

少数核子系からさぐる

古くて新しい核力

～ ③ 体核力 ～

物理学系 関口仁子



自己紹介

大学院1年生



理研 (2002-2010)



東北大 (2010-2022)



研究のテーマ

原子核物理学

20世紀初頭に生まれた”古くて新しい物理学”

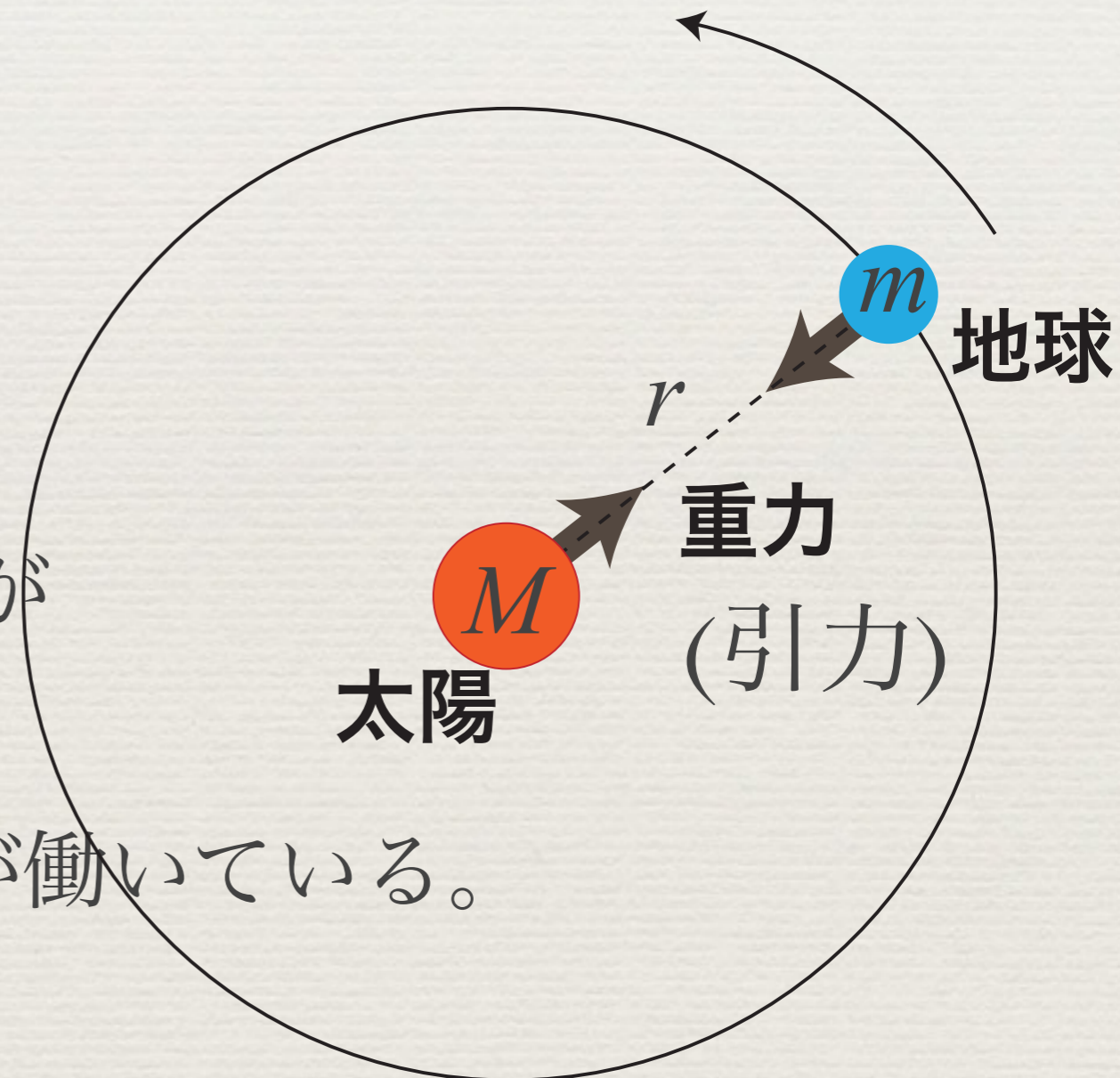
原子核の中で働く **力** が研究のテーマ

重 力 (万有引力)



$$\text{力 } F = G \frac{mM}{r^2}$$

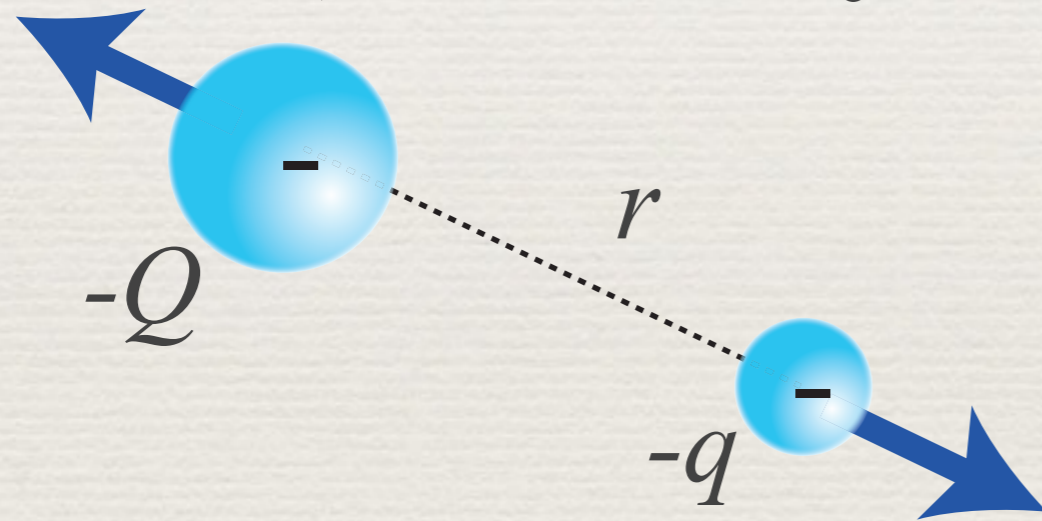
- 太陽系：
 - 中心には太陽が存在し、太陽の周囲を地球などの惑星が公転している。
 - 太陽と地球の間には、重力が働いている。



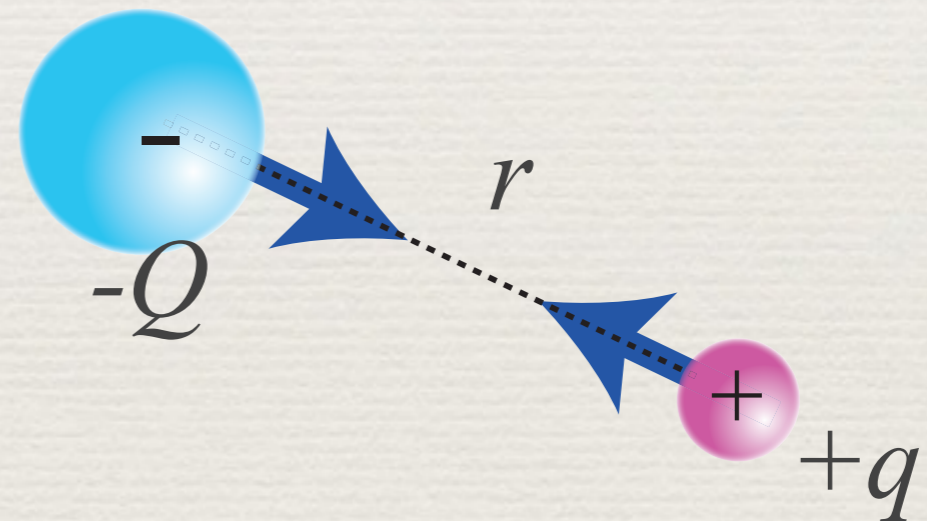
電気力

$$力 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qQ}{r^2}$$

- ◆ 電荷を持った物体の間では、反発または引き合う力が働く。



同じ符号の電荷の物体は
反発(斥力)



符号の異なる電荷をもった
物体は引き合う(引力)

ミクロの世界の力

原子

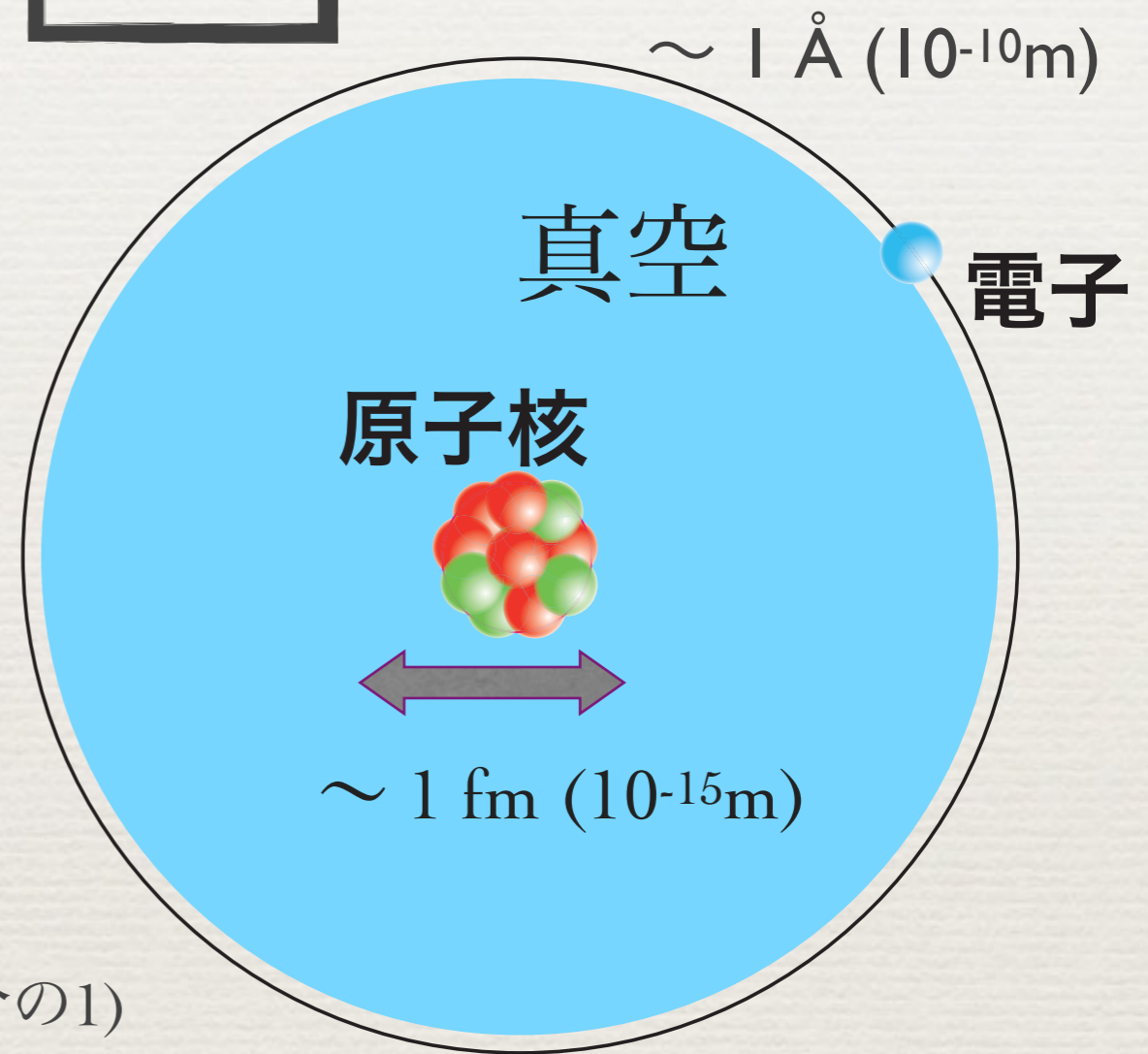
- ミクロの世界の太陽系
 - 構成：電子と原子核
 - 中心に原子核
- サイズ：1 Å (10⁻¹⁰m)

原子核

- サイズ：10⁻¹⁵ m
 - 原子に比べてはるかに小さい(10万分の1)
- 原子の重さの99%を占める

非常に狭い空間に陽子(+)と中性子(電荷無し)が密集している

微小空間に陽子(+)や中性子(電荷なし)を閉じ込める力力の起源は？

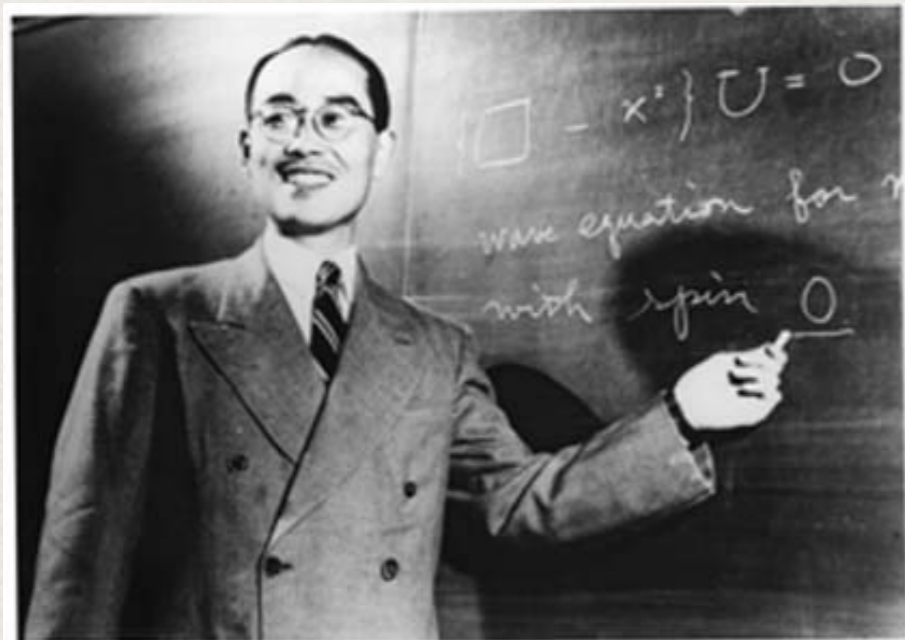


原子核の力

- 原子核を形作る力を「核力」と呼ぶ。

1935年 湯川の中間子交換理論

PROC. PHYS. MATH. SOC. JPN 17, 48 (1935)



Scanned at the American Institute of Physics

京都大基礎物理学研究所・湯川記念館史料

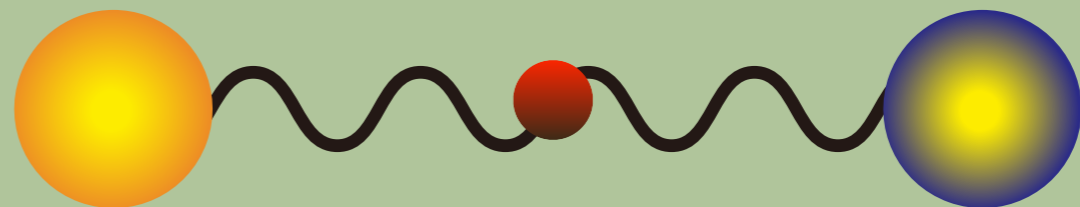
核力は陽子と中性子の間に

中間子(パイ中間子)という仮想的な粒子を交換する事によって生じる

二体核力(二体力)

陽子

中性子



原子核の力

- 原子核を形作る力を「核力」と呼ぶ。

1935年 湯川の中間子交換理論

PROC. PHYS. MATH. SOC. JPN 17, 48 (1935)



Scanned at the American Institute of Physics

京都大基礎物理学研究所・湯川記念館史料

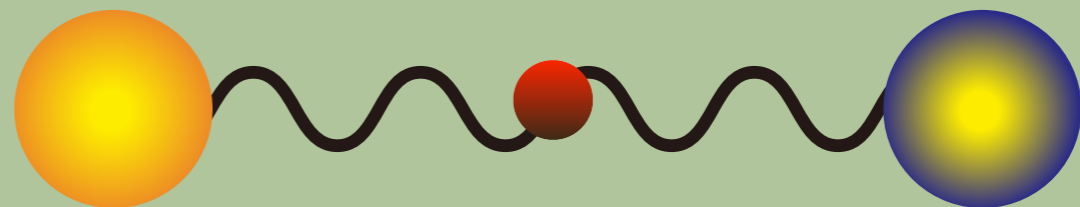
この理論のすごいところ！

- ☑ 粒子の交換によって力を説明する
→場の理論の基盤
- ☑ 強い力(到達距離が短い力)の起源
- ☑ 量子力学の適用

粒子

陽子

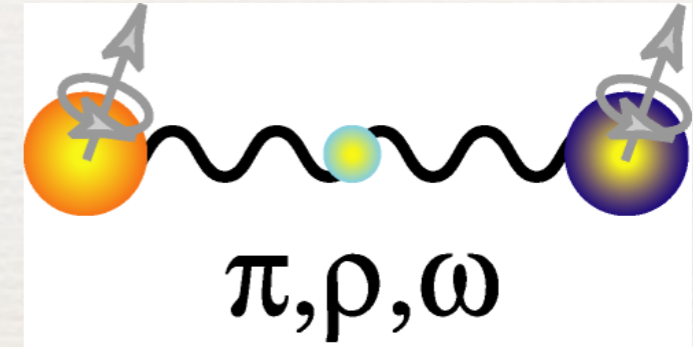
中性子



原子核の **力** ～ 20世紀の物理学 ～

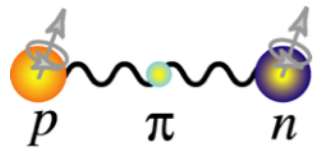
1935年 湯川の中間子交換理論

Proc. Phys. Math. Soc. Jpn 17, 48 (1935)

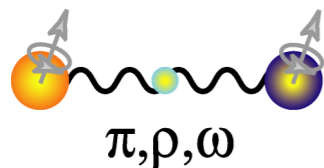


その後

理論



π 中間子交換に基づく核力理論



ρ, ω 中間子など π 中間子より重い中間子を考慮した核力理論

実験

陽子-陽子散乱、陽子-中性子散乱

実験データの蓄積

(散乱微分断面積、スピン観測量)

1990年代 核力研究の転機

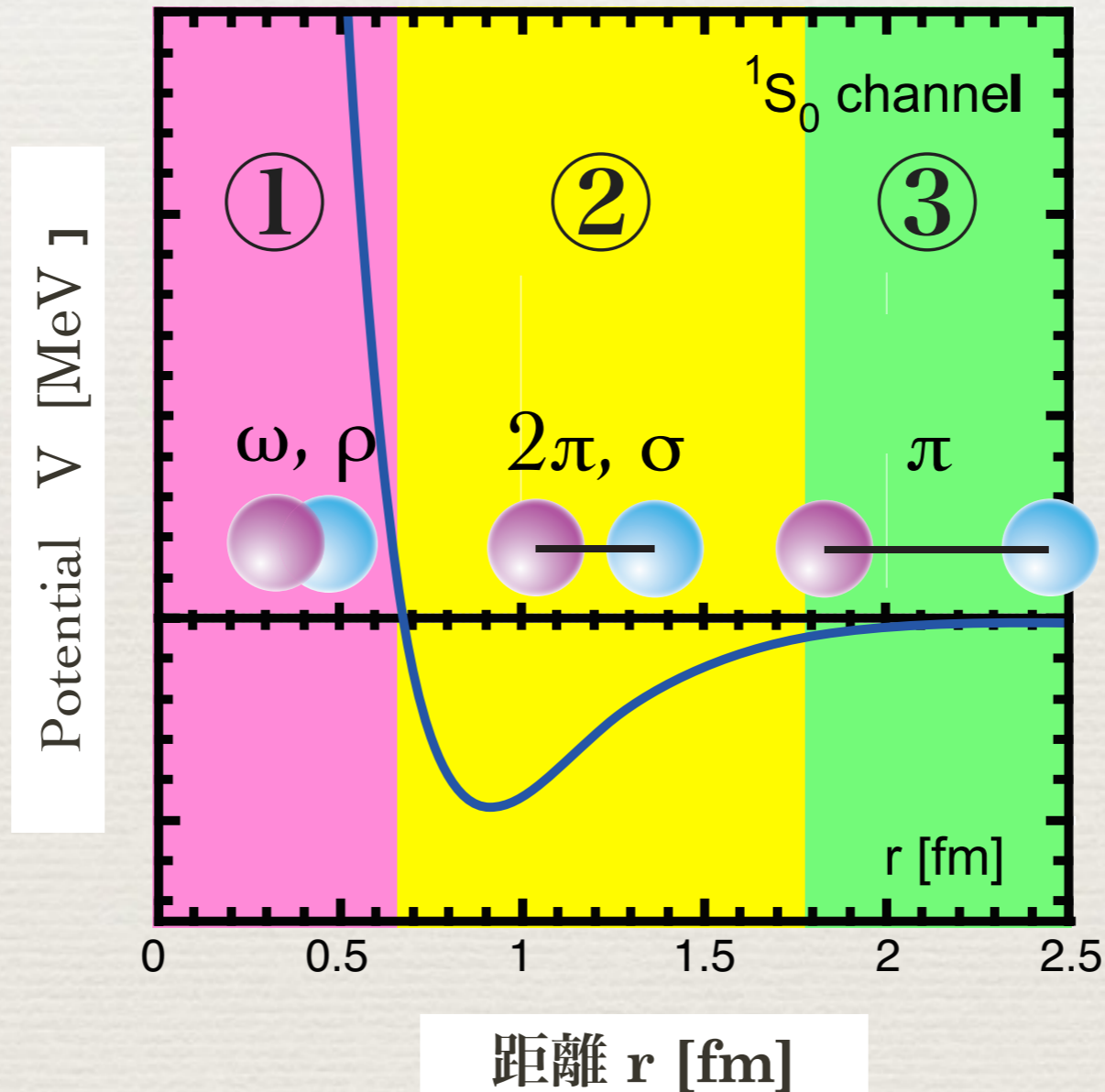
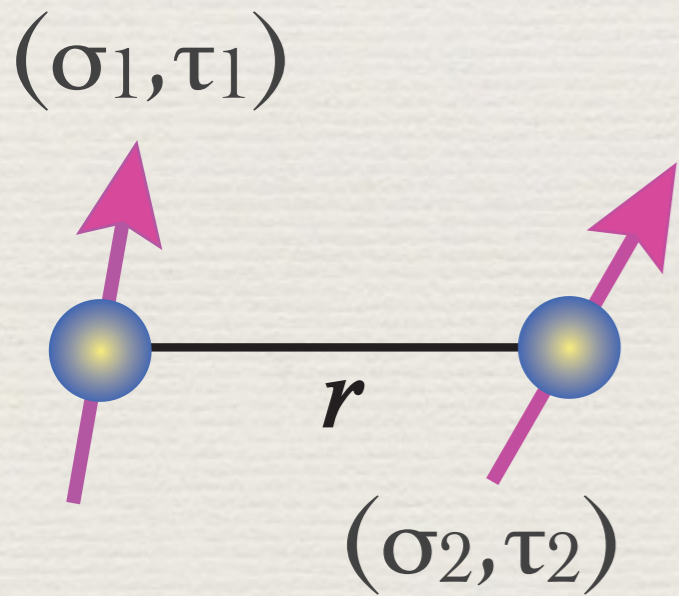
4000以上の陽子-陽子散乱、陽子-中性子散乱データを再現する二体力(二核核力)の確立

原子核の 力 - 2-Nucleon Force -

①. Repulsive
-Short Range-

②. Attractive (strong)
-Intermediate Range-

③. Attractive (weak)
- Long Range -

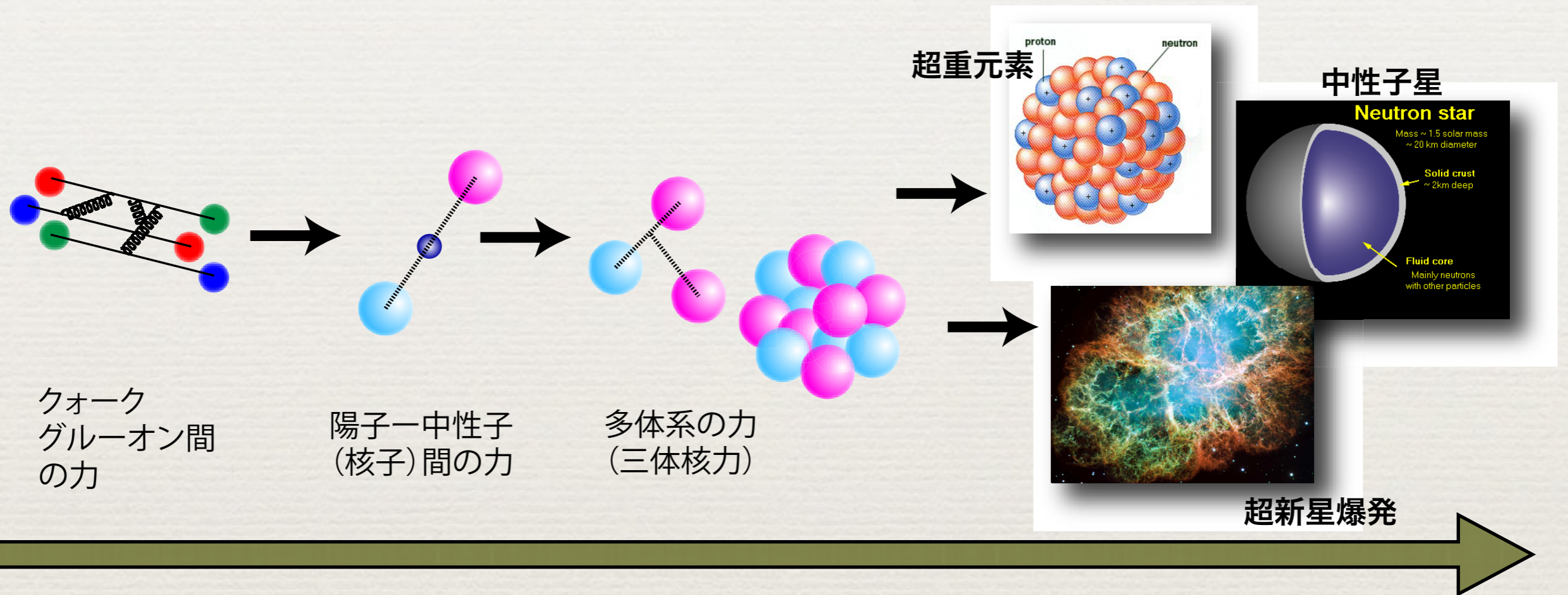


σ : Nucleon Spin

τ : Iso-spin
(p (uud) or n (ddu)?)

