

Nukleáris effektusok kis- és nagy ütközési rendszerekben LHC energián

G.G. Barnaföldi, HUN-REN Wigner FK, ALICE CERN

Support: *Hungarian NKFIH grants, NEMZ_KI-2022-00031,
2024-1.2.5-TÉT-2024-00022, Wigner Scientific Computing Laboratory*
Ref.: *O-O: Physics Letters B 860 (2025) 139145, p-O: arXiv:2505.22367*

ELFT Fizikus Vángorgyűlés 2025, PTE, Pécs, 23. Aug 2025

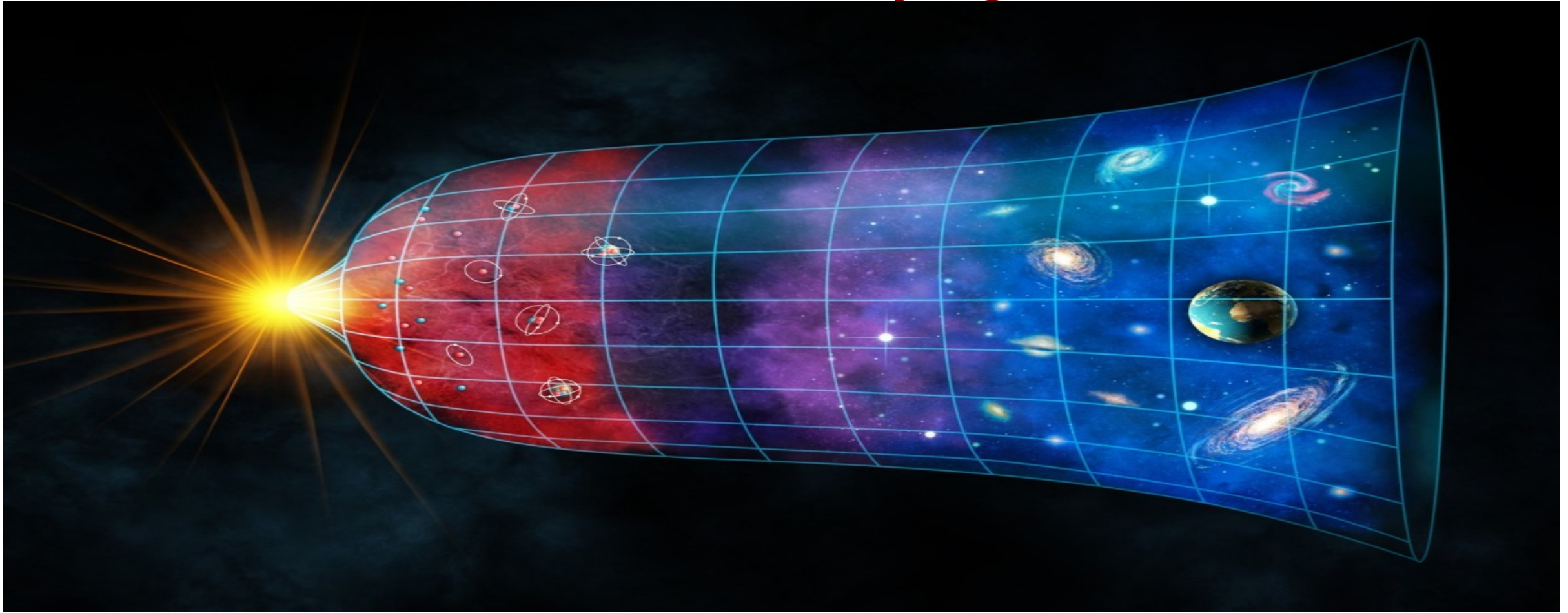
HUN
REN



HUN-REN
Hungarian Research Network

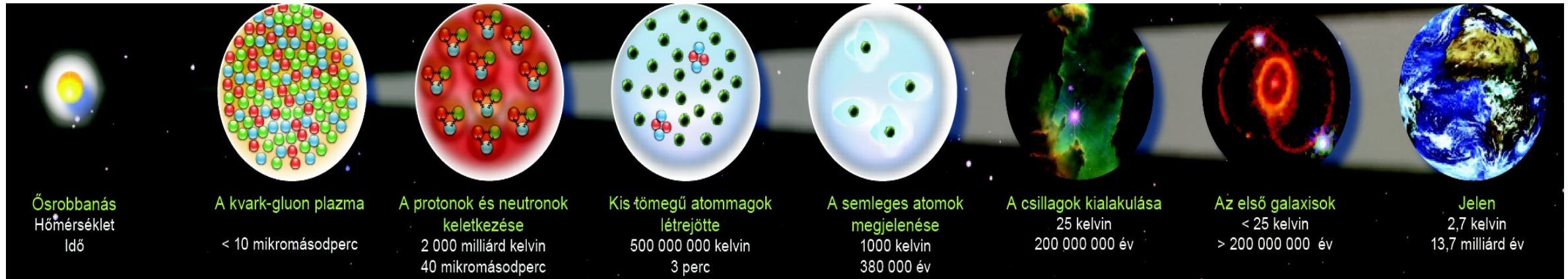


Cél a korai univerzum anyagának kutatása



A Világegyetem 13,7 milliárd éves most. Milyen volt az anyaga az Ősrobbanás utáni pillanatokban?

Cél a korai univerzum anyagának kutatása



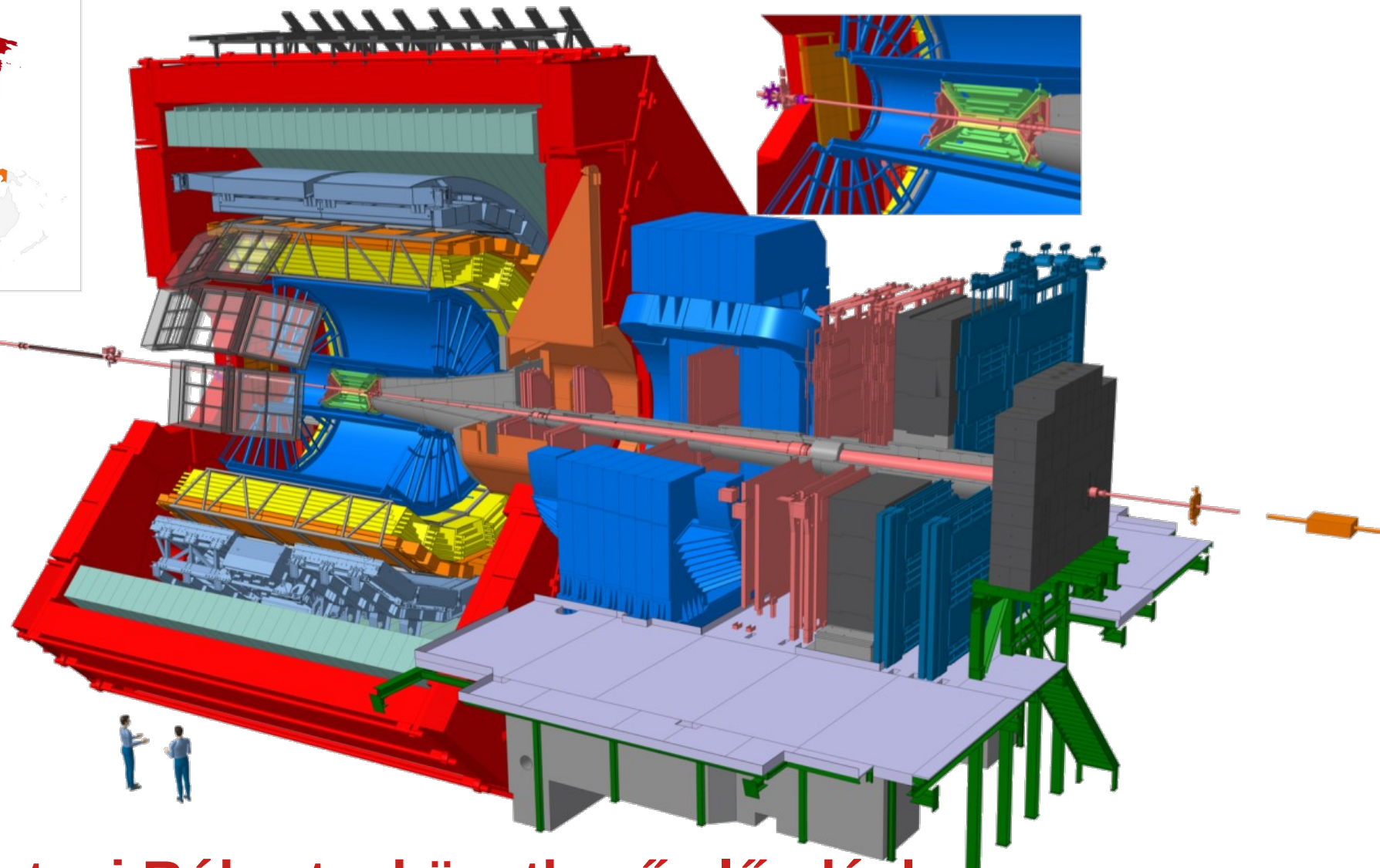
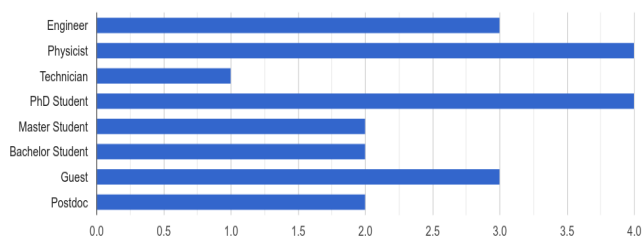
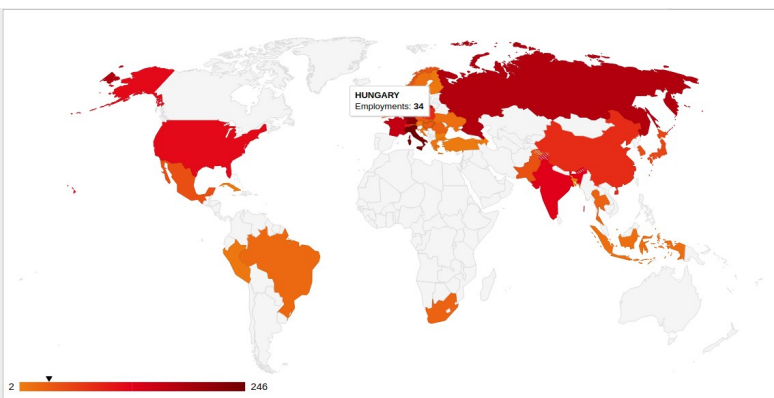
Az Ősrobbanás után az anyag tágult és folyamatosan lehűlt. Eközben a szerkezete megváltozott. Ma a látható (barionos) anyag alkot minket, a földi életet, bolygókat, csillagokat, galaxisokat...

Az első milliomod-másodpercekben a kvarkleves alkotta a Világegyetemet ez a **forró** és **sűrű** anyag a **kvarkokból** és **gluonokból** álló **kvark-gluon plazma**.

Eszköz: A Large Ion Collider Experiment



Eszköz: A Large Ion Collider Experiment

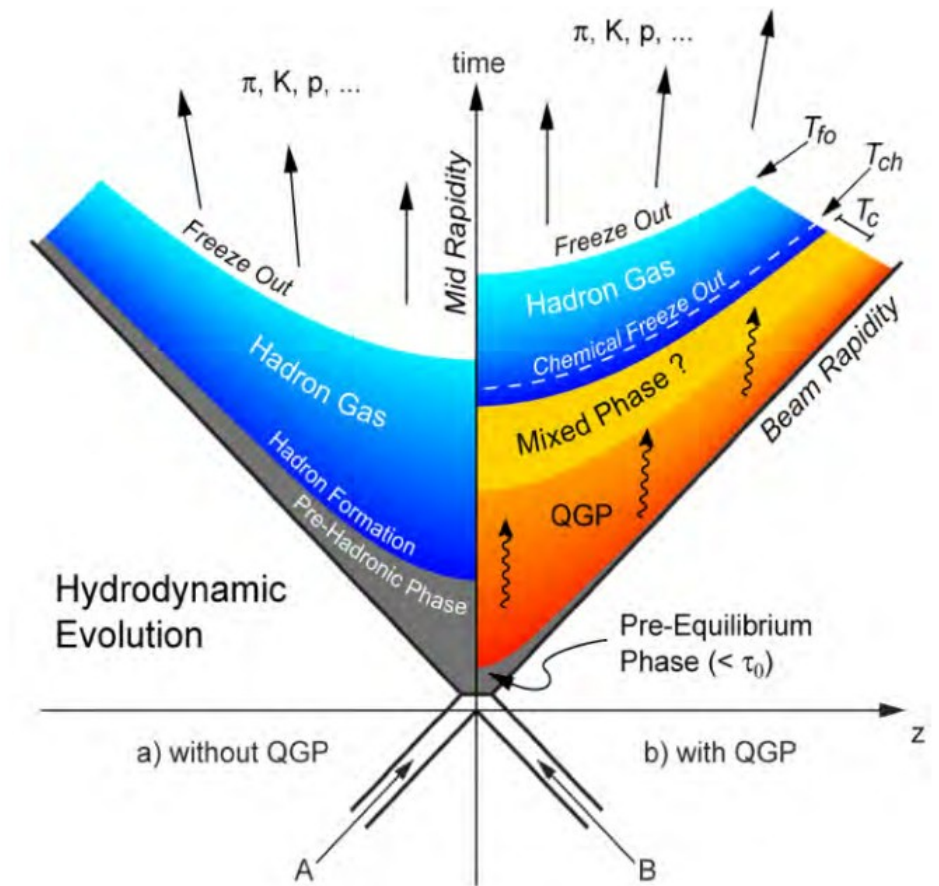


A jövő: ALICE3 Vértesi Róbert a következő előadásban

Ősanyag nehézion-ütközésekben

- **QGP kísérleti vs elméleti megközelítés**

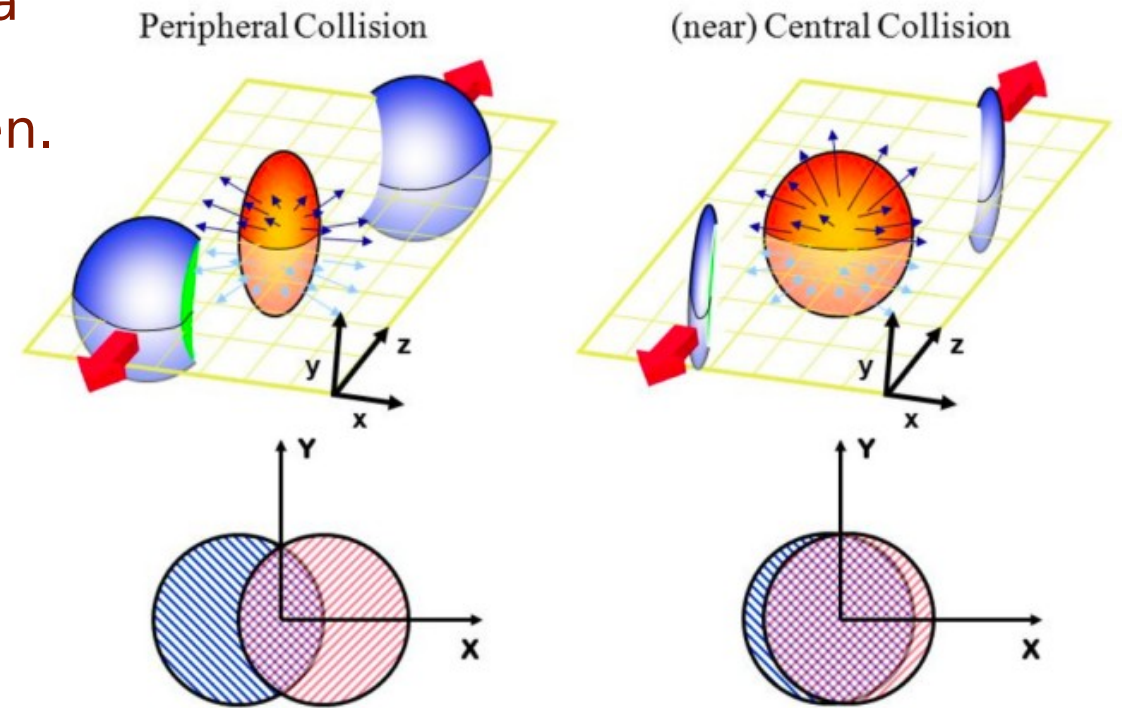
- Nehézion-ütközésekben előállítható az Univerzum őanyagának kicsiny cseppje
- Az asszimptotikus szabadság miatt nem megfigyelhető, csak **szignatúrákat láthatunk**: jet-elnyomás, részecskekorrelációk, kollektív tulajdonságok, **(elliptikus) folyás...**
- Szükség van egy komplex leírása: QCD phenomenologia, hidrodinamika, (nem egyensúlyi) termodinamika



Elliptikus folyás (v_n)

- **Kísérleti megközelítés:**

- A folyás (flow) leírja az impulzus térben a részecskekeltés szögleloszlásának anizotrópiáját – pl nehézion-ütközésekben.

