J-PARC-HI MT
PWG3-report

市川、江角、森野、佐甲、小沢、郡司

Yudai Ichikawa (Tohoku University)
2024/02/22 @ RIKEN

WG discussion

- https://docs.google.com/document/d/1oFG_oVNvhGD7yDZDCa_L40bEad8XpdnOeruYmlYIm6M/edit

WG discussion

議題：次回の全体MT（2/22）に向けたレプトン測定（森野）とハドロン測定（江角）と
ハドロン物理の関係性の理解を深める。

- J-PARC-HIでハドロン物理を測定を行うためには、どのような検出器が必要なのかも
  議論する。
  ハドロン物理で何を狙うか？

- レプトン測定に関して（森野）

- ハドロン測定に関して（江角）

- J-PARC HIでのハドロン物理（市川）
  （レプトン測定、ハドロン測定と直接被らないものを前提として）
  - Femtoscopy
    - 三体力（長距離力）
      ALICEに対する強みは？
      エネルギーがそろったバリオン密度はJ-PARC-HIの方が多いはず。
      →Femtoscopyには強み。
      →中性子測定をどうする？

    - 原子核＋ハドロンのFemtoscopy

    - Σ測定をどうするか？　（Ξ0）
      - γ conversionでの測定
      - kinkでの測定
        いいvertex検出器を用意できるか？
        どれだけ近づけられるか？
      - 中性子測定、γ測定

    - Femtoscopyで新しいbreak throughは？
      - Femtoscopyの部分波解析（ALICE/STARが得するだけな気はする）

- ハイパー核測定
  - Mid-rapidity： double Λハイパー核、triple Λハイパー核、
    Ξハイパー核（ツインΛハイパー核）
    Ωハイパー核
    - vertex検出器の精度による（resolutionがどれだけか？）
  - Beam-rapidity（保留）

- エキゾチックハドロン測定
  - エキゾチックハドロン探索
  - 収量比較（pp/pA/AA）
  - Quark scaling（フロー測定）

- フロー測定
  - Interactionの議論（Λ-A potentialの密度依存性？）
  - 粒子の偏極の情報を使って、何か議論できないか？
- チャーム測定？
  - D中間子くらいは測定できる
    近藤効果（D中間子のフロー測定(v1, v2)）

  (チャームの続き)
  生成量というよりIDの方の問題だと思う(vertex ID)
  CBM方面の人はthreshold付近だと素過程で考えるより重イオンの場合は
  断面積はもっと多いというような絵をよく見せてる(fermi & muti step)
  こういうレアプローブこそ意味があるという理屈があると、
  高統計の重要性が主張しやすい。
  郡司さんとかが前に言っていたのは、charm baryonの生成比がCSC相
  のdetailのプローブにならないか、という事
  charmは生成されてもほぼ止まっているだろうと思うとlambda_cのフロー
  を見ることでdiquarkが自由度になっているなら、それが見えるのでは、
  というのはある。

  Λc/Dに関してはs.h.leeと安井さんの論文がある
  ハドロン物理という意味では高温状態でのdiquarkの性質変化を反映した
  charm baryonの性質変化みたいな事を
  末永さんと岡さんが最近計算していたりする。

WG discussion

(・カイラル対称性の話？相互作用の密度依存性？
STARの結果でPromissingな話があるとロジックがつながる。)
佐々木さんのいってるvetor- axialvector mixingが相当する
spectraだけならj-parc energyでの計算もある
ただし実験と比べられる形にはなってない
STARでいうと興味ある領域の統計は足りないはず
NA60+のdimuonはいけると言っている
理論計算の方の詳細は不明(dynamicsは考慮されてるのか？)

・重イオン--> p (pi,k) + p (spectroscopy)の話はよくある
p(pi,k)+p → 重イオンを考えたらどうか。
具体的には、高密度側の相図はＮＪＬで考えた場合
lagrangianの形式やcoupling constantで大きく変わる。
diquarkの部分とKMT(6point interaction) termの有無　強さ
本来spectroscopyで決めれるはず。
N-delta splitting(di-quark)で決めると、臨界終点などない(一時相転移もない)
高密度側はほとんどぜんぶカラー超伝導になる
結局のところ、ハドロン物理を記述する有効模型が確立していない
→交差点研究会の次回の話題にする。

→検出器の話と物理の話を整理できるとよい。

・それぞれの関係性（ブレーンストーミング）

・カイラル対称性
Interactionの密度依存性測定（がそもそもできるか (?)だが）
とレプトン測定の関係性

・HBT
InteractionとSorce size
二次元、三次元解析の可能性
Sorce sizeでは次元解析がやられている（1次元近似で）
中心衝突でも、z軸に対しては、非対称になっているはず。
簡単にはEvent selectionだけでもいいはず。
正しい解析で、相互作用の議論ができると主張するのはありかもしれない。
Event selectionだとすると、統計勝負。（J－PARC-HIの強み）

・フロー測定
Interactionとviscocity
Interactionに影響しにくい観測量と影響しやすい観測量があれば
実験的に区別できる（奈良さんへの質問）

・Femtoscopyとハイパー核測定
散乱長と束縛エネルギー（Compositeness）

・フロー測定とハイパー核測定
ハイパー核のフロー測定で何がわかるのか？

https://indico.cern.ch/event/1139644/contributions/5456346/attachments/2707617/4700889/QM2023_poster_JunyiHan_v3.pdf
https://kds.kek.jp/event/47542/timetable/?layout=room#20231028.detailed

Topics for hadron physics

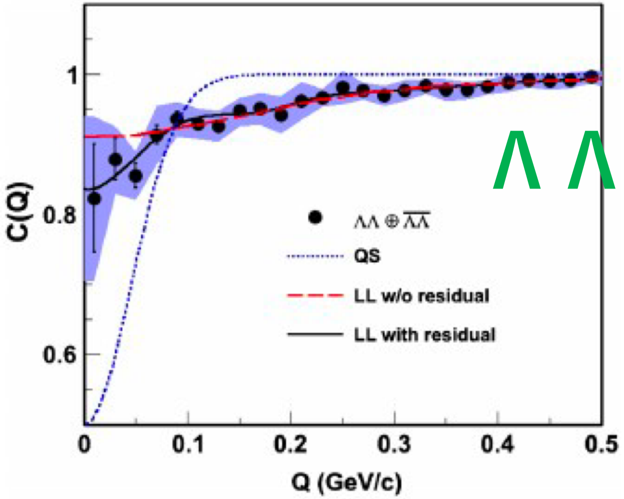
- Femtoscopy
  - Nucleus (Hypernucleus) + hadron system
  - Three body system

- Hypernucleus measurement at mid-rapidity region
  - Double Λ / Triple Λ / Ξ / Ω Hypernucleus
  - p_T and flow measurements with Hypernucleus

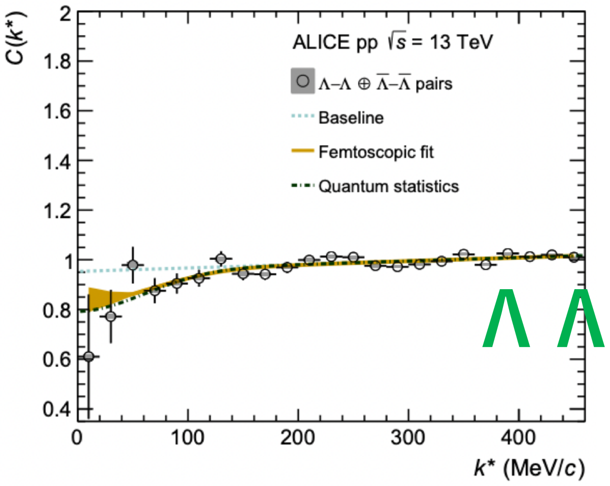
- Exotic hadron measurement
  - Yield comparison (pp/pA/AA)
  - Quark scaling by measuring v_2