$$= V_0(r) + V_\sigma(r) \sigma_1 \cdot \sigma_2 + V_\tau(r) \tau_1 \cdot \tau_2 + V_{\sigma\tau}(r) (\sigma_1 \cdot \sigma_2) (\tau_1 \cdot \tau_2) + V_T S_{12} + V_{T\tau} S_{12} \tau_1 \cdot \tau_2 + V_{LS} L \cdot S + V_{LS\tau} (L \cdot S) (\tau_1 \cdot \tau_2) + \dots$$

原子核の **力** ～ 21世紀の物理学 ～



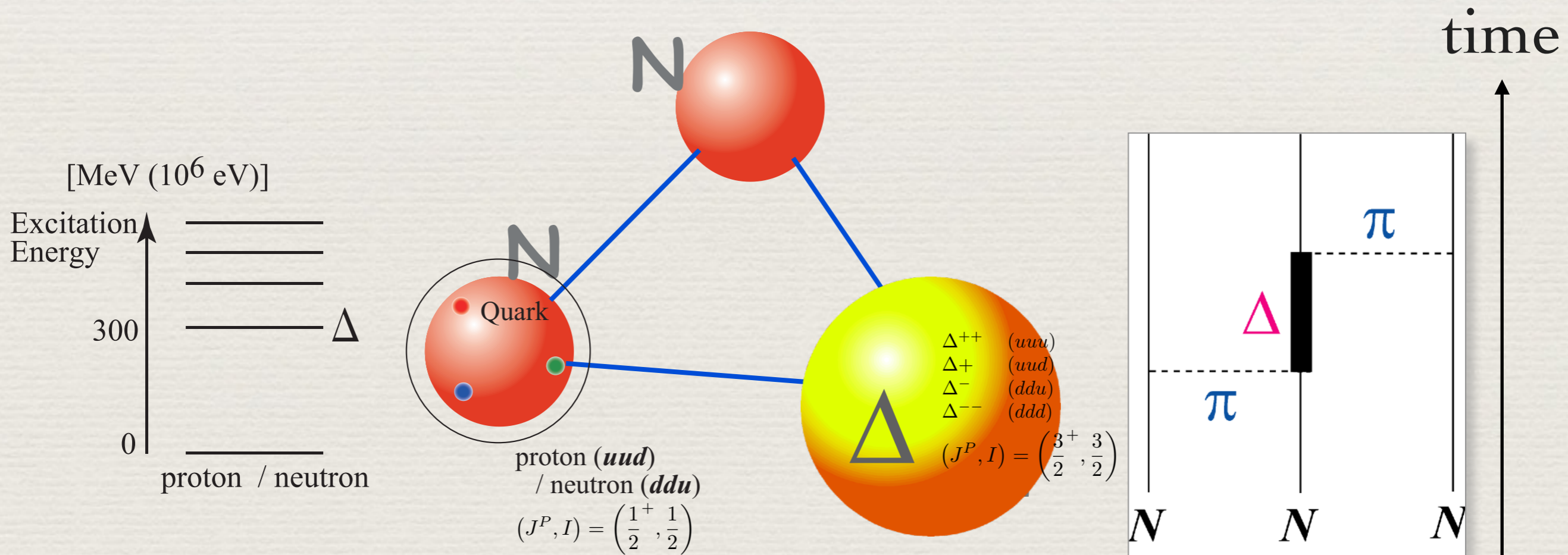
クォークから宇宙の成り立ちまでを理解する

クォーク(素粒子)から核力がどの様に形成されるのかを理解する

三体核力 を含む核力から原子核や星を第一原理的に理解する

③ 体核力(三体力)とは

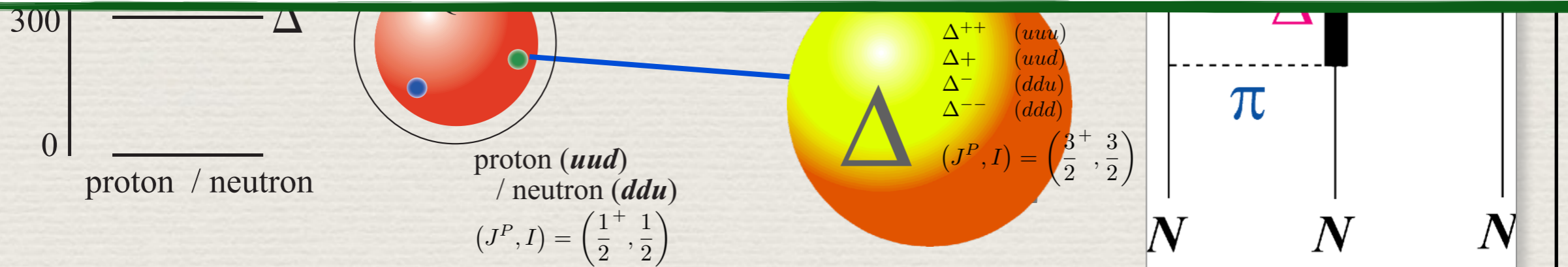
- 三つの核子が同時に相互作用する力は二体力の和で表す事は出来ない。その様な力を三体核力 (三体力) と呼ぶ。
- 1957年に藤田純一・宮沢弘成が 2π 中間子交換型の三体核力を予言。



③ 体核力(三体力)とは

- 三つの核子が同時に相互作用する力は二体力の和で表す事は出来ない。その様な力を三体核力 (三体力) と呼ぶ。
- 1957年に藤田純一・宮沢弘成が 2π 中間子交換型の三体核力を予言。

- 三体核力は、核子(ハドロン)が基本粒子ではなく、内部構造をもつ複合粒子であるため、必然的に発生する。
(3-point particle の三体核力は、別途要議論)
- 二体力の”おつり”の力ではない。



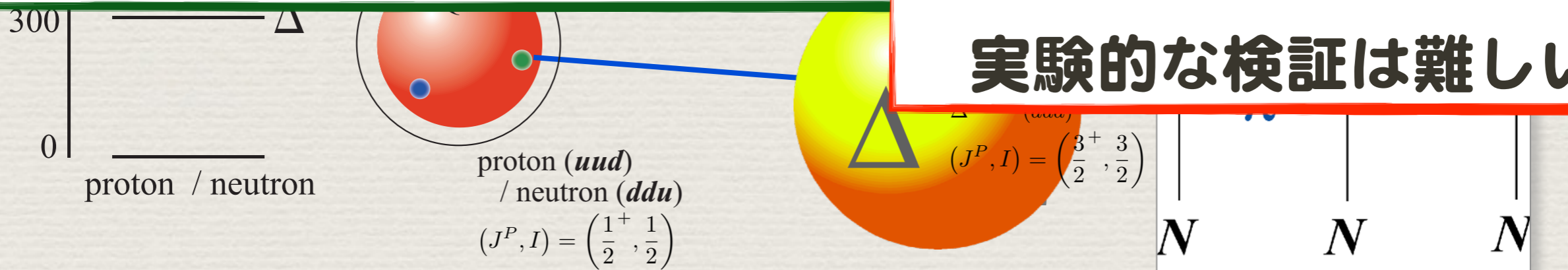
③ 体核力(三体力)とは

- 三つの核子が同時に相互作用する力は二体力の和で表す事は出来ない。その様な力を三体核力 (三体力) と呼ぶ。
- 1957年に藤田純一・宮沢弘成が 2π 中間子交換型の三体核力を予言。

➤ 三体核力は、核子(ハドロン)が基本粒子ではなく、内部構造をもつ複合粒子であるため、必然的に発生する。
(3-point particle の三体核力は、別途要議論)

➤ 二体力の”おつり”の力ではない。

**三体核力の
実験的な検証は難しい**



三体核力へのアプローチ

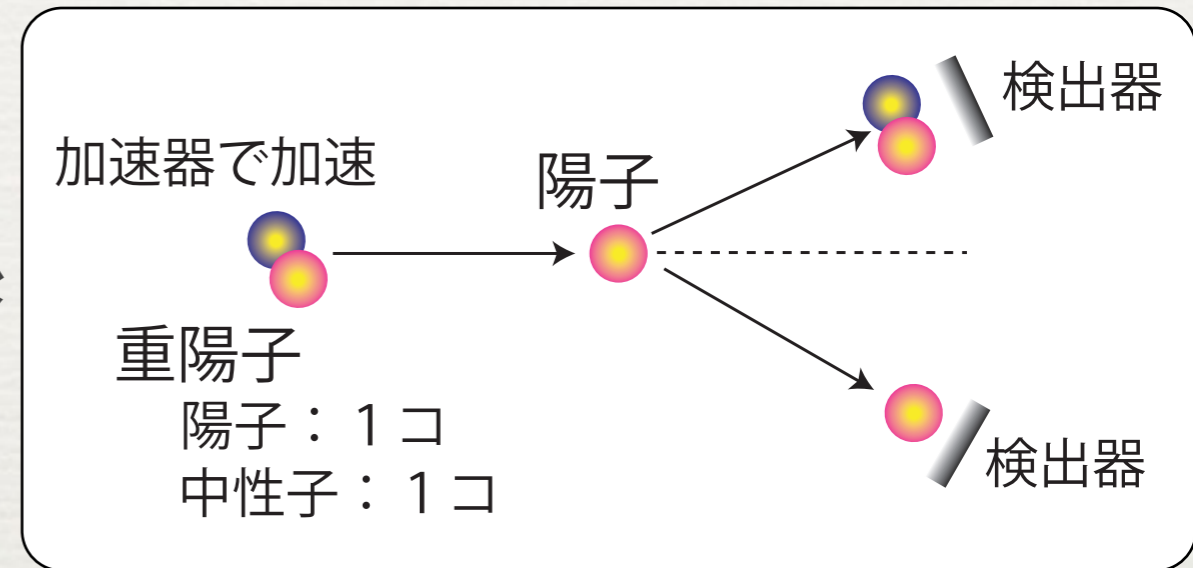
◆ ③つの条件

1. 三体問題を解く
2. 二体力が解っている
3. 理論を検証するための実験

三核子系

③ 3つの核子からなる原子核の系

- 三重水素, ヘリウム3
- 重陽子と陽子の散乱



方法

1. 三体問題を解く **ファデーエフ方程式**
2. 二体力が解っている **確立**
3. 理論を検証するための実験 **これからお話する我々の実験**

③ 三体問題を解く

量子三体問題は解ける！

量子力学での三体問題

- ハイゼンベルグの不確定性原理

$$\Delta p \Delta x \sim \hbar = h/2\pi \quad : \text{自由度が減る}$$

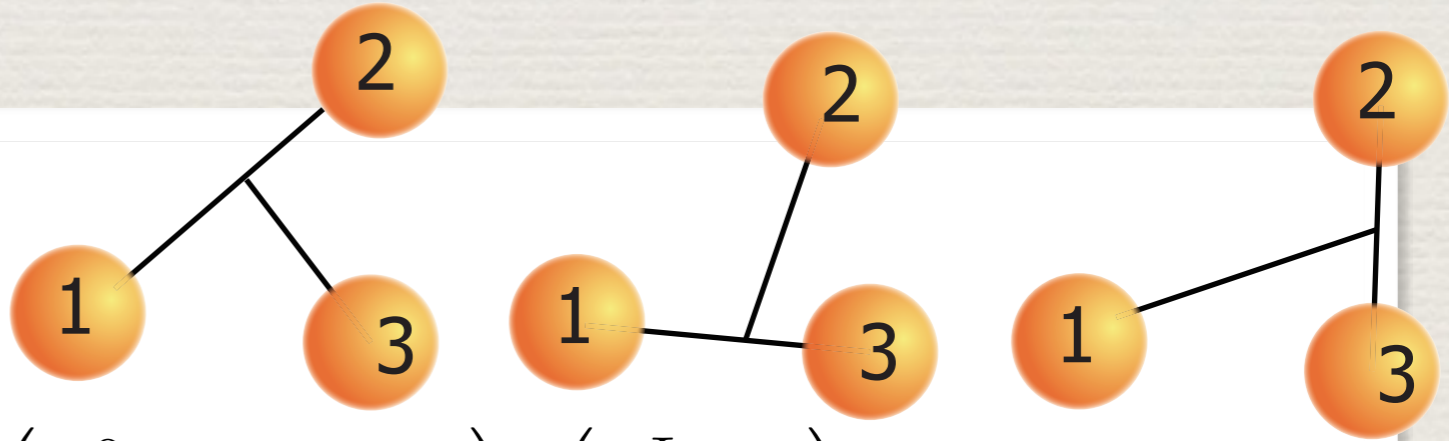
- ファデーエフ方程式

量子三体系を解く方程式 (L.D. ファデーエフ 1961年)

$$H = H_0 + V_{12}^{NN} + V_{23}^{NN} + V_{31}^{NN}$$

$$\Psi = \Psi_{23,1} + \Psi_{31,2} + \Psi_{12,3}$$

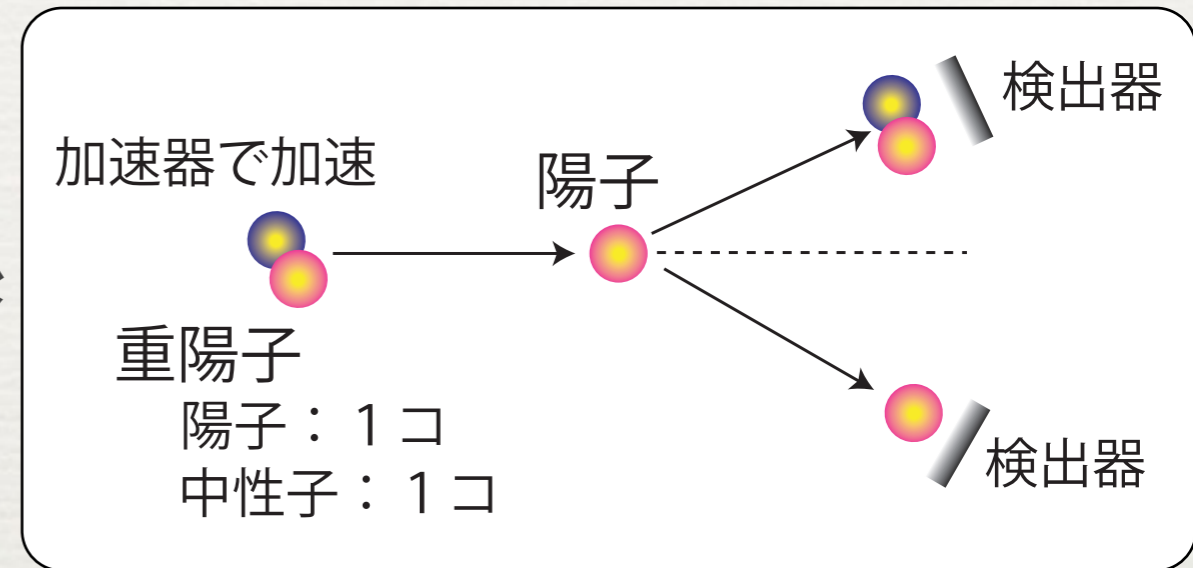
$$\begin{pmatrix} \Psi_{23,1} \\ \Psi_{31,2} \\ \Psi_{12,3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \phi_{23,1} \\ \phi_{31,2} \\ \phi_{12,3} \end{pmatrix} + G_0 \begin{pmatrix} 0 & t_{23} & t_{23} \\ t_{31} & 0 & t_{31} \\ t_{12} & t_{12} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Psi_{23,1} \\ \Psi_{31,2} \\ \Psi_{12,3} \end{pmatrix}$$



三核子系

③ 3つの核子からなる原子核の系

- 三重水素, ヘリウム3
- 重陽子と陽子の散乱



方法

1. 三体問題を解く **ファデーエフ方程式** **コンピューターの高速度化**
2. 二体力が解っている **確立**
3. 理論を検証するための実験 **これからお話しする我々の実験**

③ 重水素 (${}^3\text{H}$) の束縛エネルギー

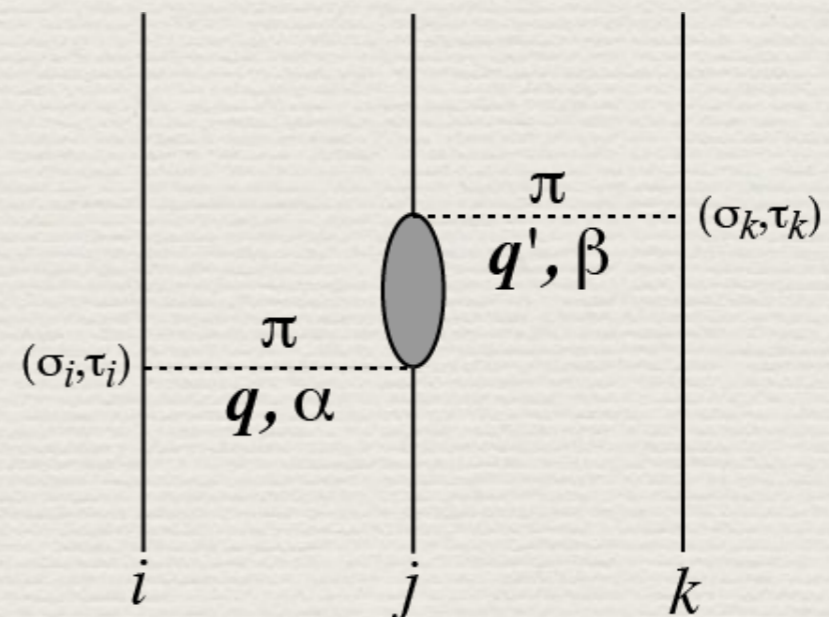
Triton (${}^3\text{H}$)

- $A=3$ ($Z=1, N=2$) の三核子束縛系
- 束縛エネルギー：8.481821(4) MeV
- 現実的な核力(二体核力)では、
実験値と約 0.5 ~ 1 MeV の差。
- 三体核力を考慮することで、実験値が説明された。
- ただし、cut-off Λ は実験値を再現する様に決められている。

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

Potential	2NF E_B [MeV] (w/o 3NF)	2NF+3NF E_B [MeV] (with 3NF)	Λ/m_π
CDBonn	7.953	8.483	4.856
AV18	7.576	8.479	5.215
Nijm I	7.731	8.480	5.147
Nijm II	7.709	8.477	4.990
Nijm 93	7.664	8.480	5.207
Exp.	8.481821(4) [MeV]		

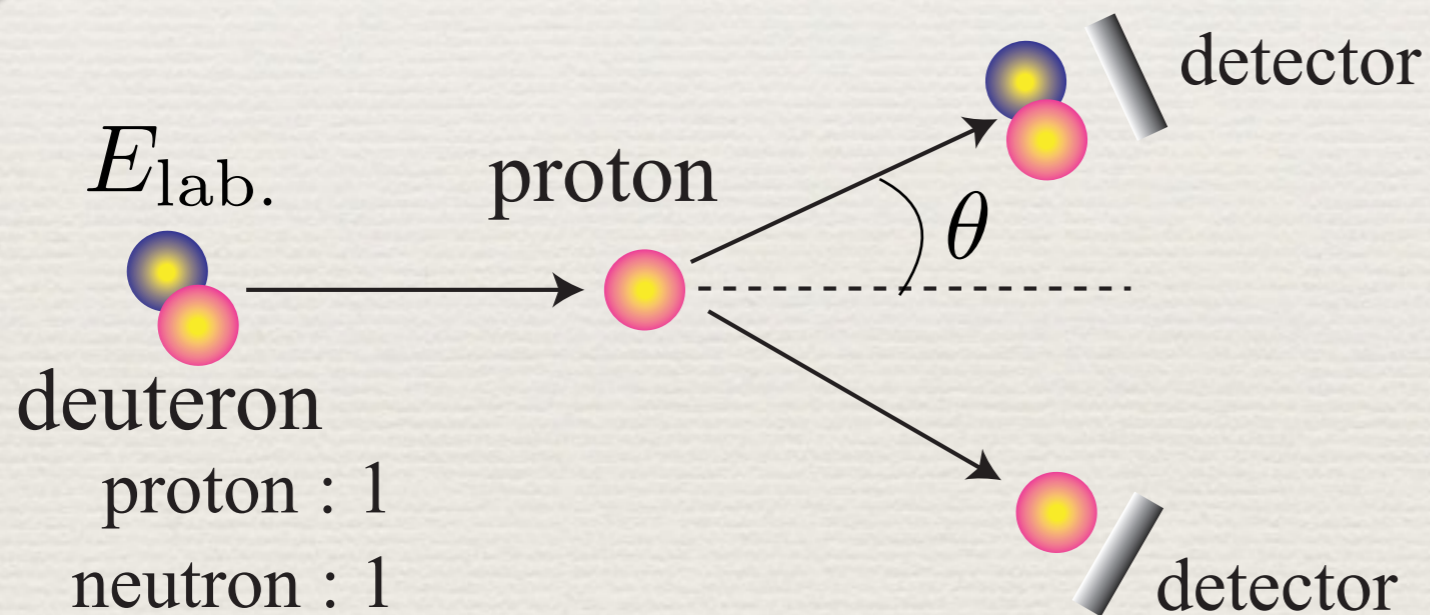
A. Nogga *et al.*, Phys. Rev. C **65**, 054003 (2002).



三三 核子系散乱

a good probe to study the dynamical aspects of 3NFs.

