電子線および光子ビームを用いた短距離 核子相関による原子核内核子構造の研究

- 水谷圭吾
- 阪大RCNP

第23回高エネルギーQCD・核子構造勉強会 23-Dec-2024

光子ビームによる核子構造研究



- JLab/Hall D, GlueX検出器を使った実験
- 9 GeV制動放射ガンマ線
- 4πを覆う荷電・中性検出器



- SPring-8/LEPS2検出器を使った実験
- 1.5-2.9 GeV 逆コンプトン散乱ガンマ線
- 10°-120°を覆う荷電検出器。(w/ 側方γ線)





Quark/Gluon-Generalized Parton Distribution



DVCS (DVMP, TCS, ..)

probe the nucleon structure with two quark lines access quark GPDs



Vector meson photoproduction probe the nucleon structure with two gluon lines access gluon GPDs

mass radius



質量半径の測定





Gluon GPDに関連して.. 閾値近傍でのベクトル中間子光生成測定から、質量半径 (グルーオン分布のサイズ)も測定されている









Photoproduction of $\phi(s\bar{s})$ and $J/\psi(c\bar{c})$ near threshold









Photoproduction of $\phi(s\bar{s})$ and $J/\psi(c\bar{c})$ near threshold



 J/ψ photoproduction can be used as a probe of the gluon distribution of the proton \rightarrow mass radius of the proton & D-term can be accessible in the kinematic region where the gluon exchange process dominant. Need to pin down the production mechanism near threshold!



核子および原子核の構造



核子構造の物理 (後藤 et al.)





自由核子構造の研究

- 1960年代、SLACの電子線と核子の弾性散乱により形状因子が測定される。
- ・深非弾性散乱により構造関数が測定、パートン模型が確立。



GPDs

 $x, \xi, ec{\Delta}_{\perp}$

FFs

 Δ_{\perp}^2

一般化パートン分布の測定がJLab, COMPASS/AMBER@CERN, J-PARCを中心に進行中。

5次元相空間でのパートン分布 The mother distribution/Wigner関数 原理的には核子のすべての物理量を この分布から導出可能

(2+1)次元の一般化パートン分布 [次ページ]









パートンの横方向の空間分布



quark GPD .. Deeply Virtual Compton scattering (DVCS)







自由核子の研究はよく進んでいる。では原子核中での核子の構造は?

There are a number of fundamental unanswered questions about nuclear physics. (1) Is the nucleus really made of nucleons and mes-

- ons only?
- quarks and gluons?

(3) How does the partonic content of the nucleus differ from that of N free neutrons plus Z free protons? No one asked such questions before the discovery of the EMC effect. Or Hen et al., RMP 89, 045002 (2017)

原子核内でのハドロンの質量変化の研究はあるが、構造変化の研究は少ない またEMC効果という大きな謎も。

(2) How does the nucleus emerge from QCD, a theory of



















EMC効果

1983年にCERNのEMC(European Muon Collaboration)によって、鉄や鉛などの重い原子核中の核子 の構造関数が、自由な陽子や中性子の構造関数に比べて変化していることが示された。 → 原子核内の核子のクォーク分布が変化している。 核内の全ての核子の構造が変化しているのか?一部の核子のみか?メカニズムは?





波動関数が重なりあっている短距離相関(Short Range Correlation, SRC) 対を構成する核子なら、構造が変化していても自然か? → JLab/CLASによるSRC解析







SRCに関して分かっていること

原子核中での核子の運動量分布





2核子ノックアウト反応の角度相関

¹²C(p,2pn)测定@BNL



核内運動量の大きいSRC核子が、対で存在しているという描像が良くなり立つ。







pp対, nn対, np対





15



モデル非依存の F_2^n が無いため以下の関係式を用いて式変形 $F_2^p, F_2^d \to F_2^d - F_2^p - n_{SRC}^d (\Delta F_2^p + \Delta F_2^n)$ 唯一の現象論的パラメータ ($n_{
m SRC}^A$ に対応。核子がnp対中にいる確率)

CLAS, Nature **566**, 354 (2019)









