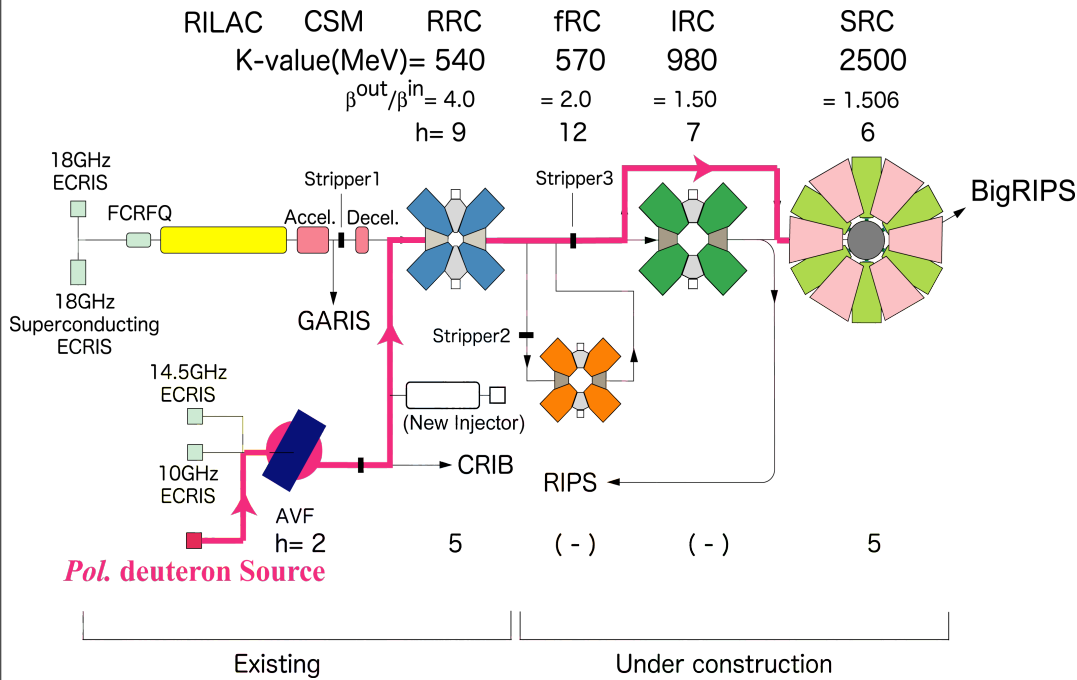


# RIBF 偏極重陽子ビームによる 少数核子系の実験

独立行政法人理化学研究所  
仁科加速器研究センター  
関口仁子

# RIBF における偏極重陽子ビーム加速



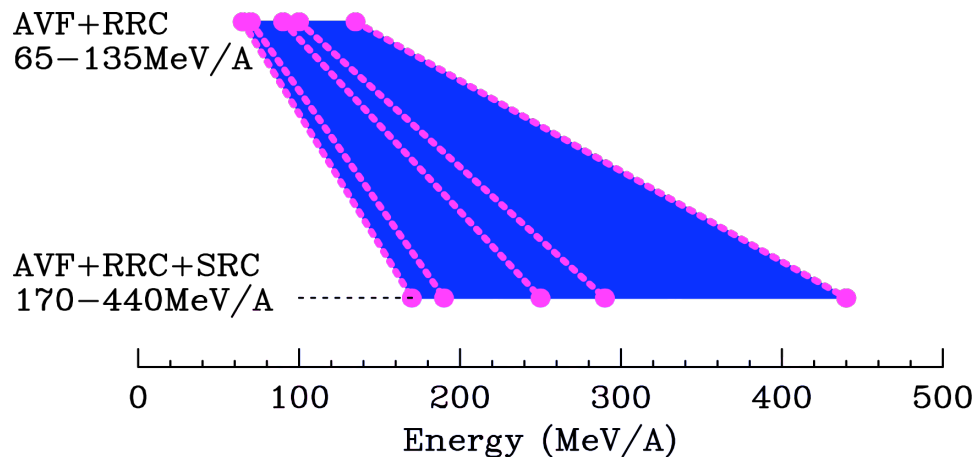
## AVF+RRC

- $E/A = 65 - 135 \text{ MeV}$
- Beam Intensity  $\sim 200 \text{ pA}$



## AVF+RRC+SRC

- $E/A = 170 - 440 \text{ MeV}$
- Beam Intensity
  - 100 pA BigRIPS F0 まで



# Pol.d Beam Experiments at RIBF

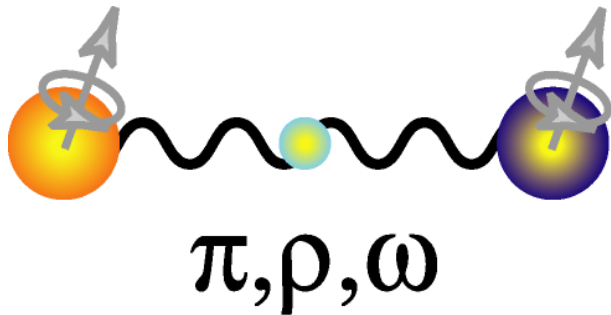
## ❁ Physics Subjects :

- **Study of Three Nucleon Forces via Few Nucleon System**
  - **3N Scattering**
    - $dp$  elastic & breakup reactions
    - $dp \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma$  radiative capture
  - **4N Scattering**
    - $d+d \rightarrow d+d$
    - $d+d \rightarrow p+n+d$  etc.. (breakup)
    - $d+d \rightarrow {}^3\text{H}+p / {}^3\text{He}+n$
    - $d+d \rightarrow {}^4\text{He}+\gamma$  radiative capture
- **Short-Range Part of the NN Tensor Interactions**
  - ${}^3\text{He}(d,p){}^4\text{He}$
- **etc..**

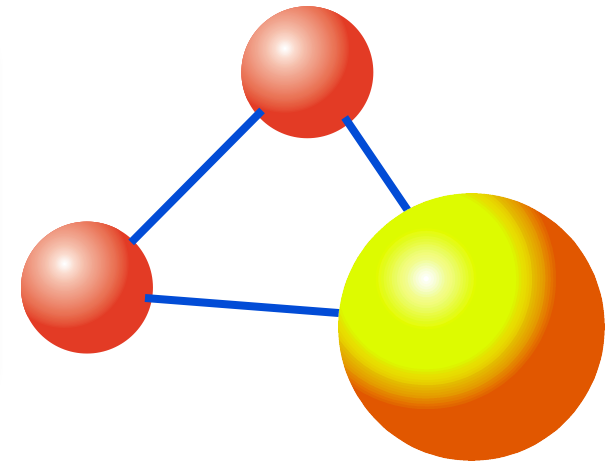
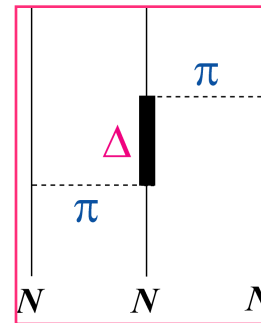
# 三体力 ( Three Nucleon Force )

- ▶ 核子と中間子場の最もシンプルな過程の一つ。
- ▶ 核力の統一的な理解には欠かせない。

## 二体力



## 三体力



$\Delta$  : excited state of nucleon

1990年代 中間子論+現象論

3000~4000の核子-核子散乱  
データを $\chi^2 \sim 1$ の精度で再現

e. g. CD Bonn, AV18, Nijmegen I&II





# 2π交換型の三体力

## 藤田-宮沢型の三体力 (1957)

- ⇒ Tucson-Melbourne (TM) 3NF
- ⇒ Urbana-IX 3NF
- ⇒ Brazil, Texas, Ruhr, etc.

## 一般的なポテンシャルの表現

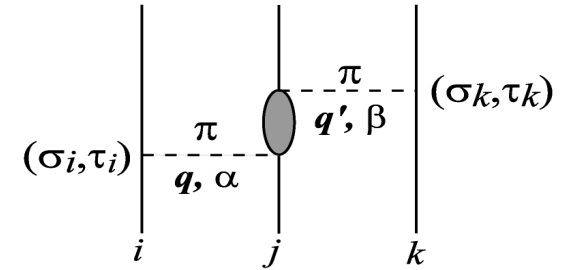
- ▶ Low Momentum Expansion of πN Scattering
- ▶ Cut-off パラメータ  $\Lambda$  は  ${}^3\text{H}$  の束縛エネルギーを再現するように決める

$$V_{3NF}^{(j)} = \frac{g^2}{4m_N^2 q^2 + m_\pi^2 q^2 + m_\pi^2} \frac{\vec{\sigma}_i \cdot \mathbf{q}}{q^2 + m_\pi^2} \frac{\vec{\sigma}_k \cdot \mathbf{q}'}{q'^2 + m_\pi^2} F_{\pi NN}^2(q^2) F_{\pi NN}^2(q'^2) \times \left\{ \xi^{\alpha\beta} \left[ a + b\mathbf{q} \cdot \mathbf{q}' + c(q^2 + q'^2) \right] - d(\tau_j^\gamma \epsilon^{\alpha\beta\gamma} \vec{\sigma}_j \cdot \mathbf{q} \times \mathbf{q}') \right\} \tau_i^\alpha \tau_k^\beta$$

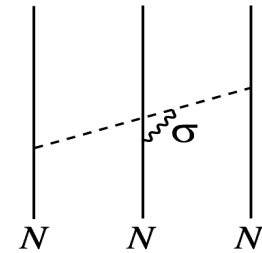
$$F_{\pi NN}(q^2) = \frac{\Lambda^2 - m_\pi^2}{\Lambda^2 + q^2}$$

3NF	$a(a') [m_\pi^{-1}]$	$b [m_\pi^{-3}]$	$c [m_\pi^{-3}]$	$d [m_\pi^{-3}]$
藤田-宮沢	0	-1.15	0	-0.29
TM	1.13	-2.58	1.0	-0.753
TM'	(-0.87)	-2.58	0	-0.753
Urbana IX	0	-1.20	0	-0.30