- ✓ Momentum dependence (R-dependence)
- ✓ Spin-dependence

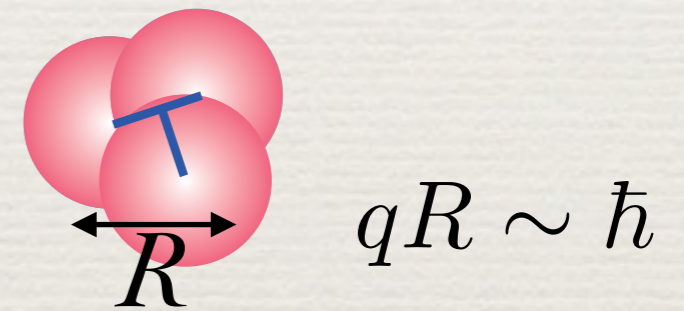


$$\frac{d\sigma}{d\Omega}(\theta) \propto \left| \int \exp(-\mathbf{q} \cdot \mathbf{r}') V(r) d\mathbf{r}' \right|^2$$

Nuclear Potential

微分断面積の角度分布

核力ポテンシャルのフーリエ変換の二乗



$$R \lesssim 1 \text{ fm}$$

$$q \gtrsim 200 \text{ MeV}/c$$

$$E_{\text{lab.}} \gtrsim 100 \text{ MeV}/A$$

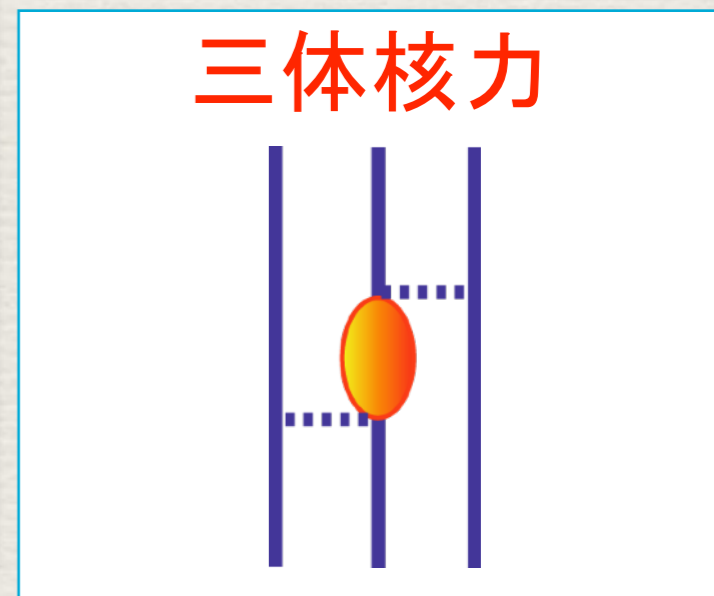
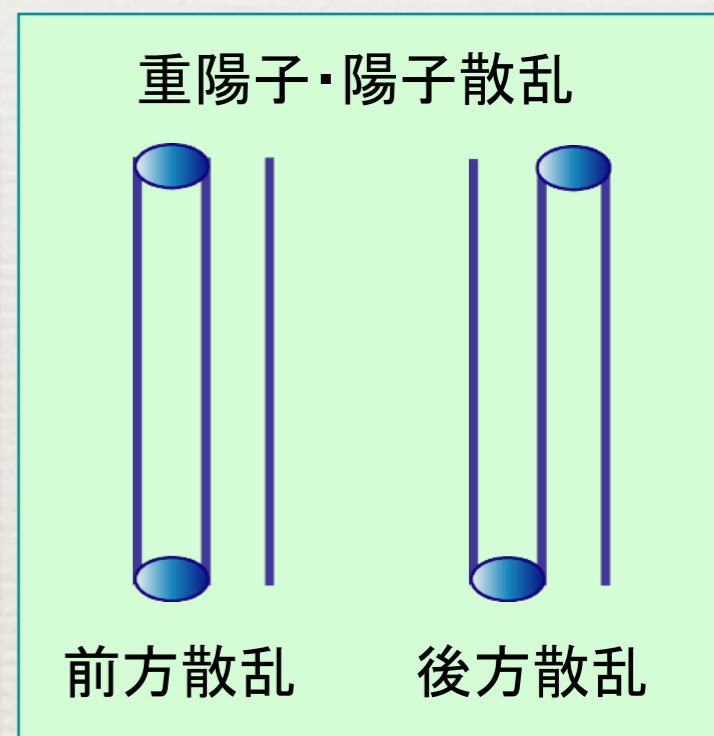
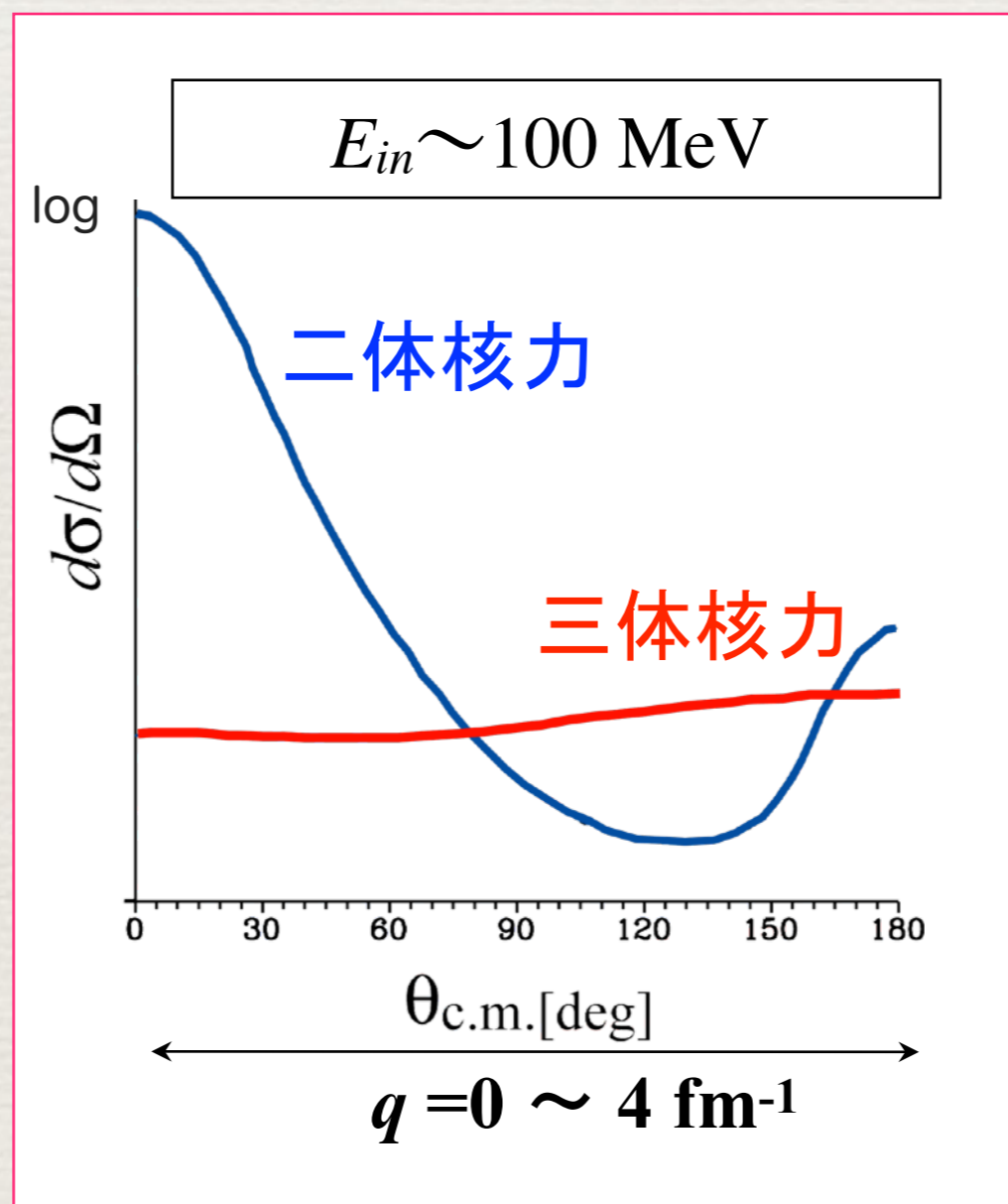
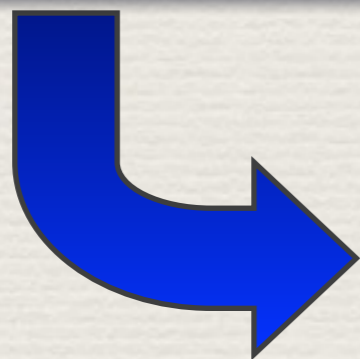
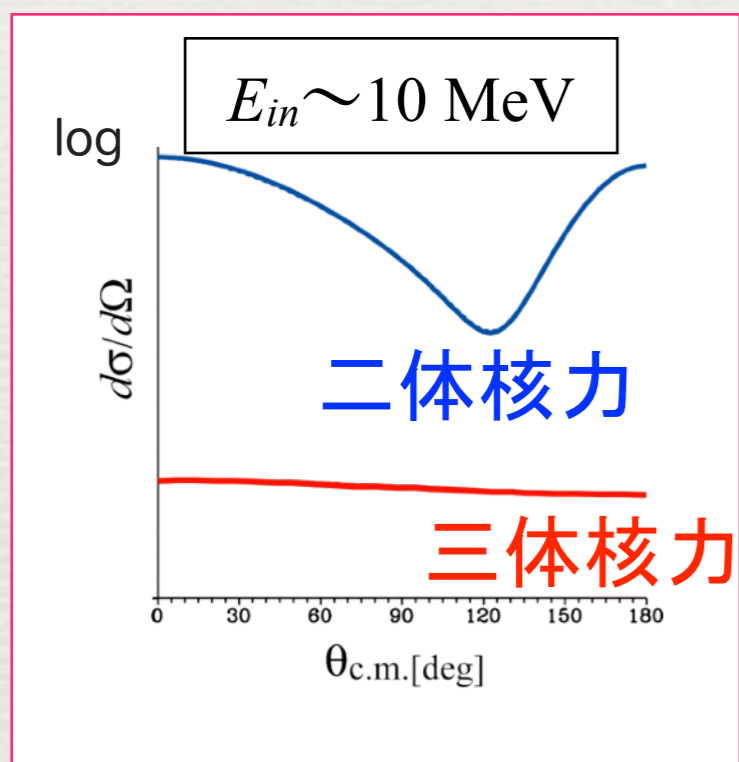
R の調整 :

入射エネルギー / 角度分布

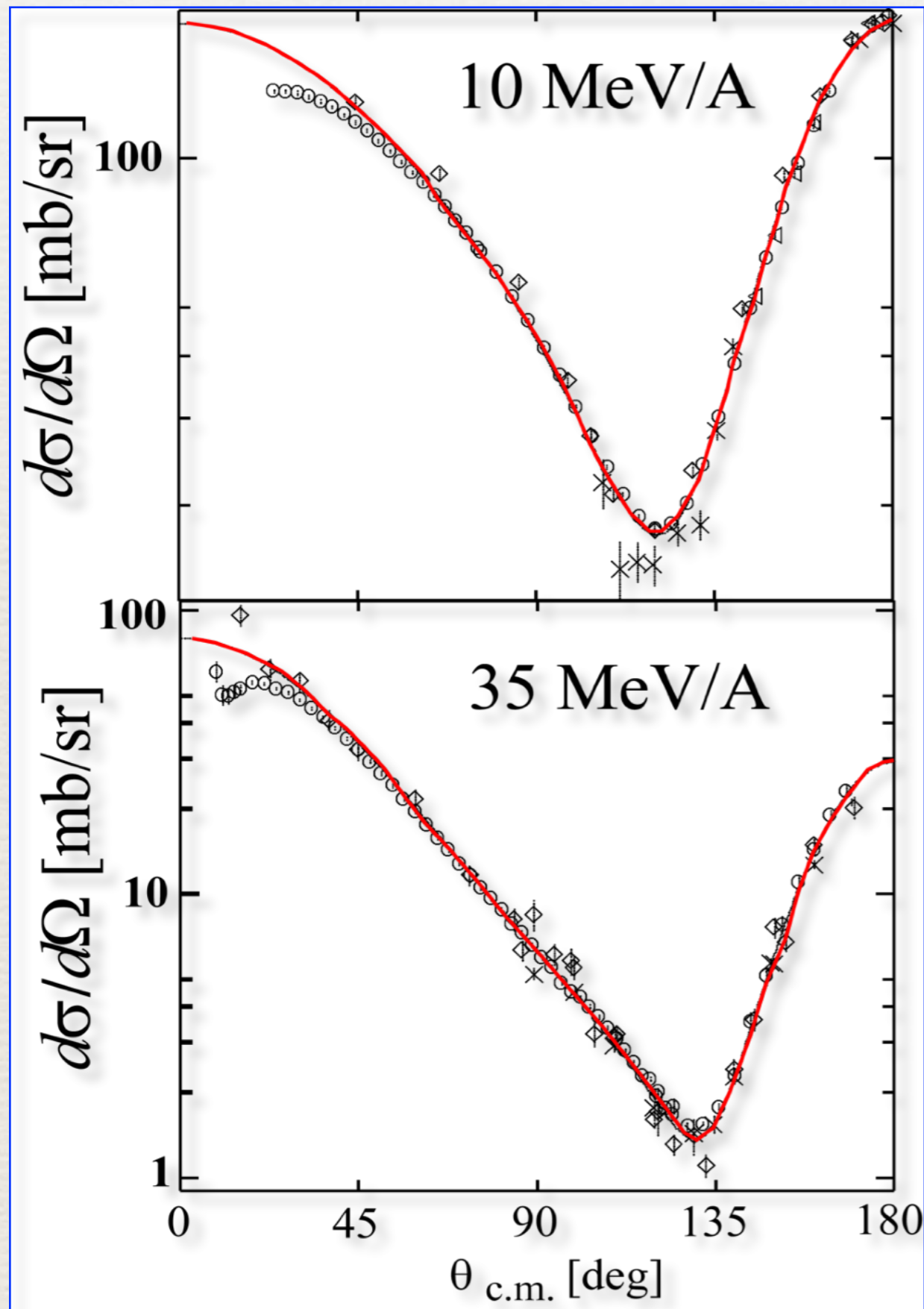
三) 三核力の予言

◆ 1998年 ヴィタラ たちの予言

加速エネルギー 100 メガ電子ボルト (MeV) 付近の 重陽子と陽子の散乱 に 三核力効果があらわれる。



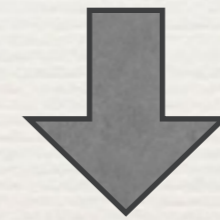
低エネルギー陽子・重陽子弾性散乱 ($E \leq 30 \text{ MeV}/A$)



◎ 超高精度の実験結果

Exp. Data from

九州大学, TUNL, Cologne etc..



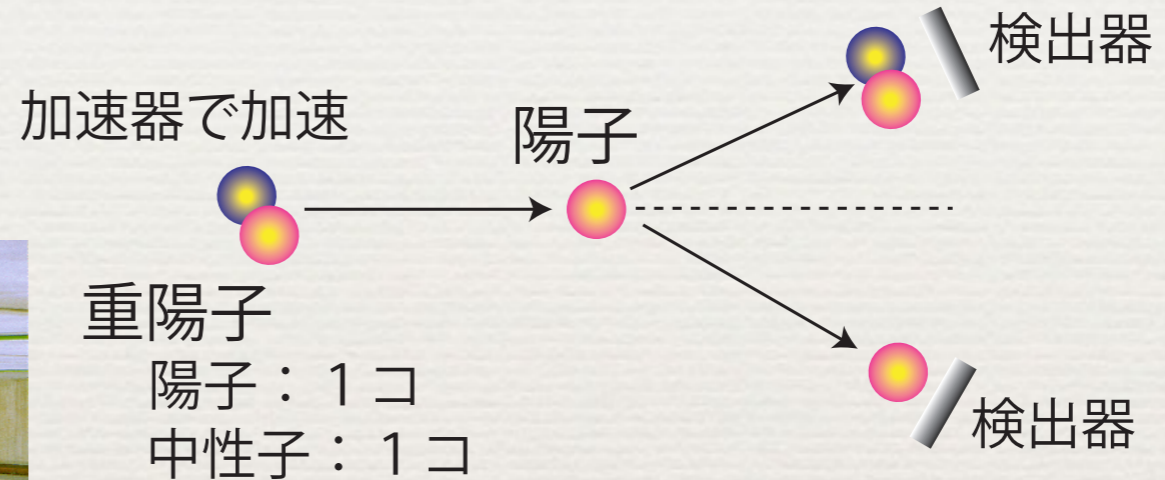
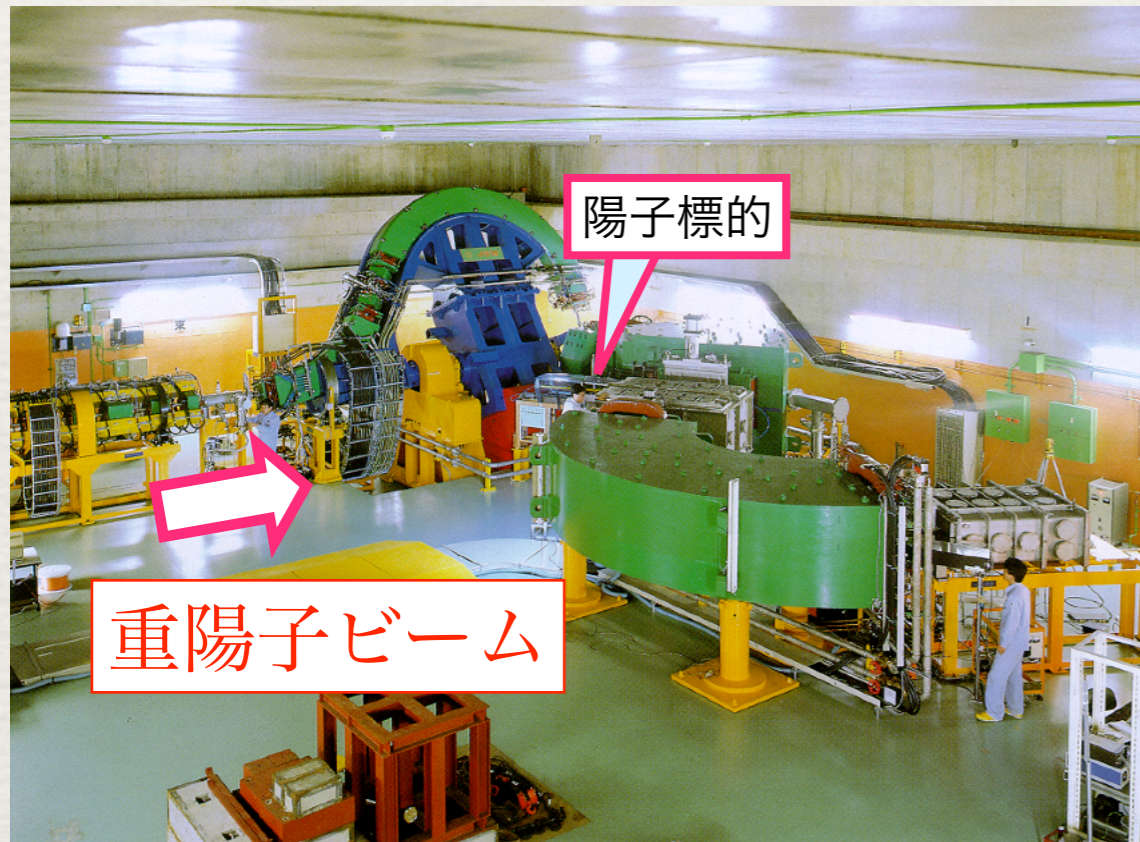
三体核力の証拠は見えなかった

W. Glöckle et al., Phys. Rep. 274, 107 (1996).

重陽子と陽子の散乱実験 (三核子系)

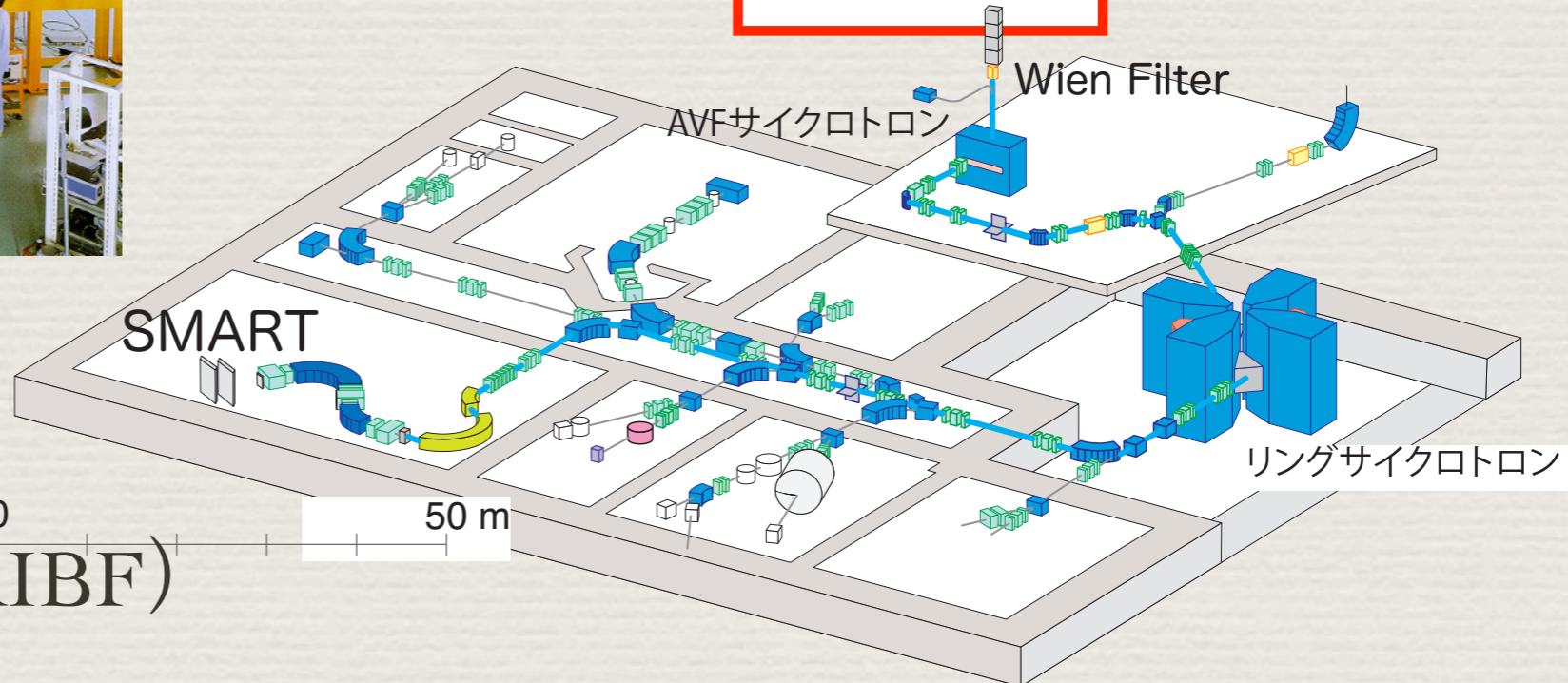
三体力効果を見るため、重陽子・陽子の弾性散乱の高精度測定を始める。

磁気分析器 SMART



加速エネルギー
135メガ電子ボルト

偏極イオン源



理化学研究所 加速器施設
(埼玉県和光市, 現 理研RIBF)

観測量

- ◆ 微分断面積：三体核力の大きさをみる
- ◆ スピン観測量：三体核力のスピン依存性をみる

微分断面積の測定

絶対値を求めることは難しい

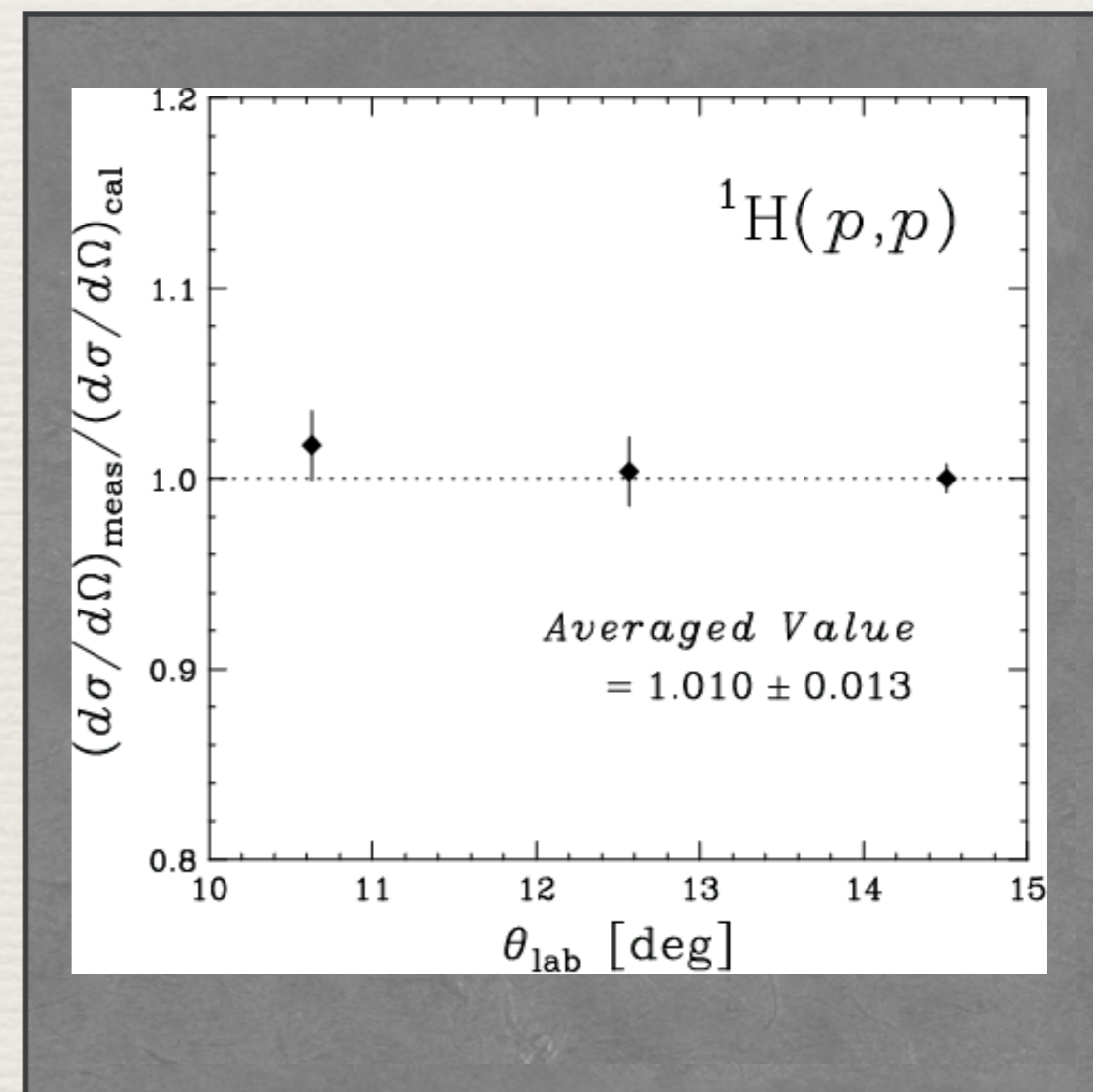
$$\text{微分断面積} = \frac{\text{検出数}}{\text{標的厚} \cdot \text{ビーム電荷量} \cdot \text{立体角} \cdot \text{検出効率}}$$

