngang của hạt boson Z phân rã thành cặp electron-positron sẽ được xây dựng từ xung lượng của electron và positron dựa trên các số liệu này. Thông tin chi tiết về máy đo ATLAS có thể được tìm thấy trong [4] và các tài liệu tham khảo của [4]. Dựa vào số liệu Hình 1 và sử dụng chương trình g3data [8], giá trị trung bình và bề rộng của độ phân giải của máy đo ATLAS trong phép đo p_T^Z được khôi phục như Hình 2. Cách cài đặt và sử dụng g3data có thể được tìm thấy tại trang thông tin [8]. Có thể nhận thấy các đồ thị này thể hiện những quy luật phụ thuộc nhất định và có thể được tham số hóa sử dụng các hàm toán học phổ biến.



Hình 2. Sự phụ thuộc giá trị trung bình (trái), bề rộng (phải) của độ phân giải của máy đo va chạm ATLAS vào xung lượng ngang của hạt boson Z được khôi phục từ hình 1

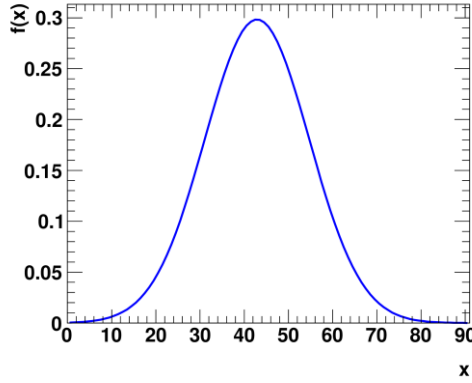
2.3. Tham số hóa đồ thị độ phân giải của máy đo va chạm ATLAS

Với tính chất linh động, hàm Gauss sẽ được sử dụng trong việc tham số hóa đồ thị độ phân giải của máy đo va chạm ATLAS. Mỗi hàm Gauss có dạng như sau:

$$f(x) = ae^{-\frac{(x-b)^2}{2c^2}}$$

trong đó $f(x)$ là hàm phụ thuộc vào biến x và a, b, c là các tham số. Ví dụ dạng của hàm Gauss với $a=0,30$; $b=42,89$; $c=11,79$ được biểu diễn trong Hình 3.

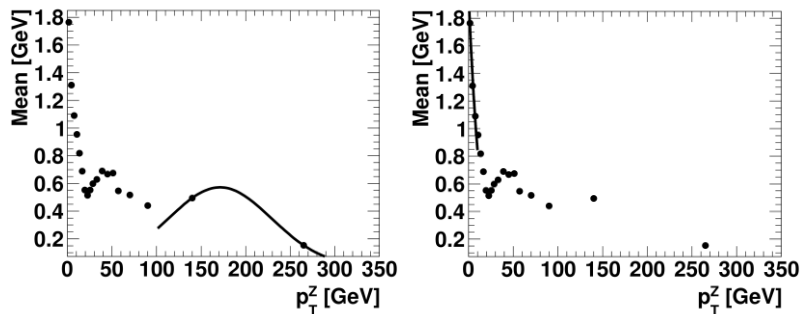
(*) Các đại lượng trong bài báo này sử dụng hệ đơn vị $\hbar=c=1$



Hình 3. Ví dụ dạng hàm Gauss

2.3.1. Giá trị trung bình của độ phân giải máy đo

Ứng dụng khớp hàm số liệu trong ROOT được sử dụng cho các hàm phân bố sự kiện hay nói cách khác là số sự kiện có được trong mỗi khoảng giá trị của đại lượng được khảo sát. Do đó các hàm phân bố này luôn có giá trị không âm. Để có thể sử dụng được ứng dụng này trong trường hợp giá trị trung bình của độ phân giải, các giá trị này được nâng lên một đơn vị để thỏa mãn điều kiện không âm và sau đó mới được khớp hàm số liệu dựa trên dáng điệu của hàm Gauss. Từng khoảng giá trị của đồ thị sẽ được khớp với một hàm Gauss và tổng của ba hàm Gauss thỏa mãn tham số hóa một cách đầy đủ đồ thị này. Hàm Gauss thứ nhất được sử dụng để khớp trong khoảng từ 0 đến 10 GeV, hàm thứ hai cho khoảng từ 30 đến 60 GeV, hàm thứ ba cho khoảng từ 100 đến 350 GeV. Kết quả này được hiển thị trong Hình 4, trong đó các đường liền nét hiển thị các hàm Gauss nói trên.