## ◆ General Form

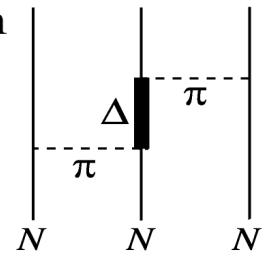


## ◆ a-term



S-wave πN Scattering

## ◆ b, d-term



P-wave πN Scattering

藤田-宮沢型

# カイラル摂動理論による核力の構築

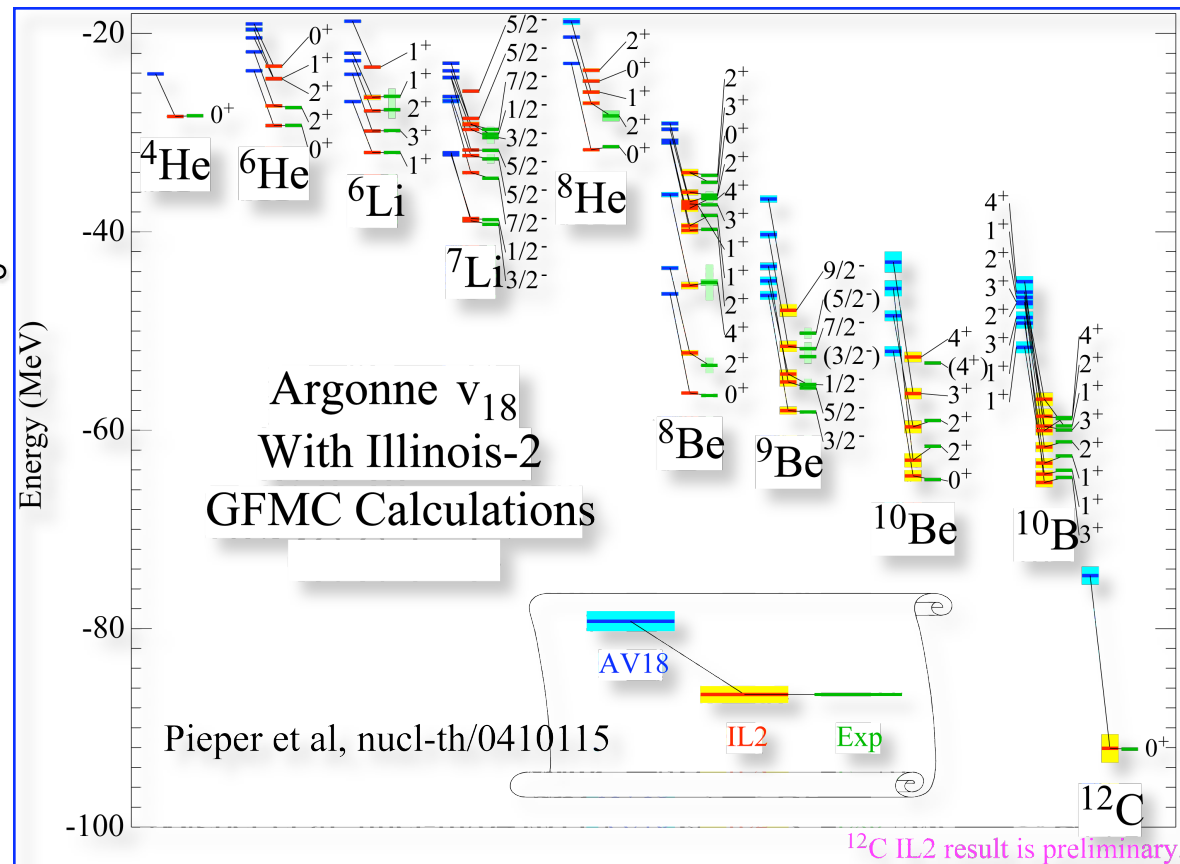
- 低エネルギーQCDの記述
- QCDラグランジアンとの接点  
カイラル対称性を考慮した有効場
- カイラル対称性の破れ  
べき展開  $\sim \pi$  中間子の質量程度 (高々  $3\text{fm}^{-1}$ )
- 相互作用:  
  - $\pi$  中間子 (Goldstone ボゾン)
  - + 核子
  - + 接触相互作用 (重い中間子,  $\Delta$  etc..)
- 二体力、三体力、四体力...  
を統一的に導き出すことができる
- 二体力 > 三体力 > 四体力 ...  
を説明. 三体力は、 $N^2\text{LO}$ で現れる.

	2N forces	3N forces	4N forces
LO		—	—
NLO			—
$N^2\text{LO}$			—
$N^3\text{LO}$			
	+ ...	+ ...	+ ...

# 三体力の効果はどこに現れるか？-その1-

## 原子核の結合エネルギー (GFMC, NCSM ...)

- 二体力だけでは、実験値を説明できない。
- 三体力(藤田・宮沢型)の導入により、実験値を再現。
- 結合エネルギーにおいて  
**核子間三体力の効果**  
が占める割合
  - 10 - 25 %
  - 引力



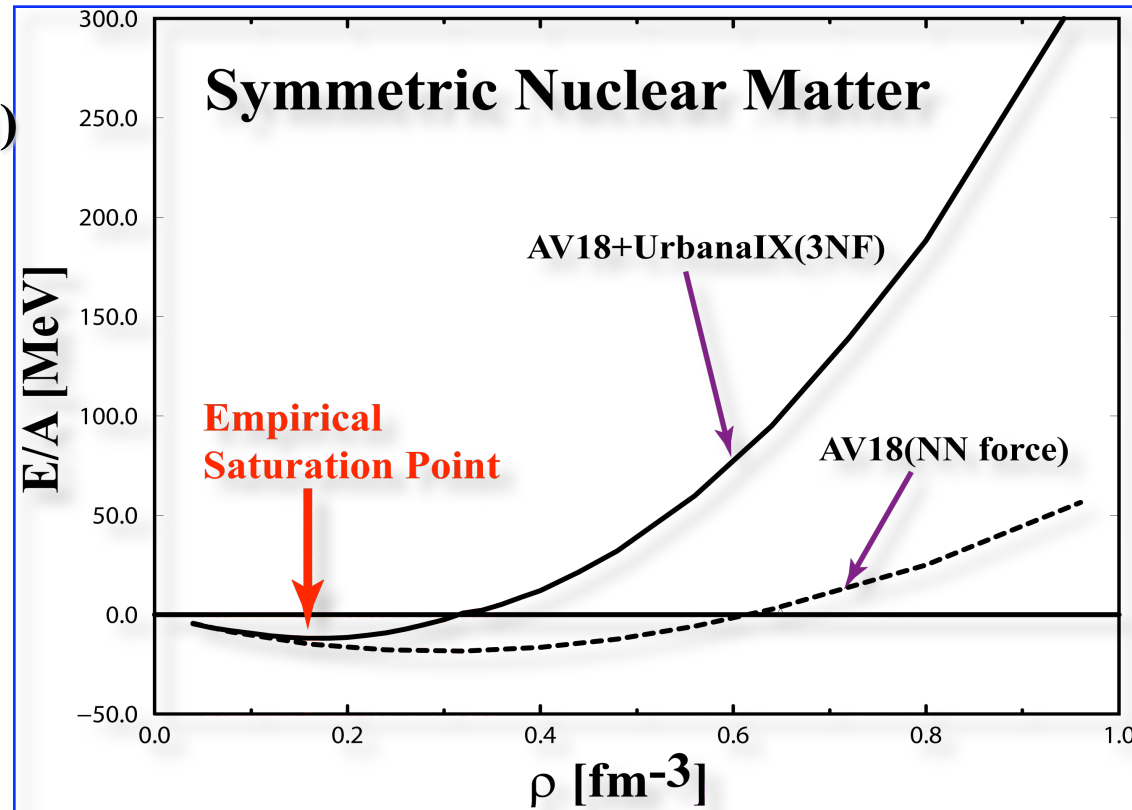
# 三体力の効果はどこに現れるか？-その2-

A. Akmal et al., PRC 58, 1804('98)

# 三体力の効果はどこに現れるか？-その2-

## 核物質の状態方程式

- 二体力 (AV18, Nijmegen I,II, CD Bonn) では、核物質の飽和性を説明できない。
- 三体力(藤田・宮沢型)
  - 飽和性の説明に成功
  - 高密度状態では三体力が重要か？

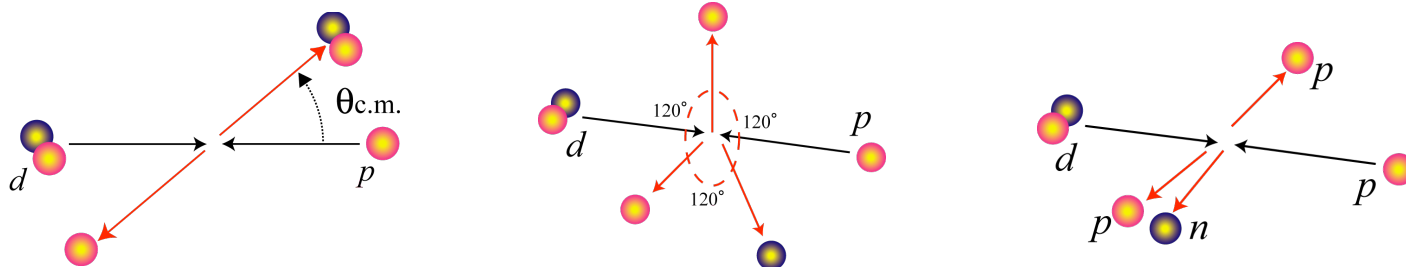


A. Akmal et al., PRC 58, 1804('98)

三体力の重要性が原子核の基本的な性質  
(結合エネルギー、原子核の飽和性)を説明する上で  
指摘され始めている。

## ～少数核子系～ 重陽子・陽子散乱

- ✓ 運動量依存性
- ✓ スピン量子数の依存性
- ✓ アイソスピン依存性： $T=1/2$

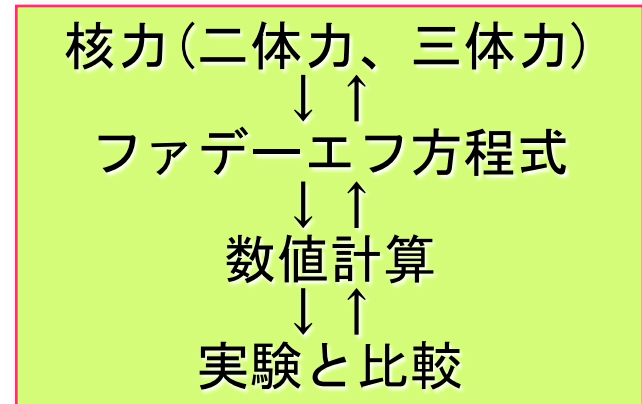
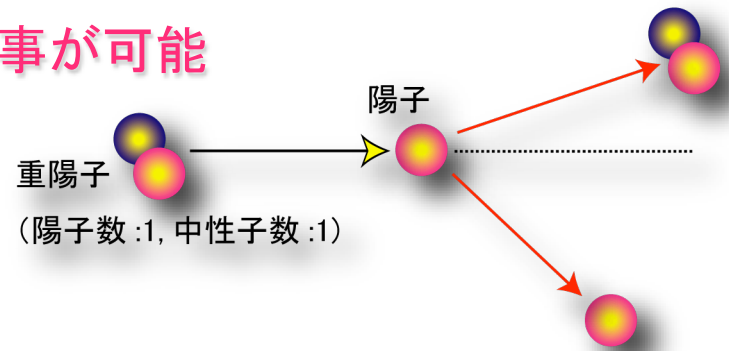