- ・加速器から検出器まで、
重陽子-陽子弾性散乱の測定パラメーターを
変えずに、陽子-陽子散乱の測定を行う工夫
→ 系統誤差をおさえる

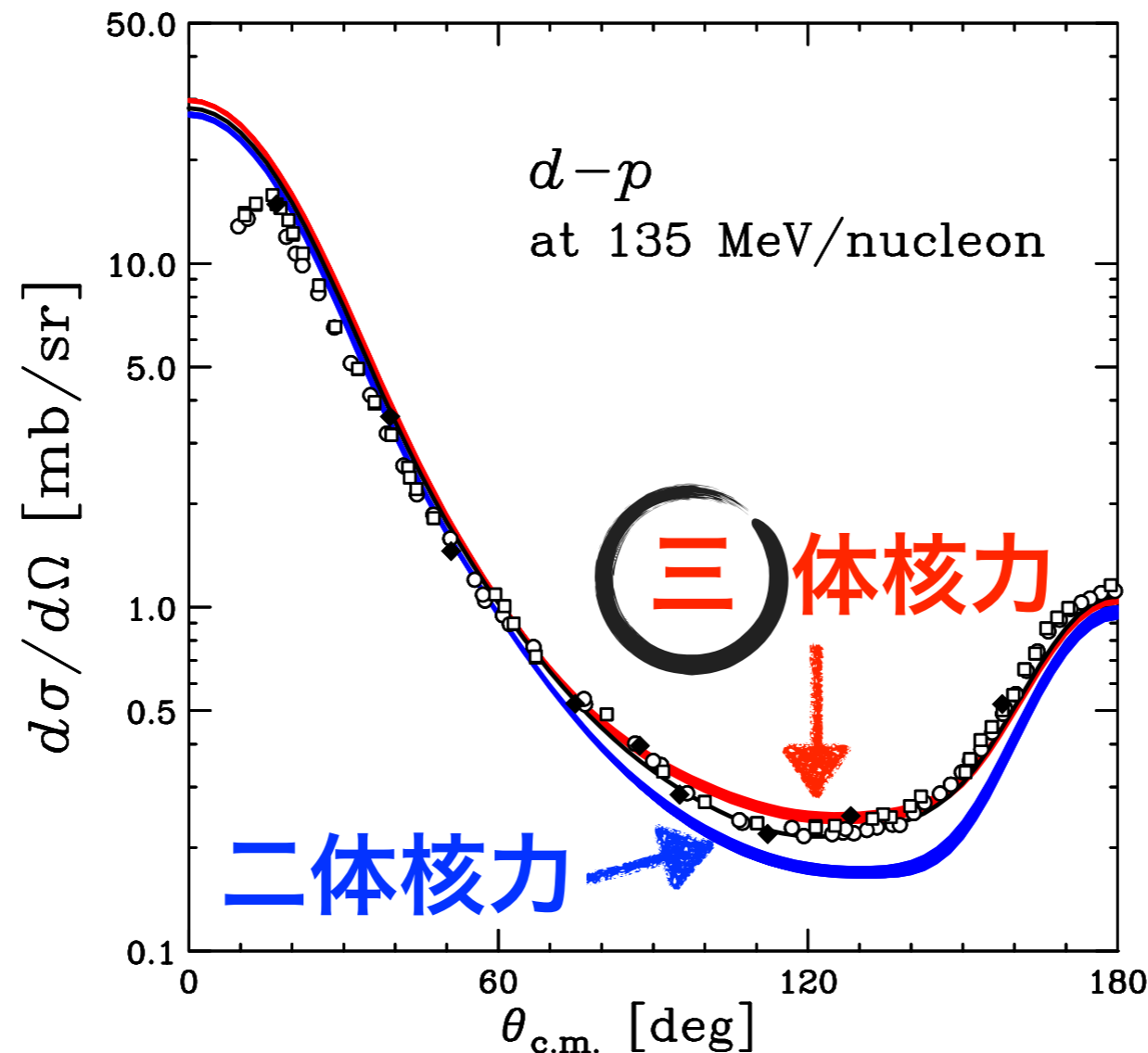
- ・陽子-陽子弾性散乱
 - ・微分断面積がよく知られている
豊富な核子-核子散乱データベース

$$\begin{aligned} & (d\sigma/d\Omega)_{\text{exp}} / (d\sigma/d\Omega)_{\text{SAID}} \\ & = 1.010 \pm 0.013 \end{aligned}$$

→ 系統誤差は2% 以下



核子あたりのエネルギーが**135**メガ電子ボルトの 重陽子・陽子弾性散乱の散乱断面積

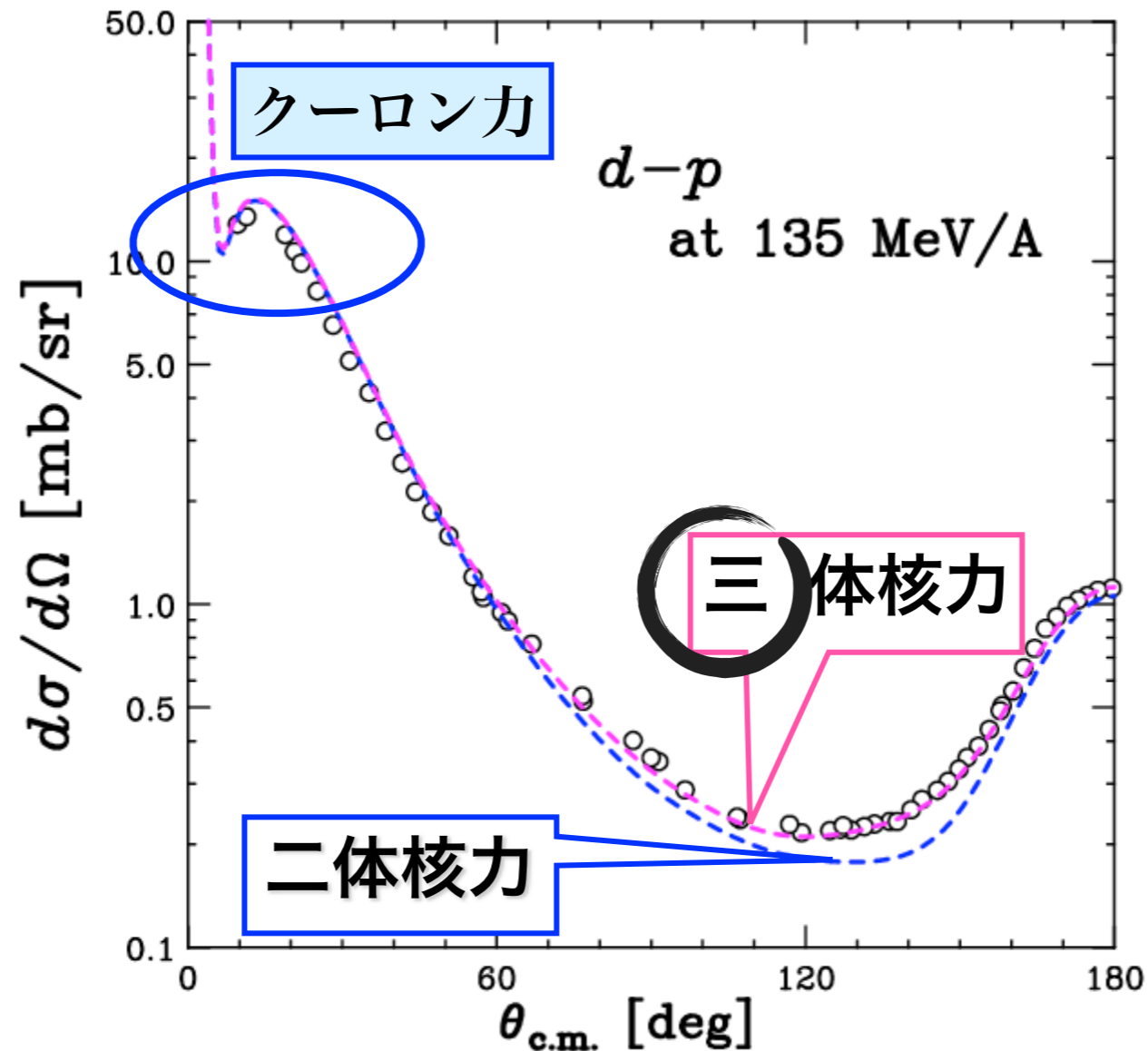


実験値と厳密理論計算との差は三体力によって説明された。

散乱系で**三体力(三体力)**の証拠が見つかった最初の例。

K. Sekiguchi et al., Phys. Rev. C (2002), Phys. Rev. Lett. (2005) etc...

核子あたりのエネルギーが135メガ電子ボルトの 重陽子・陽子弾性散乱の散乱断面積



実験値と厳密理論計算との差は三体力によって説明された。

散乱系で**三体核力(三体力)**の証拠が見つかった最初の例。

K. Sekiguchi et al., Phys. Rev. C (2002), Phys. Rev. Lett. (2005) etc...

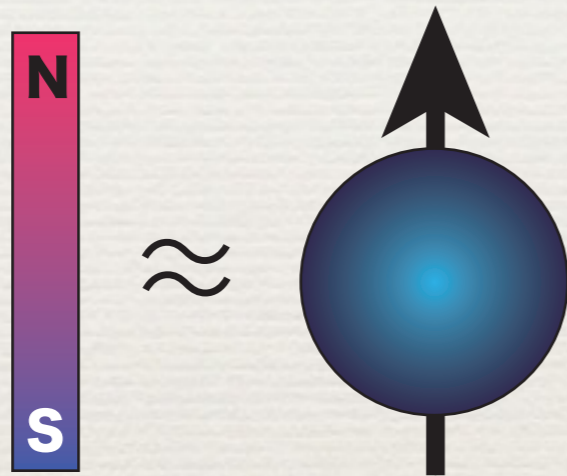
観測量

- ◆ 微分断面積：三体核力の大きさをみる
- ◆ スピン観測量：三体核力のスピン依存性をみる

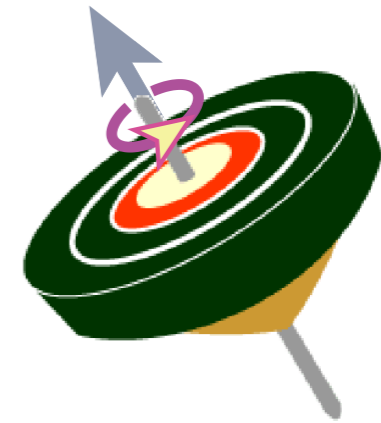
スピンとは？

量子力学：系 or 粒子の固有角運動量

- 磁石を内蔵している系 or 粒子

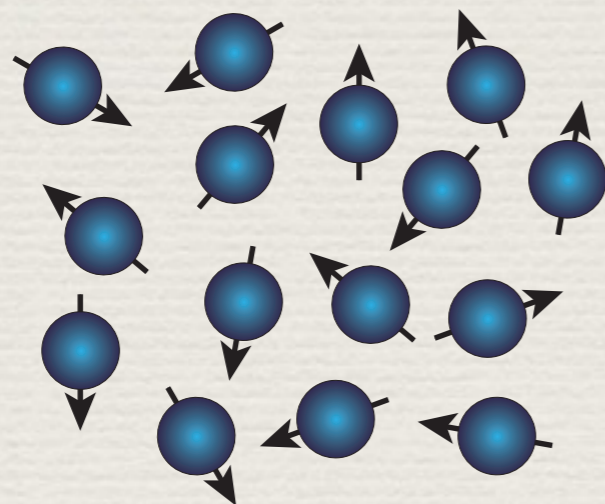


古典力学：自転、回転

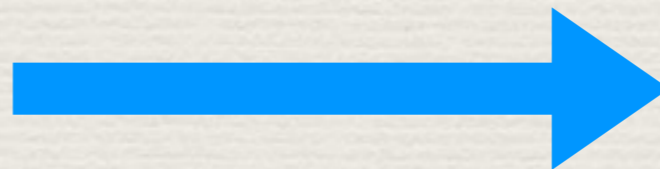


- スピンの向きを揃える (偏極)

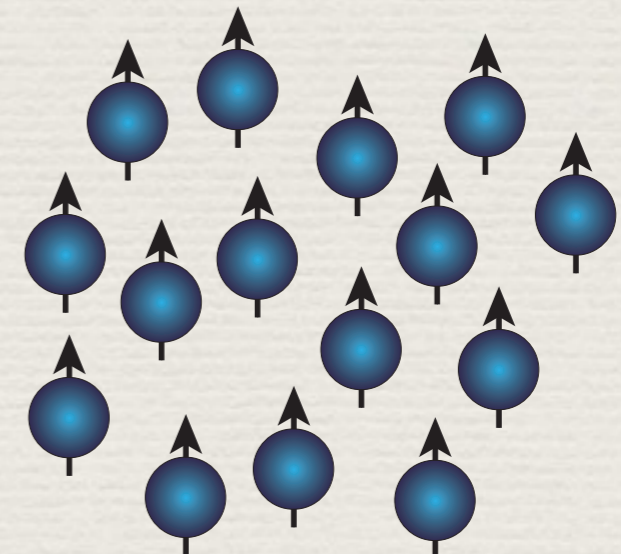
通常：無秩序な状態



スピンの向きを揃える



偏極した状態

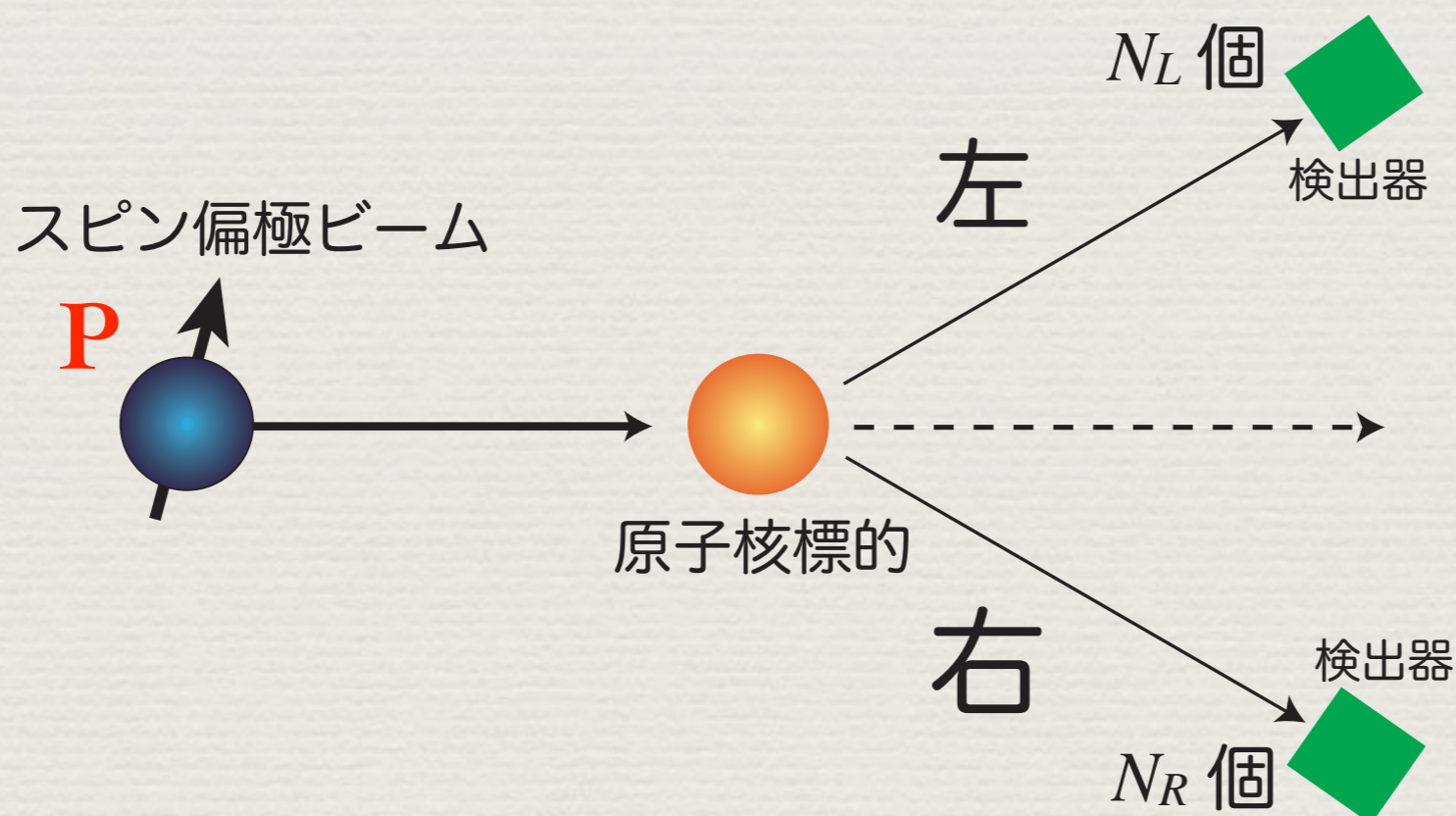


スピンの向きを測る

スピン偏極による効果は左右に散乱される粒子数の非対称度として現れる。

$$\text{非対称度} = P \cdot A = \frac{N_L - N_R}{N_L + N_R} \quad \begin{array}{l} P : \text{偏極度} \\ A : \text{標的の分析能} \end{array}$$

→ スピンの向き **P** が求まる

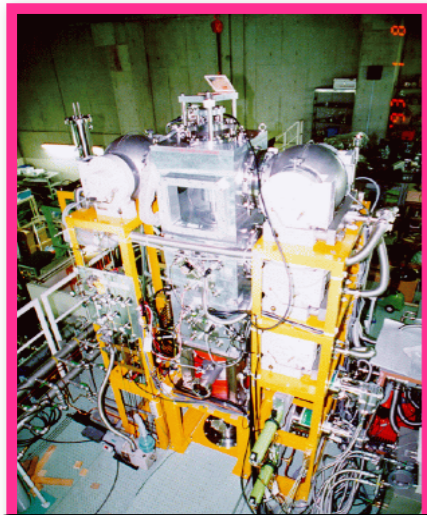


RIKEN RI ビームファクトリー (RIBF)

- 偏極重陽子ビーム
 - acceleration by AVF+RRC : 65-135 MeV/nucleon
 - acceleration by AVF+RRC+SRC : 190-300 MeV/nucleon (2009年より)
 - polarization : 60-80% of theoretical maximum values
- Beam Intensity : < 100 nA

自由自在にスピン軸を制御

理研偏極重陽子ビームの最大の特徴



偏極重陽子イオン源

RARF

AVF

RRC

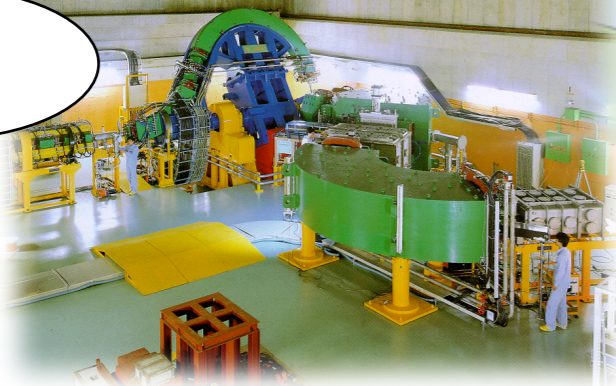
SRC

SMART
(- 2005)

IRC

BigRIPS

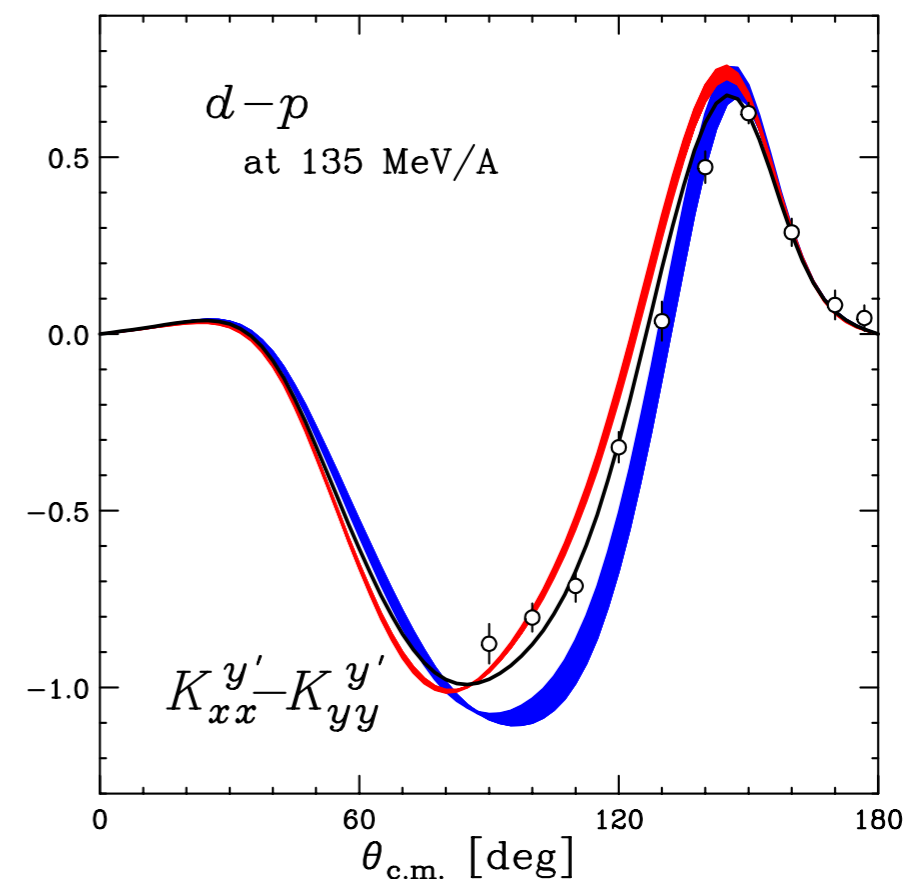
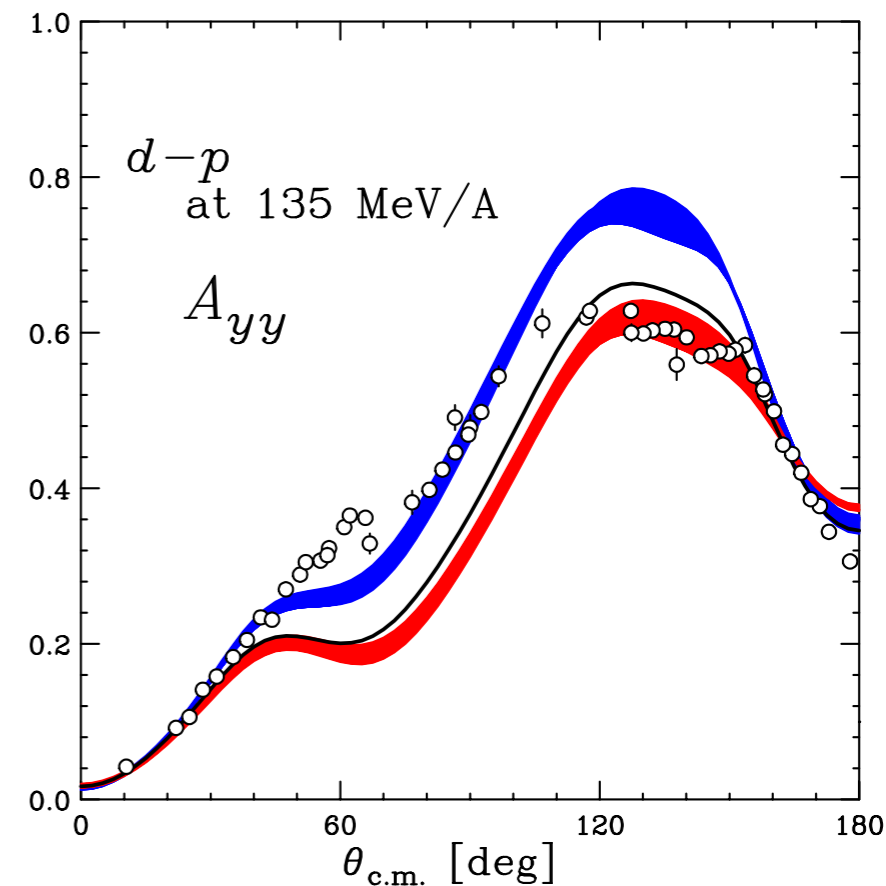
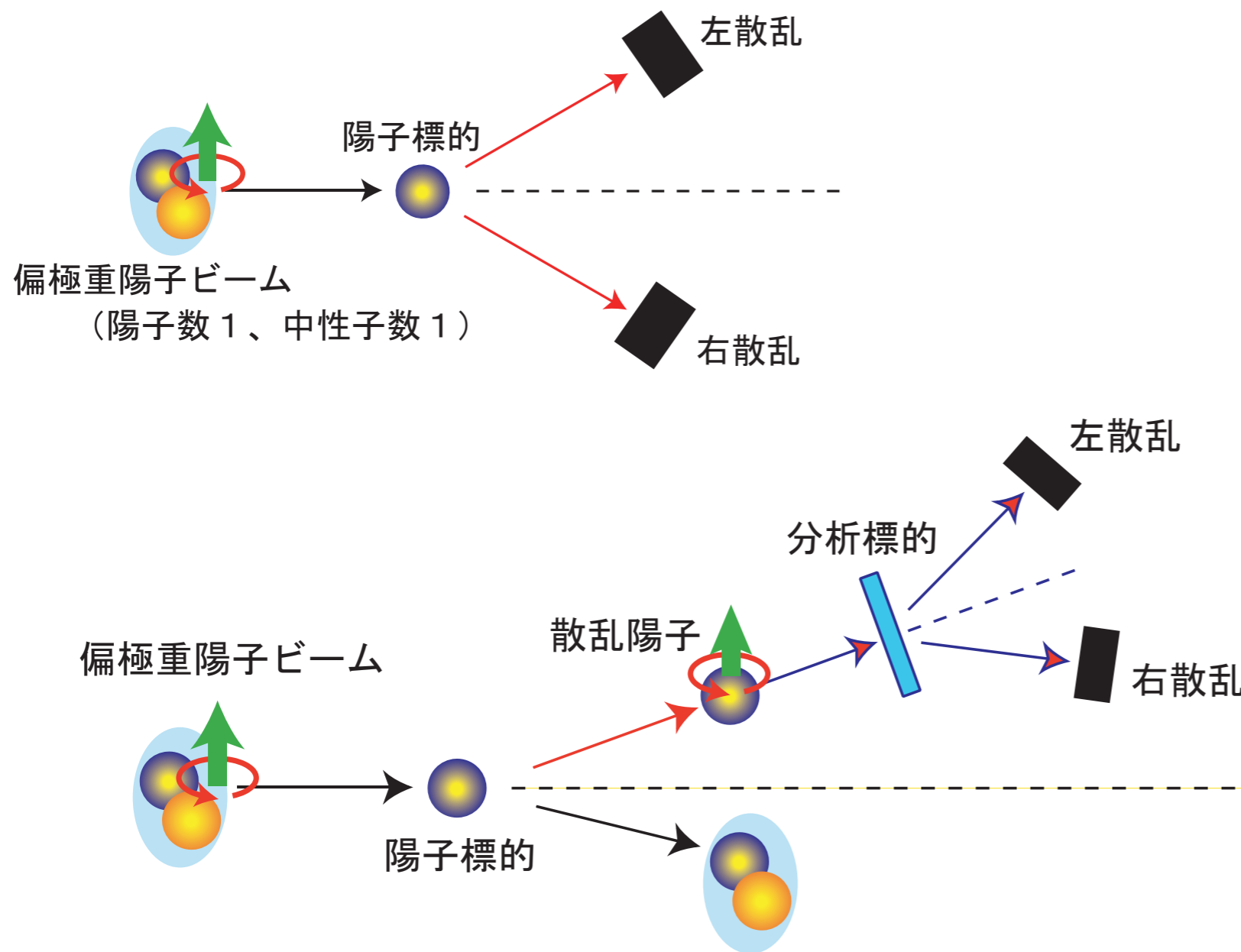
Polarimeter
BigDpol



