

# ĐỘ MẤT NĂNG LƯỢNG CỦA CHÙM HẠT $^4\text{He}$ VÀ $^{22}\text{Mg}$ TRONG BIA KHÍ $\text{He}+\text{CO}_2$ ENERGYLOSS OF $^4\text{He}$ PARTICLES AND $^{22}\text{Mg}$ RADIOACTIVE IONS IN $\text{He}+\text{CO}_2$ GAS TARGET

Nguyễn Kim Uyên<sup>1</sup>, Nguyễn Ngọc Duy<sup>2</sup> và David Miles Kahl<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật TP. Hồ Chí Minh

<sup>2</sup>Trường Đại học Đồng Nai

<sup>3</sup>Trung tâm CNS, Trường Đại học Tokyo, Nhật Bản

Ngày tòa soạn nhận bài 14/10/2014, ngày phản biện đánh giá 27/12/2014, ngày chấp nhận đăng 02/2/2015

## TÓM TẮT

Chúng tôi đã tiến hành đo đạc trực tiếp độ mất năng lượng của chùm hạt alpha ( $^4\text{He}$ ) trong vùng năng lượng [4.788 , 5.795] MeV và chùm hạt phóng xạ  $^{22}\text{Mg}$  năng lượng 25.894 MeV đi qua lớp hỗn hợp khí  $\text{He}+\text{CO}_2$ (10%). Chùm alpha gồm ba đồng vị  $^{237}\text{Np}$  (4.788 MeV),  $^{241}\text{Am}$  (5.486 MeV) và  $^{244}\text{Cm}$  (5.795 MeV) với cường độ 350 Bq. Chùm hạt phóng xạ  $^{22}\text{Mg}$  được tạo ra từ phản ứng hạt nhân  $^3\text{He}(^20\text{Ne},^{22}\text{Mg})n$ . Thử nghiệm này được nghiên cứu tại trung tâm hạt nhân CNS của đại học tổng hợp Tokyo, Nhật Bản, với hệ phổ kế CRIB. Báo cáo này trình bày kết quả thực nghiệm của phép đo độ mất năng lượng và so sánh với kết quả tính toán của SRIM2008, ATIMA và tính toán của F.Hubert. Kết quả cho thấy có sự sai khác giữa các kết quả tính toán và thực nghiệm. Do đó, chúng ta cần có những hiệu chỉnh và lưu ý khi sử dụng những phần mềm này.

**Từ khóa:** độ mất năng lượng, hạt nhân, alpha,  $^{22}\text{Mg}$ ,  $\text{He}+\text{CO}_2$ .

## ABSTRACT

Energy loss of alpha particles in energy region 4.788 ÷ 5.795 MeV and of  $^{22}\text{Mg}$  radioactive ions at 25.894 MeV in the gas of  $\text{He}+\text{CO}_2$  (10%) was measured. The alpha particles were emitted from a thin triple alpha-source including  $^{237}\text{Np}$  (4.788 MeV),  $^{241}\text{Am}$  (5.486 MeV) and  $^{244}\text{Cm}$  (5.795 MeV) with 350 Bq of intensity. The  $^{22}\text{Mg}$  radioactive ion (RI) beam was produced via  $^3\text{He}(^20\text{Ne},^{22}\text{Mg})n$  reaction. The experiment was performed at NuclearStudyCenter of the University of Tokyo, Japan, by using CRIB spectrometer. This paper reports the experimental data of energy loss measurement of these isotopes in the mixed gas  $\text{He}+\text{CO}_2$ (10%). A comparison of the empirical results and the calculation by using computer codes SRIM2008, ATIMA and F.Hubert's theoretical data is also pointed out. The final results show that there are some differences between the theoretical results and the experimental ones. Therefore, we need to concern modifying when we use such computer codes.

