



ALICE Deneyi Güncel Kuarkonyum Sonuçları

Serpil YALÇIN KUZU ve Ayben KARASU UYSAL

YEFİST 2025

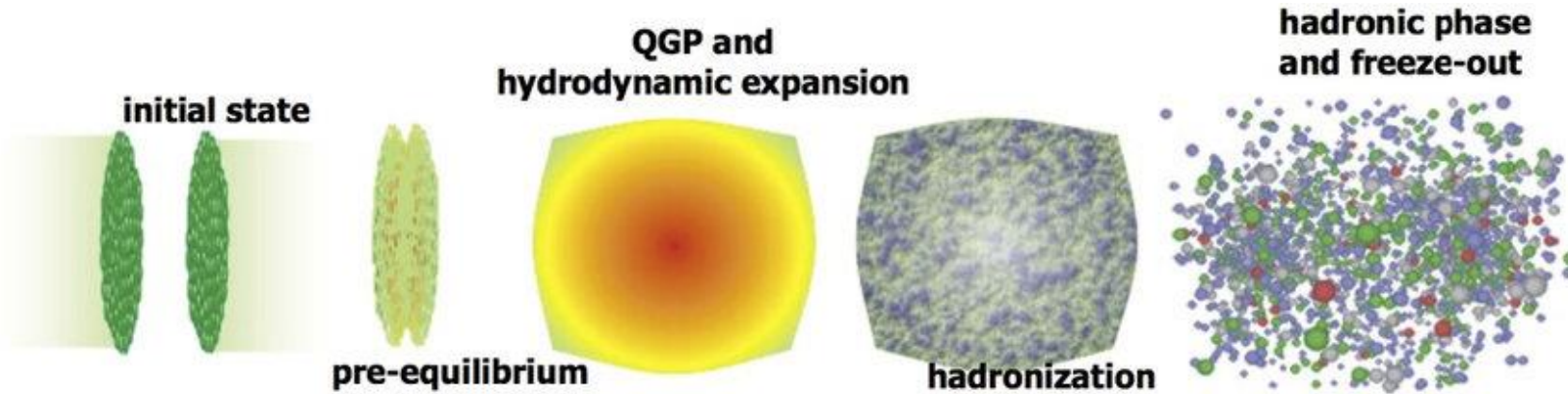
İstanbul, 25.05.2025

İÇERİK

- Motivasyon
 - Kuarkonyum Bağlı Durumları
 - Çarmonyum ve Bottomonyum
 - KGP Termometresi
- Büyük İyon Çarpıştırıcısı Deneyi: ALICE
- Kuarkonyum Çalışmalarında Kullanılan Temel Parametreler
 - Nükleer Modifikasyon Faktörü
 - Üretim Kesiti Oranı
- ALICE Güncel Kuarkonyum Ölçümleri
 - Proton-proton (pp) $\sqrt{s}=13.6$ TeV Ölçümleri
 - Proton-Kurşun (p-Pb) $\sqrt{s}=8.16$ TeV Ölçümleri
 - Kurşun-Kurşun (Pb-Pb) $\sqrt{s}=5.02$ TeV Ölçümleri
- Özet

Motivasyon: Kuarkonyum Bağlı Durumları

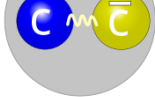
- Kuarkonyum, ağır bir kuark ile ona karşılık gelen antikuarkın oluşturduğu yüksüz mezonlardır.



- Serbest kuark ve gluonların güçlü bir şekilde etkileştiği, yüksek sıcaklık ve yoğunluğa sahip Kuark Gluon Plazma (KGP-QGP) ortamının yapısını incelemek için önemli bir araçtır.

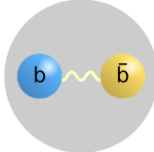
Motivasyon: Kuarkonyum Bağlı Durumları

• Çarmonyum:

- $c\bar{c}$ bağlı durumlarıdır. 
- J/ψ (*Jpsi*) en bilinen çarmonyum durumudur.
- $\psi(2S)$, χ_c gibi diğer durumlar.

| State | Quantum # s (n L J pc) | Mass (Mev) | Width (Mev) |
|--------------|------------------------|------------|-------------|
| η_c | 1 0 0 ++ | 2980 | 25.5 |
| J/ψ | 1 0 1 -- | 3096 | 93.4 keV |
| χ_{c0} | 1 1 0 ++ | 3414 | 10.4 |
| χ_{c1} | 1 1 1 ++ | 3510 | .89 |
| χ_{c2} | 1 1 2 ++ | 3556 | 2.06 |
| h_{c0} | 1 1 1 +- | 3525 | < 1 |
| $\psi(3770)$ | 1 2 1 -- | 3771 | 23.0 |
| η_c | 2 0 0 +- | 3638 | 14 |