スピン観測量

K. S. et al. PRC 65, 034003(2002)

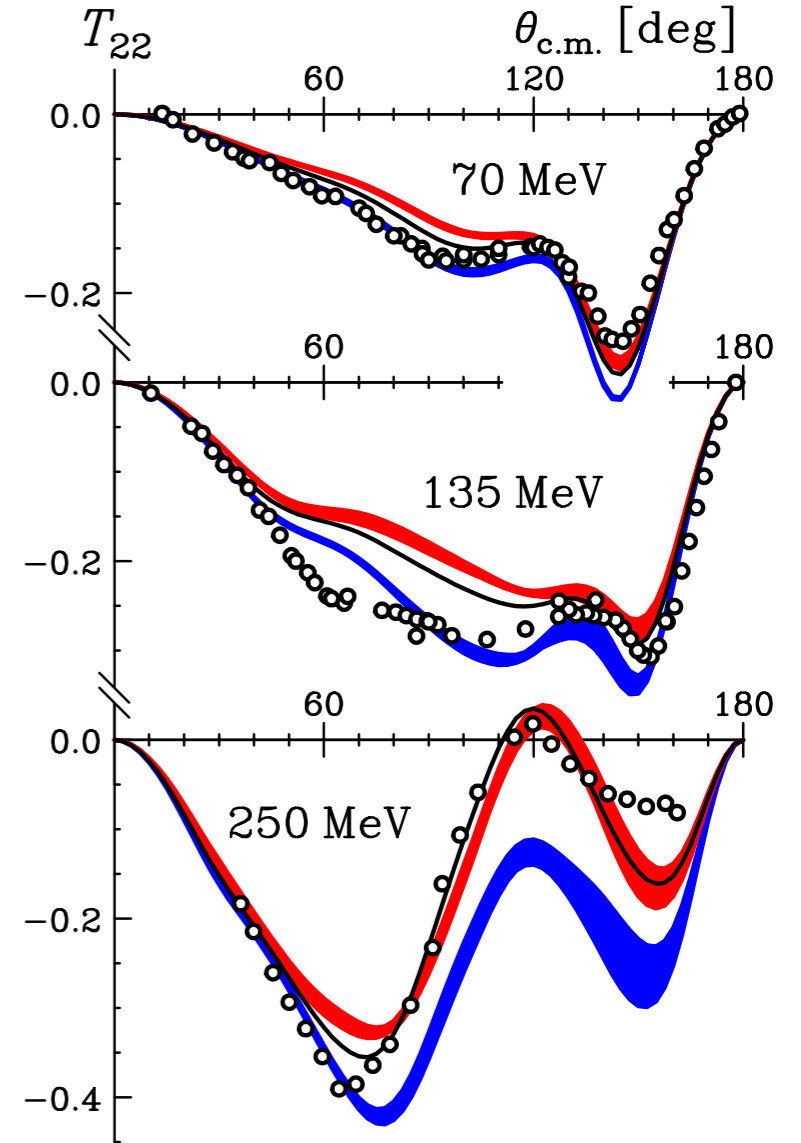
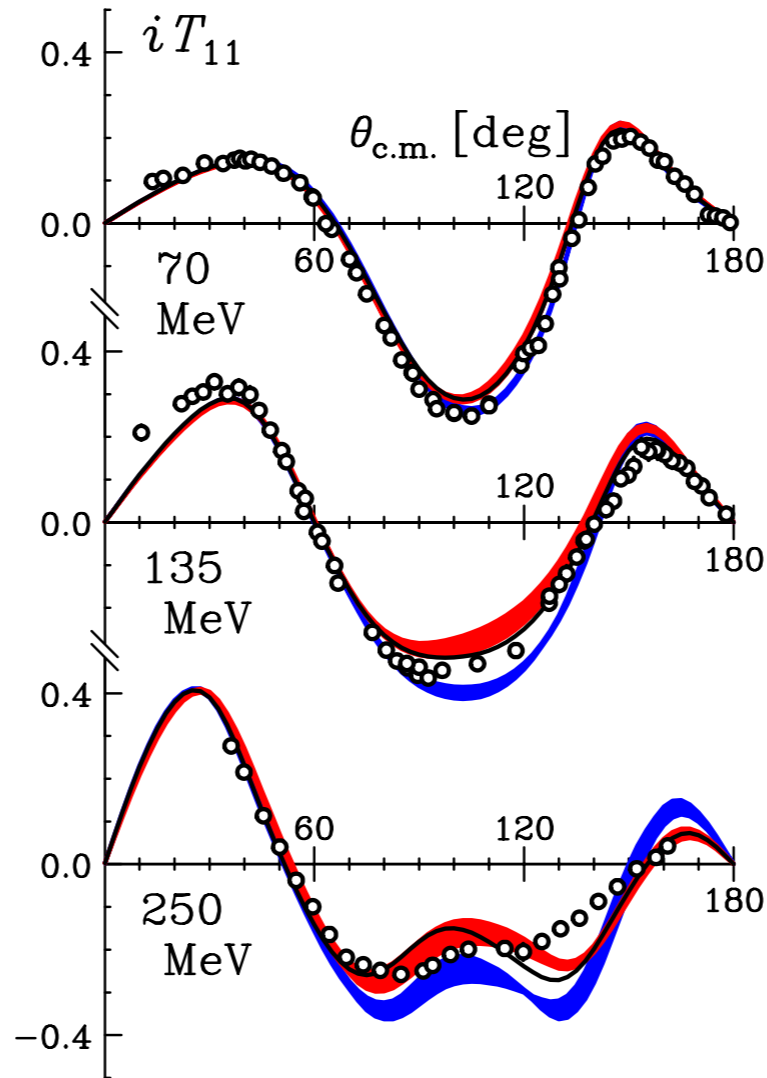
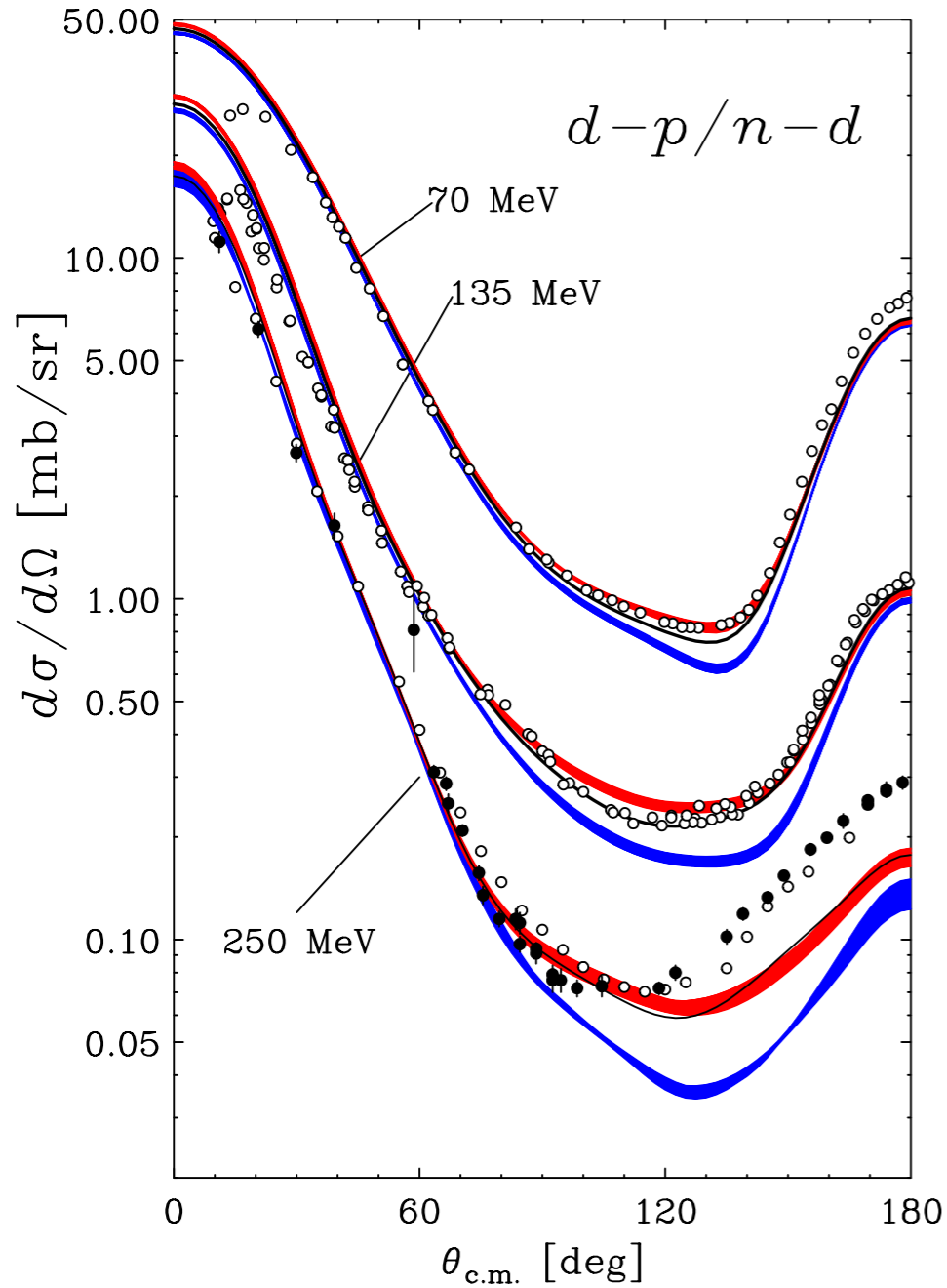
K. S. et al. PRC 70, 014001(2004)



三体核力のスピン依存部分の記述は不完全

エネルギー依存性

K. S et al., Phys. Rev. C 83, 061001 (2011)
 K. S et al., Phys. Rev. C 89, 064007 (2014)
 K. S et al., Phys. Rev. C 96, 064001 (2017)




■ NN (CDBonn, AV18, Nijm I,II)
■ TM'(99) 3NF +
■ NN(CD Bonn, AV18, Nijm I,II)
■ Urbana IX 3NF+AV18

高いエネルギーの後方散乱：短距離型三体力が必要か

観測量

- ◆ 微分断面積：三体力の大きさをみる

大きさ： 

実験値と厳密理論計算との差は三体力によって説明された。
散乱系で三体力の証拠が見つかった**最初の例**。

- ◆ スピン観測量：三体力のスピン依存性をみる

三体力を考慮しても必ずしも実験値を説明できない

⇒ **三体力のスピン依存部分の記述は不完全**

- ◆ エネルギー依存性：より高いエネルギー

後方散乱：

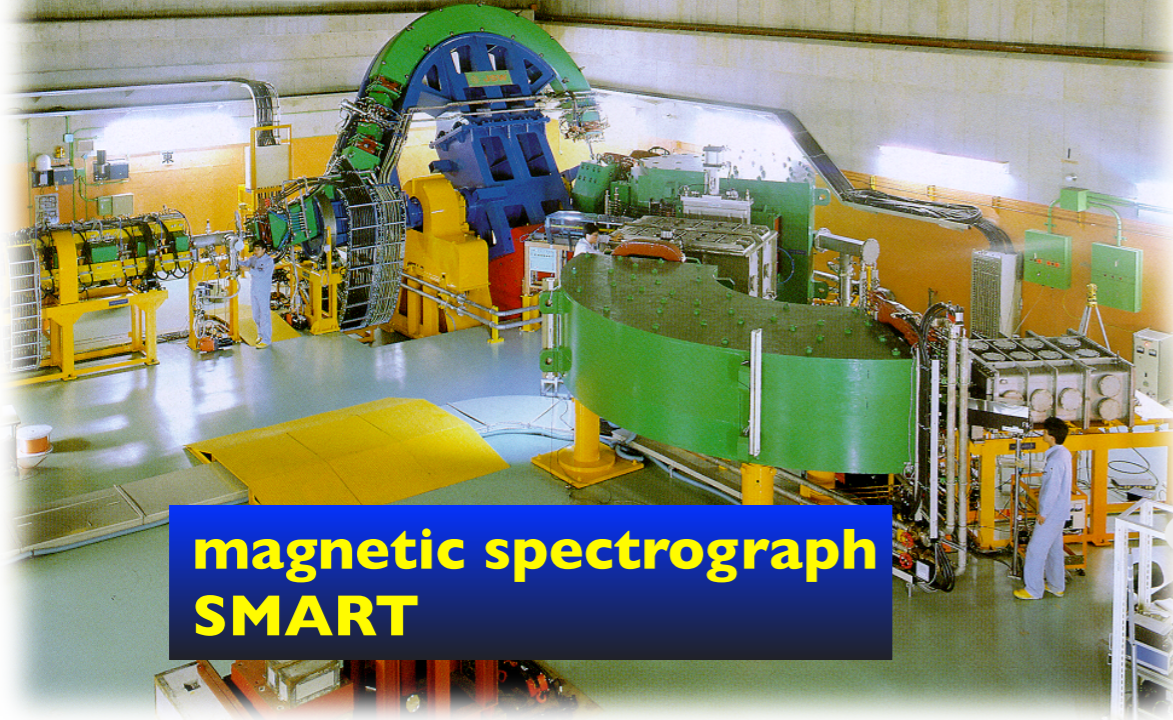
微分断面積、スピン観測量共に既存の三体力では説明出来ない

⇒ **短距離三体力が必要か？**

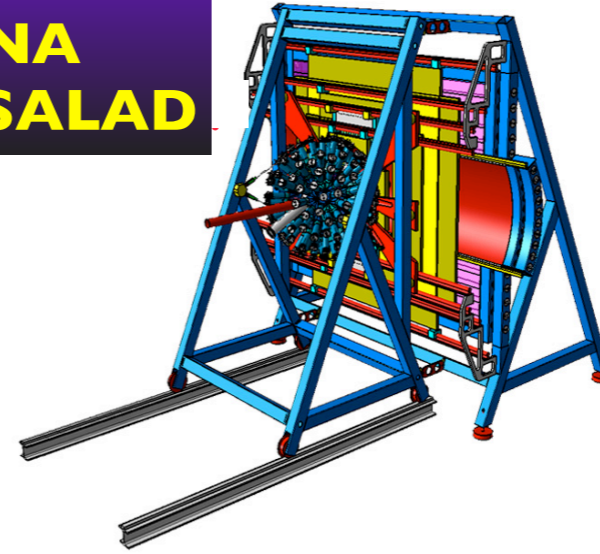
我々の実験以降に起きていること

実験

RIKEN

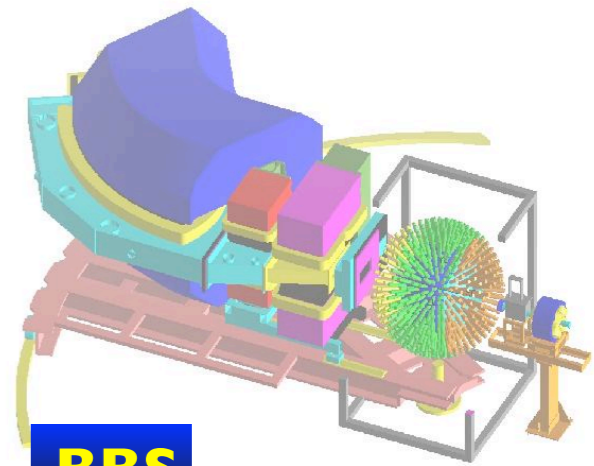


BINA
& SALAD

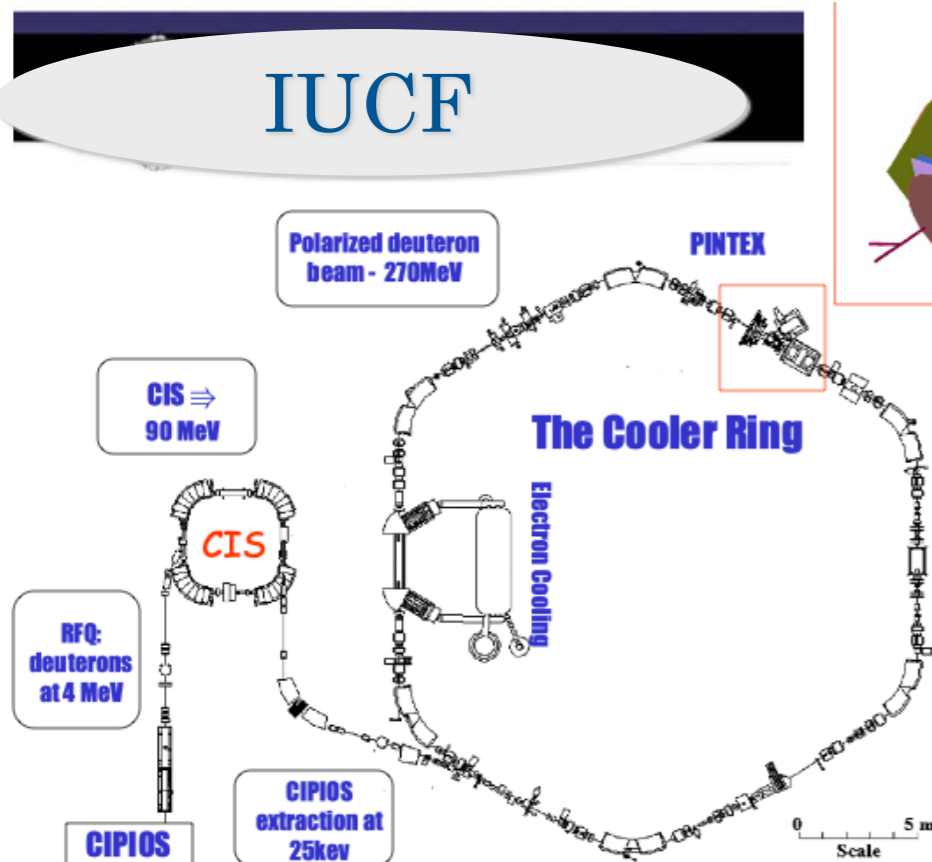


KVI

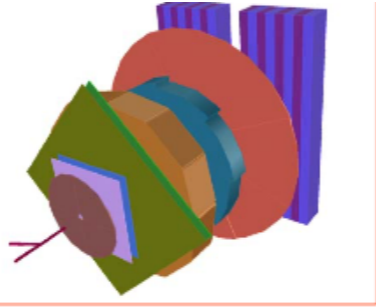
BBS



IUCF



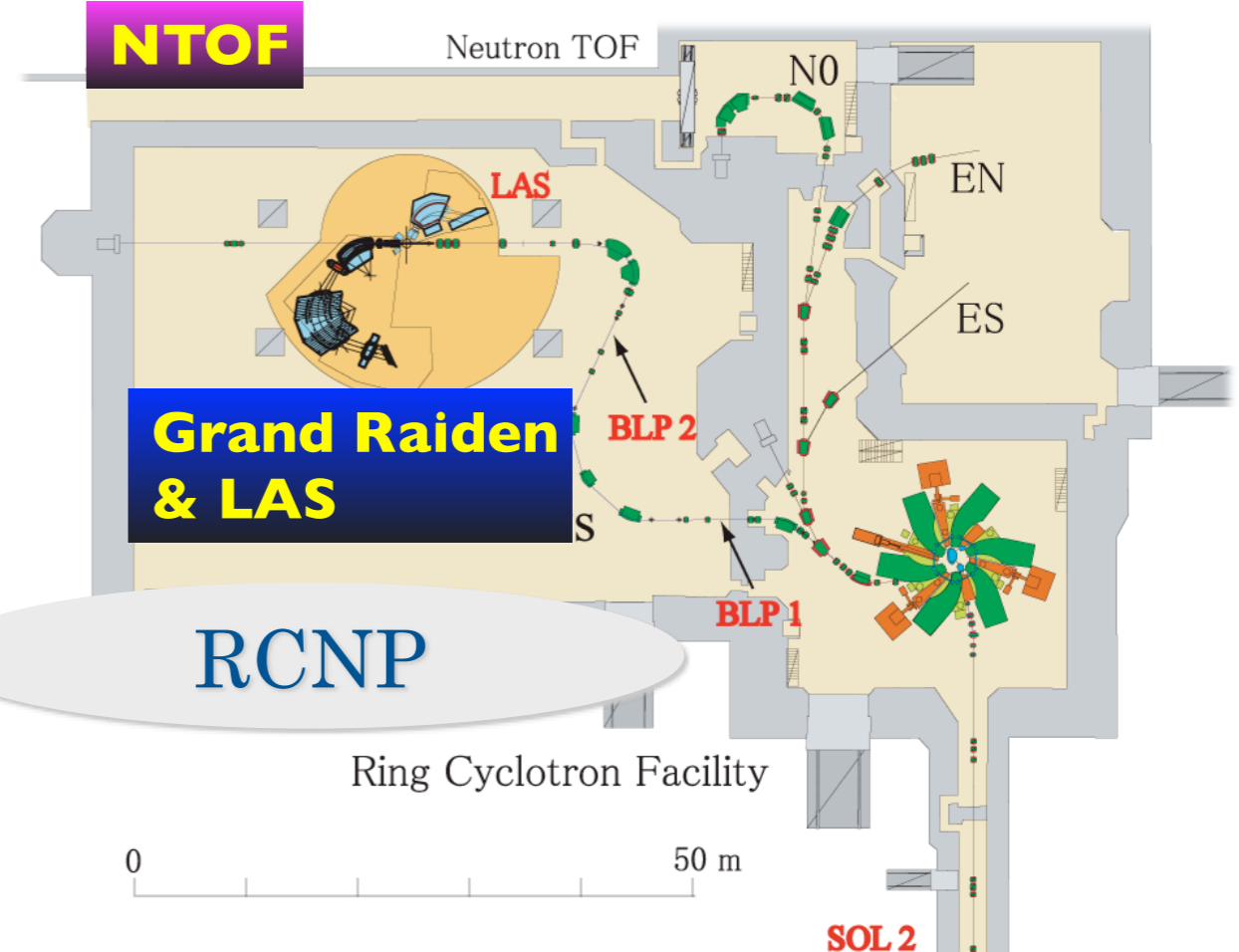
Cooler Ring
+ PINTEX



NTOF

Grand Raiden
& LAS

RCNP



70-400 MeV/A の重陽子一陽子弾性散乱

pd and nd Elastic Scattering at 70–400 MeV/A

~1998

Observable	100	200	300	400
$\frac{d\sigma}{d\Omega}$				
\vec{p} A_y^p \vec{n} A_y^n				
\vec{d} A_y^d A_{yy} A_{xx} A_{xz}				
$\vec{p} \rightarrow \vec{p}$ $K_y^{y'}$ $K_x^{x'}$ $K_x^{z'}$ $K_z^{x'}$ $K_z^{z'}$				
$\vec{d} \rightarrow \vec{p}$ $K_y^{y'}$ $K_{xx}^{y'}$ $K_{yy}^{y'}$ $K_{xz}^{y'}$				
$\vec{p} \rightarrow \vec{d}$ $K_y^{y'}$				
$\vec{p}\vec{d}$ C_{yy} C_{ij}				

理論の進展

③ 体力を含む核力で原子核・核物質を記述する

📌 新しい frame work の核力

📌 多核子系における 三体核力 $\sim 3NFs$ in $A > 3 \sim$

● 原子核の構造の理解

● 中性子星

新しい frame work の核力

● カイラル有効場理論(χ EFT)による核力の記述

- 📌 カイラル対称性を考慮した有効場核力
- 📌 S. ワインバーグによる提案から始まる (1990)
- 📌 相互作用：
 - 📌 π 中間子 (南部-Goldstone ボゾン)
 - + 核子
 - + 接触相互作用(重い中間子, Δ 励起 etc..)

