

# Coulomb Dissociation of Borromean Nuclei $^{17}\text{B}$

Hyeji Lee

November 13, 2023

# Abstract

Neutron-rich isotopes have received much attraction in recent years due to its structural properties such as neutron halo: one or two neutrons in the nucleus are weakly bound so that they are spatially extended far from the core nucleus. Borromean nuclei are particularly interesting due to the two-neutron halo structure. The Borromean nucleus is a bound three-body system, where any of its two-body subsystems are unbound. Experimental data of 2n halo structure has been reported for  $^6\text{He}$ ,  $^{11}\text{Li}$ , and  $^{19}\text{B}$ . These 2n halo nuclei are possible to have a dineutron correlation, a spatially compact neutron pair, and the recent Coulomb dissociation of  $^{19}\text{B}$  revealed the dineutron in  $^{19}\text{B}$ . [1] We focus on  $^{17}\text{B}$ , which is also considered as a 2n halo nucleus.  $^{17}\text{B}$  is the core of the 2n halo nucleus  $^{19}\text{B}$  but  $^{17}\text{B}$  itself is the 2n halo nucleus. Investigating a dineutron correlation in the  $^{17}\text{B}$  will give us a critical information about multi-neutron halo structure in neutron-rich isotopes. To investigate the dineutron correlation at the  $^{17}\text{B}$ , the experimental measurement using Coulomb dissociation was performed at SAMURAI (Superconducting Analyser for Multi particles from Radio Isotope beams) spectrometer in RIBF (Radioactive Isotope Beam Factory), RIKEN. A  $^{48}\text{Ca}$  primary beam accelerated to 345 MeV per nucleon was incident on a primary Be target to produce a  $^{17}\text{B}$  secondary beam. The generated secondary beam was separated and identified by BigRIPS fragment separator and was incident into a secondary Pb target where  $^{17}\text{B}$  is dissociated into  $^{15}\text{B}$  and two neutrons. The charged fragment  $^{15}\text{B}$  was detected by the SAMURAI spectrometer, while the two neutrons were detected by the neutron detectors NEBULA to measure Coulomb dissociation exclusive cross section. In this poster, we report the current analysis status.



# Contents

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Experimental Methods</b>	<b>3</b>
2.1	Soft E1 Excitation in Neutron Halo Nuclei . . . . .	3
2.2	Coulomb Dissociation . . . . .	3
2.2.1	Invariant Mass Method . . . . .	3
2.2.2	Scattering Angle . . . . .	3
2.3	Equivalent Photon Method . . . . .	3
<b>3</b>	<b>Experimental Setup</b>	<b>5</b>
3.1	Production of $^{17}\text{B}$ beam . . . . .	5
3.2	Experimental Setup overveiw . . . . .	5
3.3	BigRIPS . . . . .	5
3.3.1	BPC (Beam Proportional Chamber) . . . . .	5
3.3.2	Plastic Scintillator . . . . .	5
3.3.3	Beam Drift Chamber . . . . .	5
3.4	SAMURAI . . . . .	5
3.5	Data acquisition system and Trigger condition . . . . .	5
3.6	Run summary . . . . .	5
<b>4</b>	<b>Data Analysis</b>	<b>7</b>
4.1	Analysis of the secondary beam . . . . .	7
4.1.1	Time of Fligh and $\beta_{\text{Beam}}$ . . . . .	8
4.1.2	Magnetic Rigidity $B\rho$ . . . . .	8
4.1.3	Energy Loss $\Delta E$ . . . . .	8
4.1.4	Beam Particle Indeification . . . . .	8
4.2	Beam Profile at Target . . . . .	9
4.2.1	BDC Profile . . . . .	9
4.2.2	Target Profile . . . . .	9
4.2.3	Beam beta calculation . . . . .	9
4.3	Analysis of charged fragment . . . . .	9
4.3.1	FDC를 이용한 위치 계산 . . . . .	9
4.3.2	Brho from Geant4 simulation . . . . .	9
4.3.3	HODscope Z . . . . .	9
4.3.4	Fragment Particle Identification . . . . .	9
4.4	Analysis of Neutrons . . . . .	10
4.5	Cross-talk Rejection . . . . .	10
4.5.1	gamma event rejection . . . . .	10
4.5.2	Clustering Event Subtraction . . . . .	10
4.5.3	same wall event . . . . .	10