Example of Femtoscopy

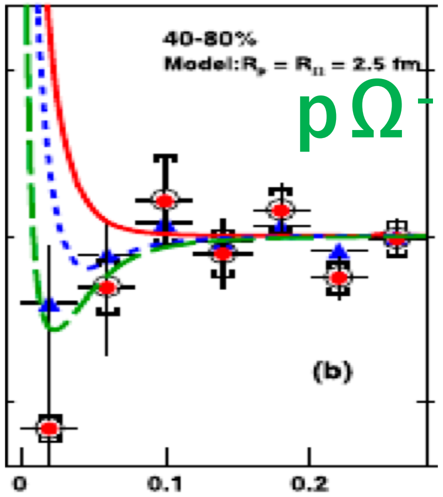
STAR
PRL 114 (2015) 022301



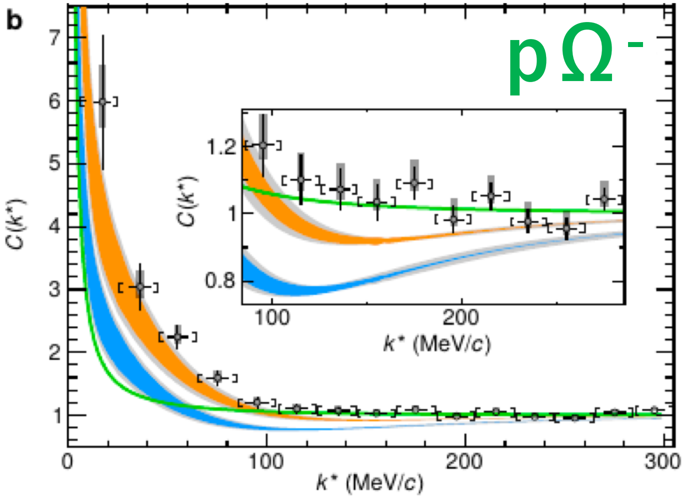
ALICE
PLB 797 (2019) 134822



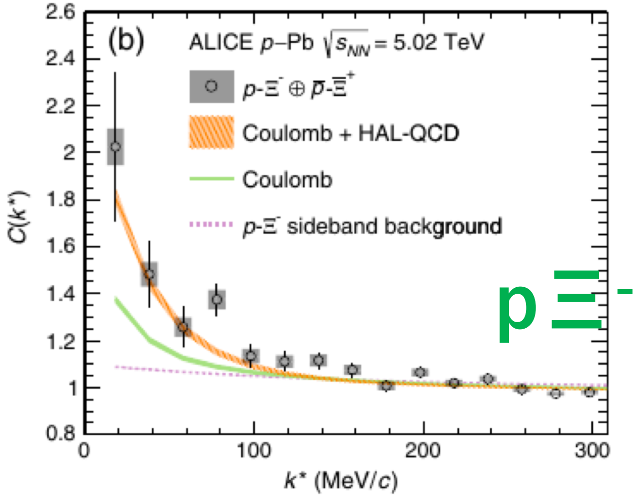
STAR
PLB 790 (2019) 490



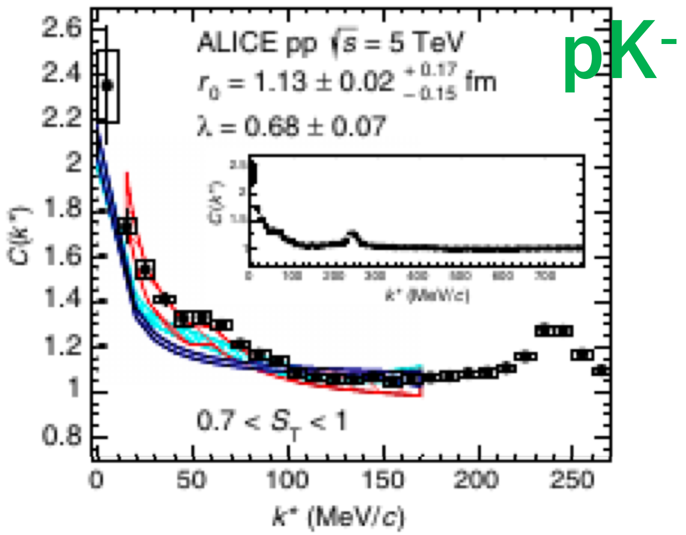
ALICE
Nature 588 (2020) 232



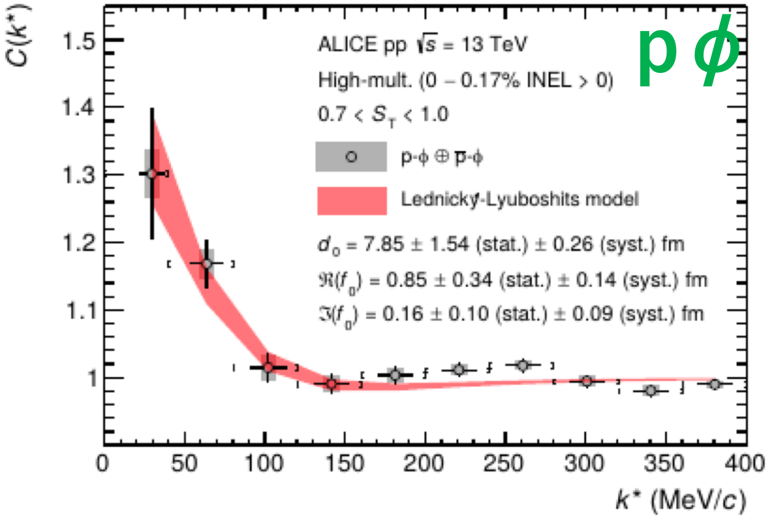
ALICE
PRL123(2019)112002

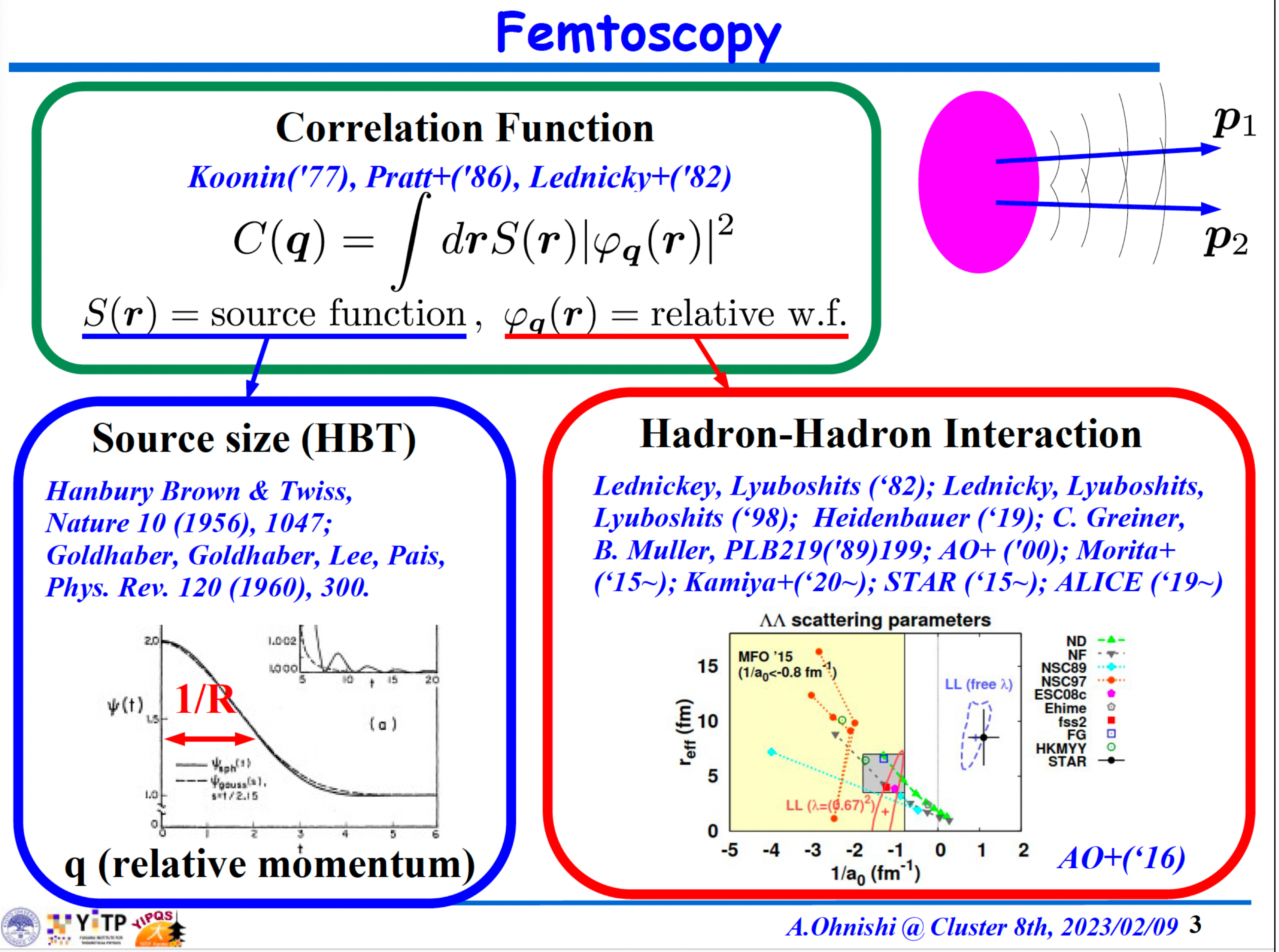


ALICE
PRL 124 (2020) 092301



ALICE
PRL 127 (2021) 17, 172301





Femtoscopy

Correlation Function

Koonin('77), Pratt+('86), Lednicky+('82)

$$C(\boldsymbol{q}) = \int d\boldsymbol{r} S(\boldsymbol{r}) |\varphi_{\boldsymbol{q}}(\boldsymbol{r})|^2$$

$S(\boldsymbol{r}) = \text{source function}$, $\varphi_{\boldsymbol{q}}(\boldsymbol{r}) = \text{relative w.f.}$

Source size (HBT)

Hanbury Brown & Twiss,
Nature 10 (1956), 1047;
Goldhaber, Goldhaber, Lee, Pais,
Phys. Rev. 120 (1960), 300.

q (relative momentum)

Hadron-Hadron Interaction

Lednickey, Lyuboshits ('82); Lednicky, Lyuboshits, Lyuboshits ('98); Heidenbauer ('19); C. Greiner, B. Muller, PLB219('89)199; AO+ ('00); Morita+ ('15~); Kamiya+('20~); STAR ('15~); ALICE ('19~)

AO+('16)

A.Ohnishi @ Cluster 8th, 2023/02/09 3

Led by
Prof. A. Ohnishi

Ledniky-Lyuboshitz (LL) model

ALICE, PLB 802, 135223 (2020).

(Given by Bethe-Salpeter equation)

Confluent hypergeometric function (solution of hypergeometric equation)

Combination of the regular and singular S-wave Coulomb function

$$\Psi^{(+)}_{-\vec{k}^*}(\vec{r}^*,\vec{k}^*) = \sqrt{A_C(\eta)}\frac{1}{\sqrt{2}} \times \left[e^{-i\vec{k}^*\cdot\vec{r}^*} F(-i\eta,1,i\zeta^+) + \boxed{f_C(\vec{k}^*)}\frac{\tilde{G}(\rho,\eta)}{r^*}\right]$$

Scattering amplitude: $f(k^*) = \left[\frac{1}{f_0} + \frac{1}{2}d_0k^{*2} - ik^*\right]^{-1},$:w/o coulomb force (effective range expansion)

$$f_C(k^*) = \left[\frac{1}{f_0} + \frac{1}{2}d_0k^{*2} - ik^* - \frac{2}{a_C}h(\eta) - ik^*A_C(\eta)\right]^{-1}, \qquad \text{(A.3)}$$

:with coulomb force

where $h(\eta) = \eta^2\sum_{n=1}^{\infty}[n(n^2+\eta^2)]^{-1} - \gamma - \ln|\eta|$ ($\gamma = 0.5772$ is the Euler constant).

A_c: Gamow factor (probability factor overcoming the Coulomb barrier)

$\zeta^{\pm} = k^*r^*(1 \pm \cos\theta^*)$, $\eta = 1/(k^*a_C)$,

Angle

Bohr radius

Ledniky-Lyuboshitz (LL) model

ALICE, PLB 802, 135223 (2020).

(Given by Bethe-Salpeter equation)

Confluent hypergeometric function (solution of hypergeometric equation)

Combination of the regular and singular S-wave Coulomb function

$$\Psi^{(+)}_{-\vec{k}^*}(\vec{r}^*,\vec{k}^*) = \sqrt{A_C(\eta)}\frac{1}{\sqrt{2}} \times \left[e^{-i\vec{k}^*\cdot\vec{r}^*} F(-i\eta, 1, i\zeta^+) + \boxed{f_C(\vec{k}^*)}\frac{\tilde{G}(\rho,\eta)}{r^*} \right]$$

$$\boxed{f(k^*) = \left[\frac{1}{f_0} + \frac{1}{2}d_0 k^{*2} - ik^*\right]^{-1},}$$

When only the strong interaction is present,

Sum of over all pair-spin configurations σ

Weights: e.g.$(\bar{p}p)$ ¼(singlet), ¾(triplet)

One dimensional source size

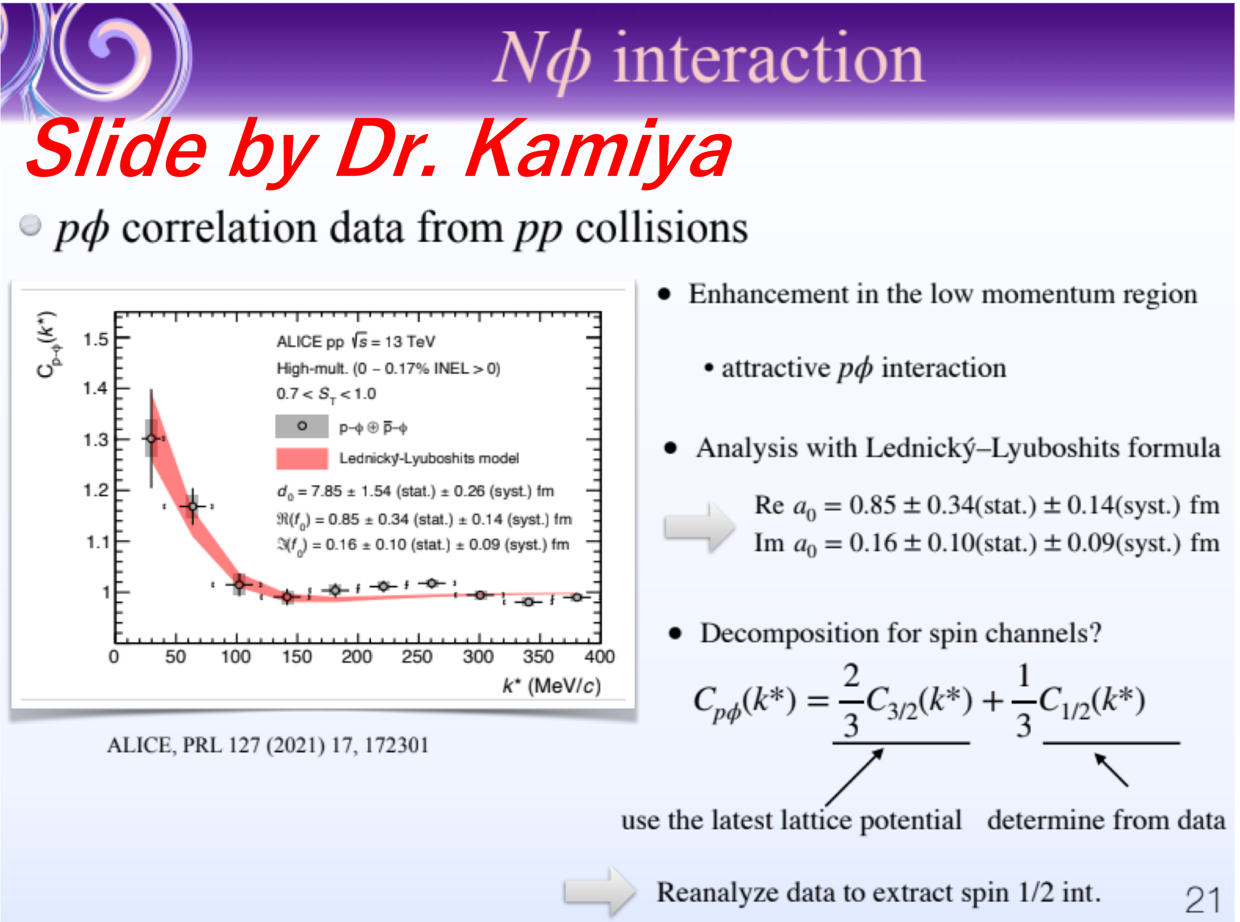
$$C(k^*) = 1 + \sum_\sigma \rho_\sigma \left[\frac{1}{2}\left|\frac{f(k^*)}{R}\right|^2 \left(1 - \frac{d_0^\sigma}{2\sqrt{\pi}R}\right) + \frac{2\Re f(k^*)}{\sqrt{\pi}R}F_1(2k^*R) - \frac{\Im f(k^*)}{R}F_2(2k^*R)\right],$$

By fitting with this equation, we can evaluate the scattering parameter as f_0, d_0.

$$F_1(z) = \int_0^z (e^{x^2-z^2}/z)dx \qquad F_2(z) = (1 - e^{-z^2})/z.$$

Issue of Femtoscopy and advantage of J-PARC-HI

- Femtoscopy → Isospin and spin **averaged** interaction (f_0, d_0)
- CF corresponds to **total cross section (σ)** in the scattering experiment.
  - Scattering experiment: PWA to decompose them using dσ/dΩ and spin observables
  - Can CF(Femtoscopy) be decomposed with spin observables?（Issues in the future）



Nϕ interaction

Slide by Dr. Kamiya

- *pϕ* correlation data from *pp* collisions

ALICE, PRL 127 (2021) 17, 172301

- Enhancement in the low momentum region
  - attractive *pϕ* interaction
- Analysis with Lednický–Lyuboshits formula

$$\mathrm{Re}\ a_0 = 0.85 \pm 0.34(\mathrm{stat.}) \pm 0.14(\mathrm{syst.})\ \mathrm{fm}$$
$$\mathrm{Im}\ a_0 = 0.16 \pm 0.10(\mathrm{stat.}) \pm 0.09(\mathrm{syst.})\ \mathrm{fm}$$

- Decomposition for spin channels?

$$C_{p\phi}(k^*) = \underbrace{\frac{2}{3}C_{3/2}(k^*)} + \underbrace{\frac{1}{3}C_{1/2}(k^*)}$$

use the latest lattice potential　determine from data

Reanalyze data to extract spin 1/2 int.

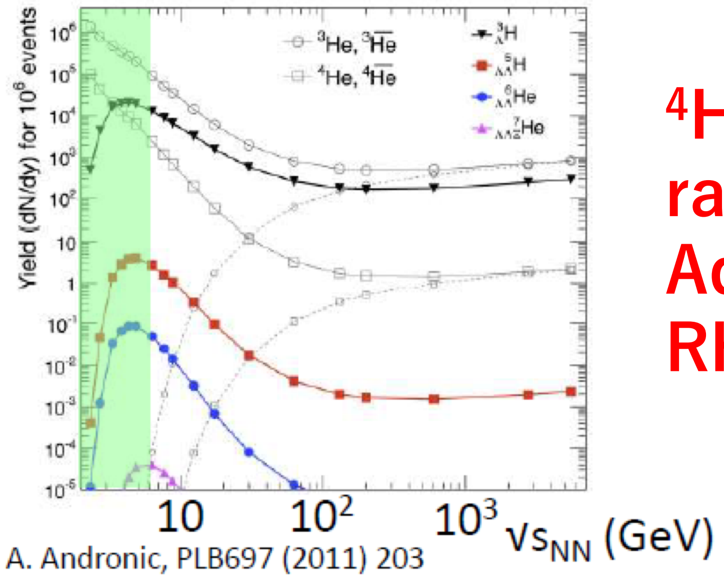
21

Key of J-PARC-HI Femtoscopy

:^{4}He（I=J=0）

f_0, d_0 will be determined uniquely

J-PARC-HI

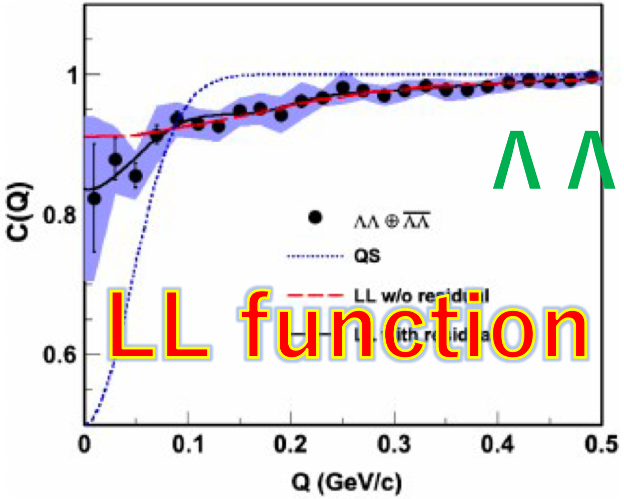


A. Andronic, PLB697 (2011) 203

^{4}He production rate is maximum. Advantage over RHIC and LHC!!