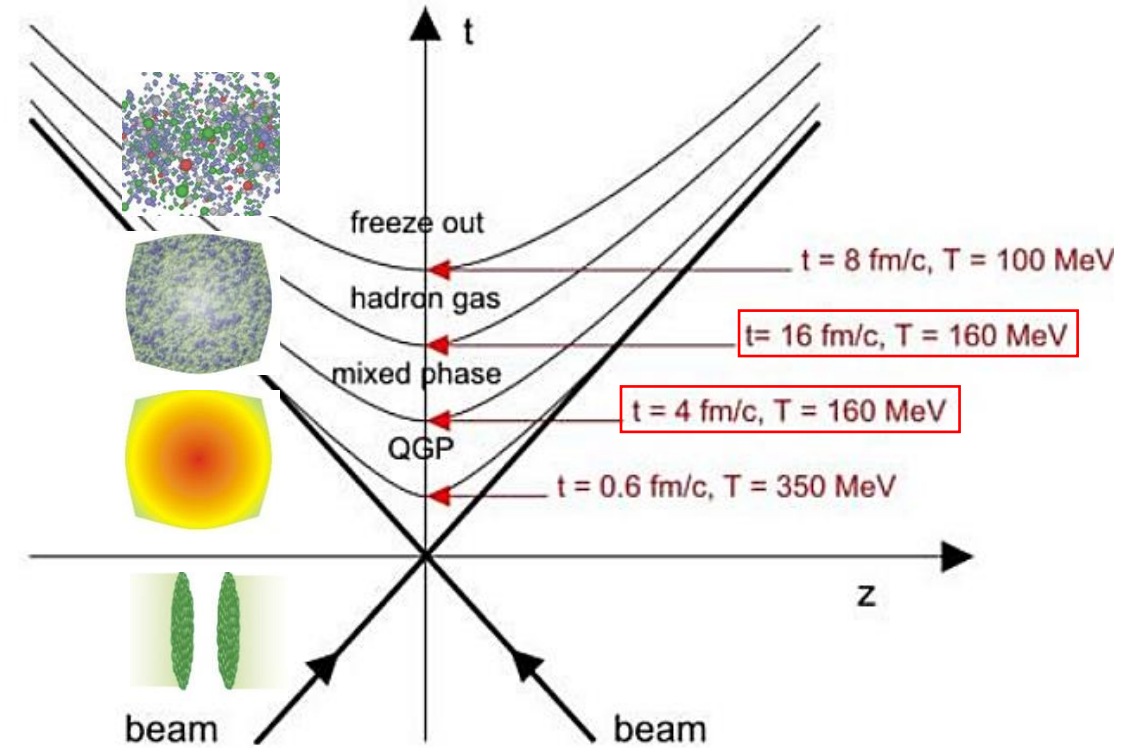
• Bottomonyum:

- $b\bar{b}$ bağlı durumlarıdır. 
- Υ (*Upsilon*) durumları: $\Upsilon(1S)$, $\Upsilon(2S)$, $\Upsilon(3S)$.
- χ_b gibi durumlar.

| State | Quantum # s (n L J pc) | Mass (Mev) | Width (Mev) |
|-----------------|------------------------|------------|-------------|
| $\Upsilon(1S)$ | 1 0 1 -- | 9460.30 | 54.02 keV |
| $\chi_{b0}(1P)$ | 1 1 0 ++ | 9859.44 | unknown |
| $\chi_{b1}(1P)$ | 1 1 1 ++ | 9892.78 | unknown |
| $\chi_{b2}(1P)$ | 1 1 2 ++ | 9912.21 | unknown |
| $\Upsilon(1D)$ | 1 2 2 -- | 10161.1 | unknown |
| $\Upsilon(2S)$ | 2 0 1 -- | 10023.26 | 31.98 keV |
| $\chi_{b0}(2P)$ | 2 1 0 ++ | 10232.5 | unknown |
| $\chi_{b1}(2P)$ | 2 1 1 ++ | 10255.46 | unknown |
| $\chi_{b2}(2P)$ | 2 1 2 ++ | 10268.65 | unknown |
| $\Upsilon(3S)$ | 3 0 1 -- | 10355.2 | 20.32 keV |

Motivasyon: Kuarkonyum Bağlı Durumları

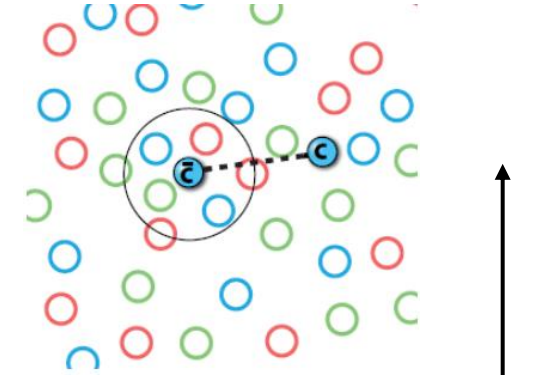
- Sahip oldukları kütle sebebiyle c ve b kuarkları yüksek enerji çarpışmalarının çoğunlukla ilk safhasında üretilir.
- Çarmonyum ve bottomonyum bağlı durumları güçlü etkileşim yapmaları sebebiyle çabuk bozunmazlar.
 - Leptonik bozunum kanallarından kolaylıkla ölçülebilirler.



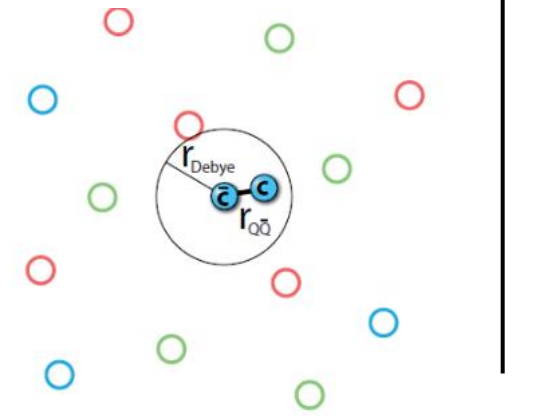
Motivasyon: Kuarkonyum Bağlı Durumları

- Bir kuarkonyum durumu renk yüklerinin yoğun olduğu KGP varlığında, çevredeki renk yükleri tarafından $r_{Q\bar{Q}} > r_{Debye}$ uzaklıklarında perdelenir (ekranlanır).
 - Sıcaklık arttıkça:
 - Ortamın yoğunluğu artar.
 - Karakteristik renk perdeleme yarıçapı r_{Debye} azalır.
 - Eğer $r_{Debye} \ll r_{Q\bar{Q}}$ ise:
 - Ağır kuark anti kuark çifti birbirini "göremez", bu nedenle bağlı hâl "erir".
 - Çevresinde birçok başka kuark ve antikuark görür ve bu sayede ortamda **serbestçe hareket edebilir**.
- Bu duruma "Debye perdesi" (Debye screening) adı verilir.