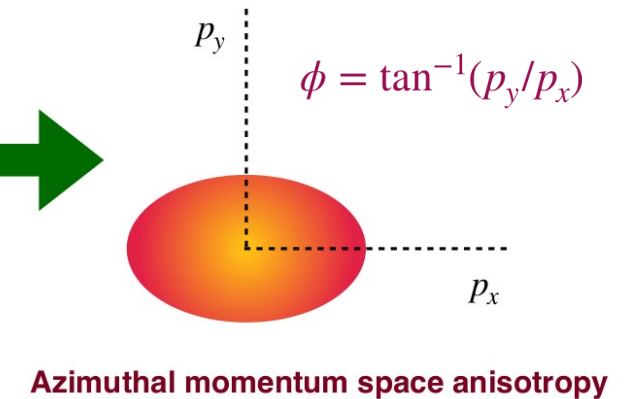
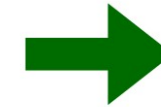
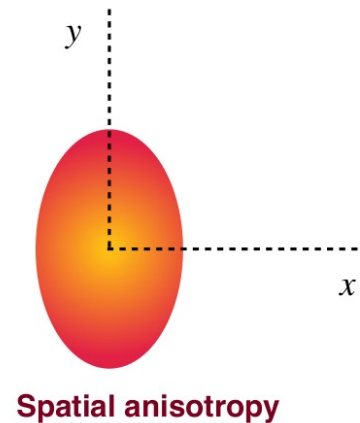


Elliptikus folyás (v_n)

- **Kísérleti megközelítés:**

- A folyás (flow) leírja az impulzus térben a részecskekeltés szögleloszlásának anizotrópiáját – pl nehézion-ütközésekben.
- Az impulzusmomentum szögeloszlásának Fourier-sorfejtését az n . harmonikus együttható írja le:

$$E \frac{d^3N}{dp^3} = \frac{d^2N}{p_T dp_T dy} \frac{1}{2\pi} \left(1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} v_n \cos[n(\phi - \psi_n)] \right)$$



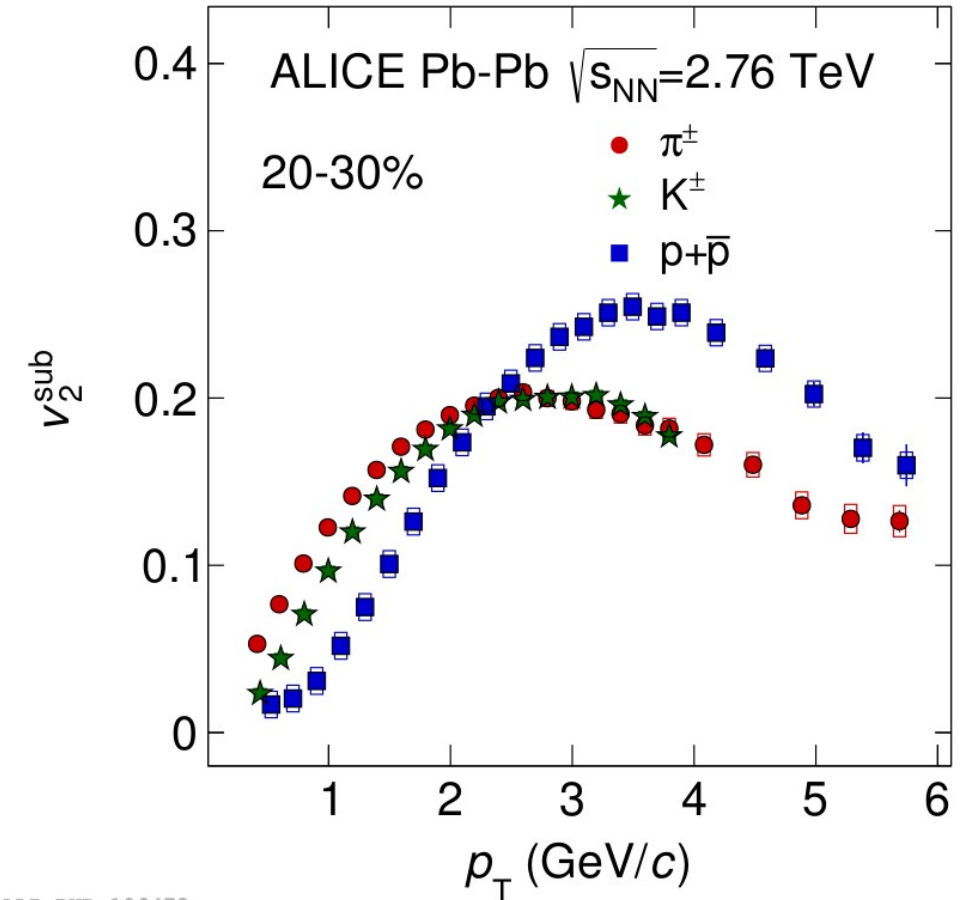
Elliptikus folyás (v_n)

- Kísérleti megközelítés:**

- A folyás (flow) leírja az impulzus térben a részecskekeltés szögleloszlásának anizotrópiáját – pl nehézion-ütközésekben.
- Az impulzusmomentum szögleloszlásának Fourier-sorfejtését az n . harmonikus együttható írja le:

$$E \frac{d^3N}{dp^3} = \frac{d^2N}{p_T dp_T dy} \frac{1}{2\pi} \left(1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} v_n \cos[n(\phi - \psi_n)] \right)$$

- A $v_2(p_T, y) = \langle \cos(2(\phi - \psi_2)) \rangle$ méri az átfedési tartomány kezdeti térbeli anizotrópiáját a transzverzális síkban.



ALI-PUB-109472

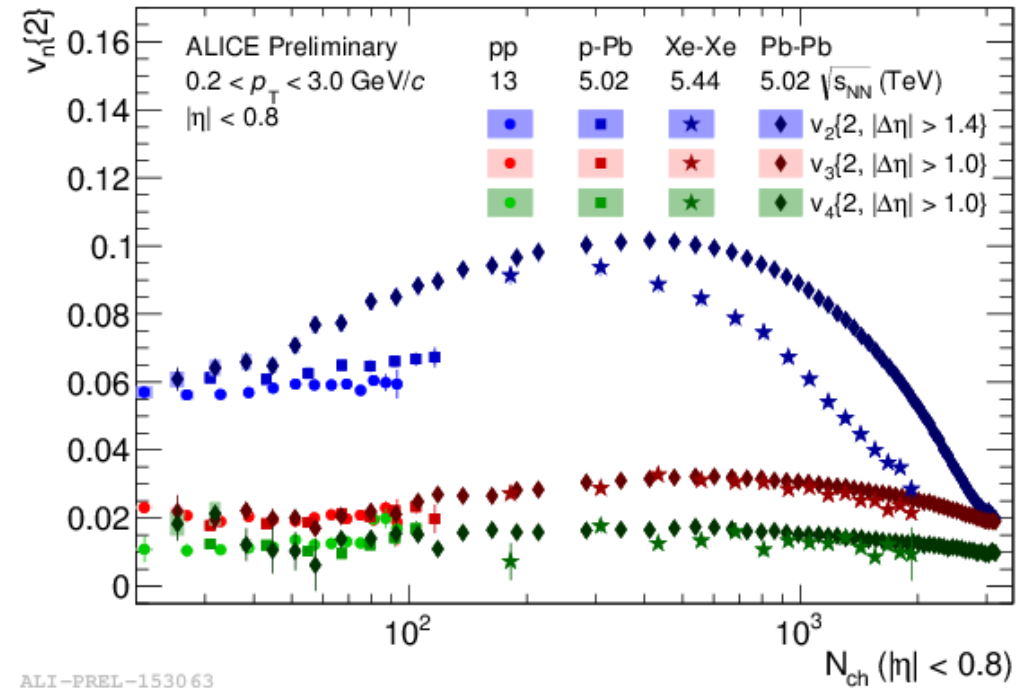
Elliptikus folyás (v_n)

- Kísérleti megközelítés:**

- A folyás (flow) leírja az impulzus térben a részecskekeltés szögleloszlásának anizotrópiáját – pl nehézion-ütközésekben.
- Az impulzusmomentum szögleloszlásának Fourier-sorfejtését az n . harmonikus együttható írja le:

$$E \frac{d^3N}{dp^3} = \frac{d^2N}{p_T dp_T dy} \frac{1}{2\pi} \left(1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} v_n \cos[n(\phi - \psi_n)] \right)$$

- A $v_2(p_T, y) = \langle \cos(2(\phi - \psi_2)) \rangle$ méri az átfedési tartomány kezdeti térbeli anizotrópiáját a transzverzális síkban.
- Magasabb rendű komponensek is mérhetőek



A kvark-gluon plazma kutatáson túl...

ALICE eredmények (2020)

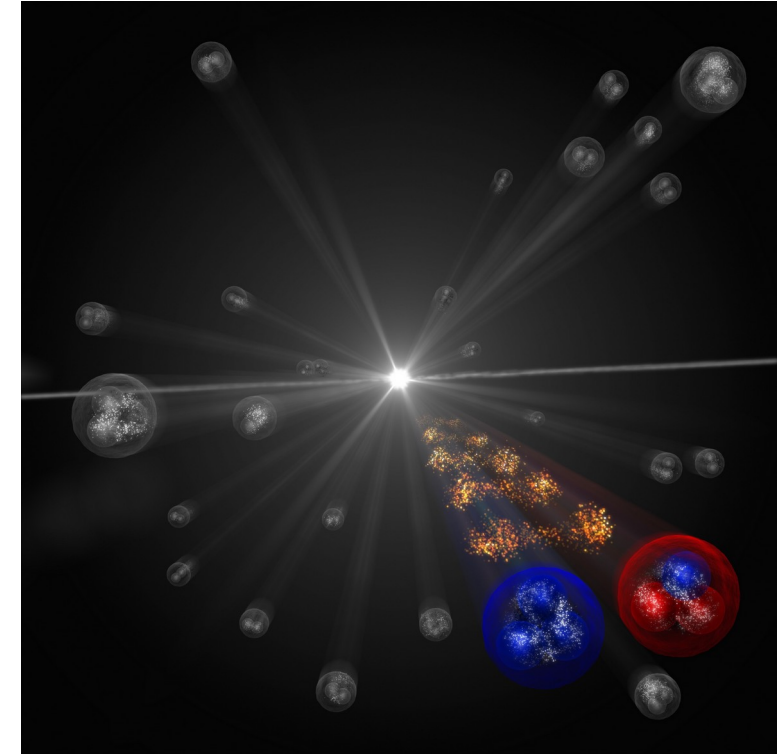
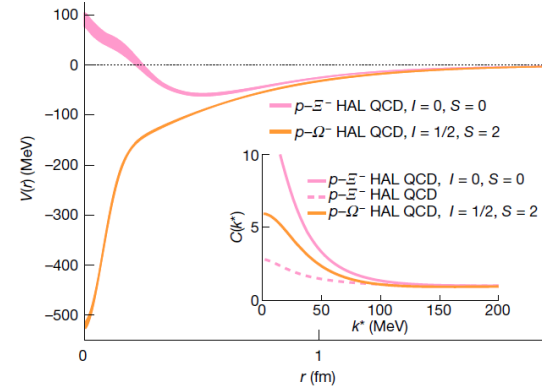
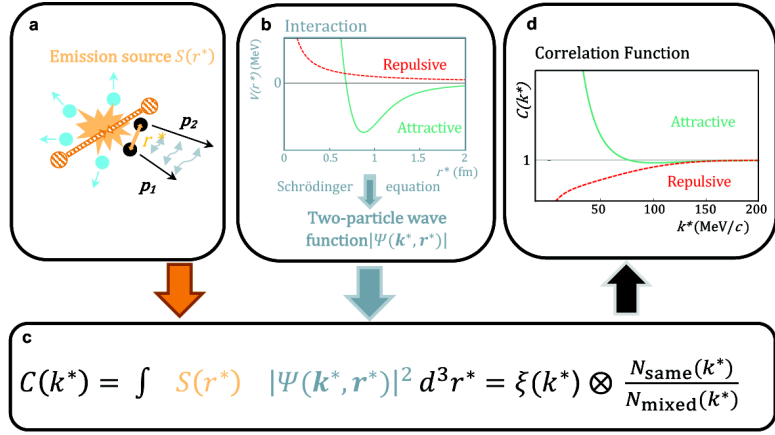
- **Magerők kimérése ultrarelativistikus ütközésekben**

Article | Published: 09 December 2020

Unveiling the strong interaction among hadrons at the LHC

ALICE Collaboration

Nature 588, 232–238(2020) | Cite this article



nature

- **EREDMÉNY:** ritkaságtartalmú anyag erős kölcsönhatási potenciája mérhető
→ Input pl a neutroncsillagok belső szerkezetének meghatározására

ALICE eredmények (2023)



Article | [Open Access](#) | [Published: 12 December 2022](#)

Measurement of anti- ^3He nuclei absorption in matter and impact on their propagation in the Galaxy

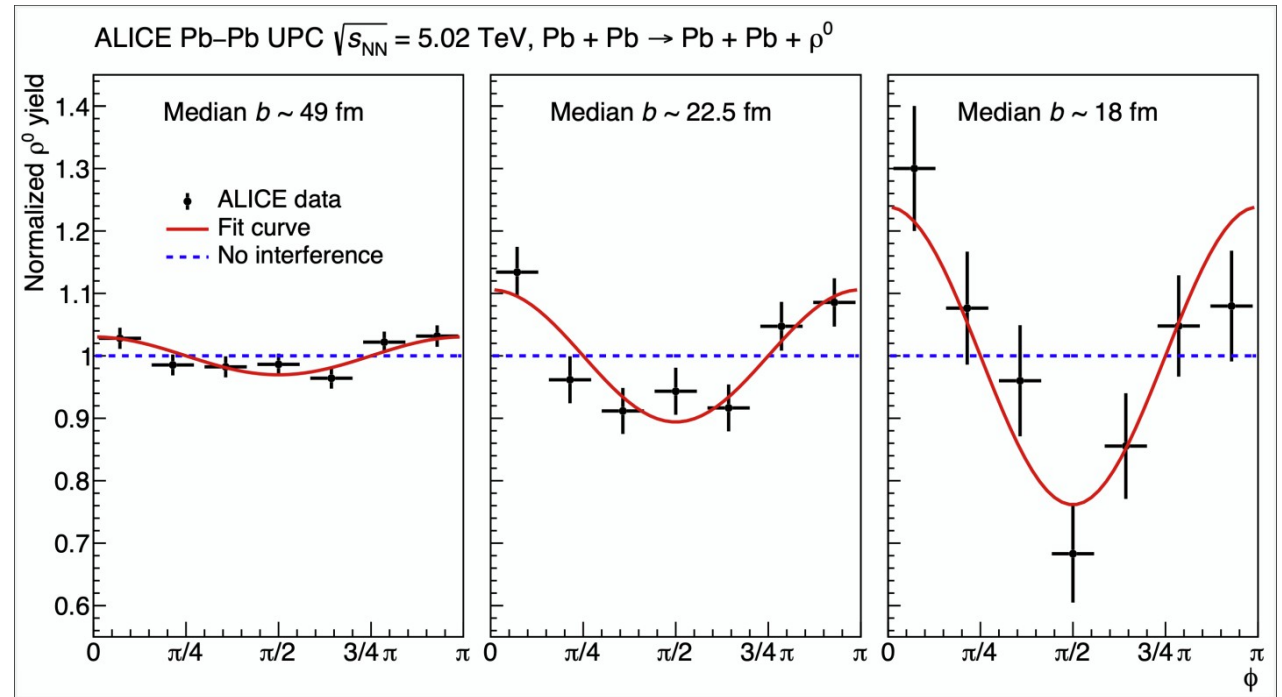
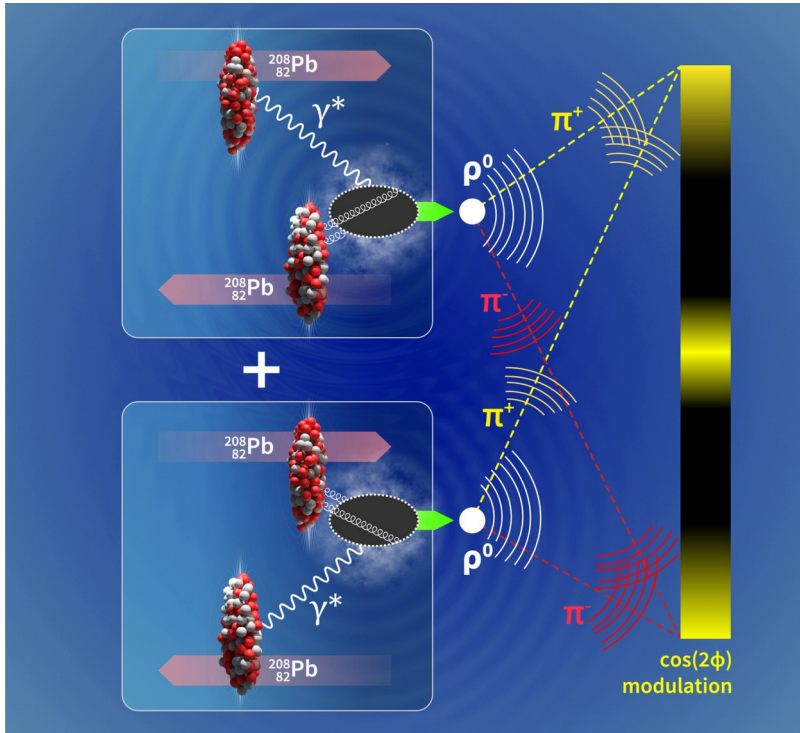


- **FELADAT:** Antihélium hatáskeresztmetszet meghatározása, TeV energián.
- **EREDMÉNY:** A Galaxisban utazó antihélium, mintegy fele éri el a Földet.
→ Jobban becsülhető a sötét anyag mennyisége.



ALICE eredmények (2024)

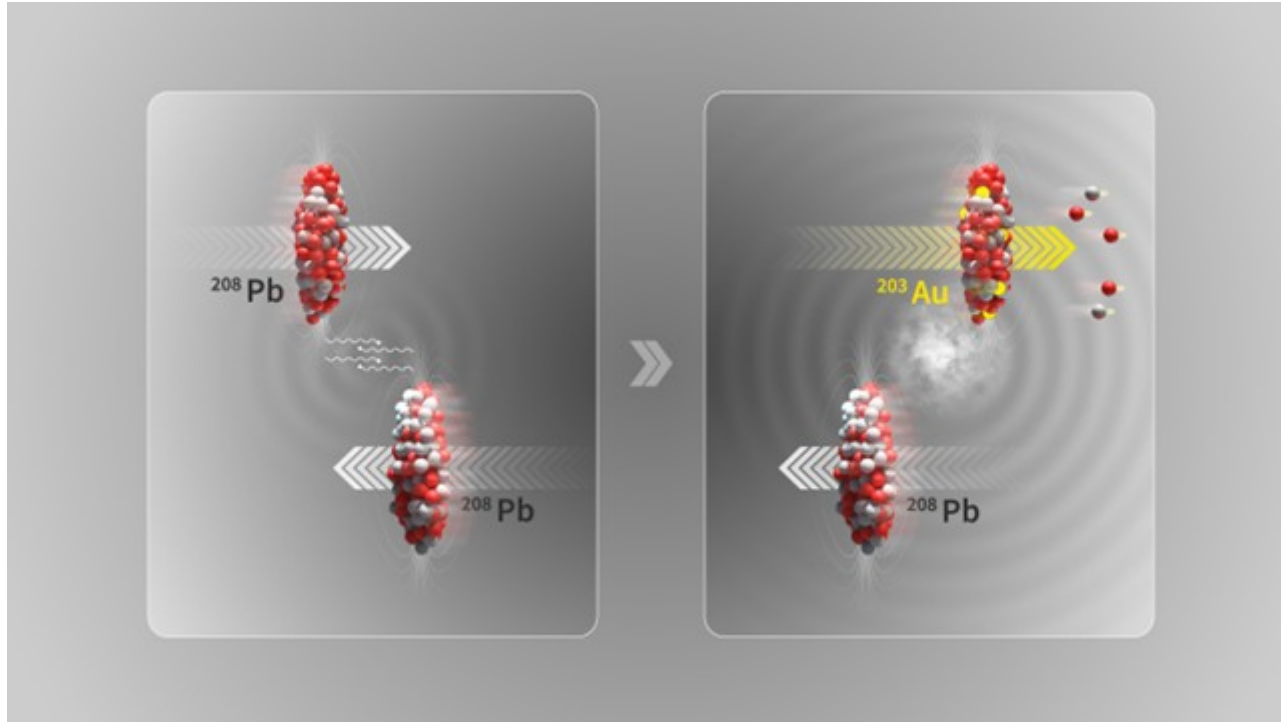
- **Kétréses kísérlet femtoskálán**



- **EREDMÉNY:** Ultraperiférikus ütközésekben interferencia effektus mérés
→ **Kvantumeffektusok mérhetőek femtométer skálán**

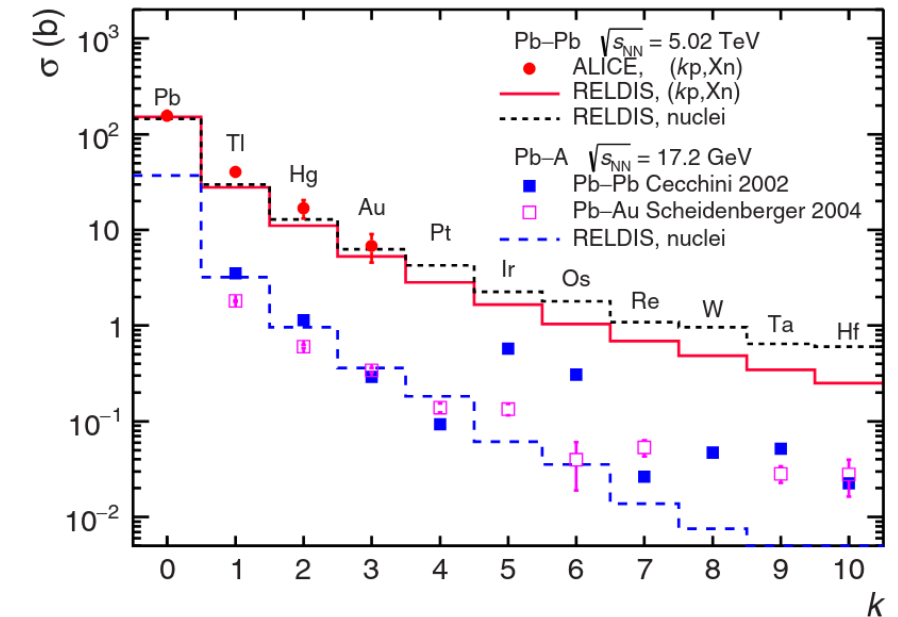
ALICE eredmények (2025)