Example of Femtoscopy

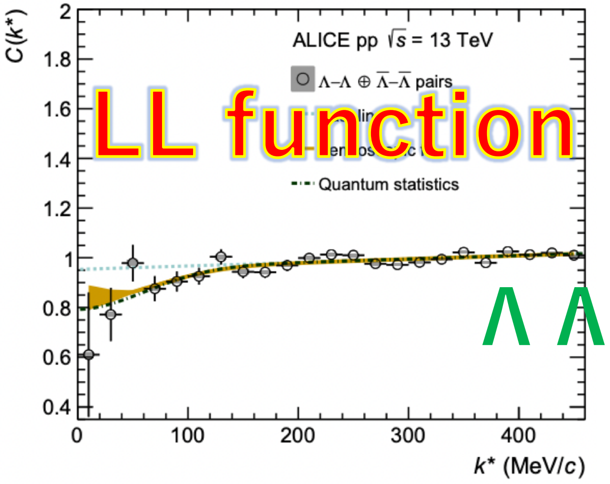
STAR
PRL 114 (2015) 022301



Λ Λ

LL function

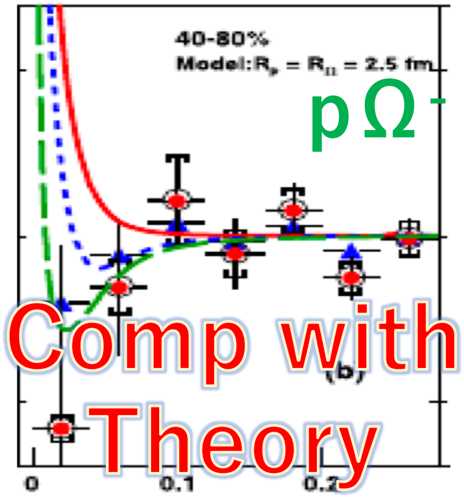
ALICE
PLB 797 (2019) 134822



LL function

Λ Λ

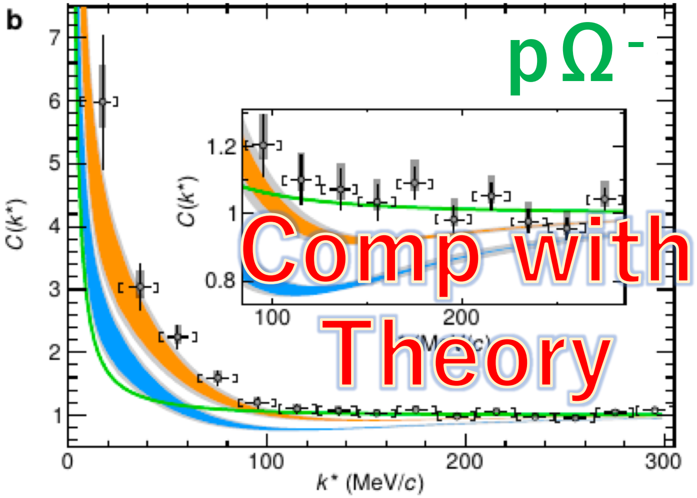
STAR
PLB 790 (2019) 490



p Ω⁻

Comp with Theory

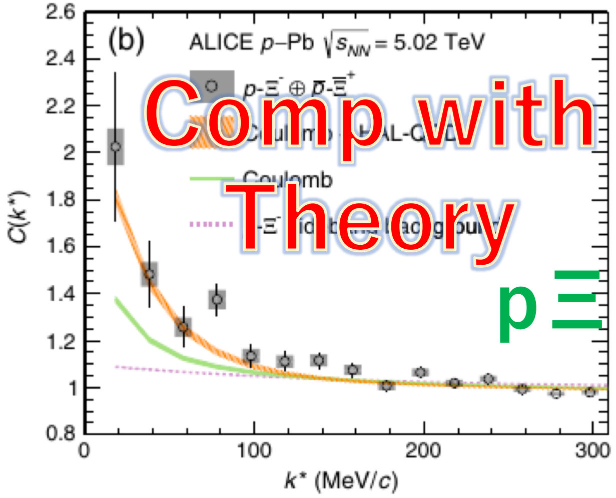
ALICE
Nature 588 (2020) 232



p Ω⁻

Comp with Theory

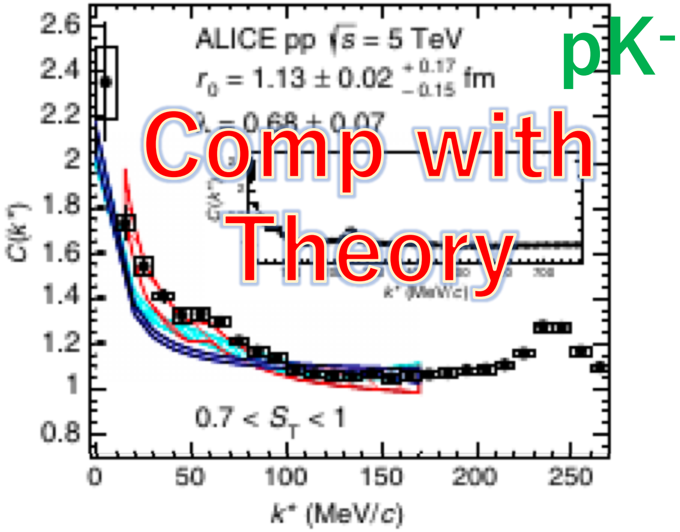
ALICE
PRL123(2019)112002



Comp with Theory

p Ξ⁻

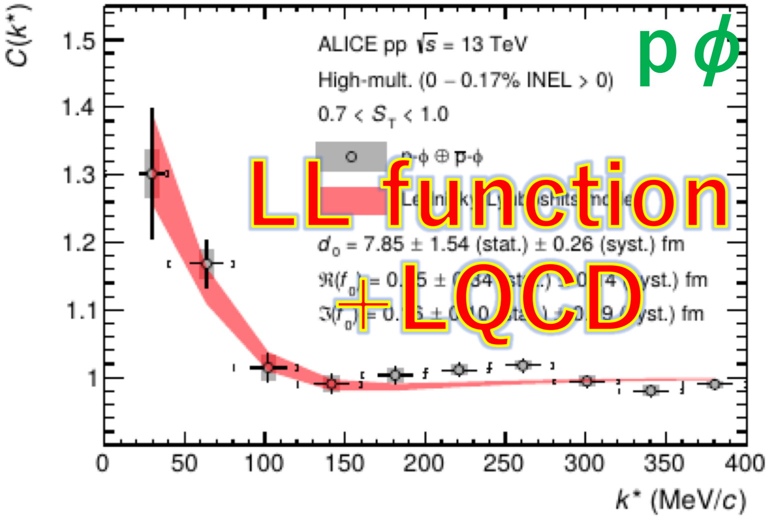
ALICE
PRL 124 (2020) 092301



pK⁻

Comp with Theory

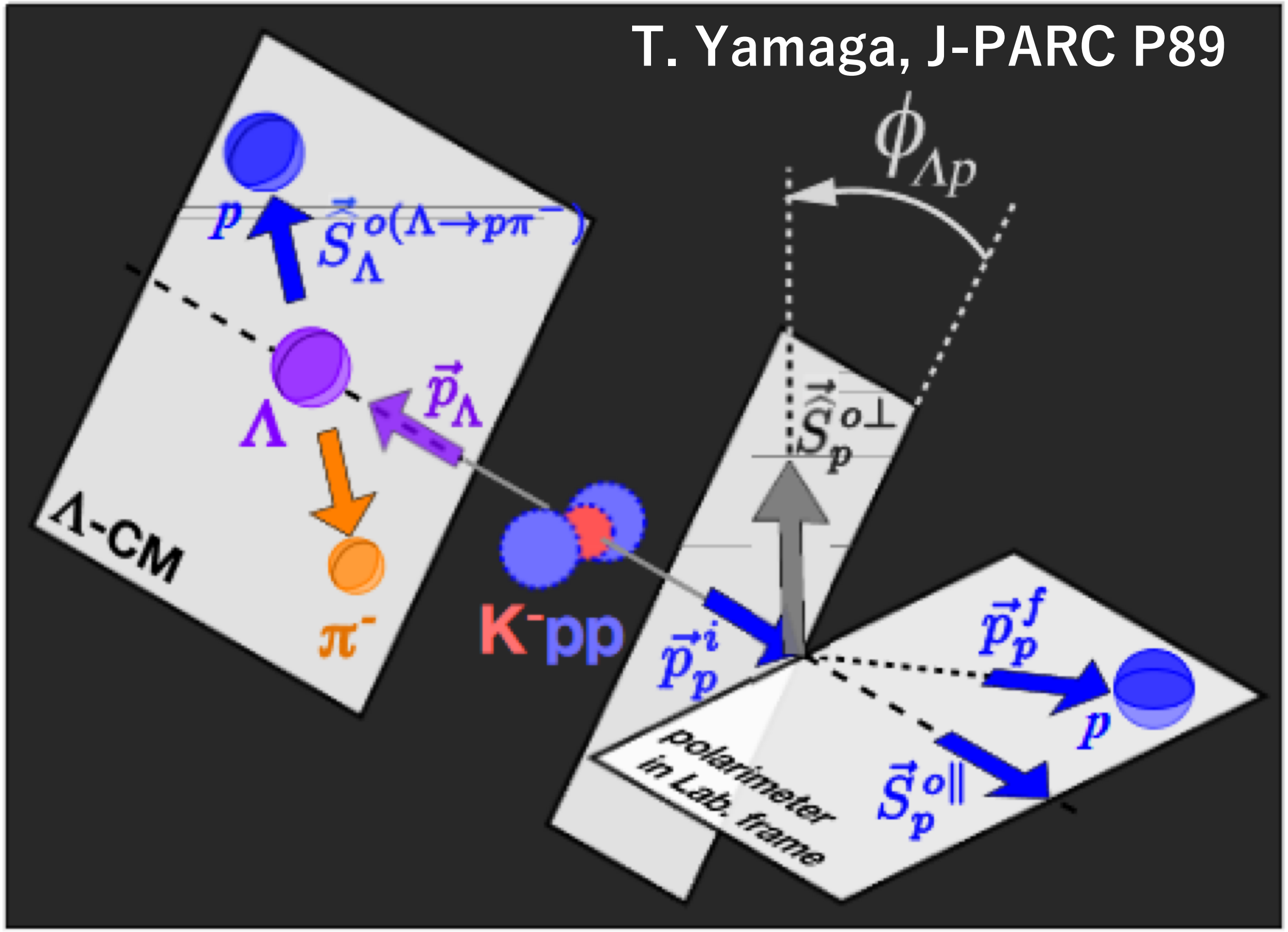
ALICE
PRL 127 (2021) 17, 172301

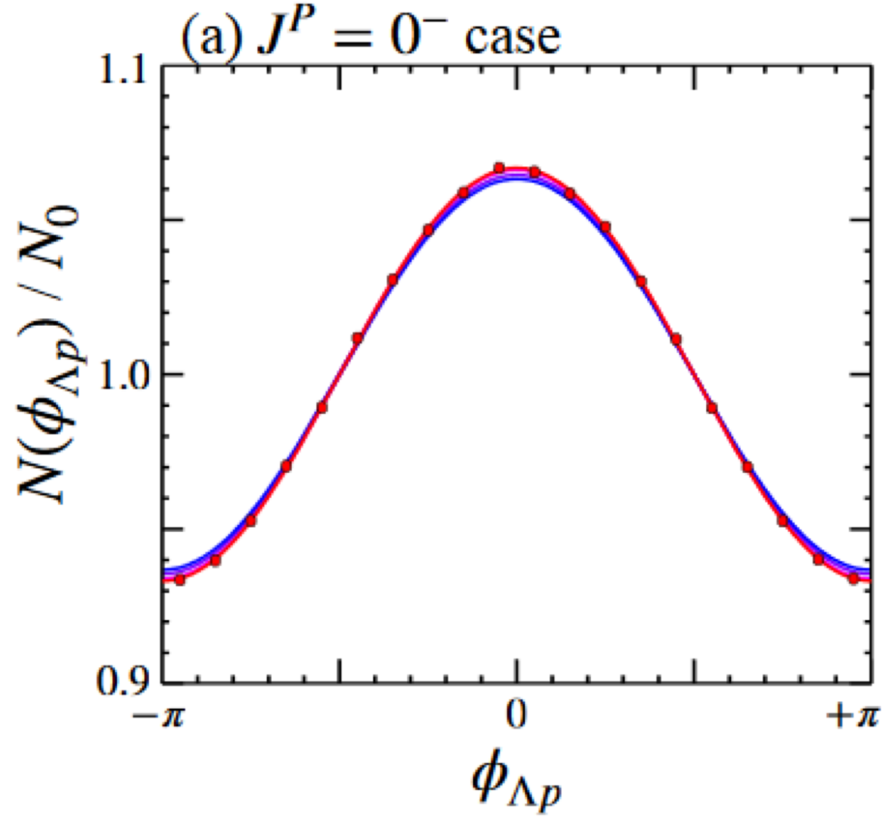


p ϕ

LL function + LQCD

Partial Wave Analysis of CF


T. Yamaga, J-PARC P89


(a) $J^P = 0^-$ case

Femtoscopy(f_0) + Spectroscopy(B_Ξ) → Compositeness

J-PARC-HI

$f_0(\alpha\text{-}\Xi^-)$

Femtoscopy

J-PARC-K1.8

$B_\Xi(\alpha\text{-}\Xi^-)$

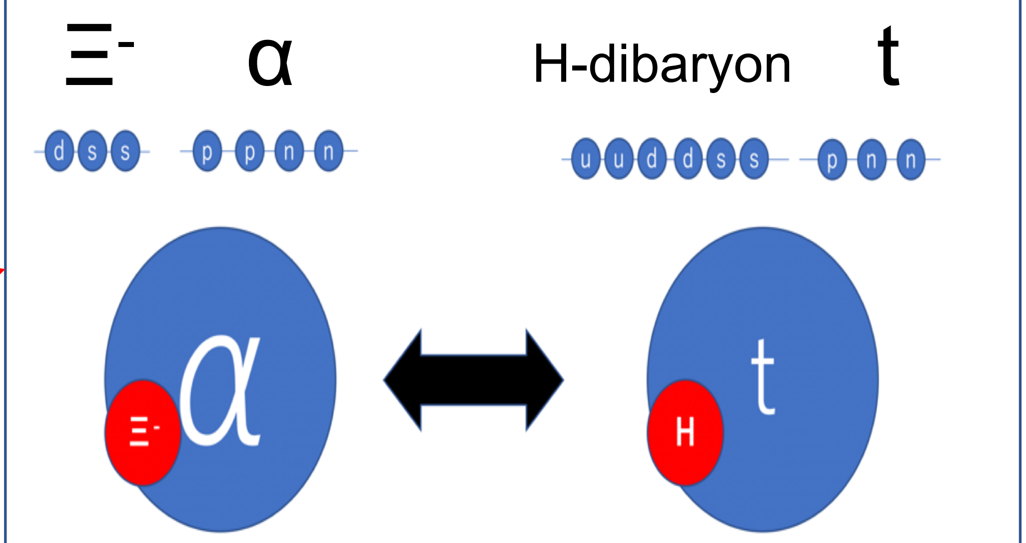
Missing-mass spectroscopy

Weak Binding relation

$$f_0 = R\left\{\frac{2X}{1+X} + \mathcal{O}\left(\frac{R_{typ}}{R}\right)\right\},$$