KGP içinde Kuarkonyum Durumu: Debye perdelemesi



Erken Evrede Üretilen Kuarkonyum Durumu

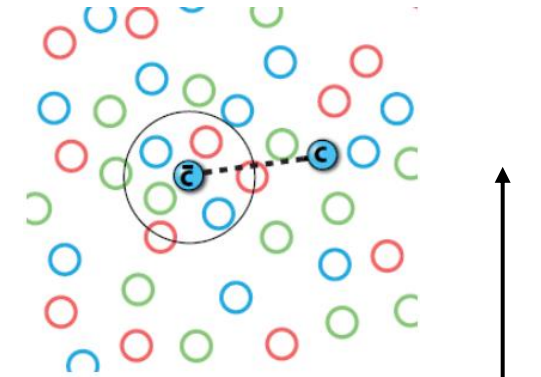


Matsui & Satz (1986)

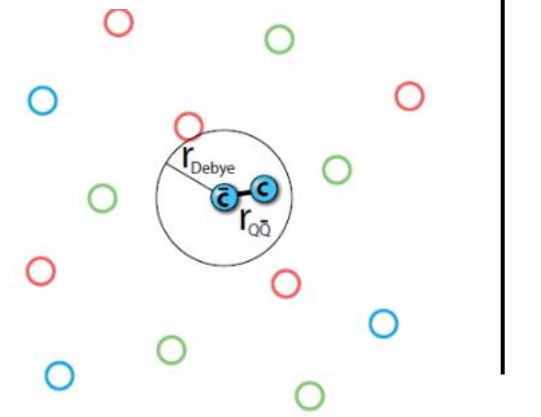
Motivasyon: Kuarkonyum Bağlı Durumları

- Bir kuarkonyum durumu renk yüklerinin yoğun olduğu KGP varlığında, çevredeki renk yükleri tarafından $r_{Q\bar{Q}} > r_{Debye}$ uzaklıklarında perdelenir (ekranlanır).
 - Sıcaklık arttıkça:
 - Ortamın yoğunluğu artar.
 - Karakteristik renk **perdeleme yarıçapı** r_{Debye} azalır.
 - Eğer $r_{Debye} \ll r_{Q\bar{Q}}$ ise:
 - Ağır kuark anti kuark çifti birbirini “göremez”, bu nedenle bağlı hâl "erir".
 - Çevresinde birçok başka kuark ve antikuark görür ve bu sayede ortamda **serbestçe hareket edebilir**.
- Bu duruma “Debye perdesi” (Debye screening) adı verilir. → *KGP Baskılaması!*

KGP içinde Kuarkonyum Durumu: Debye perdelemesi



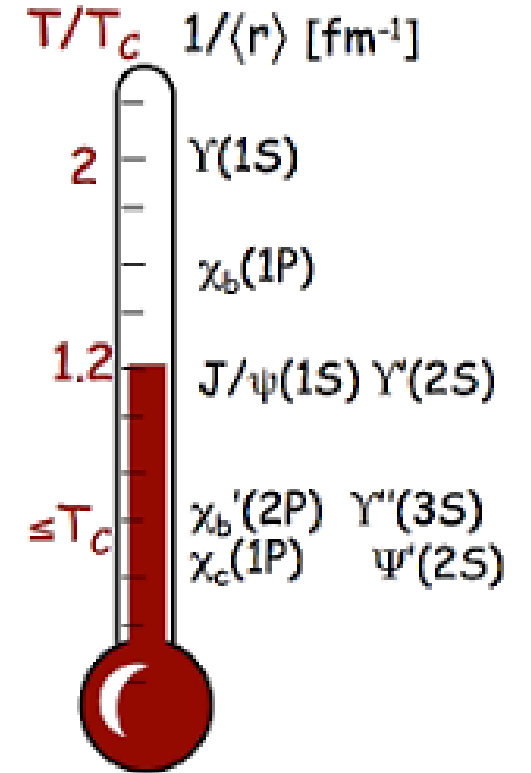
Erken Evrede Üretilen Kuarkonyum Durumu



Matsui & Satz (1986)

Motivasyon: KGP Termometresi

- Eğer perdeleme yarıçapının (r_{Debye}) sıcaklığa bağlılığı biliniyorsa, buna karşılık gelen ayrışma sıcaklığını (T) belirler.
- Her bir kuarkonyum durumu, bağlanma yarıçapına bağlı olarak farklı bir sıcaklıkta ayrışır.
 - Bu durum, KGP için bir “termometre” işlevi görebilir.
- Kuarkonyum bağlarının ne zaman eriyip ayrıştığını anlamak için, ayrışma sıcaklığı (T) genellikle kritik sıcaklığa (T_c) oranıyla (T/T_c) verilir.

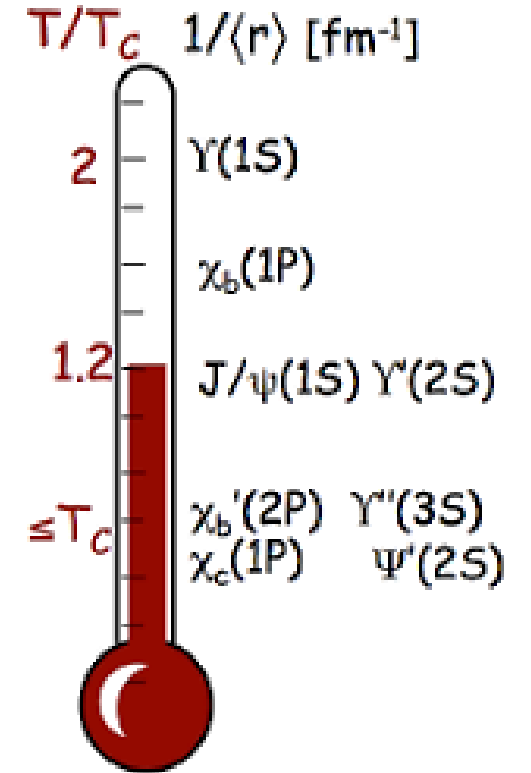


| Bound State | J/ψ | χ _c | Ψ' | Y(1S) | Y(2S) | Y(3S) |
|--------------------|------|----------------|-----|-------|-------|-------|
| T / T _c | 1.10 | 0.74 | 0.2 | 2.31 | 1.10 | 0.75 |

