

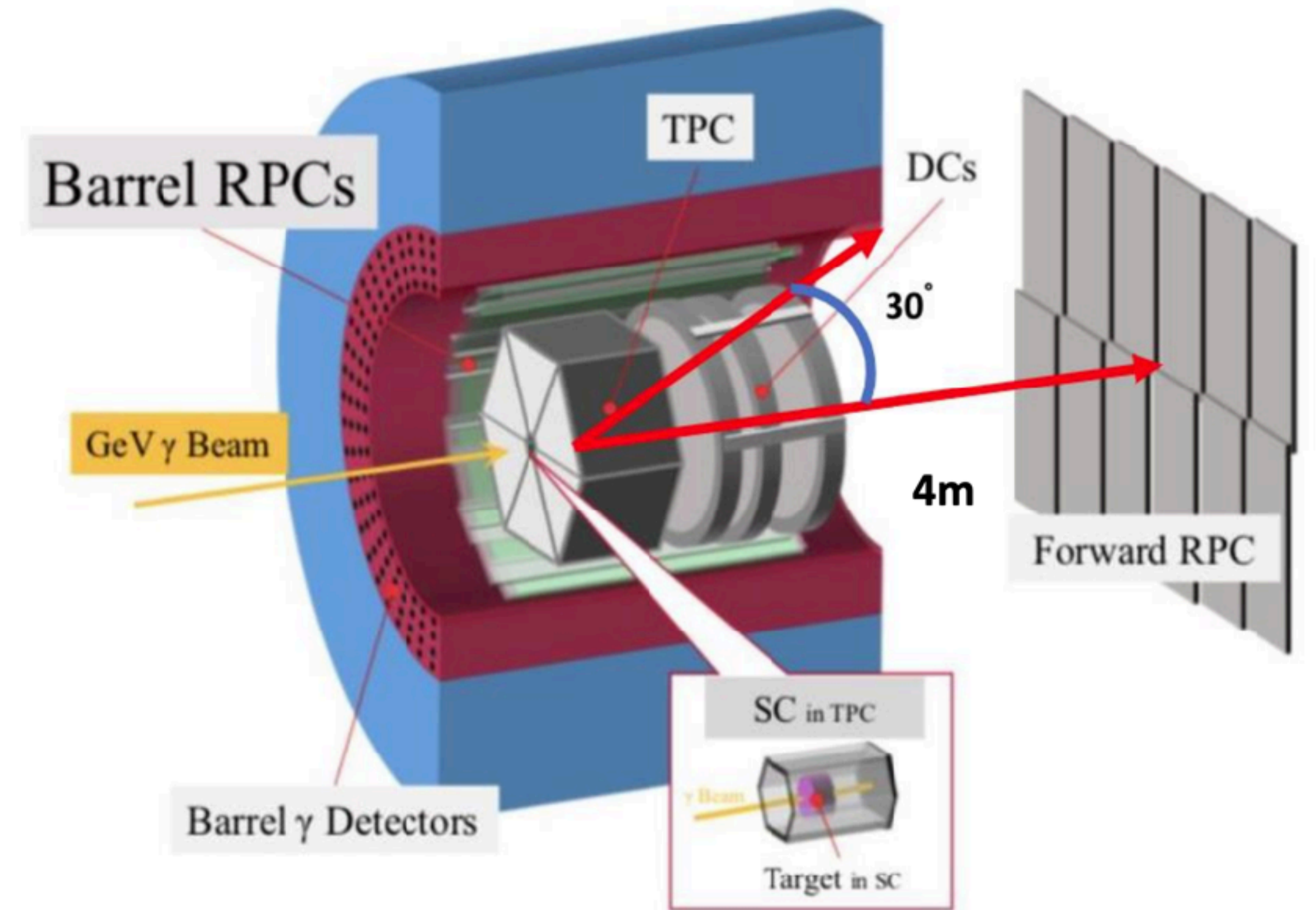
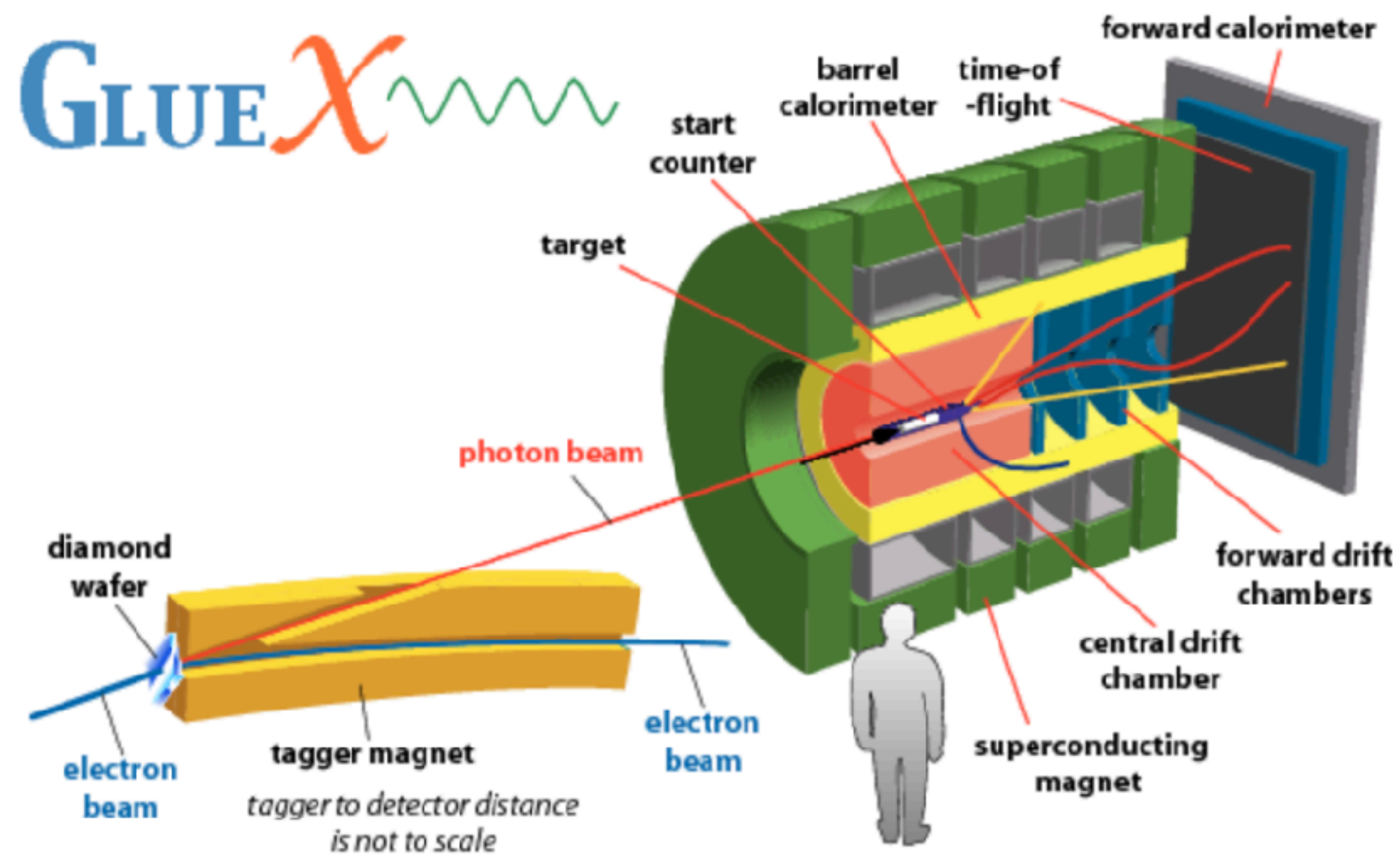
電子線および光子ビームを用いた短距離 核子相関による原子核内核子構造の研究

水谷 圭吾

阪大RCNP

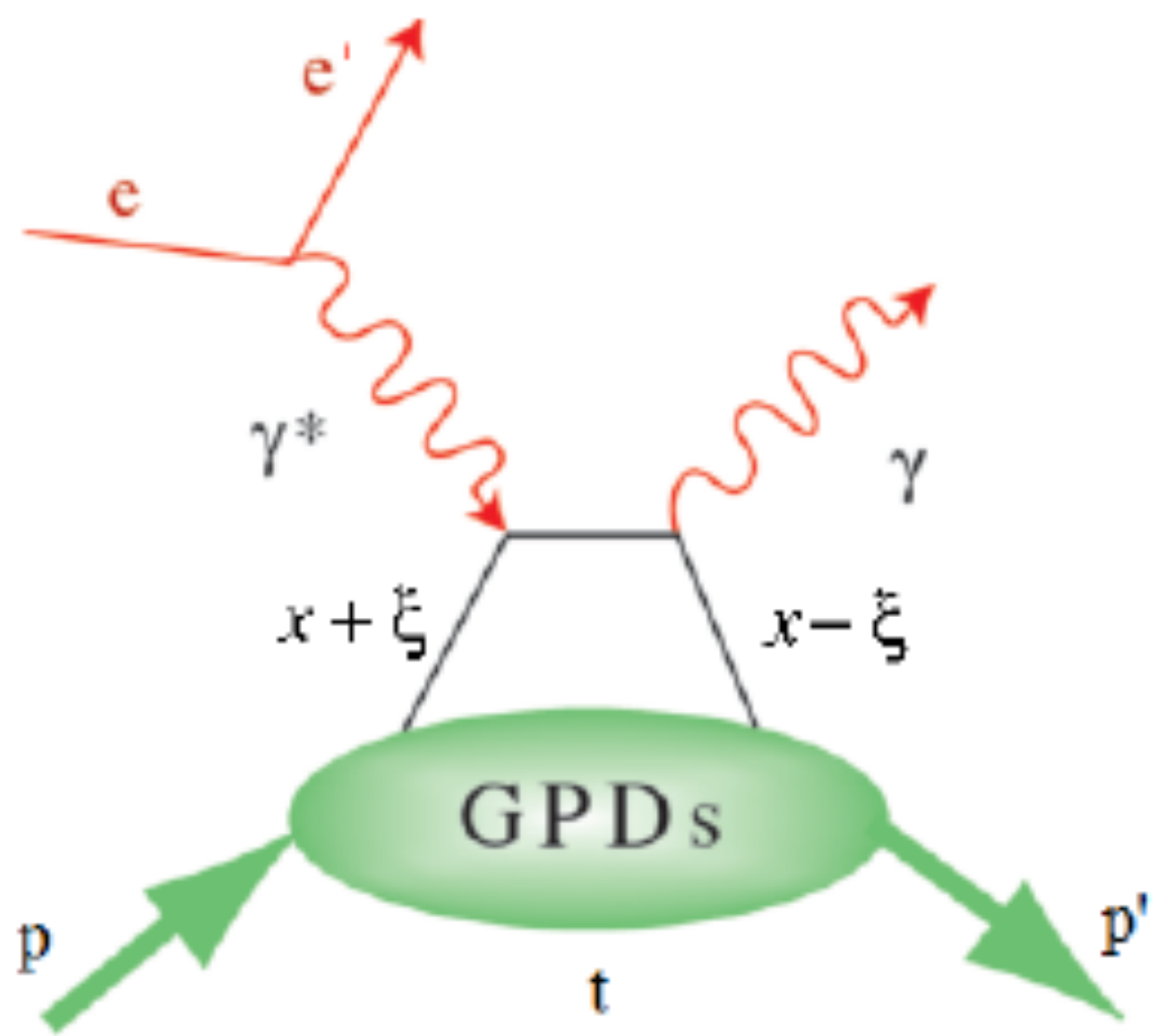
第23回高エネルギーQCD・核子構造勉強会

23-Dec-2024

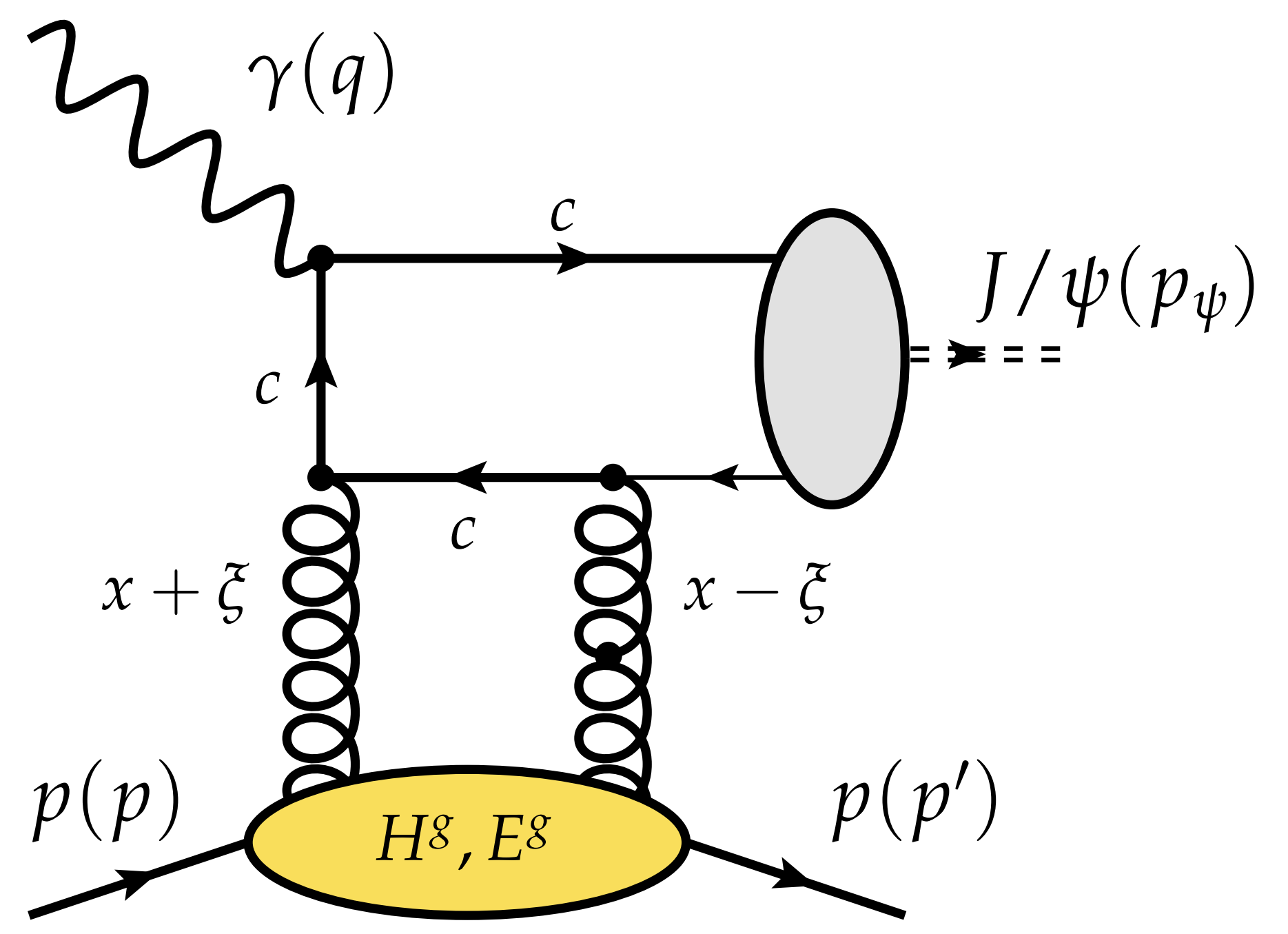


- JLab/Hall D, GlueX検出器を使った実験
- 9 GeV制動放射ガンマ線
- 4π を覆う荷電・中性検出器

- 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)

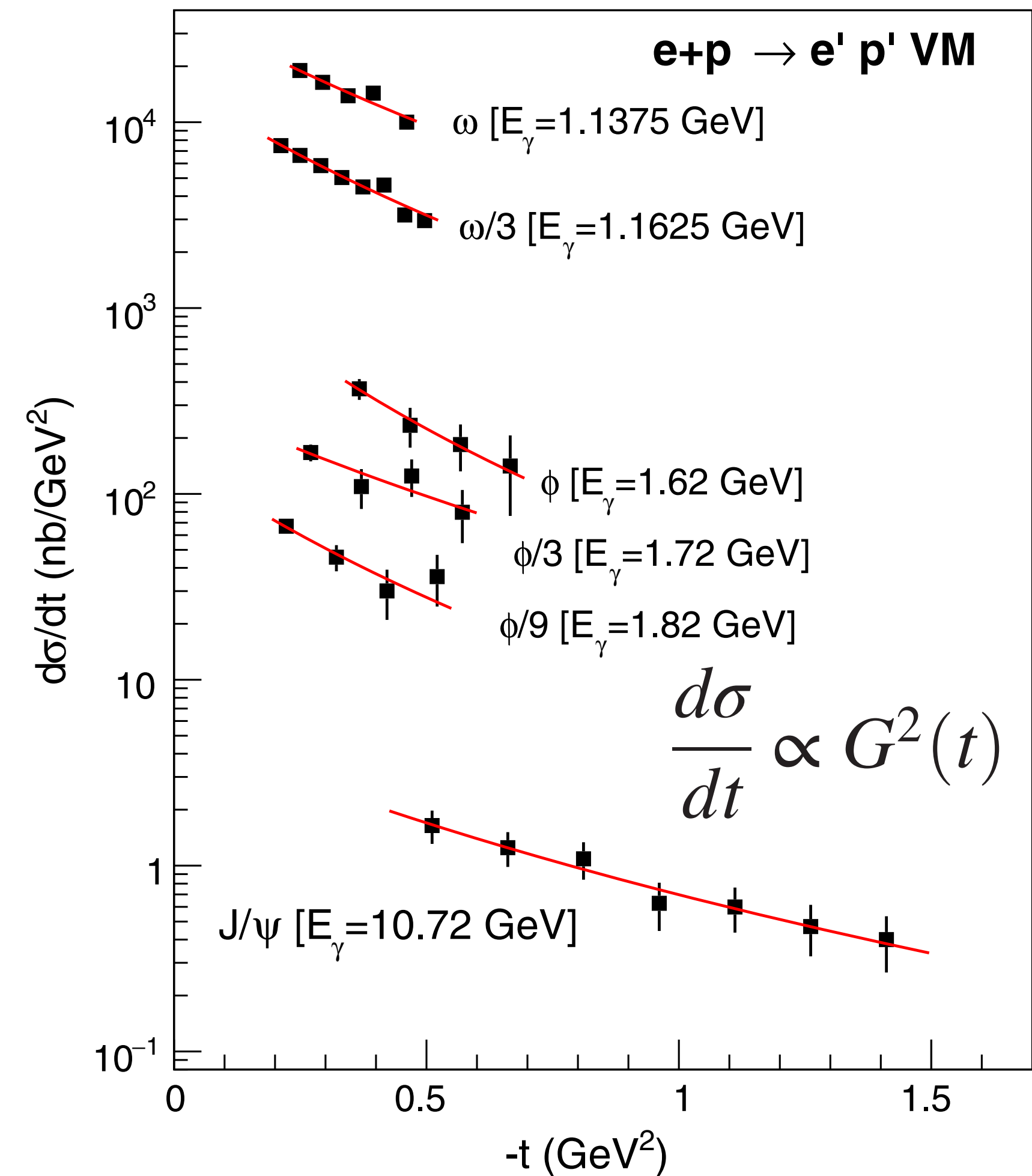


DVCS (DVMP, TCS, ..)
probe the nucleon structure with two **quark** lines
access **quark** GPDs