# 重陽子・陽子散乱による三体力の検証方法

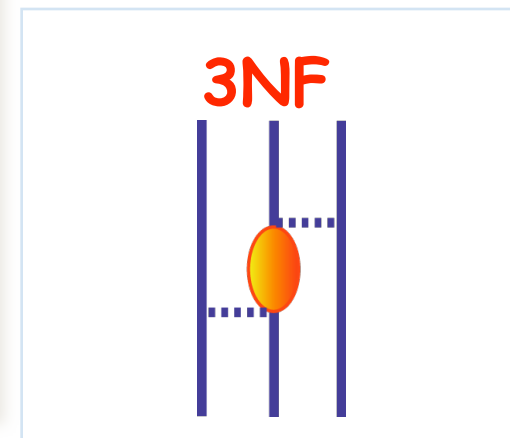
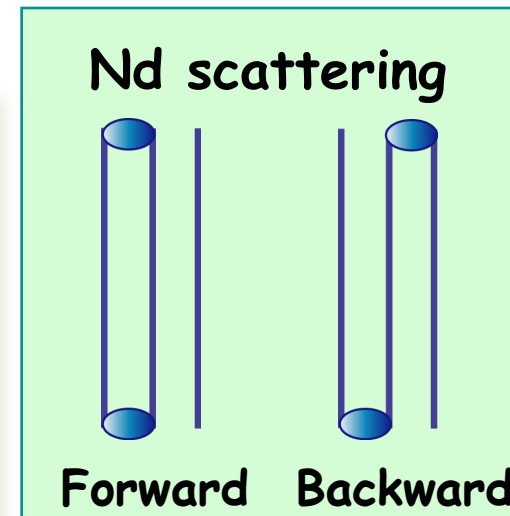
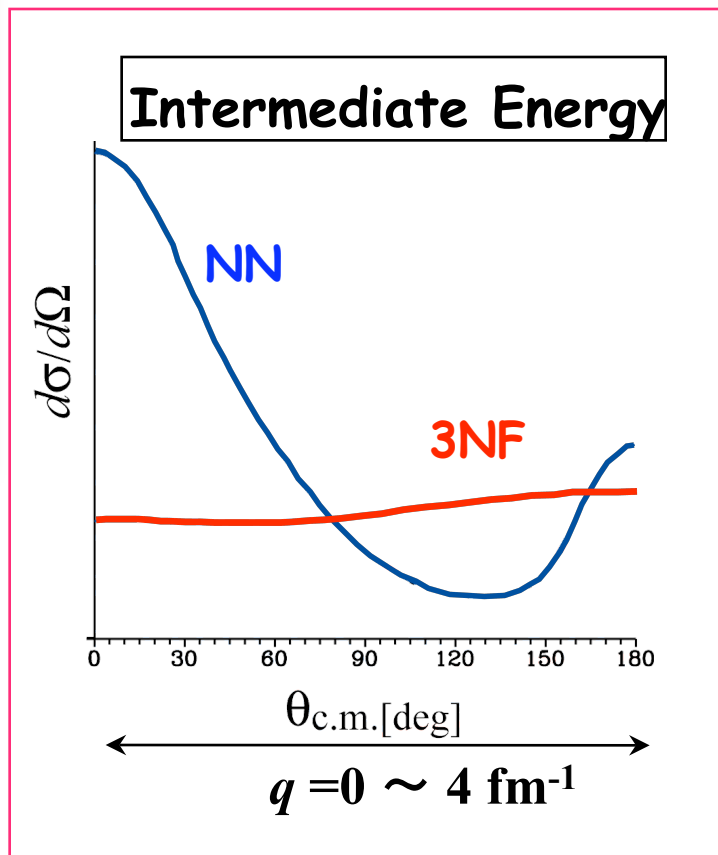
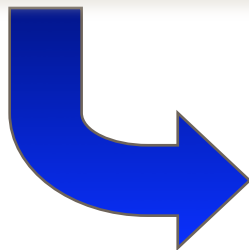
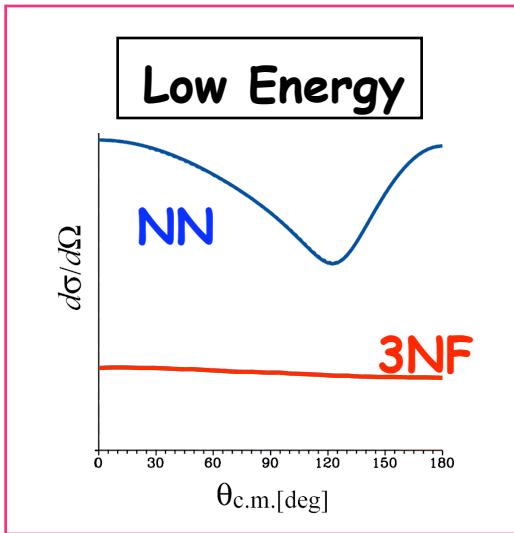
- 確立された二体力を用いた三体系の厳密計算
- 高精度な三体系の実験データを比較

⇒ 三体力の効果を直接、定量的に議論する事が可能

- 三体系の厳密理論：ファデーエフ理論 (1961年)
  - ： 三体系を二体力を用いて厳密に記述
    - －但し、数値計算はとても大変。
    - －コンピュータの高速化で近年実現可能に。
- 実験：高精度データ
  - 散乱微分断面積  $d\sigma/d\Omega$
  - スピン観測量
    - 偏極分解能  $A_{ij}$
    - 偏極移行量  $K_{ij}$
    - スピン相関係数  $C_{ij}$



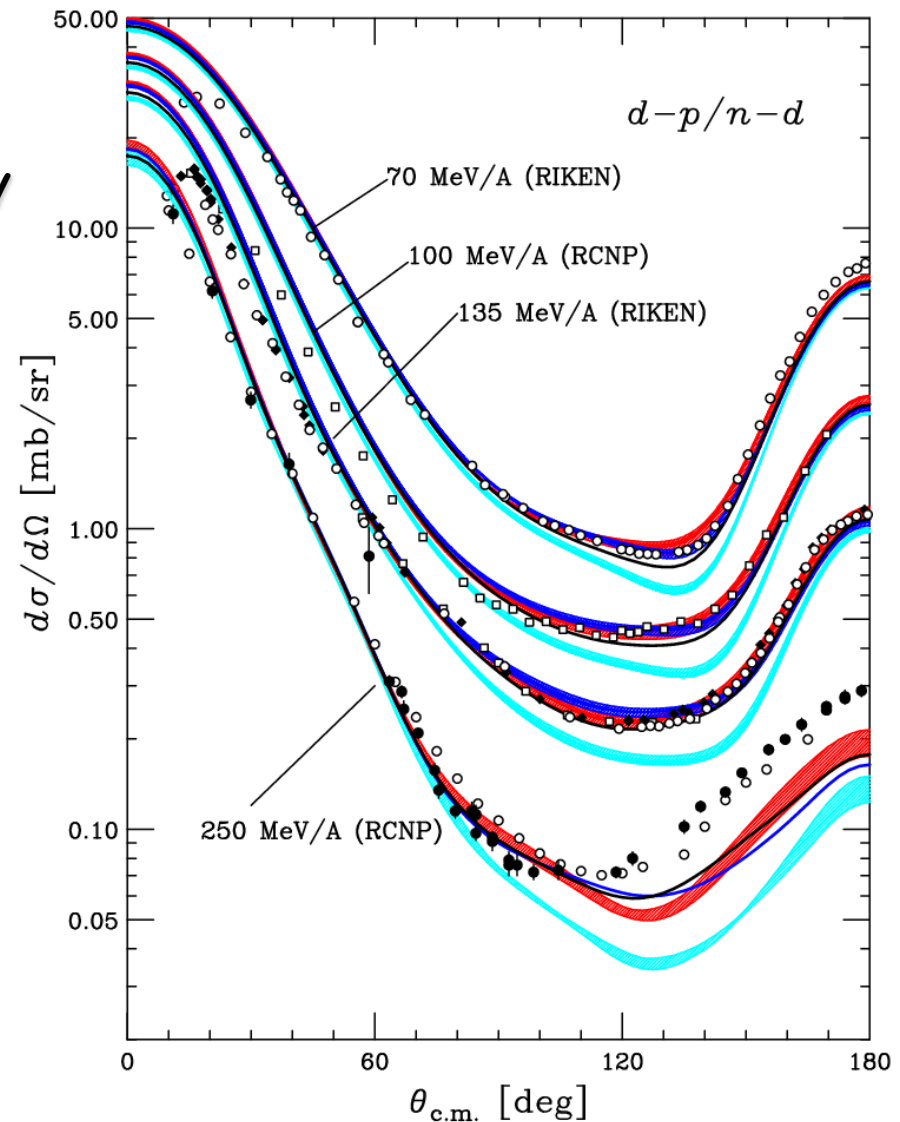
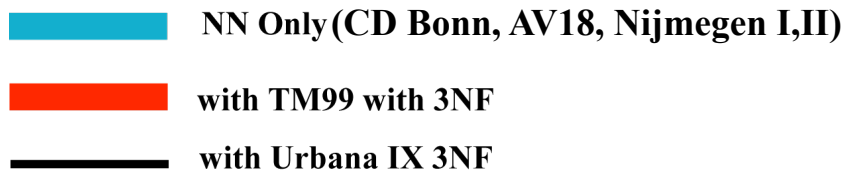
# Picture of 3NF Effects in Nd scattering





# $p$ - $d$ elastic scattering at 70 – 250 MeV/A

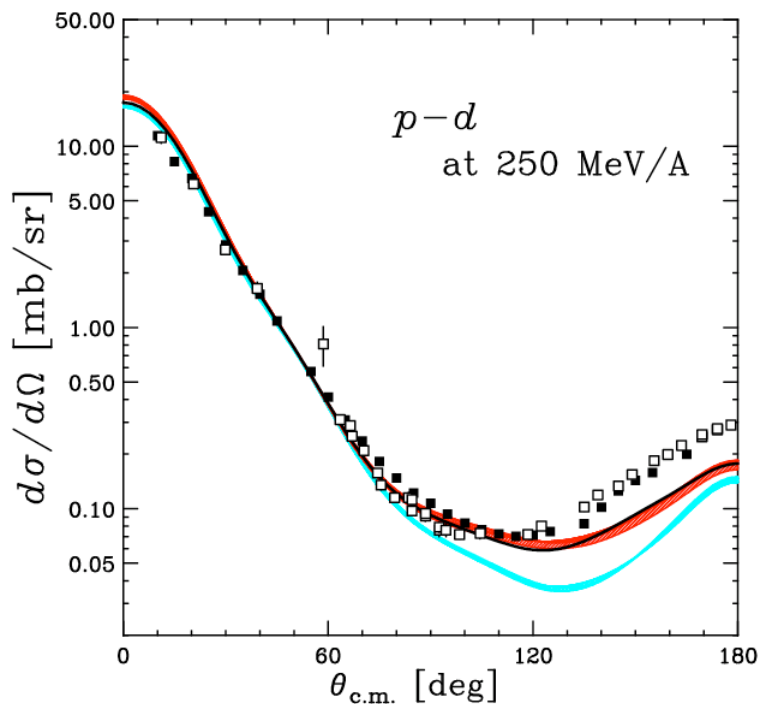
- Discrepancies between the data and the calculations based on 2NF only
  - Backward angles
  - Large as an Energy Increases
- 3NF Effect ?
  - Agreement is improved by  $2\pi$ -3NF
  - but not enough at higher energies



