

# SeaQuest のドレール・ヤン実験の最近の進展

東京工業大学 宮坂翔

## Contents

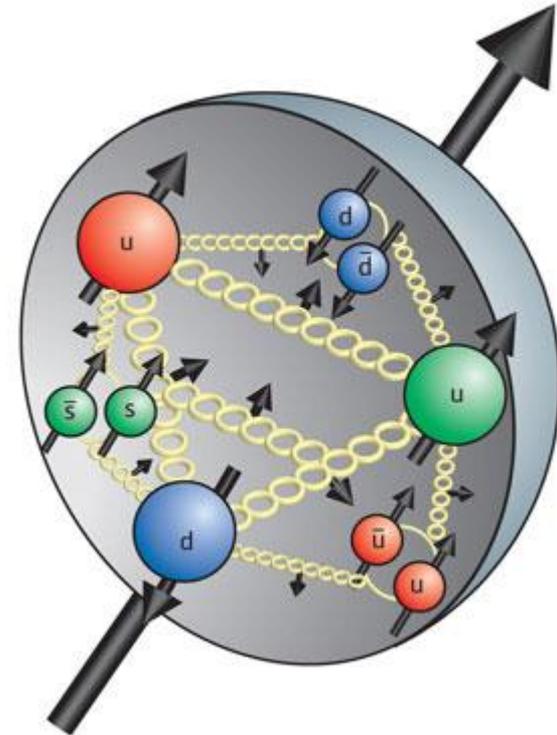
1. 物理と SeaQuest 実験の目的
2. Fermilab と SeaQuest spectrometer
3. SeaQuest 実験の進展
4. まとめ

---

# 1. 物理と SeaQuest 実験の目的

# 陽子の内部構造

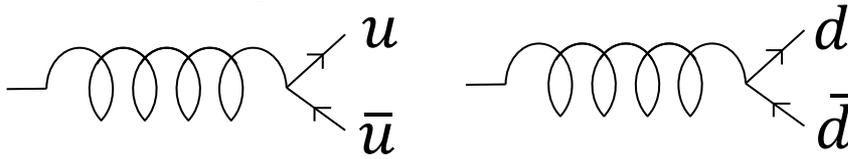
- Valence クォーク (価クォーク)
  - 量子数を決定する
- グルーオン
  - クォークとクォークを結びつける
- sea クォーク
  - グルーオンから対生成される
  - 陽子の運動量の一部を担う



# 陽子内の sea quark

- 陽子内の sea quark、特に  $\bar{d}(x), \bar{u}(x)$  の研究

- Gluon splitting



- Naïve assumption

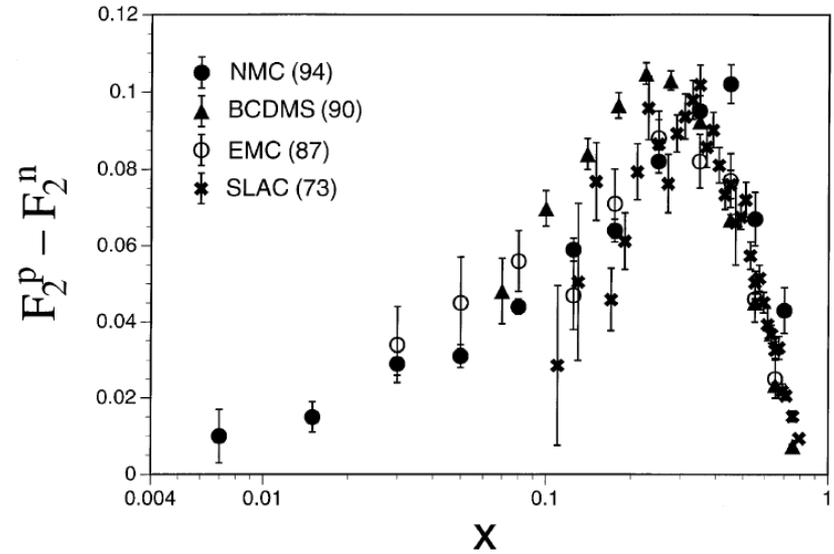
陽子中の存在量  $\bar{d}(x) = \bar{u}(x)$

- NMC (Muon deep inelastic scattering, 1991, CERN)

$$\int_0^1 [\bar{d}(x) - \bar{u}(x)] dx > 0$$



$$\int_0^1 \bar{d}(x) dx > \int_0^1 \bar{u}(x) dx$$



**New Muon Collaboration (NMC) result (1991), DIS**

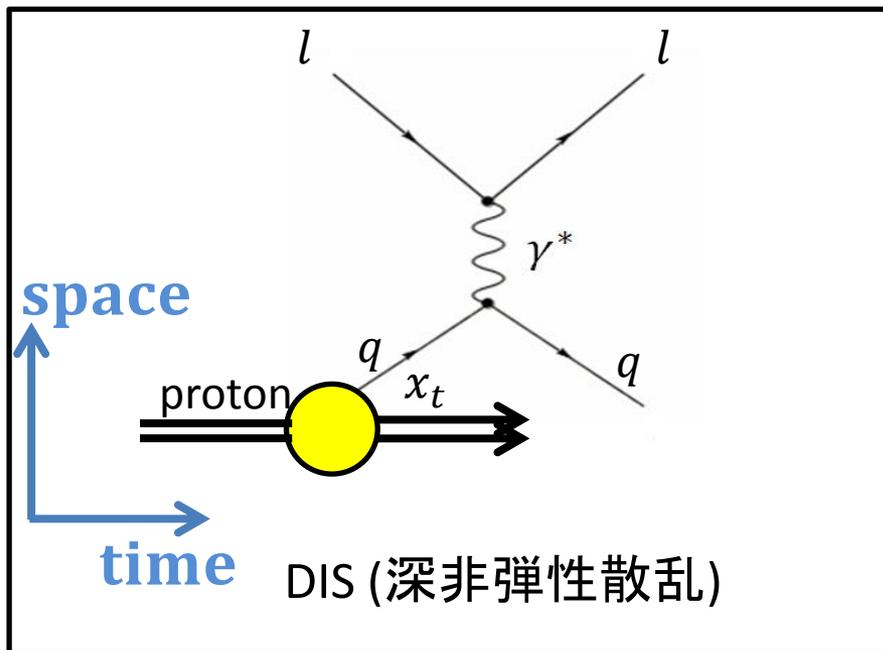
$$\text{Bjorken } x = \frac{p_{parton}}{p_{proton}}$$

# E866/NuSea 実験

---

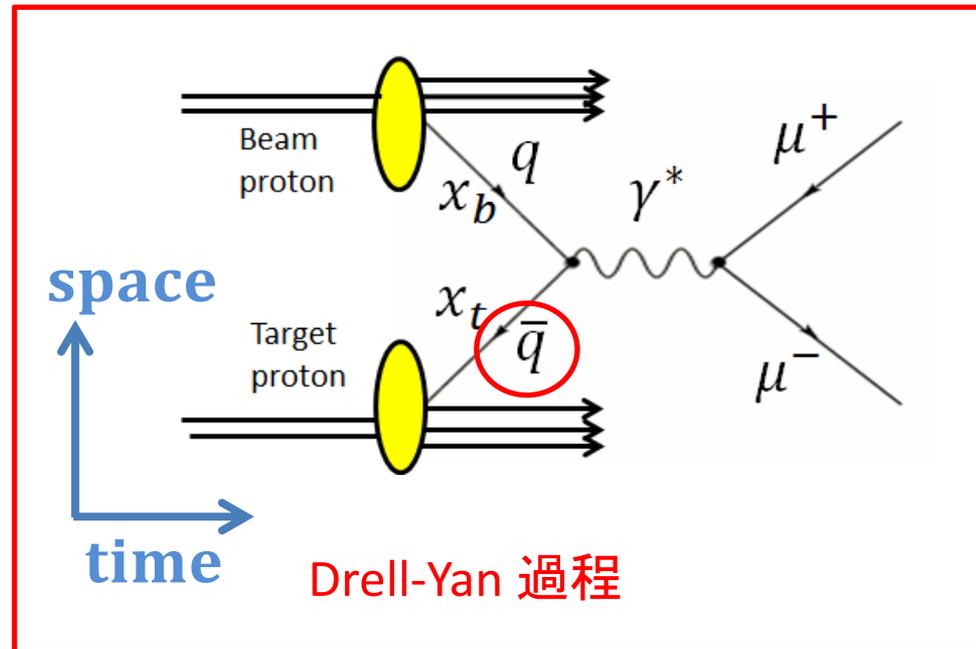
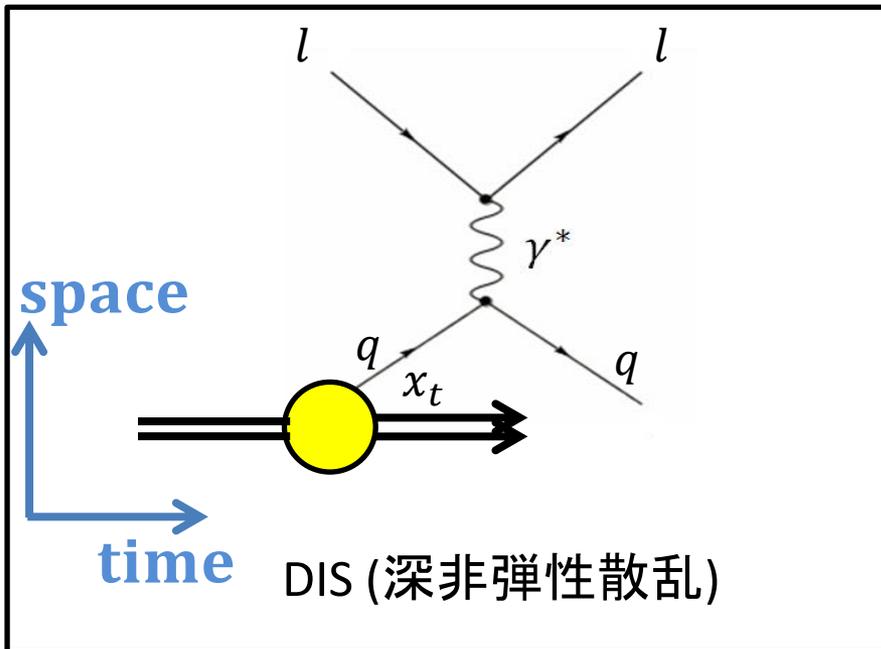
- SeaQuest 実験の前身
- Drell-Yan 過程を用いて、sea クォークの研究