$$R \equiv \sqrt{2\mu B_\Xi}$$

Compositeness (X) of $^5_\Xi$H

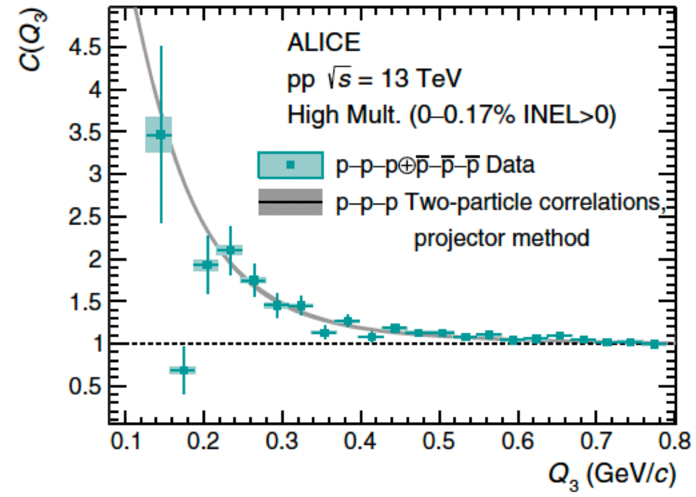


Probability：X　　**Probability：1-X**

Hypernucleus + Hadron Femtoscopy is also interesting and possible

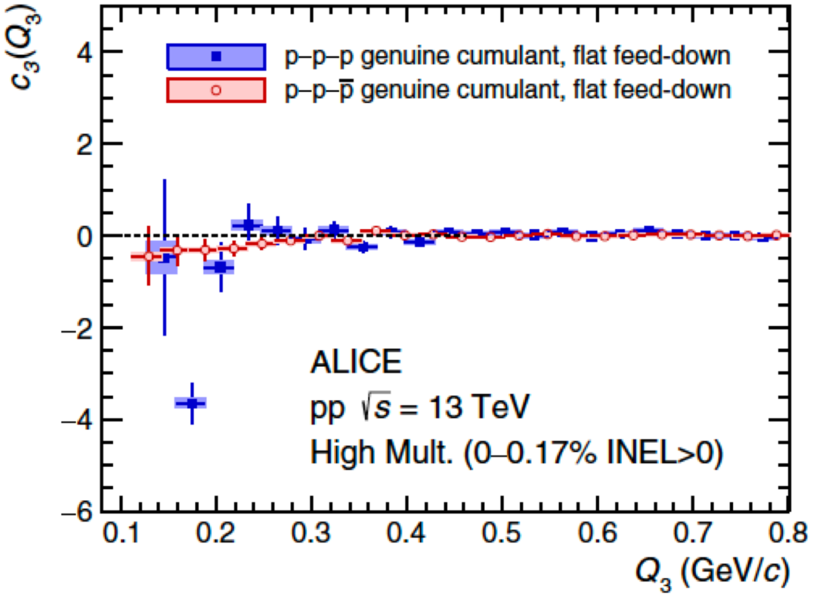
Three body systems (three body interaction)

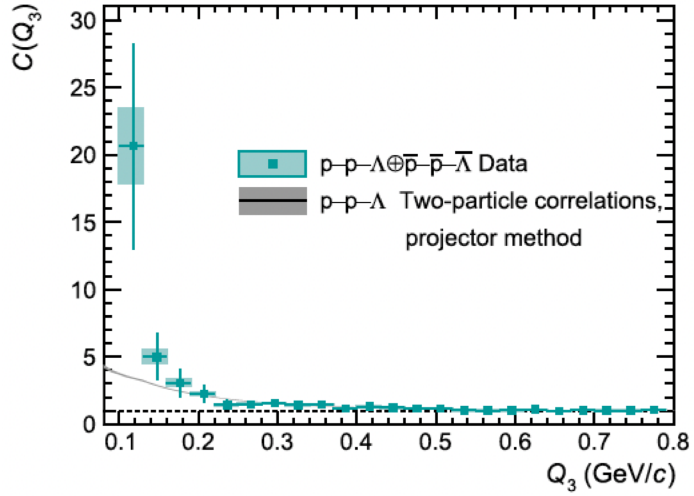
ALICE, Eur. Phys. J. A (2023) 59:145



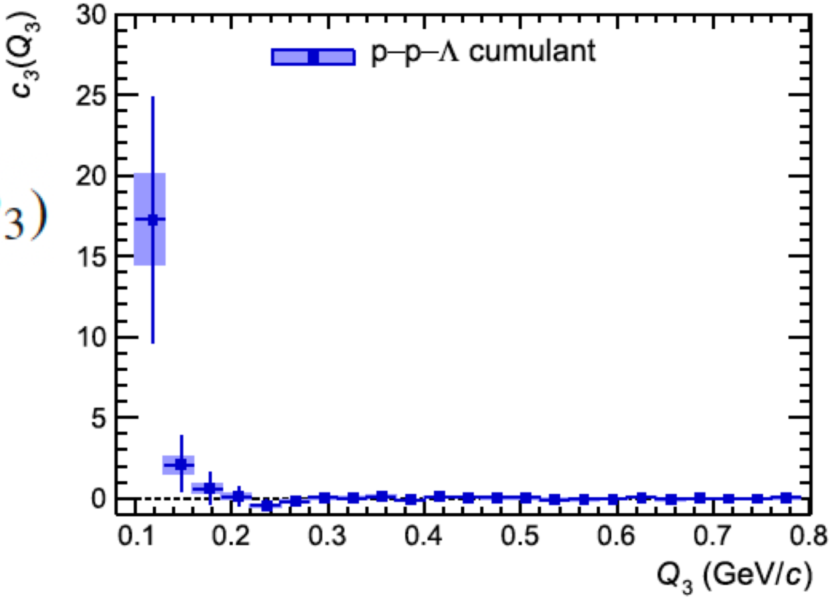
$$C(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \mathbf{p}_3) = C(Q_3) = \mathcal{N}\frac{N_s(Q_3)}{N_m(Q_3)}$$

$$Q_3 = \sqrt{-q_{12}^2 - q_{23}^2 - q_{31}^2}$$





$$c_3(Q_3) = C(Q_3) - C^{\text{two-body}}(Q_3)$$



Topics for hadron physics

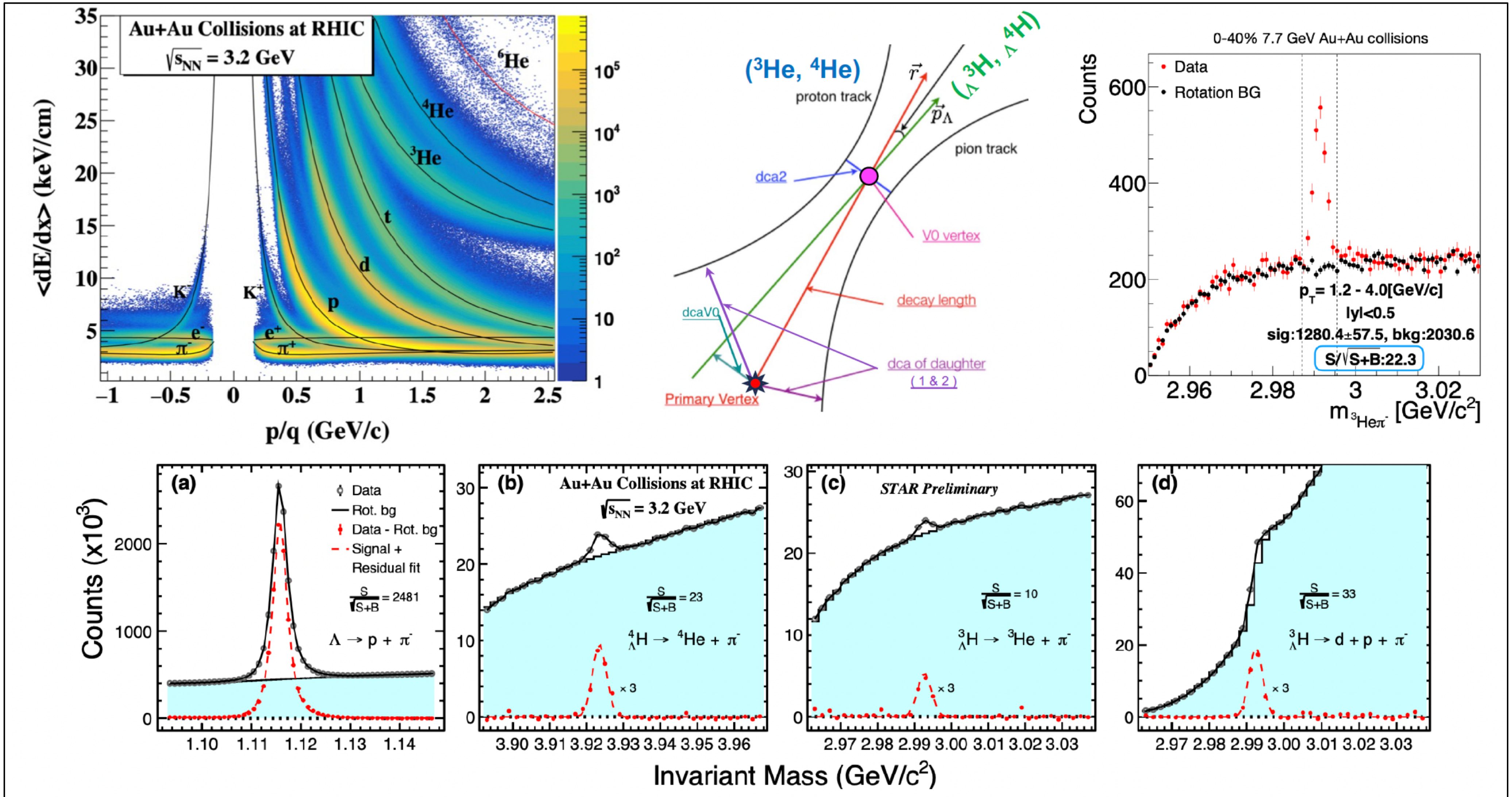
- Femtoscopy
    - Nucleus (Hypernucleus) + hadron system
    - Three body system

- Hypernucleus measurement at mid-rapidity region
    - Double Λ / Triple Λ / Ξ / Ω Hypernucleus
    - p_T and flow measurements with Hypernucleus

- Exotic hadron measurement
    - Yield comparison (pp/pA/AA)
    - Quark scaling by measuring v_2

Hypernucleus measurement at mid-rapidity

We aim to measure Double Λ / Triple Λ / Ξ / Ω Hypernucleus



STAR
BES
phase-II
(Fixed target)

Slide by Prof. Esumi

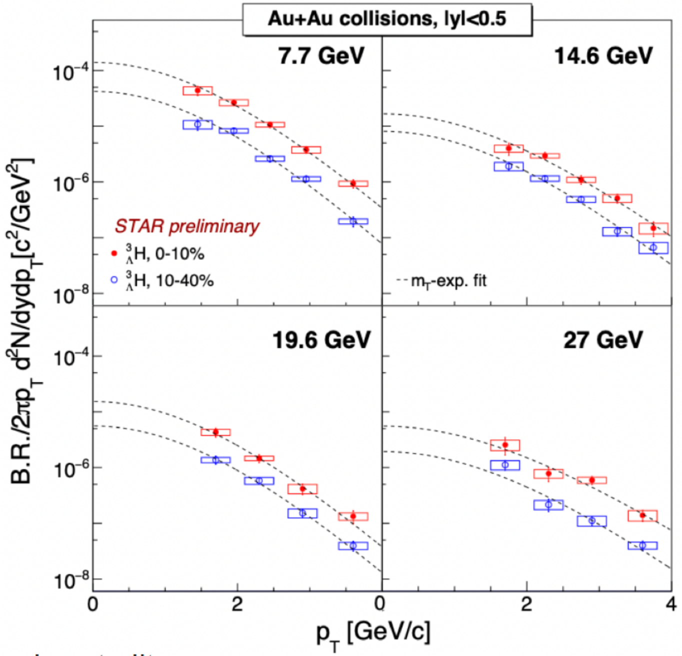
Hypernucleus measurement at mid-rapidity

A lot of measurements with Hypernucleus were shown

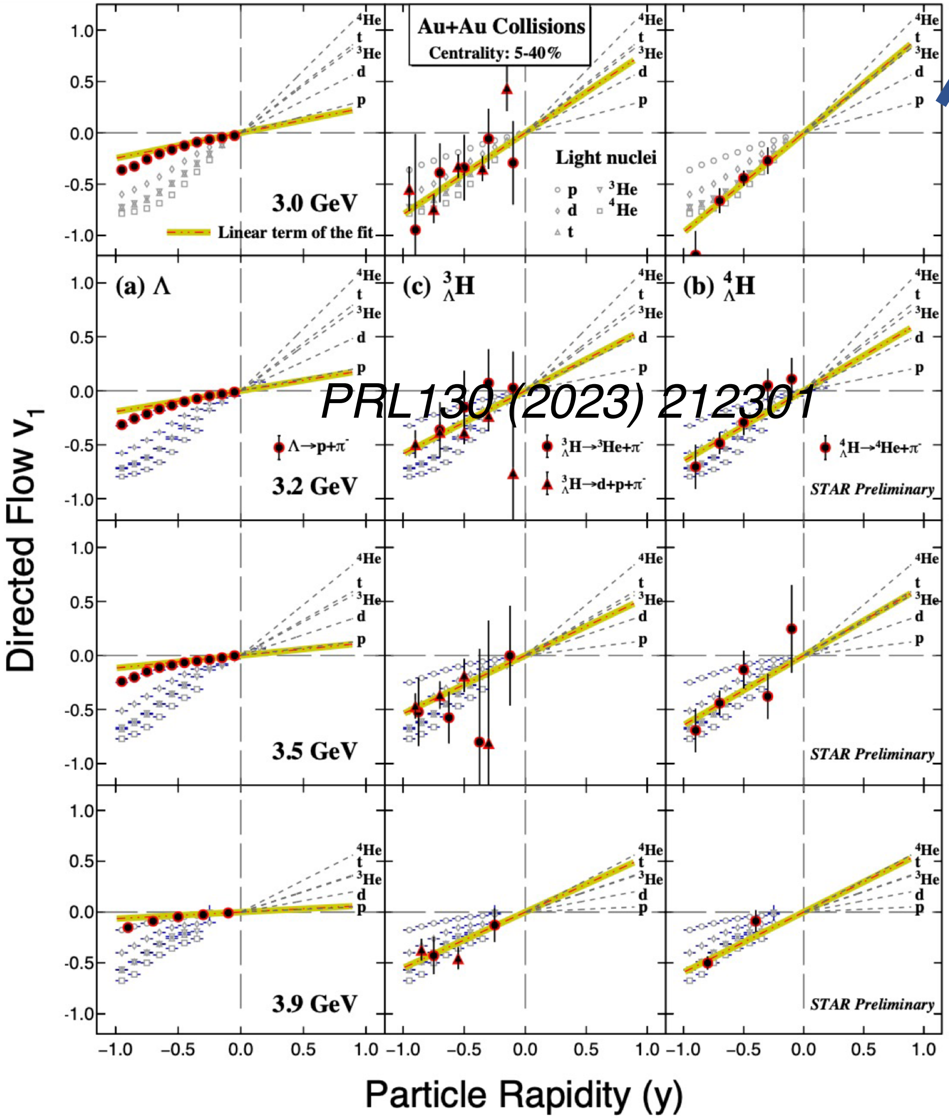
STAR
BES
phase-II
(Fixed target)