$d\sigma/d\Omega$  : go to higher energies

K. Hatanaka et al. PRC 65, 034003(2002);  
Y. Maeda et al. PRC76, 014004 (2007)

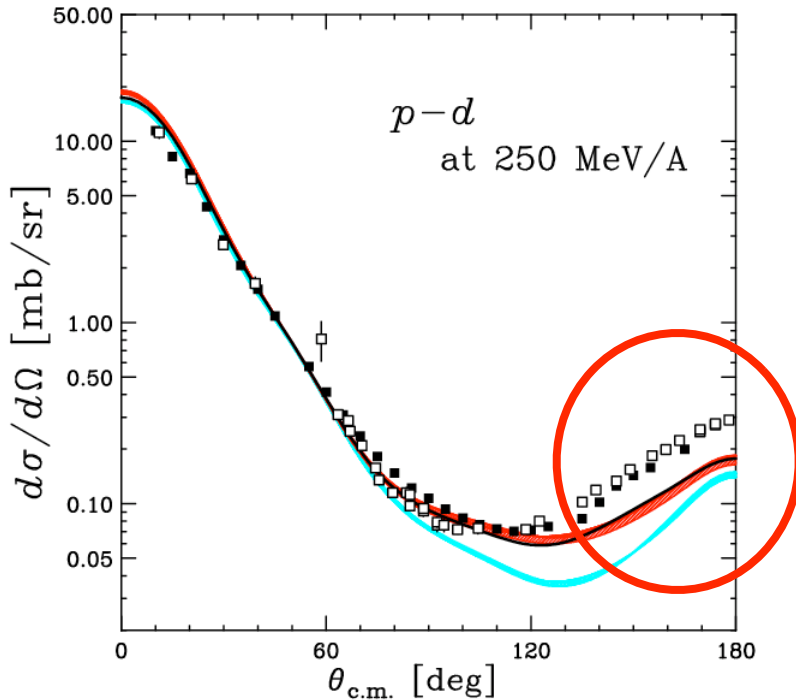
*p-d / n-d* elastic scattering at 250 MeV



$d\sigma/d\Omega$  : go to higher energies

K. Hatanaka et al. PRC 65, 034003(2002);  
Y. Maeda et al. PRC76, 014004 (2007)

$p-d$  /  $n-d$  elastic scattering at 250 MeV

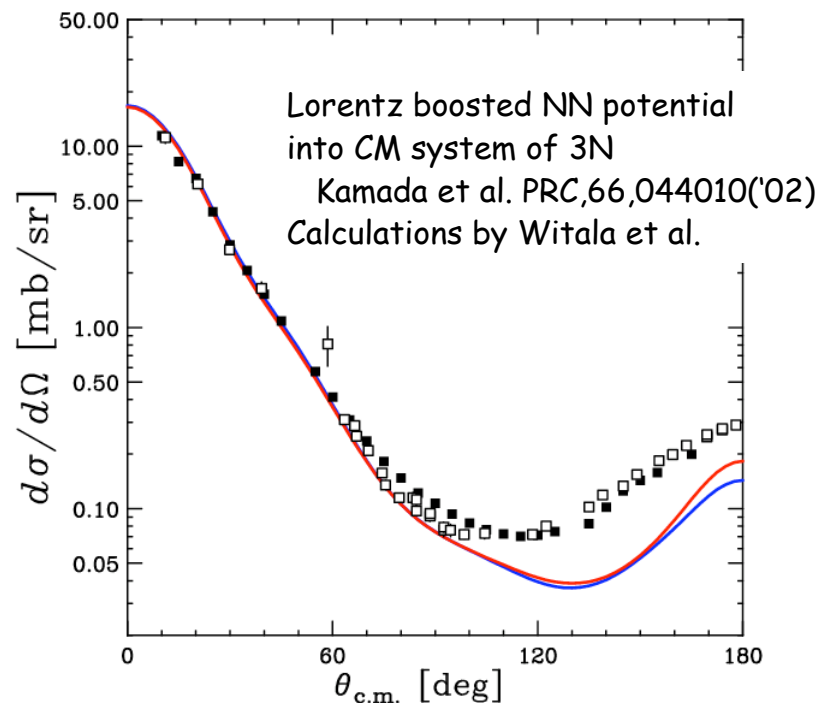
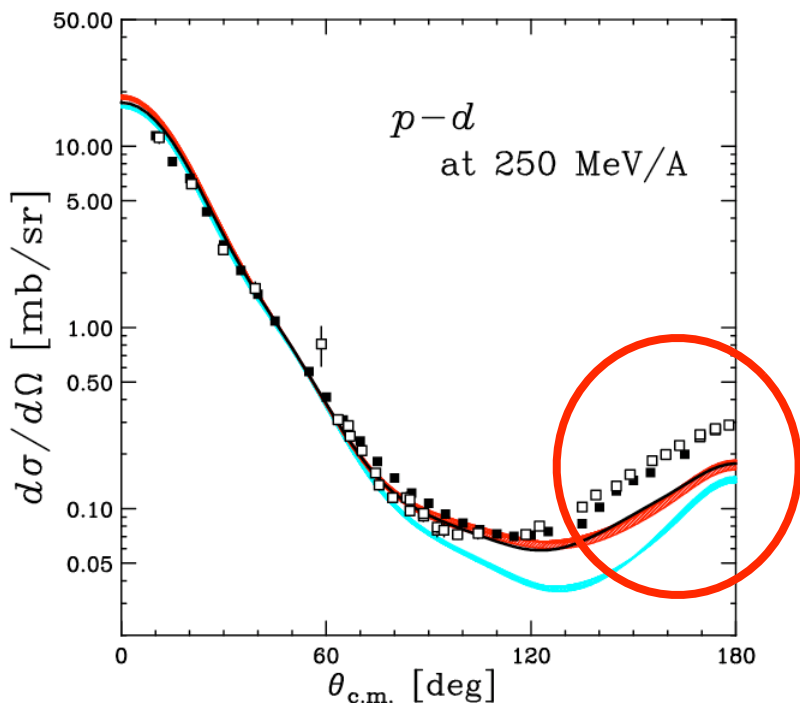


**NN+3NF calc. still underestimates  
the data at backward angles  
by 50 %.**

$d\sigma/d\Omega$  : go to higher energies

K. Hatanaka et al. PRC 65, 034003(2002);  
Y. Maeda et al. PRC76, 014004 (2007)

## $p-d$ / $n-d$ elastic scattering at 250 MeV



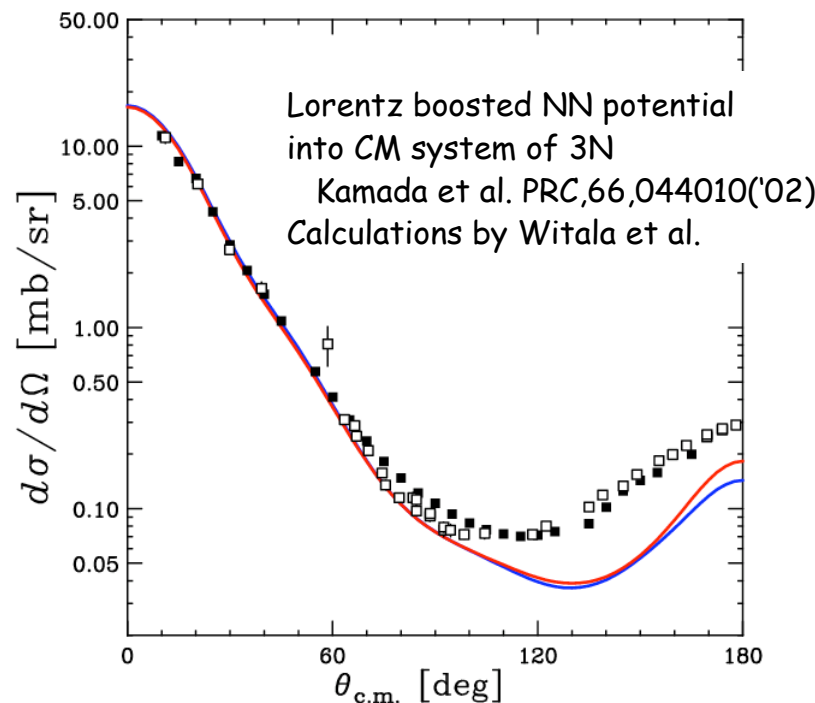
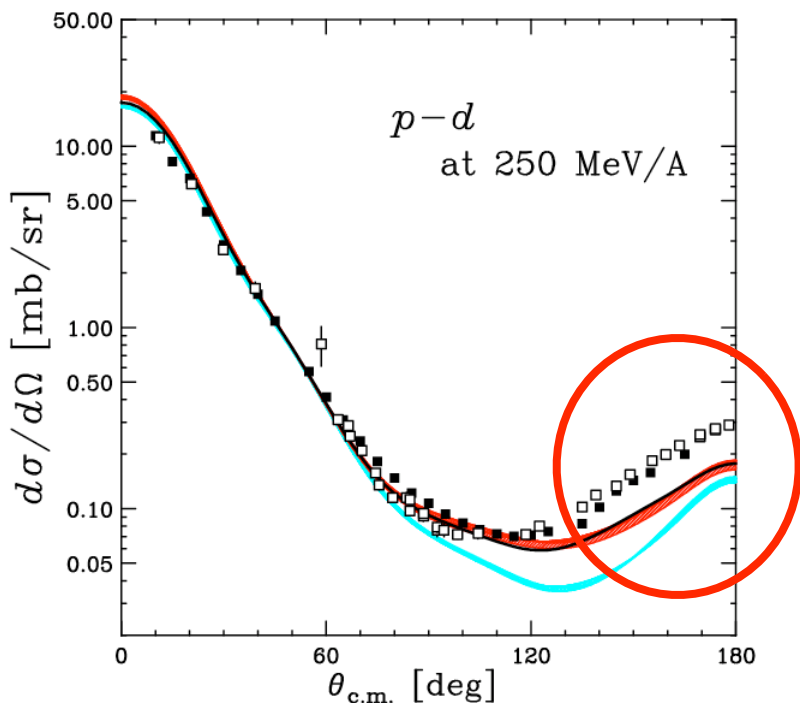
**NN+3NF calc. still underestimates  
the data at backward angles  
by 50 %.**