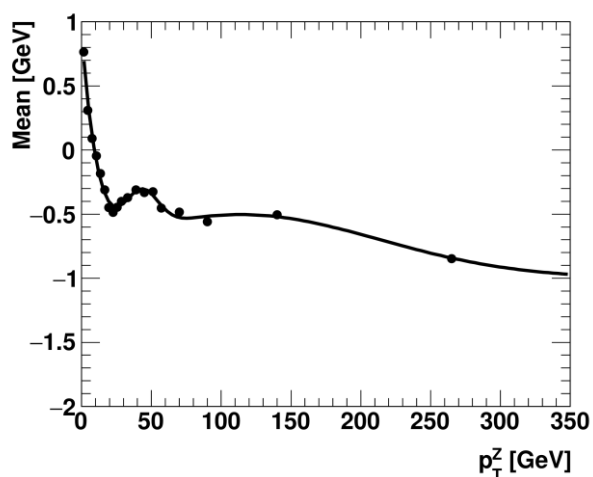


Hình 4. Kết quả khớp hàm số liệu cho ba khoảng giá trị của đồ thị giá trị trung bình của độ phân giải

Tổng của ba hàm này cho kết quả khớp hàm số liệu giá trị trung bình của độ phân giải của máy đo như trong Hình 5. Kết quả thu được cho thấy hàm toán học được sử dụng biểu diễn tốt quy luật phụ thuộc của giá trị trung bình của độ phân giải máy đo ATLAS vào p_T^Z . Hàm đó có dạng:

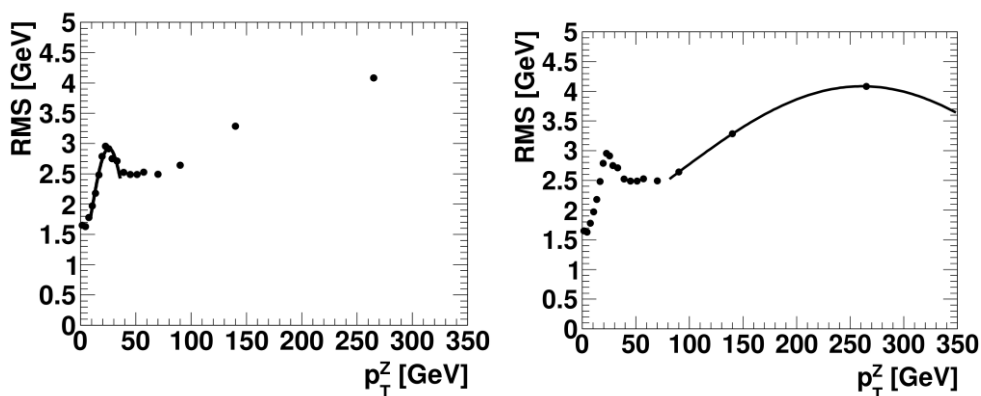
$$89,108e^{-0,5[(x+88,143)/31,262]^2} + 0,298e^{-0,5[(x-42,888)/11,791]^2} + 0,4972e^{-0,5[(x-113,684)/99,918]^2} - 1,$$

với $x \equiv p_T^Z$.

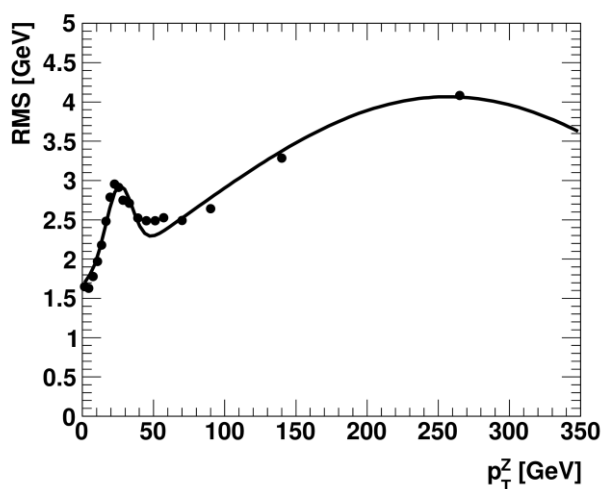


Hình 5. Kết quả khớp hàm số liệu cho đồ thị giá trị trung bình của độ phân giải máy đo ATLAS sử dụng tổng của ba hàm Gauss

2.3.2. Bề rộng của độ phân giải máy đo



Hình 6. Kết quả khớp hàm số liệu cho hai khoảng giá trị của đồ thị bề rộng độ phân giải



Hình 7. Kết quả khớp hàm số liệu cho đồ thị bề rộng của độ phân giải máy đo ATLAS sử dụng tổng của hai hàm Gauss

Tương tự như trường hợp trên, đồ thị bề rộng của độ phân giải máy đo được khớp với hai hàm Gauss trong các khoảng giá trị từ 9 đến 36 GeV và từ 80 đến 350 GeV. Kết quả này được thể hiện trên Hình 6. Tổng của hai hàm Gauss dùng để tham số hóa đồ thị này có dạng: $0,973e^{-0,5[(x-25,591)/9,275]^2} + 4,066e^{-0,5[(x-256,691)/191,119]^2}$, với $x \equiv p_T^Z$, được biểu diễn trong Hình 7, thể hiện sự phù hợp với dáng điệu của đồ thị được nghiên cứu.