hep-ph/0106017

Motivasyon: KGP Termometresi

- Eğer perdeleme yarıçapının (r_{Debye}) sıcaklığa bağlılığı biliniyorsa, buna karşılık gelen ayrışma sıcaklığını (T) belirler.
- Her bir kuarkonyum durumu, bağlanma yarıçapına bağlı olarak farklı bir sıcaklıkta ayrışır.
 - Bu durum, KGP için bir “termometre” işlevi görebilir.
- Kuarkonyum bağlarının ne zaman eriyip ayrıştığını anlamak için, ayrışma sıcaklığı (T) genellikle kritik sıcaklığa (T_c) oranıyla (T/T_c) verilir.



| | | | | | | |
|-------------|------|----------|---------|-------|-------|-------|
| Bound State | J/ψ | χ_c | Ψ' | Y(1S) | Y(2S) | Y(3S) |
| T/T_c | 1.10 | 0.74 | 0.2 | 2.31 | 1.10 | 0.75 |

hep-ph/0106017

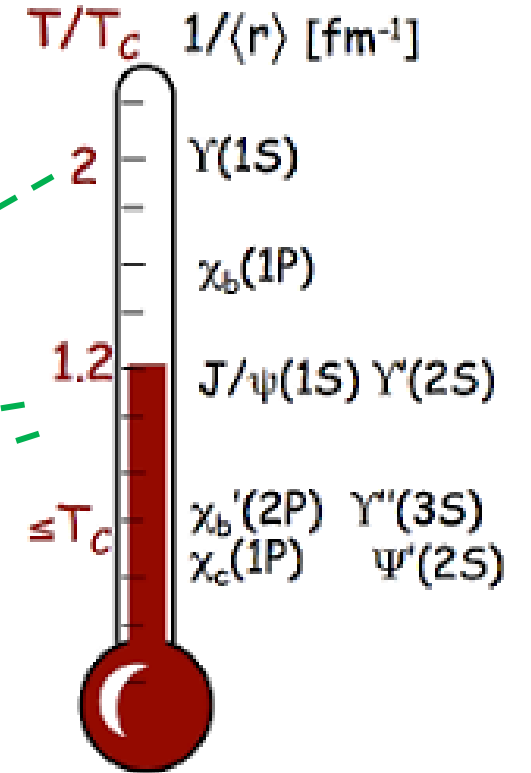
Motivasyon: KGP Termometresi

- Eğer perdeleme yarıçapının (r_{Debye}) sıcaklığa bağlılığı biliniyorsa, buna karşılık gelen ayrışma sıcaklığını (T) belirler.

- Her bir kuarkonyum durumu, bağlanma yarıçapına bağlı olarak farklı bir sıcaklıkta ayrışır.

→ Bu durum, KGP için bir “termometre” işlevi görebilir.

- Kuarkonyum bağlarının ne zaman eriyip ayrıştığını anlamak için, ayrışma sıcaklığı (T) genellikle kritik sıcaklığa (T_c) oranıyla (T/T_c) verilir.



| | | | | | | |
|--------------------|------|----------------|-----|-------|-------|-------|
| Bound State | J/ψ | χ _c | ψ' | Y(1S) | Y(2S) | Y(3S) |
| T / T _c | 1.10 | 0.74 | 0.2 | 2.31 | 1.10 | 0.75 |