**Relativistic Effects :  
only visible at very backward angles**

$d\sigma/d\Omega$  : go to higher energies

K. Hatanaka et al. PRC 65, 034003(2002);  
Y. Maeda et al. PRC76, 014004 (2007)

## $p-d$ / $n-d$ elastic scattering at 250 MeV



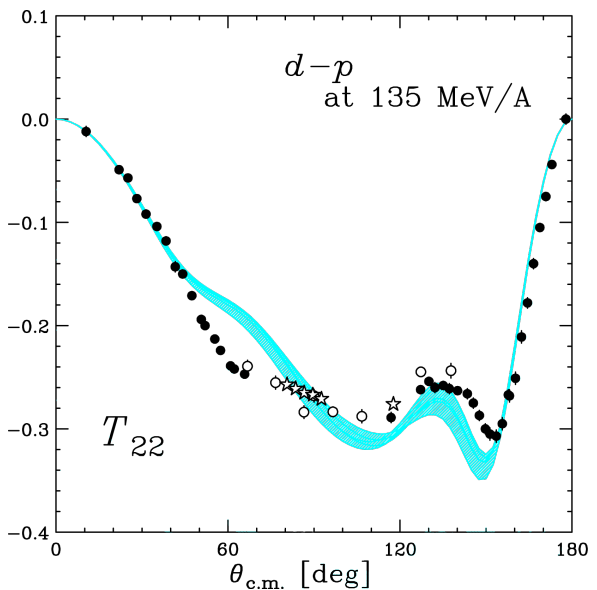
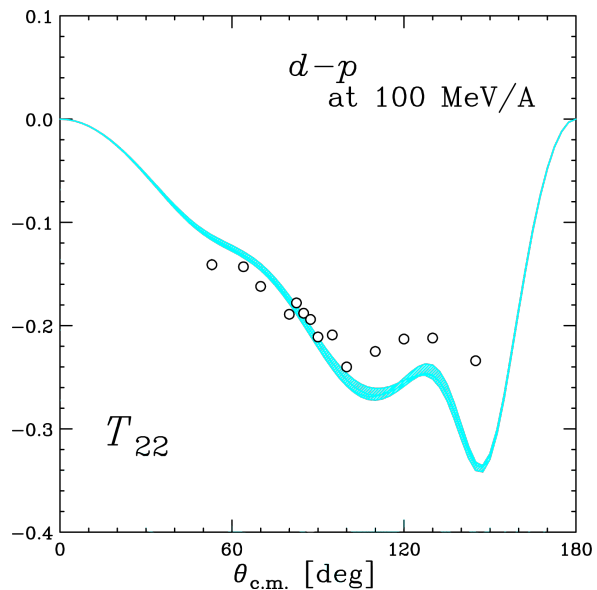
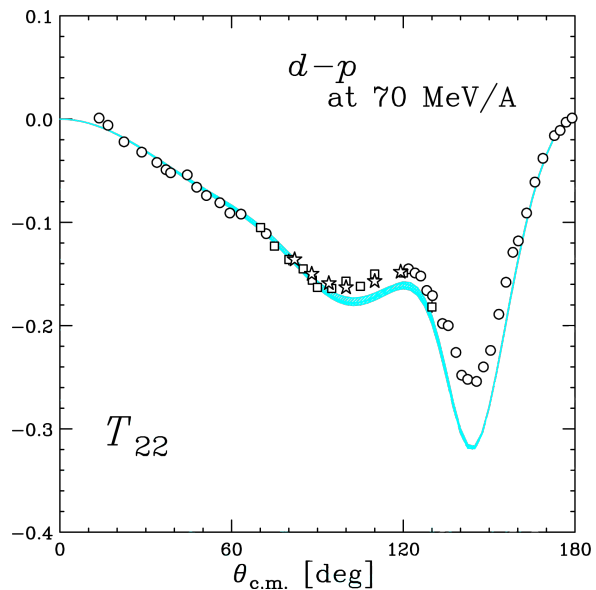
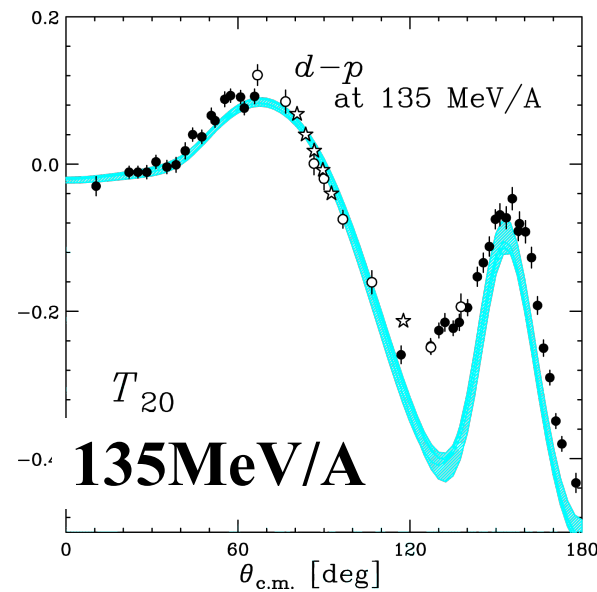
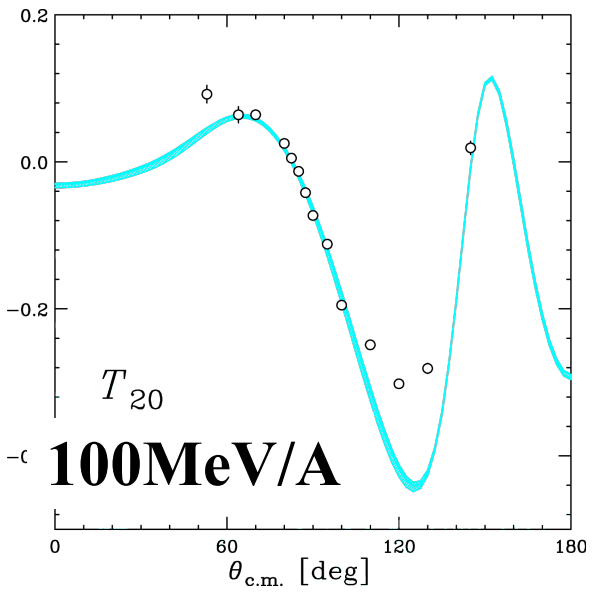
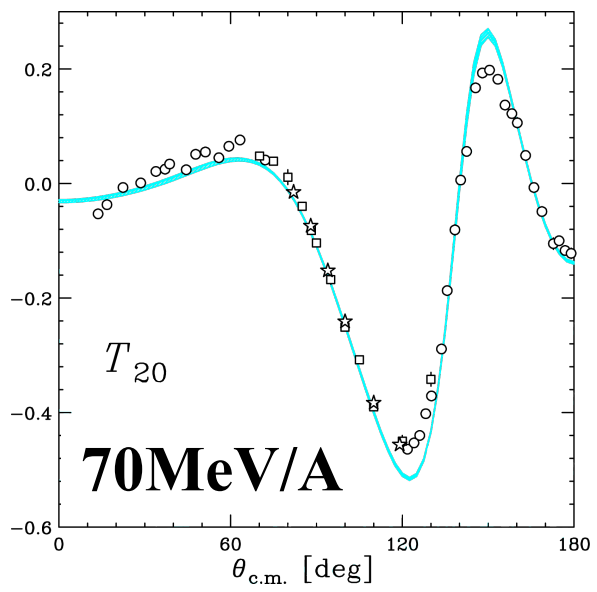
**NN+3NF calc. still underestimates  
the data at backward angles  
by 50 %.**

**Relativistic Effects :  
only visible at very backward angles**

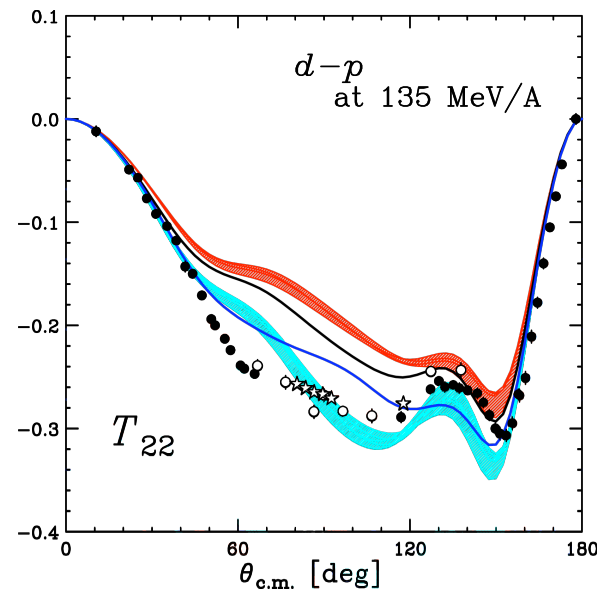
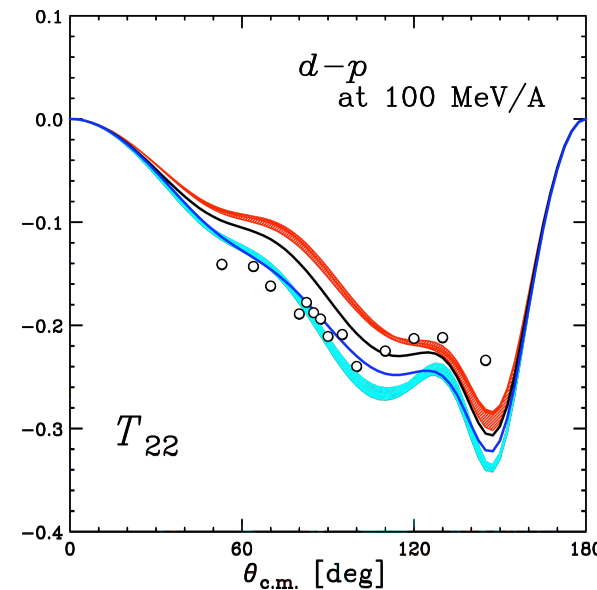
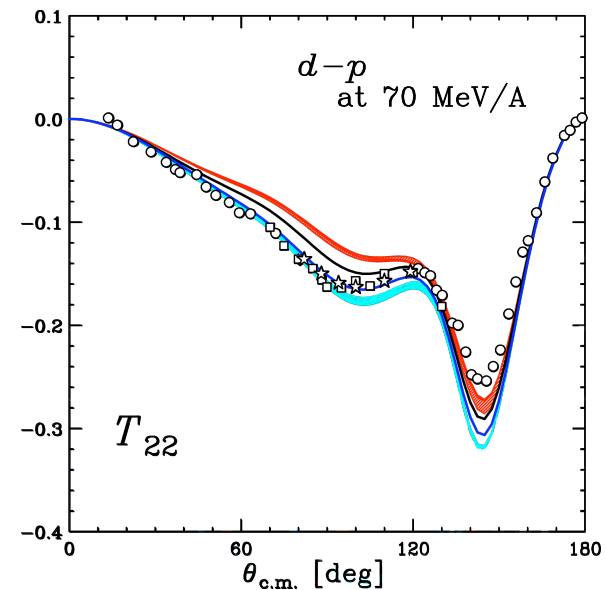
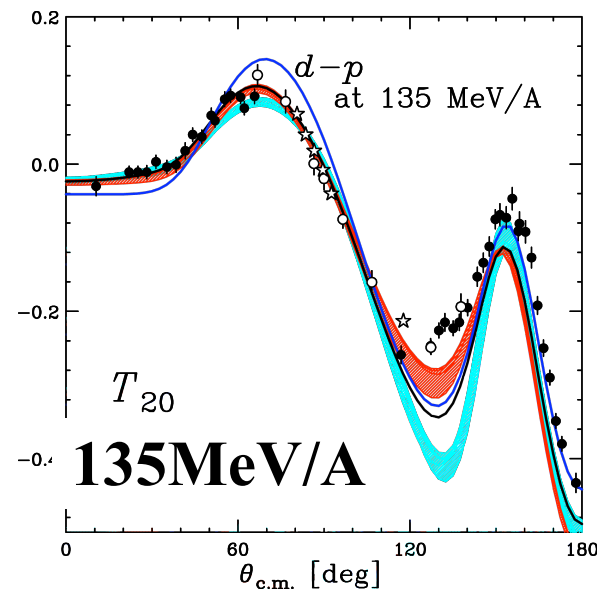
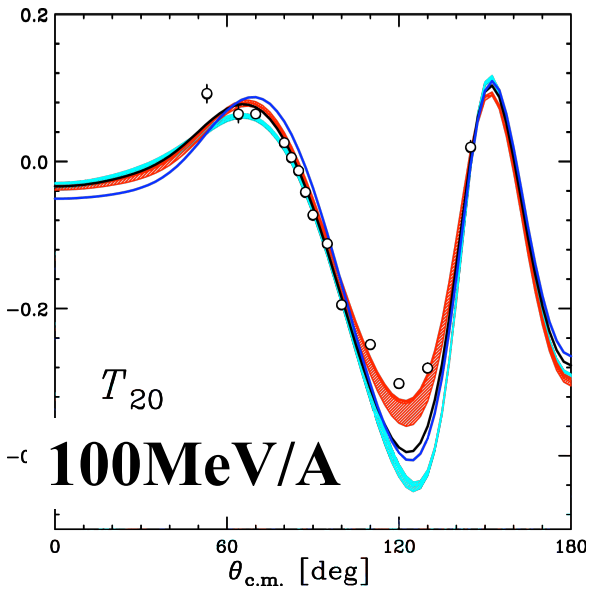
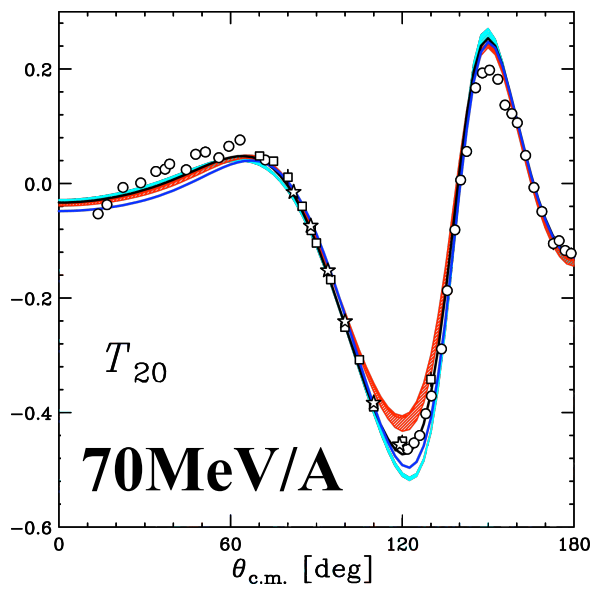
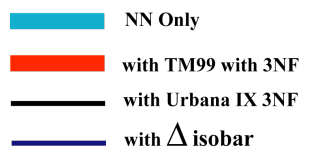
**New Challenge**