# DIS (深非弾性散乱)



- 反応する陽子内のクォークは valence クォークの可能性もある

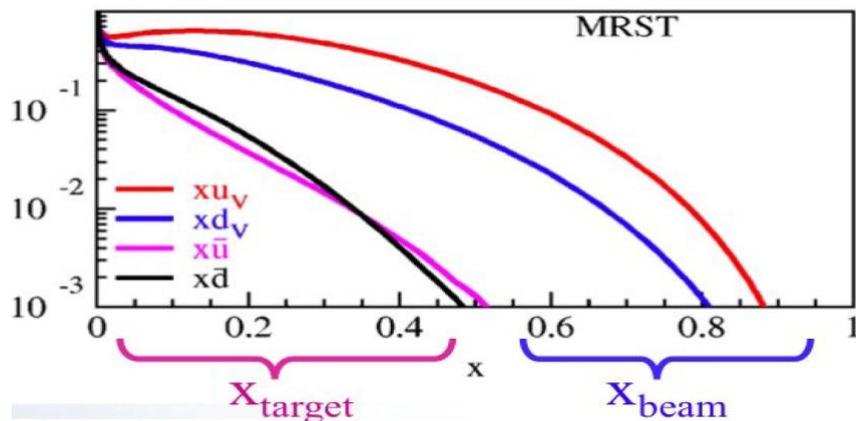
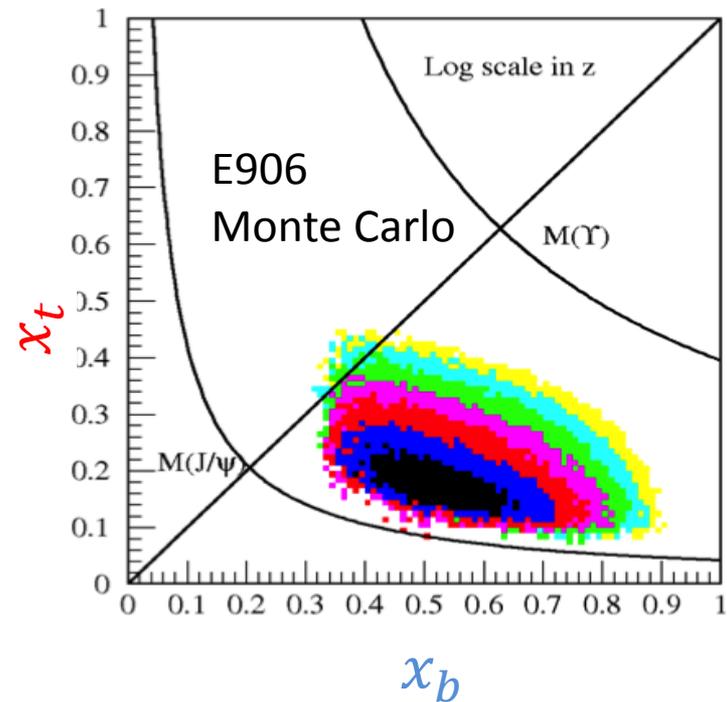
# Drell-Yan 過程



- Drell-Yan 過程 :  $q\bar{q} \rightarrow \gamma^* \rightarrow \mu^+\mu^-$
- 常に sea クォーク(反クォーク)が関与するため  
sea クォーク(反クォーク)の研究に適している。

# sea クォークへのアプローチ

$$\frac{d^2\sigma}{dx_t dx_b} = \frac{4\pi\alpha^2}{9x_t x_b s} \sum_q e_q^2 [\bar{q}_t(x_t) q_b(x_b) + \bar{q}_b(x_b) q_t(x_t)]$$

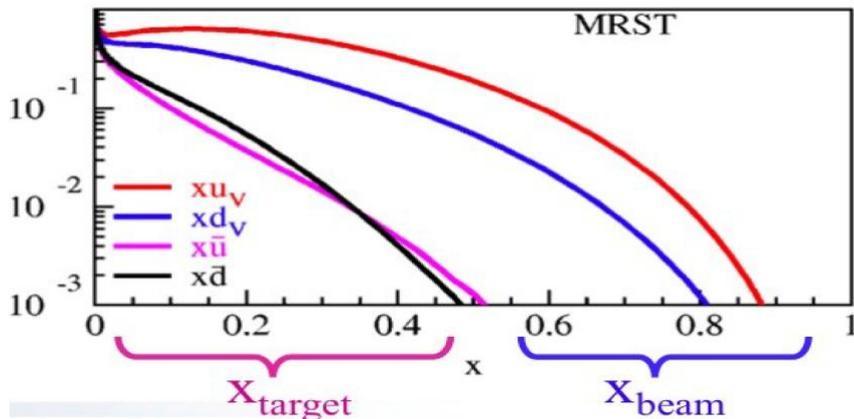
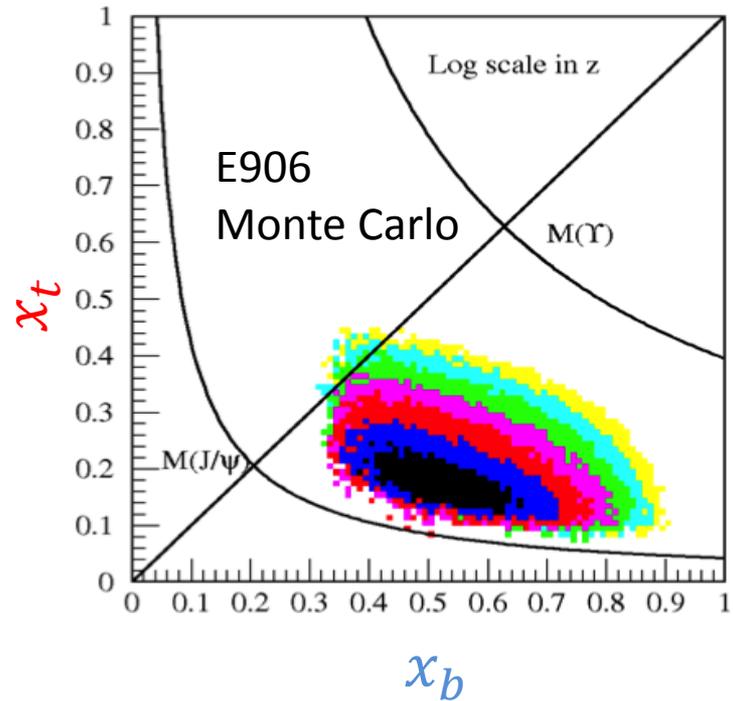


- beam: valence quarks at high- $x$
- target: sea quarks at low/intermediate  $x$

$$\text{Bjorken } x = \frac{p_{parton}}{p_{proton}}$$

# sea クォークへのアプローチ

$$\frac{d^2\sigma}{dx_t dx_b} = \frac{4\pi\alpha^2}{9} \frac{1}{x_t x_b s} \sum_q e_q^2 [\bar{q}_t(x_t) q_b(x_b) + \bar{q}_b(x_b) q_t(x_t)]$$



- beam: valence quarks at high-x
- target: sea quarks at low/intermediate x

$$\text{Bjorken } x = \frac{p_{parton}}{p_{proton}}$$

# 陽子内の sea quark のフレーバー非対称度

$$\frac{d^2\sigma}{dx_t dx_b} = \frac{4\pi\alpha^2}{9x_t x_b} \frac{1}{s} \sum_q e_q^2 [\bar{q}_t(x_t) q_b(x_b) + \bar{q}_b(x_b) q_t(x_t)]$$



陽子-重陽子

$$\frac{1}{2} \frac{\sigma^{pd \rightarrow \mu^+ \mu^-}}{\sigma^{pp \rightarrow \mu^+ \mu^-}} \Big|_{x_b \gg x_t} \approx \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{\bar{d}(x_t)}{\bar{u}(x_t)} \right]$$