- **Alkímia az ALICE kísérletben**



PHYSICAL REVIEW C **111**, 054906 (2025)

Proton emission in ultraperipheral Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV

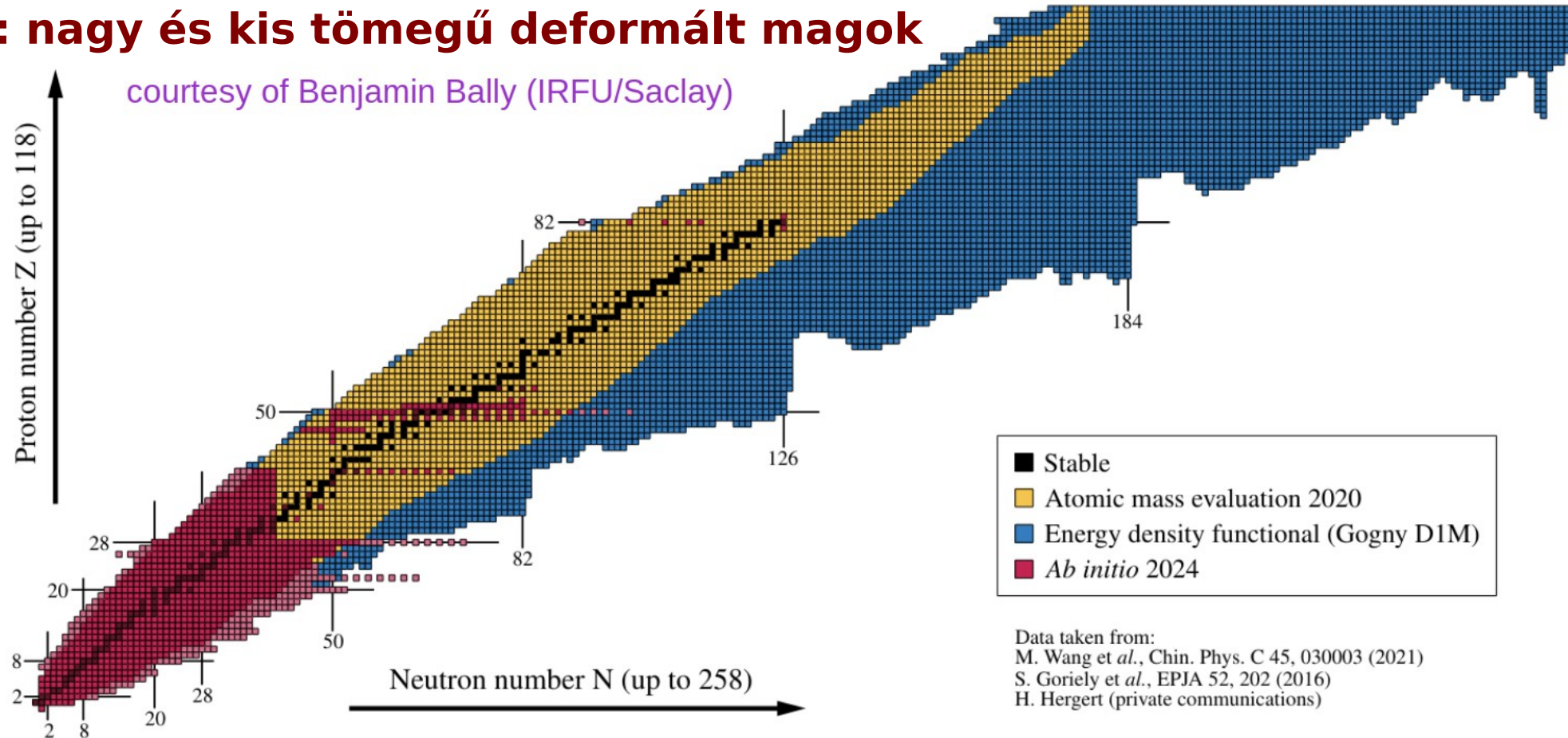


- **EREDMÉNY:** Ultraperiférikus Pb-Pb ütközésekben a leszakadó protonok miatt,
→ **Transzmutáció** történik, új magok, izotópsorok keletkeznek

Milyen atommagokat ütköztessünk?

Ultrarelativisztikus atommag ütközések

- **Korai ütközések: technológia határozza meg**
- **Ma: nagy és kis tömegű deformált magok**



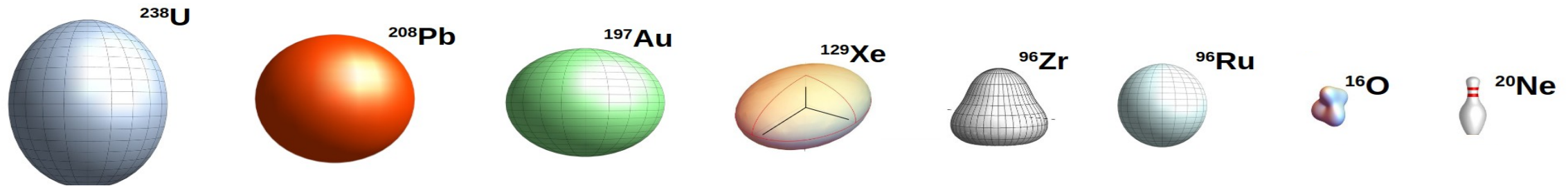
...no, de atommag olyan mint a gombóc ...



Jelen és tervezett atommagütközések

- **Kísérleti lehetőségek & érdekek**

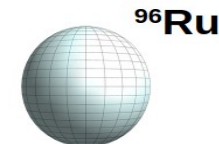
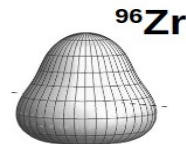
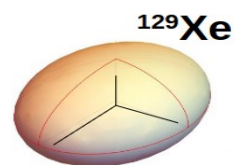
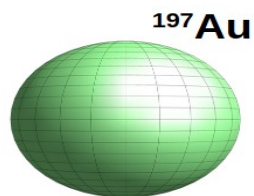
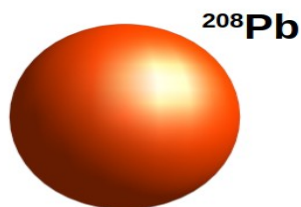
- Nagy deformált atommagok: urán, arany, xenon
- Kicsi-érdekes: Zirkónium, rubídium, oxigén, neon



Jelen és tervezett atommagütközések

- **Kísérleti lehetőségek & érdekek**

- Nagy deformált atommagok: urán, arany, xenon
 - Kicsi-érdekes: Zirkónium, rubídium, oxigén, neon
- Csakúgy, mint a “gombóc”....



Atommagok ütközései LHC energián

- **LHC program: kis atommagok ütközései**

- Run 2: p-p, p-Pb, Pb-Pb, XeXe

Breakthrough Prize in fundamental physics

LHC schedule



Collision systems

pp, pPb, Pb-Pb

pp, pPb,
Xe-Xe, Pb-Pb

Breakthrough Prize in Fundamental Physics 2025 awarded to the four large LHC experiments for

“... the exploration of nature at the shortest distances and most extreme conditions at CERN’s Large Hadron Collider”

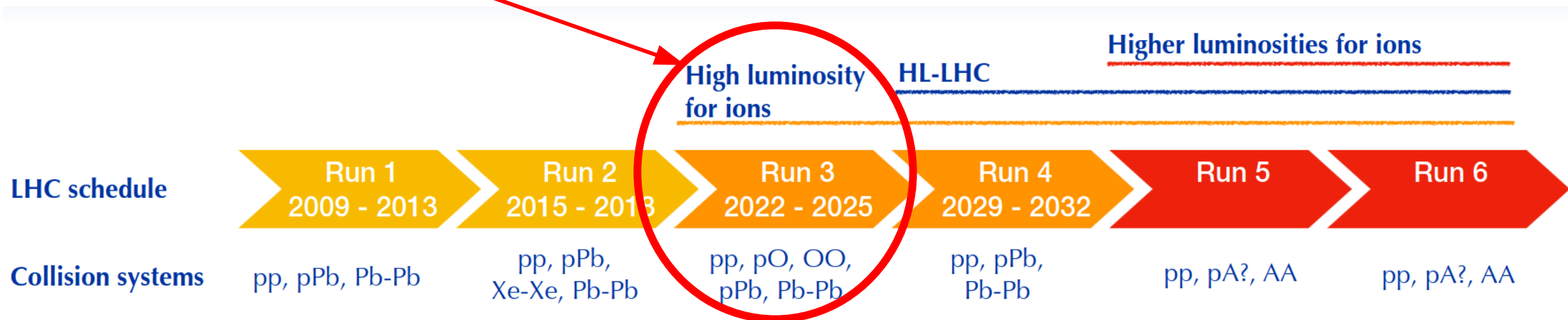


- Price ceremony in Los Angeles, 5th April 2025 attended by spokespersons of the experiments
- Shared by all authors of run-2 publications ([listed on web site](#))
- Prize money will be used for PhD studentship grants for a stay at CERN

Atommagok ütközései LHC energián

- **LHC program: kis atommagok ütközései**

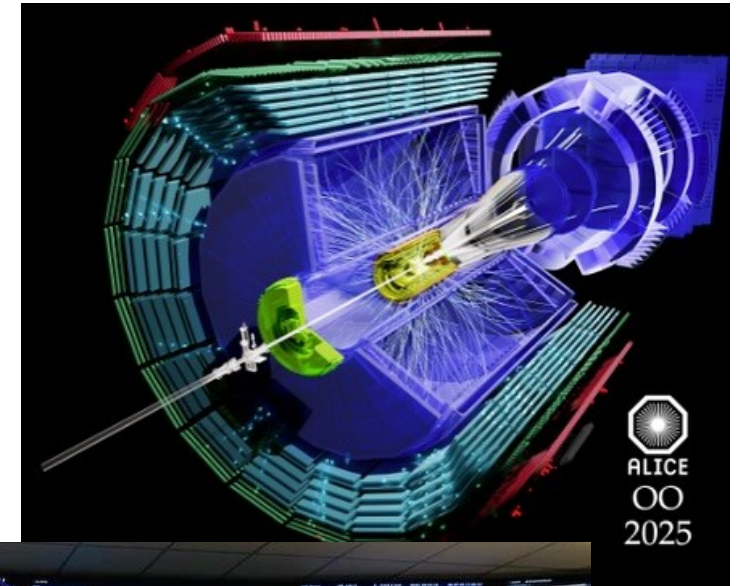
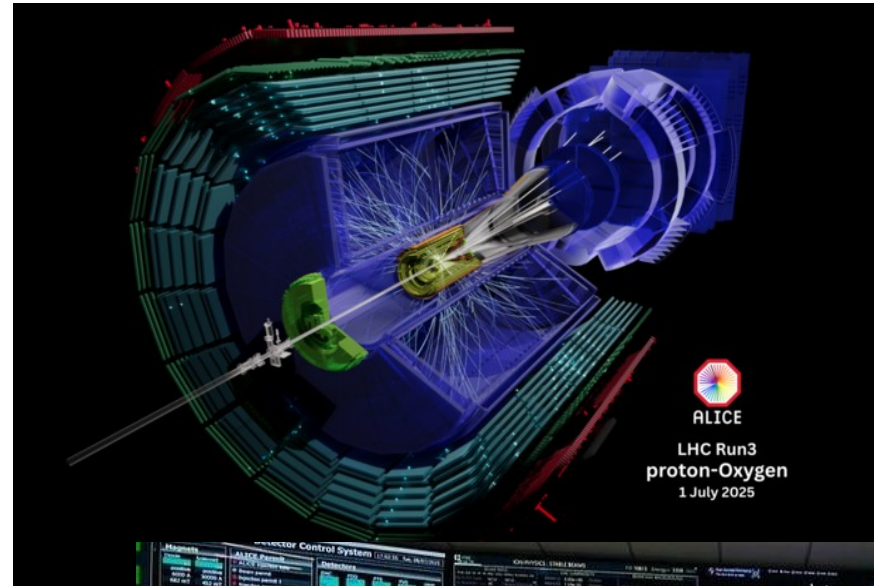
- Run 2: p-p, p-Pb, Pb-Pb, XeXe
- Run 3: p-p, p-Pb, Pb-Pb, p-O, & O-O



Áttörés: OO, pO & NeNe ütközés @LHC

1 hét oxigén pilot: 2025. július elején 5.36 ATeV LHC energián

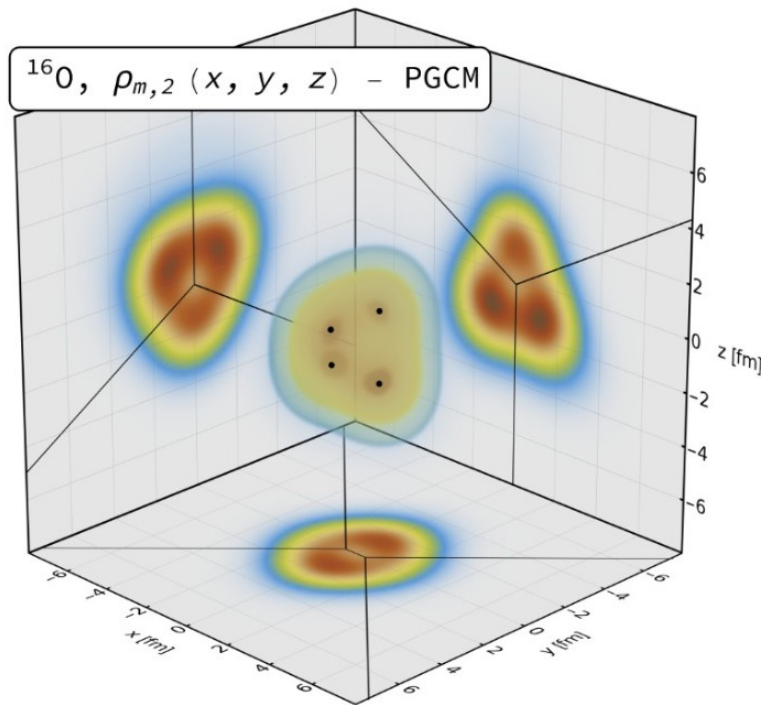
- 2 nap p-O, 7.24 nb^{-1}
 $\sim 10^9$ esemény
- 4 nap O-O, 5.01 nb^{-1}
 $\sim 10^9$ esemény
- 1 nap Ne-Ne, 0.84 nb^{-1}
 $\sim 10^8$ esemény



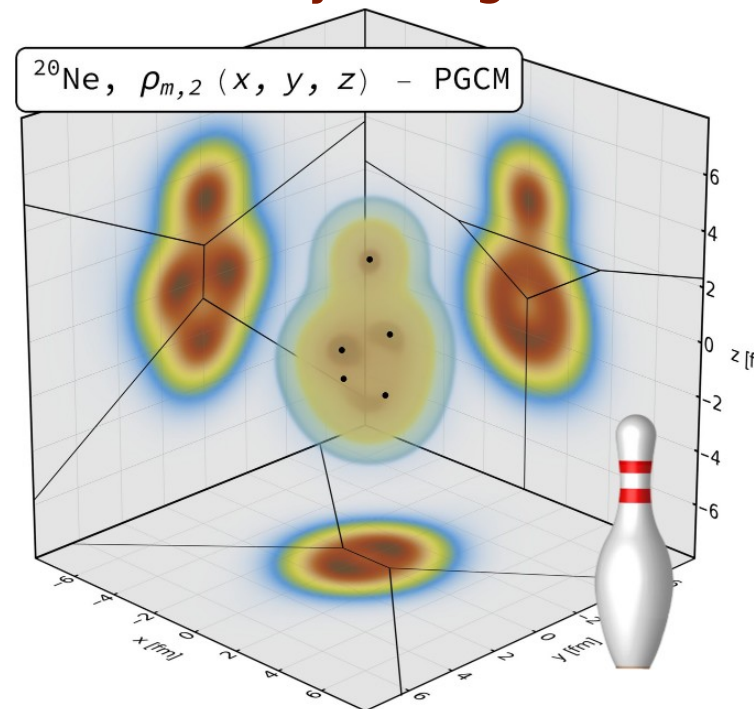
Kis energiás magfizika TeV energián

A legutóbbi mérések célkeresztjében

- **Oxigén:** duplán mágikus, mert mindkét héj zárt. Tetraéderes szerkezet.



- **Neon:** tekebábú alakú atommag, nagyon érdekes és bonyolult geometria



Ancillary files (details):

- NLEFT_dmin_0.5fm_negativeweights_Ne.h5
- NLEFT_dmin_0.5fm_negativeweights_O.h5
- NLEFT_dmin_0.5fm_positiveweights_Ne.h5
- NLEFT_dmin_0.5fm_positiveweights_O.h5
- PGCM_clustered_dmin0_Ne.h5
- PGCM_clustered_dmin0_O.h5
- PGCM_uniform_dmin0_Ne.h5
- PGCM_uniform_dmin0_O.h5

[arXiv:2402.05995](https://arxiv.org/abs/2402.05995)

Az oxigén atom alakja

Oxigén modellek

- **Woods-Saxon (WS)**

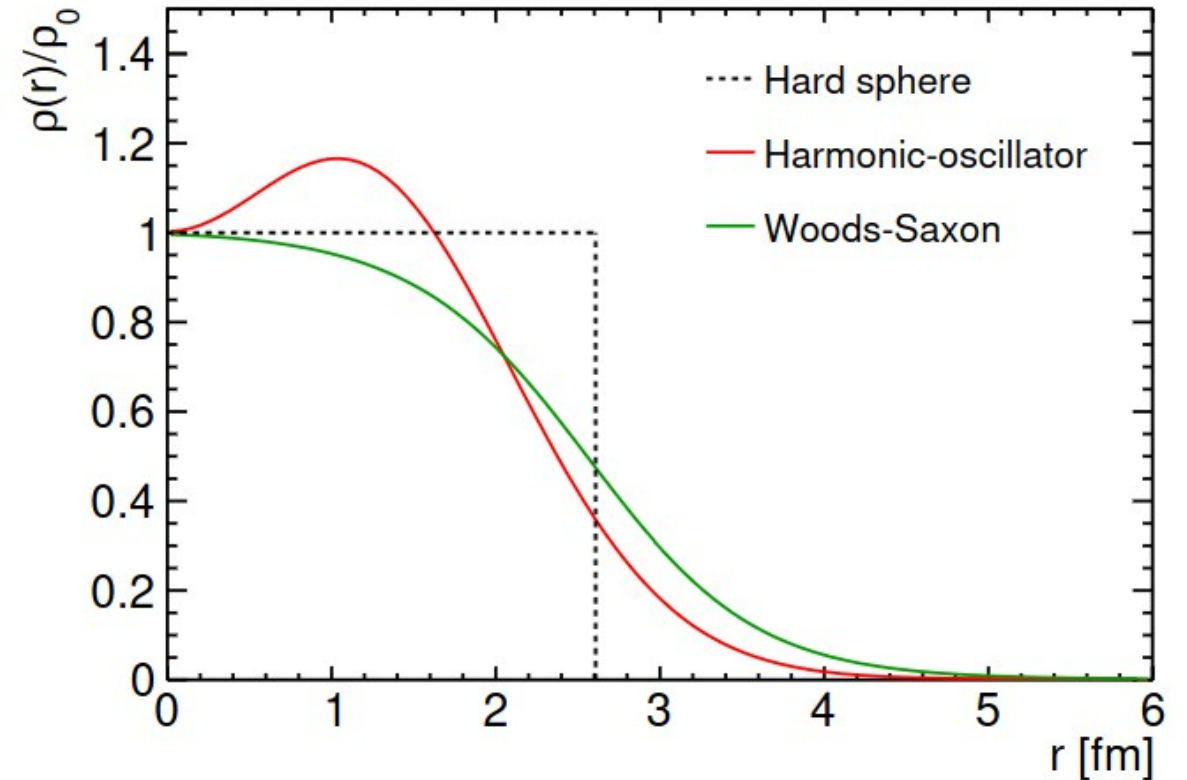
$$\rho(r) = \rho_0 \left[1 + \alpha \left(\frac{r}{a} \right)^2 \right] \exp \left(\frac{-r^2}{a^2} \right)$$