**Keywords:** energy loss, alpha, radioactive ion  $^{22}\text{Mg}$ , active gas target  $\text{He}+\text{CO}_2$ .

## I. GIỚI THIỆU

Độ mất năng lượng của hạt nhân khi qua các lớp vật liệu không chỉ có ý nghĩa rất quan trọng trong việc che chắn phóng xạ, ghi đo số liệu hạt nhân mà còn cho phép chúng ta đo bề

dày hay mật độ của vật liệu và ứng dụng trong các ngành công nghiệp [1, 2]. Chẳng hạn như trong bài toán an toàn bức xạ, người ta phải tính đến suất liều hấp thụ của vật liệu đối với

các chùm phóng xạ. Khi đó, giá trị độ mất năng lượng trong bia có ý nghĩa quyết định đối với những khuyến cáo về độ an toàn khi che chắn. Trong kỹ thuật phủ nano hay cấy các hạt ion lên bề mặt vật liệu, việc đo độ dày lớp ion đã phủ cũng được thực hiện thông qua kết quả đo độ mất năng lượng của chùm bức xạ khi đi qua vật chất. Bên cạnh đó, độ mất năng lượng cũng ảnh hưởng rất lớn đến việc thiết kế và phân tích các chùm hạt phóng xạ được tạo ra bằng cách sử dụng máy gia tốc [3]. Bởi vì số liệu độ mất năng lượng của các chùm hạt nhân đi qua vật chất có vai trò rất quan trọng trong nhiều lĩnh vực nên hiện nay trên thế giới có một số phần mềm được xây dựng để tính toán giá trị này dựa trên công thức bán thực nghiệm Bethe-Bloch [4]:

$$\frac{dE}{dx} = \alpha \cdot \rho \cdot \frac{Z}{A} \cdot \frac{z^2}{\beta^2} \left[ \ln \left( \frac{2m_e \gamma^2 v^2 W_{\max}}{I^2} \right) - 2\beta^2 - \delta - 2 \frac{C}{Z} \right]$$

(1)

Với  $\alpha = 0.1535 (MeV \cdot cm^2 \cdot g^{-1})$

$m_e$ : khối lượng nghỉ của electron.

$N_A = 6.023 \times 10^{23}$  (hạt/mol).

I: năng lượng kích thích trung bình.

A: khối lượng hiệu dụng của bia.

r: mật độ bia.

Z và z: Số nguyên tử hiệu dụng của bia và hạt đạn.

d: hệ số hiệu chỉnh mật độ.

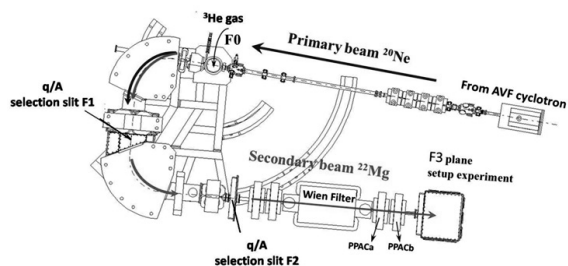
C: hệ số hiệu chỉnh vỏ.

$W_{\max}$ : năng lượng truyền đi trong một va chạm.

Tuy nhiên, vì các code chương trình tính toán dựa trên công thức này mang tính lý thuyết và có những sai lệch so với thực tế. Do đó, các chương trình máy tính này rất cần sự

đánh giá cũng như hiệu chỉnh dựa trên số liệu thực nghiệm ghi nhận được, đặc biệt là đối với vật liệu là hỗn hợp đa nguyên tố. Với những lý do vừa nêu và để ghi đo số liệu của phản ứng hạt nhân  $^{22}\text{Mg}(\alpha, p)^{25}\text{Al}$ , chúng tôi đã tiến hành thực nghiệm đo độ mất năng lượng của các chùm hạt alpha và  $^{22}\text{Mg}$ .

Trong thực nghiệm này, chúng tôi đã đo độ mất năng lượng của chùm hạt alpha có năng lượng lần lượt là 4.788 MeV, 5.486 MeV, 5.795 MeV và chùm hạt  $^{22}\text{Mg}$  năng lượng 25.894 MeV trong hỗn hợp khí He+CO<sub>2</sub> (đây là bia của phản ứng  $^{22}\text{Mg}(\alpha, p)^{25}\text{Al}$ , trong đó có He-90% và CO<sub>2</sub>-10%) với những bề dày khác nhau. Phép đo độ mất năng lượng này được tiến hành tại hệ phổ kế CRIB (CNS Radioactive Ion Beam) [5] của đại học tổng hợp Tokyo, đặt tại viện nghiên cứu liên hợp RIKEN, Nhật Bản, xem hình 1. Kết quả đo đạc từ thực nghiệm này được so sánh và đánh giá với các giá trị tính toán của Ziegler trong phần mềm SRIM 2008 [6], của Hans Geissel cùng các cộng sự trong phần mềm ATIMA [7] và các số liệu được tính theo nhóm F.Hubert cùng các cộng sự trong tài liệu [8]. Kết quả phân tích, đánh giá cho thấy các chương trình máy tính cho ra kết quả tương đối phù hợp với thực nghiệm trong một số trường hợp, một số trường hợp khác có sự sai lệch lớn cần phải hiệu chỉnh.