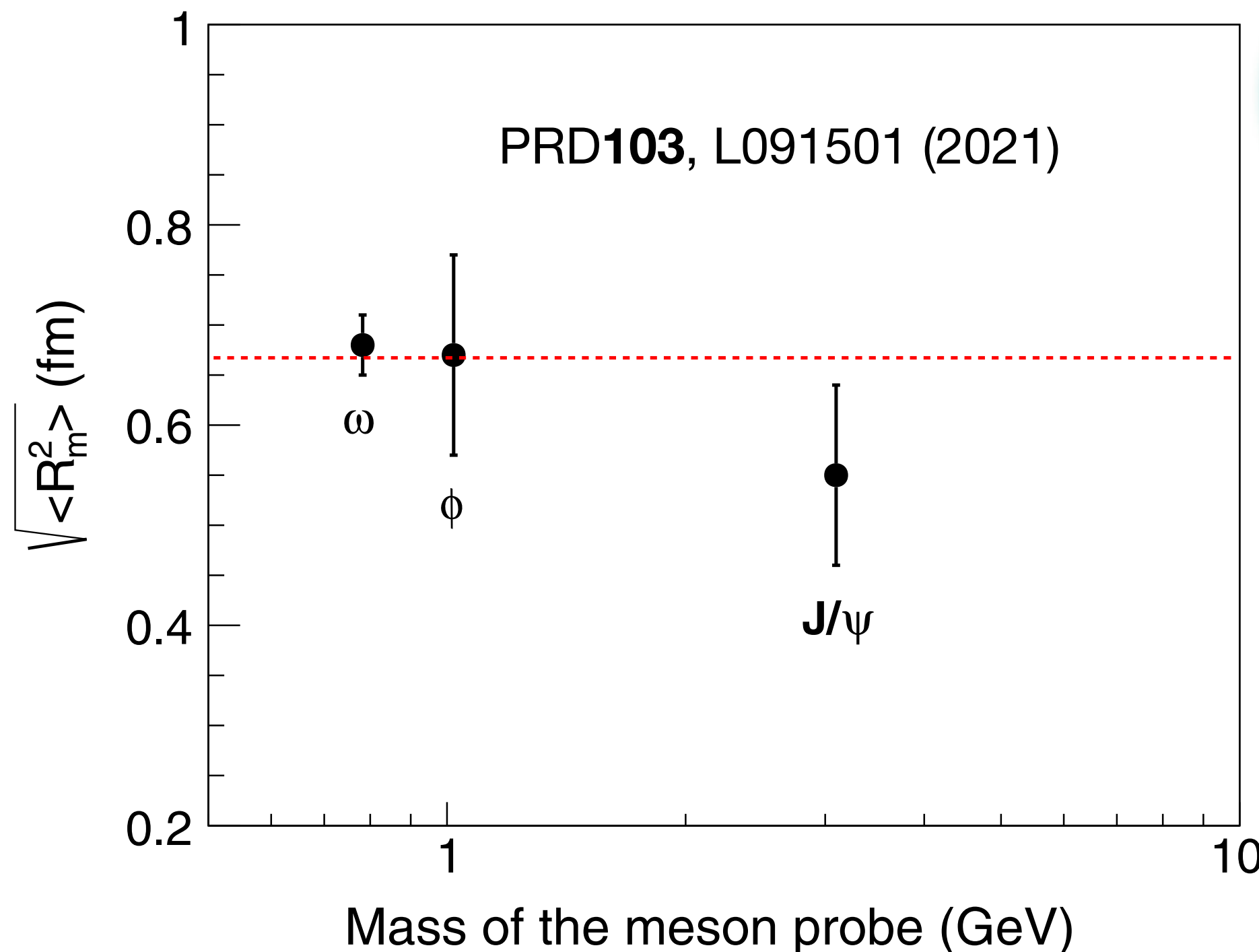
Vector meson photoproduction
probe the nucleon structure with two **gluon** lines
access **gluon** GPDs

mass radius



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



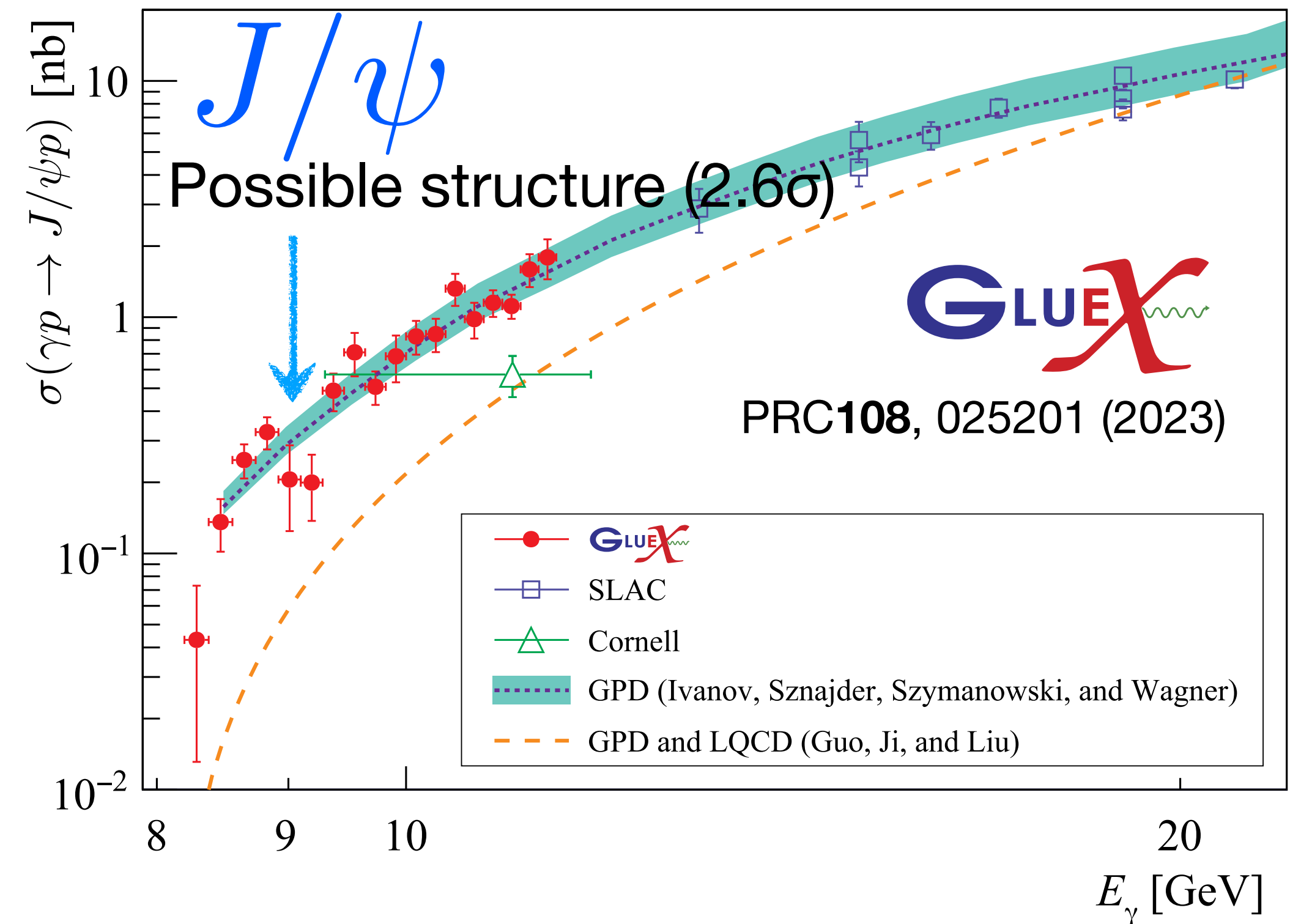
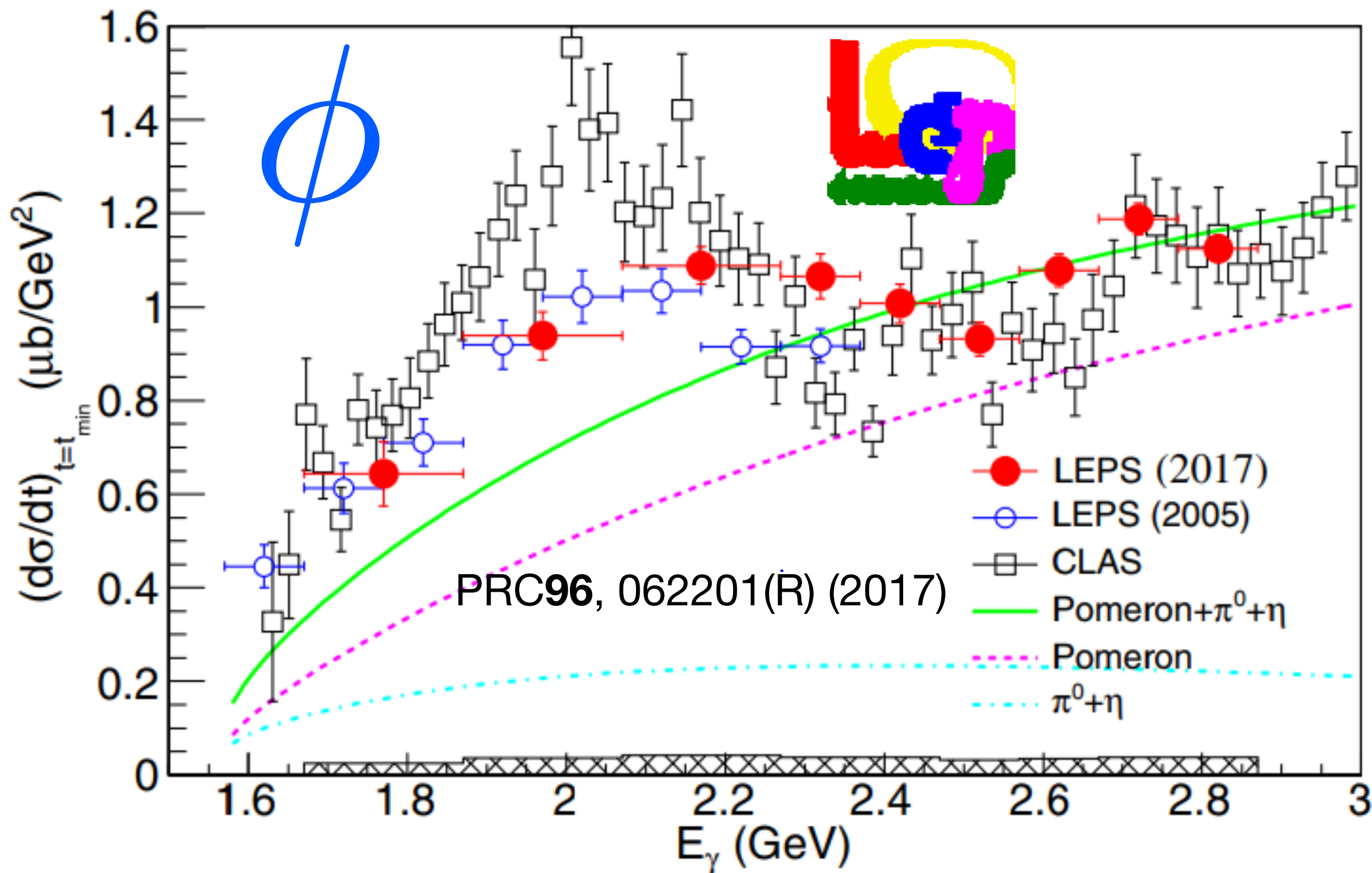
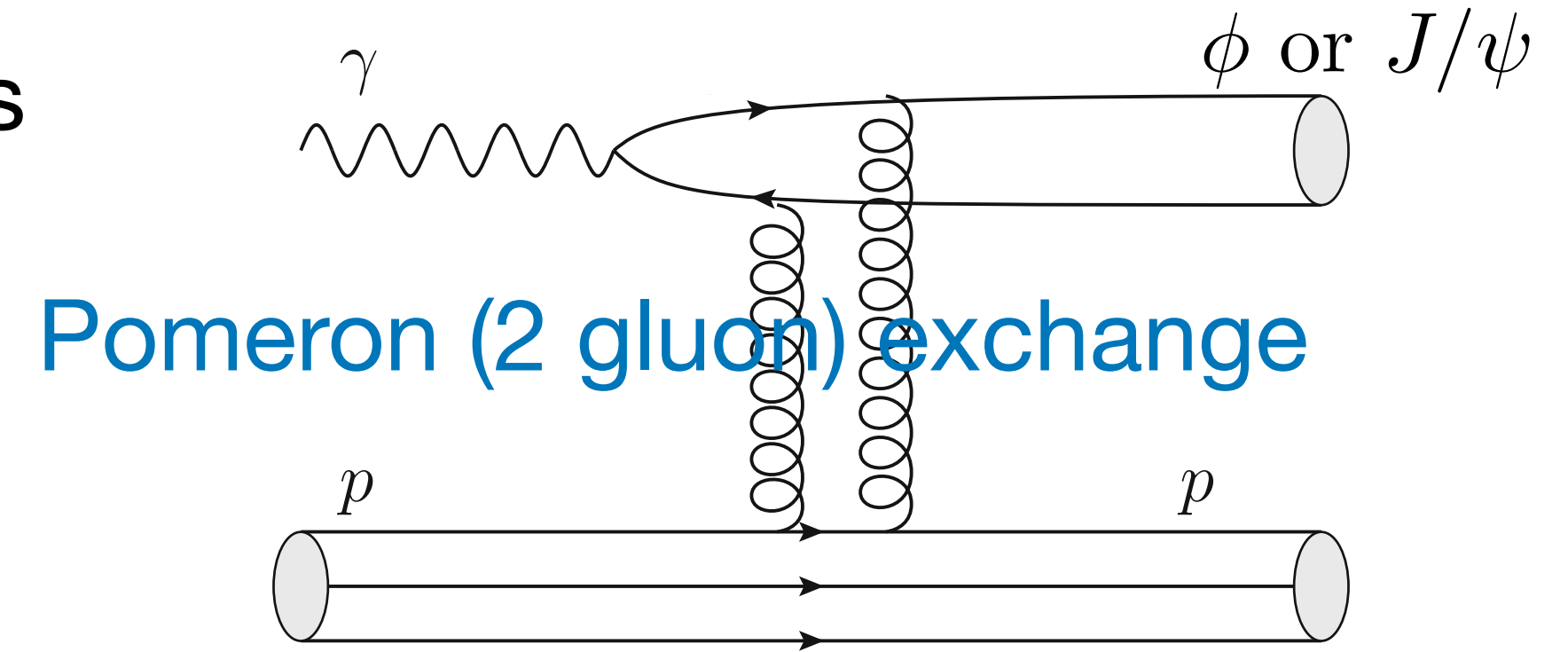
ダイポール型のスカラー重力形状因子

$$G(t) = \frac{M}{(1 - t/m_s^2)^2} \quad \langle R_m^2 \rangle = \frac{12}{m_s^2}$$

質量半径 R_m は陽子の荷電半径 $R_c = 0.8409 \pm 0.0004 \text{ fm}$ に比べて小さい。グルーオンコア？ π の雲？

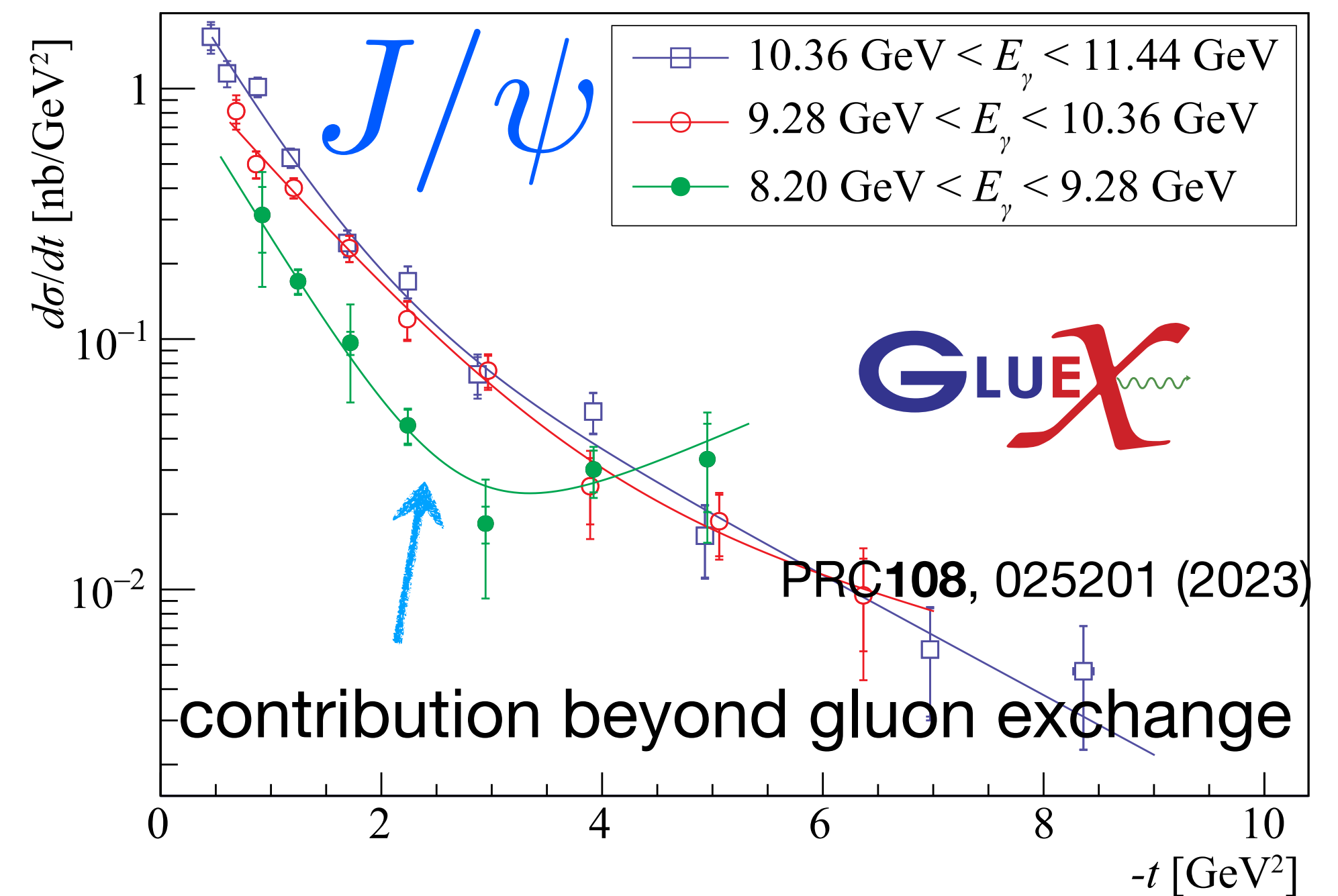
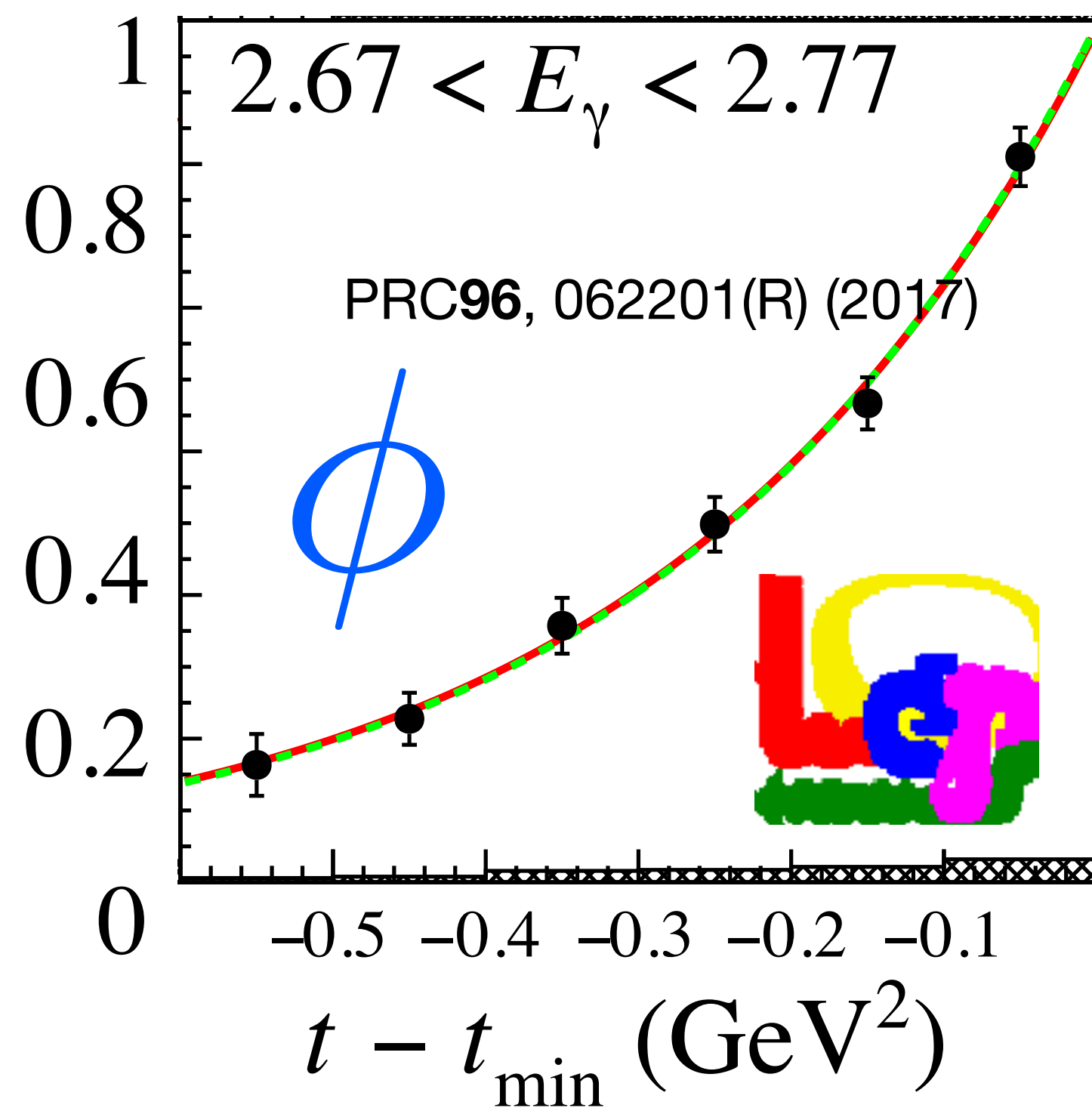
If the t-channel process is dominant, the photoproduction cross section can be written as:

$$\frac{d\sigma}{dt} = \left(\frac{d\sigma}{dt} \right)_{t=t_{\min}} \exp(-B|t - t_{\min}|)$$