4.5.4 different wall . . . . .	10
4.6 Cross-talk 잔존률 평가 . . . . .	10
4.7 Acceptance and Efficiency . . . . .	10
<b>5 Result and Discussion</b>	<b>11</b>
<b>6 Conclusion</b>	<b>13</b>
<b>Appendix</b>	<b>15</b>
A.1 Bethe-Bloch Formula . . . . .	15
A.2 Equivalent Photon Method . . . . .	15
A.3 Cross section extraction . . . . .	15

# List of Figures

1.1	Nuclear Chart . . . . .	2
-----	-------------------------	---



# List of Tables





# Chapter 1

## Introduction

최근 몇년간, 가속기를 이용한 핵물리 실험이 급진적으로 발전함에 따라, 불안정 핵에 대한 연구가 급격하게 진행되었다. 특히 자연에서는 존재하지 않는 beta stability에서 먼, 원자핵의 존재 한계에 가까운 드립라인 핵에 대한 연구가 가능하게 되었다. 특히 양성자의 수보다 중성자의 수가 훨씬 많은 중성자 과잉 핵자에서는 안정 핵자에서는 볼 수 없는 특이한 현상들을 관찰 할 수 있는데, 중성자 헤일로가 대표적이다.

중성자 헤일로는 하나 또는 두개의 중성자가 코어로부터 공간적으로 멀리 떨어져있는 핵자다. 헤일로 중성자는 코어로부터 매우 약하게 속박되어 있고, 낮은 centrifugal barrier 를 갖고있는 낮은 궤도 각운동량  $l=0$  or  $1$ 를 갖고 있는 것이 특징이다. 이러한 특징으로 기인하는 중성자 헤일로 핵의 고유한 특징은  $1\text{MeV}$  이하의 아주 작은 중성자 분리 에너지 (안정핵은 보통  $8\text{MeV}$ 이다)와 주변핵자에 비해 매우 큰 반경, 그리고 Soft E1 Excitation이 있다. 그림1.1를 보면 원자번호 1부터 12까지의 핵자표가 있고, 원으로 표시된 핵자가 헤일로 핵자이다. 하나의 원은 1 중성자 헤일로, 2개의 원은 2중성자 헤일로이다. 지금까지 발견된 2중성자 헤일로는  $6\text{He}$ ,  $11\text{Li}$ ,  $14\text{Be}$ ,  $17\text{B}$ ,  $19\text{B}$ ,  $22\text{C}$ 로

Over recent years, The study of neutron-rich nuclei has garnered increasing attention within the field of nuclear physics, providing invaluable insights into the fundamental forces and interactions that govern atomic nuclei. Characterized by an excess of neutrons compared to stable isotopes, these nuclei serve as a compelling laboratory for investigating phenomena that transcend conventional nuclear models. One particularly intriguing subclass is that of 2-neutron halo nuclei, which feature an extended halo of two loosely bound neutrons. This thesis aims to delve deeper into the enigmatic properties and behaviors of 2-neutron halo nuclei, contributing to our broader comprehension of neutron-rich systems.

2 중성자 헤일로로 알 수 있는 것은 dineutron에 대한 연구이다. 본 논문에서는 납 타겟을 이용하여  $17\text{B}$ 를 Coulomb dissociation 시키고,  $15\text{B}$ 와 두 중성자를 검출하여  $17\text{B}$ 의 soft E1 Excitation을 조사하였다.