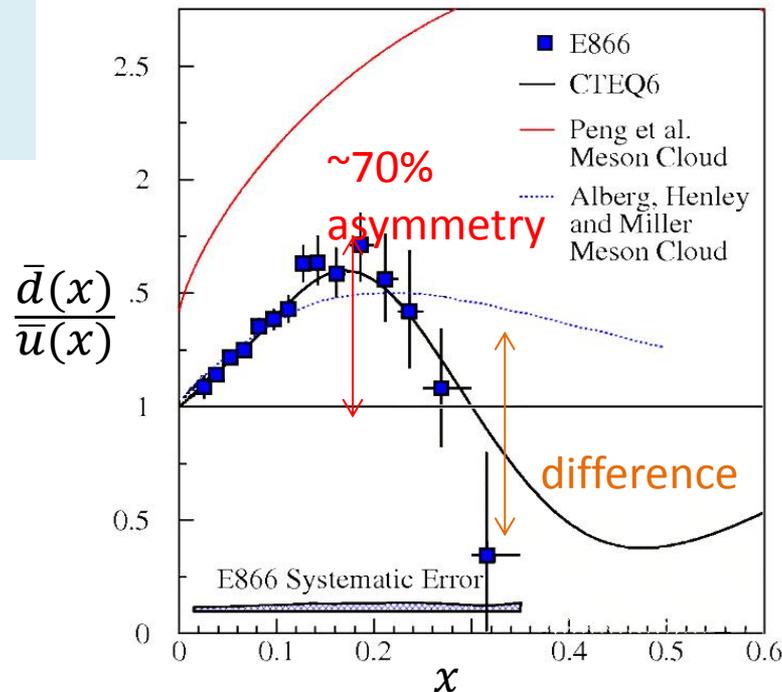
陽子-陽子

# 陽子内の sea quark のフレーバー非対称度

$$\left. \frac{1}{2} \frac{\sigma_{pd \rightarrow \mu^+ \mu^-}}{\sigma_{pp \rightarrow \mu^+ \mu^-}} \right|_{x_b \gg x_t} \approx \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{\bar{d}(x_t)}{\bar{u}(x_t)} \right]$$

E866:  $\bar{d}(x)/\bar{u}(x)$  for  $0.015 \leq x \leq 0.35$   
 (フレーバー非対称度)

$\bar{d}(x)/\bar{u}(x) \simeq 1.7$  @ Bjorken  $x \simeq 0.2$   
 $\bar{d}(x)/\bar{u}(x) < 1??$  @ Bjorken  $x \simeq 0.3$

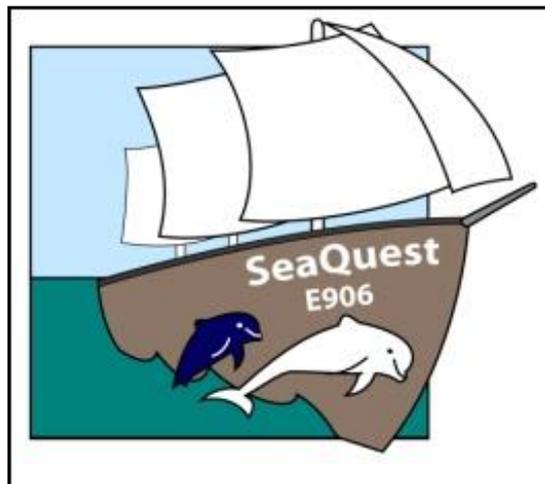


E866実験の結果、Meson cloud model の予想. CTEQ6  
 カーブはE866結果を再現するように決められたもの

**SeaQuest:  $\bar{d}(x)/\bar{u}(x)$  for  $0.1 \leq x \leq 0.45$**   
**広範囲、且つ精度良く**

# SeaQuest 実験

## 陽子内の sea クォークの探求



# SeaQuest collaboration

## Fermilab E906/SeaQuest Collaboration

### Abilene Christian University

Ryan Castillo, Michael Daugherty, Donald Isenhower, Noah Kitts, Lacey Medlock, Noah Shutty, Rusty Towell, Shon Watson, Ziao Jai Xi

### Academia Sinica

Wen-Chen Chang, Ting-Hua Chang, Shiu Shiu-Hao

### Argonne National Laboratory

John Arrington, Don Geesaman\*, Kawtar Hafidi, Roy Holt, Paul E. Reimer\*, Brian Tice

### University of Colorado

Ed Kinney, Po-Ju Lin

### Fermi National Accelerator Laboratory

Chuck Brown, Dave Christian, Su-Yin Wang, Jin-Yuan Wu

### University of Illinois

Bryan Dannowitz, Markus Diefenthaler, Bryan Kerns, Hao Li, Naomi C.R Makins, Dhyaanesh Mullagur R. Evan McClellan, Jen-Chieh Peng, Shivangi Prasad, Mae Hwee Teo, Mariusz Witek, Yangqiu Yin

### KEK

Shin'ya Sawada

### Los Alamos National Laboratory

Gerry Garvey, Xiaodong Jiang, Andreas Klein, David Kleinjan, Mike Leitch, Kun Liu, Ming Liu, Pat McGaughey, Joel Moss

### Mississippi State University

Lamiaa El Fassi

### University of Maryland

Betsy Beise, Yen-Chu Chen

### University of Michigan

Christine Aidala, Wolfgang Lorenzon, Bryan Ramson, Richard Raymond, Josh Rubin, Matt Wood

### National Kaohsiung Normal University

Rurngsheng Guo, Su-Yin Wang

### RIKEN

Yoshinori Fukao, Yuji Goto, Atsushi Taketani, Manabu Togawa

### Rutgers, The State University of New Jersey

Ron Gilman, Ron Ransome, Arun Tadepalli

### Tokyo Tech

Shou Miyaska, Kei Nagai, Kenichi Nakano, Shigeki Obata, Florian Sanftl, Toshi-Aki Shibata

### Yamagata University

Yuya Kudo, Yoshiyuki Miyachi, Shumpei Nara

### Students and postdocs

\*Co-Spokespersons



# SeaQuest 実験

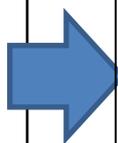
- 大Bjorken  $x$  をカバー

$\bar{d}(x)/\bar{u}(x)$  for  $0.1 \leq x \leq 0.45$

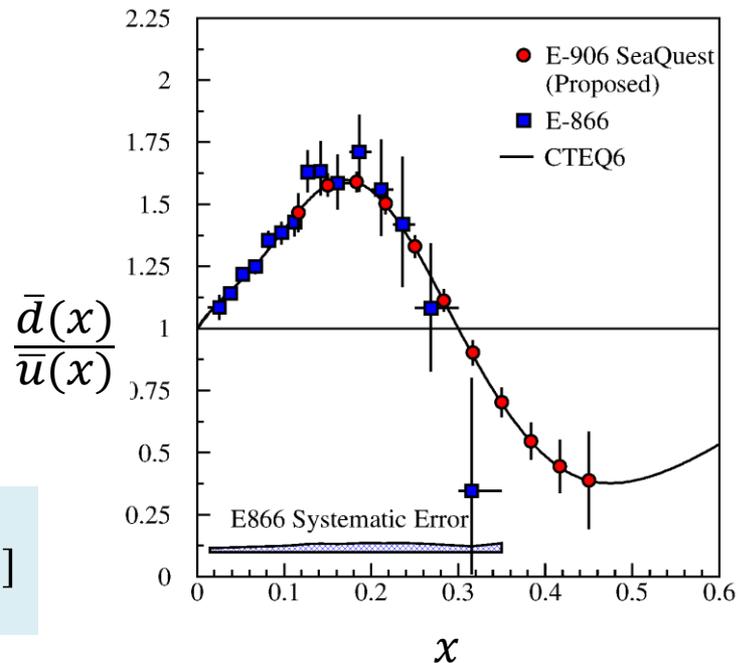
- 統計量を増やして、統計精度を上げる

$$\frac{d^2\sigma}{dx_t dx_b} = \frac{4\pi\alpha^2}{9} \frac{1}{x_t x_b} \sum_q e_q^2 [\bar{q}_t(x_t) q_b(x_b) + \bar{q}_b(x_b) q_t(x_t)]$$

Beam Energy:  
 120 GeV (SeaQuest)  
 800 GeV (E866/NuSea)