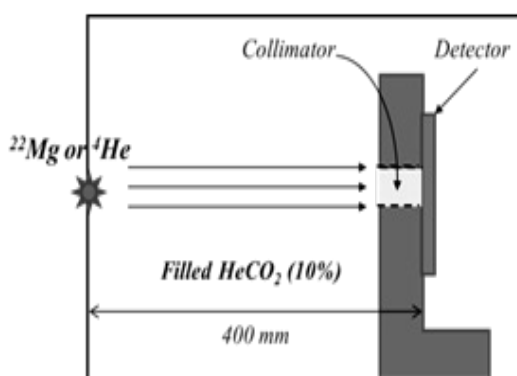


**Hình 1.** Hệ phổ kế CRIB của đại học Tokyo. Chùm hạt  $^{22}\text{Mg}$  được tạo ra từ phản ứng  $^{20}\text{Ne} + 3\text{He}$  ở F0 và được lọc hai lần qua hai hệ thống điện từ: tứ cực điện-nam châm và bộ lọc Wien. Phép đo độ mất năng lượng được thực

hiện tại buồng thực nghiệm F3.

## II. TIẾN HÀNH THỰC NGHIỆM

Trong phép đo này, chúng tôi sử dụng nguồn alpha gồm ba đồng vị  $^{237}\text{Np}$  (4.788 MeV),  $^{241}\text{Am}$  (5.486 MeV) và  $^{244}\text{Cm}$  (5.795 MeV) với cường độ 350 Bq. Chùm hạt không bền  $^{22}\text{Mg}$  được tạo ra theo phản ứng sơ cấp  $^3\text{He}(^{20}\text{Ne}, ^{22}\text{Mg})\text{n}$  bằng cách chiếu chùm hạt  $^{20}\text{Ne}$ , có cường độ 700 enA (electron-nano-Ampere) đã được gia tốc đến năng lượng 6.2 MeV/u, vào bia lạnh  $^3\text{He}$  được giữ ở nhiệt độ 90 K [9, 10]. Chùm  $^{22}\text{Mg}$  sau khi ra khỏi F0 được lọc hai lần qua hệ thống các điện cực và nam châm để có độ tinh khiết cao. Để có thể nhận dạng hạt  $^{22}\text{Mg}$ , vì phản ứng sơ cấp tạo ra cả những hạt khác, chúng tôi đã sử dụng hệ detector gồm hai PPACs [10, 11] và để đo năng lượng hạt chúng tôi dùng detector Silicon. Kết quả chùm hạt  $^{22}\text{Mg}$  được tạo ra với năng lượng 25.894 MeV trên bia có cường độ 1200 pps (hạt/giây) được sử dụng cho phép đo mất năng lượng. Chi tiết của việc tạo chùm hạt được công bố trong tài liệu [11, 12].



**Hình 2.** Sơ đồ bố trí thực nghiệm đo độ mất năng lượng của  $^4\text{He}$  và  $^{22}\text{Mg}$  trong khí  $\text{He}+\text{CO}_2$ .

Để thực hiện phép đo, bia khí  $\text{He}+\text{CO}_2(10\%)$  được phun đầy vào buồng F3 và áp suất của nó được giữ ổn định bởi hệ thống máy bơm có van tự động. Khi cần thay đổi độ dày bia,

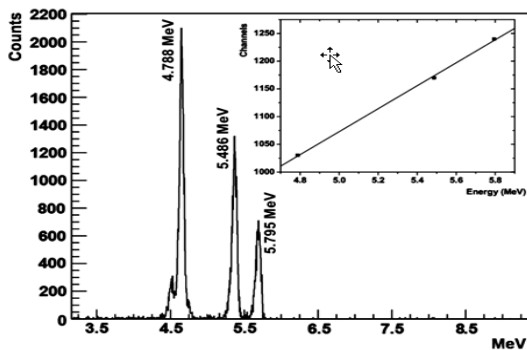
chúng ta sẽ thay đổi áp suất bằng cách điều chỉnh các van điện tử được kết nối giữa buồng khí và bình cung cấp khí. Nhiệt độ của khí được giữ ở 300 K bởi hệ thống máy điều hòa nhiệt độ. Chùm hạt tới ( $^4\text{He}$  và  $^{22}\text{Mg}$ ) được chiếu qua một ống chuẩn trực có đường kính 04 mm và bề dày 05 cm trước khi đến detector silicon. Khoảng cách giữa vị trí bắt đầu của hạt đến vị trí detector silicon là 400 mm. Hình 2 là sơ đồ bố trí của phép đo trong buồng F3 của hệ phổ kế CRIB.