Slide by Prof. Esumi

p_T dependence



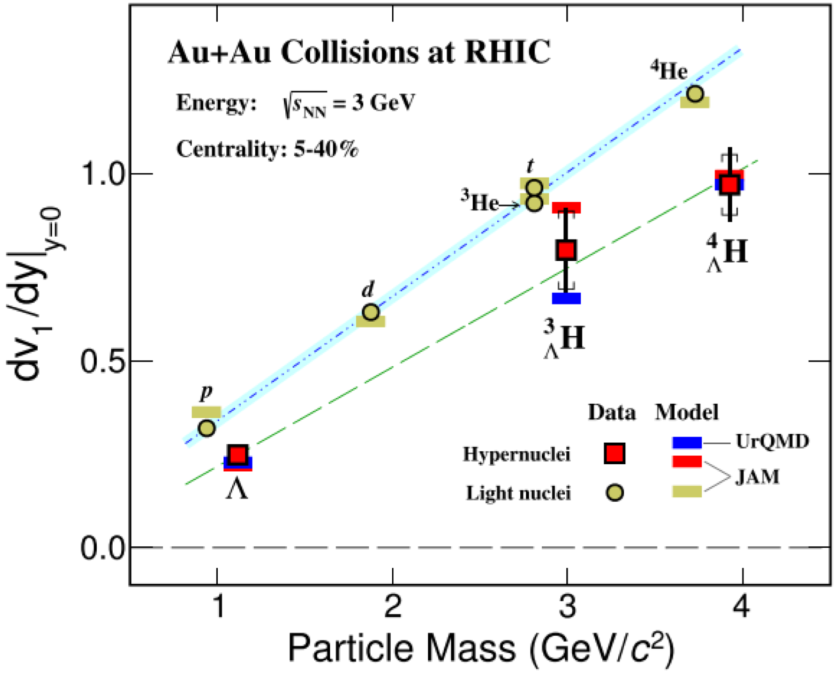
Directed flow v_1 vs rapidity



PRL130 (2023) 212301

Following baryon mass scaling
Coalescence would be dominant
to produce Hypernuclei

v_1 slope



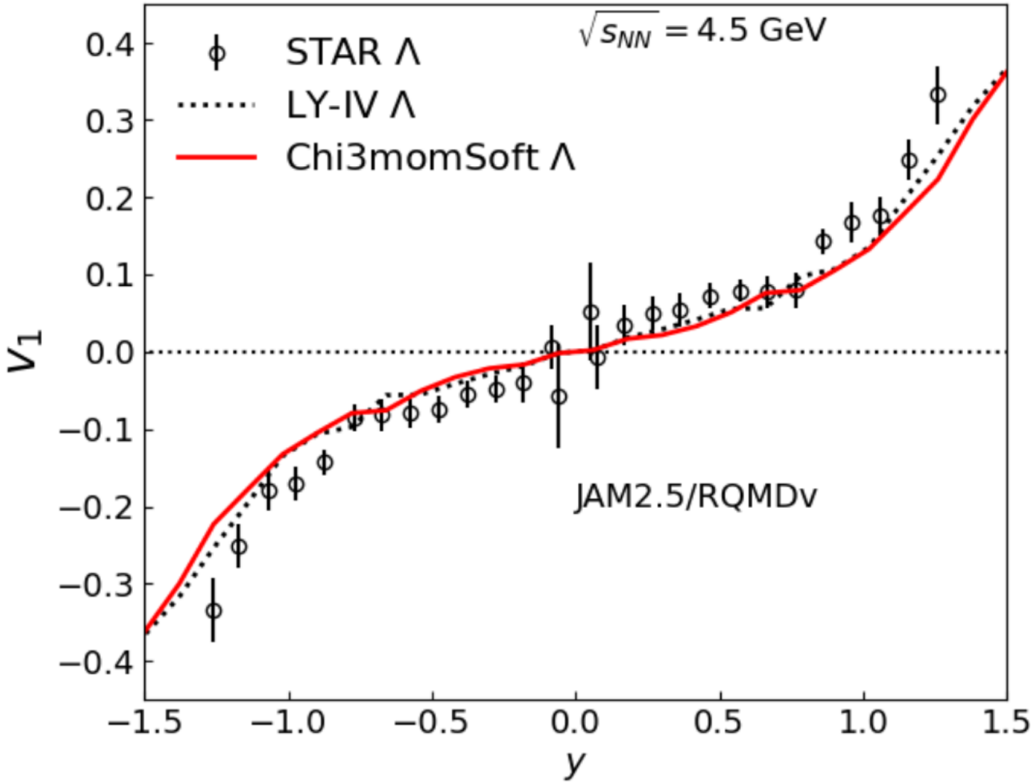
PRL130 (2023) 212301

v1測定の意義

神野さんのスライドより
v1はU_Λにsensitiveでは
なさそう。
$^3_\Lambda$Hのv1も同様らしい。

Λ directed flow v_1 ($\sqrt{s_{NN}} = 4.5$ GeV)

Y. Nara, A. Jinno, K. Murase, & A. Ohnishi, PRC 106, 044902(2022).
(Calculation is done by using latest version of JAM2)



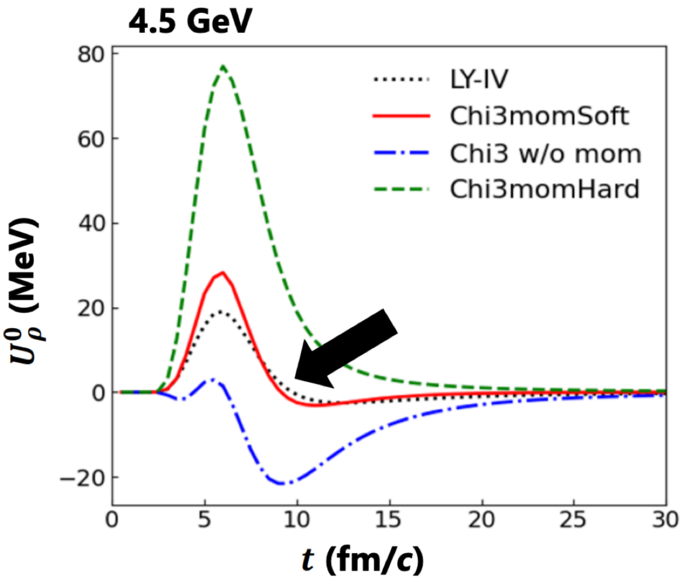
STAR Λ: Phys. Rev. C 103, 034908 (2021).

No difference is found between Chi3 and LY-IV.

(Also for $\sqrt{s_{NN}} = 3 - 19.6$ GeV)

Why?

Why Λ v_1 is not sensitive to $U_\Lambda(\rho)$?



The difference in the Λ potential experienced in the simulation is not so large to exhibit the difference in Λ v_1.

The difference may be found in other setup or event selection method achieving higher density.

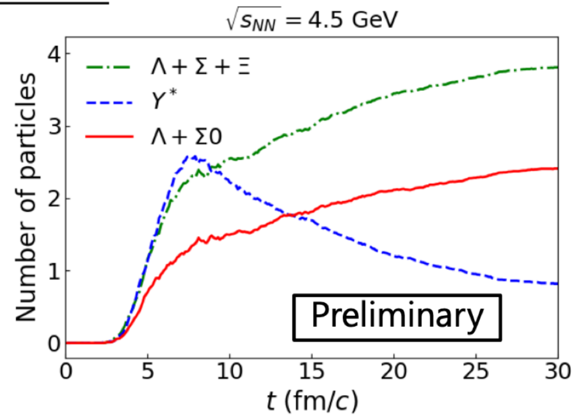
What is needed to access $U_\Lambda(\rho > \rho_0)$?

- More constraint on the mom. dep. in the high mom. region.
- Other setup for selecting Λ's feeling higher densities (event selection).

<u>If you have idea, please let me know!</u>

- Potentials of Σ and resonance hyperons (Y*)
  (In the current calculation, all hyperons feel same potential as Λ.)

→ e.g. parity doublet model
(now working on!)



Topics for hadron physics

- Femtoscopy
    - Nucleus (Hypernucleus) + hadron system
    - Three body system

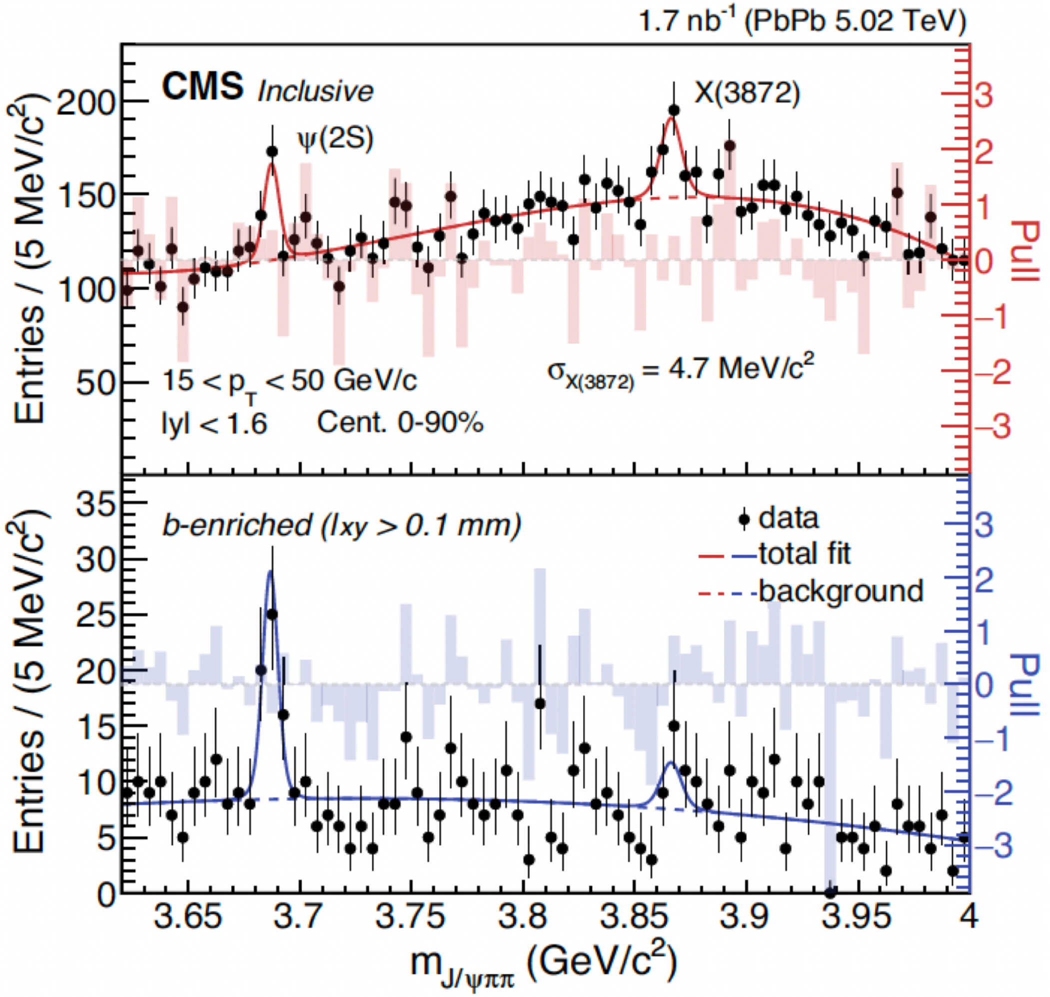
- Hypernucleus measurement at mid-rapidity region
    - Double Λ / Triple Λ / Ξ / Ω Hypernucleus
    - p_T and flow measurements with Hypernucleus

- Exotic hadron measurement
    - Yield comparison (pp/pA/AA)
    - Quark scaling by measuring v_2

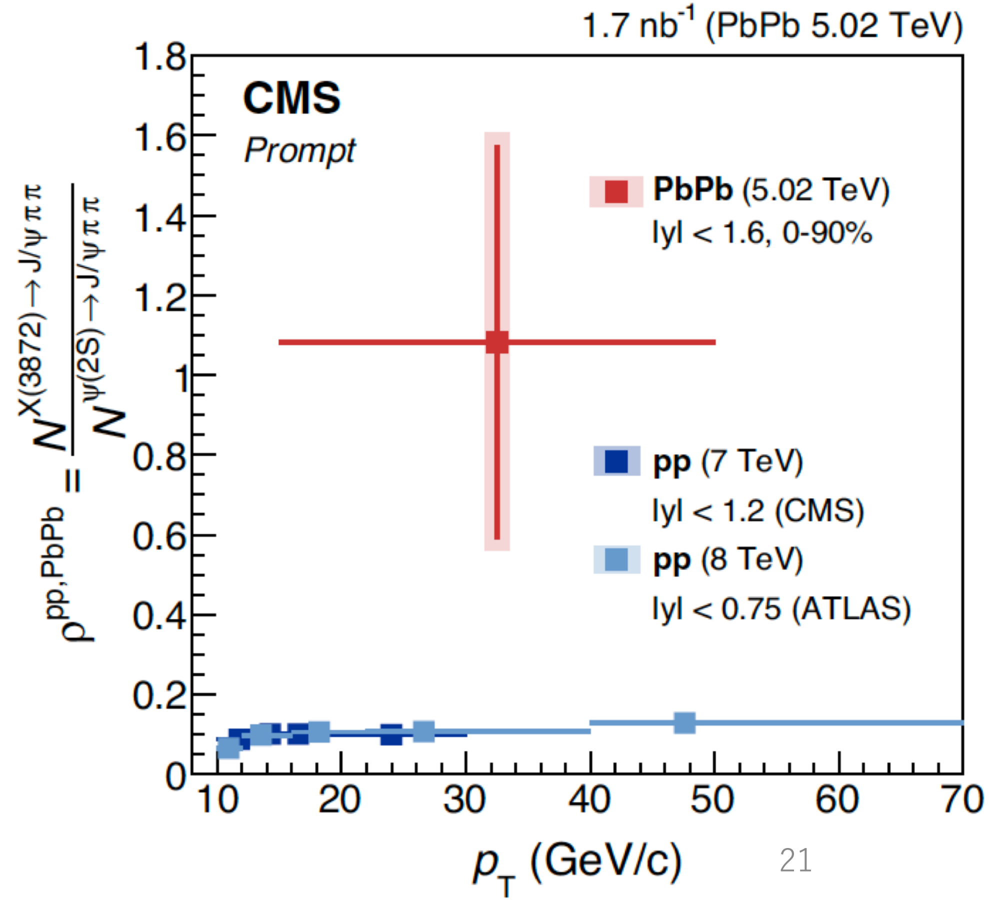
Exotic hadron measurement at J-PARC-HI

CMS, PRL **128**, 032001 (2022).