hep-ph/0106017

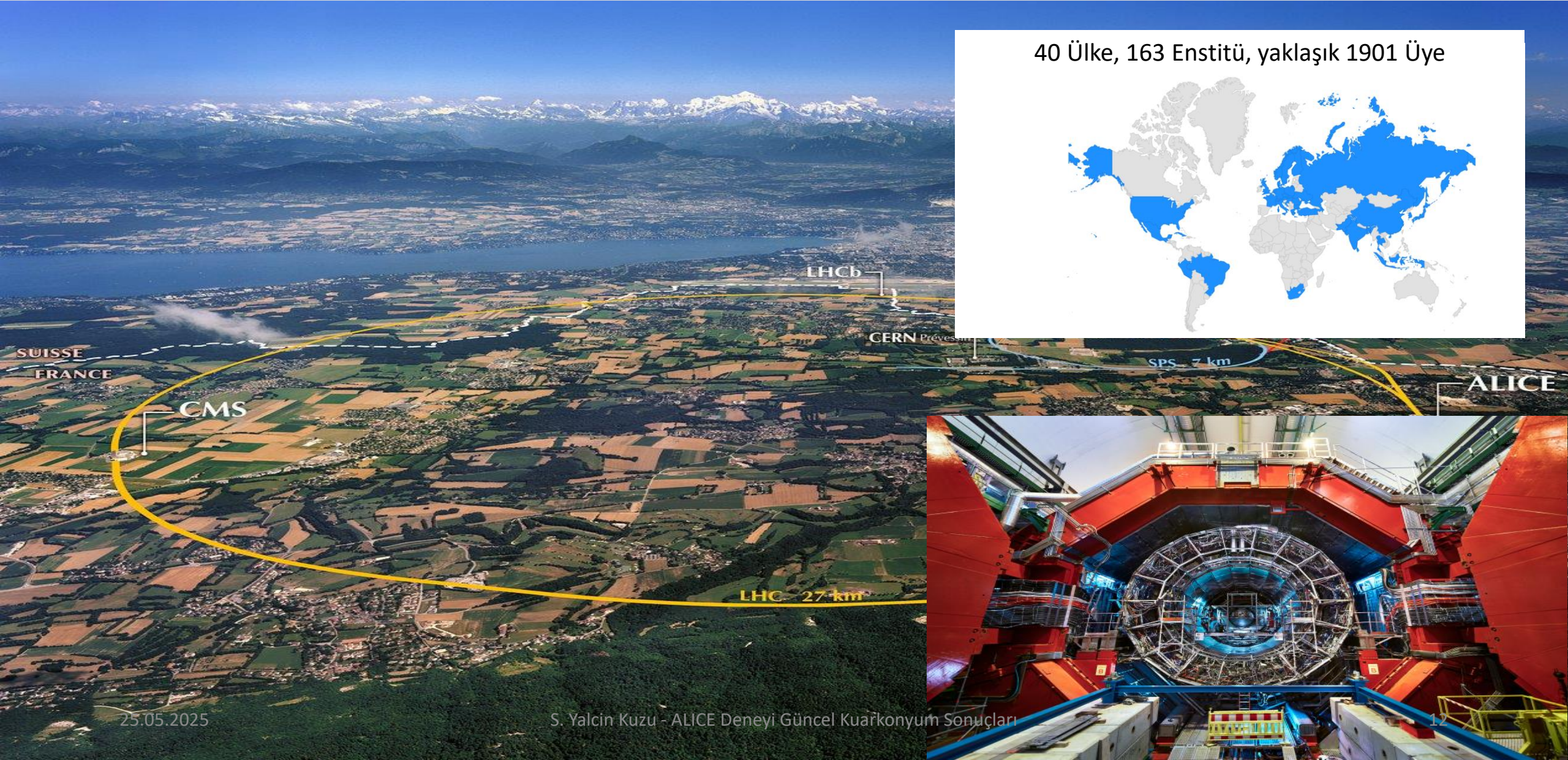
Büyük İyon Çarpıştırıcısı Deneyi: ALICE



25.05.2025

S. Yalcin Kuzu - ALICE Deneyi Güncel Kuarıkonyum Sonuçları

Büyük İyon Çarpıştırıcısı Deneyi: ALICE



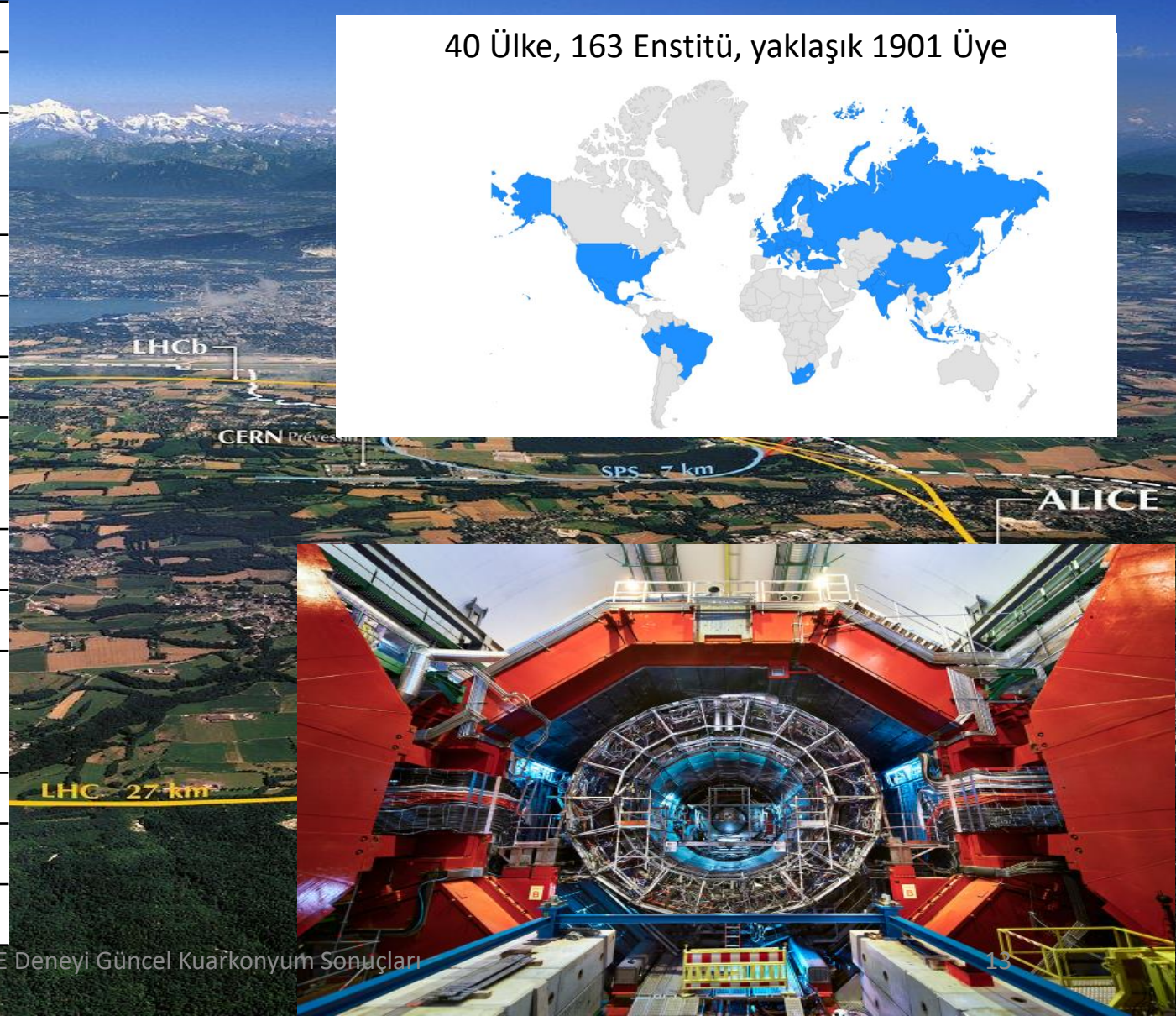
40 Ülke, 163 Enstitü, yaklaşık 1901 Üye



Büyük İyon Çarpıştırıcısı Deneyi: ALICE

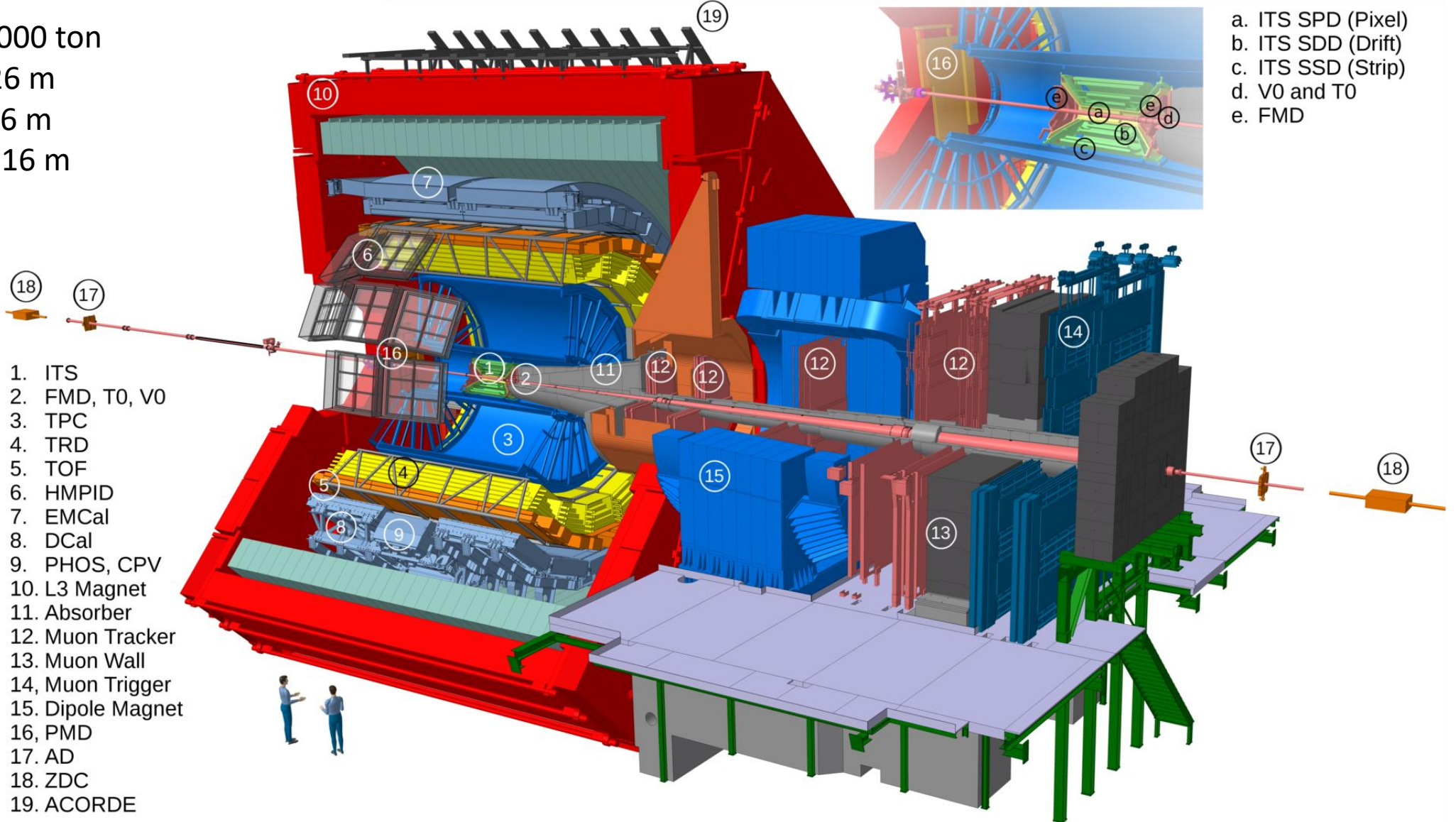
| Yıl | Çarpışma Sistemi | Enerji |
|------|------------------|--------------------|
| 2009 | pp | 0.9 TeV, 2.36 TeV |
| 2010 | pp $Pb-Pb$ | 7 TeV 2.76 TeV |
| 2011 | $Pb-Pb$ | 2.76 TeV |
| 2012 | pp | 8 TeV |
| 2013 | $p-Pb$ | 5.02 TeV |
| 2015 | pp $Pb-Pb$ | 13 TeV 5.02 TeV |
| 2016 | $p-Pb$ | 5.02 TeV |
| 2017 | $Xe-Xe$ | 5.44 TeV |
| 2018 | pp $Pb-Pb$ | 13 TeV 5.02 TeV |
| 2022 | pp | 13.6 TeV |
| 2023 | $Pb-Pb$ | 5.36 TeV |
| 2025 | $Pb-Pb$ | 5.36 TeV |

40 Ülke, 163 Enstitü, yaklaşık 1901 Üye



Büyük İyon Çarpıştırıcısı Deneyi: ALICE

Ağırlık: 10000 ton
Uzunluk: 26 m
Genişlik: 16 m
Yükseklik: 16 m



Büyük İyon Çarpıştırıcısı Deneyi: ALICE

Central Barrel $|\eta| < 0.9$

Solenoidal magnet

Upgraded Time Projection Chamber

- tracking
- PID via dE/dx

Upgraded Inner Tracking System (Pixel Detectors)

- vertexing, tracking, multiplicity

Time Of Flight MRPCs

- PID

Fast Interaction Trigger system

- triggering
- centrality/multiplicity
- luminosity

(only detectors involved in quarkonium analyses are discussed here)

Transition Radiation Detector

- triggering
- electron ID

ElectroMagnetic Calorimeter

- electron ID

Zero Degree Calorimeters

- centrality
- luminosity in Pb-Pb

Muon Forward Tracker (Pixel Detectors)