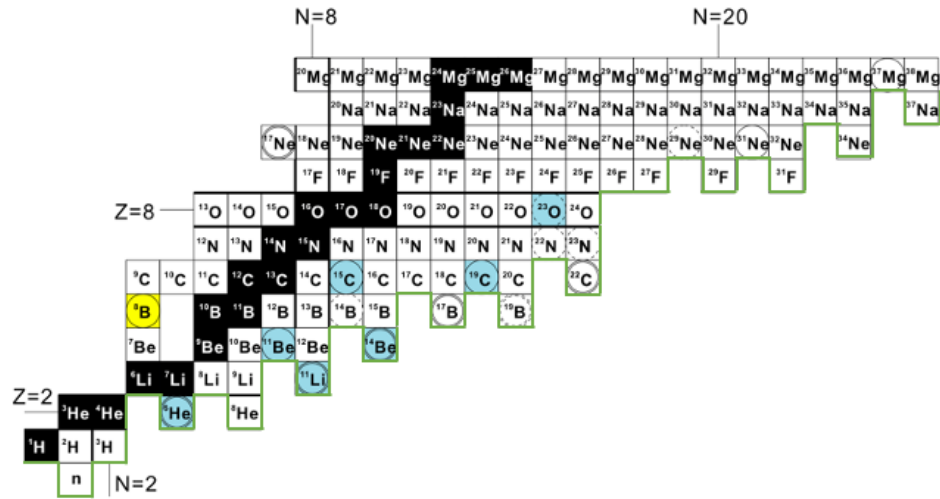
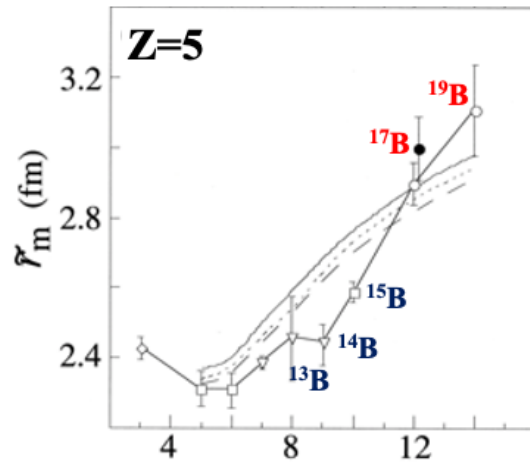


Figure 1.1: Nuclear Chart



## Chapter 2

# Experimental Methods

이 장에서는 중성자 헤일로 핵의 구조상 특징에서 기인하는 soft E1 Excitation과 그것을 조사하는 방법인 Coulomb Dissociation에 대해 설명한다. 최종적으로, reduced transition probability  $B(E1)$ 을 구하는 방법에 대해 설명한다.

### 2.1 Soft E1 Excitation in Neutron Halo Nuclei

왜 E1인지 설명

### 2.2 Coulomb Dissociation

#### 2.2.1 Invariant Mass Method

납 타겟과 반응 직후 soft e1 excitation이 일어난  $^{17}\text{B}$ 상태를 조사하기 위해서는 Invariant Mass Method로 상태를 재구성 할 필요가 있다. Excitation Energy는 다음과 같이 표시된다

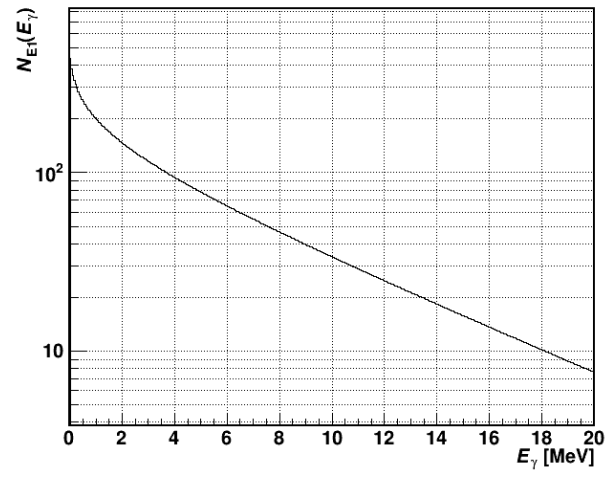
$$E_x = S_{2n} + E_{rel}$$

여기서  $S_{2n}$ 은 중성자 분리 에너지,  $E_{rel}$ 은  $^{15}\text{B}$ 와 두 중성자 사이의 상대에너지이다.

#### 2.2.2 Scattering Angle

### 2.3 Equivalent Photon Method

우리는 납과의 전자기적 반응이 일어날 때의 교환되는 가상 광자를 직접 검출 할 수 없다. 따라서 입사 빔의 에너지와 타겟과의 거리, 타겟의 종류



## Chapter 3

# Experimental Setup

In this chapter, I will describe about beam, target, and detectors.