Chúng tôi thực hiện đo độ mất năng lượng của  $^{22}\text{Mg}$  bằng cách giữ năng lượng cố định và thay đổi kích thước bia lần lượt là 0.47916  $\text{mg}/\text{cm}^2$ , 0.77008  $\text{mg}/\text{cm}^2$ , 1.02676  $\text{mg}/\text{cm}^2$ , 1.35192  $\text{mg}/\text{cm}^2$  và 1.71128  $\text{mg}/\text{cm}^2$  bằng cách điều chỉnh van điện tử để thay đổi áp suất đối. Đối với alpha, năng lượng của các hạt thay đổi và giữ bề dày bia ở giá trị không đổi 0.47916  $\text{mg}/\text{cm}^2$ . Năng lượng ban đầu trong môi trường chân không và năng lượng sau khi qua lớp khí của các hạt được đo bằng detector silicon. Chúng ta dễ dàng thu được độ mất năng lượng của các hạt chính độ chênh lệch giữa hai giá trị trước và sau khi qua bia khí  $\text{He}+\text{CO}_2(10\%)$ .

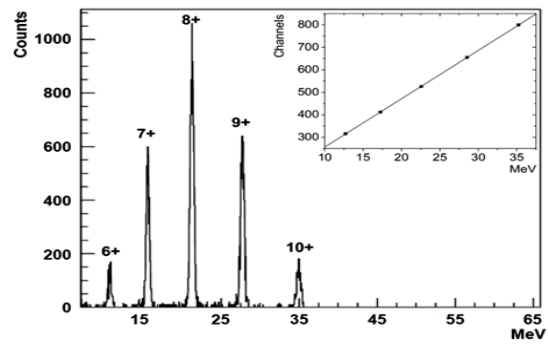
Tín hiệu năng lượng ghi nhận trên detector dưới dạng phổ sẽ được chuẩn năng lượng bằng cách sử dụng nguồn alpha đã biết năng lượng ( $^{237}\text{Np}$ ,  $^{241}\text{Am}$  và  $^{244}\text{Cm}$ ) và chùm các hạt sơ cấp  $^{20}\text{Ne}$  với điện tích khác nhau 6+, 7+, 8+, 9+ và 10+ có năng lượng xác định từ máy gia tốc. Số liệu thực nghiệm được ghi nhận vào các file máy tính để phân tích offline, sẽ được trình bày trong phần kế tiếp.

## III. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Việc phân tích số liệu được thực hiện theo hai bước cơ bản là chuẩn tín hiệu năng lượng detector và xác định độ mất năng lượng. Từ đó, xác định suất dừng của các hạt trong bia khí  $\text{He}+\text{CO}_2$ .



Hình 3. Phổ năng lượng của alpha và đường chuẩn năng lượng cho tín hiệu detector dùng nguồn ba alpha.



Hình 4. Phổ năng lượng của  $^{22}\text{Mg}$  và đường chuẩn năng lượng cho tín hiệu detector sử dụng chùm hạt  $^{20}\text{Ne}$  với điện tích khác nhau.

Phổ năng lượng ghi nhận được từ detector silicon được phân tích bằng cách sử dụng phần mềm chuyên dụng ROOT [12] do các nhà khoa học tại trung tâm gia tốc CERN của Châu Âu lập trình trong môi trường Linux. Ngoài ra, chúng tôi còn sử dụng các phần mềm khác như Origin, Excel để xử lý số liệu. Năng lượng của các hạt phân bố dưới dạng Gaussian nên chúng ta có thể thực hiện việc xác định các thông số của đỉnh phổ (giá trị đỉnh, độ rộng nửa đỉnh, diện tích đỉnh) bằng cách làm khớp theo hàm Gaussian. Tín hiệu trên detector silicon được chuẩn năng lượng bằng cách sử dụng nguồn alpha và chùm hạt  $^{20}\text{Ne}$  có các điện tích khác nhau (có năng lượng khác nhau). Kết quả chuẩn tín hiệu năng lượng detector sử dụng nguồn alpha và chùm hạt  $^{20}\text{Ne}$  được chỉ ra trong hình 3 và hình 4. Trong đó, hình nhỏ bên trong là đường thẳng tuyến tính của kết quả chuẩn năng lượng và các đỉnh phổ trong hình lớn tương ứng với các năng lượng khác nhau của các hạt.