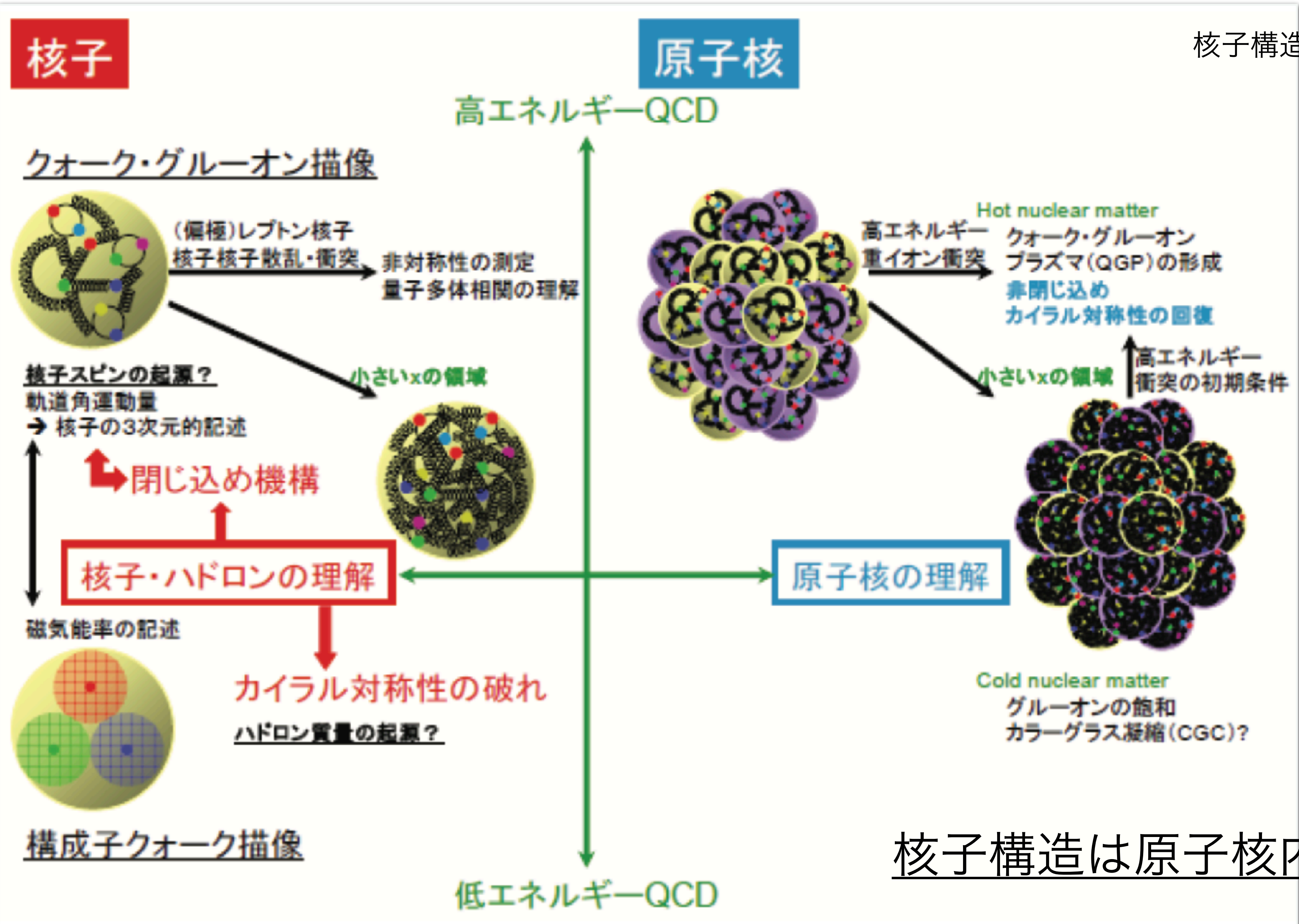
Non-monotonic structures are observed near threshold both for $\phi(s\bar{s})$ and $J/\psi(c\bar{c})$, which cannot be explained by the Pomeron (& meson) exchange in the t-channel.

- For $\phi(s\bar{s})$, differential cross section $d\sigma/dt$ follows the exponential t dependence: $\frac{d\sigma}{dt} = \left(\frac{d\sigma}{dt}\right)_{t=t_{\min}} \exp(-B|t - t_{\min}|)$
- For $J/\psi(c\bar{c})$, non-exponential dependence is seen in the energy slice closest to the threshold (8.2 GeV)



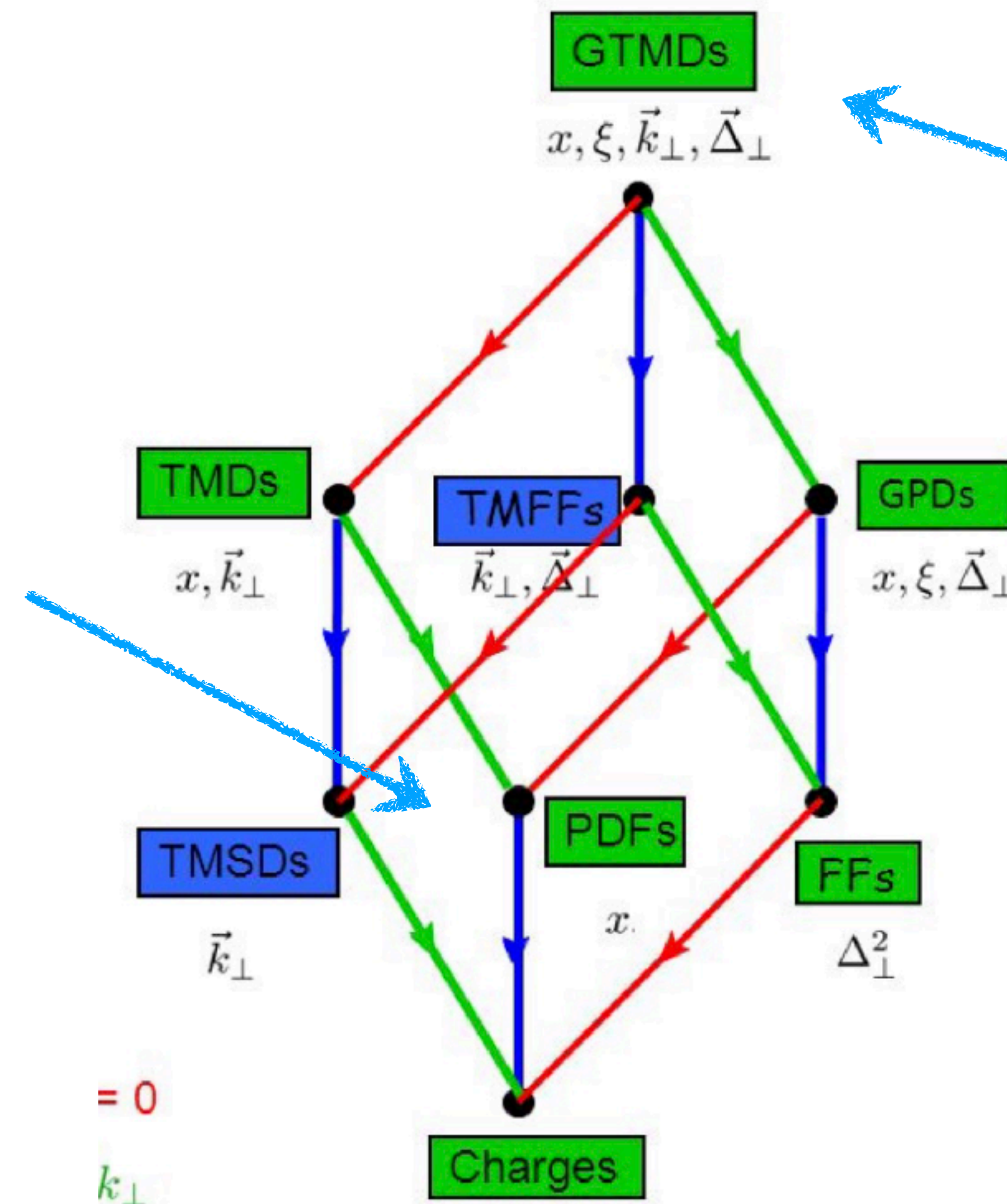
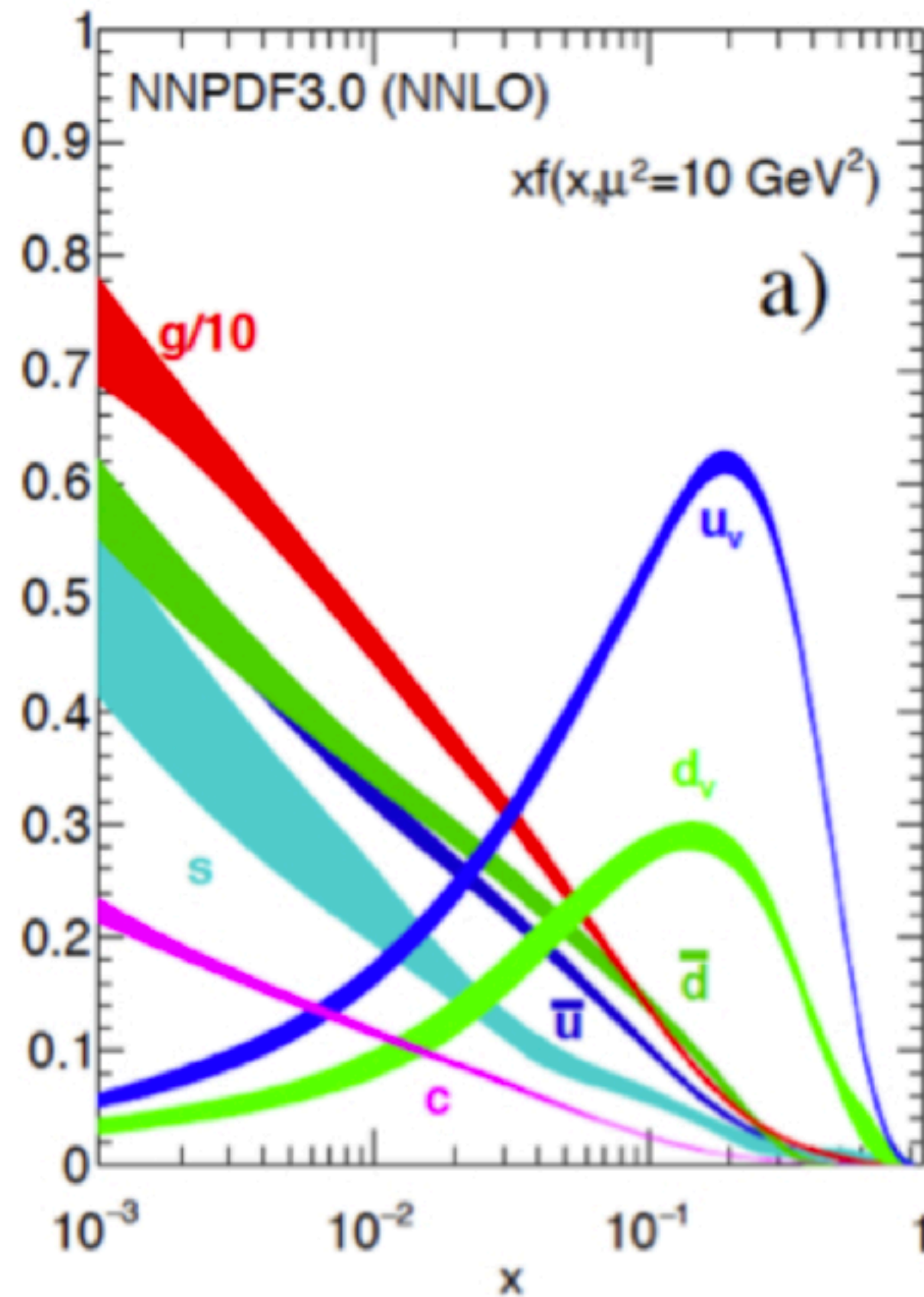
J/ψ photoproduction can be used as a probe of the gluon distribution of the proton
 → mass radius of the proton & D-term can be accessible in the kinematic region where the gluon exchange process is dominant. [Need to pin down the production mechanism near threshold!](#)

核子構造の物理 (後藤 *et al.*)



核子構造は原子核内でどう変化するか?

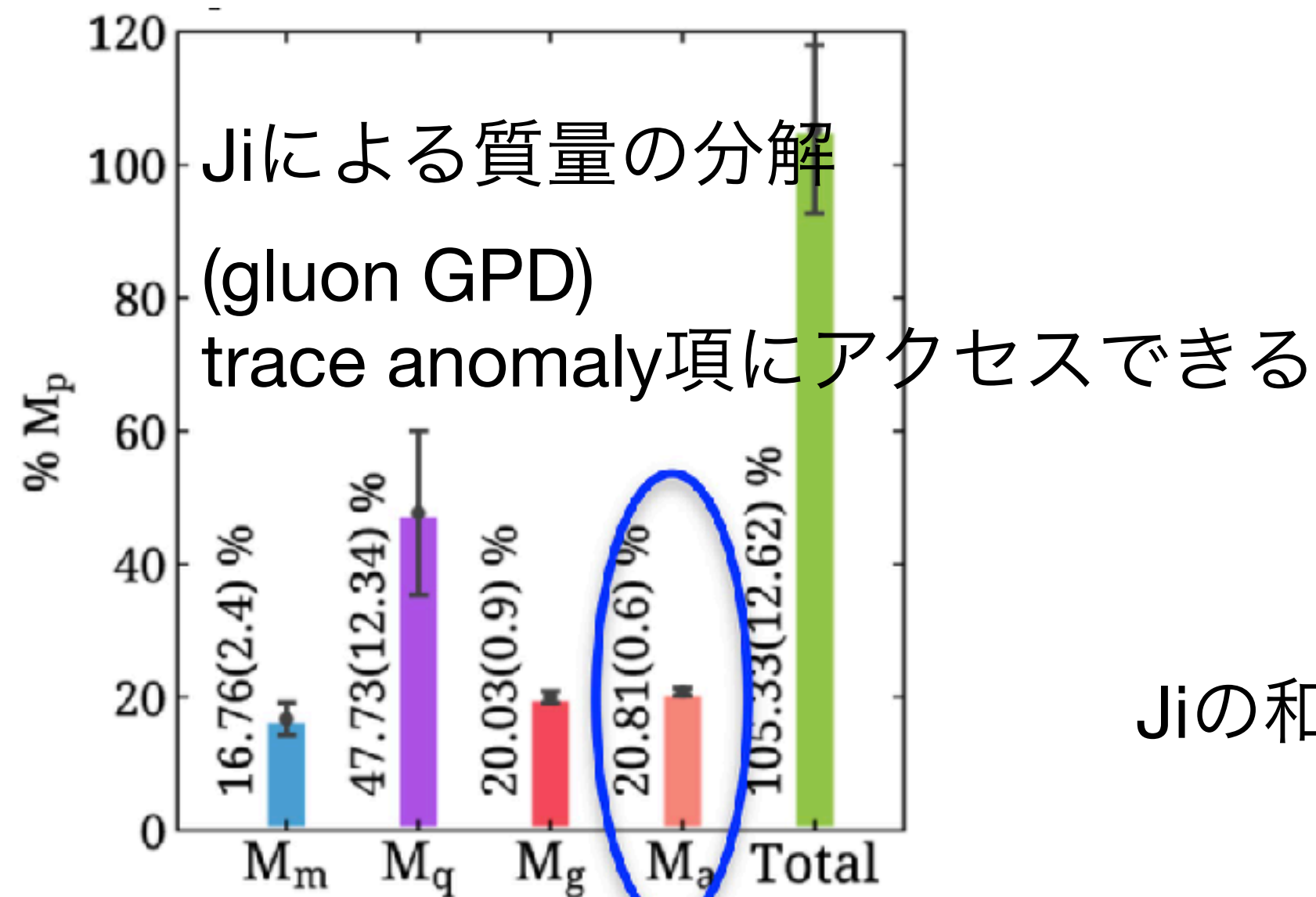
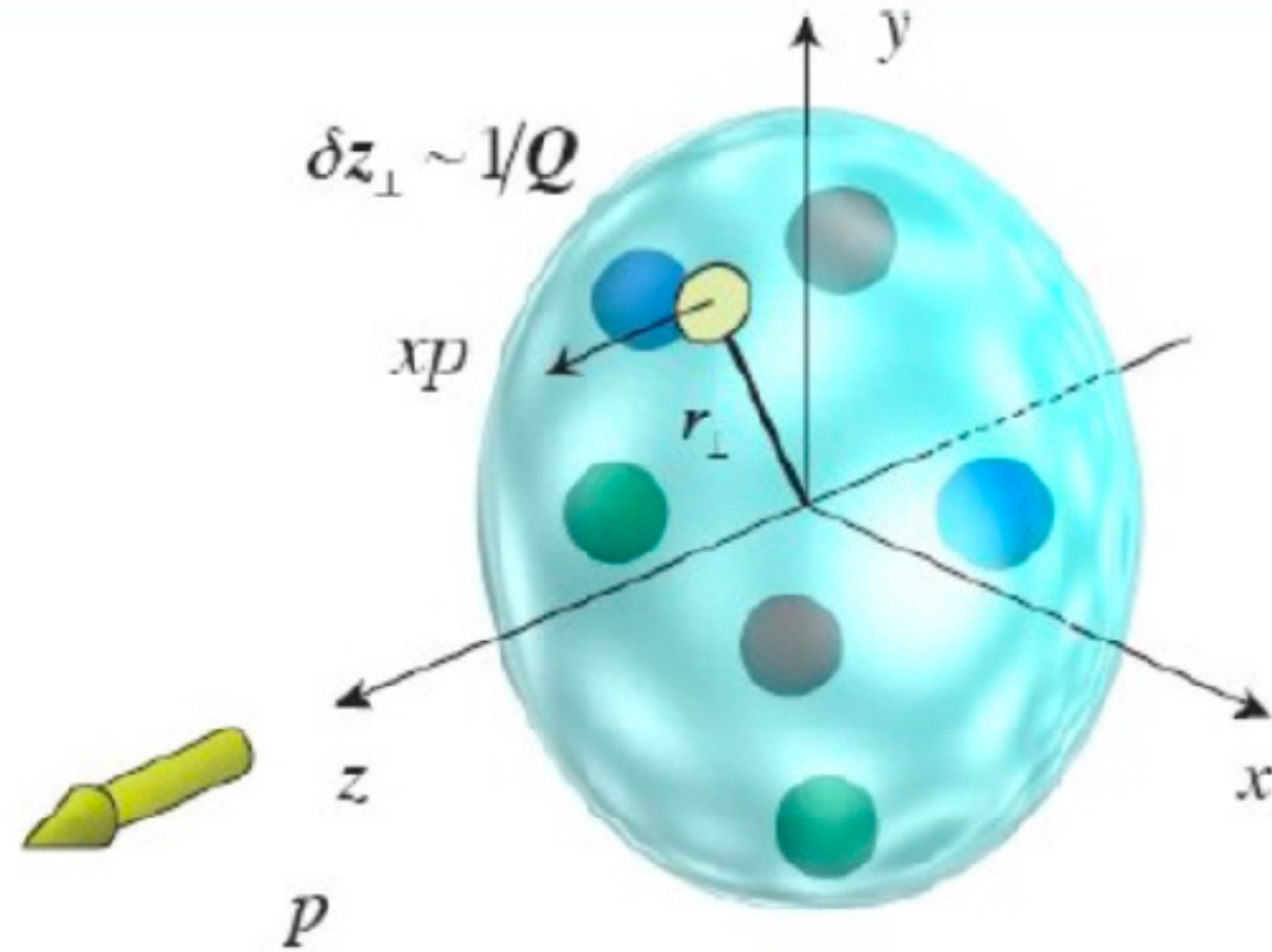
- 1960年代、SLACの電子線と核子の弾性散乱により形状因子が測定される。
- 深非弾性散乱により構造関数が測定、パートン模型が確立。
- 一般化パートン分布の測定がJLab, COMPASS/AMBER@CERN, J-PARCを中心に進行中。