### 3.1 Production of $^{17}B$ beam

### 3.2 Experimental Setup overveiw

The experiment is

### 3.3 BigRIPS

#### 3.3.1 BPC (Beam Proportional Chamber)

Magnetic Rigidity

#### 3.3.2 Plastic Scintillator

TOF

#### 3.3.3 Beam Drift Chamber

### 3.4 SAMURAI

### 3.5 Data acquisition system and Trigger condition

### 3.6 Run summary

hline	Run number	Target	Trigger
	394 - 404	C ( $1.8 \text{ g/cm}^2$ )	DSB(1/20) + B x N + D(1/1)
	405 - 409	Empty	DSB(1/20) + B x N + D(1/1)
	410 - 427	Pb ( $3.0 \text{ g/cm}^2$ )	DSB(1/20) + B x N + D(1/1)
	428 - 431	Pb ( $3.0 \text{ g/cm}^2$ )	DSB(1/20) + B x N + D(1/1)



## Chapter 4

# Data Analysis

In the analysis of experimental data, the primary goals are to extract the 2n removal cross section in the  $^{17}\text{B} \rightarrow ^{15}\text{B} + 2n$  reaction and to obtain the Relative energy spectrum. To achieve this, I will describe the procedure of identifying the secondary beam of  $^{17}\text{B}$ , and selecting events involving the fragment  $^{15}\text{B}$  and two neutrons. Particular emphasis is placed on the process of selecting two-neutron events and the rejection of cross-talk. The flow of the Data Analysis is as follows.

1. Select the event containing  $^{17}\text{B}$  beam by beam PID
2. Select the event containing  $^{15}\text{B}$  fragment by fragment PID
3. Select the event containing two neutrons by cross-talk analysis
4. Extract the 2n removal cross section of the  $^{17}\text{B} \rightarrow ^{15}\text{B} + 2n$  reaction
5. Reconstruct Invariant Mass at target and obtain the Relative energy spectrum

### 4.1 Analysis of the secondary beam

The primary beam is generated by SRC, RIBF. By accelerating  $^{48}\text{Ca}$  in MeV/u, bombarded on thick Be target (cm) secondary beam is produced. 초기 빔의 정보는 다음과 같다.

Primary Beam	Beam Energy	Primary Target
$^{48}\text{Ca}$	278.1 MeV/u	Be (3cm)

본 실험에서 사용할 메인 핵자는  $^{17}\text{B}$ 로, 초기 Ca 빔과 Be 타겟의 충돌로 만들어진다.  $^{17}\text{B}$ 는 BigRIPS separator를 통해 분리되고, SAMURAI로 전달된다. 본 실험에서는 3가지 타겟 C, Pb, Empty를 사용하였다. 각각 타겟에 대한  $^{17}\text{B}$ 의 정보는 다음과 같다.

Secondary Beam	Target	Energy at Target
$^{17}\text{B}$	C ( )	
$^{17}\text{B}$	Empty	
$^{17}\text{B}$	Pb ( )	

Identification of  $^{17}\text{B}$  secondary beam is performed by TOF- $B\rho$ - $\Delta E$  method.



### 4.1.1 Time of Flight and $\beta_{Beam}$

#### Time of Flight

The time-of-flight (TOF)는 두 plastic scintillator사이의 검출 타이밍 차를 이용하여 계산한다. 이용되는 plastic scintillator는 F7에 위치한 신틸레이터와 F13에 위치한 SBT1, SBT2라 불리는 두 신틸레이터이다. TOF between F7 and F13 는 다음과 같이 정의된다.

$$TOF_{F7-F13} = \frac{t_{SBT1} + t_{SBT2}}{2} - t_{F7} + \Delta t_{offset}$$

$\Delta t_{offset}$  실제 측정된  $TOF_{F7-F13}$ 과 Energy loss 계산으로 구해진  $TOF_{F7-F13}$  의 차이를 보정하기 위한 offset이다. 이는 f5 slit을 +/- 1mm로 매우 좁힌 run 428,429,431를 이용하여 구한 TOF와 Energy loss 계산으로 구한 TOF의 차이를 이용하여 구한다. 계산으로 얻어진  $TOF_{F7-F13}$ 은 192.333ns 7를 보정하면 다음과 같다.