- fwd vertexing
- fwd multiplicity

Muon spectrometer $-4 < \eta < -2.5$

Dipole magnet

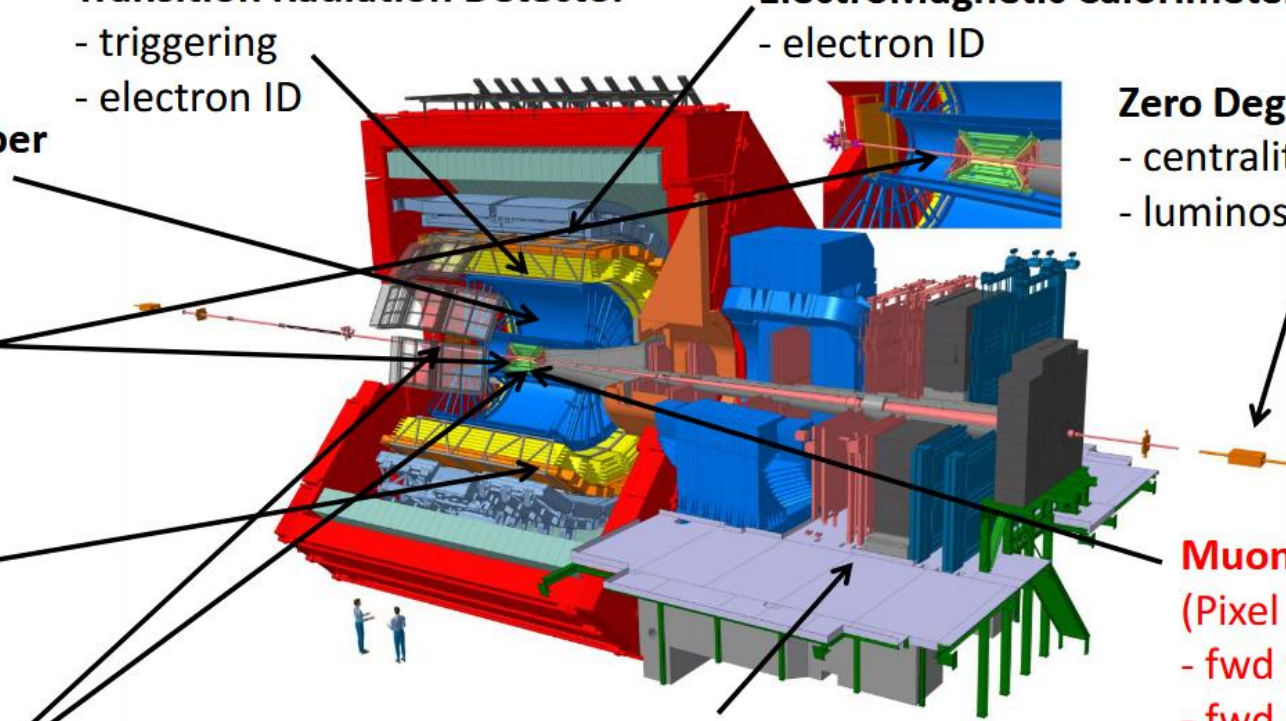
Front absorber $10 \lambda_1$

10 tracking planes (CPCs)

Muon identification system (RPCs)

Muon filter ($7 \lambda_1$)

Continuous readout,
max ~ 50 kHz in Pb-Pb



Kuarkonyum Çalışmalarında Kullanılan Temel Parametreler

Nükleer Modifikasyon Faktörü

$$R_{AA} = \frac{1}{\langle T_{AA} \rangle} \cdot \frac{dN_{AA}/dy}{d\sigma_{pp}/dy}$$

=1 → Nükleer ortam etkisi yok, AA çarpışmaları ölçeklendirilmiş pp gibidir.

<1 → Bastırma (suppression) vardır. Bu genellikle kuark-gluon plazması (QGP) oluşumuna işaret eder.

>1 → Güçlenme (enhancement) olabilir, örneğin yeniden birleşme (regeneration) gibi.

dN_{AA}/dy : Ağır iyon (AA) çarpışmalarında birim rapiditede gözlenen parçacık sayısı.

$d\sigma_{pp}/dy$: Proton proton (pp) çarpışmalarında aynı parçacığın üretim kesiti (referans olarak kullanılır).

$\langle T_{AA} \rangle$: Nükleer örtüşme fonksiyonu, çarpışan çekirdeklerin geometrik örtüşmesini temsil eder. Glauber modeli kullanılarak hesaplanır.

Kuarkonyum Çalışmalarında Kullanılan Temel Parametreler

Üretim Kesiti Oranı

Aynı çarpışma sisteminde, iki farklı kuarkonyum durumunun görelî üretim miktarını gösterir.