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

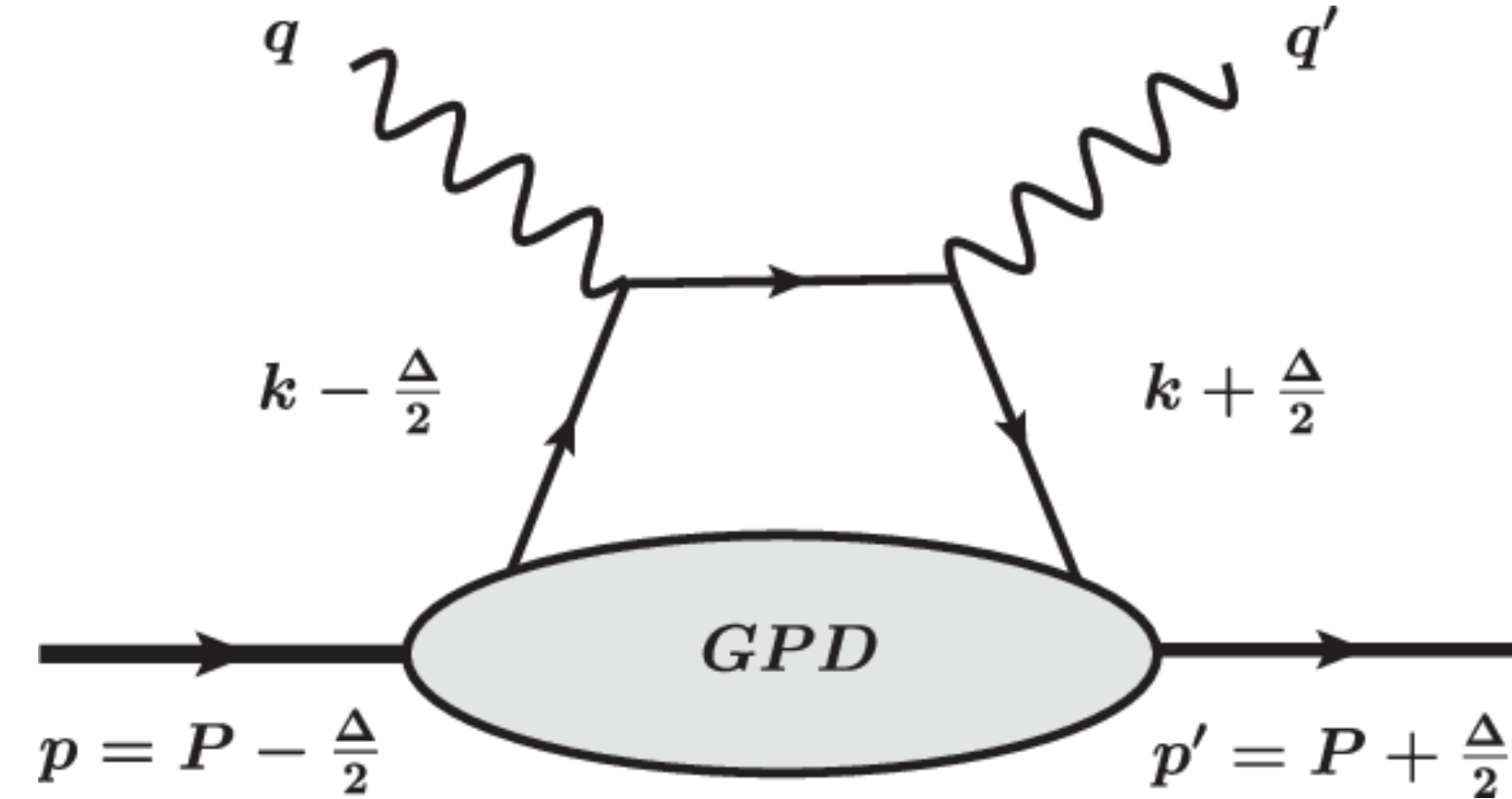
(2+1)次元の一般化パートン分布
 [次ページ]

パートンの横方向の空間分布

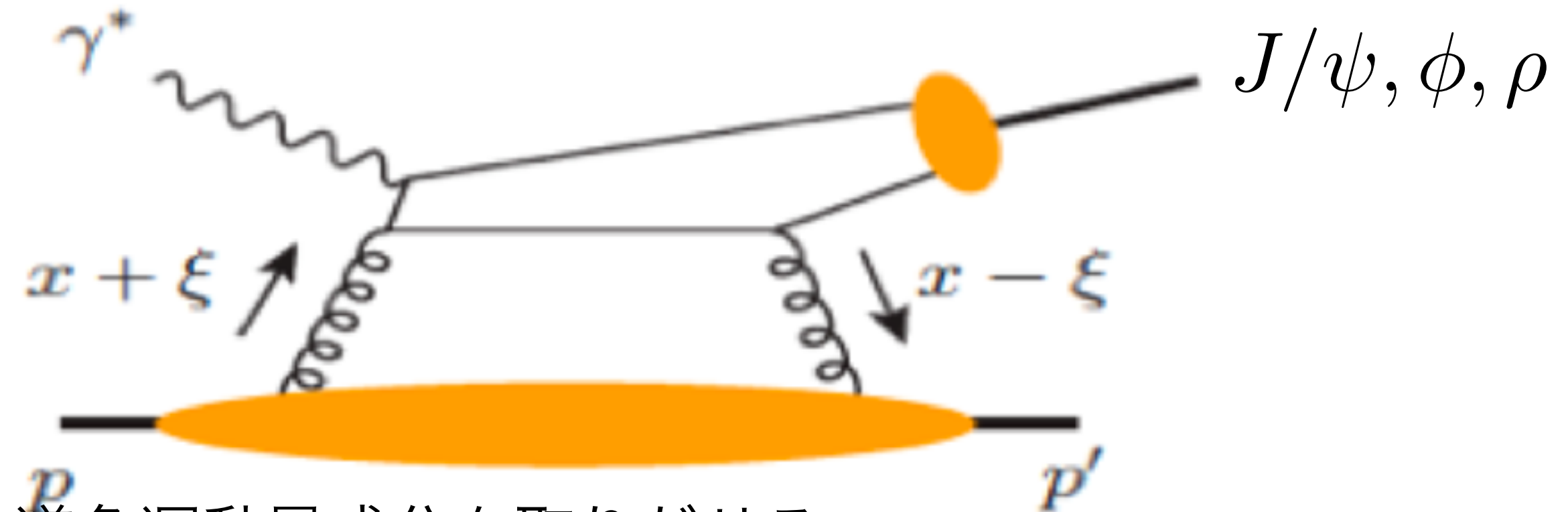


C. Alexandrou et al., (ETMC), PRL 119, 142002 (2017)
C. Alexandrou et al., (ETMC), PRL 116, 252001 (2016)

quark GPD .. Deeply Virtual Compton scattering (DVCS)



gluon GPD .. Deeply Virtual Meson production (DVMP)



Jiの和則 .. スピンの軌道角運動量成分を取りだせる。

$$J_q^Z = \frac{1}{2} \sum_q \Delta q + \sum_q L_q = \frac{1}{2} \left(\int_{-1}^1 x dx (H^q + E^q) \right)_{t \rightarrow 0}$$

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 mesons only?
- (2) How does the nucleus emerge from QCD, a theory of 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.

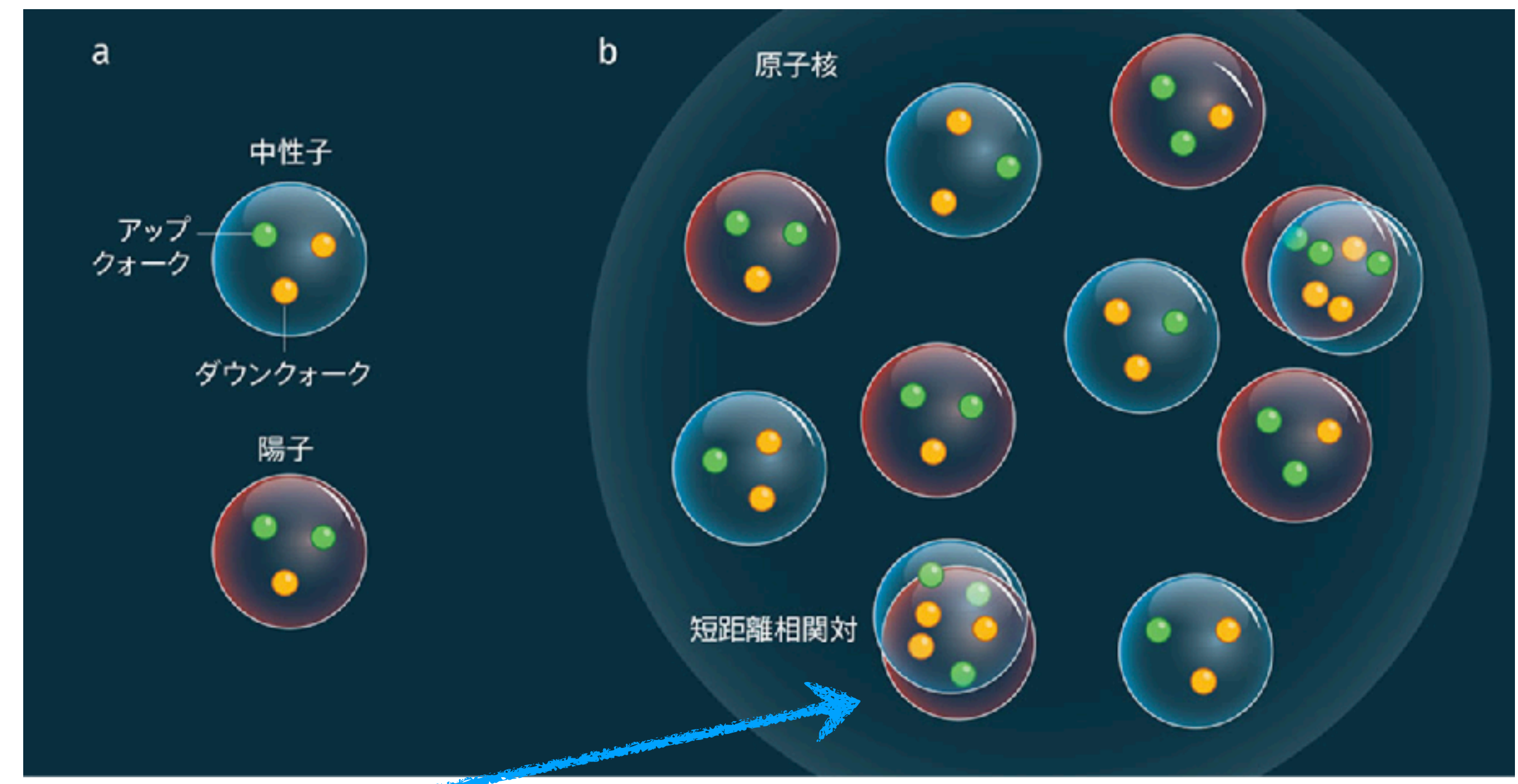
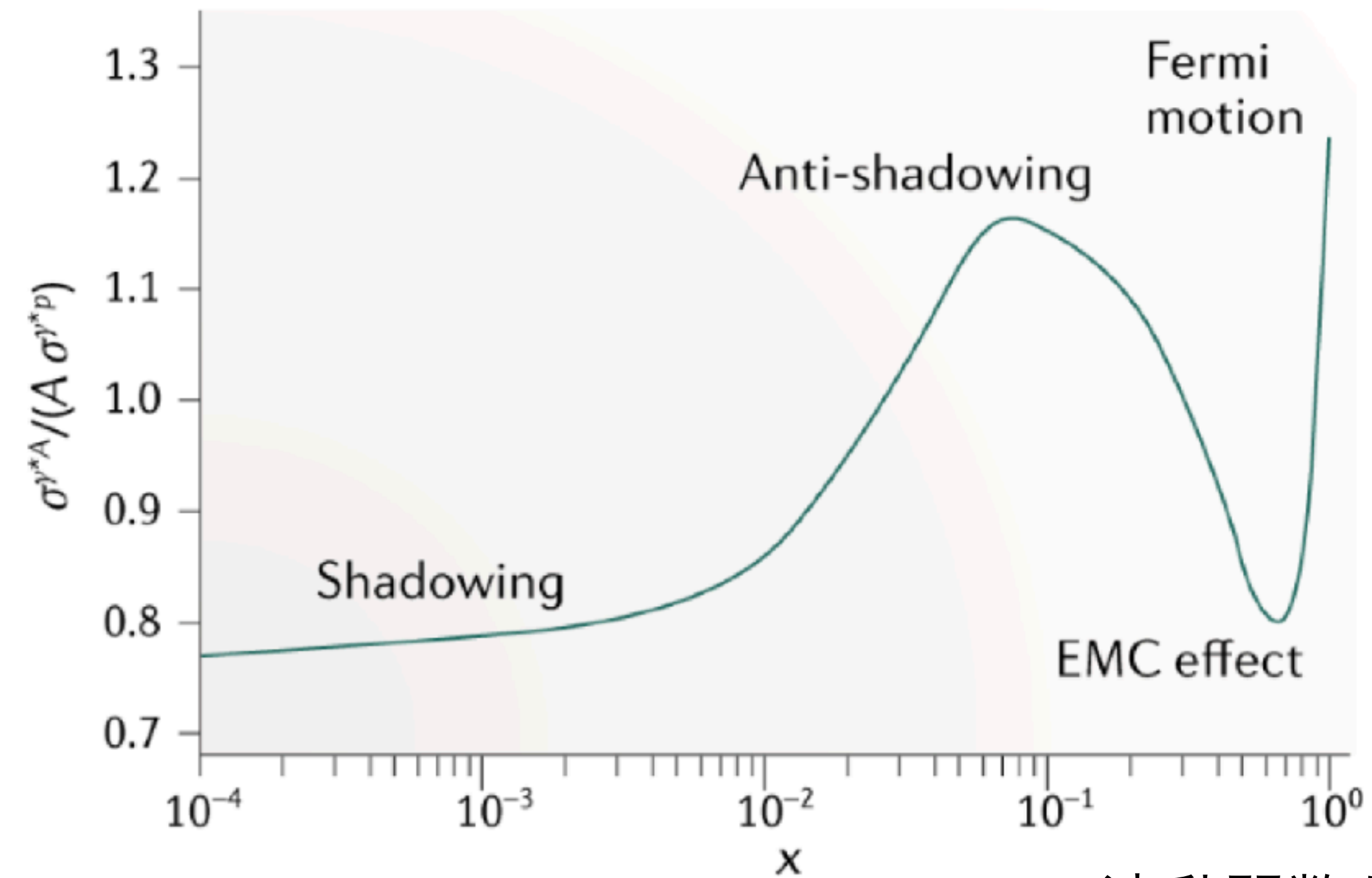
Or Hen *et al.*, RMP 89, 045002 (2017)