# Spin 観測量の現状

- █ NN Only
- █ with TM99 with 3NF
- █ with Urbana IX 3NF
- █ with  $\Delta$  isobar



# Spin 観測量の現状

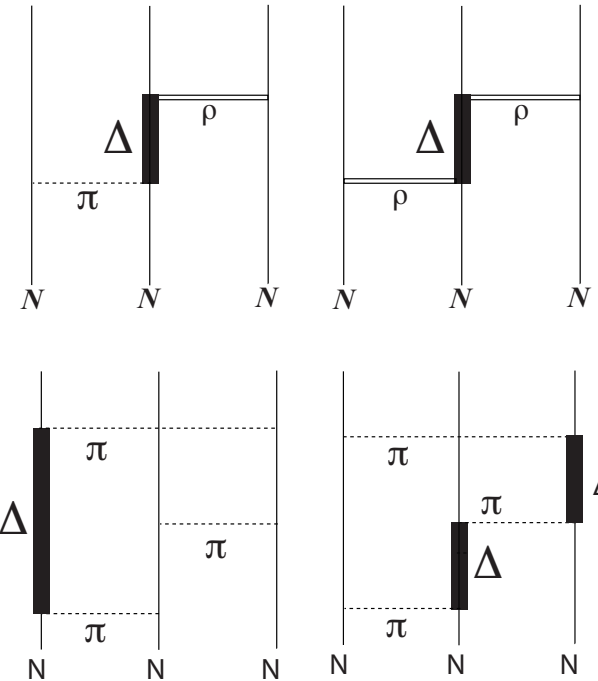


# What we are missing?

- Further ingredients of 3NF
  - ⊙  $\rho$ - $\rho$  and  $\pi$ - $\rho$  exchange 3NF
  - ⊙ many  $\Delta$ -contributions with  $\pi$ -rings
    - e.g.  $3\pi$ -rings with  $\Delta$ -isobar excitations (Illinois Model)
  - ⊙ etc...

- Treatment of Relativistic Effect

- New Nuclear Potential
  - ⊙ Chiral Effective Field Theory etc...







# 理研RIBFでの実験計画

## 偏極重陽子ビーム

AVF+RRC+SRC :  
170 - 440 MeV/A

2008 夏 ~

重陽子ビームライン建設

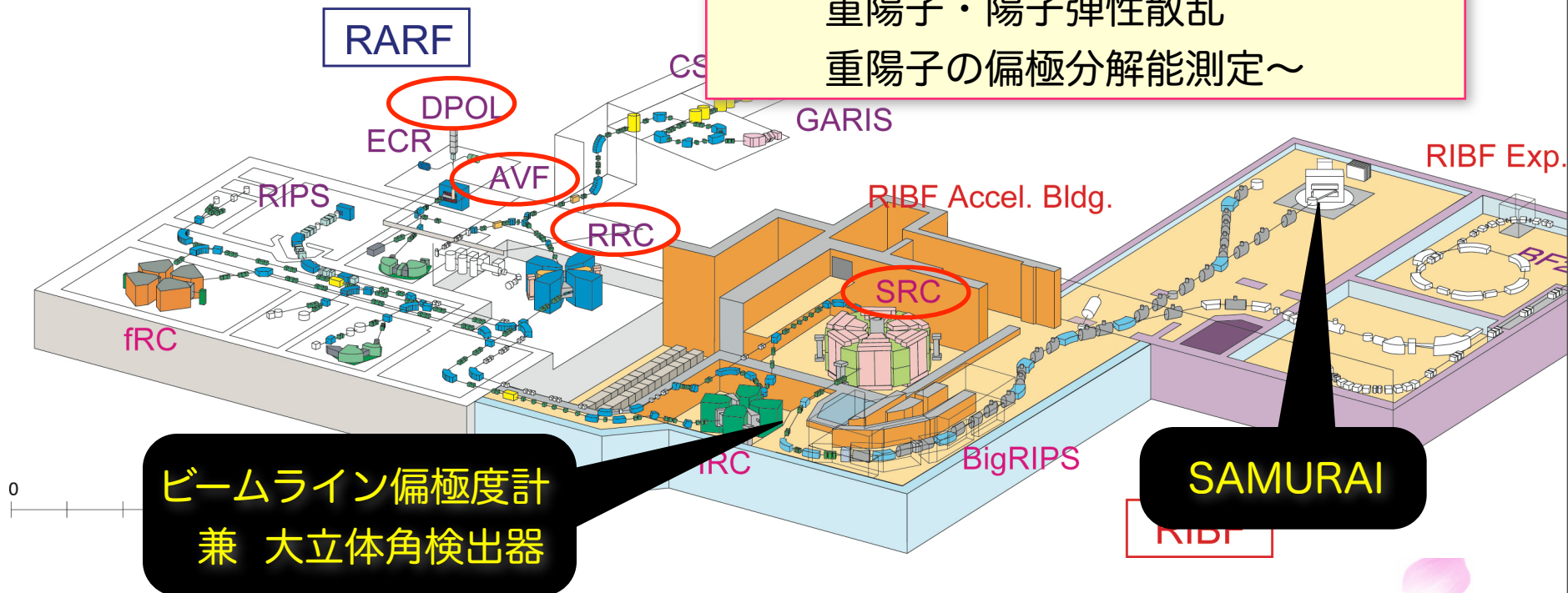
2009 春 ~

新施設での初の偏極重陽子ビーム実験

~ 250MeV/Aにおける

重陽子・陽子弾性散乱

重陽子の偏極分解能測定~



ビームライン偏極度計  
兼 大立体角検出器

SAMURAI

# RIBFにおける偏極重陽子加速に向けて



- IRC バイパスライン建設
  - c.f. 重イオン加速は、
    - LINAC+RRC+fRC+IRC+SRC (U, Xe)
    - LINAC+RRC+IRC+SRC (Ca etc...)
- ビームライン偏極度計建設／整備
- 重陽子用のビーム診断系整備
  - 加速器(RRC, SRC), BT系
  - BigRIPS F0 (二次ビーム生成標的設置箇所)





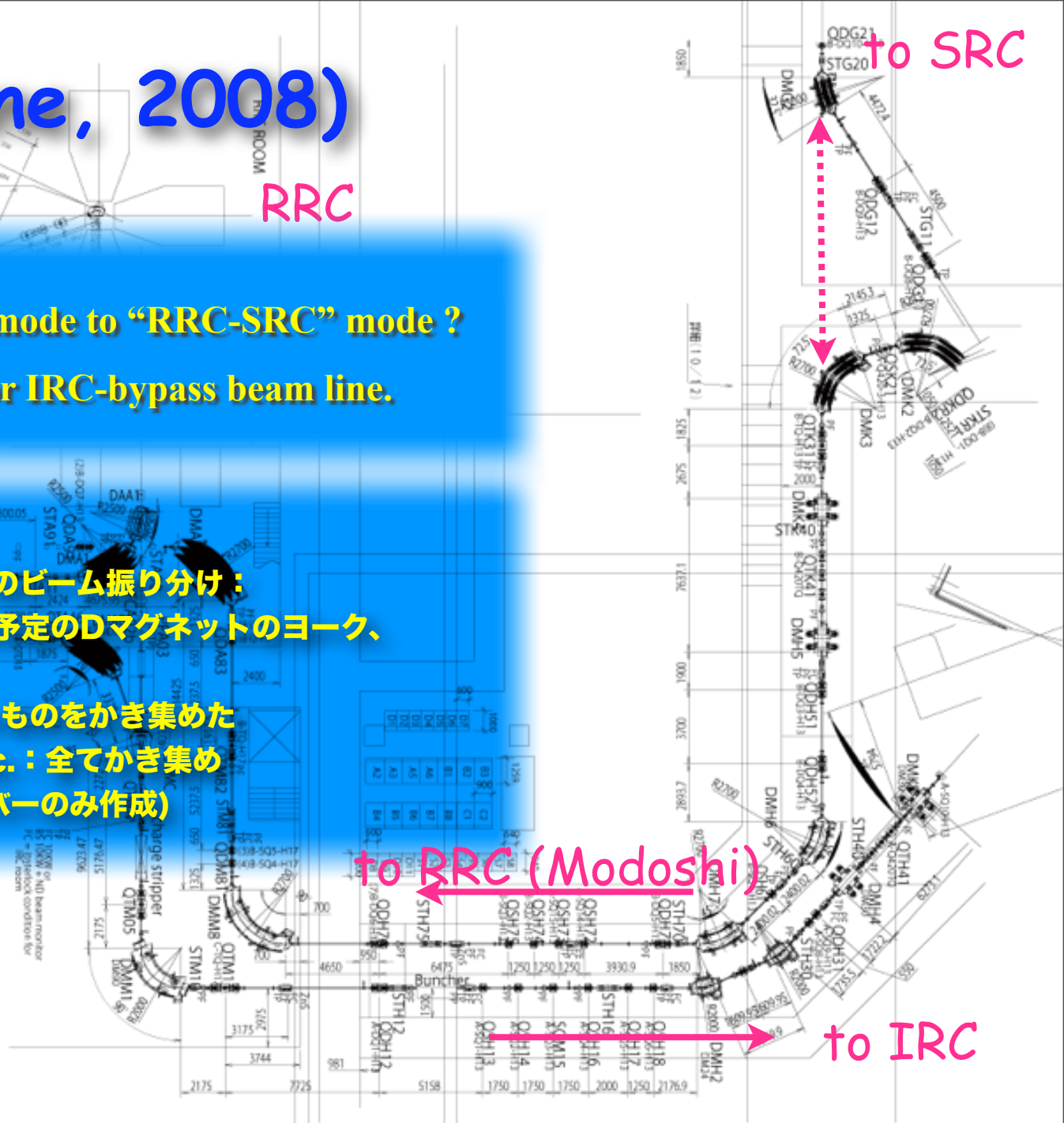
# RIBF (- June, 2008)

RRC

- How to switch from “RRC-IRC-SRC” mode to “RRC-SRC” mode ?
- No magnets/device for IRC-bypass beam line.