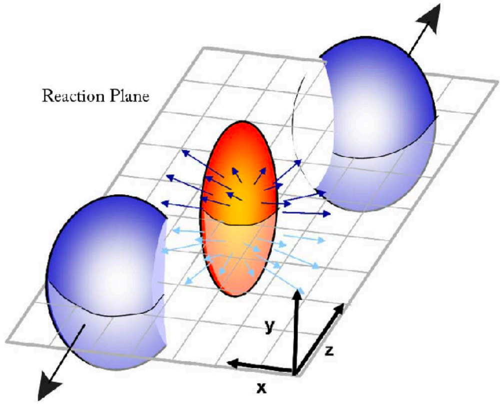
CMS succeed to measure X(3872)

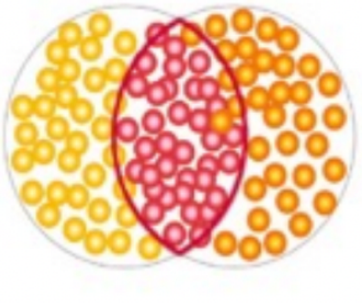


X(3872) and ψ(2s) [$c\bar{c}$] would be affected differently by the medium in Pb-Pb collision. Size and quark content should play an important role.



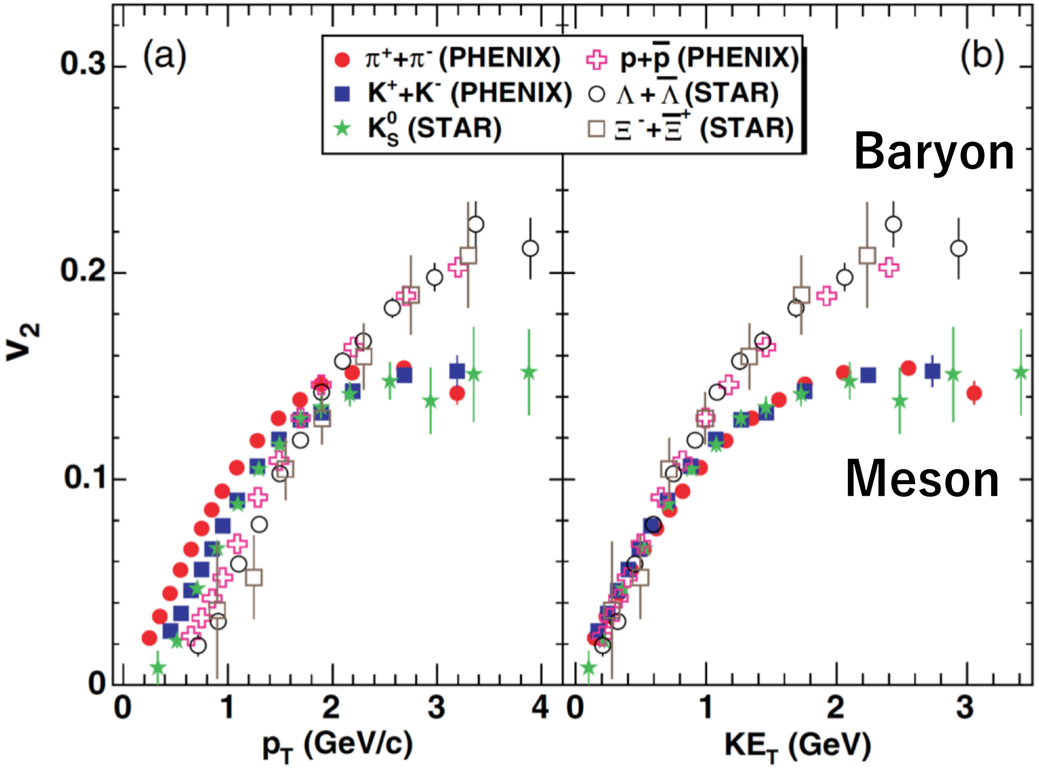
v_2 Measurement with Exotic Hadron →Quark Scaling

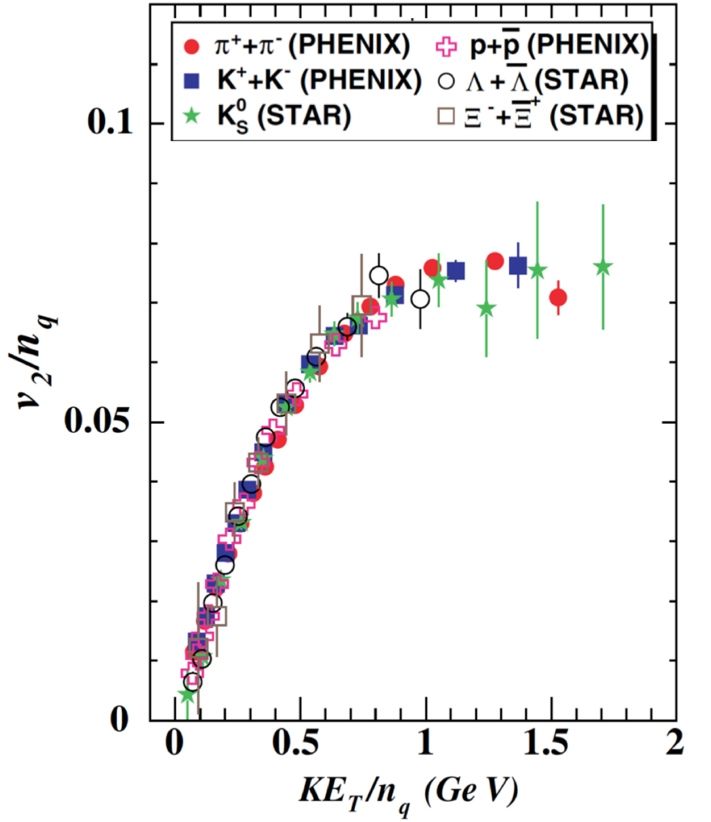




Elliptic flow v_2

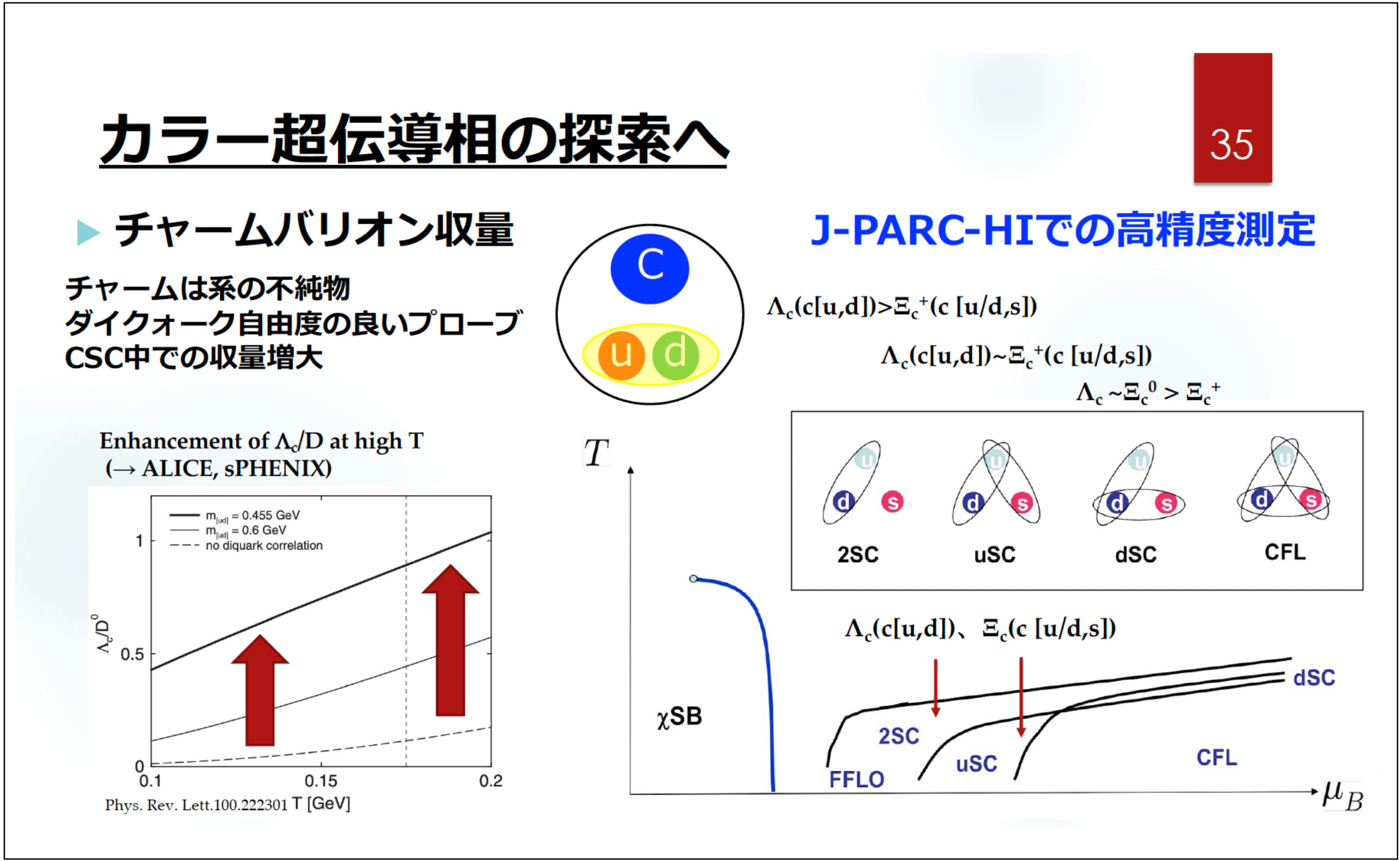
J-PARC-HI will measure the v2
→ Discuss the quark number of exotic hadron





チャーム測定

郡司さんのスライド



35

カラー超伝導相の探索へ

▶ チャームバリオン収量

チャームは系の不純物
ダイクォーク自由度の良いプローブ
CSC中での収量増大

J-PARC-HIでの高精度測定

$\Lambda_c(c[u,d]) > \Xi_c^+(c\ [u/d,s])$

$\Lambda_c(c[u,d]) \sim \Xi_c^+(c\ [u/d,s])$

$\Lambda_c \sim \Xi_c^0 > \Xi_c^+$

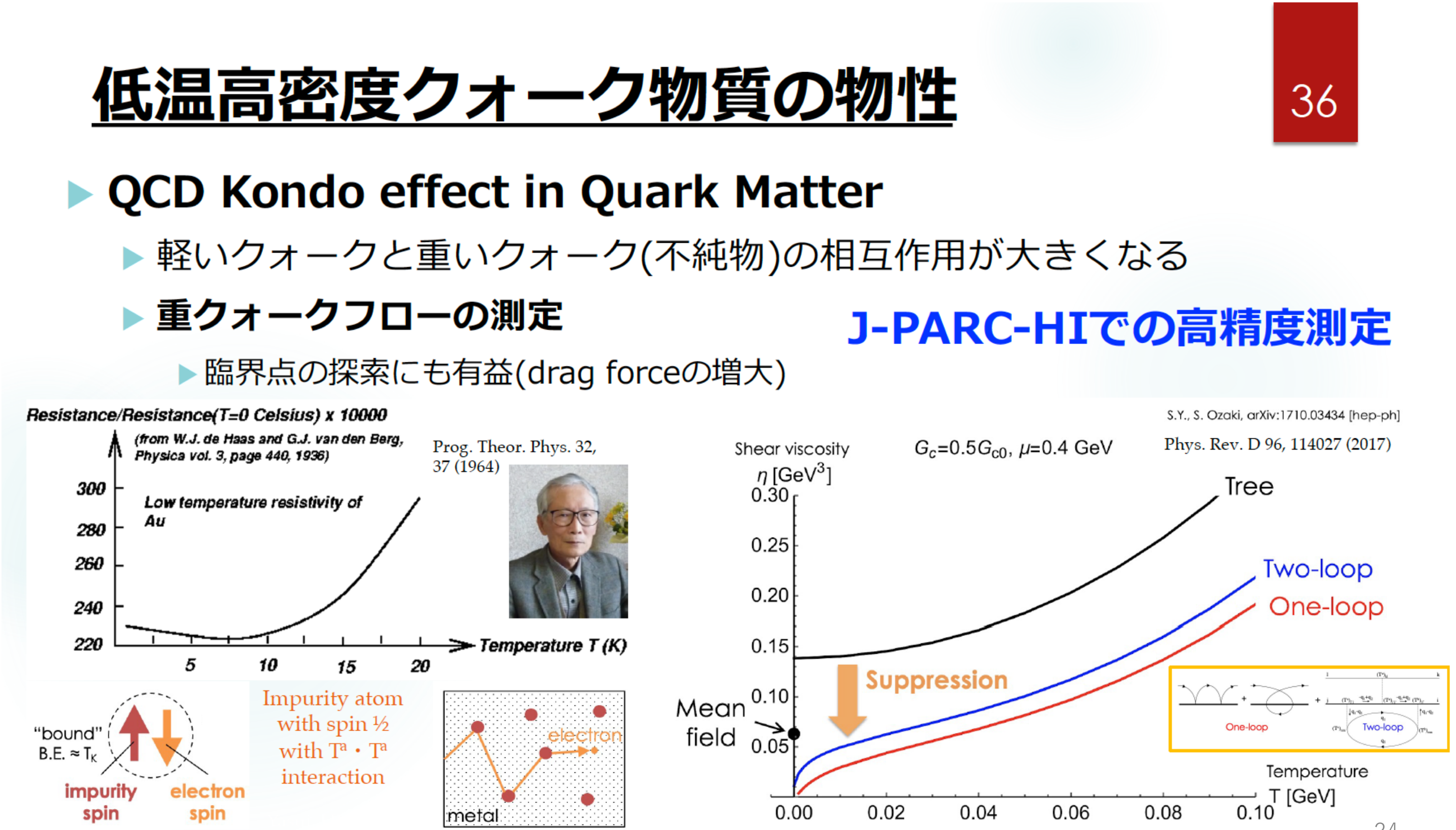
Enhancement of Λ_c/D at high T
(→ ALICE, sPHENIX)