2核子弾性散乱領域でのSRC対密度の決定

$$F_{2}^{A} = Z \cdot F_{2}^{p} + N \cdot F_{2}^{n} + n_{SRC}^{A} \cdot (\Delta F_{2}^{p} + \Delta F_{2}^{n})$$

$$\frac{F_{2}^{A}}{R_{SRC}^{d} \cdot (\Delta F_{2}^{p} + \Delta F_{2}^{n})} = \frac{F_{2}^{A}}{F_{2}^{d}} - (Z - N) \cdot \frac{F_{2}^{p}}{F_{2}^{p}} - N^{p}$$

$$\frac{R_{SRC}^{d} \cdot (\Delta F_{2}^{p} + \Delta F_{2}^{n})}{F_{2}^{d}} = \frac{F_{2}^{A}}{(A/2) \cdot a_{2}} - N$$

$$\frac{R_{SRC}^{d} \cdot (\Delta F_{2}^{p} + \Delta F_{2}^{n})}{F_{2}^{d}} = \frac{F_{2}^{A}}{F_{2}^{d}} = \frac{F_{2}^{A}}{F_{2}^{d}} = \frac{F_{2}^{A}}{F_{2}^{d}} + \frac{R_{2}^{A}}{F_{2}^{d}} + \frac{R_{2}^{A}}{F_{2}^{A}} + \frac{R_{2}^{A}}{F$$



核子あたりのSRC対密度の比(重陽子に対する) $a_2(A) = \frac{2}{A} \frac{\sigma_A(x_B, Q^2)}{\sigma_d(x_B, Q^2)}$

上式は1.5 < x_B < 2の弾性散乱領域で有効



Fig 1 | DIS and QE (e,e') Cross-section Ratios. The per-nucleon cross-section ratios of nucleus with atomic number



CLASによるSRC解析とEMC効果



このA依存性が「EMC効果」



- np-SRC対中の構造関数のみ修正している(最小限)
- フリーパラメータ無し! $(a_2$ は弾性領域のデータから。)



CLASの主張まとめ

- Similarly, the relative probability for a nucleon to belong to an SRC ng pair is interpreted as equal to a_2 , which denotes the average ratio nat of the inclusive quast-elastic electrop scattering tross-section per vill nucleon of nucleus A to that of deuterium at momentum transfer^{1,11–15} $Q^2 > 1.5 \text{ GeV}^2$ and $1.45 \le x_B \le 1.9$ (see Supplementary Appformation ge section III). nal 0.03 the nuclear effects are expected to be new igible. The contribu-, a tion of three-nucleon SRCs should be an order of magnitude smaller h-a than the SRC-pair contributions. The contributions of two-body currents (called 'higher-twist effects' in DIS) sh ld also be END 効果は、原子核中の短距相関核子が一時的に Figure 1 showed DIS and quasi-elastic cost section ratios for scattering off a solid target relative to deuterin as a function of *x*_B. uale The red lines are fits to the data that are used determine 都位外住方は弾性散乱領域の測定から予言可能 Typical Mechanizertion nonentializertion nonentializertion of 1%-2% ant direon Company in the set of the ere introckice negretable uncertainty in the ANQ slope. Note of the ratios presented has isoscalar corrections (cross-section corrections for une- ν). by qual numbers of protons and neutrons), in contrast to much published nd data. We did not apply such corrections for two reasons: (1) to focus ng



208



19





ほぼ全てのSRCデータは電子線ビームを使って得られている。 * 結果の解釈が、背景プロセスの理解度に依存 → 大きな不定性 * SRC現象はプローブ(やエネルギー)によらない普遍的な現象。他プローブでの検証が不可欠 Photon-inducedなSRC測定が、背景プロセスの理解、扱いに対する強い制限を与える

光子ビームによるSRC測定



これらの背景プロセスは電子線と光子ビームで大きく異なる。 MECは光子ビームだとtransverse response functionが支配的であることが知られている 反跳核子が後方に散乱される光子ビーム測定では、FSIの効果が小さくなることが期待される(?)

21

光子ビームによるSRC測定



np対-pp対比やそのA依存性など、電子線での測定(&解釈)を光子ビームでも確認することがまず重要





光子ビームによるSRC測定



- JLab/Hall D, GlueX検出器を使った実験
- 9 GeV制動放射ガンマ線
- 4πを覆う荷電・中性検出器
- d, ⁴He, ¹²Cデータ取得済。解析中



- SPring-8/LEPS2検出器を使った実験
- 1.5-2.9 GeV 逆コンプトン散乱ガンマ線
- 10°-120°を覆う荷電検出器。(w/ 側方γ線)
- feasibility確認のための原子核標的データを取得





on light nuclei and did not determine the shape of the modification ratios for $0.3 < x_{\rm R} = 0.7$ (see Supplementary function. Similar ideas using factorization were discussed in ref.¹, such as a model-dependent ansatz for the modified stougture functions