Sau khi chuẩn năng lượng chúng ta đã thu được giá trị năng lượng còn lại thực sự của các hạt ghi nhận từ detector. Độ mất năng lượng  $DE$  của các hạt được tính dựa vào hiệu số năng lượng ban đầu  $E_i$  và năng lượng  $E_f$  trên detector:

$$DE = E_i - E_f \quad (2)$$

Sai số của giá trị độ mất năng lượng  $DE$  đối với alpha và  $^{22}\text{Mg}$  lần lượt là 6% và 12%. Sự sai số này bị gây ra bởi sai số trong việc làm khớp đỉnh Gaussian và độ phân giải năng lượng của detector. Sử dụng độ mất năng lượng này, chúng ta có thể xác định được năng lượng trung bình của các hạt tại giữa bia  $E_{av}$  như sau:

$$E_{av} = E_i - DE/2. \quad (3)$$

Kết quả độ mất năng lượng tương đối  $DE/E$  (%) và năng lượng trung bình của alpha và  $^{22}\text{Mg}$  trong bia khí  $\text{He}+\text{CO}_2$  được trình bày lần lượt trong bảng 1 và bảng 2.

Bảng 1. Năng lượng trung bình  $E_{av}$ , độ mất năng lượng tương đối và độ mất năng lượng tuyến tính của alpha trong bia  $\text{He}+\text{CO}_2$  với bề dày  $0.47916 \text{ mg/cm}^2$ .

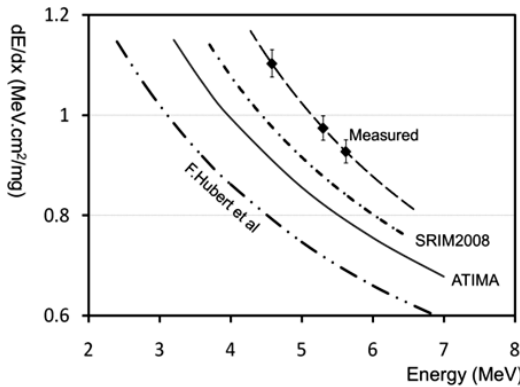
$E(\text{MeV})$	$E_{av}(\text{MeV})$	$DE/E(\%)$	$dE/dx (\text{MeV.mg.cm}^{-2})$
$4.788 \pm 0.047$	$4.518 \pm 0.271$	11.952	$1.127 \pm 0.057$
$5.486 \pm 0.054$	$5.253 \pm 0.315$	8.871	$0.972 \pm 0.061$
$5.795 \pm 0.058$	$5.576 \pm 0.334$	7.855	$0.914 \pm 0.064$

Bảng 2. Năng lượng trung bình  $E_{av}$ , độ mất năng lượng tương đối và độ mất năng lượng tuyến tính của  $^{22}\text{Mg}$  alpha trong bia He+CO<sub>2</sub> với các bề dày tương ứng.

$E_{av}$ (MeV)	DE/E(%)	$\Delta x$ (mg/cm <sup>2</sup> )	$dE/dx$ (MeV.mg.cm <sup>-2</sup> )
14.553 ± 1.745	77.933	1.7113	16.813±1.101
16.721 ± 2.000	54.859	1.3519	17.895±1.074
19.050 ± 2.286	35.928	1.0268	17.852± 1.082
20.506 ± 2.460	26.275	0.7701	17.847± 1.070
21.722 ± 2.601	19.206	0.4792	17.573± 1.053