対処:

- IRC とバイパスラインのビーム振り分け:  
戻しビームライン使用予定のDマグネットのヨーク、  
チャンバーを加工。
- Q磁石: 当面使用しないものをかき集めた
- チェンバー、ポンプ etc.: 全てかき集め  
(診断系の一部のチャンバーのみ作成)



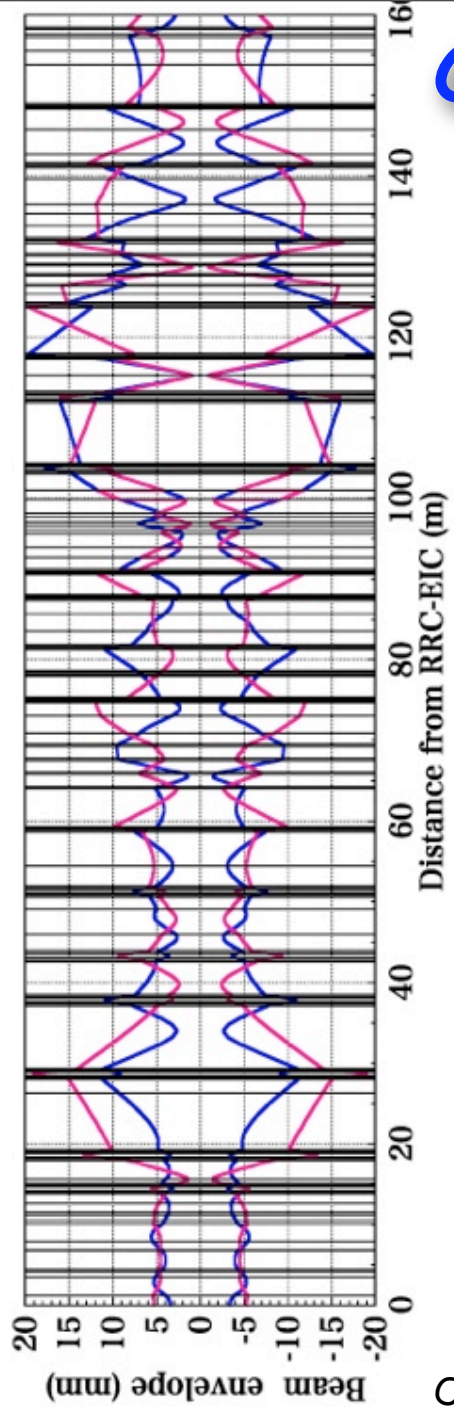
to SRC

to RRC (Modoshi)