- **Harmonikus oszcillátor (HO)**

$$\rho(r) = \frac{\rho_0 (1 + w (\frac{r}{r_0})^2)}{1 + \exp(\frac{r-r_0}{a})}$$

- Normálás szokásosan:

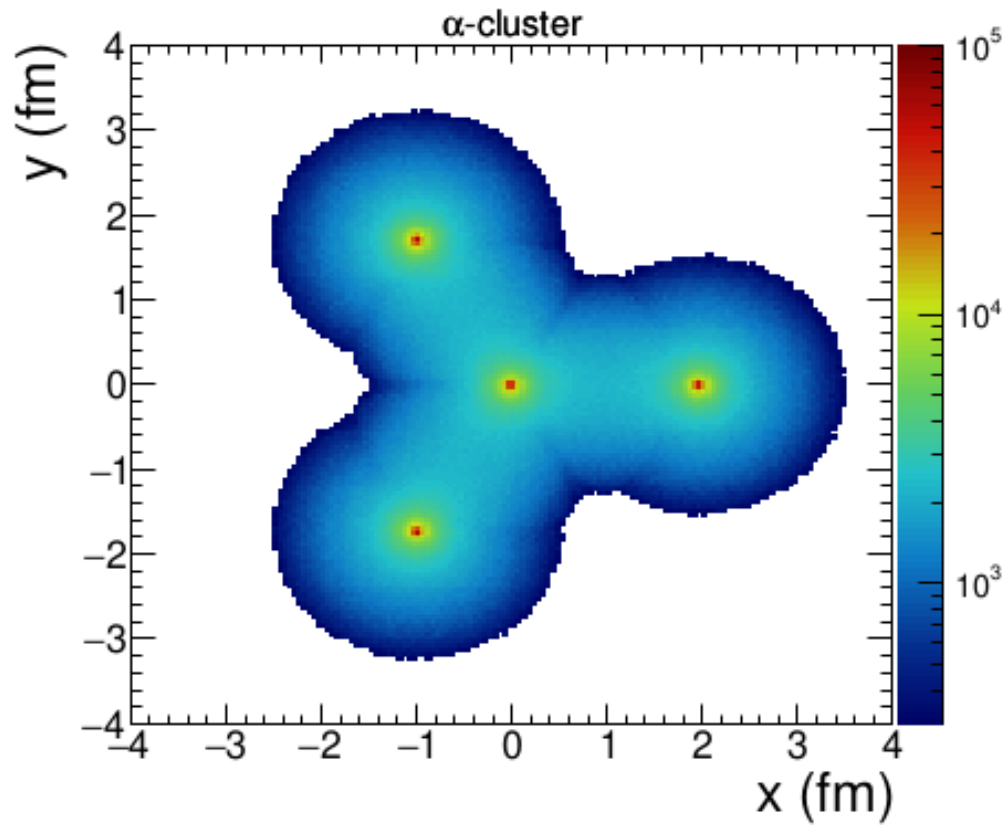
$$\int \rho(r) d^3r = 4\pi \int \rho(r) r^2 dr = Ze$$



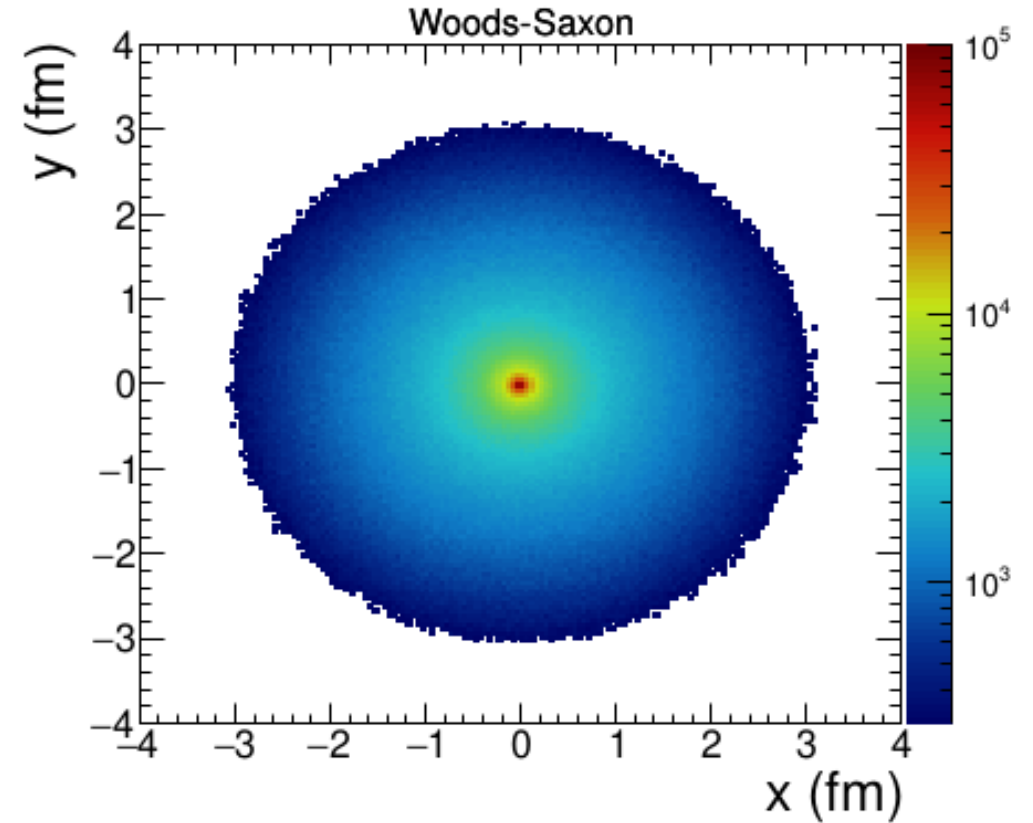
Az oxigén atom alakja

Atommag-szerkezet modellek

– Klaszter modell



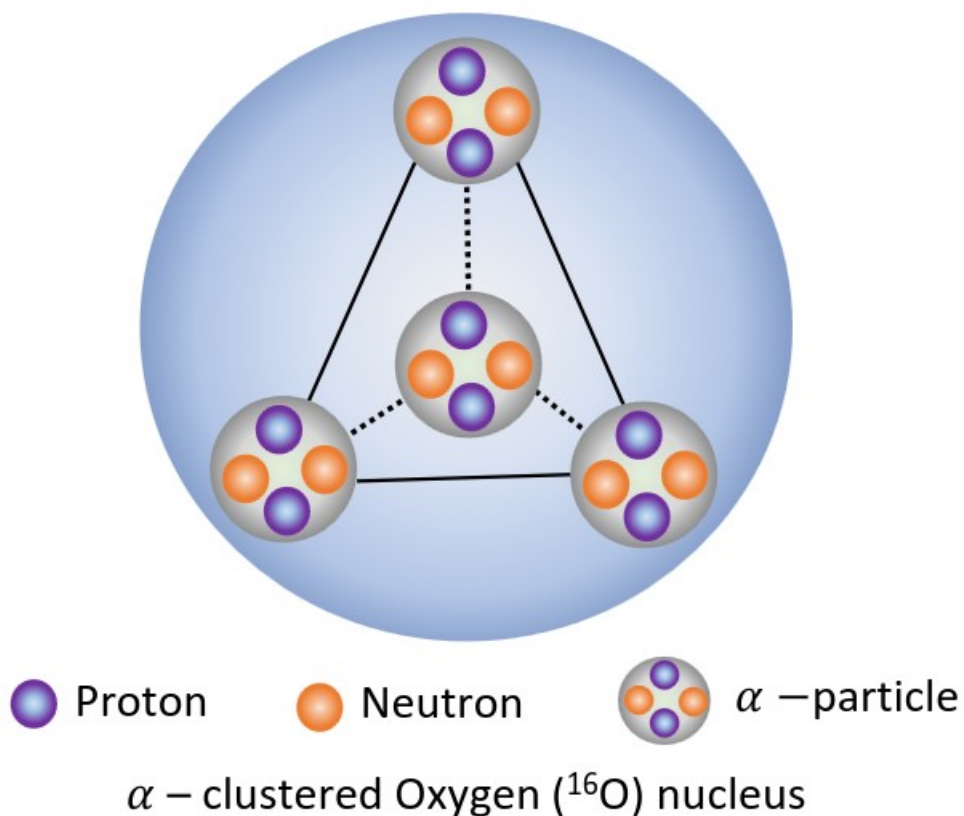
Nem-klaszter model (Woods-Saxon)



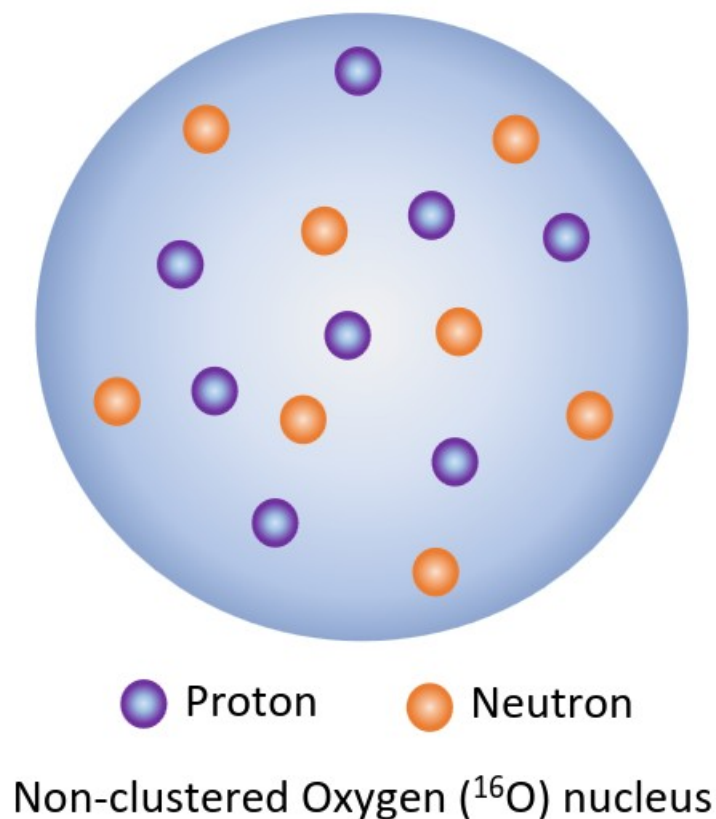
Az oxigén atom alakja

Atommag-szerkezet modellek

– Klaszter modell



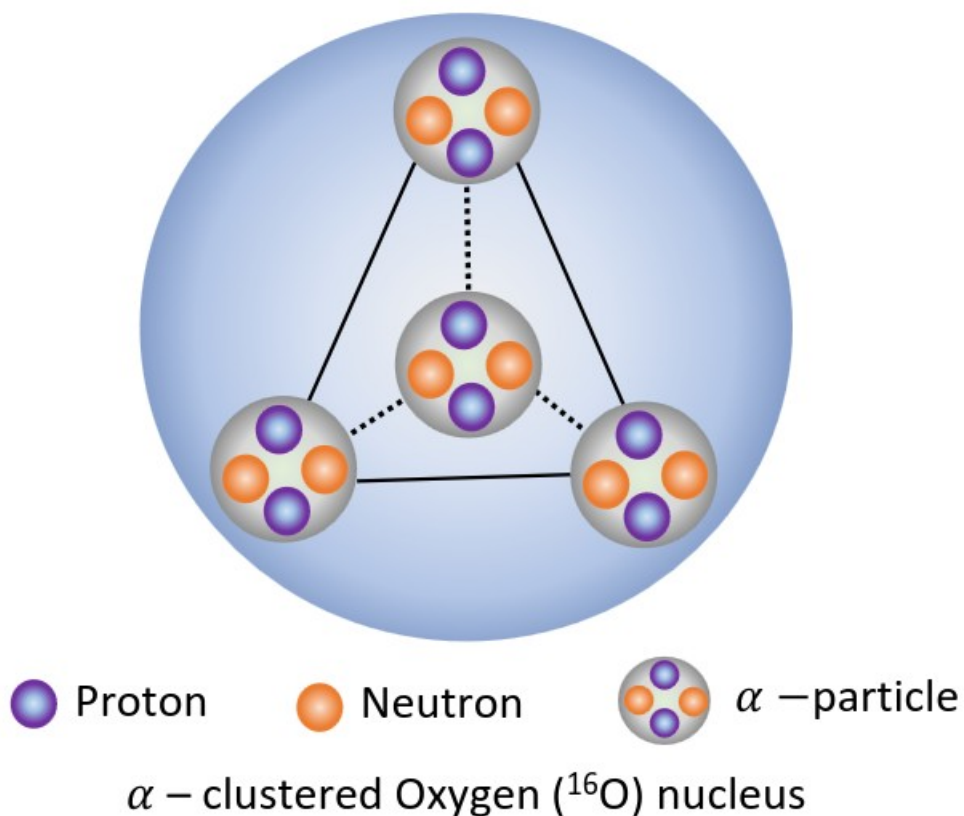
Nem-klaszter model (Woods-Saxon)



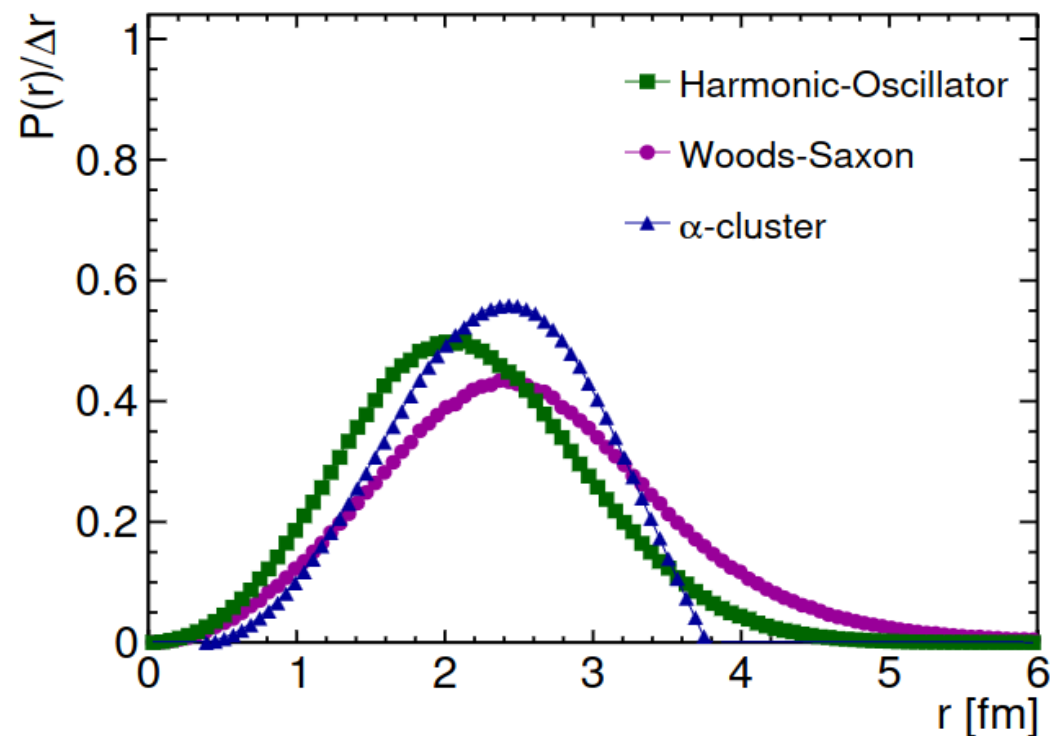
Az oxigén atom alakja

Atommag-szerkezet modellek

– Klaszter modell vs. WS



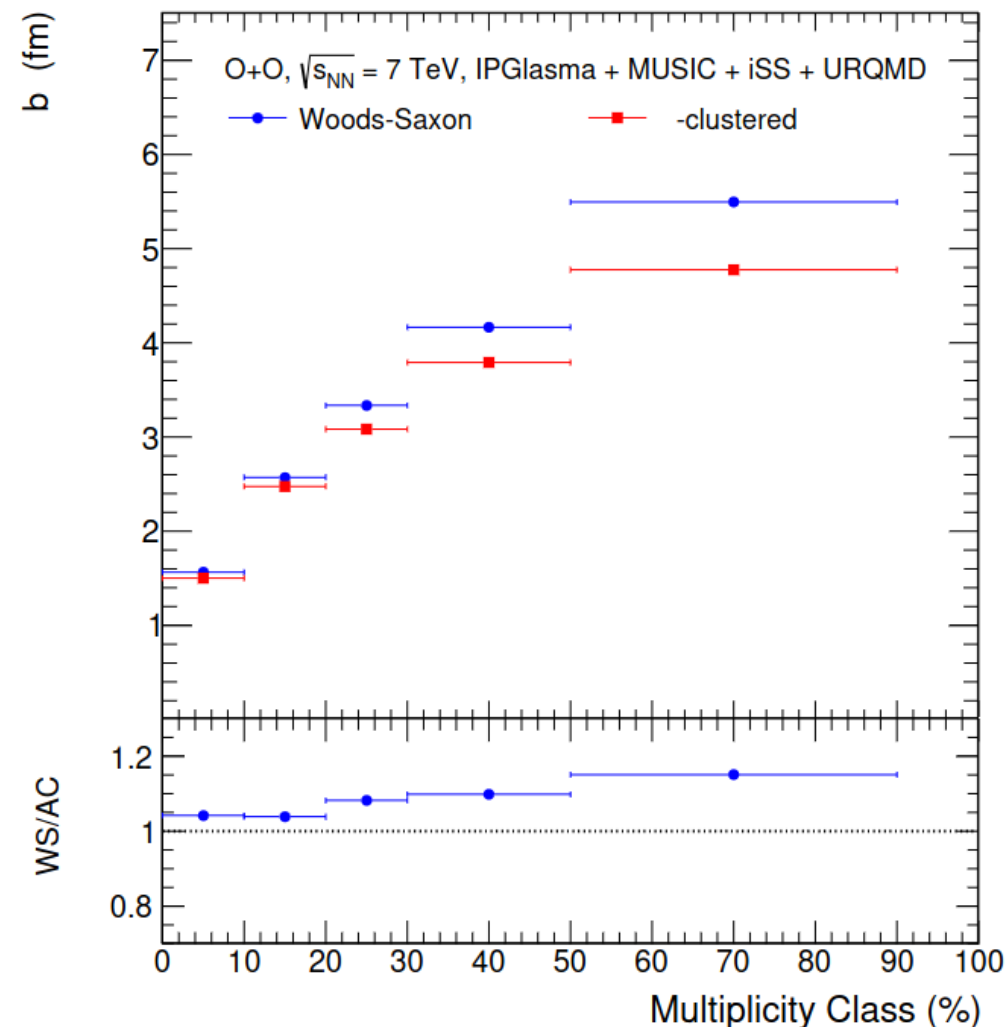
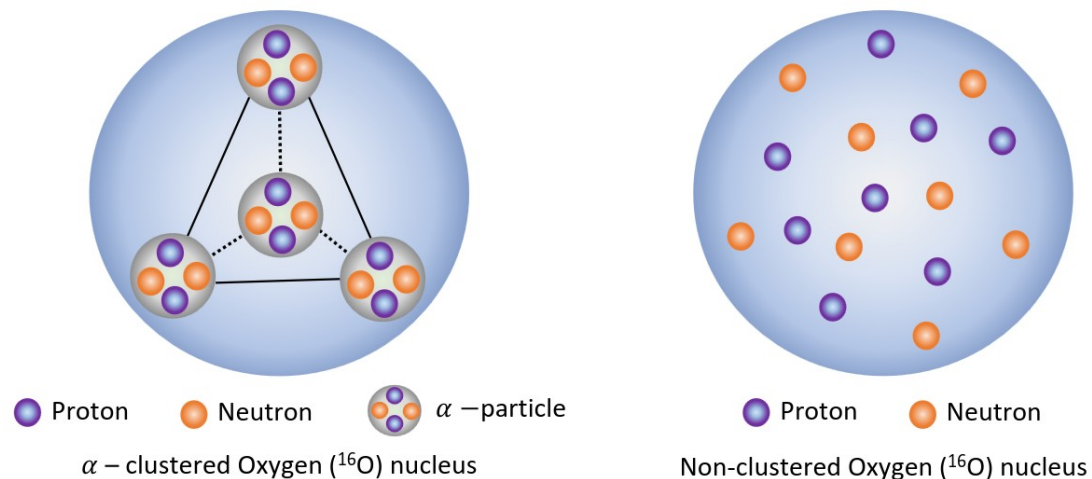
Megtalálási valószínűség