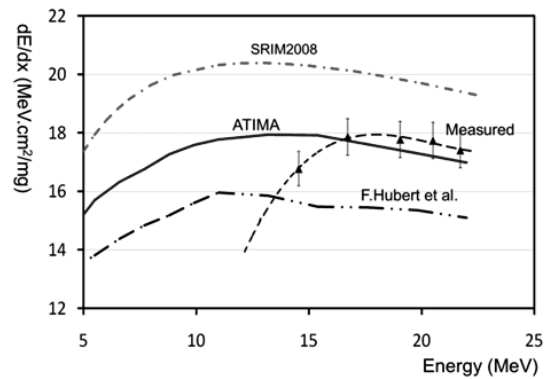
Bên cạnh việc xác định độ mất năng lượng của các hạt, chúng tôi đánh giá suất dừng của các hạt theo năng lượng trung bình trong bia của chúng. Suất dừng của các hạt tính bằng

năng lượng trung bình chia cho bề dày của bia. Kết quả ghi nhận bởi thực nghiệm này được so sánh với các tính toán trong [6, 7, 8] như chỉ ra trong hình 5 và hình 6.



Hình 5. Đường cong suất dừng của alpha là một hàm theo năng lượng  $E_{av}$ .

Như chỉ ra trong hình 5, đối với  $^4\text{He}$ , suất dừng của hạt trong bia hỗn hợp khí He+CO<sub>2</sub>(10%) được tính toán bởi SRIM2008[6] tương đối chính xác so với thực nghiệm. Giá trị thực nghiệm cao hơn giá trị tính toán vào khoảng 9%. Các giá trị tính toán bởi ATIMA[7] và F.Hubert[8] thấp và lệch xa hơn so với giá trị thực nghiệm, từ 15% đến 20%. Ngoài ra, trong vùng năng lượng càng thấp thì độ lệch giữa giá trị tính toán và thực nghiệm càng xa. Điều này cho phép chúng ta dự đoán, việc tính toán theo các phần mềm này sẽ có độ chính xác cao hơn khi năng lượng cao. Bên cạnh đó, những tính toán kèm theo hiệu chỉnh của Ziegler cho độ chính xác cao hơn hẳn so với những phần mềm còn lại. Do đó, chính ta có thể ước lượng độ mất năng lượng theo SRIM2008 đối với



Hình 6. Đường cong suất dừng của  $^{22}\text{Mg}$  là một hàm theo năng lượng  $E_{av}$ .

alpha trong vùng năng lượng này. Đối với  $^{22}\text{Mg}$ , xem hình 6, những tính toán theo code ATIMA cho giá trị rất gần với giá trị thực tế trong vùng năng  $E > 17.5$  MeV. Tuy nhiên, nó lại kém phù hợp trong vùng năng lượng  $E < 17.5$  MeV. Các kết quả tính toán còn lại của SRIM2008 và F.Hubert đều cho giá trị sai lệch. Điều này chứng tỏ rằng code ATIMA tương thích cho vùng năng lượng cao của các hạt nặng như  $^{22}\text{Mg}$ .

Dựa trên cơ sở số liệu thực nghiệm độ mất năng lượng của  $^4\text{He}$  và  $^{24}\text{Mg}$  trong khí nguyên chất Helium [13], chúng ta có thể dự đoán những sai khác giữa giá trị tính toán và thực tế có thể bị gây ra bởi các một số nguyên nhân. Trong đó, việc tính toán theo công thức bán thực nghiệm Bethe-Bloch với những hệ

số ion hoá, hệ số hiệu chỉnh vỏ nguyên tử, hệ số hiệu chỉnh mật độ hạt, thế kích thích trung bình khi tương tác được hiệu chỉnh chưa thật sự chính xác, chỉ mang tính gần đúng. Để hiệu chỉnh chính xác được các hệ số này, chúng ta cần bổ sung rất nhiều dữ liệu từ thực nghiệm, và nghiên cứu này cũng không nằm ngoài mục đích đó. Ngoài ra, việc xác định số khối A hiệu dụng và số nguyên tử Z hiệu dụng, xem công thức (1), trong những vật liệu hỗn hợp nhiều nguyên tố là tương đối phức tạp. Điều này thể hiện rõ rệt trong vùng năng lượng thấp khi tương tác của các hạt với vật liệu xảy ra thực tế khác xa so với dự đoán của lý thuyết. Do đó, những tính toán theo các phần mềm dựa theo công thức bán thực nghiệm Bethe-Bloch cần được lưu ý khi sử dụng, đặc biệt trong vùng năng lượng thấp và vật liệu hỗn hợp. Trong đó, các hệ số hiệu chỉnh vỏ C, mật độ hạt  $\rho$  trong biểu thức (1) đối với bia hỗn hợp cần được hiệu chỉnh dựa trên những số liệu thực nghiệm như trong nghiên cứu này. Bên cạnh đó, tùy theo vùng năng lượng, loại hạt nặng hay nhẹ mà chúng ta sử dụng các code tính toán cho phù hợp.