📌 二体核力、三体核力を系統的に記述

	2N Force	3N Force	4N Force
LO (Q/Λ_χ) ⁰		—	—
NLO (Q/Λ_χ) ²			—
N2LO (Q/Λ_χ) ³			—
N3LO (Q/Λ_χ) ⁴			
N4LO (Q/Λ_χ) ⁵			—

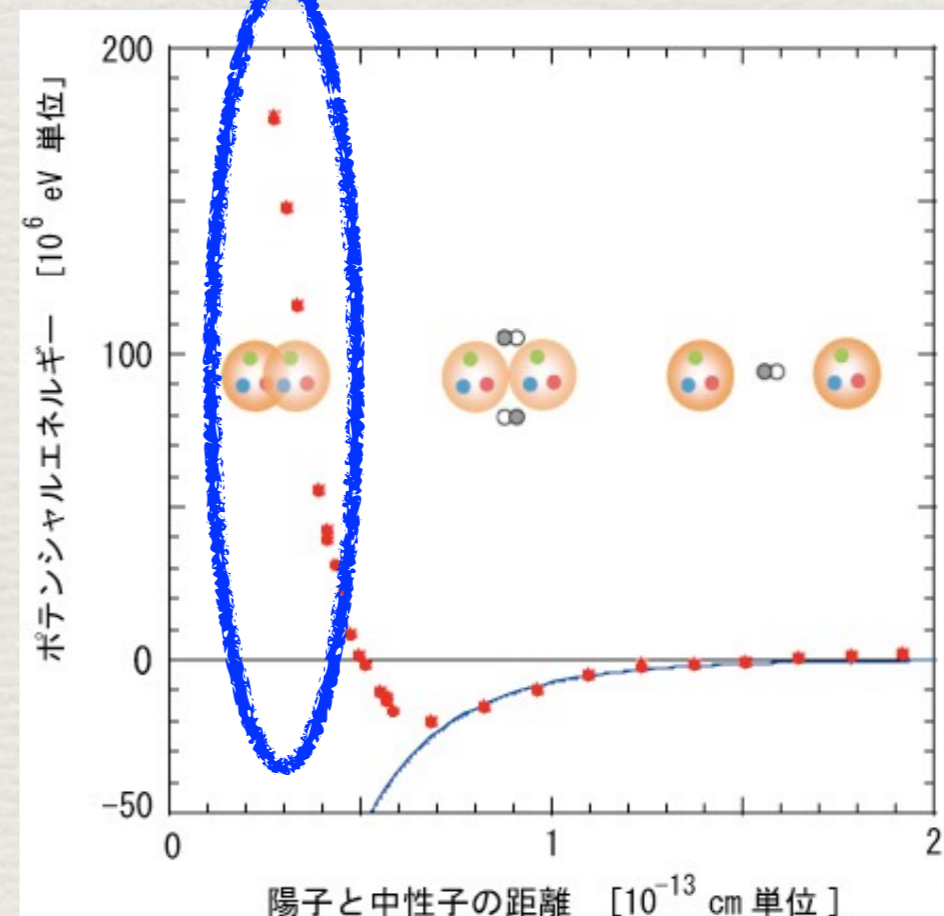
三体核力

新しい framework の核力

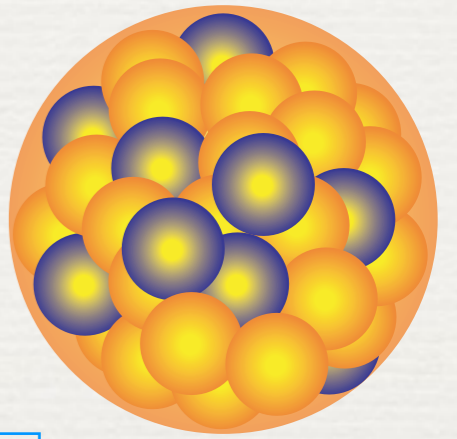
●クォークから核力を記述する

- 1980年代：量子色力学の確立
 - クォークとそれを結びつける粒子“グルーオン”の力学
 - 核力を量子色力学から導けるか？
- 2007年 石井、青木、初田がついに格子ゲージ理論から核力を説明する計算に成功！
 - 現在、三体力の研究も進行中 (土井)！

三核子散乱系での検証を
楽しみにしています。



原子核の構造の理解



原子核の形成には **三** 体核力が必要

軽い核の束縛エネルギーの記述 ($A \lesssim 12$): ${}^4\text{He}$ to ${}^{12}\text{C}$

核力を直に用いる第一原理計算の登場

- **Green's Function Monte Carlo**
- **No-Core Shell Model** など
- 二体力：実験値より大きさが小さい値
- 三体力：実験値を再現する方向

3NF 効果

- 10-25%
- 引力的

Note :

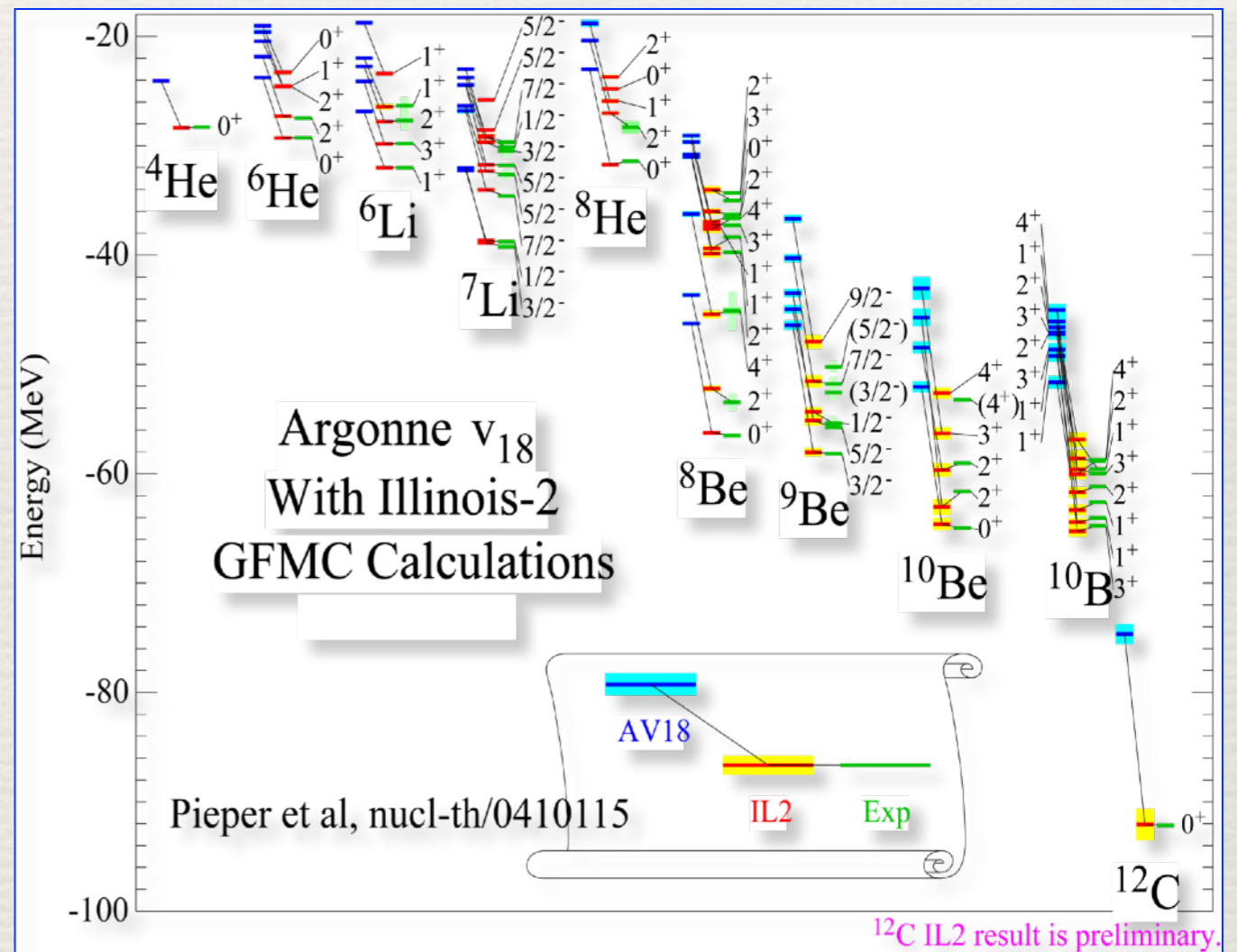
荷電スピン $T=3/2$ 3NFs

(three-neutron force) 効果が

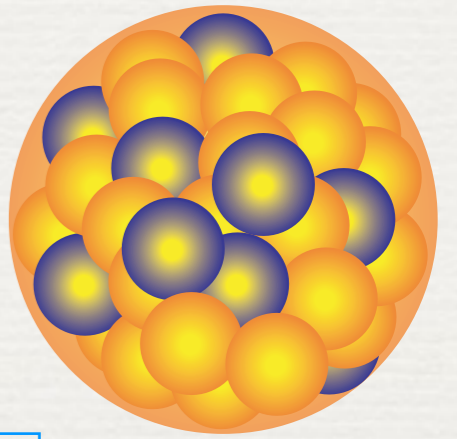
中性子過剰な原子核では大きい様子

Illinois-3NF モデルが示唆

(3π -ring with Δ -isobar)



原子核の構造の理解



原子核の形成には **三** 体核力が必要

軽い核の束縛エネルギーの記述 ($A \lesssim 12$): ${}^4\text{He}$ to ${}^{12}\text{C}$

核力を直に用いる第一原理計算の登場

- Green's Function Monte Carlo
- No-Core Shell Model など

- 二体力：実験値より大きさが小さい値
- 三体力：実験値を再現する方向

3NF 効果

- 10-25%
- 引力的

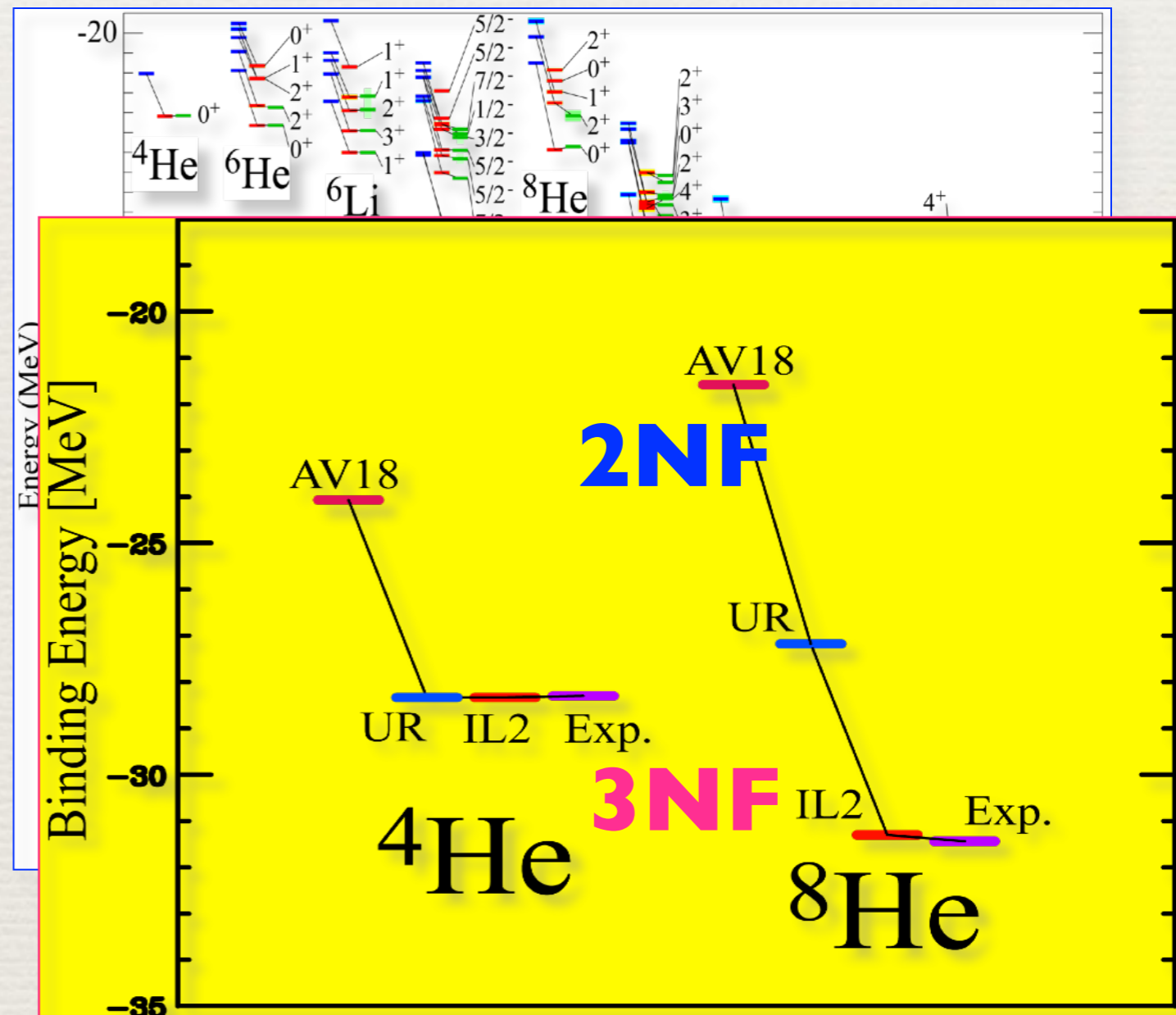
Note :

荷電スピン $T=3/2$ 3NFs

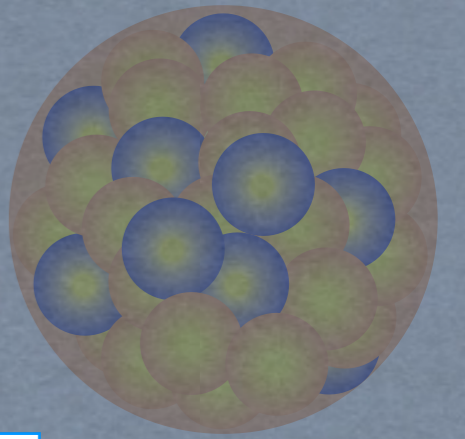
(three-neutron force) 効果が

中性子過剰な原子核では大きい様子

Illinois-3NF モデルが示唆
(3π -ring with Δ -isobar)



原子核の構造の理解



原子核の形成には **三** 体核力が必要

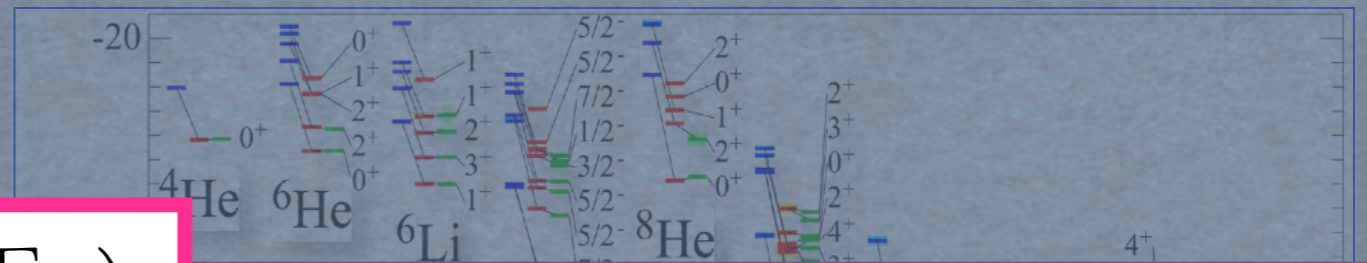
軽い核の束縛エネルギーの記述 ($A \lesssim 12$): ${}^4\text{He}$ to ${}^{12}\text{C}$

核力を直に用いる第一原理計算の登場

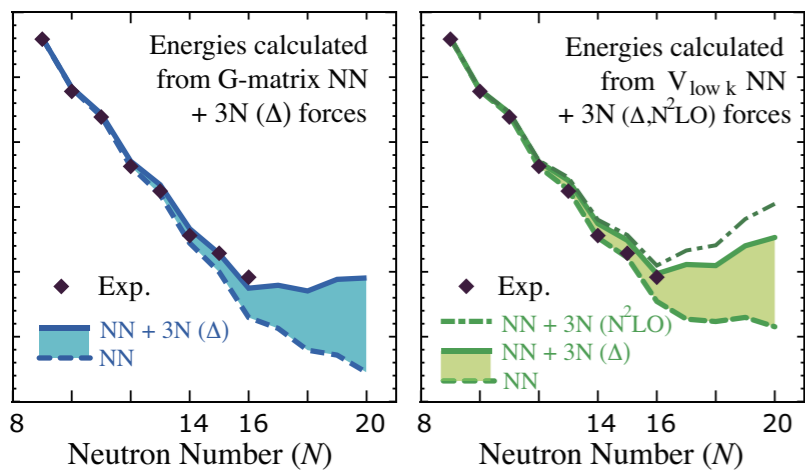
- Green's Function Monte Carlo
- No-Core Shell Model など

より重い核への展開 (up to Fe)

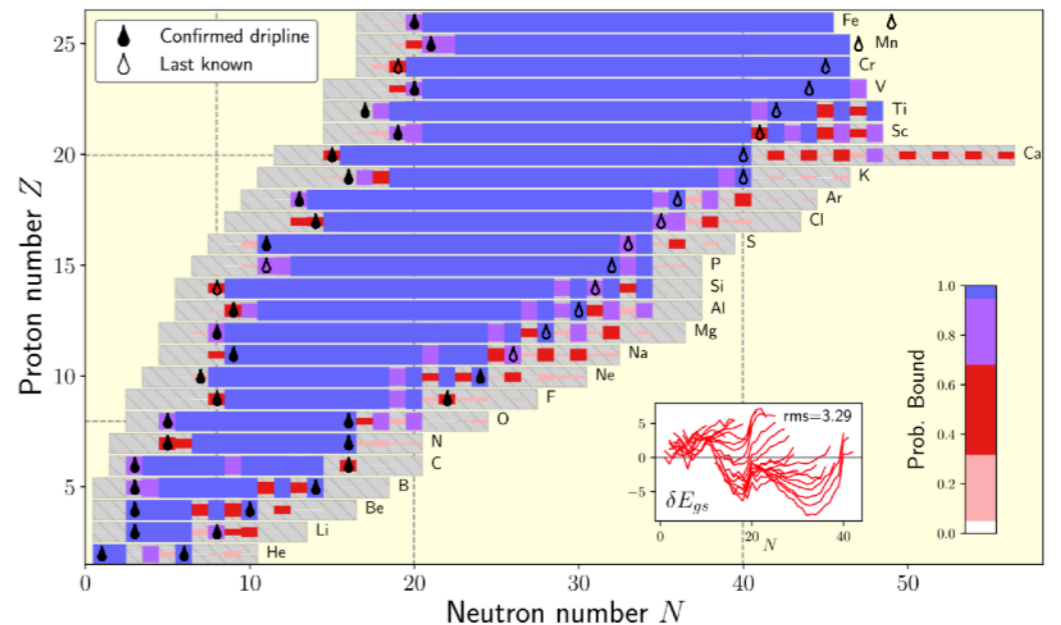
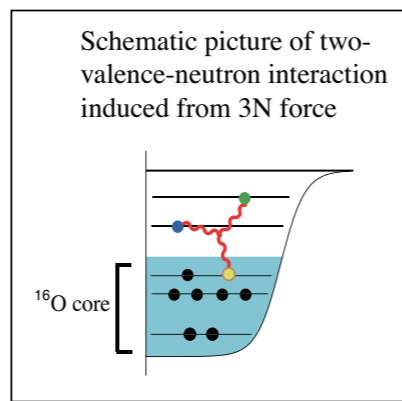
3NFs provide key mechanisms,
e.g. shell-evolution,
boundaries of nuclear stability.



PHYSICAL REVIEW LETTERS 126, 022501 (2021)



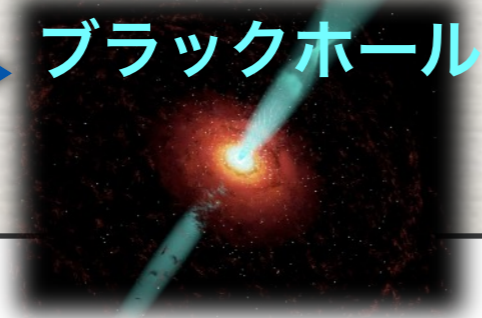
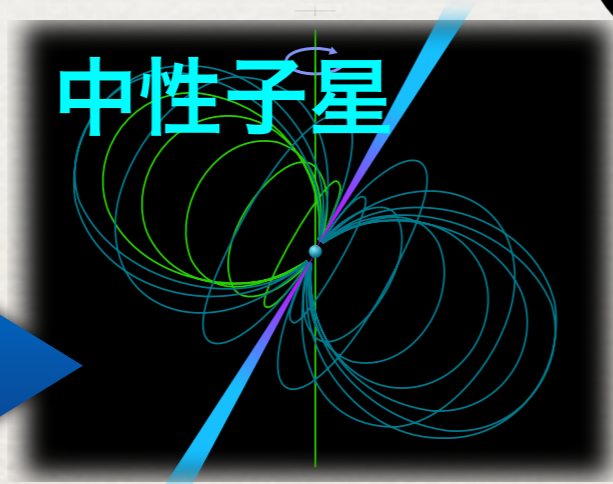
Otsuka et al., Phys. Rev. Lett. 105, 032501 (2010)



中性子星と三体核力

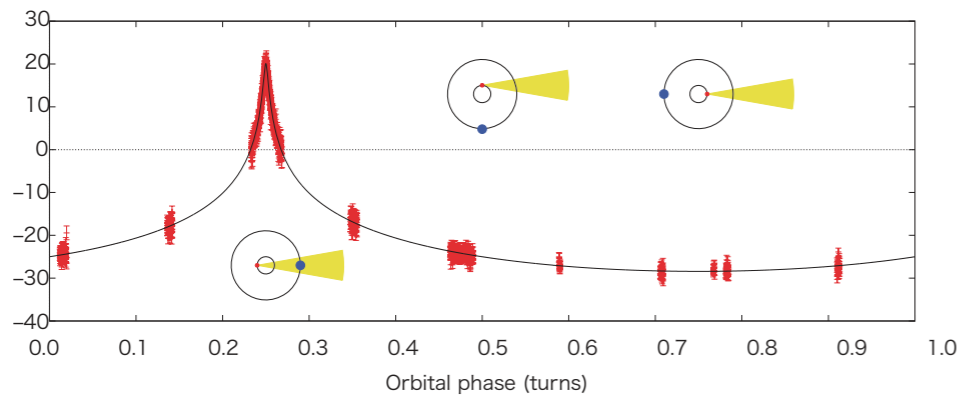
三 体核力：中性子星の形成に必須

星の終焉
超新星爆発



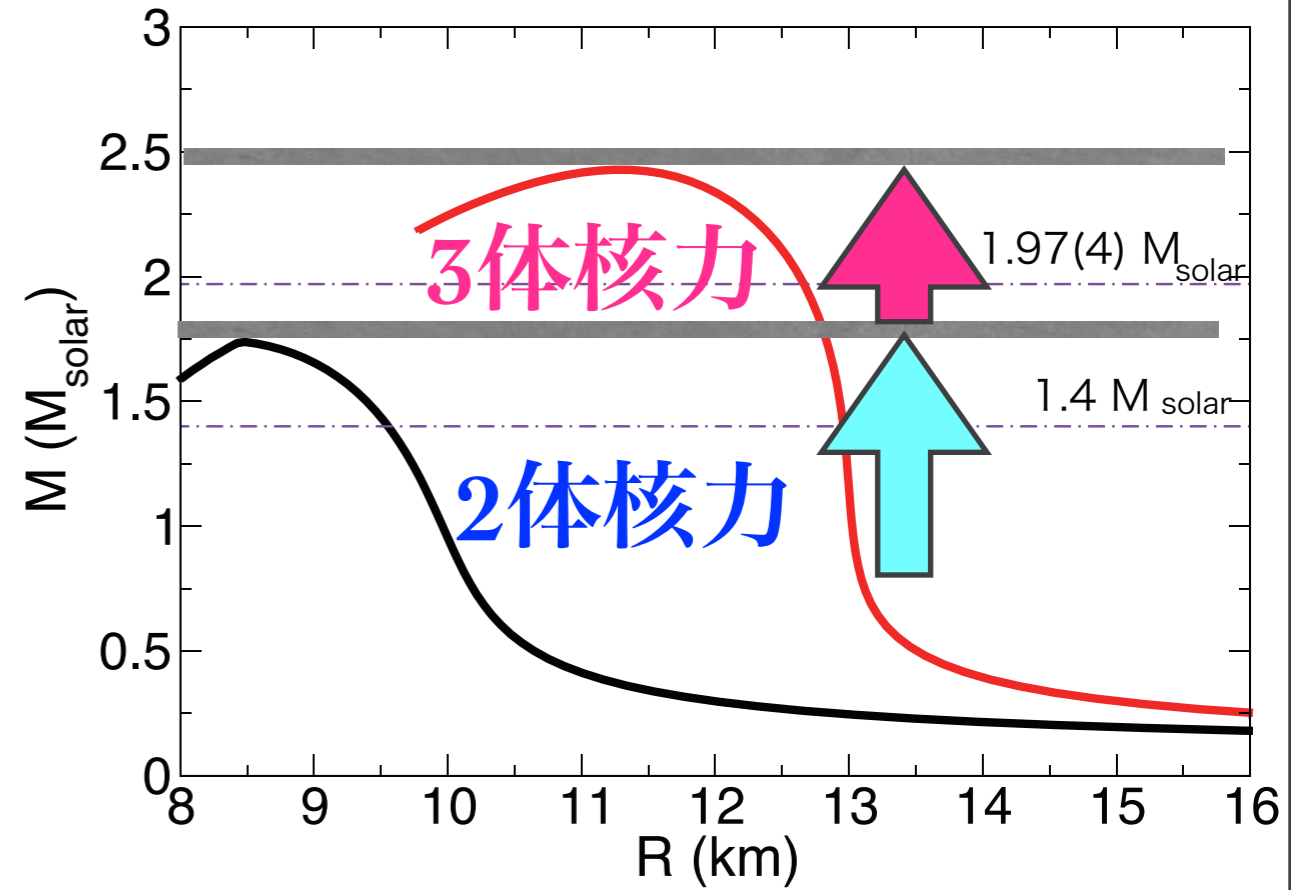
中性子星の最新の観測

太陽質量約2倍の中性子星の発見 (2010年)