또한 두 신틸레이터의 시간정보에서 상관에 크게 벗어나는 이벤트를 제거함으로써 불필요한 노이즈를 제거할 수 있다.

TOF713을 특정했으면, 이를 이용하여 Beam의  $\beta$ 를 다음과 같이 구한다.

$$\beta_{Beam} = \frac{dist_{F7-F13}}{TOF_{F7-F13} \times c}$$

$$1.723e-05 \times - 0.009899 \times + 1.902$$

### 4.1.2 Magnetic Rigidity $B\rho$

Magnetic Rigidity  $B\rho$ 는 F5에 위치한 Beam Projection Chamber (BPC)를 이용하여 도출한다. BPC에서는 F5 Focal point를 중심으로 입자의 x좌표를 구한다.

$$B\rho = (1 + \frac{x}{D})B\rho_0$$

D = 3300 (mm) Dispersion,  $B\rho_0 = 8.775$  (Tm)

여기서 A/Z를 도출하기 위해서는 위에서 구한  $\beta_{F7-F13}$ 를 F5에서의  $\beta_{F5}$ 로 보정할 필요가 있다.

이렇게 A/Z를 특정지을 수 있다.

$$\frac{A}{Z} = \frac{B\rho_{F5}}{B\rho_{F5}^{ref}} \times \frac{\beta_{F5}^{ref}}{\beta_{F5}}$$

### 4.1.3 Energy Loss $\Delta E$

각 입자의 에너지 손실  $\Delta E$ 는 BigRIPS 하류에 놓여있는 Ionize Chamber for Beam (ICB)에서 측정된다.  $\Delta E$ 와 Z사이의 상관관계는 Bethe-Bloch의 Energy loss 공식에 따라 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi N_A r_e^2 m_e c^2 z^2}{\beta^2} \left[ \frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} \right]$$

### 4.1.4 Beam Particle Identification

위의 과정에서 구한 TOF,  $B\rho$ ,  $\Delta E$  를 통해 Z와 AoZ를 다음과 같이 구한다.

다음은 Beam Particle Identification의 결과이다.

## 4.2 Beam Profile at Target

### 4.2.1 BDC Profile

### 4.2.2 Target Profile

Target Chamber 주변에는 검출기가 없기 때문에 두개의 BDC를 이용하여 target에서의 Beam 위치를 외삽한다. 본 실험에서 사용하는  $^{17}\text{B}$ 는 본 실험의 main beam이 아니기 때문에, 위에서 확인한 BDC에서의 beam profile 과 같이 target 중심에서 *ずれている* 따라서 Target의 유효면적  $x \pm 35\text{mm}$ ,  $y \pm 35\text{mm}$ 를 정의하고, 이를 넘어가는 이벤트는 제거한다.

### 4.2.3 Beam beta calculation

Invariant Mass를 계산하기 위해서는 Beam의 beta를 계산해야 한다. Beam의 beta는 다음과 같이 계산된다.

## 4.3 Analysis of charged fragment

### 4.3.1 FDC를 이용한 위치 계산

### 4.3.2 Brho from Geant4 simulation

### 4.3.3 HODscope Z

15B를 특정하기 위하여, Hodscopec라는 Plastic Scintillator 검출기에서 Z를 특정한다. 상류에서 17B를 특정하여, 가장 많은 입자가  $Z=5$ 라고 가정, 위의 시뮬레이션으로 얻은 AOZ를 대입하여 15B를 특정한다.

### 4.3.4 Fragment Particle Identification

## 4.4 Analysis of Neutrons

2차 빔  $^{17}\text{B}$ 에서 방출된 중성자는 사무라이 시스템의 중성자 검출기 NEBULA를 통해 검출된다. 본 섹션에서는 중성자 검출기 NEBULA를 이용하여 1중성자 이벤트 혹은 2중성자 이벤트를 선택하는 과정에 대해 서술한다. 중성자의 운동량 모멘텀  $P(n)$ 은 타겟으로부터의 NEBULA에서의 검출 위치, 그리고 비행시간 TOF로 Reconstructed. 중성자의 은 다음과 같이 기술된다.