Az OO ütközés geometriája

Atommag-szerkezet leírása

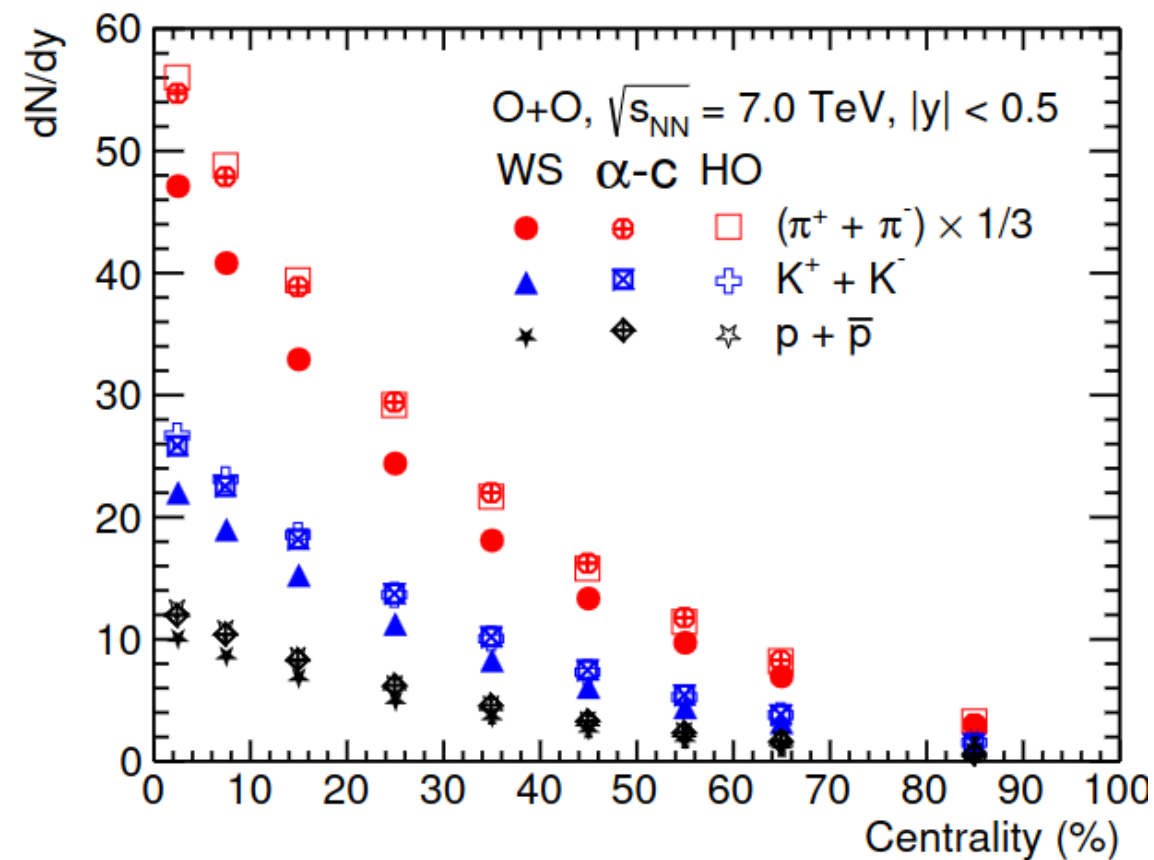
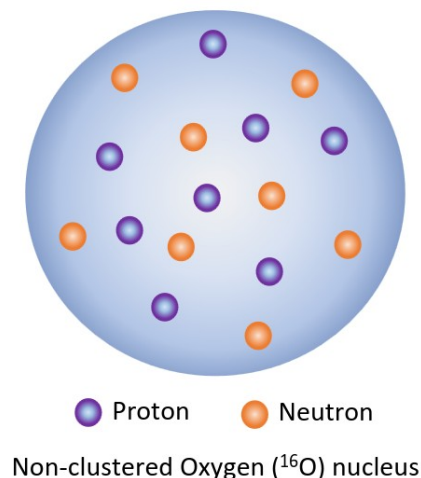
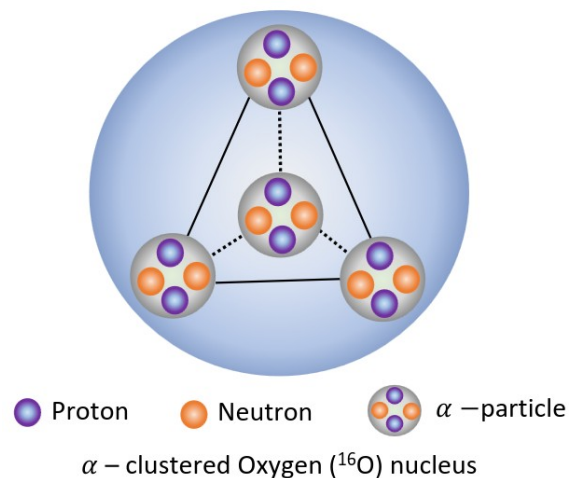
– Klaszter modell vs WS



Az OO ütközés geometriája

Atommag-szerkezet leírása

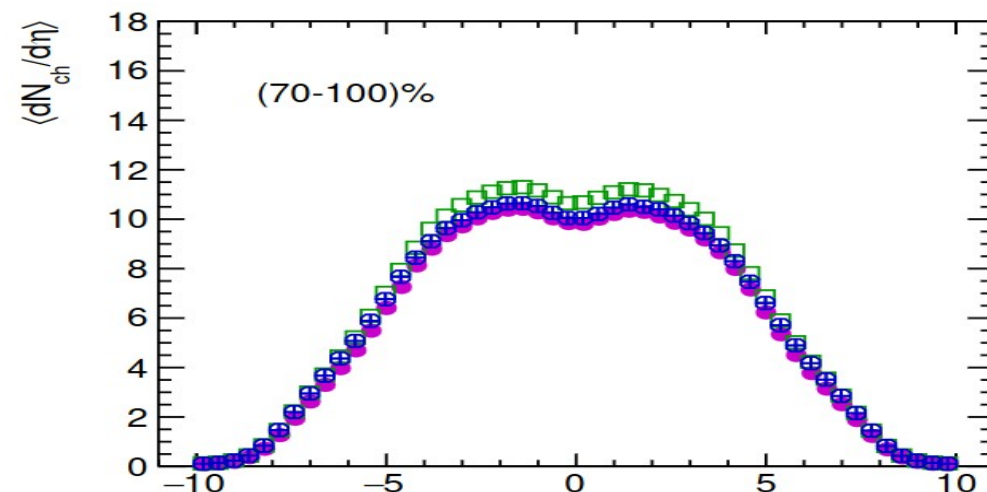
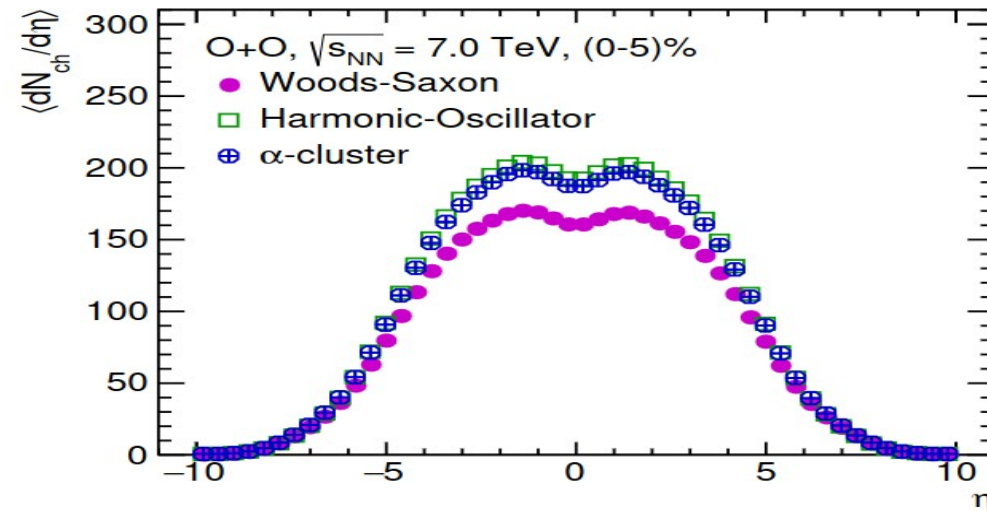
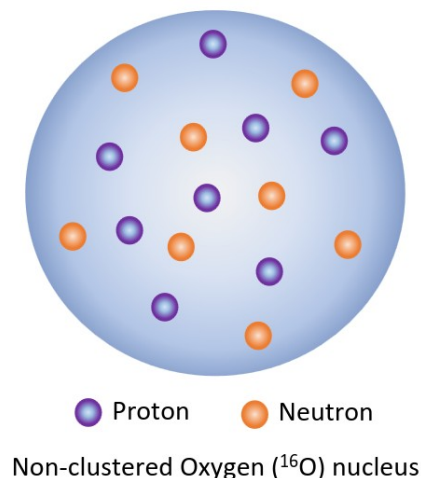
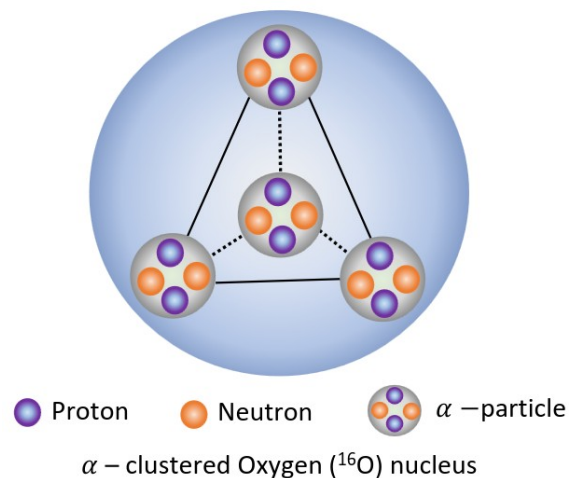
– Klaszter modell vs WS



Az OO ütközés geometriája

Atommag-szerkezet leírása

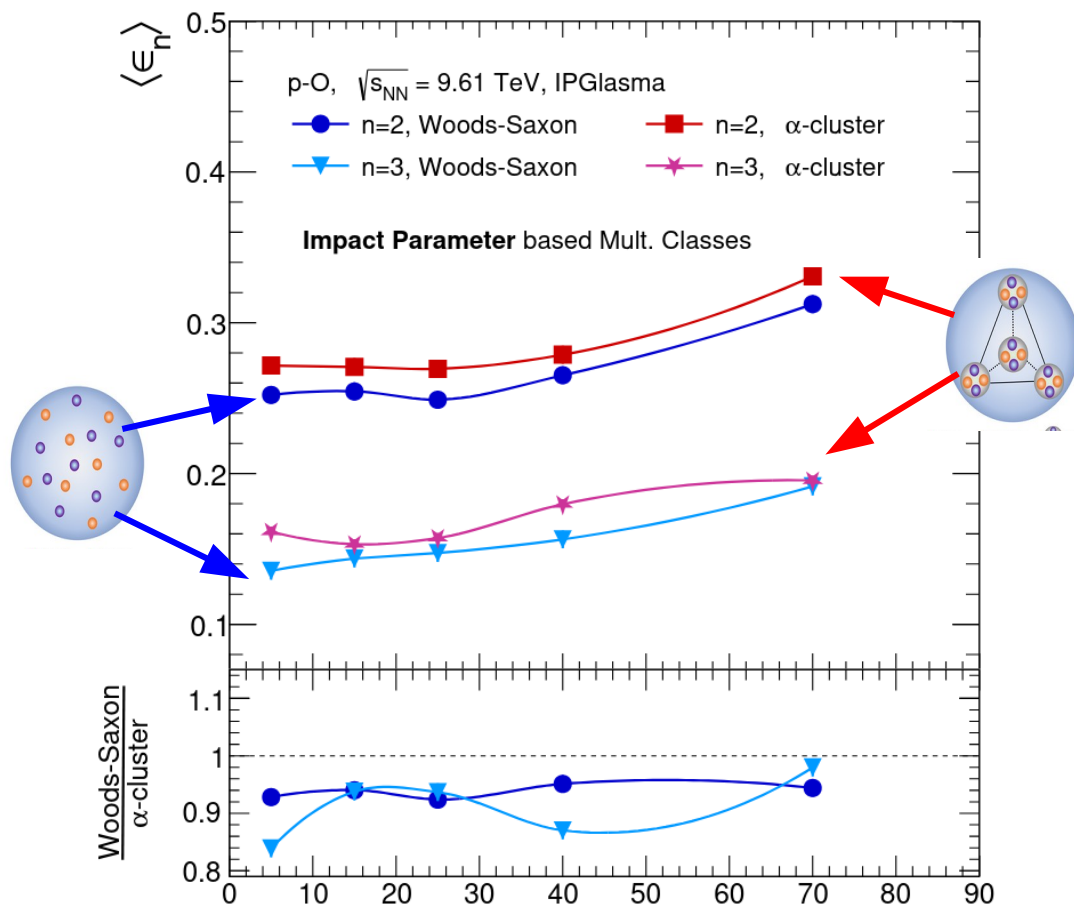
– Klaszter modell vs WS



Excentricitás p-O & O-O ütközésekben

Mérhető a kezdeti excentricitás

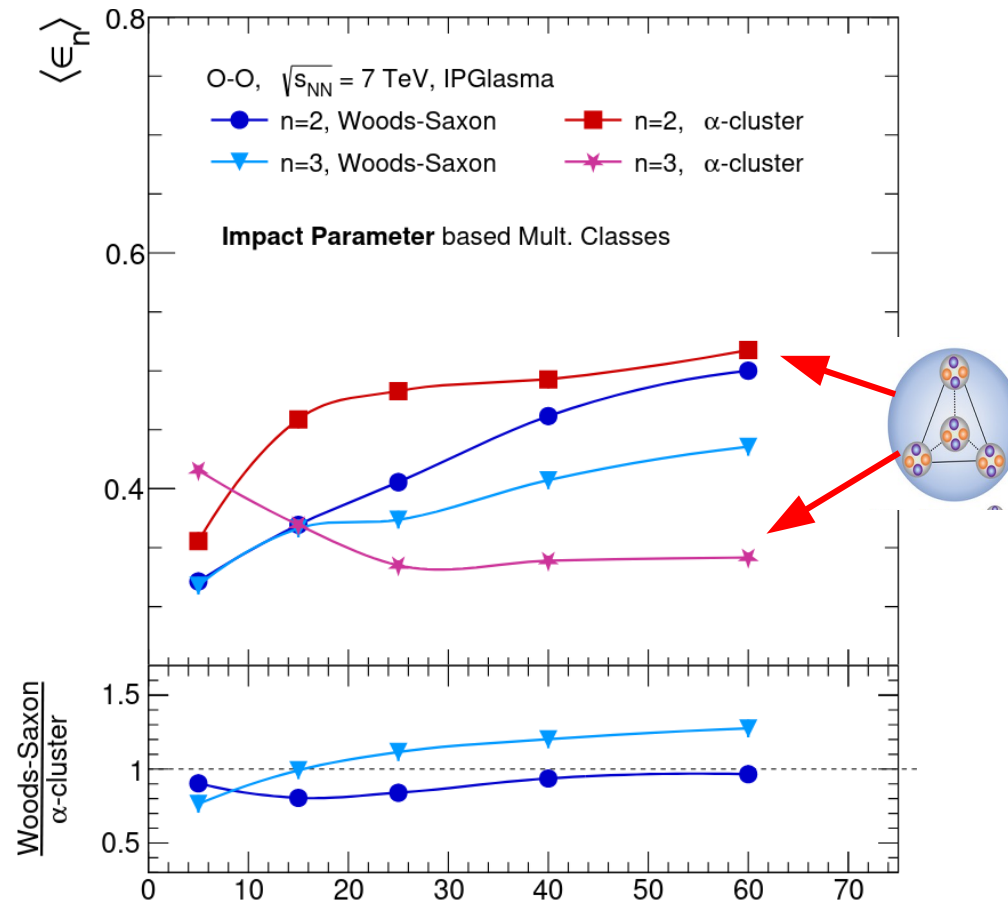
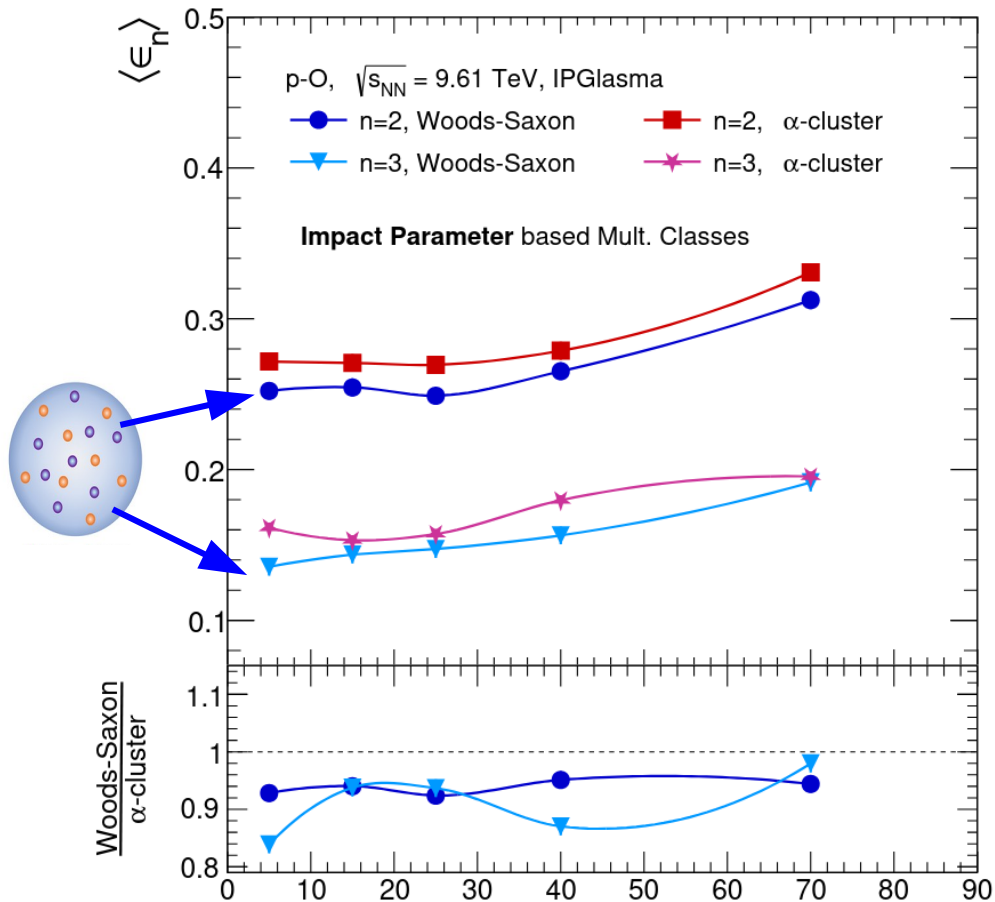
$$\epsilon_n = \frac{\sqrt{\langle r^n \cos(n\phi_{\text{part}}) \rangle^2 + \langle r^n \sin(n\phi_{\text{part}}) \rangle^2}}{\langle r^n \rangle}$$