断面積 : x7  
 ルミノシティ : x7  
 → 統計量 : x50



SeaQuest の実験精度の予想

---

## 2. Fermilab と SeaQuest spectrometer

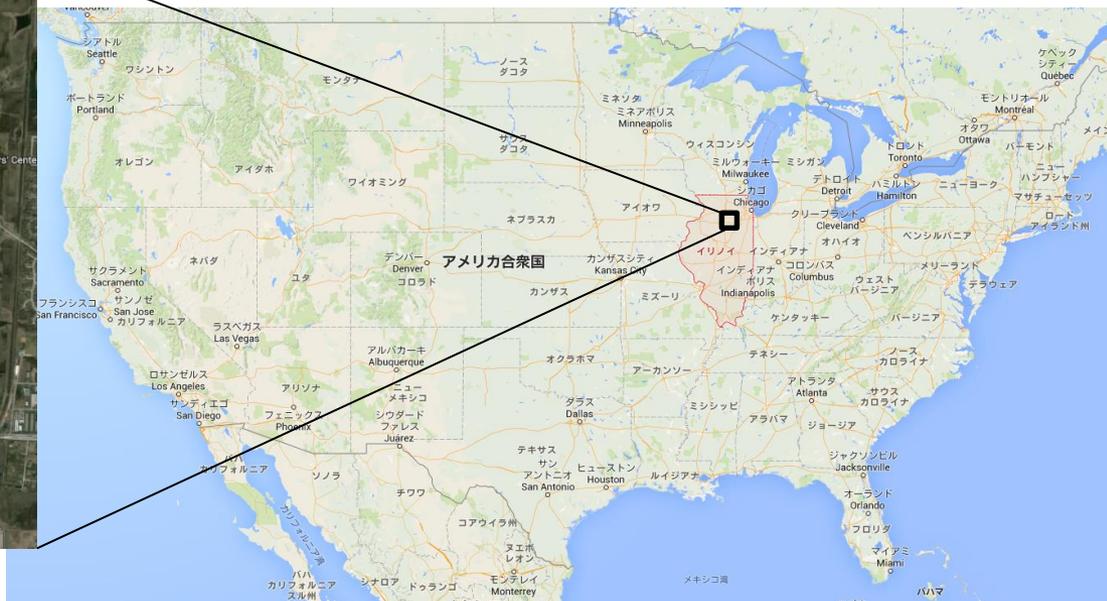
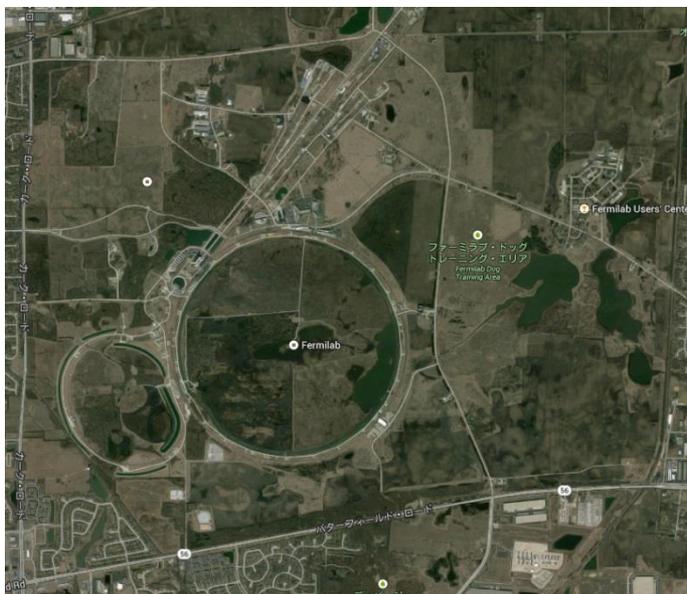
# Fermilab

- Fermilab (フェルミ国立加速器研究所)
  - 物理学者エンリコ・フェルミに由来する
  - 高エネルギー、素粒子物理学に特化
  - トップクォークの発見等

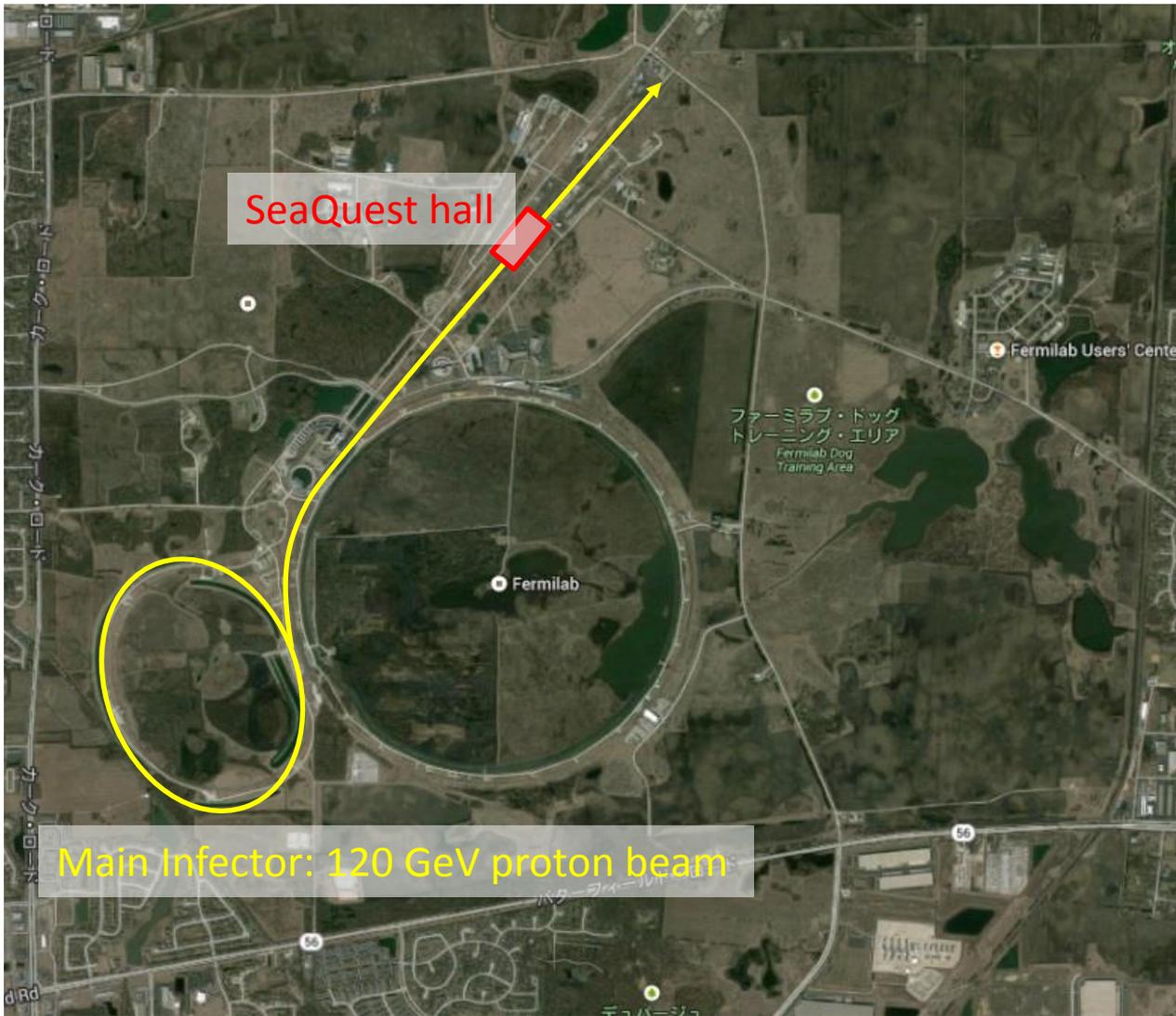


# Fermilab

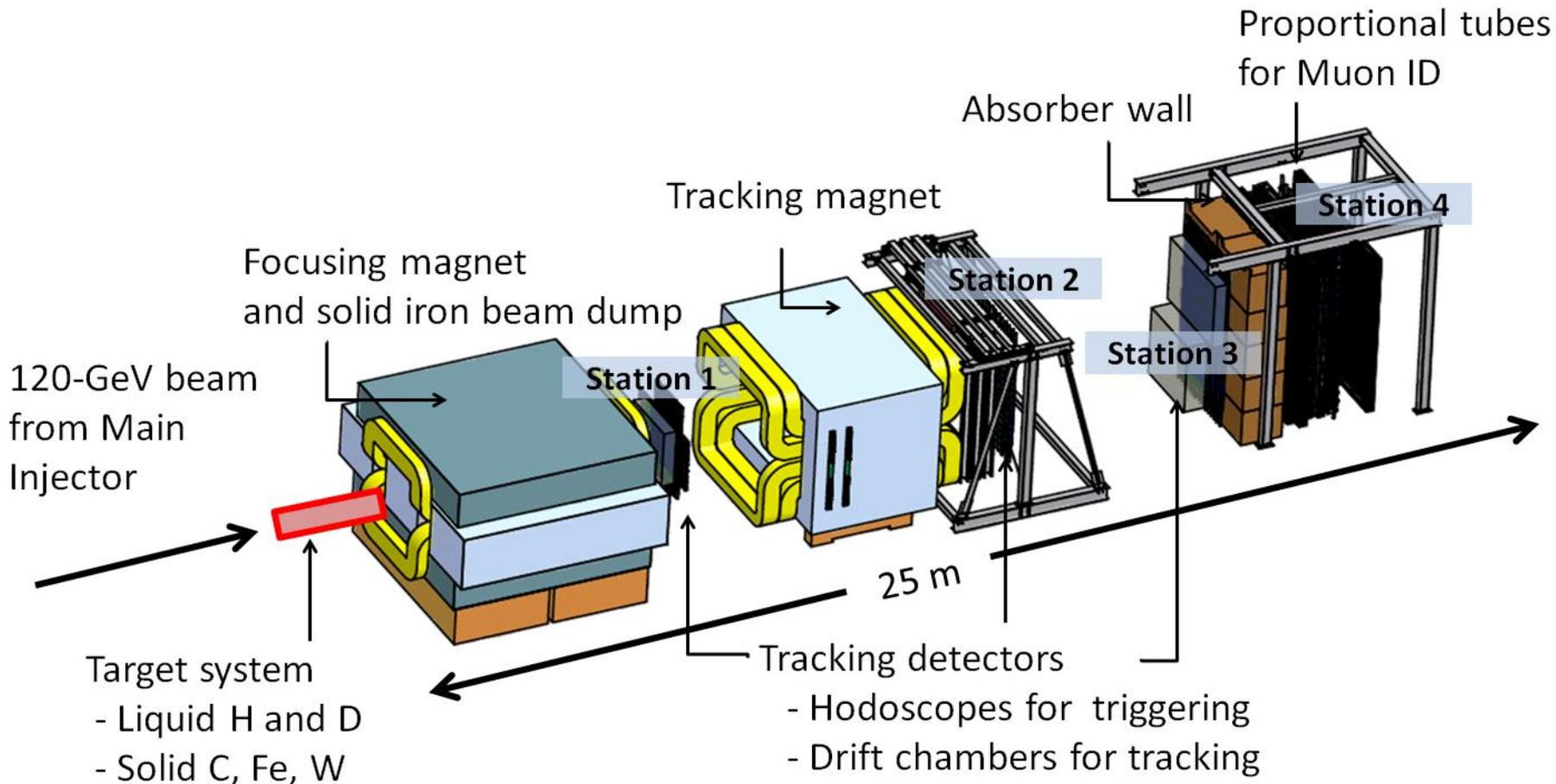
- 場所: アメリカイリノイ州バタビア
  - 近くの都市: ネイパービル(車で15分)、シカゴ(車で50分)
  - 非常に住みやすい、レストランも豊富