Nature 467 1081 (2010)

質量-半径曲線



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

中性子星と三体核力

3NFs in Infinite Nuclei - Neutron Star -

核力：中性子星の形成に必須

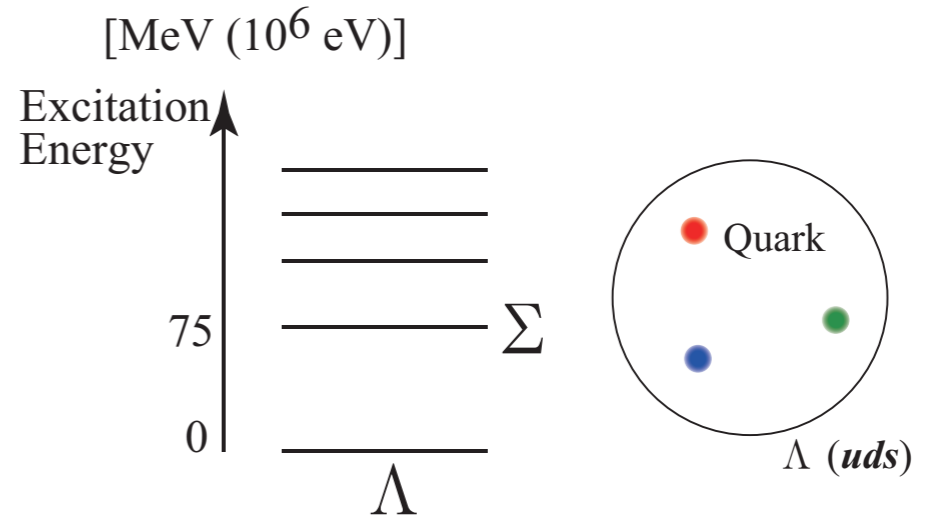
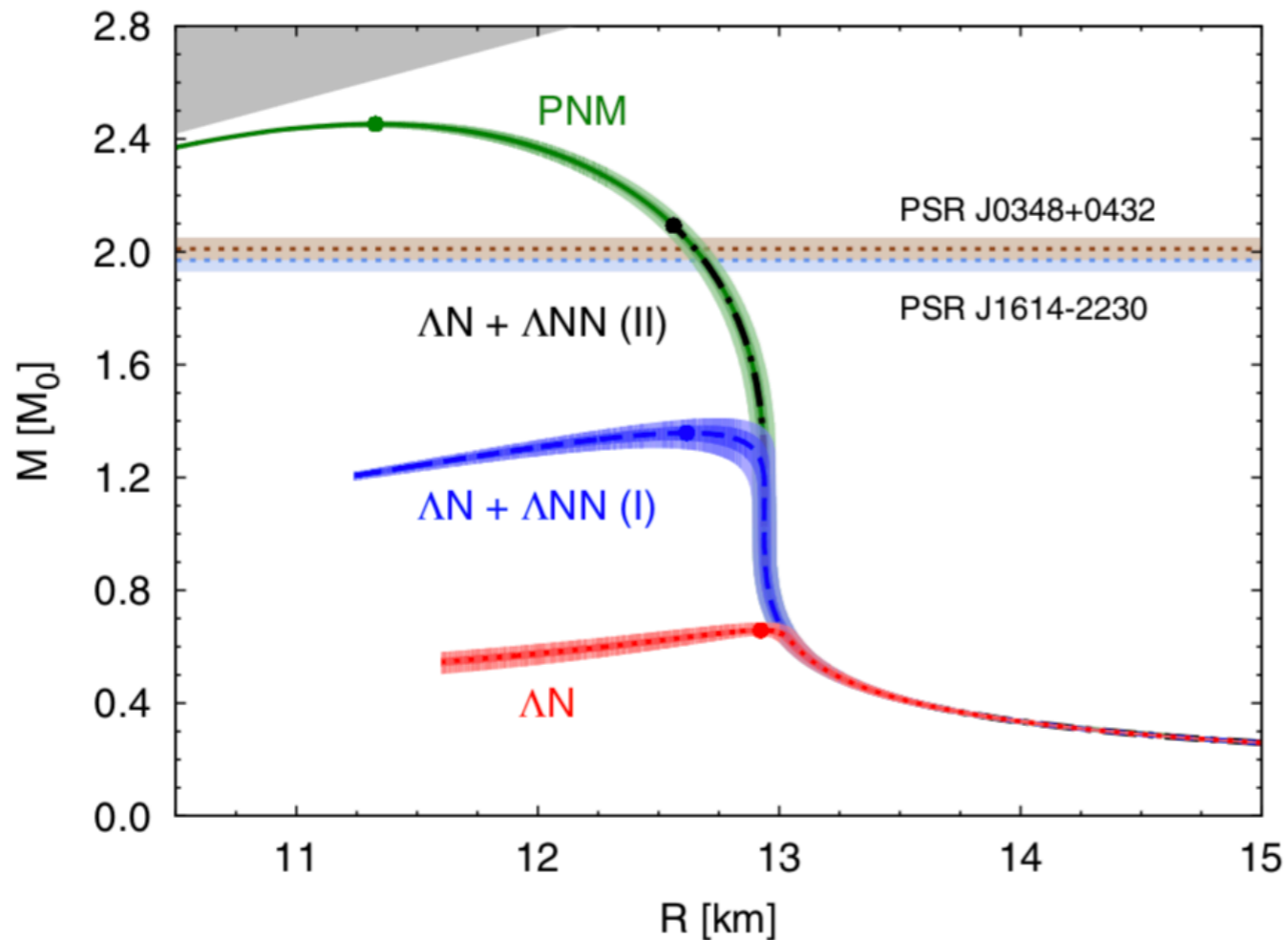
星の終焉
超新星爆発



中性子星

質量-半径曲線

NNN(nnn) + $NNA\Lambda$ in Infinite Nuclei - Neutron Star -



D. Lonaldoni et al., Phys. Rev. Lett. 114, 092301 (2015)

三 体核力研究のこれから

～クォーク→核子→原子核→星の統一的理解に向けて～

距離

スピン

荷電スピン

ストレンジネス

3 & 4核子系散乱
三体核力の基本的な情報
RIBF/RCNP etc.

中性子過剰な
原子核
理研RIBF

Sクォークを
もつ原子核
J-PARC



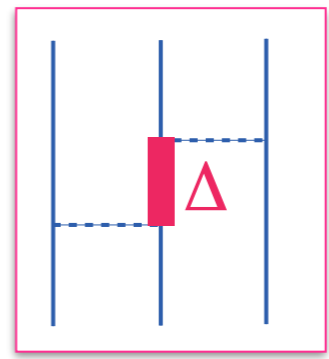
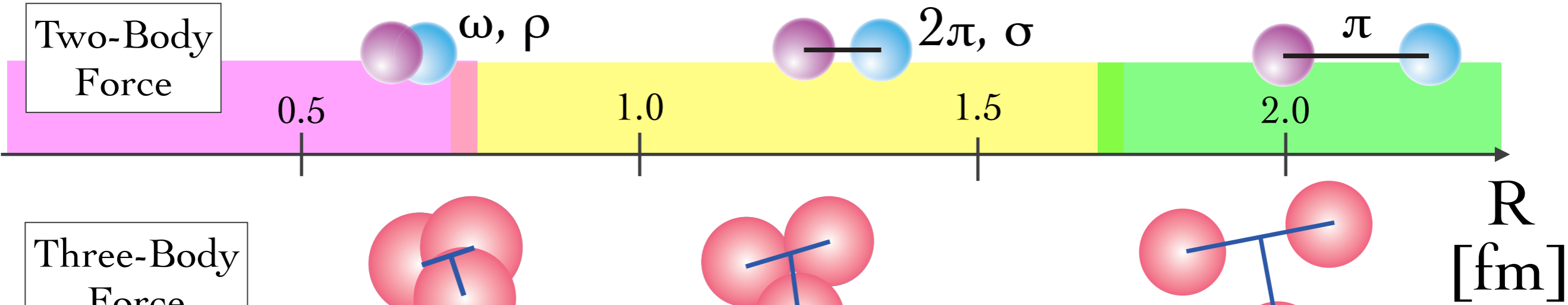
今 & これから行う実験

- 陽子と ^3He 散乱 (4核子系) への展開
- 三核子系散乱から三体核力を決める

①. Repulsive
-Short Range-

②. Attractive (strong)
-Intermediate Range-

③. Attractive (weak)
- Long Range -



Intermediate State
 Δ
—Fujita-Miyazawa—

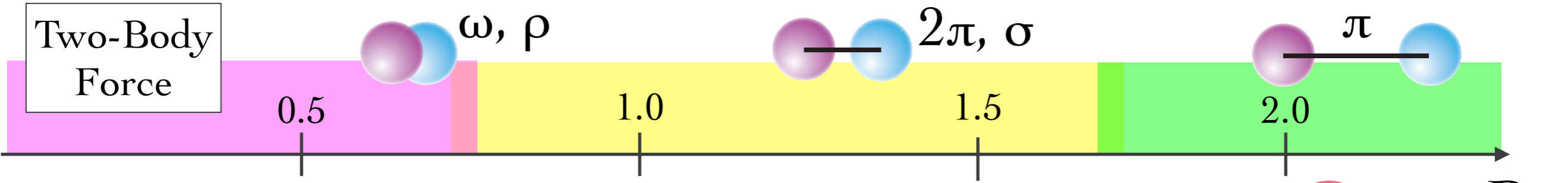
Nuclear Matter
Neutron Star

Nuclear Structure

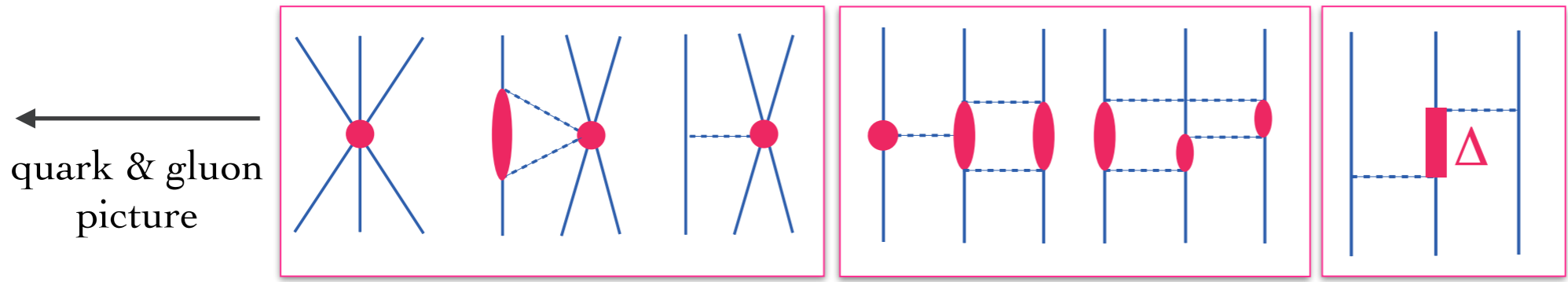
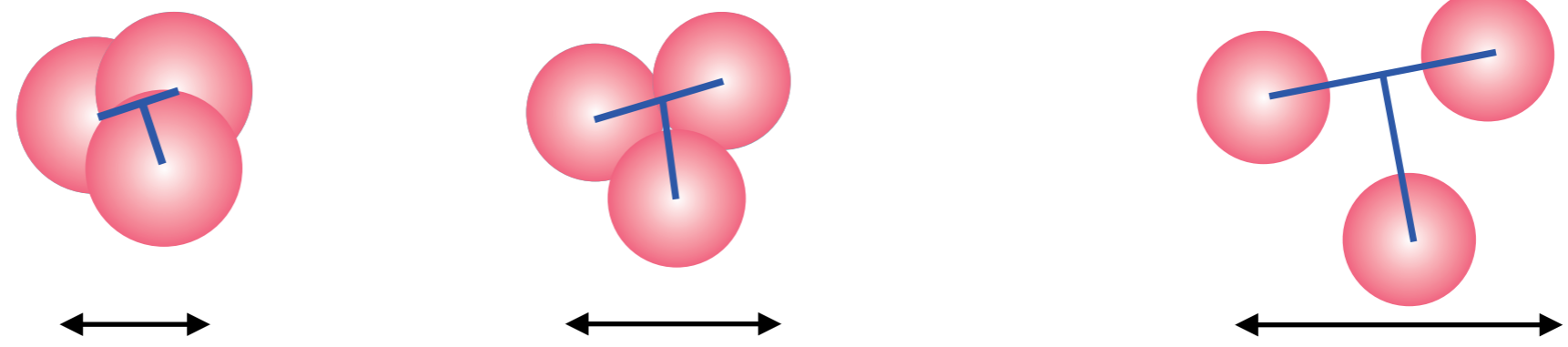
①. Repulsive
-Short Range-

②. Attractive (strong)
-Intermediate Range-

③. Attractive (weak)
- Long Range -



Three-Body Force



Intermediate State
 $N^*, \Delta\Delta$ etc...

$T=3/2$ $3NF$

Intermediate State
 Δ
-Fujita-Miyazawa-

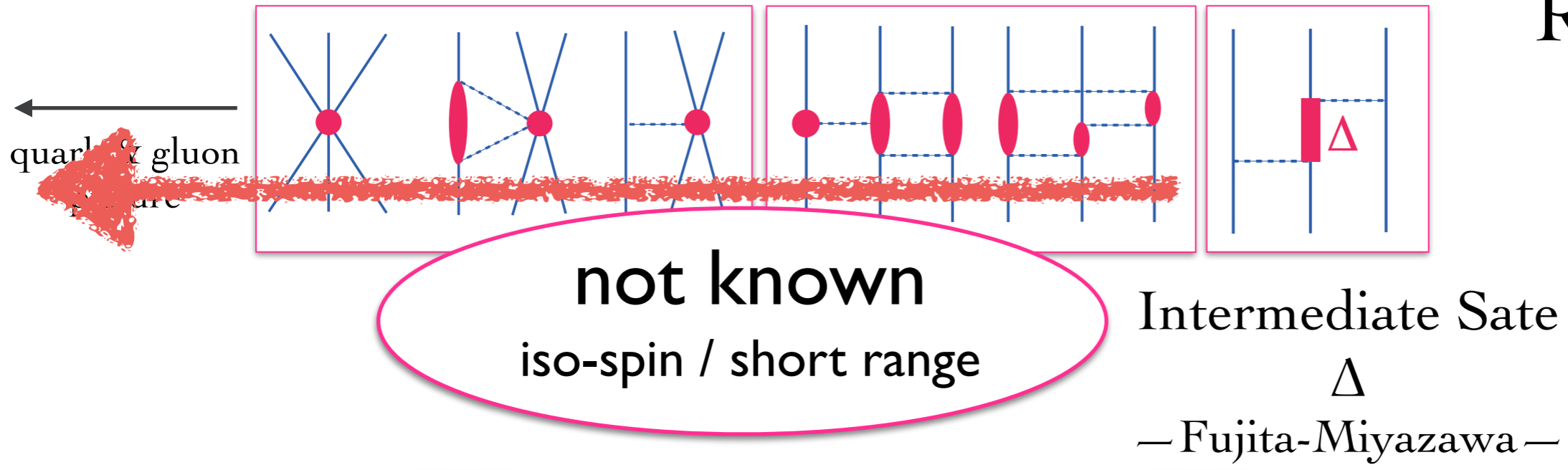
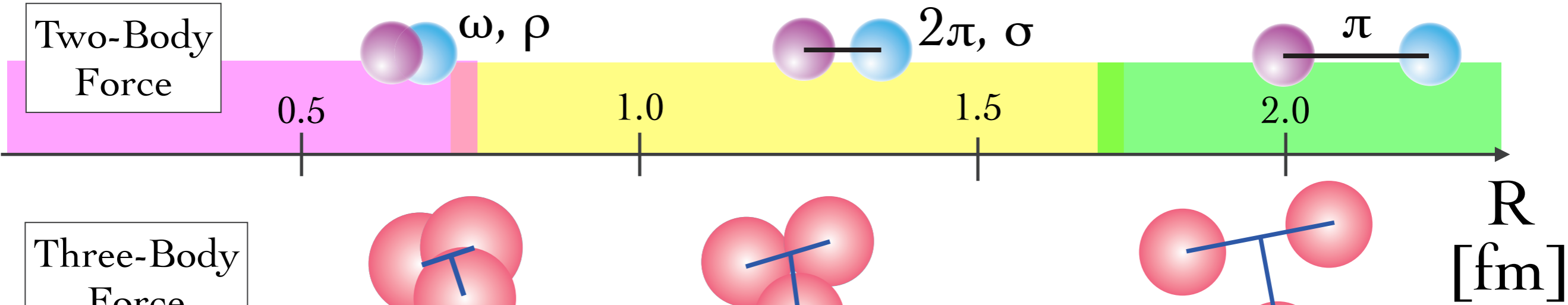
Nuclear Matter
Neutron Star

Nuclear Structure

①. Repulsive
-Short Range-

②. Attractive (strong)
-Intermediate Range-

③. Attractive (weak)
- Long Range -



Nuclear Matter
Neutron Star

Nuclear Structure

陽子- ^3He 散乱への展開

First Step from Few to Many

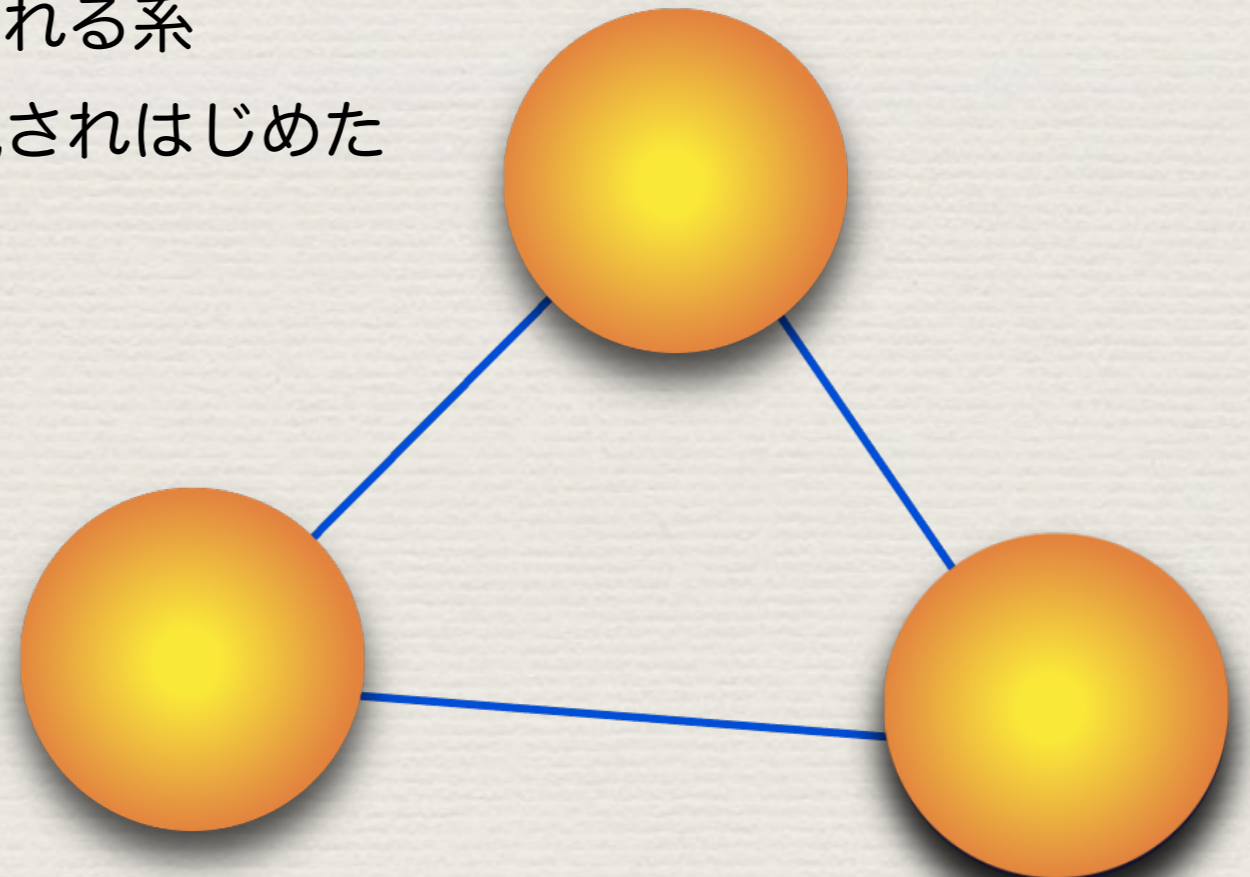
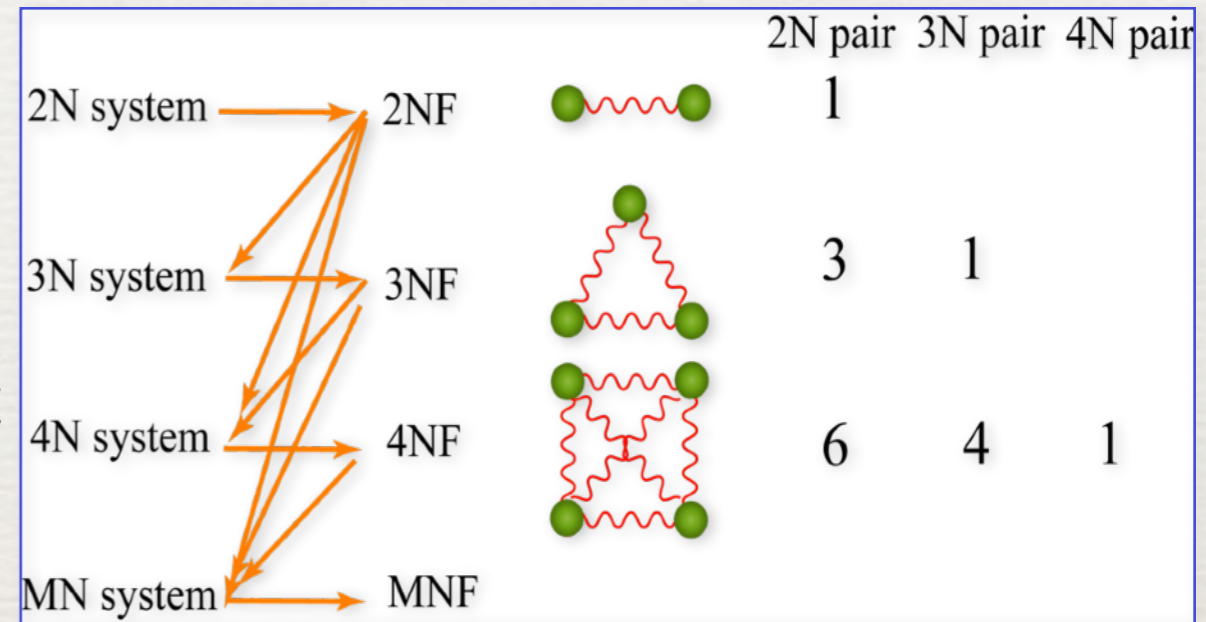
荷電スピン $T=3/2$ の三体力を見たい