Excentricitás p-O & O-O ütközésekben

Mérhető a kezdeti excentricitás

$$\epsilon_n = \frac{\sqrt{\langle r^n \cos(n\phi_{\text{part}}) \rangle^2 + \langle r^n \sin(n\phi_{\text{part}}) \rangle^2}}{\langle r^n \rangle}$$

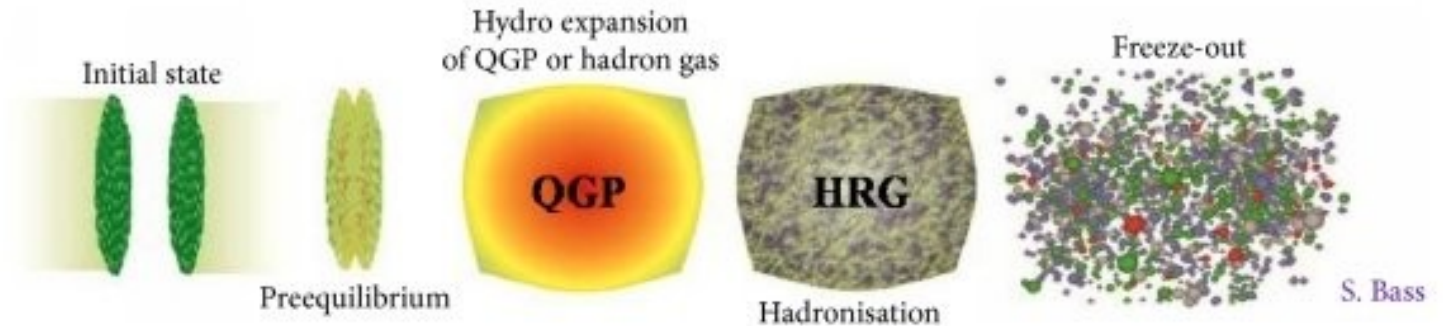


Folyás paraméterek p-O & O-O ütközésekben

A modell

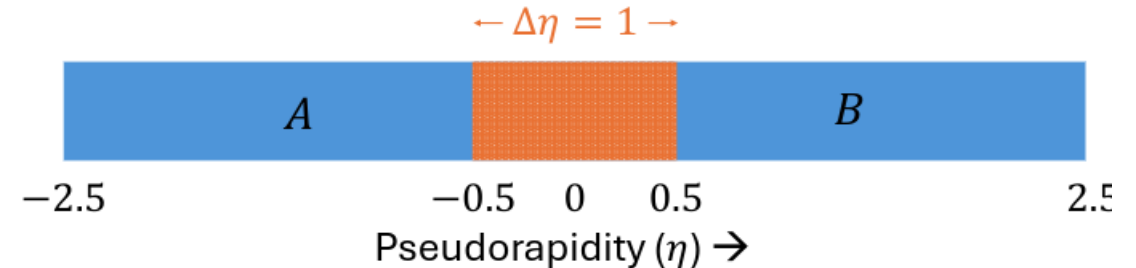
- **Teljes hidrodinamikai & Boltzmann transport modell viskozitással:**

- IPGlasma
- MUSIC
- iSS
- URQMD



- **Kinematikai tartományok:**

- Energia (c.m.): 7 TeV O+O
- Pszeudorapiditás: $|\eta| < 2.5$
- Impulzus-tartomány: $0.2 < p_T < 5.0$ GeV/c
- Pszeudorapiditás szünet: $|\Delta\eta| > 1.0$



A modell

- Teljes hidrodinamikai & Boltzmann transport modell viskozitással:**

- IPGlasma

$$\langle 2 \rangle = \frac{|Q_n|^2 - M}{M(M-1)},$$

- MUSIC

$$\langle 4 \rangle = \frac{|Q_n|^4 + |Q_{2n}|^2 - 2 \cdot \text{Re}[Q_{2n} Q_n^* Q_n^*]}{M(M-1)(M-2)(M-3)}$$

- iSS

- URQMD

$$- 2 \frac{2(M-2) \cdot |Q_n|^2 - M(M-3)}{M(M-1)(M-2)},$$

$$c_n\{2\} = \langle \langle 2 \rangle \rangle,$$

$$c_n\{4\} = \langle \langle 4 \rangle \rangle - 2 \cdot \langle \langle 2 \rangle \rangle^2.$$

$$v_n\{2\} = \sqrt{c_n\{2\}},$$

$$v_n\{4\} = \sqrt[4]{-c_n\{4\}}.$$

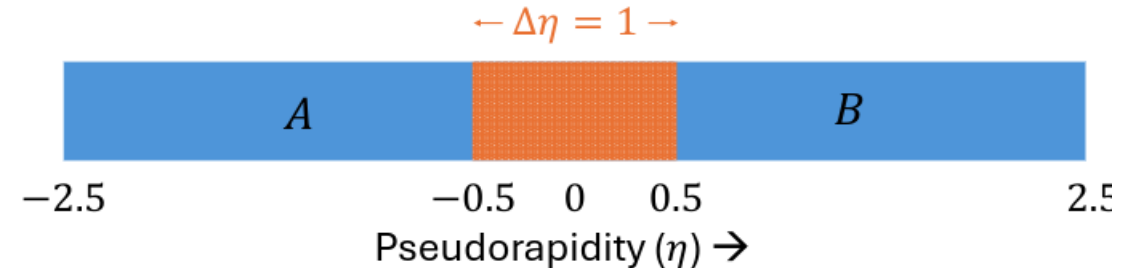
- Kinematikai tartományok:**

- Energia (c.m.): 7 TeV O+O

- Pszeudorapiditás: $|\eta| < 2.5$

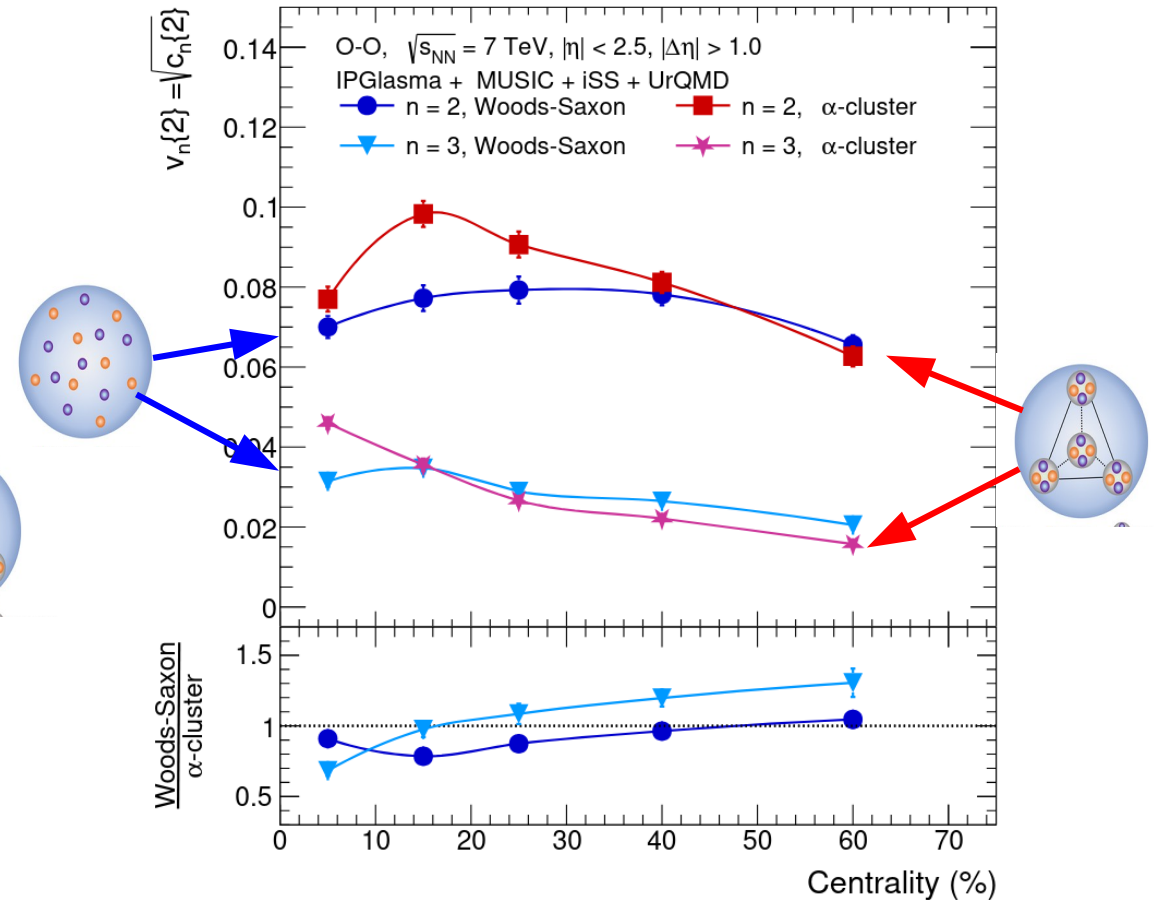
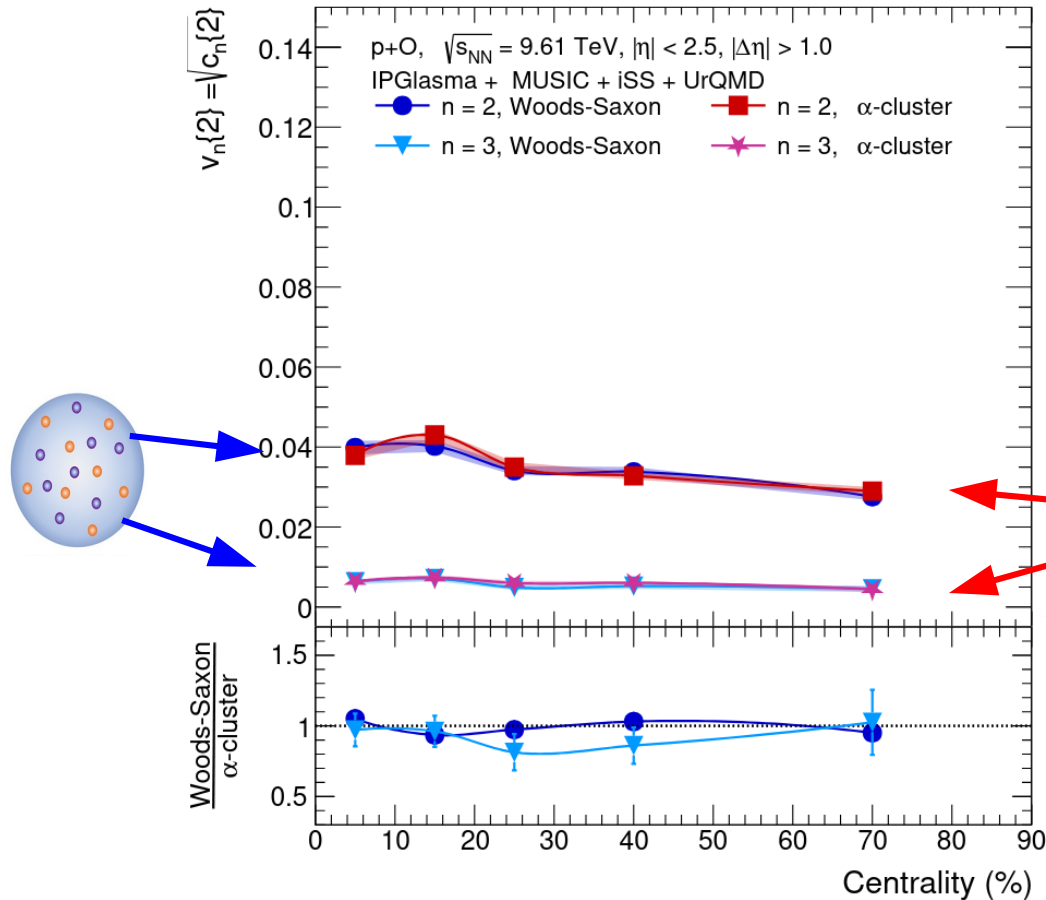
- Impulzus-tartomány: $0.2 < p_T < 5.0 \text{ GeV}/c$

- Pszeudorapiditás szünet: $|\Delta\eta| > 1.0$



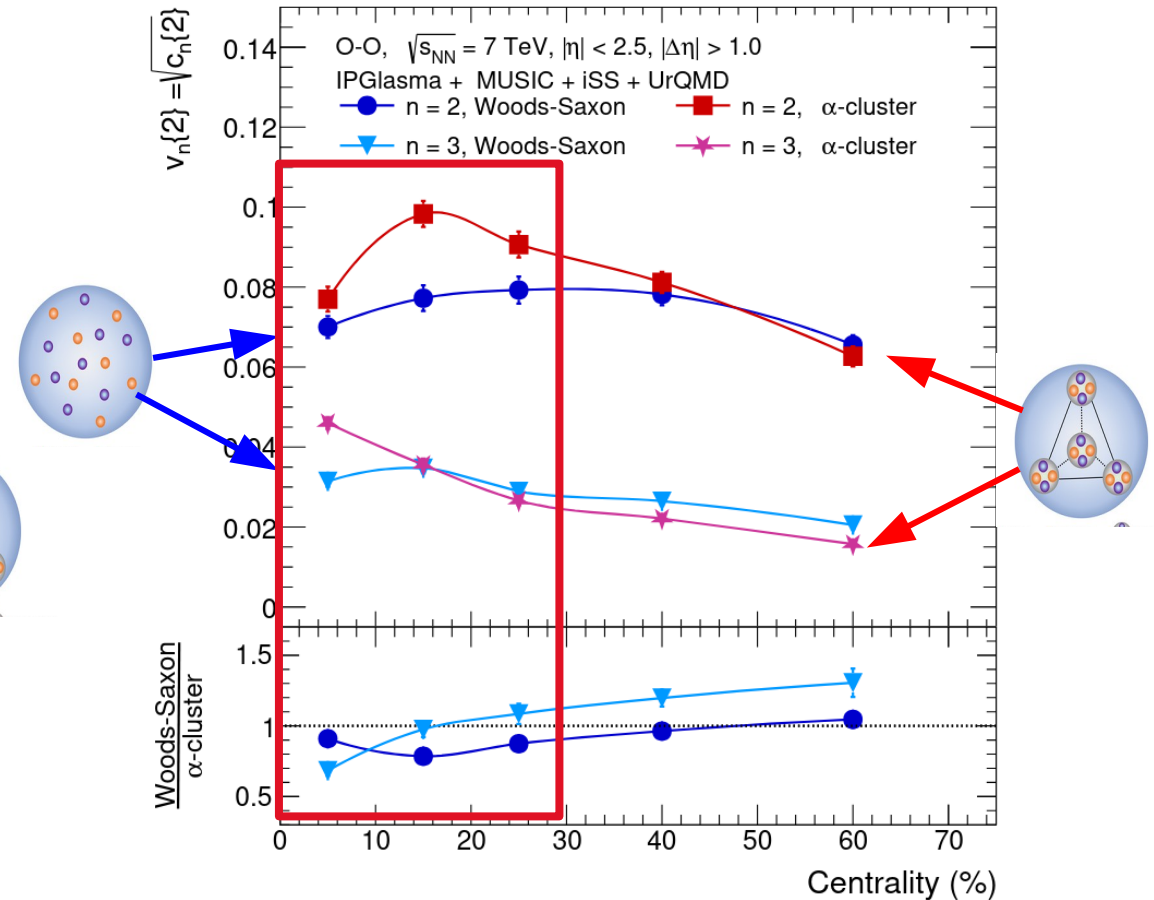
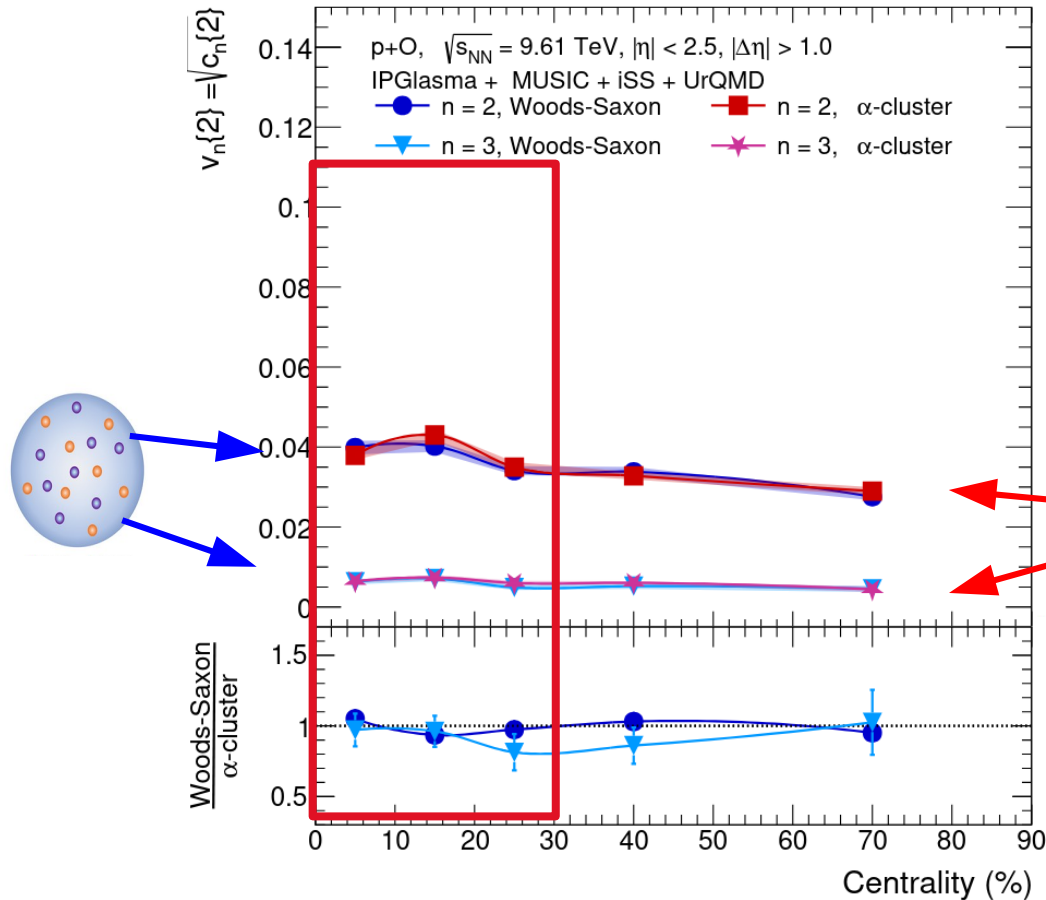
Folyás-komponens LHC energián