Phys. Rev. Lett.100.222301

$\Lambda_c(c[u,d])$、$\Xi_c(c\ [u/d,s])$

チャーム測定

郡司さんのスライド



36

低温高密度クォーク物質の物性

- **QCD Kondo effect in Quark Matter**
  - 軽いクォークと重いクォーク(不純物)の相互作用が大きくなる
  - **重クォークフローの測定**
    - 臨界点の探索にも有益(drag forceの増大)

J-PARC-HIでの高精度測定

Resistance/Resistance(T=0 Celsius) x 10000

(from W.J. de Haas and G.J. van den Berg, Physica vol. 3, page 440, 1936)

Prog. Theor. Phys. 32, 37 (1964)

S.Y., S. Ozaki, arXiv:1710.03434 [hep-ph]

Phys. Rev. D 96, 114027 (2017)

それぞれの関係性

- カイラル対称性
  Interactionの密度依存性測定（がそもそもできるか (?)だが）とレプトン測定の関係性

- HBT
  InteractionとSorce size
    二次元、三次元解析の可能性
      Sorce sizeでは次元解析がやられている（1次元近似で）
    中心衝突でも、z軸に対しては、非対称になっているはず。
      簡単にはEvent selectionだけでもいいはず。
      正しい解析で、相互作用の議論ができると主張するのはありかもしれない。
      Event selectionだとすると、統計勝負。（J－PARC-HIの強み）

- フロー測定
  Interactionとviscocity
      Interactionに影響しにくい観測量と影響しやすい観測量があれば、実験的に区別できる（奈良さんへの質問）

- Femtoscopyとハイパー核測定
  散乱長と束縛エネルギー（Compositeness）

- フロー測定とハイパー核測定
  ハイパー核のフロー測定で何がわかるのか？

https://indico.cern.ch/event/1139644/contributions/5456346/attachments/2707617/4700889/QM2023_poster_JunyiHan_v3.pdf

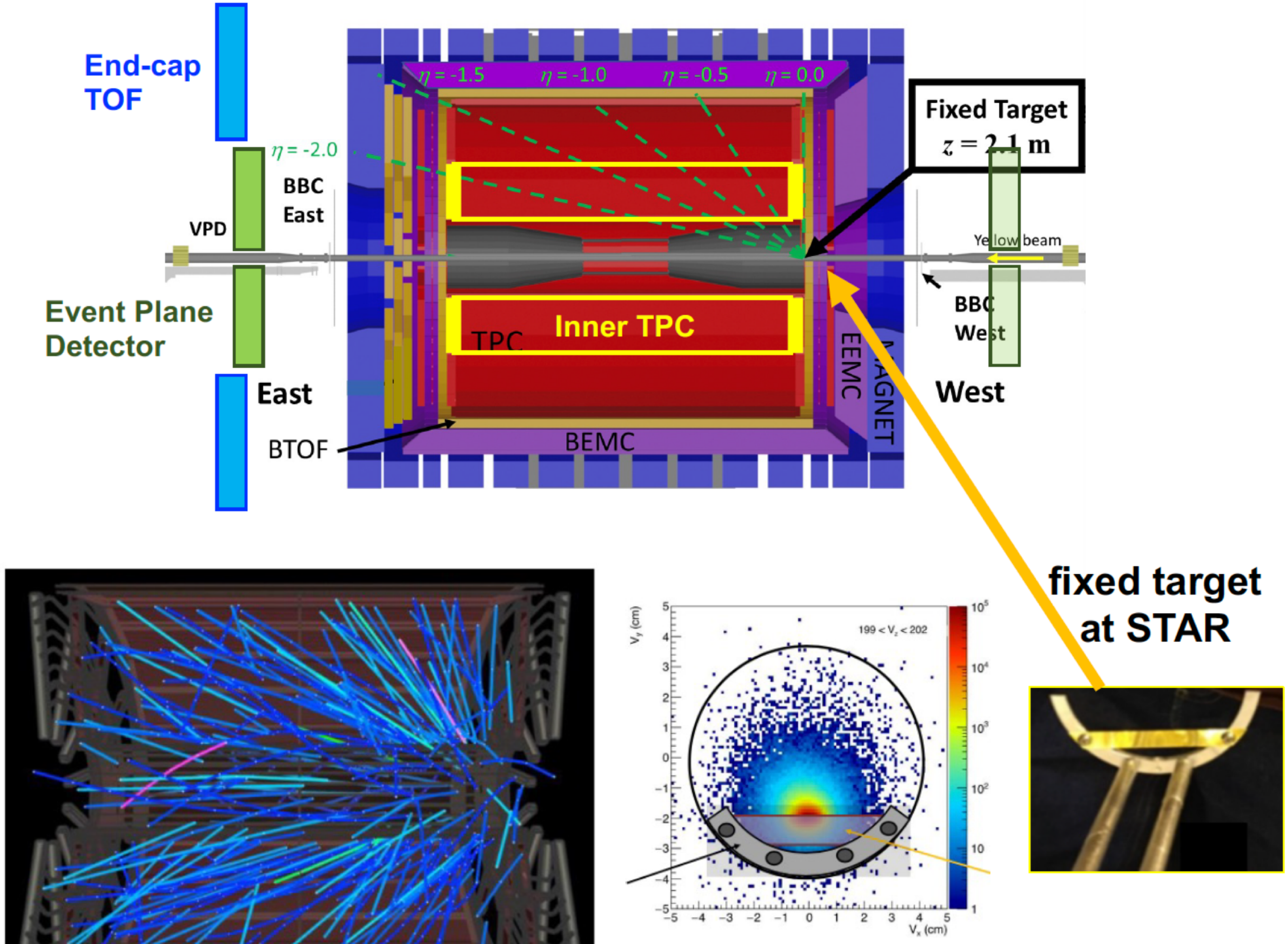
https://kds.kek.jp/event/47542/timetable/?layout=room#20231028.detailed

個人的に思うこと

- ハイパー核、エキゾチックハドロンをただ測定するだけなく、重イオン衝突で測定することのメリットを強調したい。
  - ハイパー核、エキゾチックハドロンを使って、フロー、（揺らぎ？）など重イオン衝突に特徴的な物理量を測定する。
  - ハイパー核と何かのCFを測定して、ハイパー核のForm factorが測定できないか？

検出器に関して

- Vertex検出器（ハイパー核実験の肝）



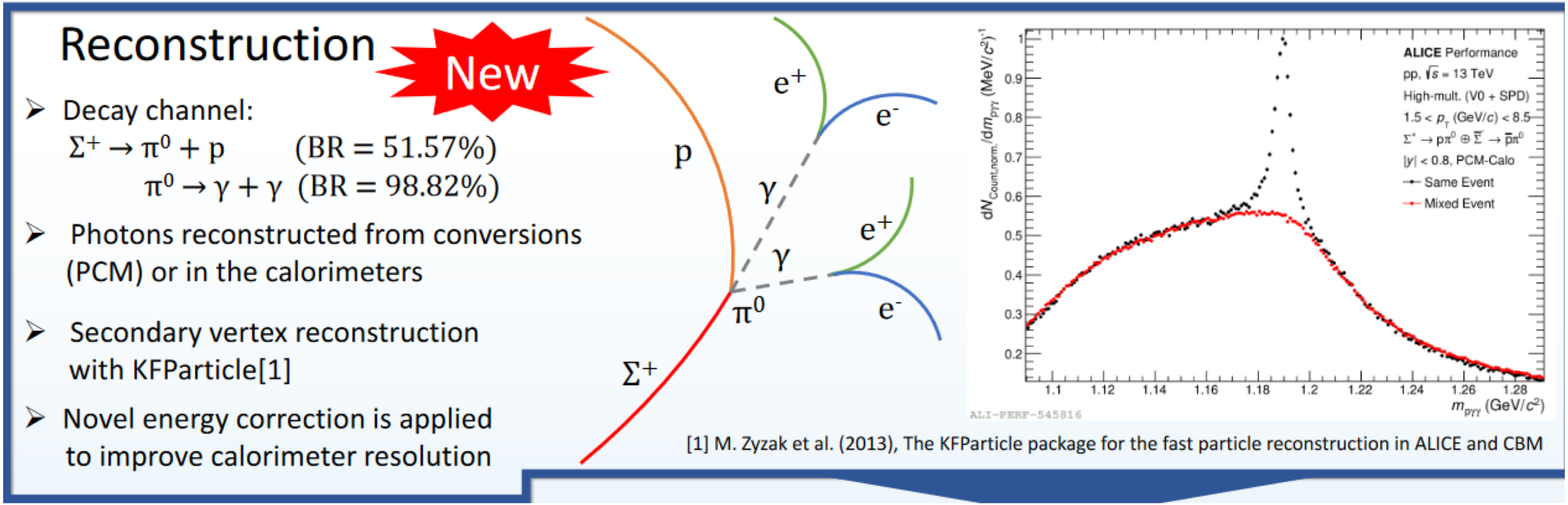
STARの Fixed target modeでは SSDはない。

→

SSDの導入は必須。

検出器に関して

- Σ 測定



Reconstruction

New

- ➢ Decay channel:

$\Sigma^+ \rightarrow \pi^0 + p$ (BR = 51.57%)

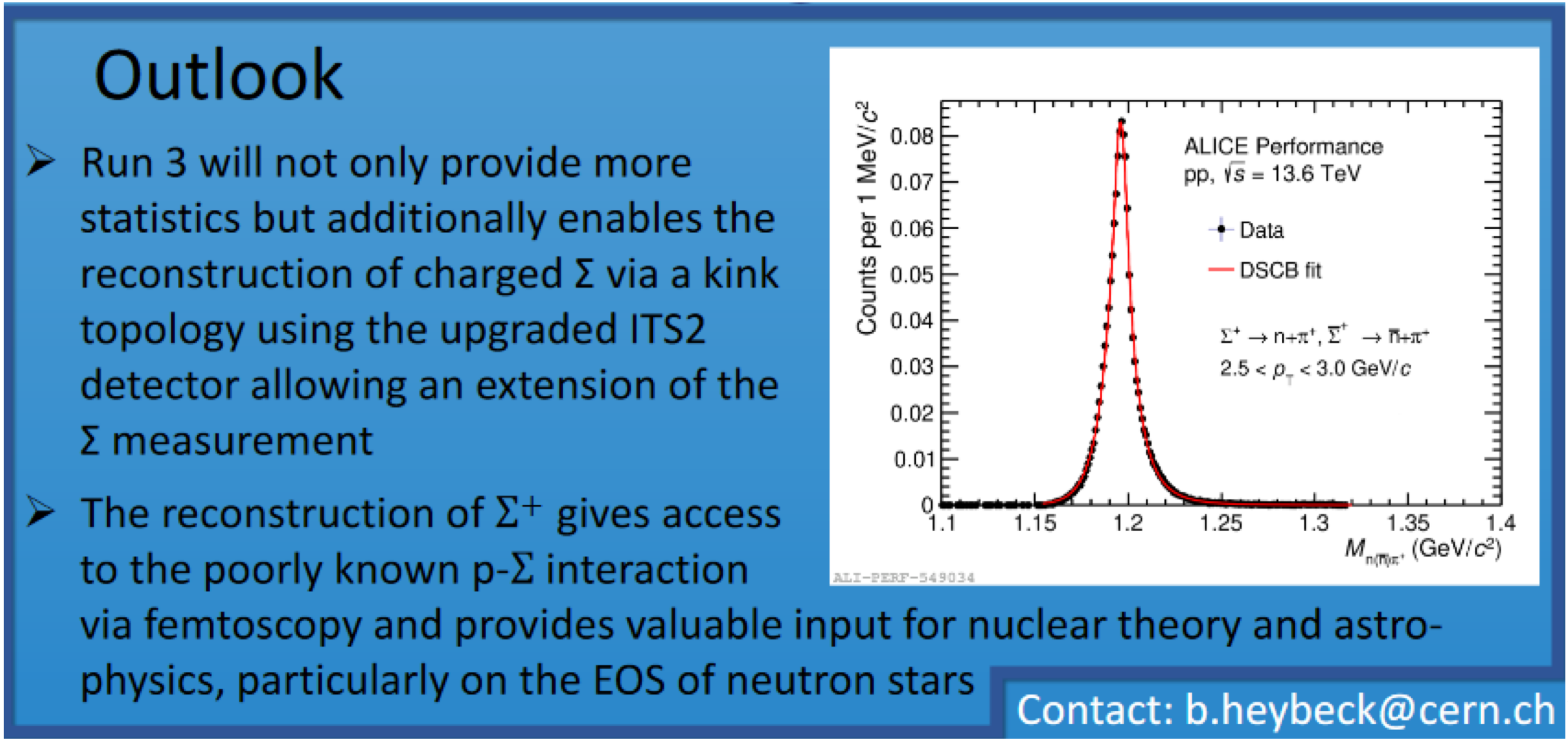
$\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$ (BR = 98.82%)

- ➢ Photons reconstructed from conversions (PCM) or in the calorimeters
- ➢ Secondary vertex reconstruction with KFParticle[1]
- ➢ Novel energy correction is applied to improve calorimeter resolution

[1] M. Zyzak et al. (2013), The KFParticle package for the fast particle reconstruction in ALICE and CBM

検出器に関して

- Σ 測定



Outlook

- ➢ Run 3 will not only provide more statistics but additionally enables the reconstruction of charged Σ via a kink topology using the upgraded ITS2 detector allowing an extension of the Σ measurement
- ➢ The reconstruction of Σ^+ gives access to the poorly known p-Σ interaction via femtoscopy and provides valuable input for nuclear theory and astro-physics, particularly on the EOS of neutron stars