## 4.5 Cross-talk Rejection

(중성자의 검출 방법 서술) 두 중성자의 이벤트를 추출하는 과정에서 가장 중요한 것이 Cross-talk 제거이다. Cross-talk란, 하나의 중성자가 여러개의 신호를 만드는 것으로, 두 중성자 이벤트를 선택할 때에 있어 가장 많은 노이즈를 차지한다. Cross talk rejection을 위해 Geant4 시뮬레이션을 통해  $^{16}\text{B} \rightarrow ^{15}\text{B} + n$  이벤트를 생성시켜, 모든 2중성자 이벤트가 Cross-talk인 경우를 재현하였다. 실행한 Geant4 시뮬레이션 정보는 다음과 같다.

Beam Energy	140 MeV/u
Relative Energy	0.5 MeV/u

위의 시뮬레이션으로 구한 Cross-talk 조건을 적용하였을 때, Cross-talk이벤트가 남아있는 비율을 평가하였다. 각 조건을 단계 a,b,c,d로

Cross-talk 제거에는 크게 3가지 단계가 있다. 이하 시뮬레이션의 결과로 결정한 각 단계의 Cross-talk를 실제 실험 데이터에 적용하여 제거한 결과를 서술한다.

### 4.5.1 gamma event rejection

진짜 뉴트론 이벤트를 선택하기 위해서 감마선을 제거하는 스톨드를 지정한다.

1. 1st VETO에 hit한 이벤트는 모두 하전입자라 간주하여 제거한다.
2. 중성자 검출기 NEBULA에 입사한 이벤트 중, 발광량 Q가 6MeVee 이하인 이벤트는 감마선으로 간주하여 제거한다. 또한 하나의 플라스틱 신틸레이터 모듈을 통과할 때의 중성자의 최대 에너지 loss 130MeV를 넘어가는 이벤트도 중성자에서 산란된 다른 이벤트로 간주하여 제거한다.
3. Target에서부터의 TOF가 1st wall의 경우 40ns 이하, 2nd wall의 경우 42ns 이하인 이벤트 또한 중성자 이외의 이벤트로 간주하여 제거한다.
4. (2중성자 이벤트에 대해서만) 2nd VETO에 hit한 이벤트에 대하여, 2nd NEUT wall에 입사한 가장 빠른 두 중성자 이벤트가  $dr(xy); 500\text{mm}$ ,  $2\text{ns} < dt < 5\text{ns}$  인 이벤트는 2nd VETO에서 기인한 cluster 산란 이벤트로 간주하여 제거한다.

### 4.5.2 Clustering Event Subtraction

### 4.5.3 same wall event

두 중성자

cluster proton cross-talk

### 4.5.4 different wall

## 4.6 Cross-talk 잔존률 평가

## 4.7 Acceptance and Efficiency

NEBULA의 Acceptance and Efficiency를 평가하기 위해 Geant4 Simulation을 진행했다.

## Chapter 5

# Result and Discussion

xxx



## Chapter 6

# Conclusion

Spectroscopy of 17B is ...



# Appendix

## A.1 Bethe-Bloch Formula

Energy loss calculation for

## A.2 Equivalent Photon Method

considering multi-polarity,

$$n_{\pi l}(\omega) = Z_1^2 \alpha \frac{l[(2l+1)]!!^2}{(2\pi)^3(l+1)} \sum_m \left| G_{\pi lm} \left( \frac{c}{v} \right) \right|^2 g_m(\xi)$$

equivalent photon number for E1 excited projectile.

$$n_{E1}(\omega) = n_{E1,m=-1} + n_{E1,m=0} + n_{E1,m=+1} = \frac{2}{\pi} Z_1^2 \alpha \left( \frac{c}{v} \right)^2 \left[ \xi K_0(\xi) K_1(\xi) - \frac{v^2 \xi^2}{2c^2} (K_1^2(\xi) - K_0^2(\xi)) \right]$$

with  $\xi = E_\gamma R / \gamma \nu \hbar$

$E_\gamma$ : Photon energy(  $E_\gamma = \omega \hbar$  )

$Z_1$ : Atomic number of target

$R$ : impact parameter ( 1.3 )

## A.3 Cross section extraction