#### IV. KẾT LUẬN

Độ mất năng lượng của  $^4\text{He}$  và  $^{22}\text{Mg}$  trong hỗn hợp khí  $\text{He}+\text{CO}_2(10\%)$  lần đầu tiên được ghi đo trực tiếp trong nghiên cứu này. Những kết quả của nghiên cứu này có vai trò quan

trọng trong việc đánh giá các phần mềm tính toán cũng như bổ sung số liệu thực nghiệm cho việc hiệu chỉnh các hệ số trong lý thuyết tính toán theo công thức bán thực nghiệm Bethe-Bloch. Điều này góp phần cho sự nâng cao tính chính xác của các phép đo phản ứng hạt nhân, đặc biệt, đối với việc tạo chùm hạt phóng xạ và ghi đo phản ứng hạt nhân thiên văn  $^{22}\text{Mg}(\alpha,p)^{25}\text{Al}$ . Các kết quả chỉ ra SRIM2008 có thể ứng dụng tốt cho hạt nhẹ alpha trong vùng năng lượng lớn hơn 4 MeV và ATIMA sử dụng tốt để tính toán cho hạt nặng  $^{22}\text{Mg}$  trong vùng năng lượng cao hơn 17.5 MeV. Trong khi đó, các vùng năng lượng khác thì chúng ta cần có sự hiệu chỉnh phù hợp trong công thức tính toán trước khi sử dụng nó.

#### LỜI CẢM ƠN

Chúng tôi chân thành cảm ơn sự hướng dẫn của Giáo sư Shigeru Kubono và toàn thể các cộng tác viên tham gia thực nghiệm tại trung tâm hạt nhân CNS của đại học Tokyo. Tiến sĩ Nguyễn Ngọc Duy trân trọng cảm ơn sự hỗ trợ kinh phí và học bổng để học tập và nghiên cứu tại Đại học Tokyo. Cuối cùng, chúng tôi gửi lời cảm ơn đến đội ngũ điều khiển máy gia tốc cung cấp chùm  $^{20}\text{Ne}$  rất tốt cho thực nghiệm đo phản ứng  $^{22}\text{Mg}(\alpha,p)^{25}\text{Al}$  và phép đo độ mất năng lượng của  $^4\text{He}$  và  $^{22}\text{Mg}$  trong bia khí  $\text{He}+\text{CO}_2(10\%)$  tại viện nghiên cứu liên hợp RIKEN.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] B.G. Svensson, B. Mohadjeri, *Nucl. Instr. And Meth.* B 55 (1991) 650.
- [2] J. Liu, Z. Zheng, W.K. Chu, *Nucl. Instr. and Meth.* B 118 (1996) 24.
- [3] J.R. Tesmer, M. Nastasi (Eds.), *Handbook of Modern Ion Beam Materials Analysis, Materials Research Society, Pittsburgh, PA, 1995.*
- [4] W.R.Leo, *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiment*, Springer-Verlag 1993.
- [5] S. Kubono et al: *Eur. Phys. J, A* 13 (2002), p. 217.
- [6] J.F. Ziegler, SRIM 2008, [www.srim.org](http://www.srim.org).
- [7] H. Geiseil, P. Malzacher, et al., ATIMA, <http://www-linux.gsi.de/~weick/atima/>.
- [8] F. Hubert, R. Bimbot, and H. Gauvin, *At. Data and Nucl. Data Tables* 46, 1(1990).
- [9] H.Yamaguchi et al., *Nucl.Instrum.Meth.* A589(2008) 150.
- [10] H. Kumagai, A. Ozawa, et al. *Nucl.Instrum.Meth.* A470 (2001) 562-570.
- [11] Nguyen Ngoc Duy et al., *Nucl.Instrum.Meth.* A 723 (2008), pp. 99–101.
- [12] <http://root.cern.ch/drupal>.
- [13] [www.exphys.uni-linz.ac.at/stopping](http://www.exphys.uni-linz.ac.at/stopping).