# 加速器

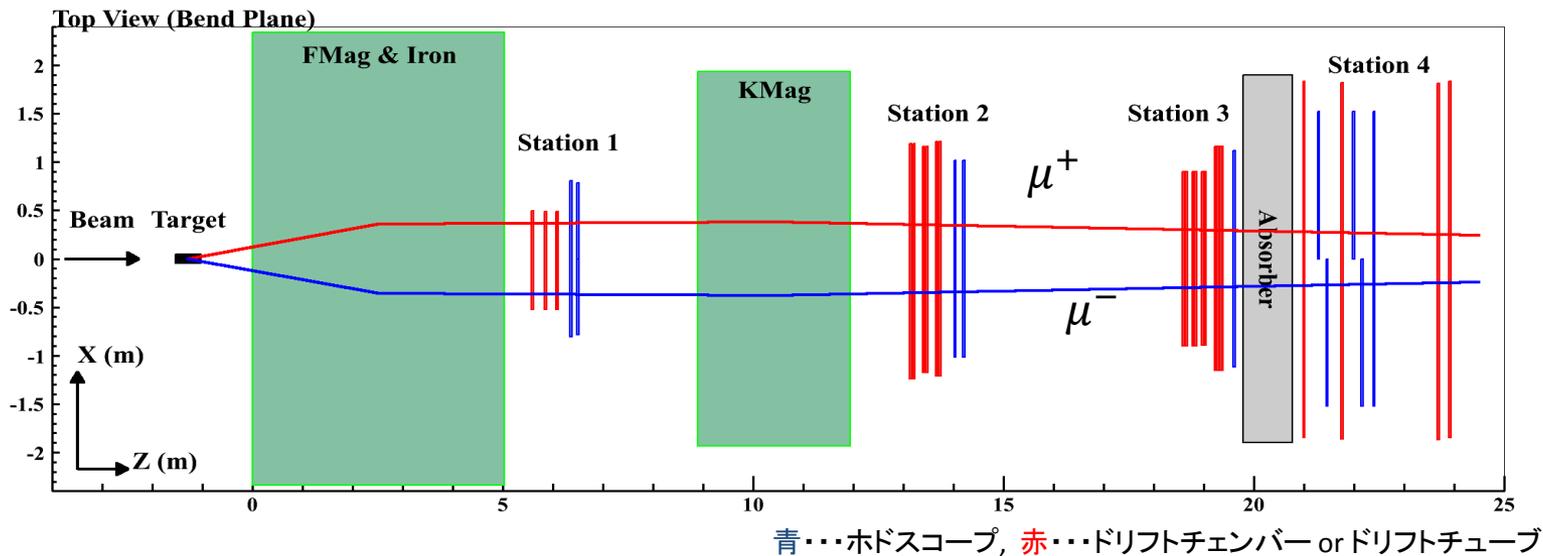


# Spectrometer



## Spectrometer

典型的なDrell-Yan イベント(6 GeV Mass のシミュレーション)



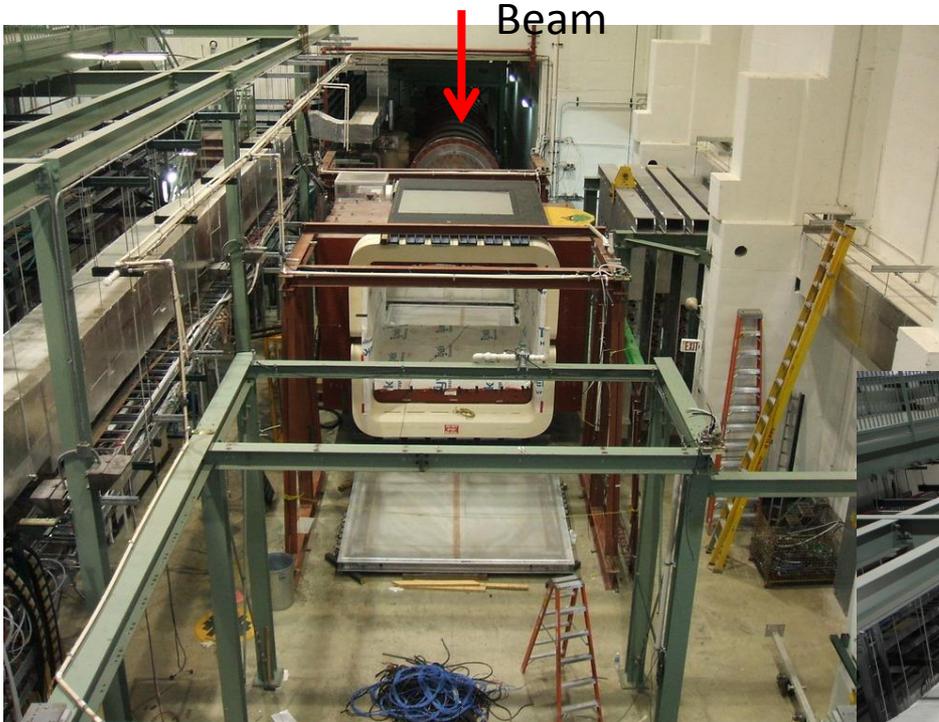
- 4つの検出器群(“ステーション”)

- トリガー用ホドスコープ
- トラッキング用ドリフトチェンバー or ドリフトチューブ

- 2つの双極マグネット

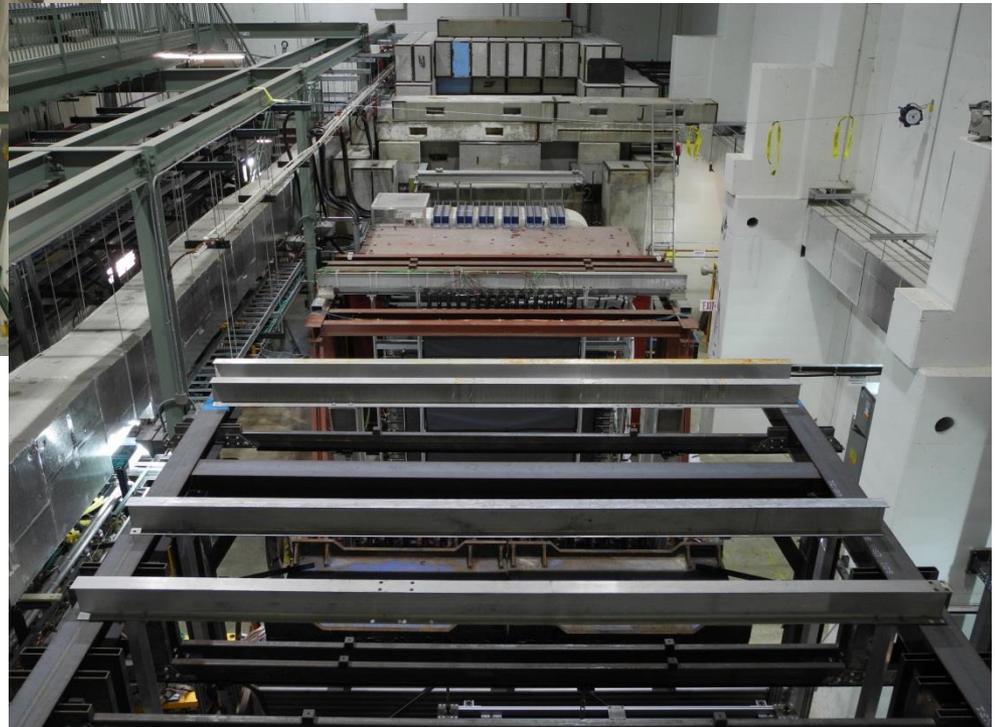
- 前方: Mass が低いミュオンを取り除く、Hadron absorber 及び beam dump の役割
- 後方: 運動量測定