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。

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。

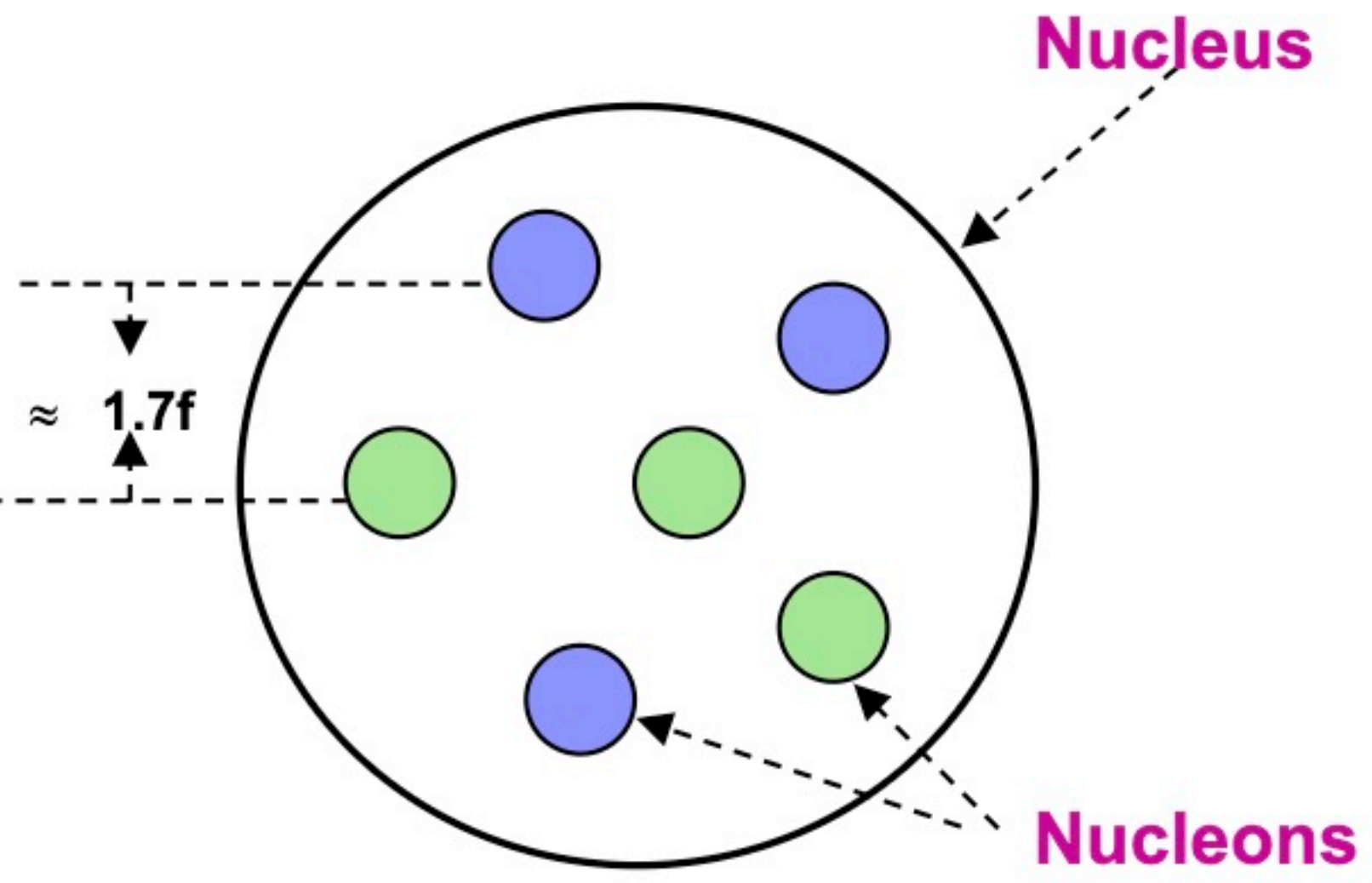
→ 原子核内の核子のクォーク分布が変化している。

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？

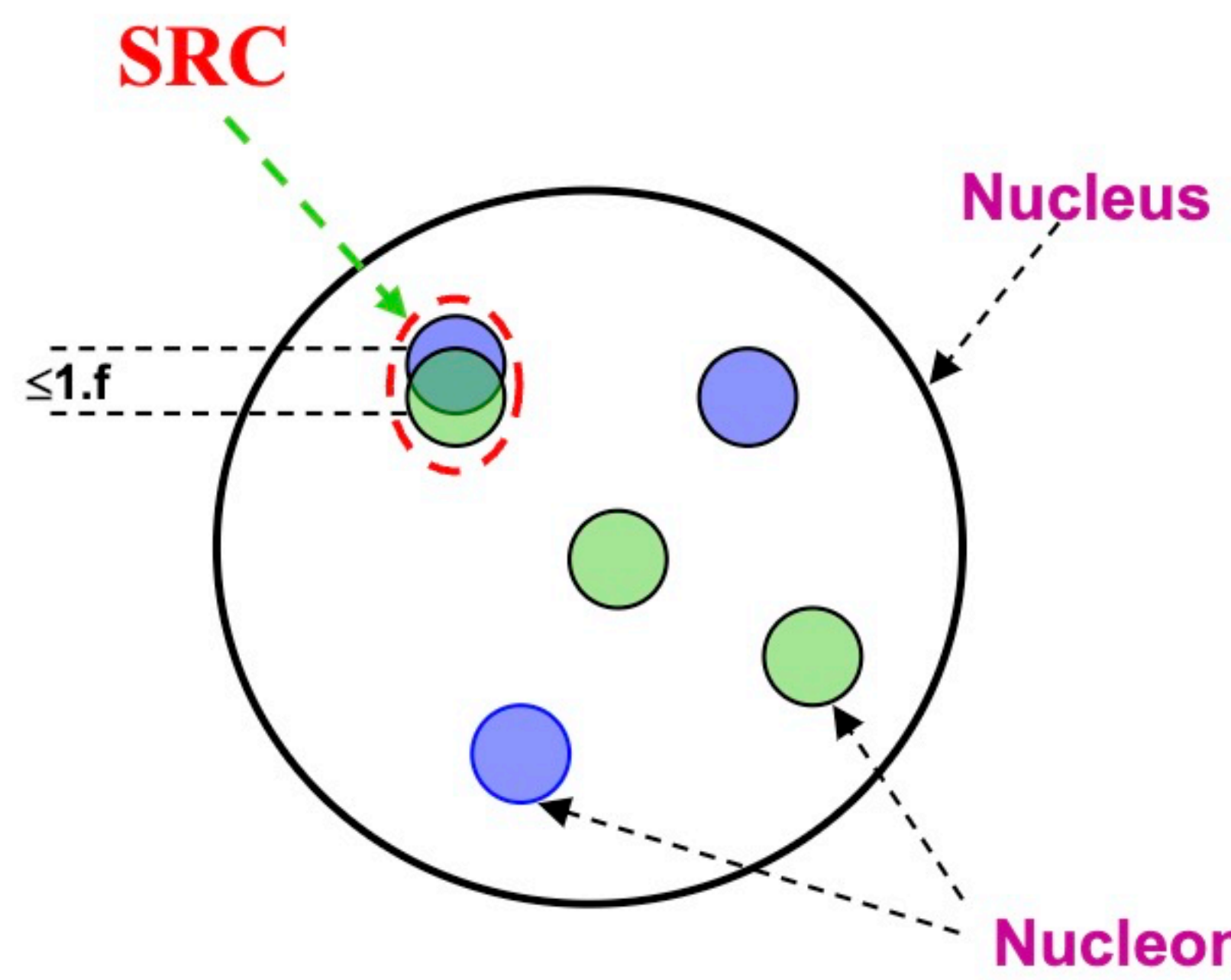


波動関数が重なりあっている短距離相関(Short Range Correlation, SRC)対を構成する核子なら、構造が変化していても自然か？

→ JLab/CLASによるSRC解析



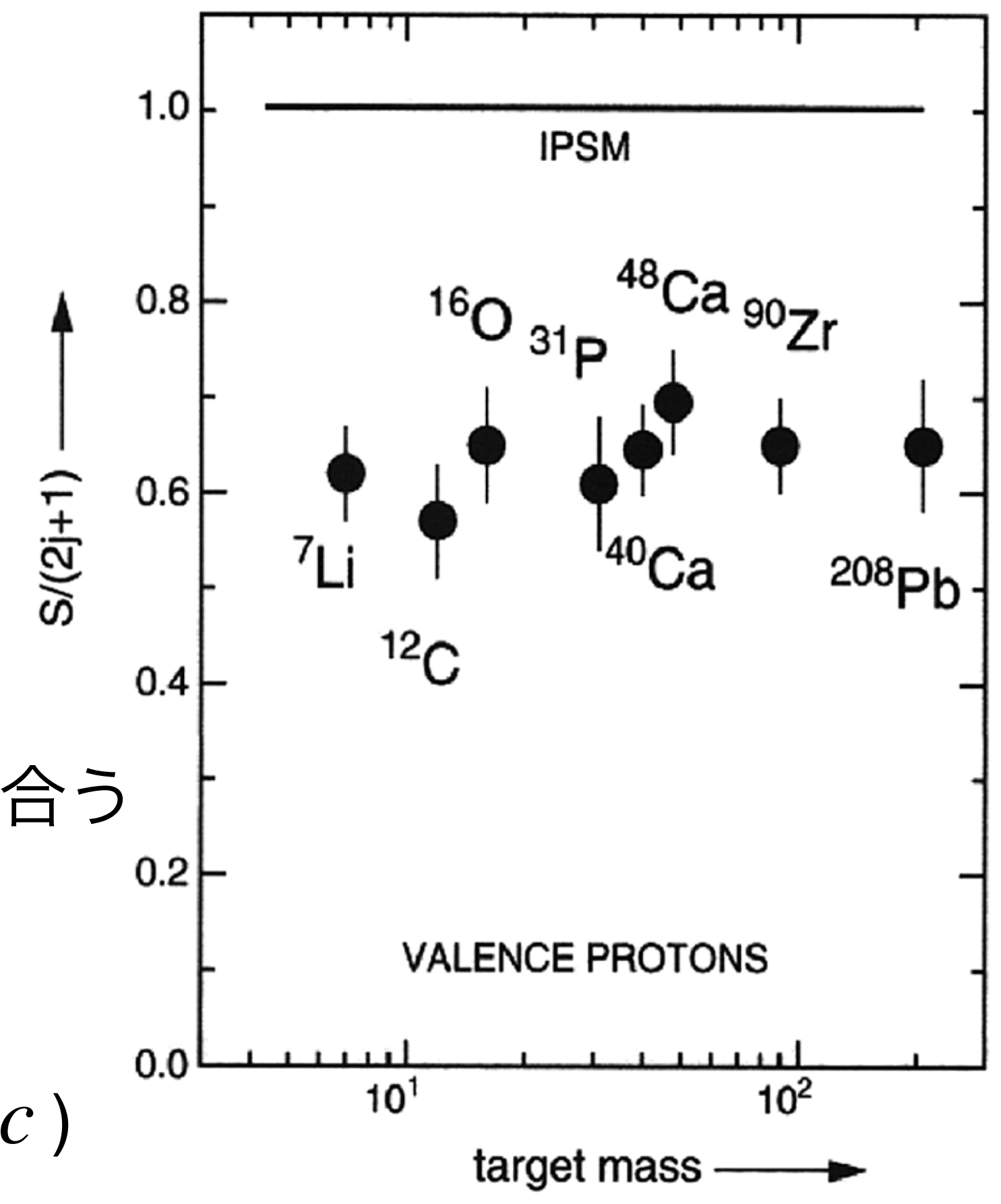
シェル模型 (独立粒子描像)
 核子は他の核子が作る平均場中を運動
 .. 原子核のエネルギー準位をよく説明



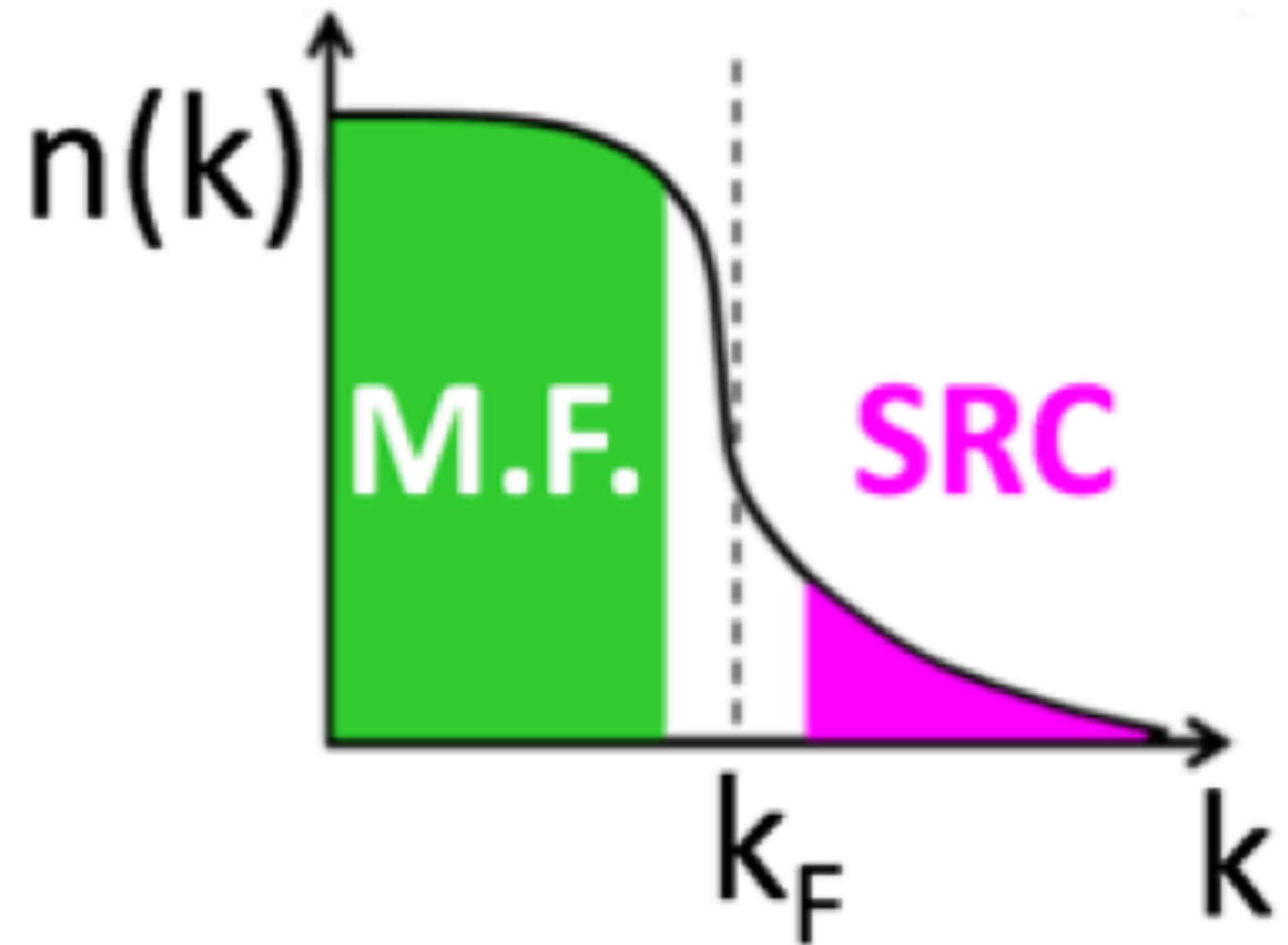
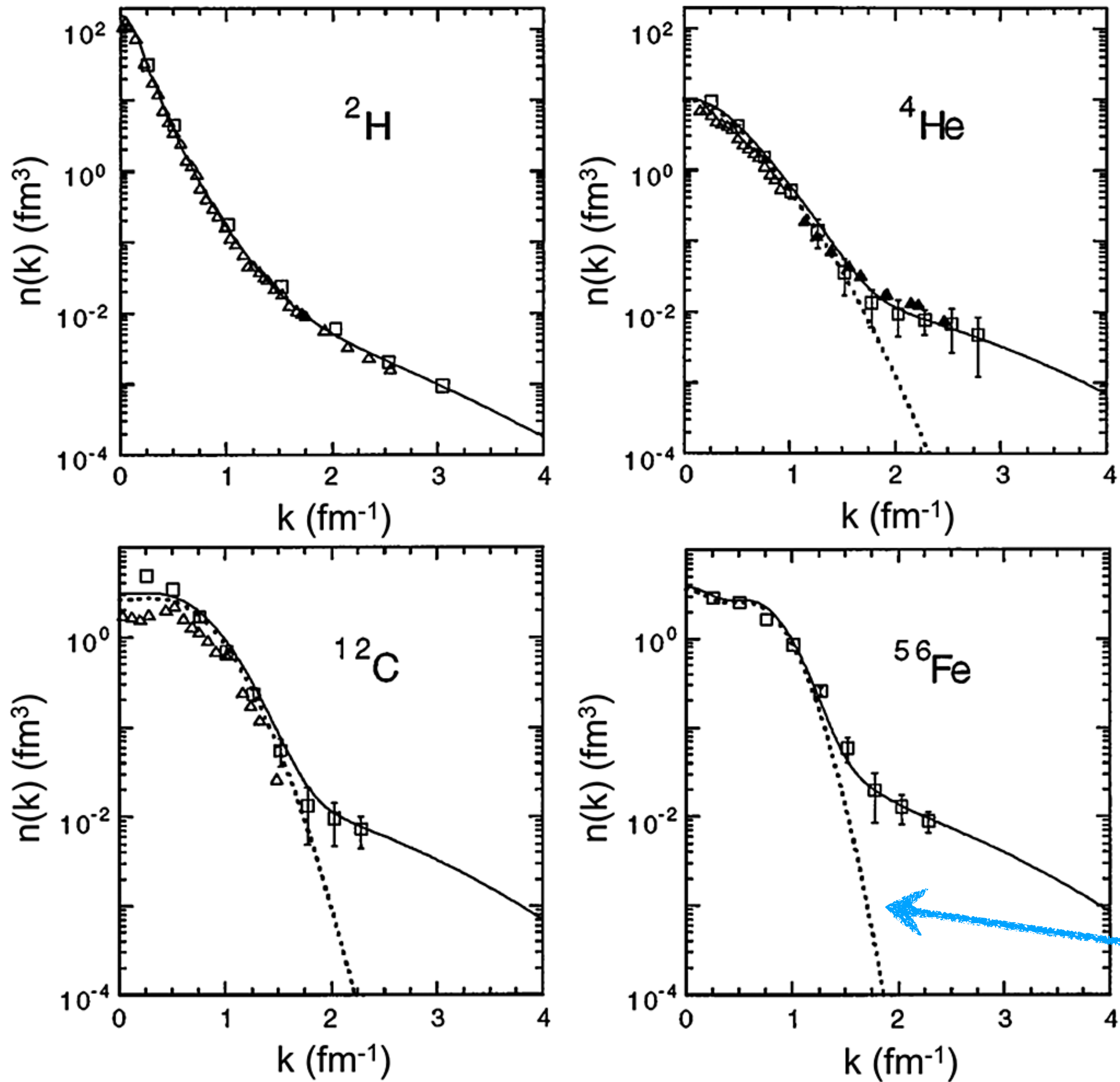
シェル模型を超えた描像
 2つ(以上)の核子の波動関数が短時間重なり合う

SRCの実験的特徴 (or 定義)
 * 相対運動量: 大 ($k_{rel} > k_F \sim 250 \text{ MeV}/c$)
 * 重心系運動量: 小 ($k_{CM} < k_F$)
 原子核中の約20%の核子がSRCを起こしている