Contact: b.heybeck@cern.ch

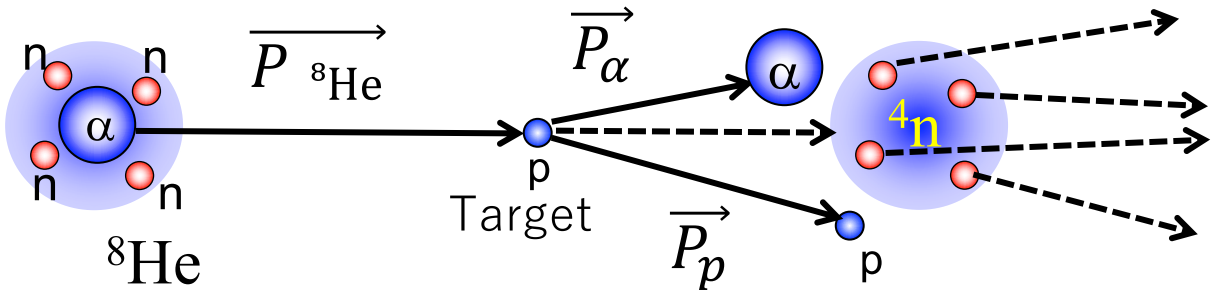
検出器に関して

- 中性子検出器

参考：理研(SAMURAI)の次世代中性子検出器

Perspectives -- For the next 5-10 years

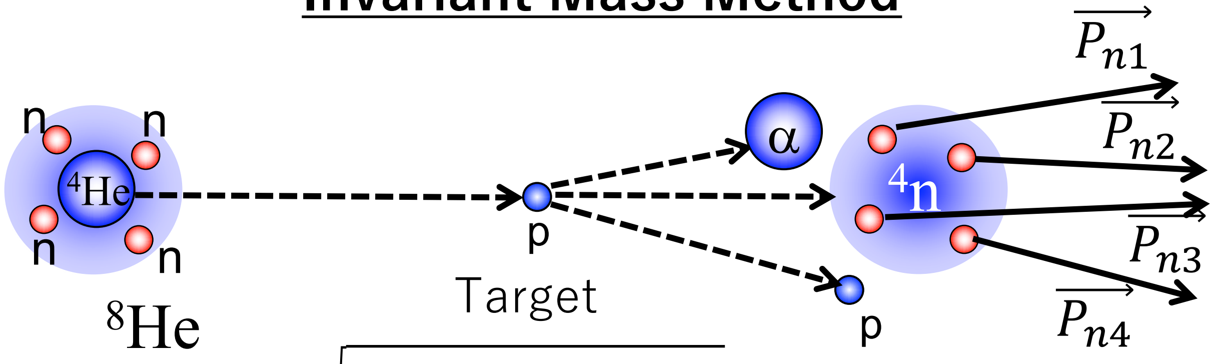
Missing Mass Method



$$M_{^4\mathrm{n}} = \sqrt{\left(E_{^8\mathrm{He}} + M_p - E_\alpha - E_p\right)^2 - \left|\overrightarrow{P_{^8\mathrm{He}}} - \overrightarrow{P_\alpha} - \overrightarrow{P_p}\right|^2}$$

- 😄 No need of neutron detections
- 😩 Worse mass-resolution: $\Delta M \sim$ 1MeV
- 😩 Decay mode cannot be observed

Invariant Mass Method

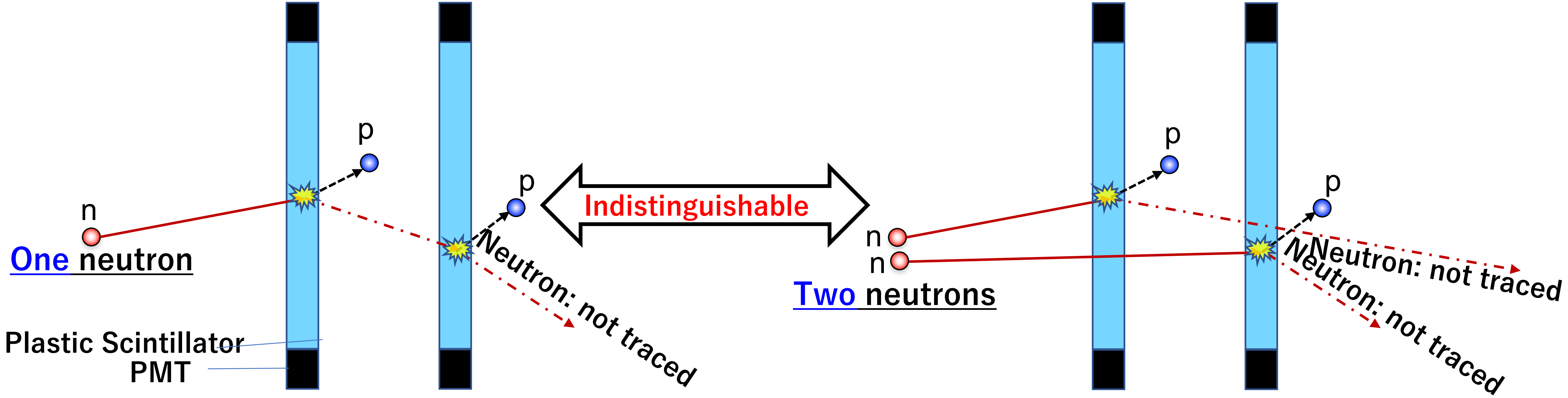


$$M_{^4\mathrm{n}} = \sqrt{\left(\sum_{i=1,4} E_i\right)^2 - \left|\sum_{i=1,4} \overrightarrow{P_{ni}}\right|^2}$$

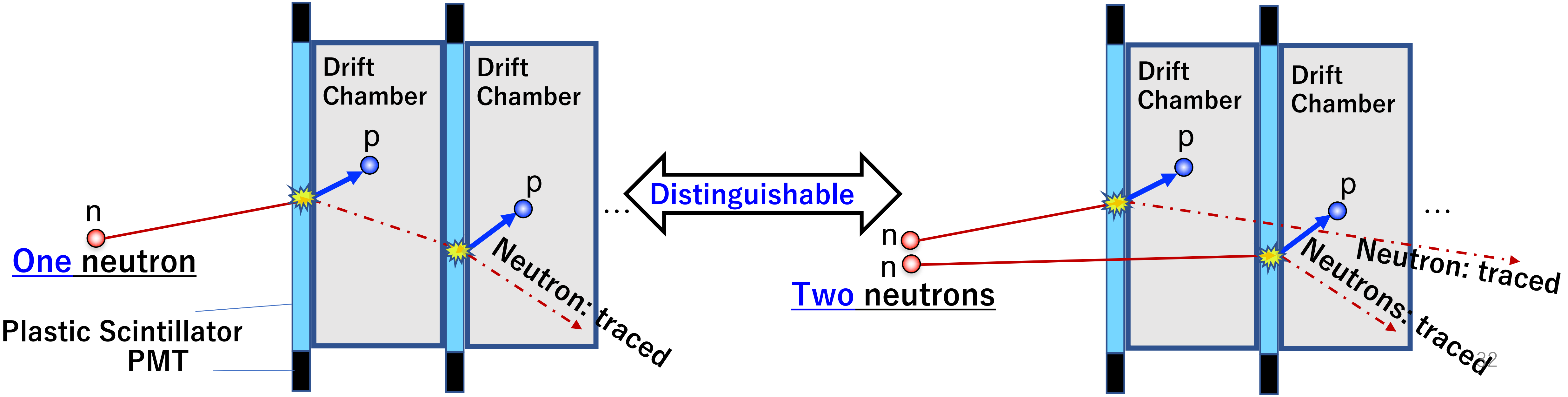
- 😄 Good mass-resolution: $\Delta M \sim$ 100keV
- 😄 Decay mode can be observed
- 😩 Need of neutron detection

- ➢ Missing-mass → Invariant-mass
- ➢ Better M, Ex resolution (~100keV)
- ➢ Decay scheme
- ➢ Require multiple neutron detections: M_n=3,4,5,6…

a) Neutron-detector: Current Scheme



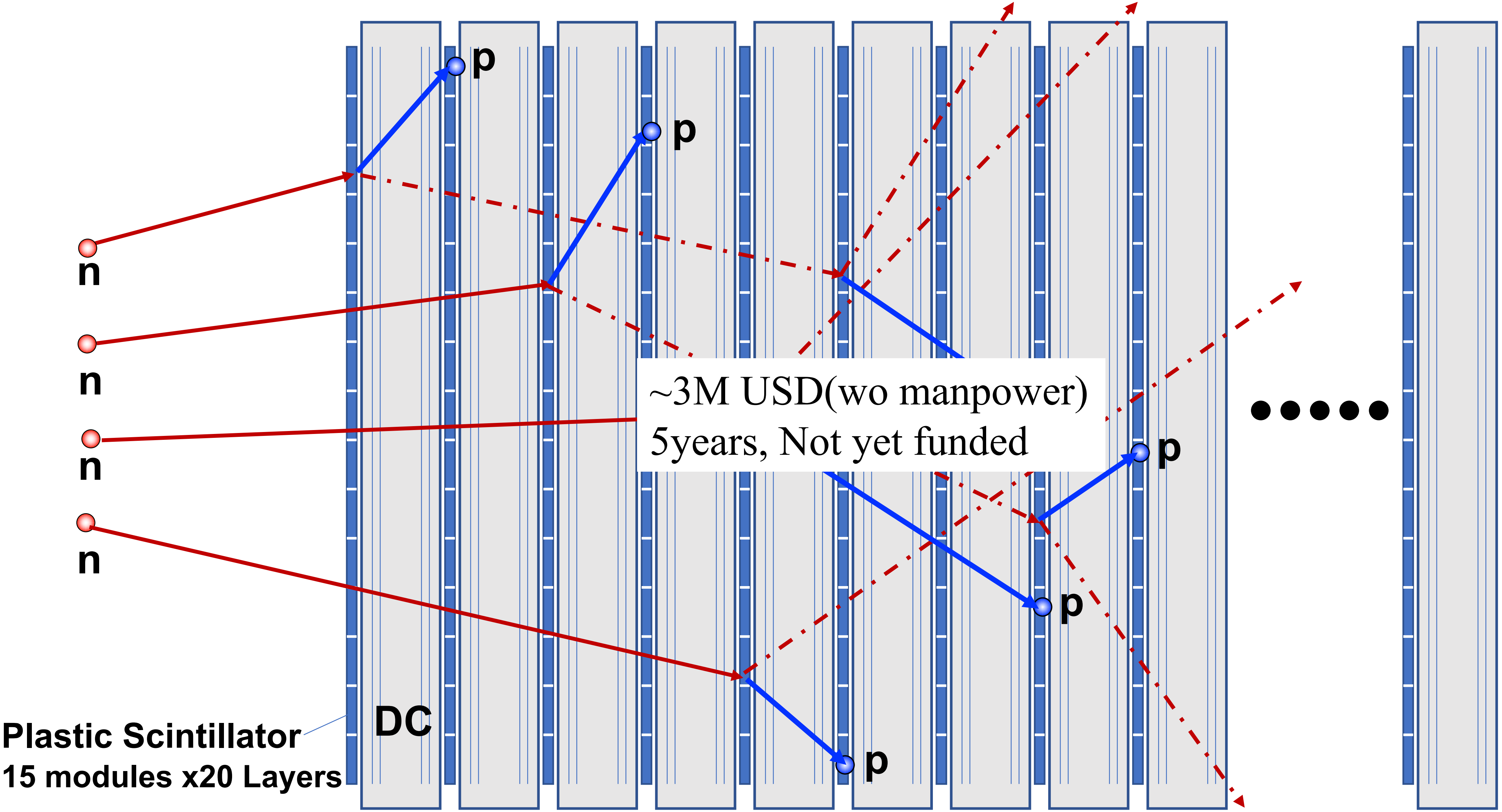
b) Neutron-detector: New Scheme



Next-generation neutron detector

TN, Y.Kondo, K.Miki, H.Otsu,T. Kobayashi

Full tracking of recoil protons by Drift Chambers (DC)→ **Neutrons can also be traced**

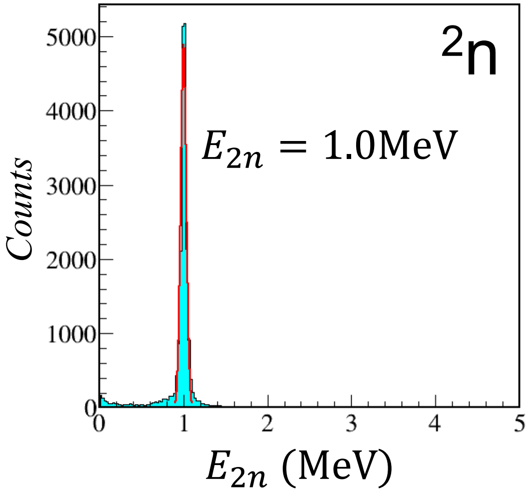


~3M USD(wo manpower)
5years, Not yet funded

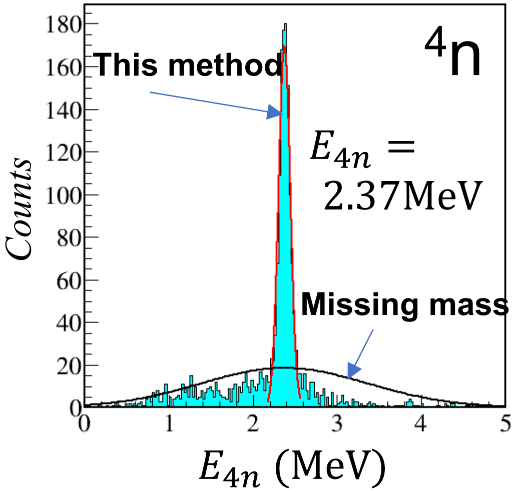
Simulation Results (by Y. Kondo)

Position resolution(σ) ~2mm

E_{rel} resolution(σ): 30~50 keV@1MeV

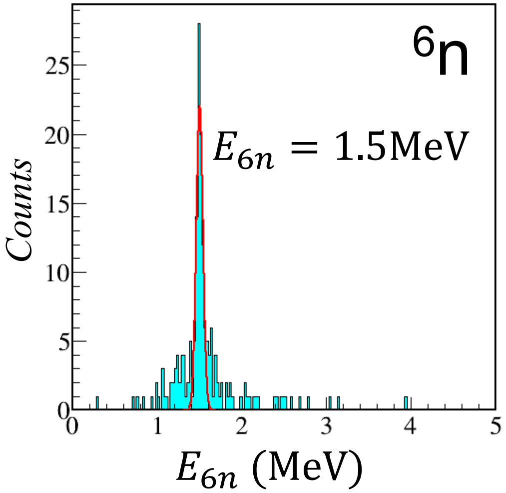


$\sigma_{E_{2n}} = 35\text{keV}$
$\varepsilon_{2n} = 2\%$



$\sigma_{E_{4n}} = 70\text{ keV}$
$\varepsilon_{4n} = 2.0\times10^{-2}\%$

^{8}He(p,α)^{4}n



$\sigma_{E_{6n}} = 37\text{ keV}$
$\varepsilon_{6n} = 1.7\times10^{-3}\%$

^{8}He(p,3p)^{6}n (c.f. K.Miki)

- ✓ Compared to the NEBULA-Plus setup, Efficiency is smaller, but S/N and Mass resolutions are much better
- ✓ With high-intense beam such as ^{6,8}He, experiments are feasible