# SeaQuest hall

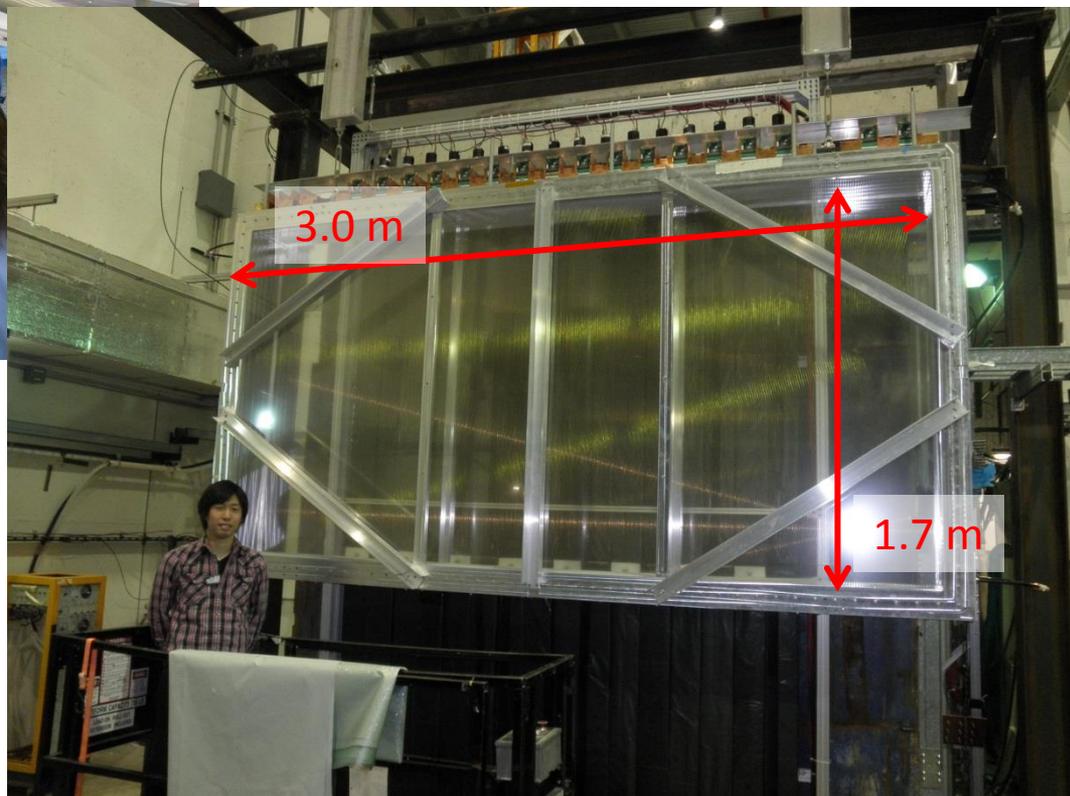
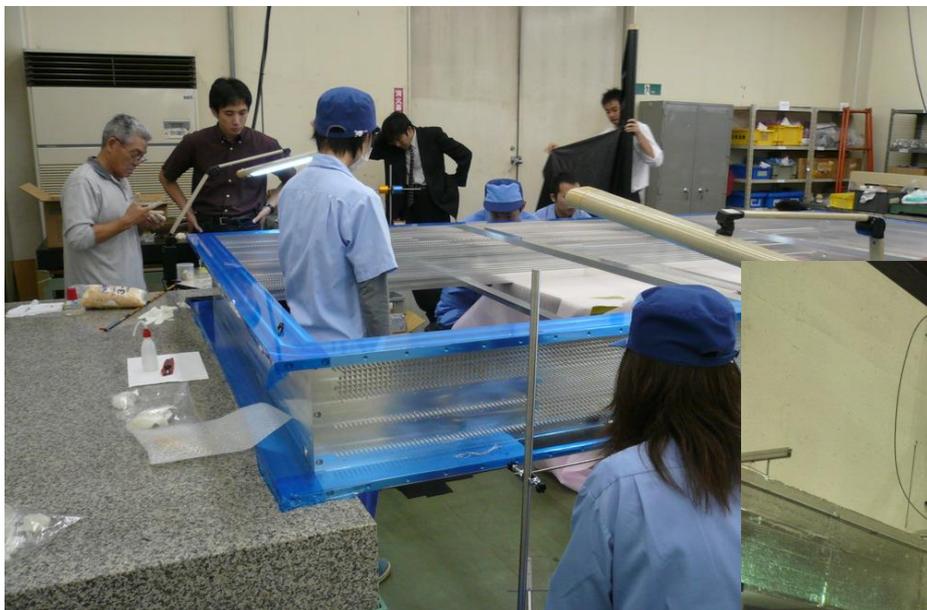