<u> </u>	1 4 1	- ble to describe the EMC'd
p reactions	n reactions	wledge is the first d
$\gamma p ightarrow \pi^0 p$	$\gamma n ightarrow \pi^- p$	e functions for nucle:
$\gamma p o \pi^- \Delta^{++}$	$\gamma n ightarrow \pi^- \Delta^+$	nodel-independent
$\gamma p ightarrow ho^0 p$	$\gamma n ightarrow ho^- p$	to the deuterc
$\gamma p o K^+ \Lambda$	$\gamma n o K^0 \Lambda$	F_2^n). We then rearra
$\gamma p o K^+ \Sigma^0$	$\gamma n o K^0 \Sigma^0$	лA
$\gamma p ightarrow \omega p$	$\gamma n ightarrow K^+ \Sigma^-$	ΔF_2^n $\frac{F_2^n}{F_2^d} - (Z-I)$
$\gamma p o \phi p$	$\gamma n \rightarrow K^{-}\Sigma^{+}$	$\frac{-12}{2} = \frac{12}{(A/2)a} = N$
		$ \operatorname{proton}^*\rangle = \alpha_{\mathrm{pr}}^* \alpha_1^{\dagger}$
where F_2^F/F_2^{μ} has been previously extracted ²⁸ and r		
per-nucleon cross-section ratio shown by the red		

red lines in Fig. 1e–h. 核子を異な**とす。 SRC-pair density ratio between nucleus A and deuterium^{1,11-15}: 原子核中で核子の状態が変化したとき、フォックベクトル(ケットベクトル)は変化曲ず、その係数が変更** Ref. ¹⁰ Because $\Delta F_2^p + \Delta F_2^n$ is assumed to be nucleus-independent, our を受ける。 This work 0.6 原子核中と目前では、that the left-hand side of equation (2) should be a uni-原子核中と目前で聞いて、(that is, the same for all nuclei). This requires that the れた係数」の情報にアクセスできる。 (ただ現在の企感-Tepe分岐地が飛客でおる低比理論が整備すれてい(2ない) combine to give a nucleus-independent result. 0.4 ope This is tested in Fig. 2. The left panel shows

This model resembles that used in ref. However, that work focused C'data²⁷. The analysis



will enable direct quantification of the relationship tum Fand the structure function the differention of b The universal SRC-pair modification function extract the free Neutron to Aproto Astructure-fun gpplying equation (1) to the genteron and using the second secoand deuteron structure functions (see Extended tion to its own importance, this F_2^n can be used to isoscalar corrections to the EMC effect data (Information equation (5)).

To further test the SRC-driven EMC model, we bic nature of SRC pairs (that is, *np* dominance approximately constant probability for a neutron pair in medium-to-heavy nuclei, while the increases²² as N/Z. If the EMC effect is indeed drive tum SRCs, then in neutron-rich nuclei both the $\sum_{C} |PLC\rangle + \alpha_{3qg}^* |3q + aggle the SRC propagatility should a function of a should grow with nuclear mass and neutron exactly a should grow with nuclear mass and neutron exactly a should grow with nuclear mass and neutron exactly a should grow with nuclear mass and neutron exactly a should grow with nuclear mass and neutron exactly a should grow with nuclear mass and neutron exactly a should grow with nuclear mass and neutron exactly a should grow with nuclear mass and neutron exactly a should grow with nuclear mass and neutron exactly a should grow with nuclear mass and neutron exactly a should grow with nuclear mass and neutron exactly a should grow with nuclear mass a should grow with should grow with nuclear mass$













- 核子構造が原子核中で変化することが知られている(EMC効果, 1983-)
- ることでEMC効果が説明できるという主張がなされた
- 要になる
- LEPS2の2 GeVビームで検討中である

• JLab/CLASのSRC解析により、np SRC核子の構造関数が核種によらず普遍的に変化す

またこの変化量は自由パラメータではなく、弾性散乱領域の測定値から決まる

• CLASの解釈は背景プロセスの理解に依存しており、別プローブ(光子)での測定が重

光ビームでの測定は、JLab/Hall Dの8 GeVビームで測定済み(解析中)、SPring-8/