($e, e'p$)断面積と独立粒子模型計算の比

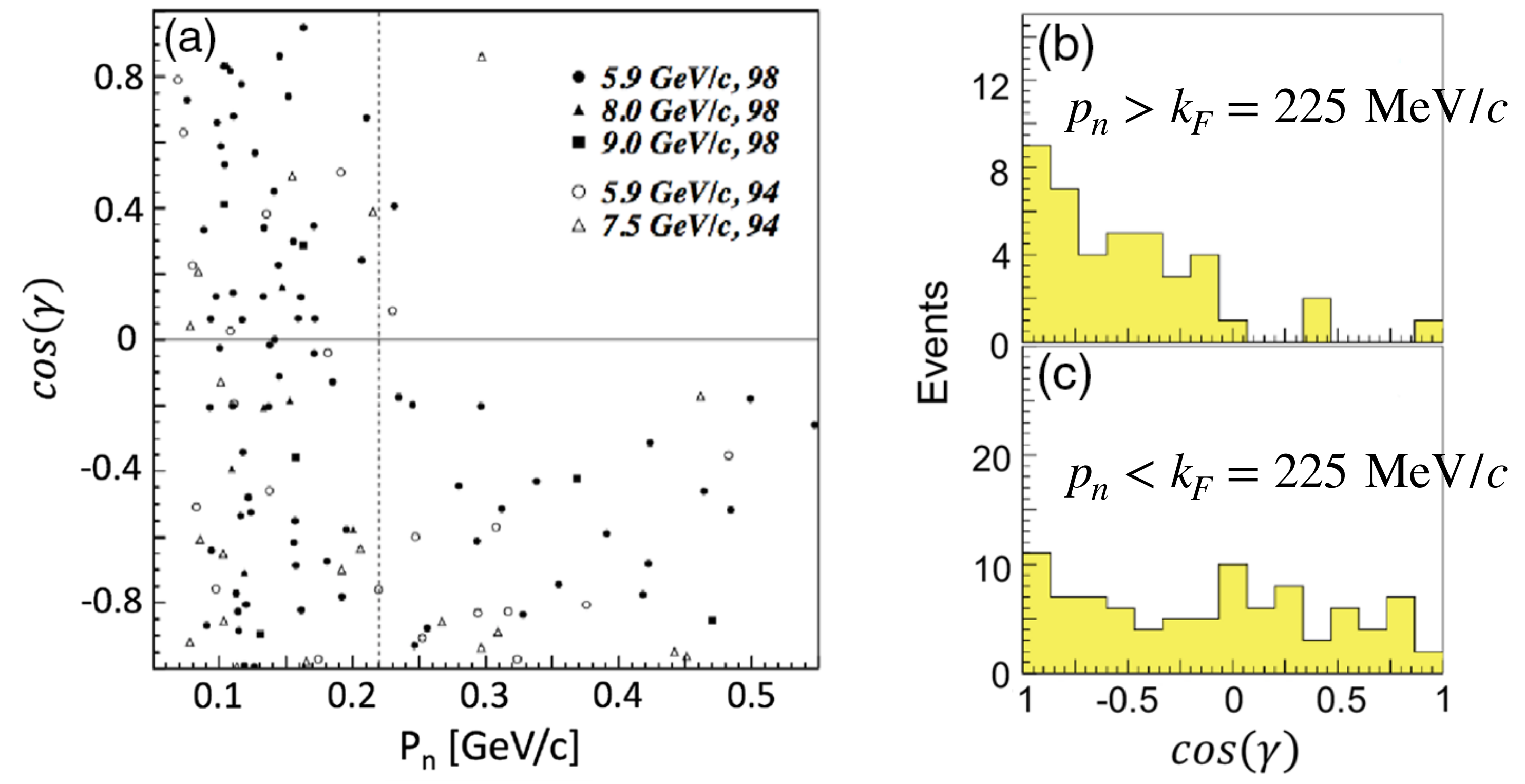


原子核中の核子の運動量分布

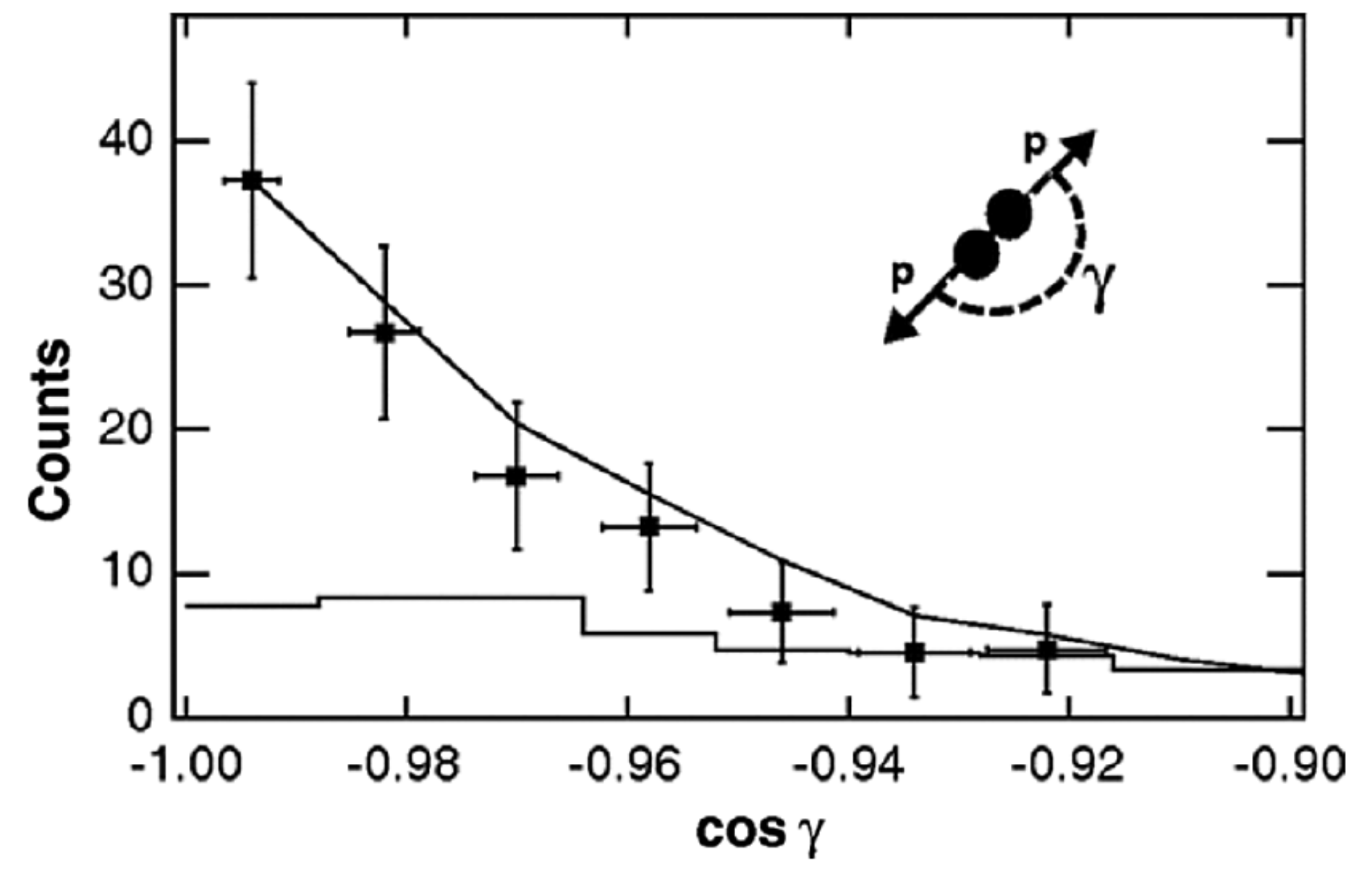


平均場模型(M.F.)で引いた線。
過剰なテール成分がSRCで説明される。

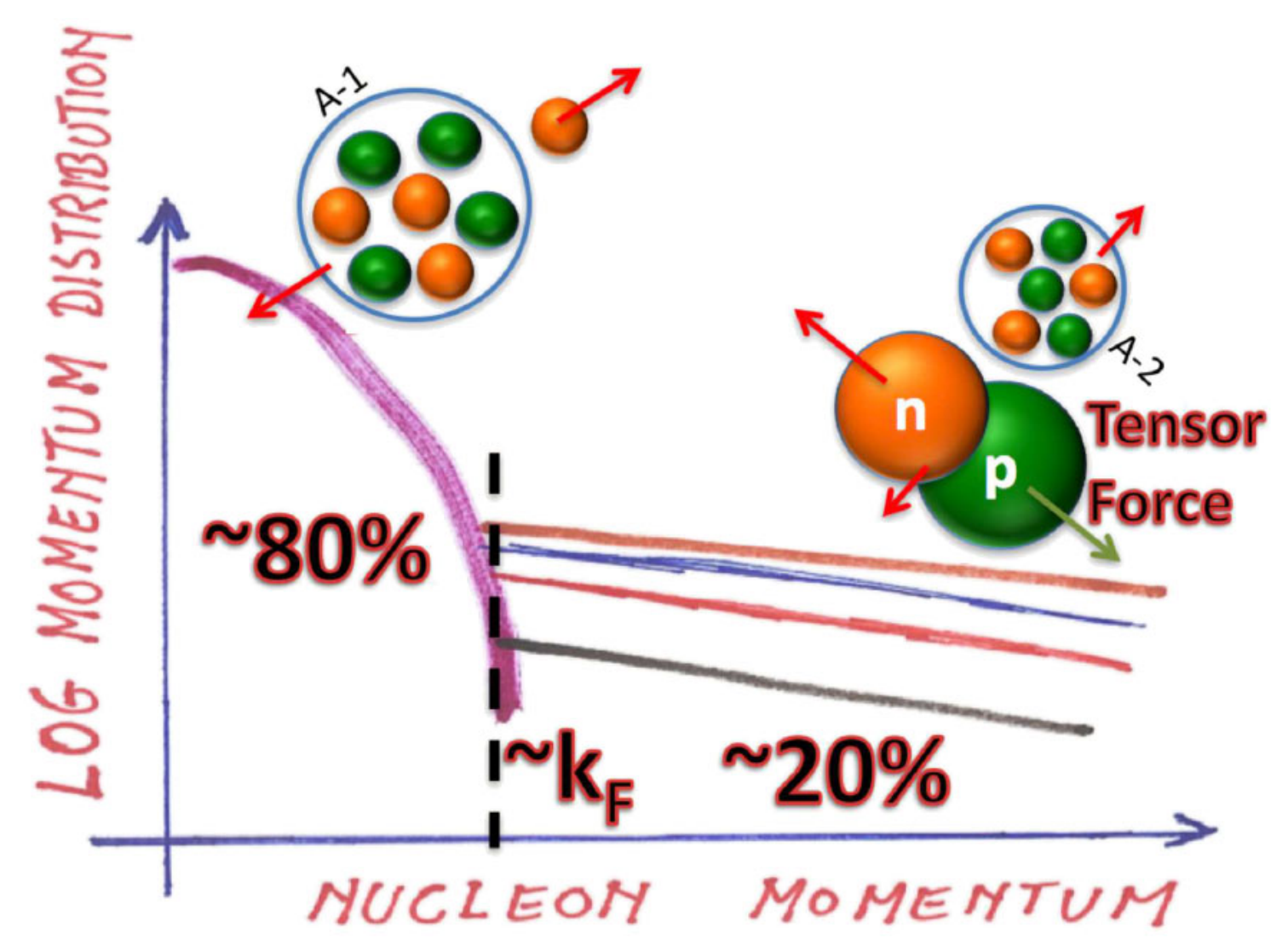
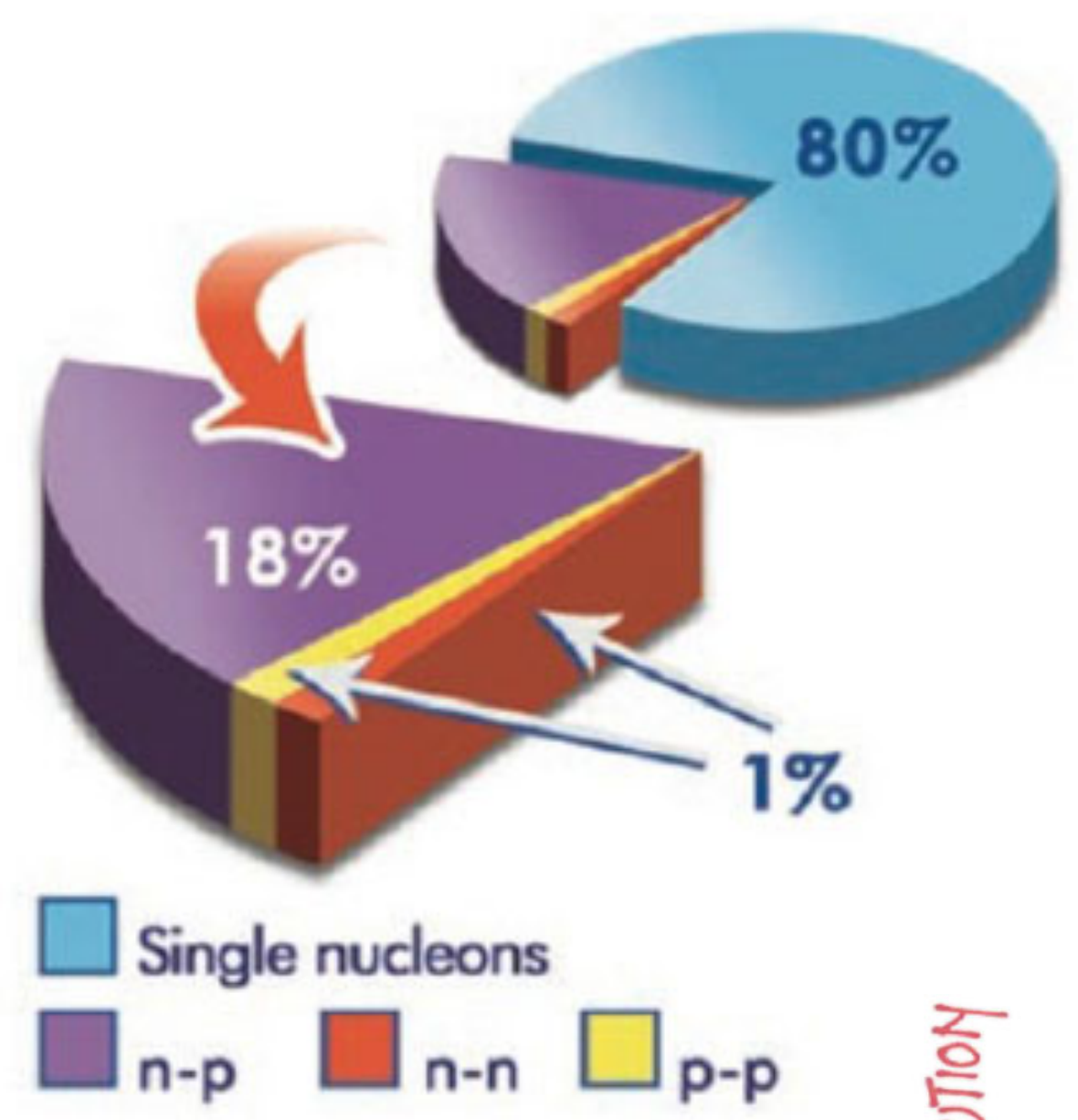
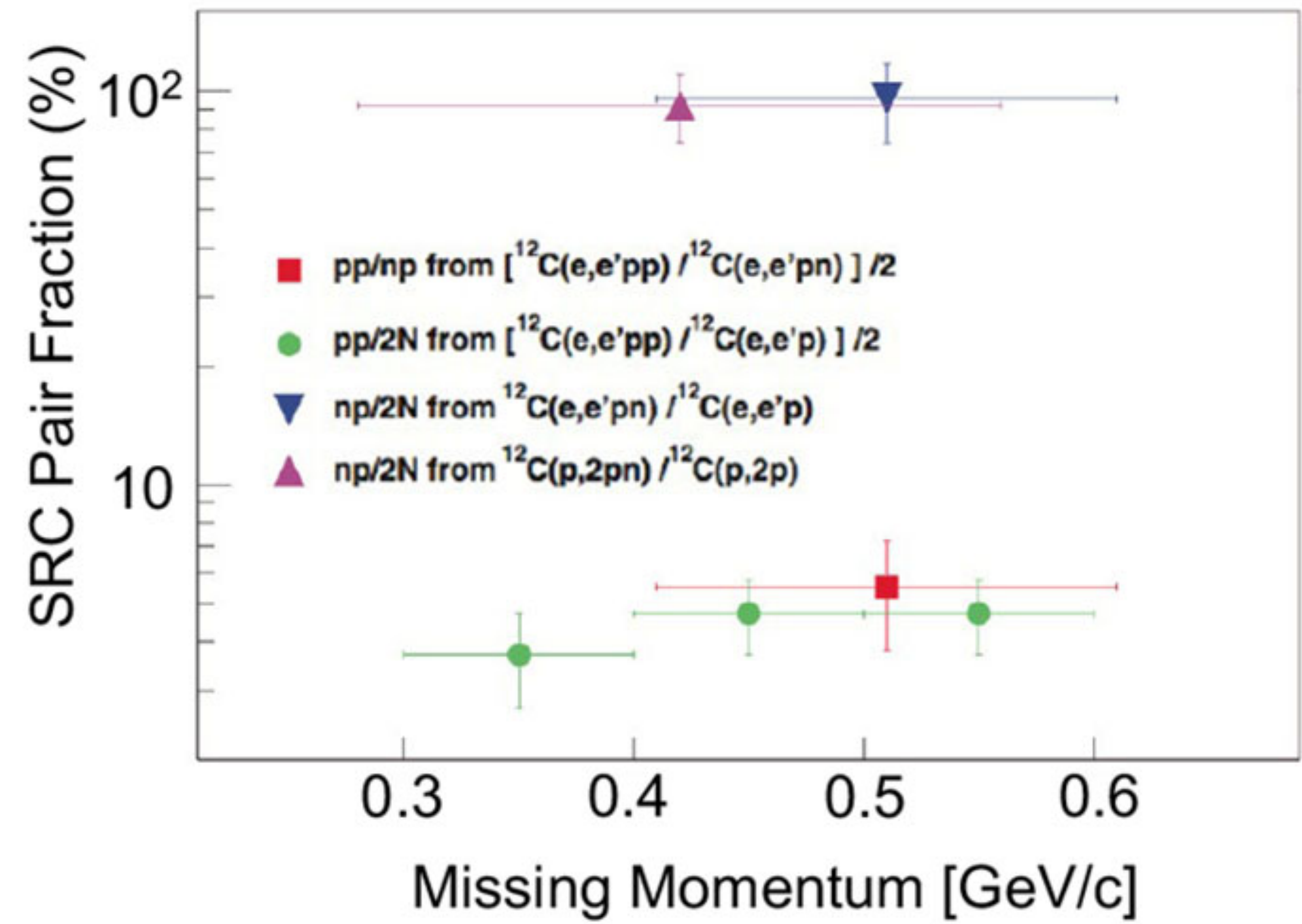
$^{12}\text{C}(p, 2pn)$ 測定@BNL



$^{12}\text{C}(e, e'pp)$ 測定@JLab



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対に比べてnp対は20倍多い (テンソル力由来)
 nn対の測定はないが、pp対と同程度だと考えられている

$$\frac{d\sigma_{inel}}{dx dQ^2} = \frac{4\pi\alpha^2}{Q^4} \left[(1-y) \frac{F_2(x, Q^2)}{x} + 2F_1(x, Q^2) \frac{1}{2} y^2 \right] \quad F_2(x_B, Q^2) \dots \text{構造関数 (クォークの運動量分布)}$$

$$F_2^A = Z \cdot F_2^p + N \cdot F_2^n + n_{SRC}^A \cdot (\Delta F_2^p + \Delta F_2^n) \quad \text{修正項 } (n_{SRC}^A: \text{np SRC対の数})$$

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

$$F_2^n \rightarrow F_2^d - F_2^p - n_{SRC}^d (\Delta F_2^p + \Delta F_2^n)$$

$$\frac{n_{SRC}^d \cdot (\Delta F_2^p + \Delta F_2^n)}{F_2^d} = \frac{F_2^A}{F_2^d} - (Z - N) \cdot \frac{F_2^p}{F_2^d} - N$$

$$\phantom{\frac{n_{SRC}^d \cdot (\Delta F_2^p + \Delta F_2^n)}{F_2^d}} = \frac{(A/2) \cdot a_2 - N}{(A/2) \cdot a_2 - N}$$

唯一の現象論的パラメータ (n_{SRC}^A に対応。核子がnp対中にある確率)

左辺は核子数Aに依存しない

* 核子数Aに依存

* Bjorken変数 x_B に非依存

$$F_2^A = Z \cdot F_2^p + N \cdot F_2^n + n_{SRC}^A \cdot (\Delta F_2^p + \Delta F_2^n)$$

核子あたりのSRC対密度の比 (重陽子に対する)

$$\frac{n_{SRC}^d \cdot (\Delta F_2^p + \Delta F_2^n)}{F_2^d}$$

$$= \frac{F_2^A - (Z - N) \cdot \frac{F_2^p}{F_2^d} - N}{(A/2) \cdot a_2 - N}$$

$$a_2(A) = \frac{2 \sigma_A(x_B, Q^2)}{A \sigma_d(x_B, Q^2)}$$

上式は $1.5 < x_B < 2$ の弾性散乱領域で有効

Aに非依存であるべき

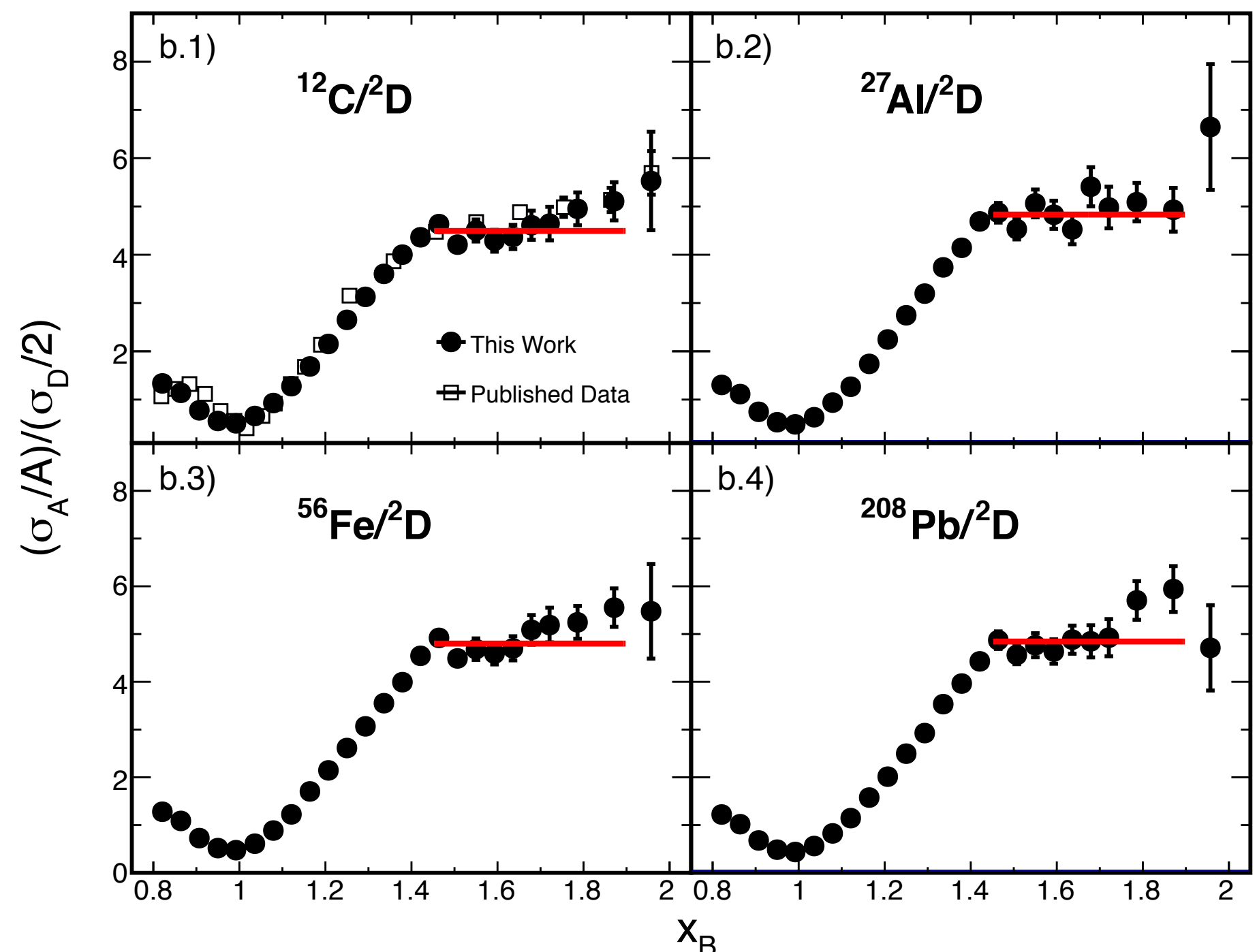
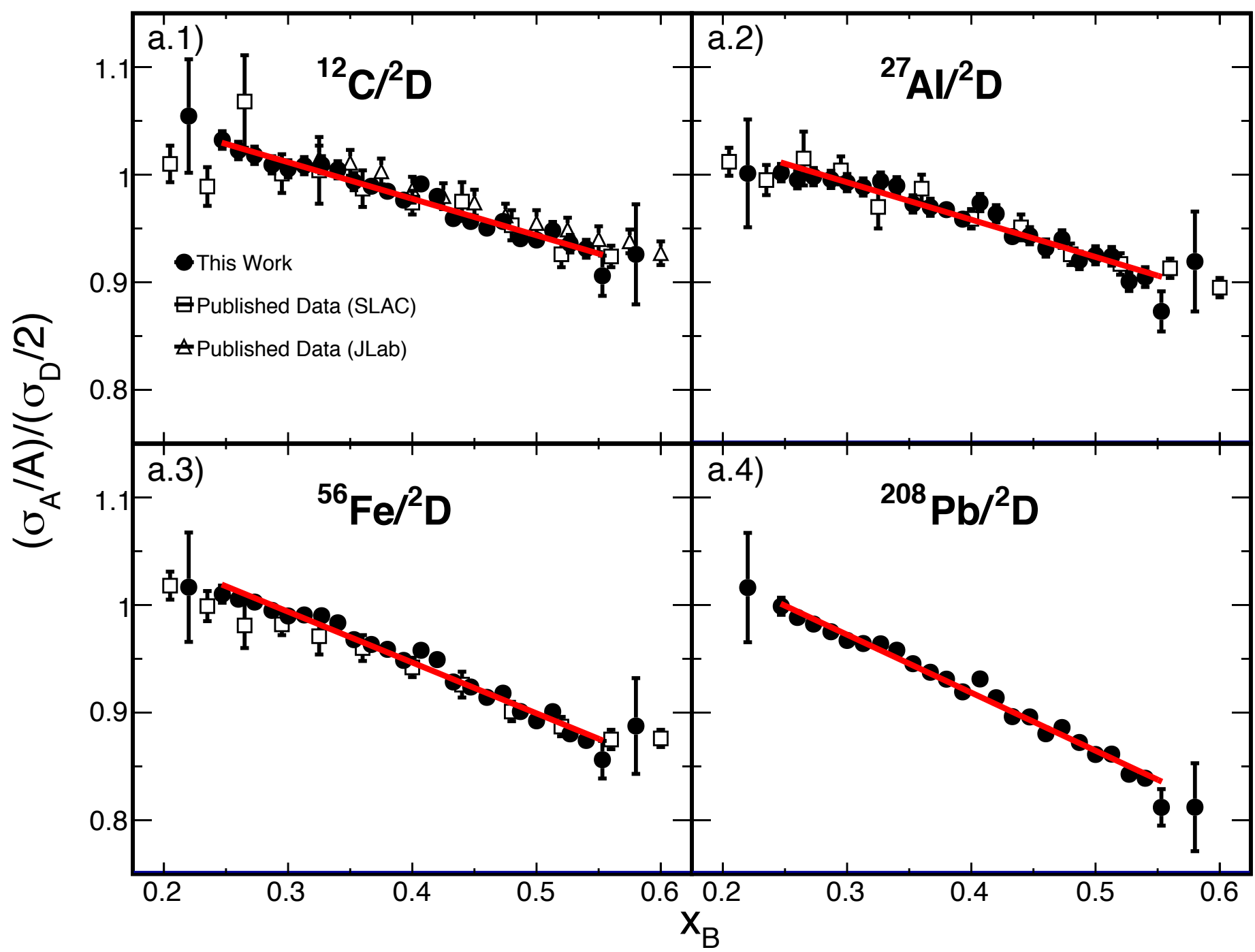