←2010年4月

2013年10月→

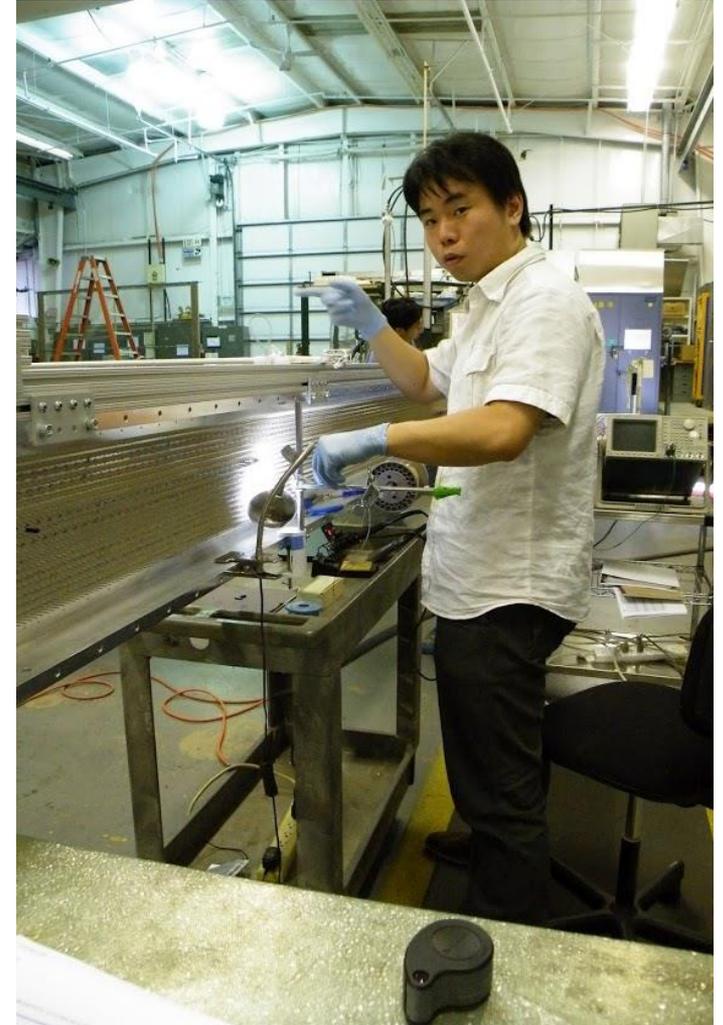


# St.3+ drift chamber



- 東工大が購入
- REPICが製作
- 理研でテスト
- Fermilabへ空輸
- Fermilabでテストの後イン  
ストール

# St.3- drift chamber



- 山形大学がフレーム・パーツを購入
- 自分たちの手で、チェンバーを組み立てる
- 合計約5000本！！

# St.3 drift chambers



# New St.1 drift chamber

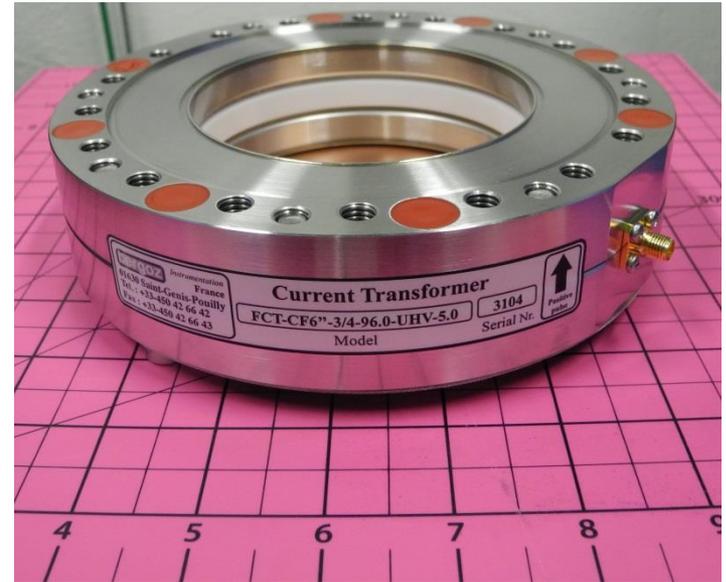
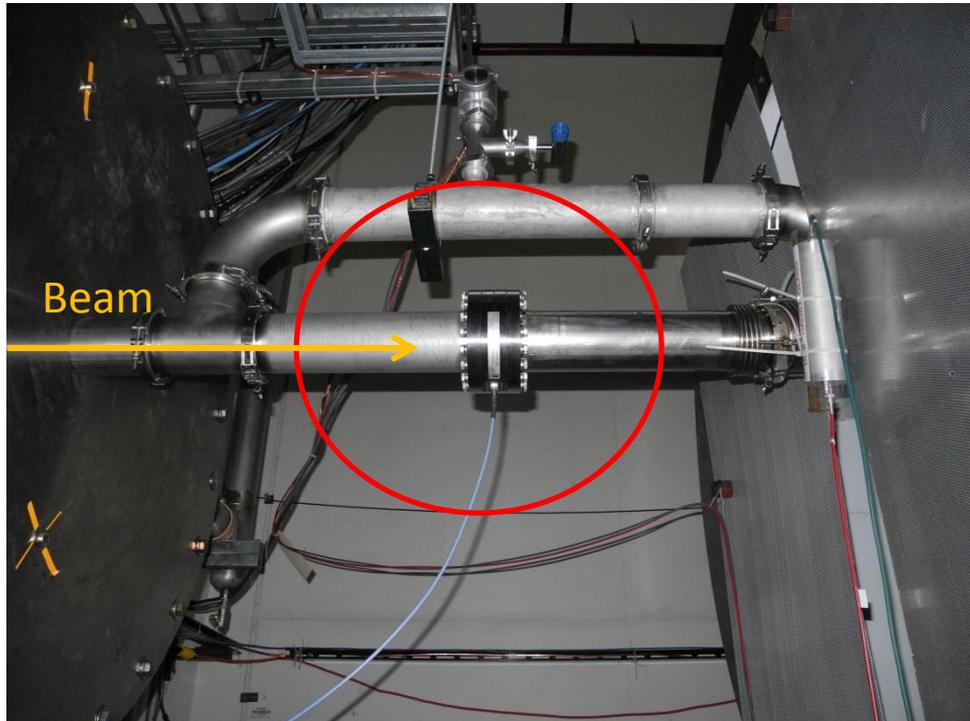


- Fermilab で製作中
- 日本グループも貢献
- もうすぐインストール予定
- アクセプタンスを大きく広げる

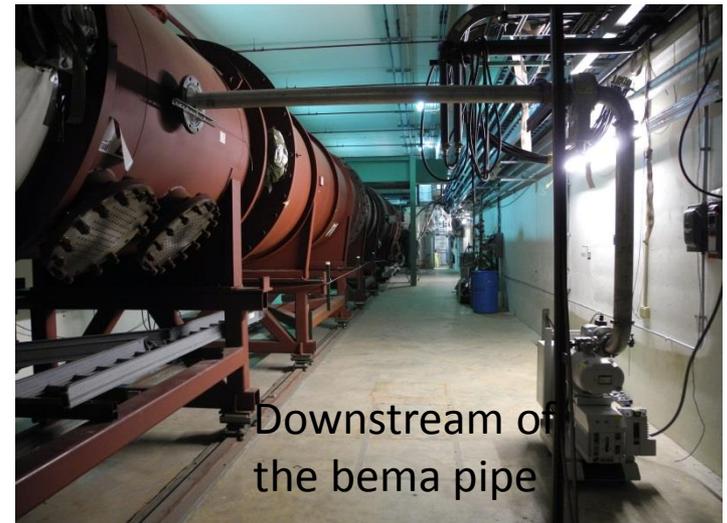
101.6 cm x 121.92 cm

→ 137.2 cm x 152.4 cm!!

# FCT (Fast Current Transformer)



- 東工大中野が購入、山田財団
- 陽子ビームのカレント絶対量を測定



---

# 3. SeaQuest 実験の進展

# SeaQuest 実験の歴史

時期	SeaQuest 実験	日本グループの働き	修士・博士論文
2009.04	Collaboration meeting		M. T. • St.3+ DCのデザイン
2009.10		St.3+ DC のフレーム完成	
2010.03	Construction • ターゲット、ダンプのインストール • ホドスコープ製作	St.3+ DC 完成、テスト@理研	S. M. • テストチェンバーのインストール • 電子増幅の測定
2010.07	• ドリフトチェンバー修復、インストール	St.3+ DC を Fermilabへ空輸 テスト@Fermilab	
2011.03	• DAQのインストール • etc ...		Shou Miyasaka • テストチェンバーの性能評価
2011.08			

# SeaQuest 実験の歴史

時期	SeaQuest 実験	日本グループの働き	修士・博士論文
2012.02	SeaQuest 実験初の陽子ビームを用いての実験！(Run1)		
2012.04		St.3- DC 製作開始	
2012.08	加速器のアップデート  Run1の結果を受けて、各システムのアップデート	St.3- DC 製作	Y. K. • St.3-DC のワイヤー張力測定まとめ • 張力測定の改良
2012.12			
2013.04		St.3- DC 完成	
2013.08			

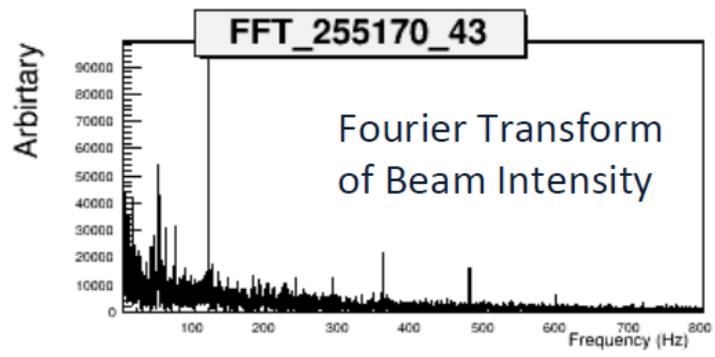
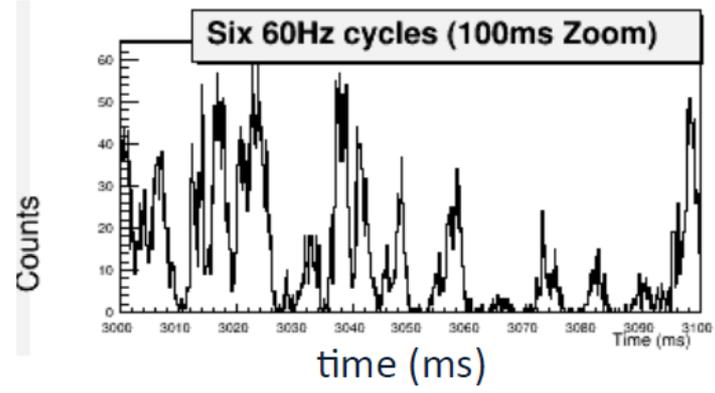
# SeaQuest 実験の歴史

時期	SeaQuest 実験	日本グループの働き	修士・博士論文
2013.10	SeaQuest 実験初の 長期Run (Run2)		F. S. <ul style="list-style-type: none"> <li>• ミューオン対トラックキングの開発</li> </ul>
2014.01		St.1 DC 製作補助 FCTインストール	S. O. <ul style="list-style-type: none"> <li>• St.3-製作のまとめ</li> </ul>
2014.04		シフト取得	K. N. <ul style="list-style-type: none"> <li>• トラッキングを用いたDCの性能評価</li> </ul>
2014.07			
2014.10			
2015.01	SeaQuest 実験Run (Run3)		R. S. <ul style="list-style-type: none"> <li>• 湿気による DC への影響</li> <li>• Hit 数によるDCへの影響</li> </ul>
2015.04	現在データ取得中		

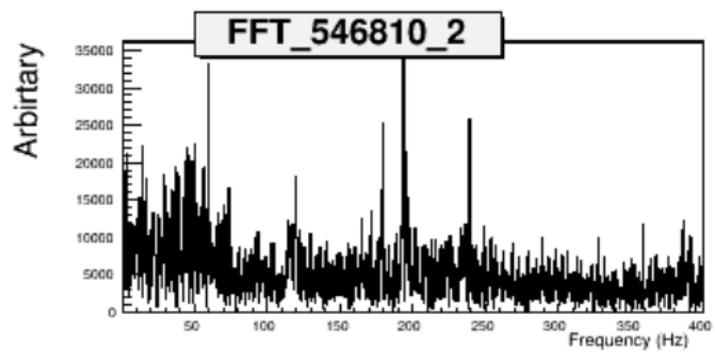
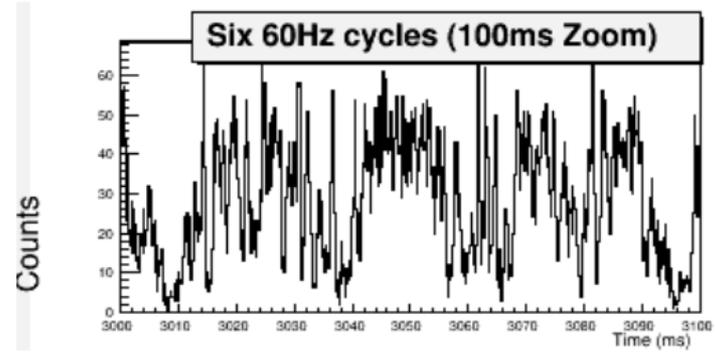
# Run2 vs Run3