to IRC

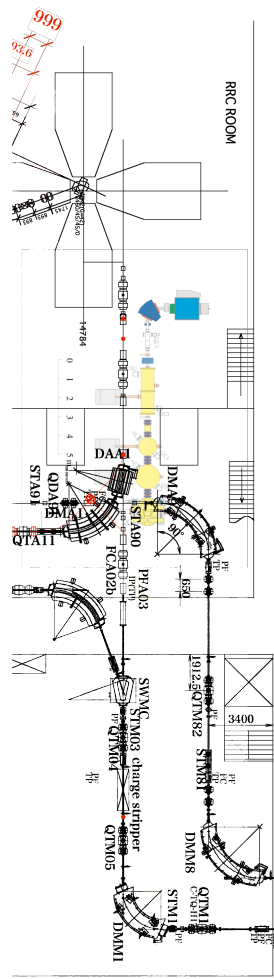


# Construction of IRC by-pass Line Jul. '08 to Nov. '08

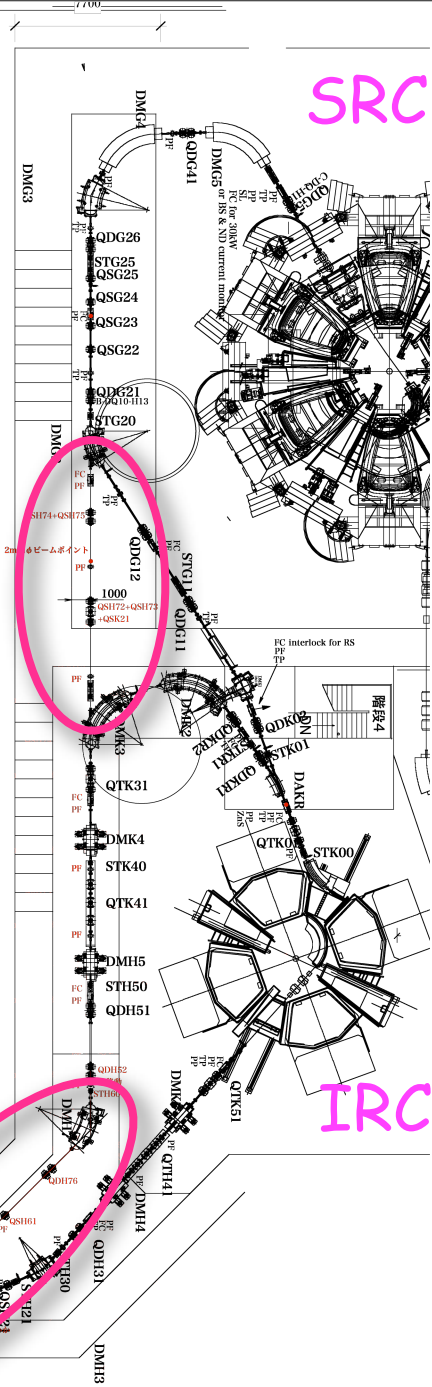


Optics : Calculated by Fukunishi

RRC

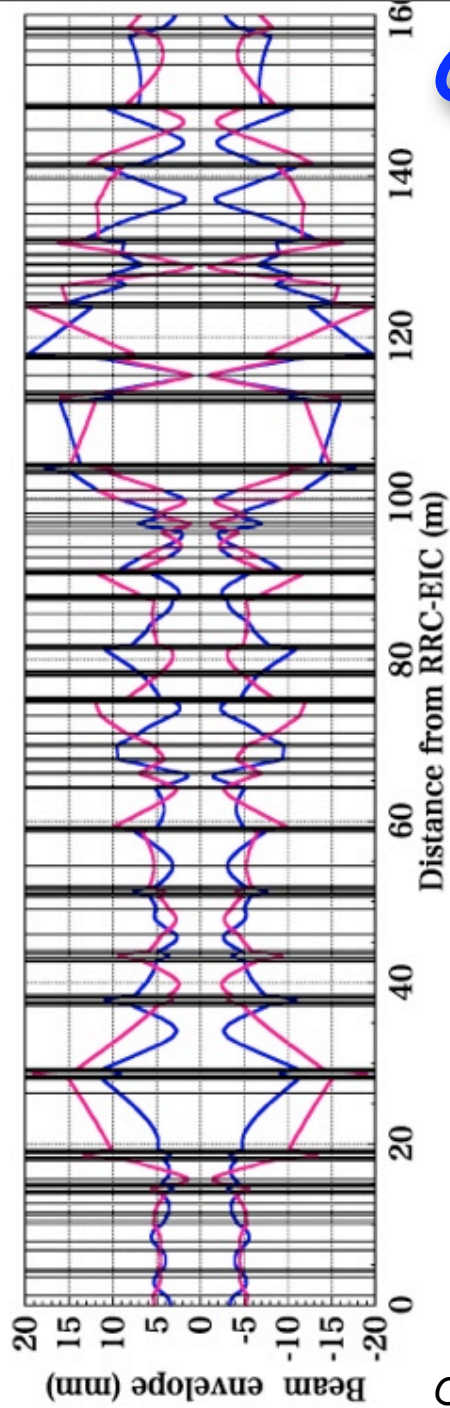


SRC

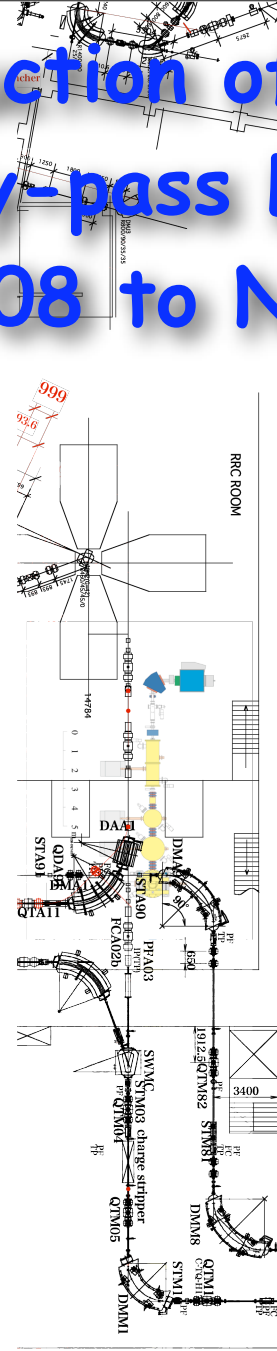


IRC

# Construction of IRC by-pass Line Jul.'08 to Nov.'08

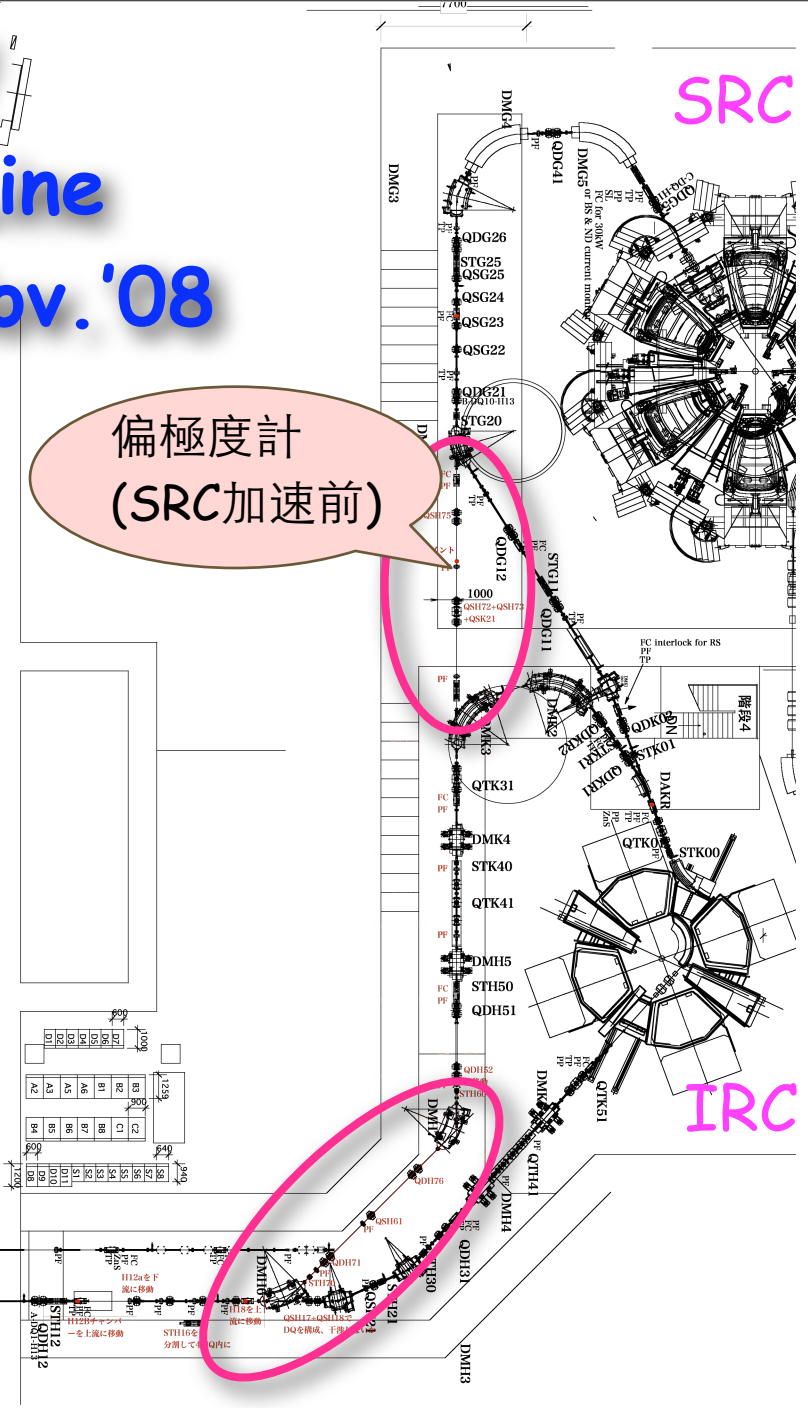


RRC



偏極度計  
(SRC加速前)

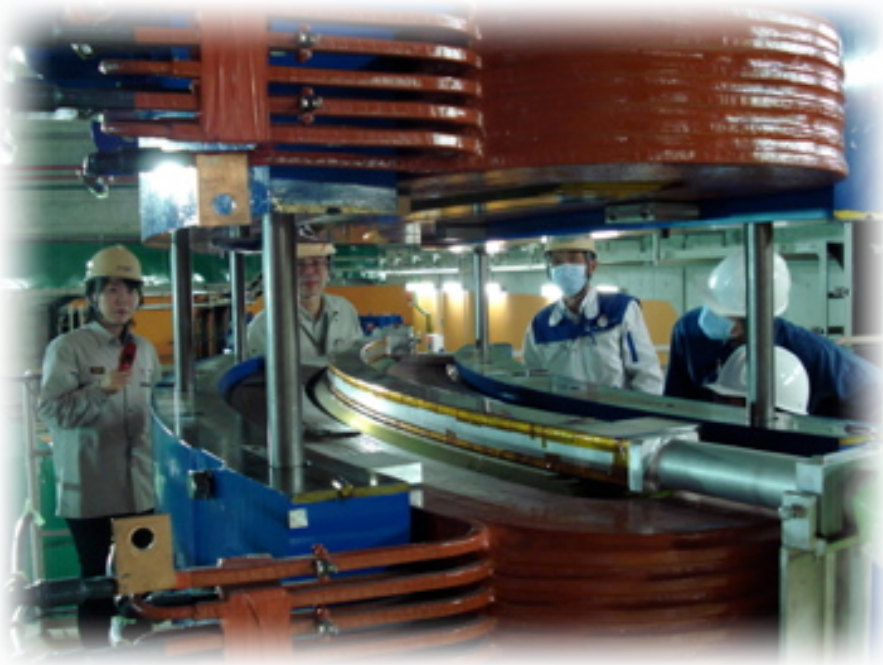
SRC



IRC

Optics : Calculated by Fukunishi





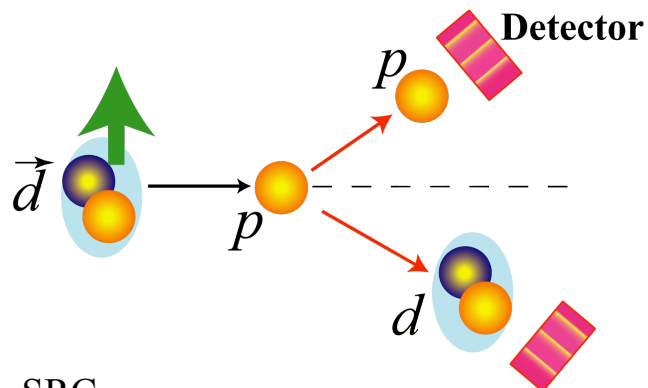




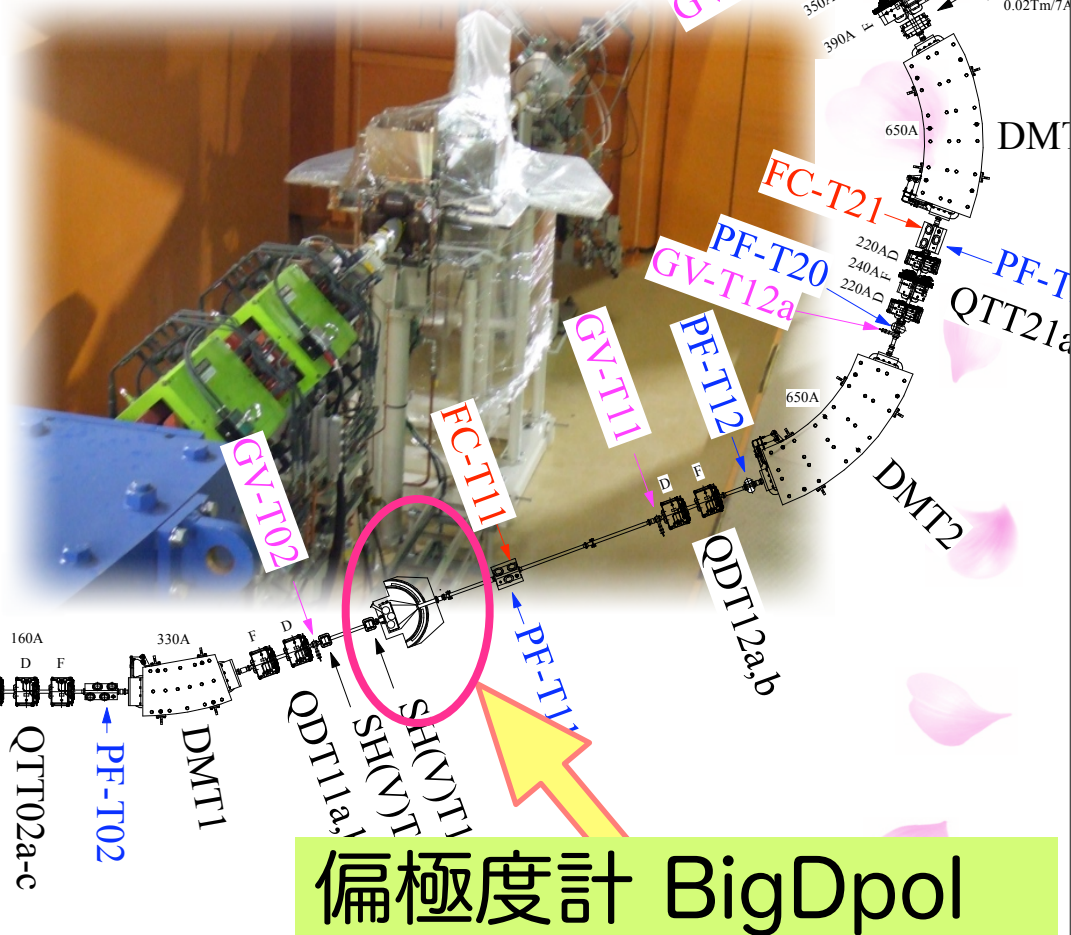
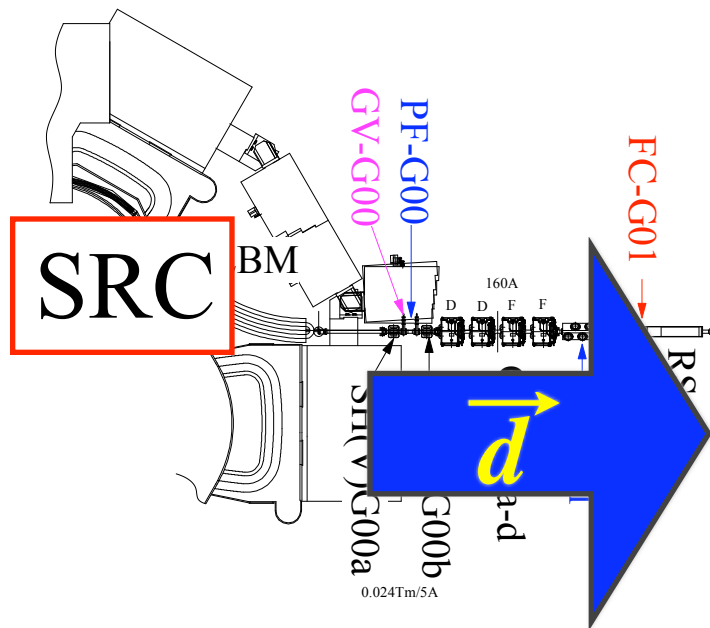
# $dp$ 弾性散乱@ビームライン偏極度計

-  $\theta_{lab.} = 10^\circ \sim 70^\circ$ ,  $\theta_{c.m.} = 40^\circ \sim 160^\circ$

ファラデーカップ  
@BigRIPS F0



SRC



偏極度計 BigDpol

# 今後の予定

- 年明け(1月～3月)
  - 偏極重陽子ビーム実験用の診断系取付け
    - BigRIPS F0のファラデーカップ含む
  - AVF-RRC-SRC のビームラインでのビーム加速テスト
- 来年の春(4,5月)
  - 偏極重陽子ビーム実験
    - $dp$  弾性散乱@250 MeV/A