2-kumuláns számolások (v_n & c_n): p-O & O-O



Folyás-komponens LHC energián

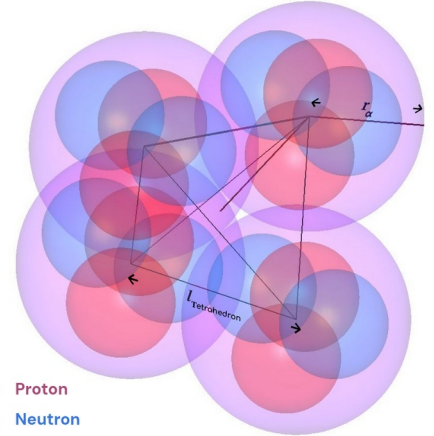
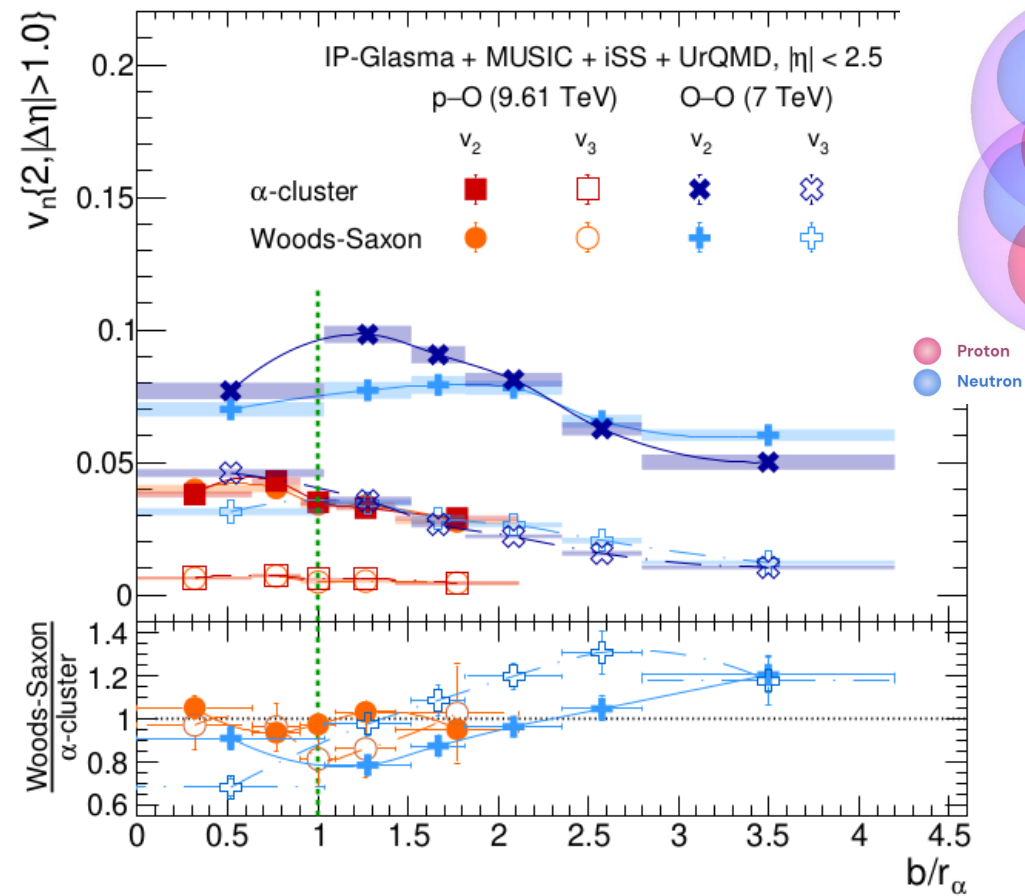
2-kumuláns számolások (v_n & c_n): p-O & O-O



Összefoglalás

Mit üzennek az LHC energiás ütközések?

Igen, mérhető a különbség az atommag-szerkezet modellek között LHC energián: **jelentős effektus látszik O-O** ütközések esetén, de a **kisebb p-O** és **bonyolultabb Ne-Ne** folyamatokban is!



Köszönöm a figyelmet!

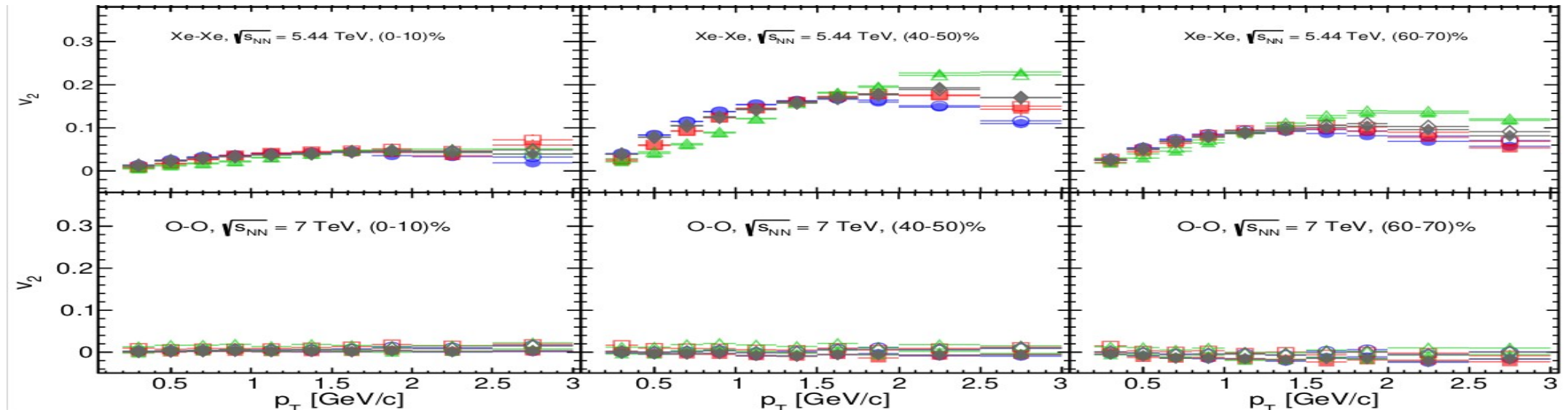


Calculating the flow

Event plane and average method

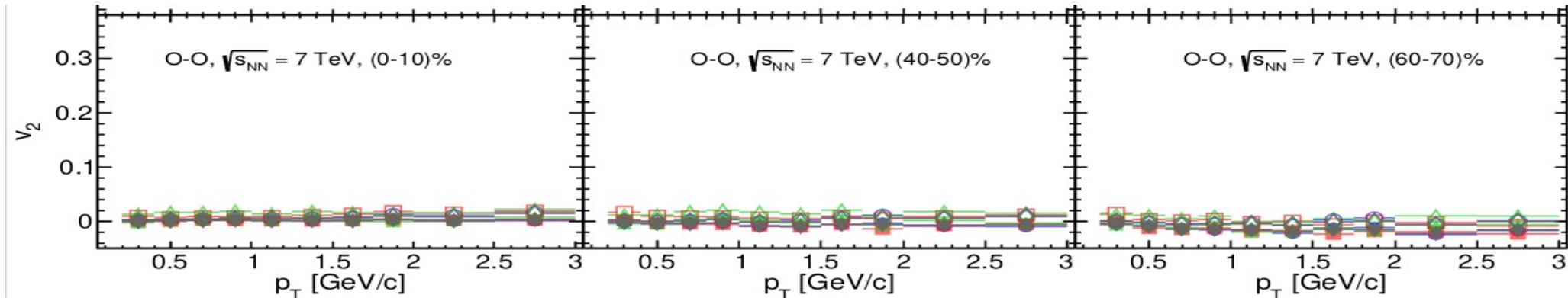
$$v_n = \langle \cos[n(\phi - \psi_n)] \rangle$$

- Need to determine the event plane, which fails for small nuclei:

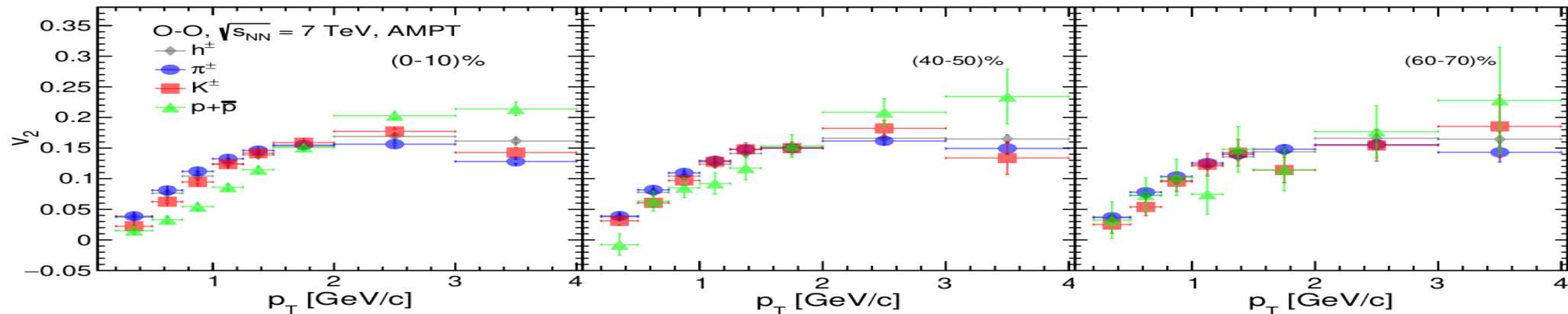


Nehézség: folyás-mérés vs kis rendszer

Eseménysík és átlagolás



Sok-részecske Q-kummuláns módszer



Calculating the flow

Event plane and average method

$$v_n = \langle \cos[n(\phi - \psi_n)] \rangle$$

Multiparticle Q-cumulant method

- Flow vector $Q_n = \sum_{j=1}^M e^{in\phi_j}$
- The 2- and 4-particle cumulants are:

$$\langle 2 \rangle = \frac{|Q_n|^2 - M}{M(M-1)},$$

$$\langle 4 \rangle = \frac{|Q_n|^4 + |Q_{2n}|^2 - 2 \cdot \text{Re}[Q_{2n} Q_n^* Q_n^*]}{M(M-1)(M-2)(M-3)} - 2 \frac{2(M-2) \cdot |Q_n|^2 - M(M-3)}{M(M-1)(M-2)},$$

$$c_n\{2\} = \langle \langle 2 \rangle \rangle,$$

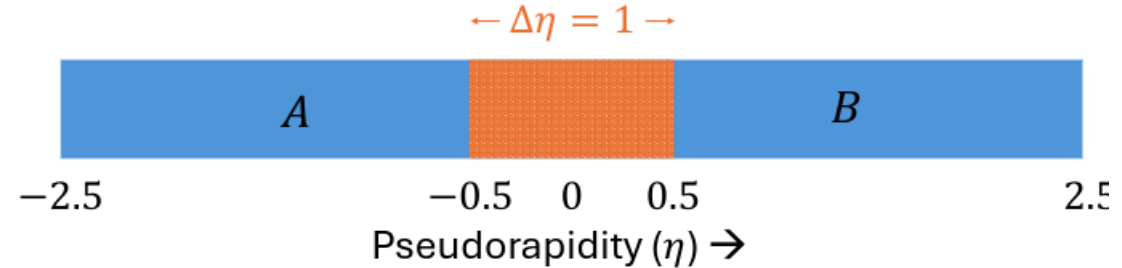
$$c_n\{4\} = \langle \langle 4 \rangle \rangle - 2 \cdot \langle \langle 2 \rangle \rangle^2.$$

$$v_n\{2\} = \sqrt{c_n\{2\}},$$
$$v_n\{4\} = \sqrt[4]{-c_n\{4\}}.$$

Calculating the flow

Suppressing the non-flow contribution:

- Kinematical cut: 2 sub-events, A&B are introduced, with a rapidity gap:



$$\langle 2 \rangle_{\Delta\eta} = \frac{Q_n^A \cdot Q_n^{B*}}{M_A \cdot M_B} \quad \longrightarrow \quad v_n\{2, |\Delta\eta|\}(p_T) = \frac{d_n\{2, |\Delta\eta|\}}{\sqrt{c_n\{2, |\Delta\eta|\}}}$$

- Differential flow cummulants:

$$\begin{aligned} d_n\{2\} &= \langle \langle 2' \rangle \rangle, \\ d_n\{4\} &= \langle \langle 4' \rangle \rangle - 2\langle \langle 2' \rangle \rangle \langle \langle 2 \rangle \rangle \end{aligned} \quad \longrightarrow \quad d_n\{2, |\Delta\eta|\} = \langle \langle 2' \rangle \rangle_{\Delta\eta}$$

- Mean and the fluctuations of the flow & ratio:

$$\begin{aligned} \langle v_n \rangle &= \sqrt{\frac{v_n^2\{2\} + v_n^2\{4\}}{2}} \\ \sigma_{v_n} &= \sqrt{\frac{v_n^2\{2\} - v_n^2\{4\}}{2}} \end{aligned} \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} \langle v_n \rangle \\ \sigma_{v_n} \end{aligned}} \right\} \longrightarrow \boxed{F(v_n) = \frac{\sigma_{v_n}}{\langle v_n \rangle}}$$

The Model

- **A full hidro & Boltzmann transport with viscosity:**

- IPGlasma

$$\langle 2 \rangle = \frac{|Q_n|^2 - M}{M(M-1)},$$

- MUSIC

$$\langle 4 \rangle = \frac{|Q_n|^4 + |Q_{2n}|^2 - 2 \cdot \text{Re}[Q_{2n} Q_n^* Q_n^*]}{M(M-1)(M-2)(M-3)}$$

- iSS

- URQMD

$$- 2 \frac{2(M-2) \cdot |Q_n|^2 - M(M-3)}{M(M-1)(M-2)},$$

$$c_n\{2\} = \langle \langle 2 \rangle \rangle,$$

$$c_n\{4\} = \langle \langle 4 \rangle \rangle - 2 \cdot \langle \langle 2 \rangle \rangle^2.$$

$$v_n\{2\} = \sqrt{c_n\{2\}},$$

$$v_n\{4\} = \sqrt[4]{-c_n\{4\}}.$$

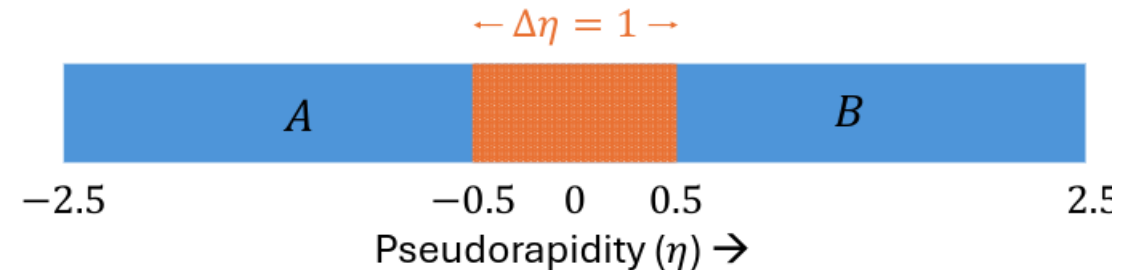
- **Kinematical settings are:**

- Energy (c.m.): 7 TeV O+O

- Pseudorapidity: $|\eta| < 2.5$

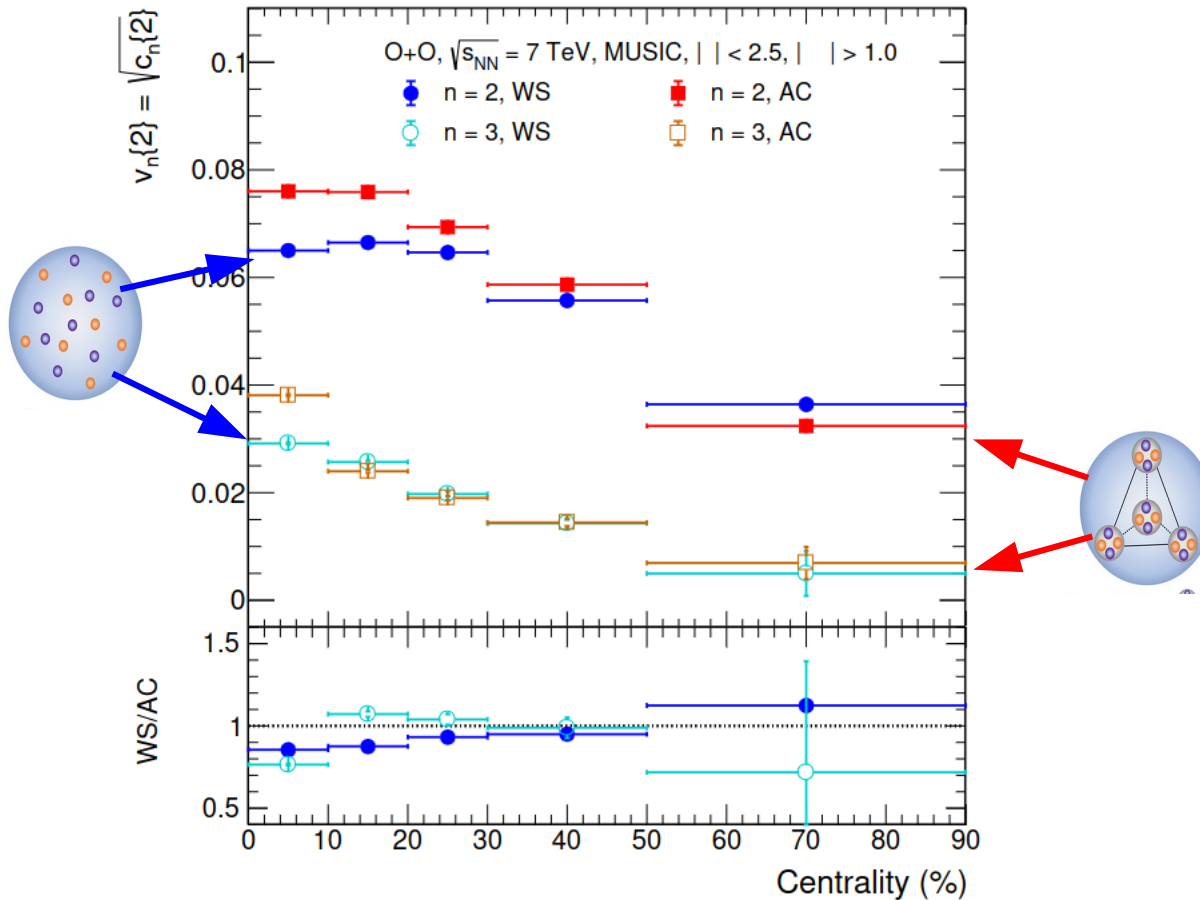
- Transverse momentum: $0.2 < p_T < 5.0$ GeV/c