## ビーム安定度

May 2014 (Run2)



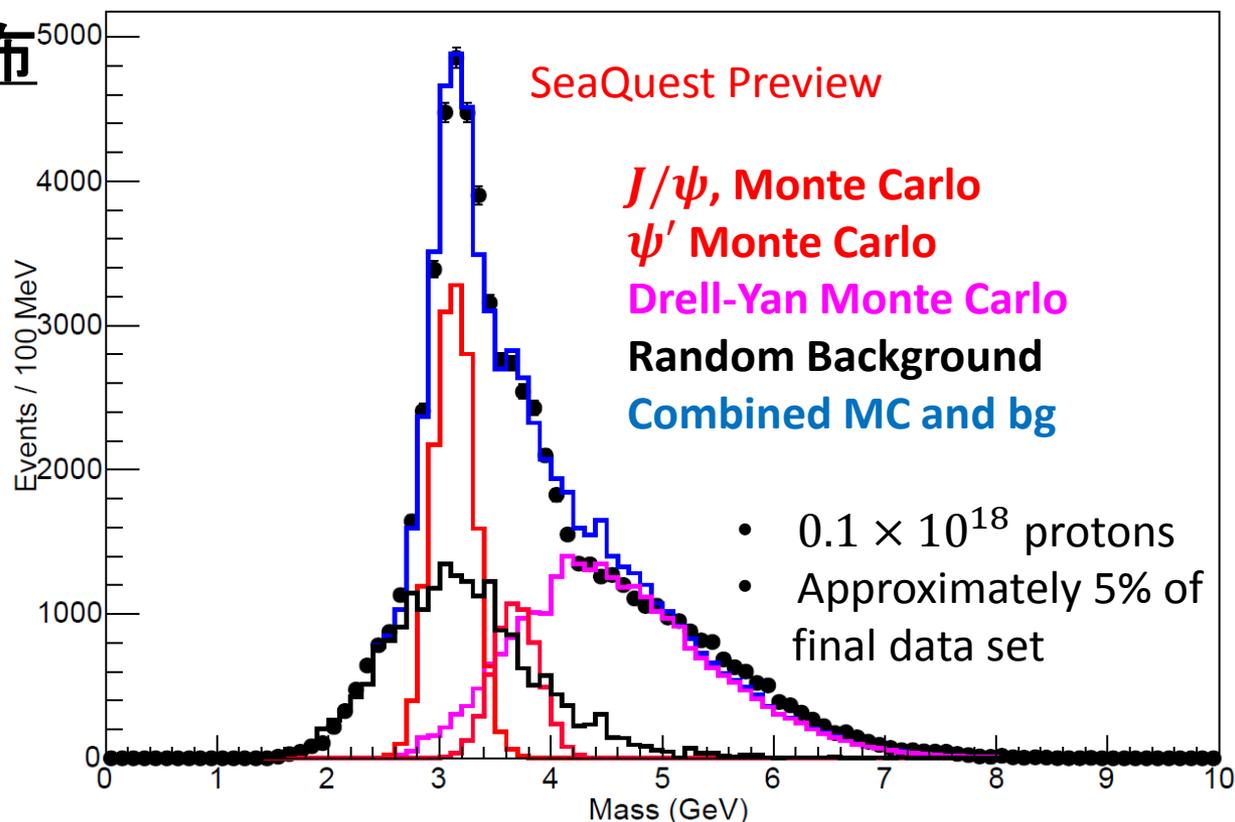
March 2015 (Run3)



- Run3 ではより安定したビームを受け取っている

# 解析状況

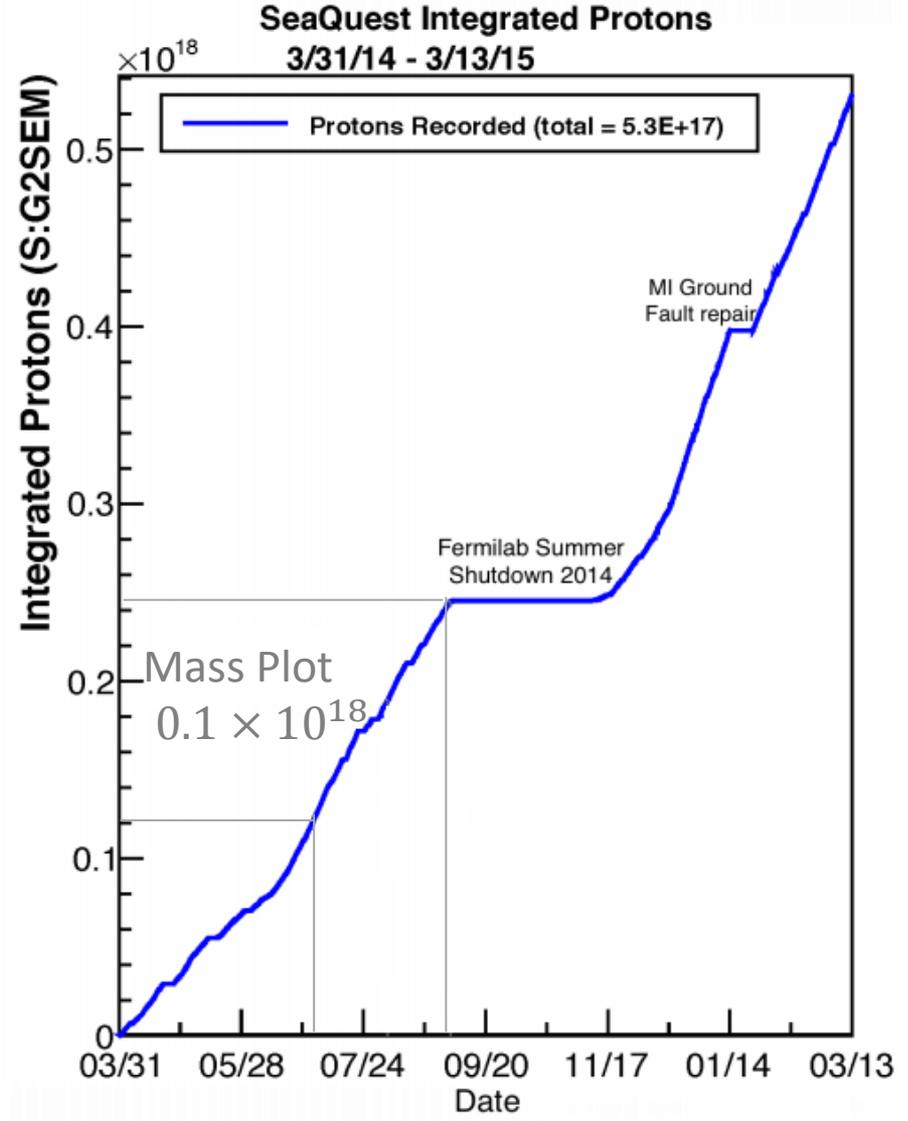
## Mass 分布



- Run2 の極一部のデータを用いた（最終的なデータ総量の約 5%）
- 検出器は想定通りに働いている
- イベント再構成に成功
- 良い Mass 分解能を持つ（ $\sim 180$  MeV）、MC の予想と一致

# 積算陽子数と展望

- 現在までの積算陽子数:  
 $0.5 \times 10^{18}$
- これは最終的な陽子総量の約20%
- 2016年7月までに予定の陽子数を  
得る:  $2.0 \times 10^{18}$



# 4. まとめ

---

- SeaQuest 実験はFermilab で 120 GeV 陽子ビームを用いた Drell-Yan 実験
- 陽子中の  $\bar{d}(x)$  と  $\bar{u}(x)$  の非対称度 @大Bjorken  $x_t$  ( $0.1 < x_t < 0.45$ )
- スペクトロメータは 大きなMass, 大きなBjorken  $x_t$  を持つミュオン対に最適化されている。日本は大きく貢献している
- 陽子ビームを用いた物理ランの開始
  - Run2: 2014年2月～2014年9月
  - Run3: 2014 年11月～2015年7月
  - Run3 では Run2 よりもビーム 陽子数が1.5倍、安定度も増した
- Run2 の極一部のデータ(最終的なデータ総量の約5%)を用いて解析を行う
- MCと一致するMass 分布の再構成に成功
- Cross section ratioの統計エラーを計算
  - Systematic error は study 中。最終的には 2% 以下になる見積もり
  - 妥当なデータを取得している
  - 現在は Run3 の QA を行っている
- 最終的な陽子総量の約20%を記録。2016年7月までに予定の陽子量を取り終える

---

# BACKUP