3. Kết luận

Bài báo đã thực hiện nghiên cứu dáng điệu và tham số hóa các đồ thị biểu diễn sự phụ thuộc của độ phân giải máy đo va chạm ATLAS vào xung lượng ngang của hạt boson Z phân rã thành cặp electron-positron trong các va chạm proton-proton ở LHC với năng lượng khối tâm 7 TeV (p_T^Z). Số liệu của các đồ thị này được khôi phục từ tài liệu [4]. Kết quả cho thấy hàm Gauss phù hợp để thực hiện việc tham số hóa các đồ thị này. Sự phụ thuộc của giá trị trung bình độ phân giải vào p_T^Z được biểu diễn bằng tổng của ba hàm Gauss: $89,108e^{-0,5[(x+88,143)/31,262]^2} + 0,298e^{-0,5[(x-42,888)/11,791]^2} + 0,4972e^{-0,5[(x-113,684)/99,918]^2} - 1$, còn đối với bề rộng của độ phân giải là hai hàm Gauss: $0,973e^{-0,5[(x-25,591)/9,275]^2} + 4,066e^{-0,5[(x-256,691)/191,119]^2}$. Nội dung nghiên cứu còn một hạn chế nhỏ do việc khôi phục số liệu từ tài liệu [4] chỉ có khả năng cung cấp giá trị của các điểm và không có sai số kèm theo. Điều này cũng có ảnh hưởng nhỏ đến kết quả khớp hàm số liệu. Tuy nhiên mục đích của bài báo là tìm ra dáng điệu của các đồ thị được đưa vào nghiên cứu nên kết quả nghiên cứu hoàn toàn đáp ứng được mục đích này. Một điểm cần đề cập đến ở đây là giá trị độ phân giải nói trên có được ở thời điểm máy đo ATLAS mới hoạt động vào năm 2010 - 2011 nên các giá trị này có phần lớn hơn độ phân giải mà máy đo đạt được hiện nay. Các giá trị cập nhật về độ phân giải của máy đo ATLAS có thể được tìm thấy tại tài liệu [5] và các tài liệu khác trong đó. Kết quả nghiên cứu này có thể được dùng để phục vụ cho các nghiên cứu khác liên quan đến độ phân giải của máy đo ATLAS trong phép đo p_T^Z , ví dụ như: mô phỏng ma trận độ phân giải, khảo sát khoảng chia bin cho phép đo p_T^Z .

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] The Large Hadron Collider (2004). LHC Design Report, CERN-2004-003-V-1, CERN-2004-003-V-2, CERN-2004-003-V-3.
- [2] ATLAS Collaboration (2006). Measurement of the transverse momentum and ϕ_η distributions of Drell-Yan lepton pairs in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector, Eur. Phys. J. C.,76: 291.
- [3] CMS Collaboration (2015). Measurement of the Z boson differential cross section in transverse momentum and rapidity in proton-proton collisions at 8TeV, Phys. Lett. B., 749: 187-209.

- [4] T. K. O. Doan (2013). Mesure de la section efficace différentielle de production du boson Z se désintégrant en paires électron-positon, dans l'expérience ATLAS, CERN-THESIS-2013-001.
- [5] ATLAS Collaboration (2014). Electron and photon energy calibration with the ATLAS detector using LHC Run 1 data, Eur. Phys. J. C., 74: 3071.
- [6] ROOT a Data Analysis Framework, <https://root.cern.ch/>.
- [7] Ilka Antcheva et al., (2009). ROOT - A C++ Framework for Petabyte Data Storage, Statistical Analysis and Visualization, Computer Physics Communications, 180(12): 2499 - 2512.
- [8] g3data, <http://www.frantz.fi/software/g3data.php>.

PARAMETERIZING THE RESOLUTION DISTRIBUTION OF THE ATLAS DETECTOR AS FUNCTIONS OF p_T^Z

Doan Thi Kieu Oanh¹, Vu Thi Huong², Ti Ho Lia²

¹Tay Bac University

²Student, Faculty of Mathematics - Physics - Informatics

Abstract: *Measurements of the transverse momentum distribution of Z bosons decaying into electron-positron pairs in proton-proton collisions at the LHC (p_T^Z) is one of fundamental measurements of experimental particle physics. These measurements have been presented by the detectors of the LHC as the ATLAS and CMS. The effect of the detector resolution is always taken into account in these measurements. Understanding this impact plays an important role in the adjustment to more complex measurements. In this study we parameterize the resolution distribution of the ATLAS detector as functions of p_T^Z . The obtained functions can be used for other simulation programs and studies relating to the impact of the ATLAS detector resolution on the p_T^Z measurements.*

Keywords: *parameterization, resolution, the ATLAS detector, p_T^Z .*