➤ 中性子星、中性子/陽子過剰な原子核で重要

陽子-ヘリウム3 散乱系

➤ 三体力の荷電スピン依存性が初めて現われる系

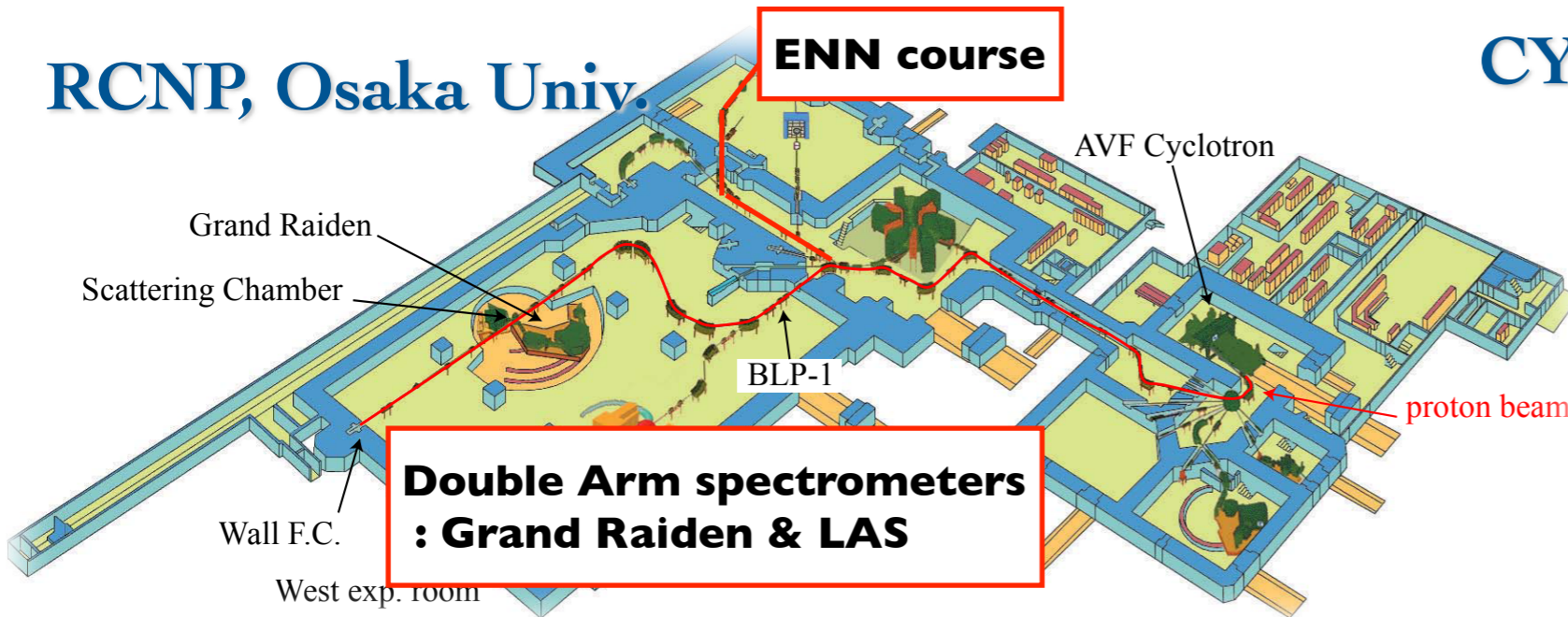
➤ 中間エネルギーでの厳密理論計算が実現されはじめた



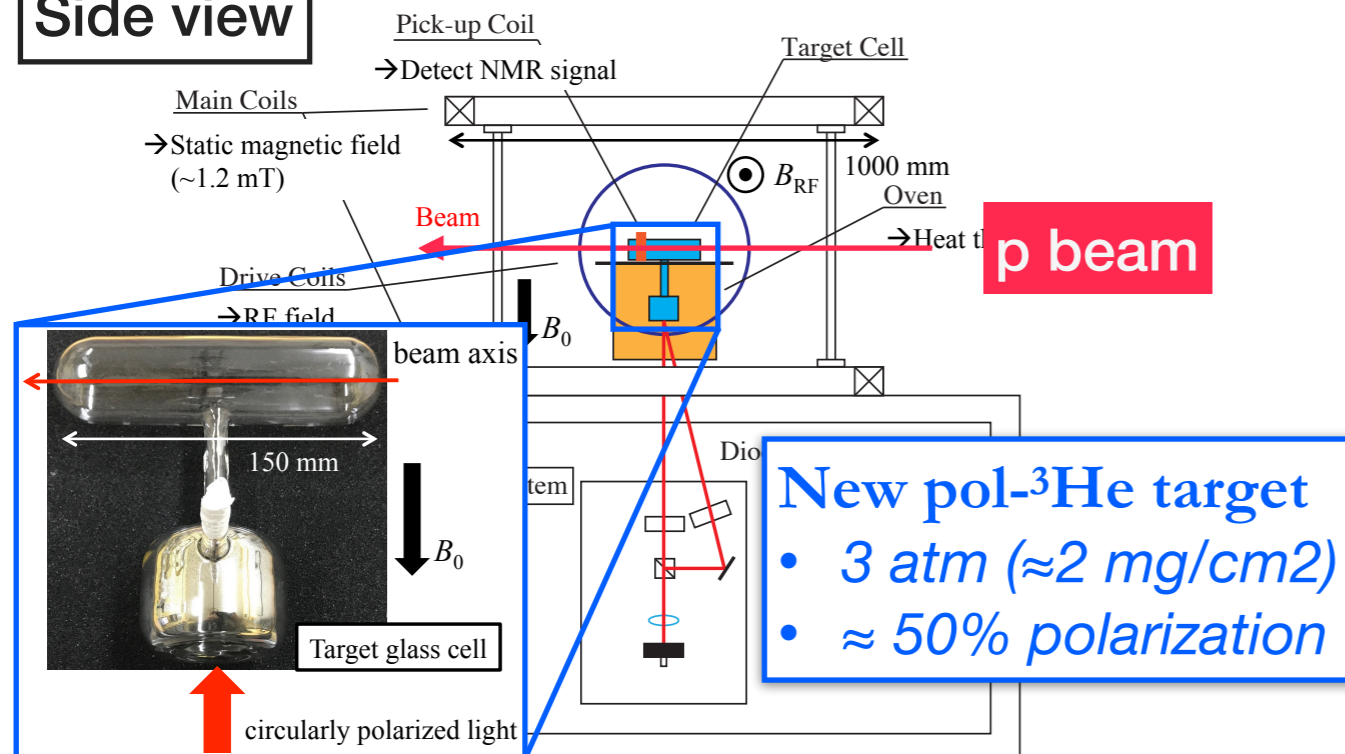
陽子- ^3He 散乱への展開@東北大・阪大

RCNP, Osaka Univ.

CYRIC, Tohoku Univ.



Side view

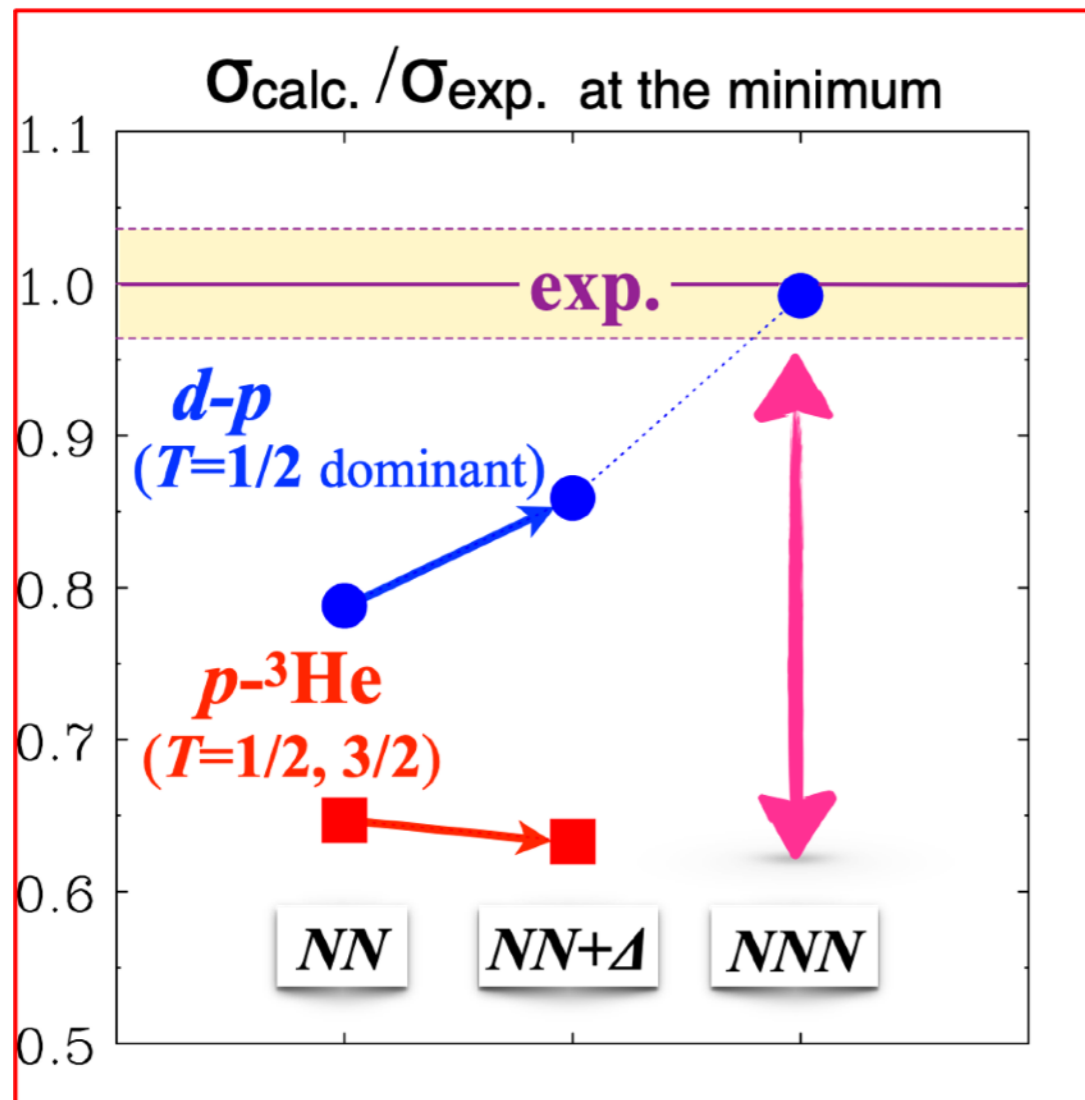


偏極方法：アルカリハイブリット型光ポンピング法

陽子- ^3He 散乱への展開@東北大・阪大

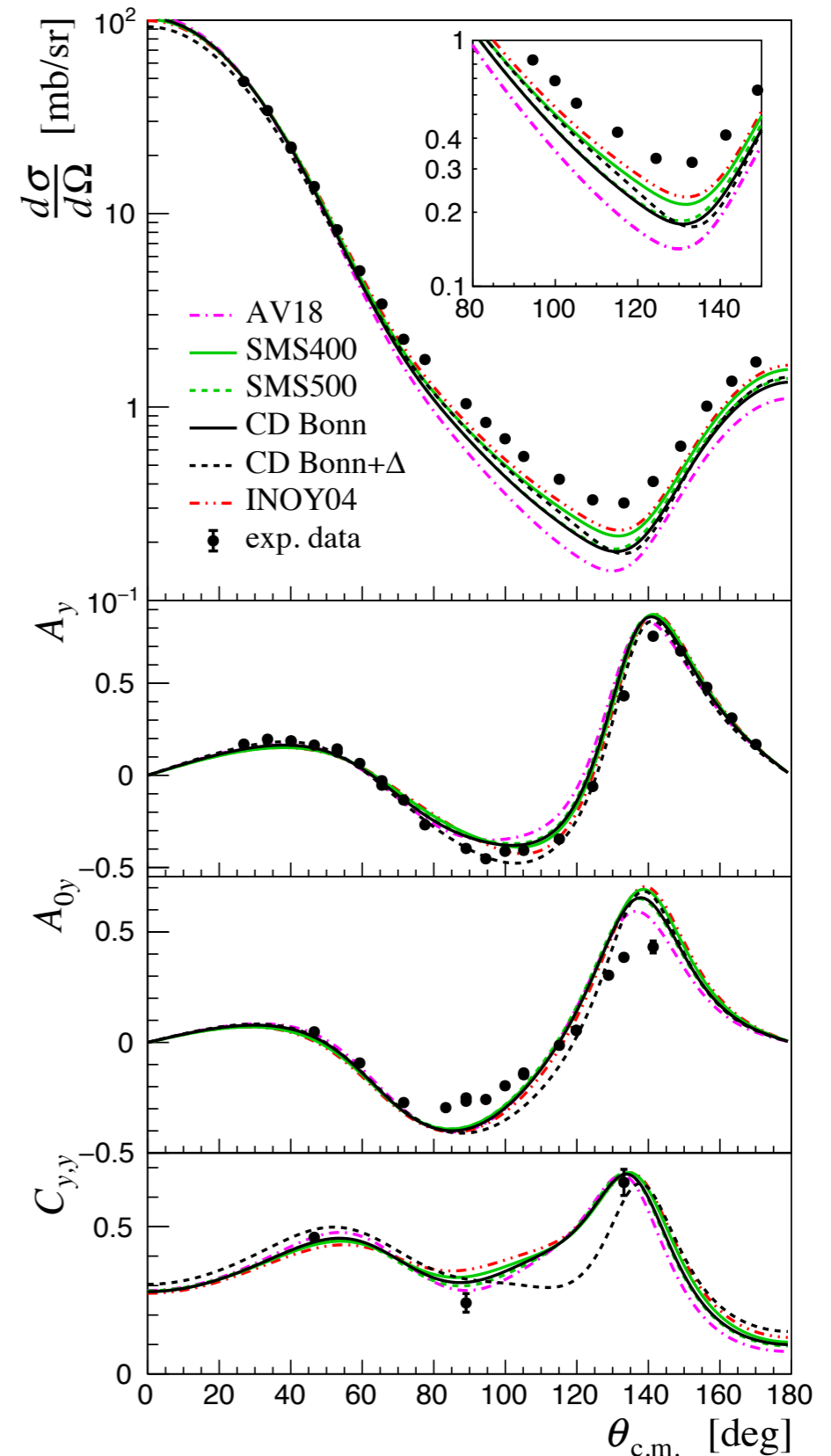
中性子星で働く **三** 体核力を見たい

4核子系では3核子系と異なる
 三体核力効果が現れる事を示唆



A. Watanabe, S. Nakai, Y. Wada, K. Sekiguchi et al.,
 Phys. Rev. C 103, 044001(2021), selected as Editor's
 suggestions

$p+^3\text{He}$ at 65 MeV



三核子系散乱から三体核力を決める

三体核力を含む
核力理論の進展

三核子系散乱実験

三体核力を含む高精度な核力の構築

核力による「原子核が関与する自然現象の記述・理解」の高精度化を加速

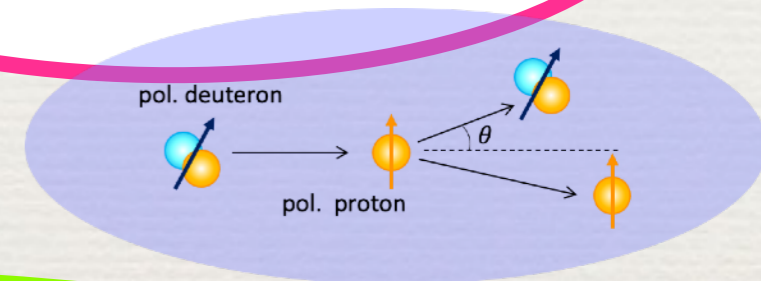
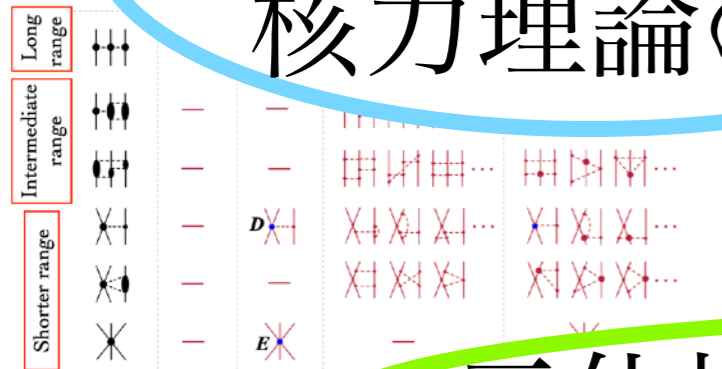
中性子星

元素合成過程

核融合反応

ニュートリノ・核反応

etc...

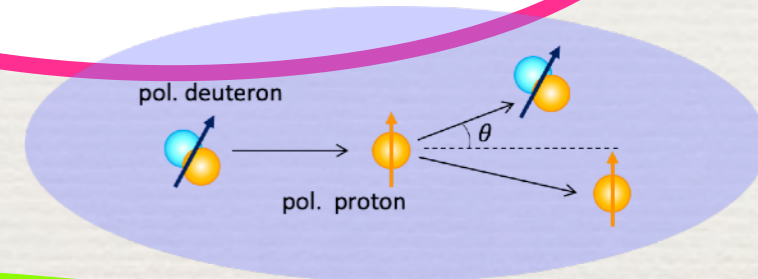
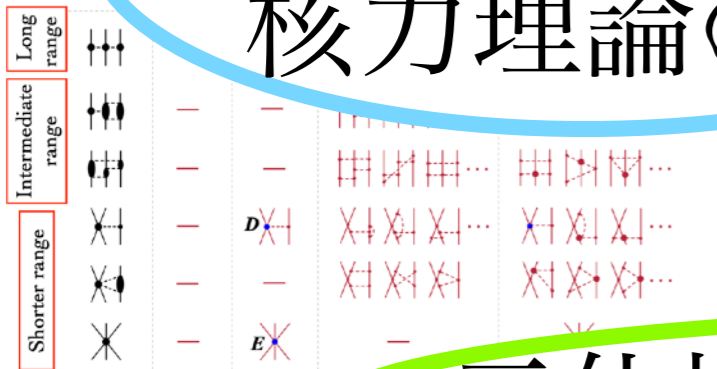


三核子系散乱から三体核力を決める

三体核力を含む
核力理論の進展

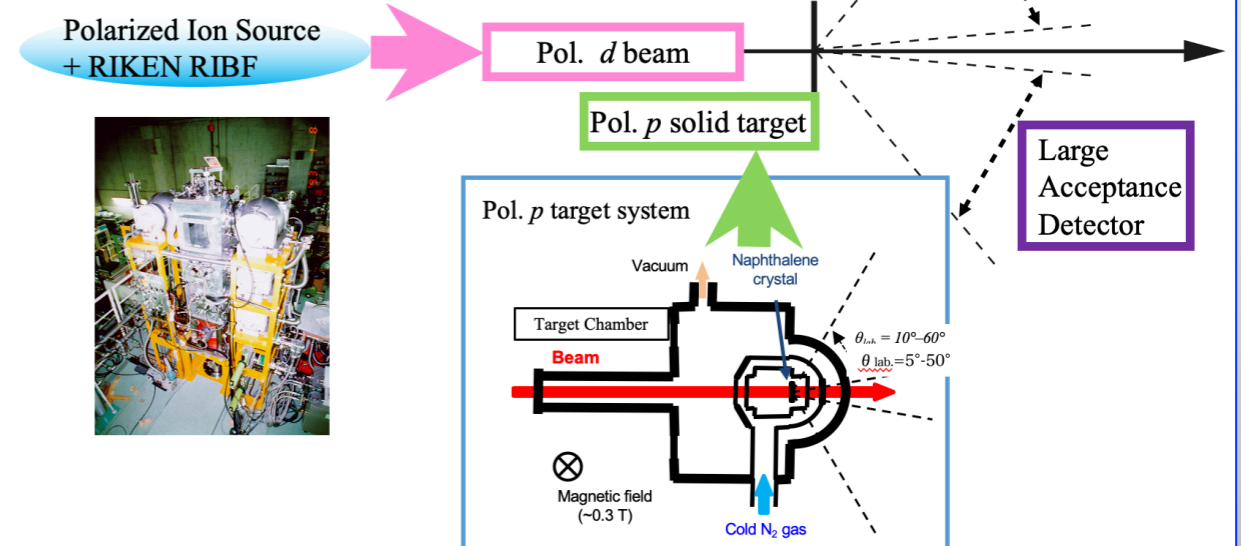
三核子系散乱実験

三体核力を含む高精度な核力の構築



スピン相関係数測定への展開 @ RIKEN RIBF

Observable	50	100	200	300 [MeV/c]
$\frac{d\sigma}{d\Omega}$	•	•••••	•••••	•••••
\vec{p} \vec{n}	•	•••••	•••••	•••••
\vec{d}	•	•••••	•••••	•••••
iT_{11}	•	•••••	•••••	•••••
T_{20}	•	•••••	•••••	•••••
T_{22}	•	•••••	•••••	•••••
T_{21}	•	•••••	•••••	•••••
$\vec{p} \rightarrow \vec{p}$				
$K_x^x K_y^y$				
$K_x^x K_x^x K_x^x$				
$\vec{d} \rightarrow \vec{p}$				
$K_y^y K_y^y$				
$K_x^x K_x^x$				
$\vec{p}\vec{d}$				
$C_{xx} C_{yy} C_{zz}$				
$C_{xz} C_{yz}$				
$C_{xy} C_{yz}$				
$C_{xx} C_{yy} C_{zz}$				



おわりに

原子核を形作るチカラ”核力”の研究は古くて新しい。今、エキサイティングな時を迎えている。

核力研究の最前線

クォークから核力を作る。

三体核力を含む核力で原子核・核物質を理解する。

重陽子・陽子散乱の高精度測定から、

三体核力は「理論の予想」から「定量的な議論」へと進んだ。

三体核力が原子核から中性子星まで、どのような振る舞いをするのか？注視されている。

少数系という実験プローブで「まだ見ぬ面白い三体核力」を見たい。そして三体核力が決まった先に広がる物理を見てみたい。

先人の教えから

To explore the laws of the nature, step in 1 → 2 → 3 .

道生一

一生二

二生三

③ 三生萬物

道經 第四十二章

老子



RIKEN SMART Gr. (~2005)

東京大学理学系研究科

酒井英行、矢向謙太郎、迫田誠太郎、加藤裕允、波田野道夫、齋藤孝明、内ヶ島暢之、笹野匡紀、高橋良幸

東京大学原子核研究センター

上坂友洋、川畑貴裕、坂口聡志、笹本良子

理研仁科加速器研究センター

坂本成彦、大西哲哉、須田健嗣、久保木功浩

大阪大学核物理研究センター

岡村弘之、民井淳

東京工業大学

佐藤義輝

KVI, オランダ

N. Kalantar-Nayestanaki

K. Ermisch

九州大学

若狭智嗣

宮崎大学

前田幸重

埼玉大学

西川純、伊藤圭介

2005年5月撮影



RIBF-*d*. Collaboration (2009~)

Department of Physics, Tohoku University

Y. Wada, A. Watanabe, D. Eto, T. Akieda, H. Kon,
J. Miyazaki, T. Taguchi, U. Gebauer, K. Takahashi, T. Mashiko, K. Miki,
Y. Saito, Y. Maruta, T. Matsui, K. Kameya, R. Urayama

RIKEN Nishina Center

N. Sakamoto, H. Sakai, T. Uesaka, M. Sasano, Y. Shimizu, K. Tateishi

Kyushu University

T. Wakasa, S. Sakaguchi, J. Yasuda, A. Ohkura, S. Shindo, U. Tabata

Miyazaki University

Y. Maeda, T. Saito, S. Kawakami, T. Yamamoto

CNS, University of Tokyo

K. Yako, M. Dozono, R. Tang,
S. Kawase, Y. Kubota, C.S. Lee

RCNP, Osaka University

H. Okamura

Kyungpook National University

S. Chebotaryov, E. Milman

RIKEN RIBF での最初の実験 (2009)



p - ^3He Collaboration

Department of Physics, Tohoku University

Y. Wada, Y. Shiokawa, A. Watanabe, S. Nakai, K. Miki,
T. Mukai, S. Shibuya, M. Watanabe, K. Kawahara, D. Sakai,
T. Taguchi, D. Eto, T. Akieda, H. Kon, M. Inoue, Y. Utsuki,
S. Kitayama, Y. Saito, Y. Maruta, K. Kameya, T. Matsui, R. Urayama

CYRIC, Tohoku University

M. Itoh

KEK

T. Ino

RCNP, Osaka University

K. Hatanaka, A. Tamii, H.J. Ong, H. Kanda,
N. Kobayashi, A. Inoue, S. Nakamura, D. T. Tran

Kyushu University

T. Wakasa, S. Goto, Y. Hirai, D. Inomoto
H. Kasahara, S. Mitsumoto, H. Oshiro

Miyazaki University

Y. Maeda, K. Nonaka

RIKEN Nishina Center

H. Sakai

RIKEN RANS

Y. Otake, A. Taketani, Y. Wakabayashi

NIRS

T. Wakui

RCNP/ENN での実験 (2018)

CYRICでの実験 (2016)



Theoretical Supports from

Ruhr-Universität, Bochum

W. Glöckle, E. Epelbaum

Jagellonian University

H. Witała, J. Gólak, R. Skibinski

Kyushu Institute of Technology

H. Kamada

Forschungszentrum of Jülich

A. Nogga

Hannover University

P. U. Sauer, S. Nemoto

Lisbon University

A. Sa. Fonseca

Vilnius University

A. Deltuva

Hosei University

S. Ishikawa



Bad Honnefにて(2006)