Fig 1 | DIS and QE (e,e') Cross-section Ratios. The per-nucleon cross-section ratios of nucleus with atomic number

$$\frac{n_{SRC}^d \cdot (\Delta F_2^p + \Delta F_2^n)}{F_2^d} = \frac{\frac{F_2^A}{F_2^d} - (Z - N) \cdot \frac{F_2^p}{F_2^d} - N}{(A/2) \cdot a_2 - N}$$

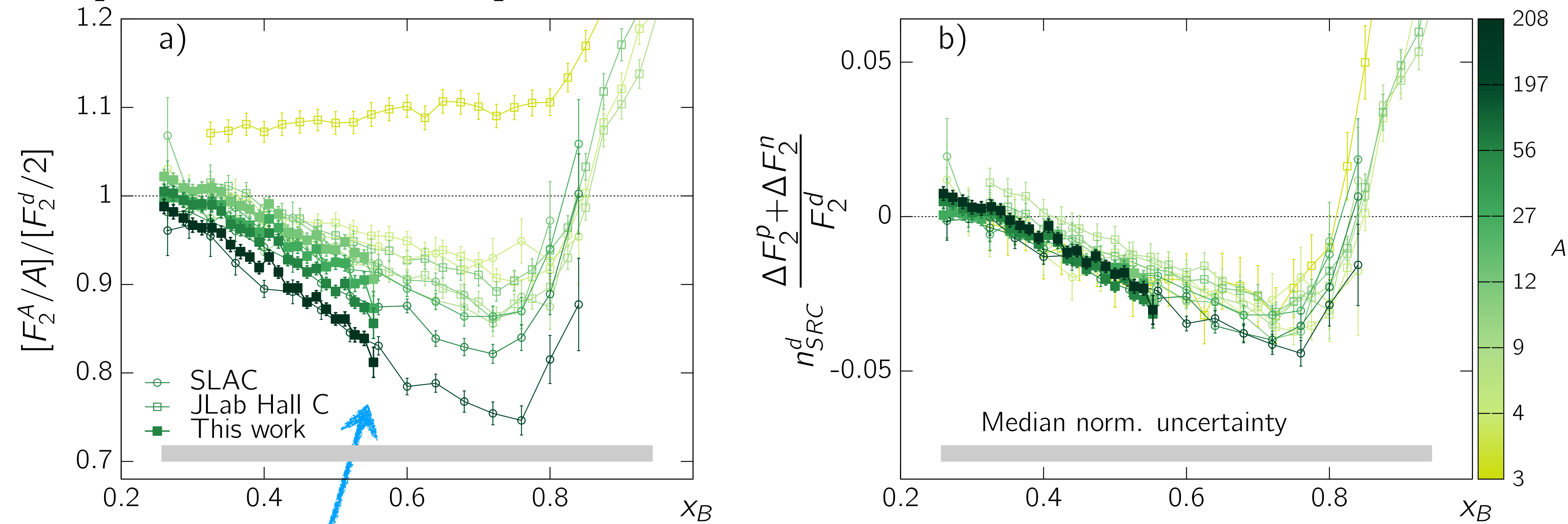
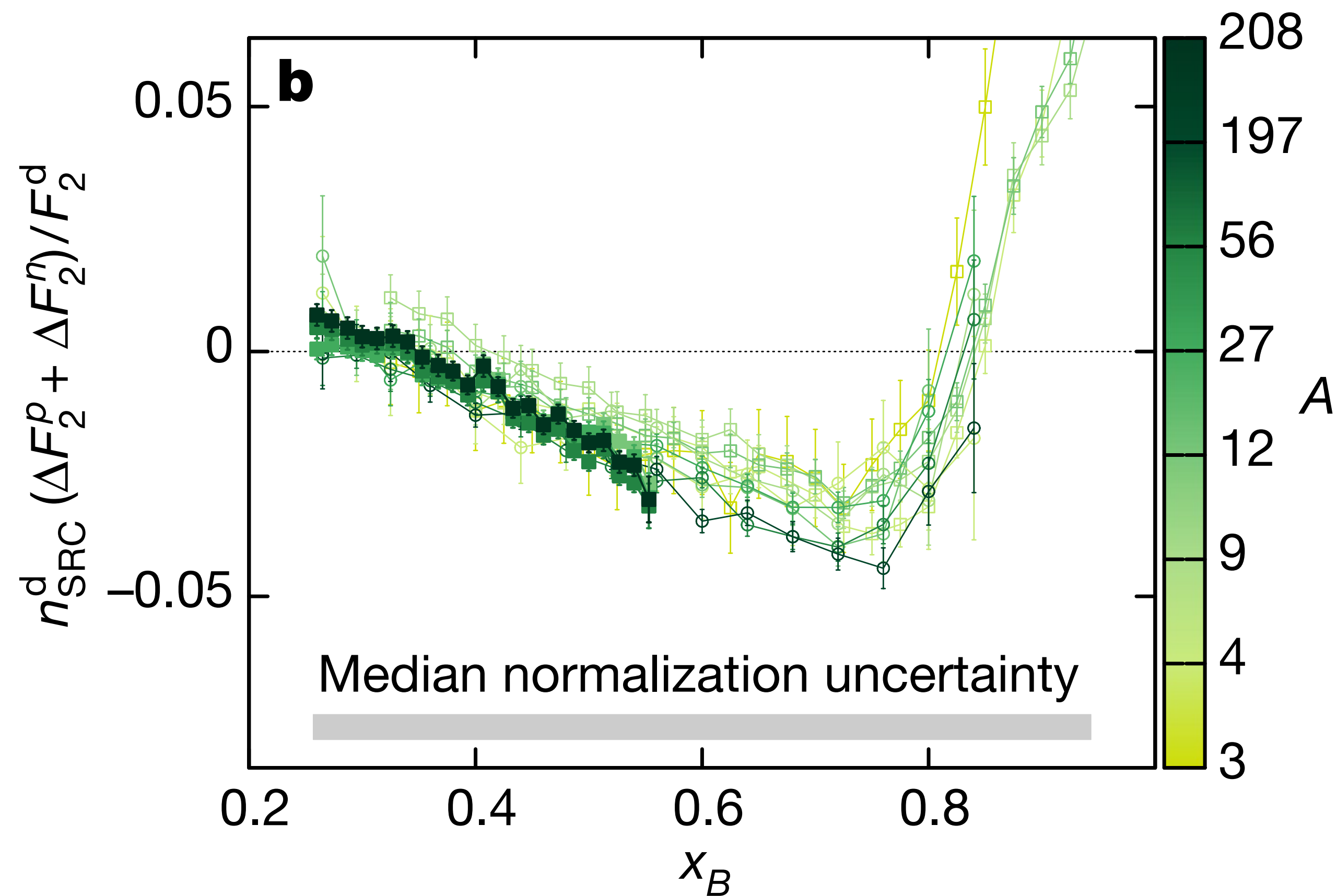


Fig 2 | Universality of SRC pair quark distributions. The EMC effect for different nuclei, as observed in (a) ratios of $(F_2^A/A)/(F_2^d/2)$ as a function of x_B and (b) the modification of SRC pairs, as described by Eq. 2. Different colors

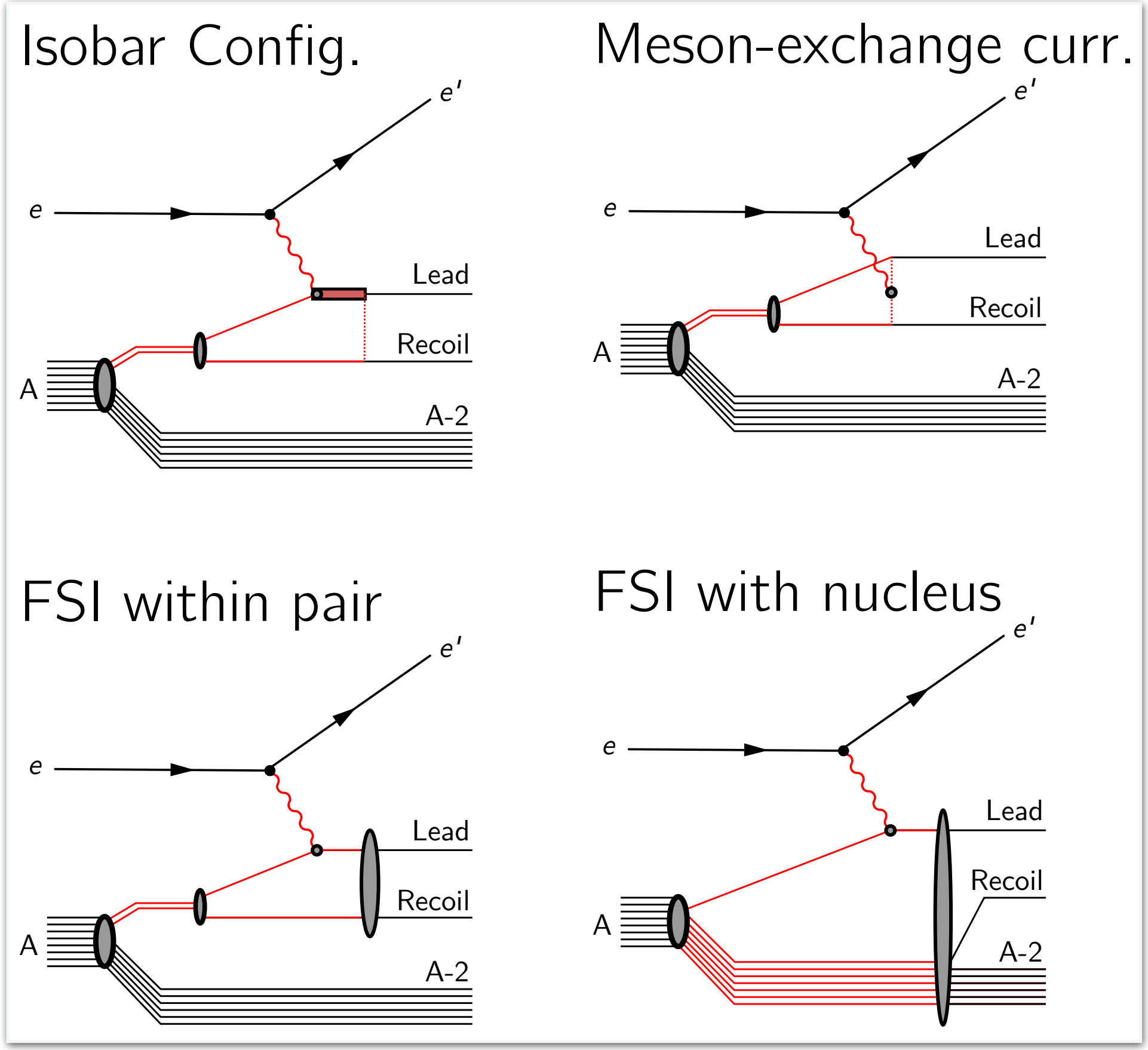
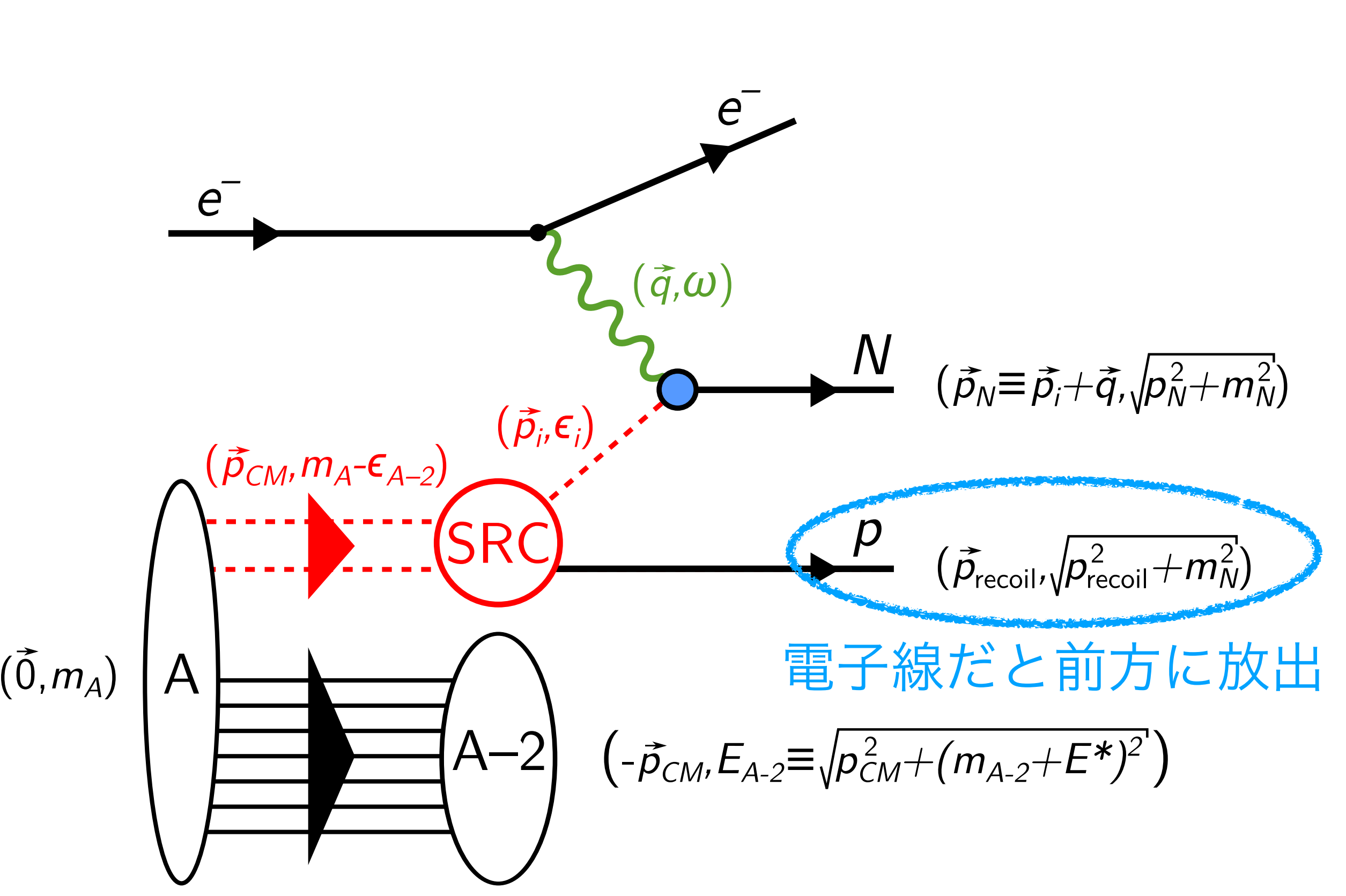
このA依存性が「EMC効果」

- 核子数Aに依らない普遍的な構造関数の修正
- 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。)

$$F_2^A = Z \cdot F_2^p + N \cdot F_2^n + n_{\text{SRC}}^A \cdot (\Delta F_2^p + \Delta F_2^n)$$

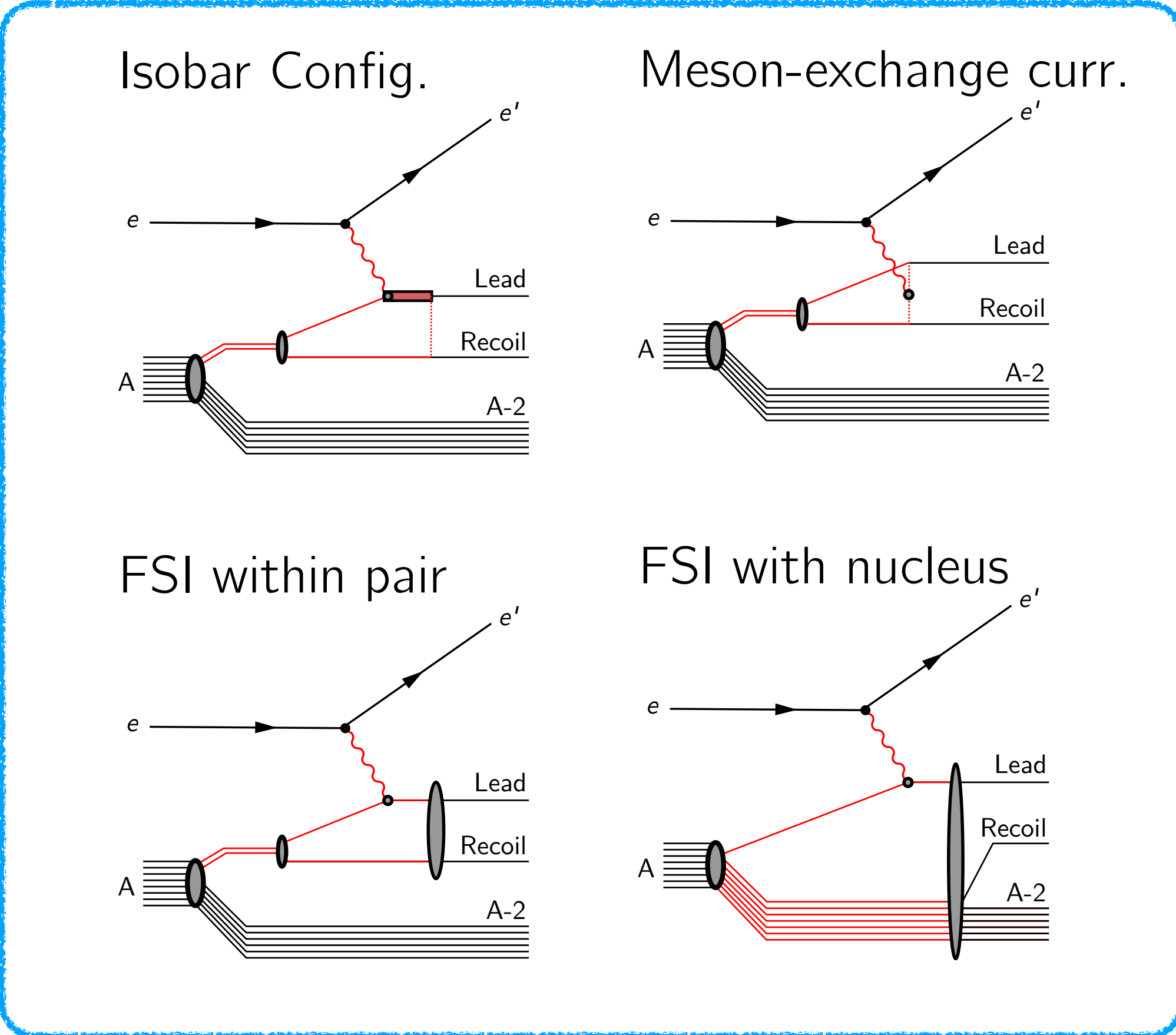
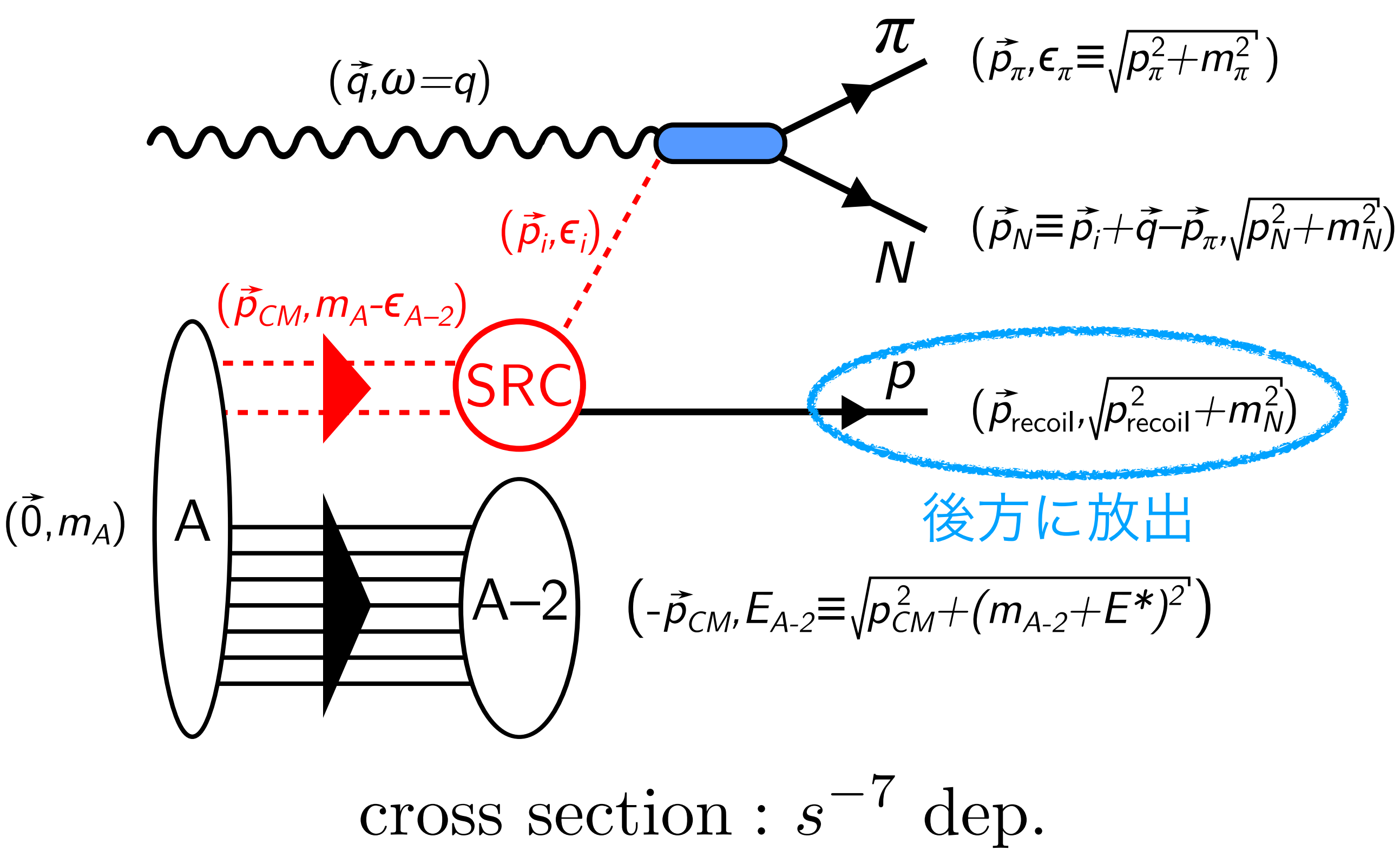