- Pseudorapidity gap: $|\Delta\eta| > 1.0$



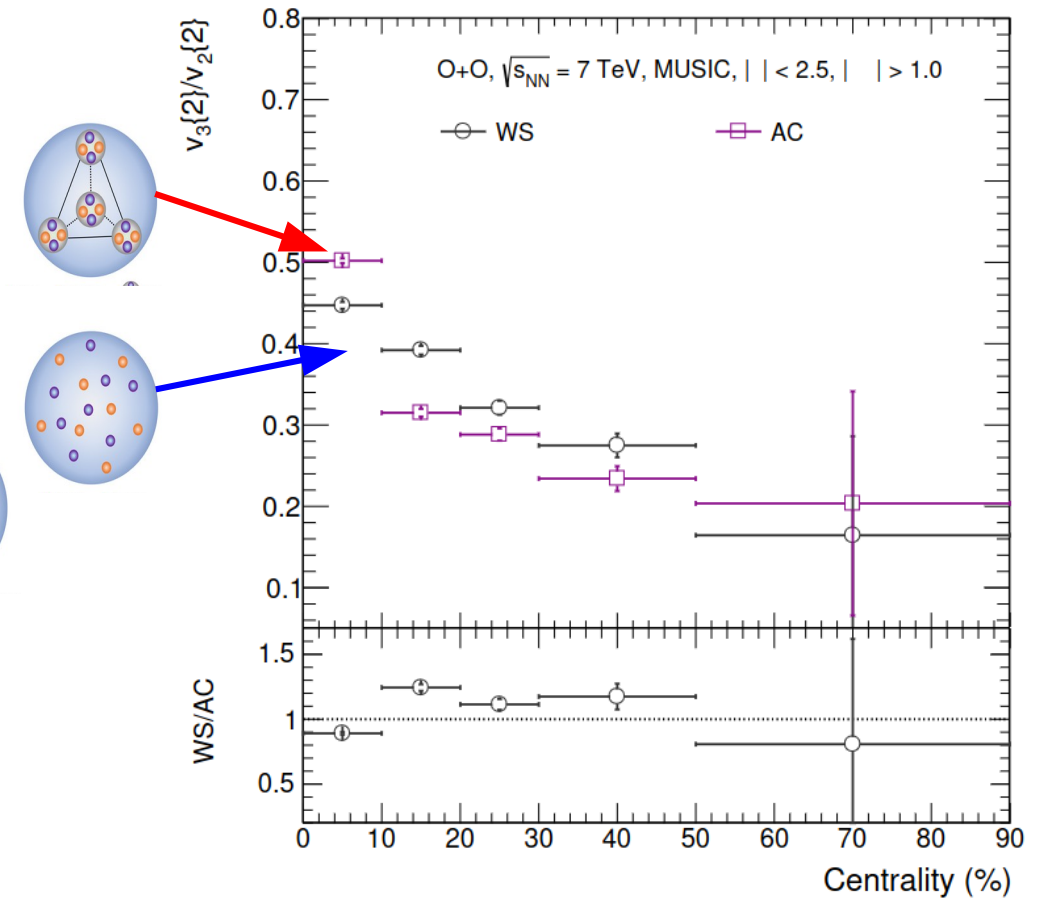
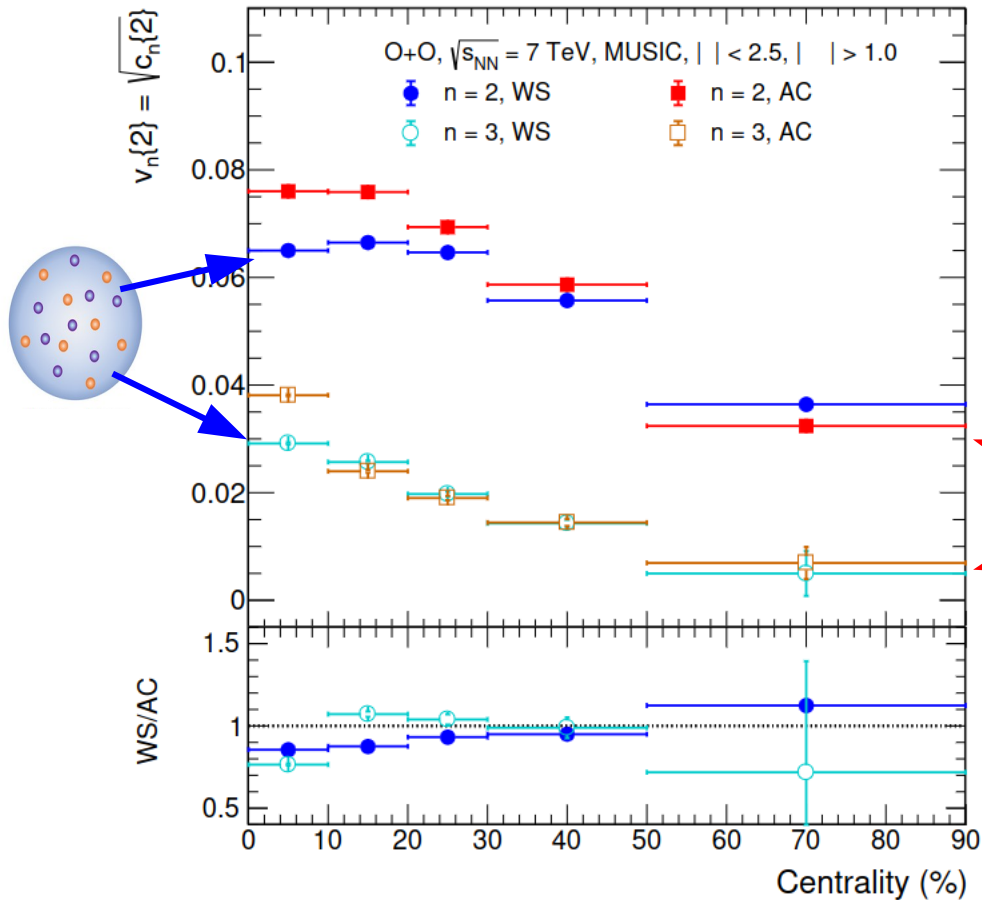
Folyás-komponens O-O @ 7TeV

2-kumuláns számolások: v_2 & v_3



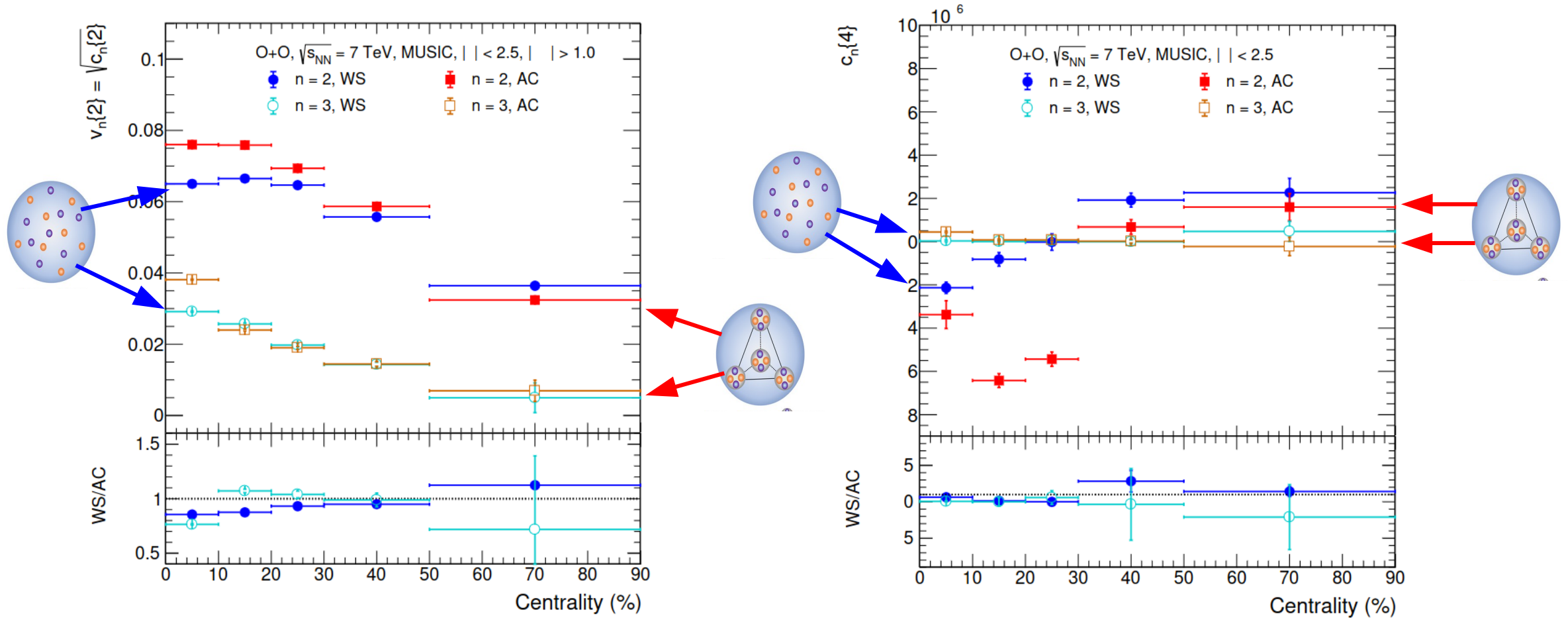
Folyás-komponens O-O @ 7TeV

2-kumuláns számolások: v_2 & v_3



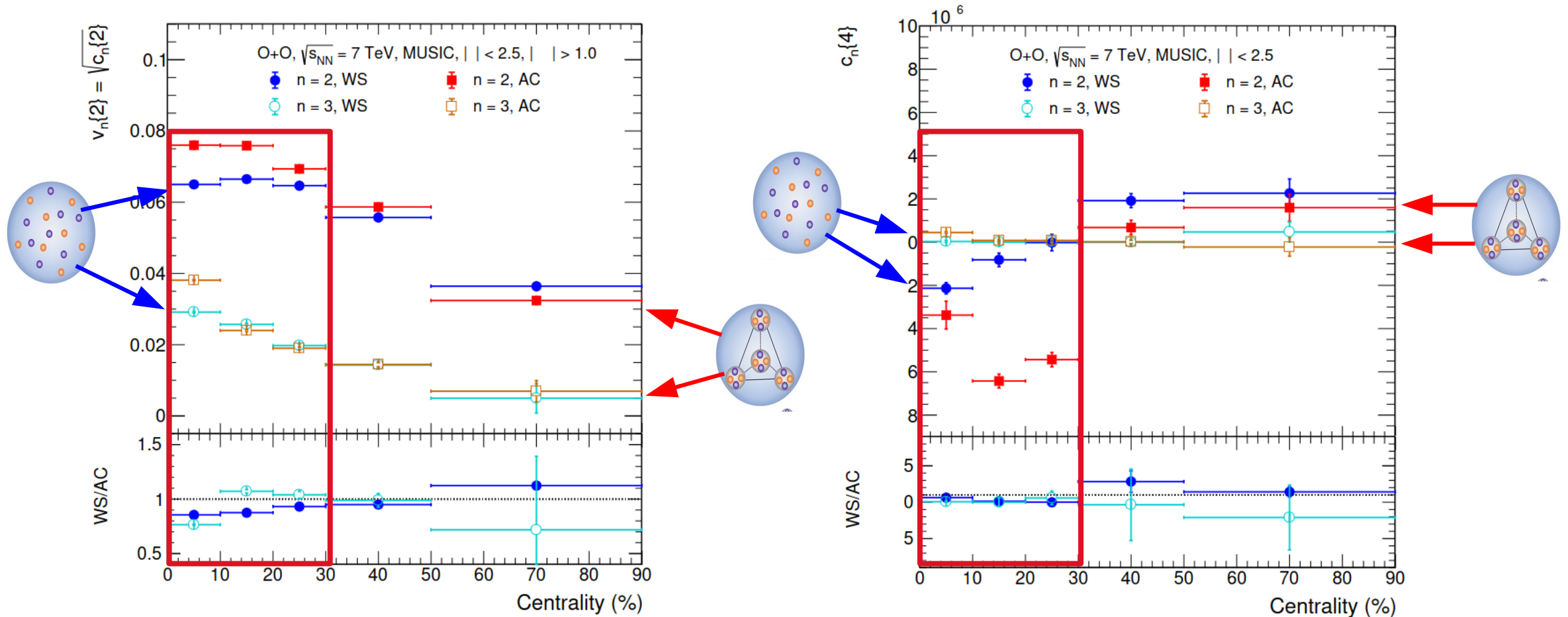
Folyás-komponens O-O @ 7TeV

2- & 4-kumuláns számolás: v_n & c_n



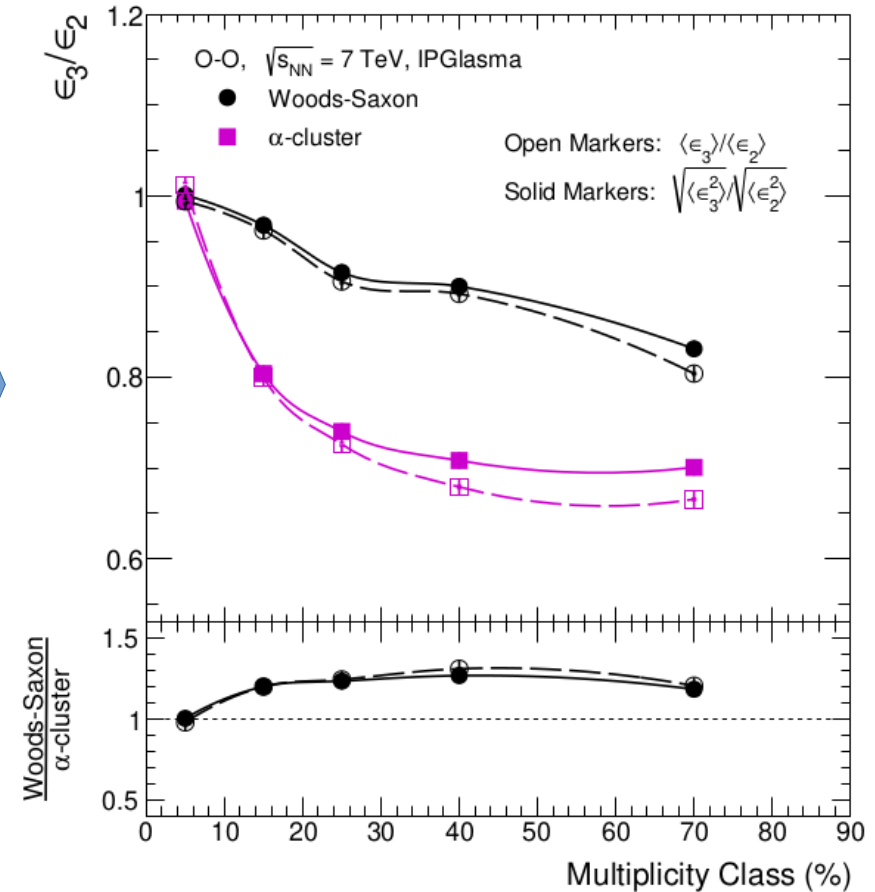
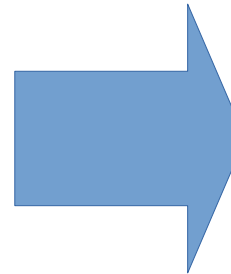
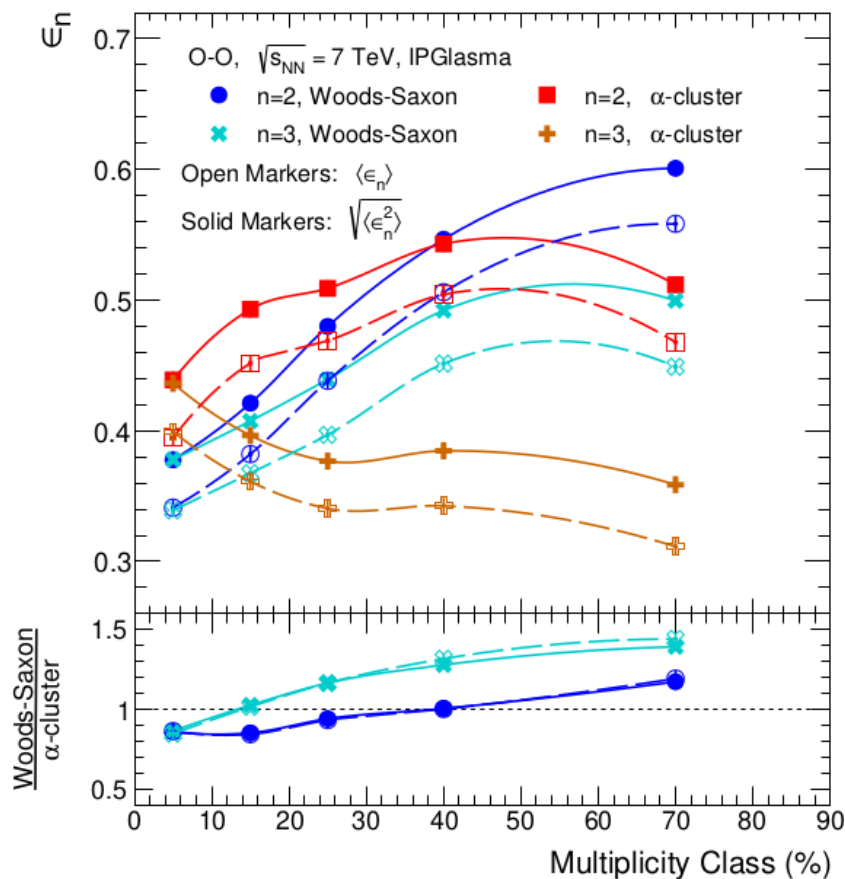
Folyás-komponens O-O @ 7TeV

2- & 4-kumuláns számolás: v_n & c_n



Eccentricity in O+O @ 7TeV

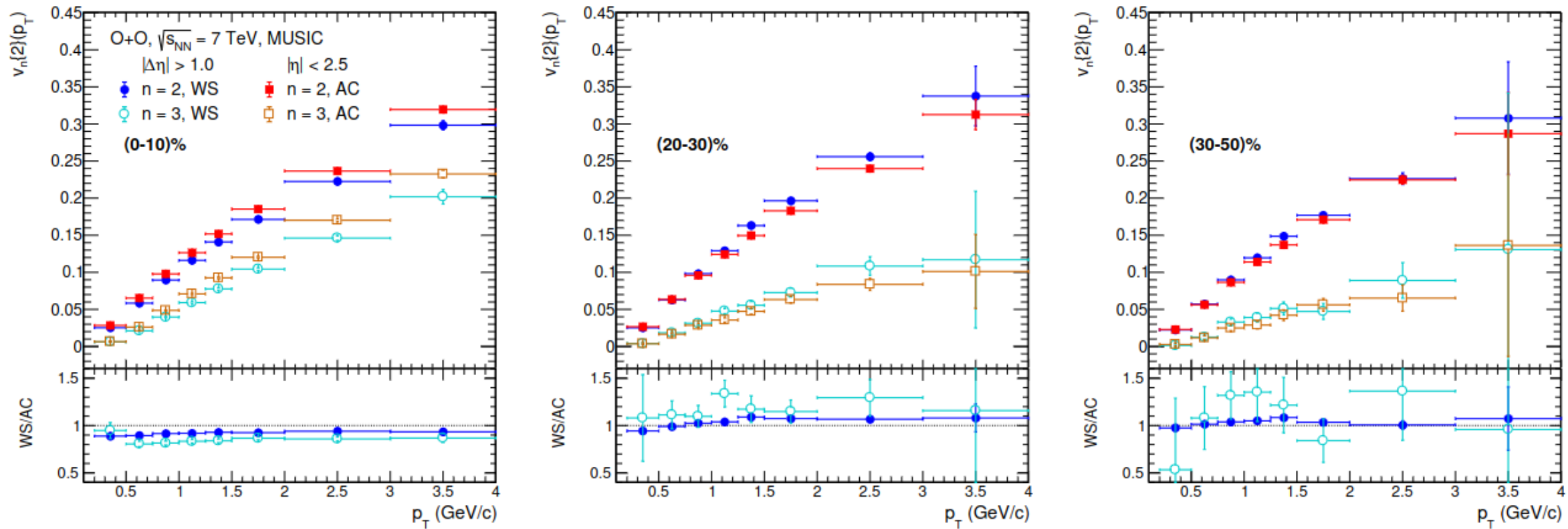
Eccentricity vs multiplicity for v2 and v3 and Woods-Saxon/Cluster



Flow components in O+O @ 7TeV

2-cummulants based $v_n(p_T)$ calculations

Centrality



Folyás-komponens O-O @ 7TeV

2- & 4-kummuláns számolások

- A folyás és a fluktuációk is jelentősen változnak a centrális 0-30% tartományban
- Alfa-klaszter modell esetében erősebb a hatás mint a Wood-Saxon profilban
- Magasabb kummulánsok esetébe erősebb az effektus nagy centrálításokban
- A két hatás jól látszik a relatív mérőszámokban:

$$F(v_n) = \frac{\sigma_{v_n}}{\langle v_n \rangle}$$