- EMC効果は、原子核中の短距相関核子が一時的に内部構造を変化させるダイナミカルな効果である
- 変化のメカニズムが解明されたわけではない
- 変化の仕方は弾性散乱領域の測定から予言可能



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。

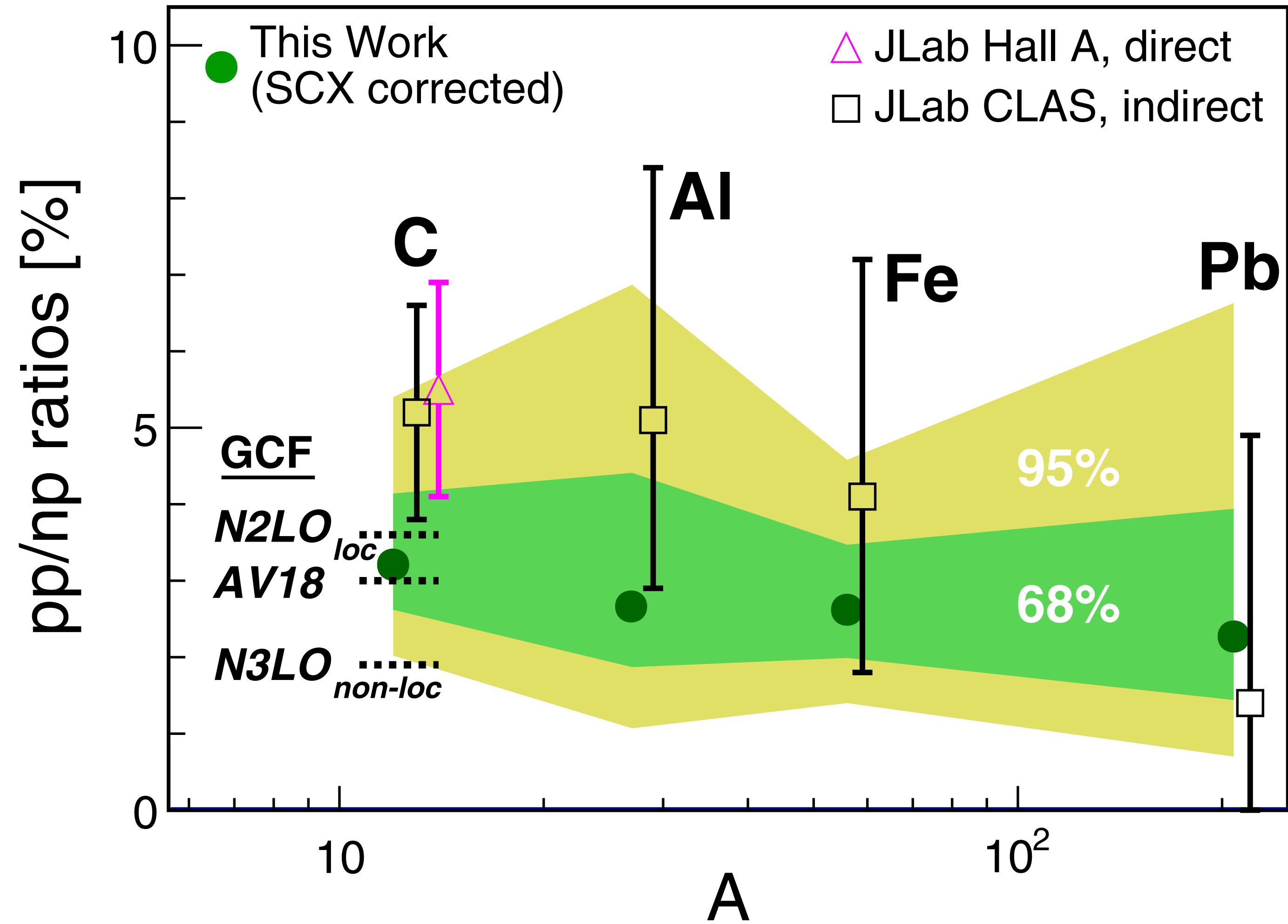
- * 結果の解釈が、背景プロセスの理解度に依存 → 大きな不定性
 - * SRC現象はプローブ（やエネルギー）によらない普遍的な現象。他プローブでの検証が不可欠
- Photon-inducedなSRC測定が、背景プロセスの理解、扱いに対する強い制限を与える



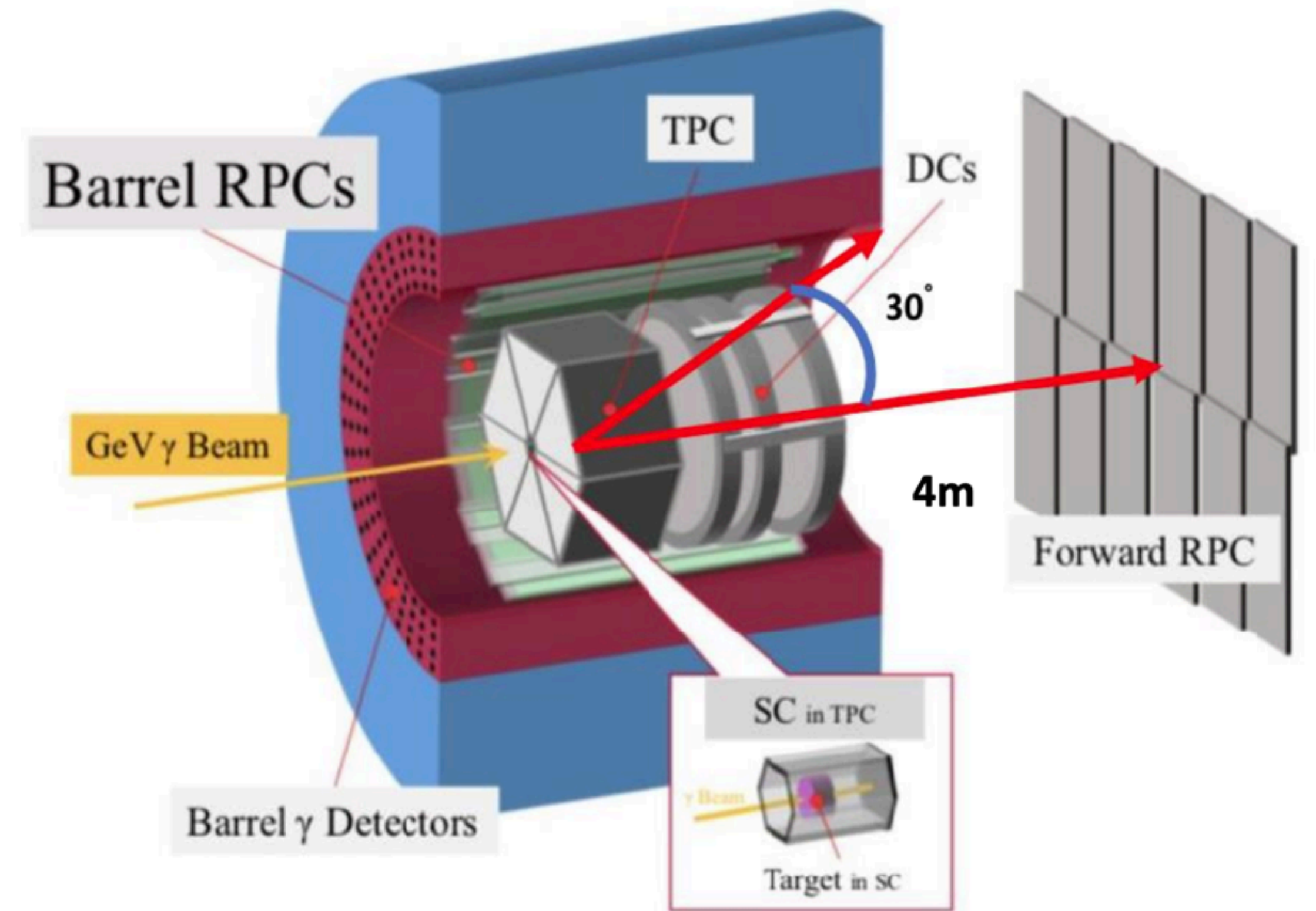
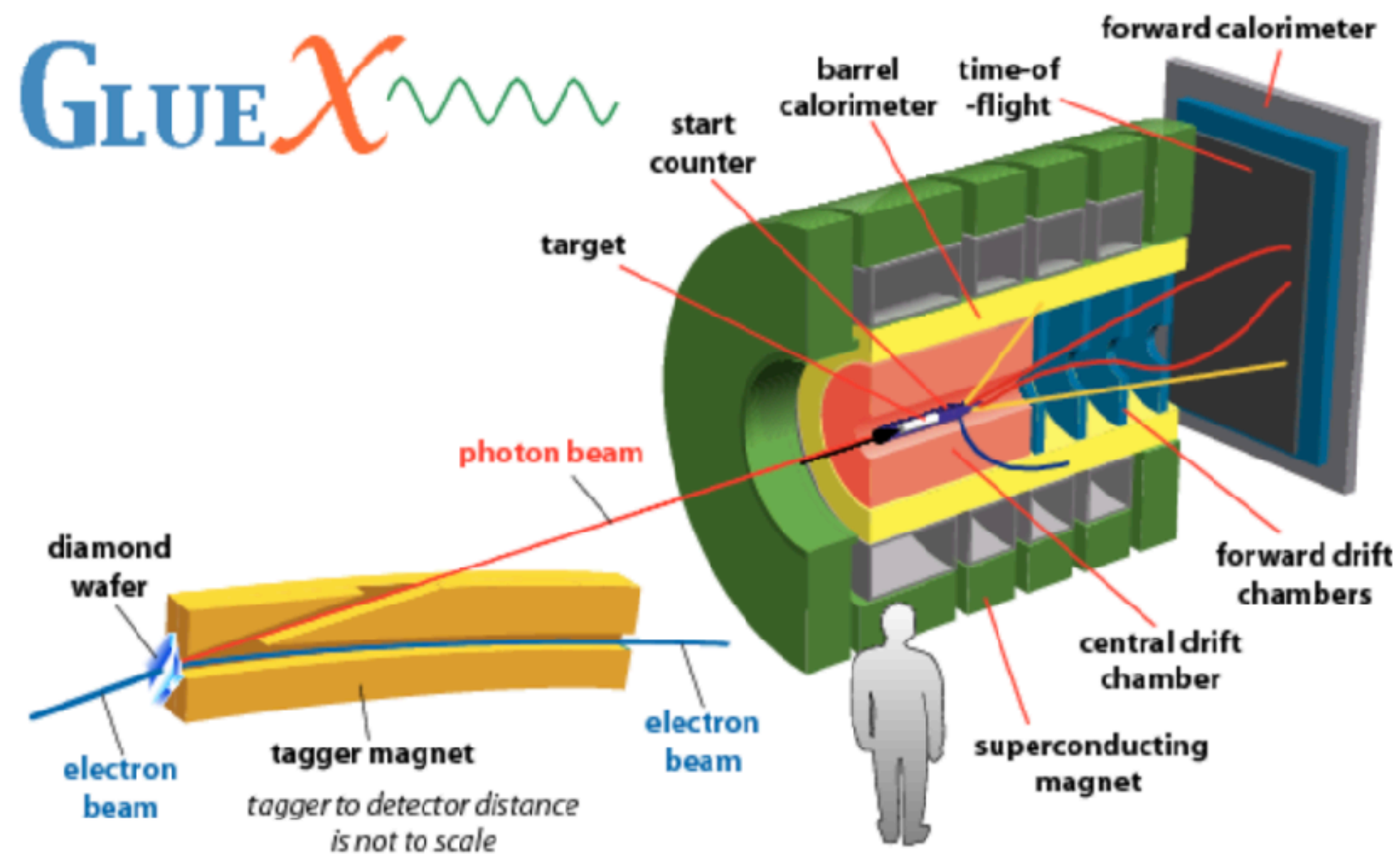
これらの背景プロセスは電子線と光子ビームで大きく異なる。

* 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(?)



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

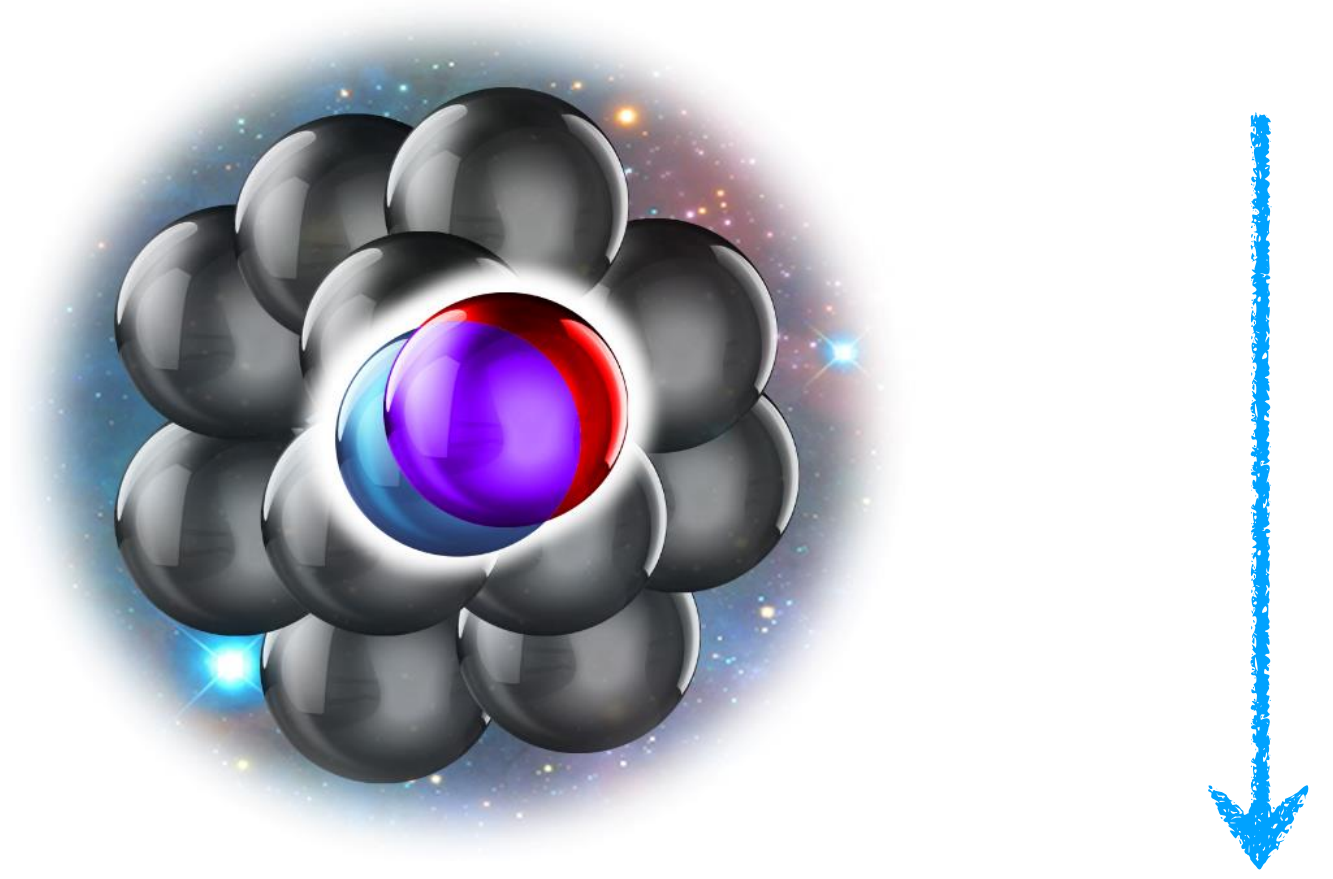


- JLab/Hall D, GlueX検出器を使った実験
- 9 GeV制動放射ガンマ線
- 4π を覆う荷電・中性検出器
- d, ^4He , ^{12}C データ取得済。解析中

- 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

$$|\text{proton}\rangle = \alpha_{\text{PLC}} |\text{PLC}\rangle + \alpha_{3qg} |3q + g\rangle + \alpha_{3qq\bar{q}} |3qq\bar{q}\rangle + \alpha_{3q\pi} |3q\pi\rangle + \dots$$

p reactions	n reactions
$\gamma p \rightarrow \pi^0 p$	$\gamma n \rightarrow \pi^- p$
$\gamma p \rightarrow \pi^- \Delta^{++}$	$\gamma n \rightarrow \pi^- \Delta^+$
$\gamma p \rightarrow \rho^0 p$	$\gamma n \rightarrow \rho^- p$
$\gamma p \rightarrow K^+ \Lambda$	$\gamma n \rightarrow K^0 \Lambda$
$\gamma p \rightarrow K^+ \Sigma^0$	$\gamma n \rightarrow K^0 \Sigma^0$
$\gamma p \rightarrow \omega p$	$\gamma n \rightarrow K^+ \Sigma^-$
$\gamma p \rightarrow \phi p$	$\gamma n \rightarrow K^- \Sigma^+$
\vdots	\vdots



$$|\text{proton}^*\rangle = \alpha_{\text{PLC}}^* |\text{PLC}\rangle + \alpha_{3qg}^* |3q + g\rangle + \alpha_{3qq\bar{q}}^* |3qq\bar{q}\rangle + \alpha_{3q\pi}^* |3q\pi\rangle + \dots$$

核子を異なるフォック状態の重ね合わせで記述する模型。
 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）は変化せず、その係数が変更を受ける。
 原子核中と自由空間での反応分岐比を比較することで、この「修正された係数」の情報にアクセスできる。
 （ただ現在のところ、分岐比が予言できるほど理論が整備されていない）

- 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-)
- 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ることでEMC効果が説明できるという主張がなされた
- 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）での測定が重要になる
- 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/LEPS2の2 GeVビームで検討中である