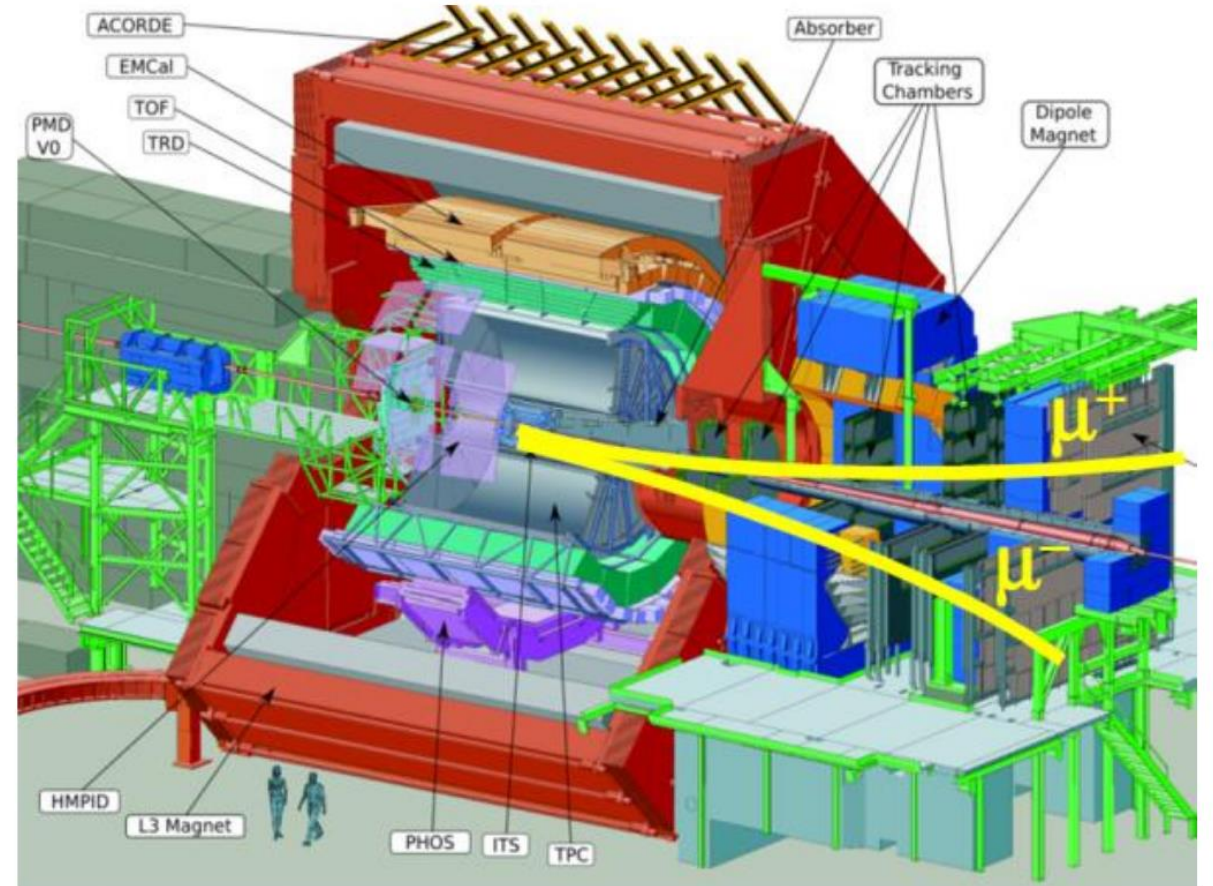
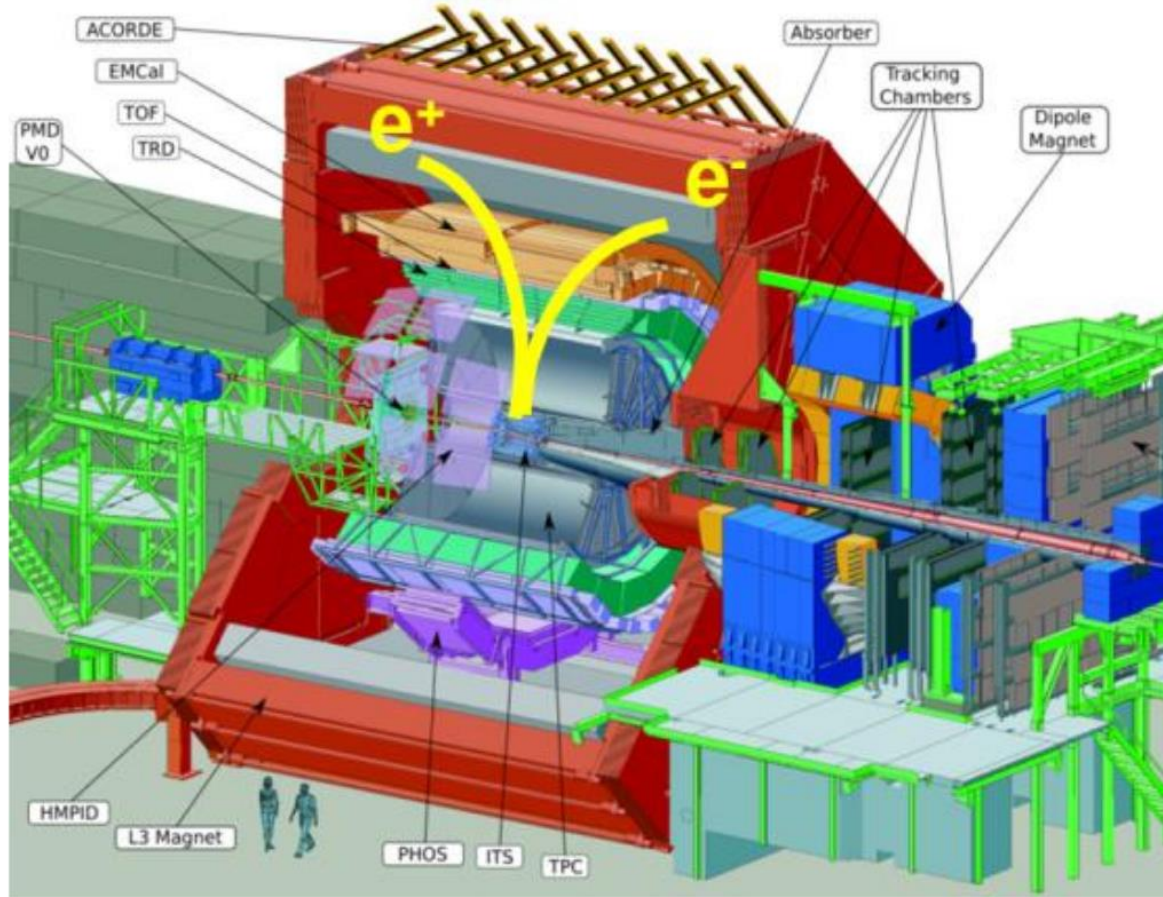
Örneğin $\psi(2S)$ ile J/ψ bastırmasını karşılaştırmak için:

$$\frac{\sigma_{\psi(2S)}}{\sigma_{J/\psi}} \begin{cases} <1 \rightarrow \psi(2S)'nin \text{ çarpışma sisteminde } J/\psi'ye \text{ kıyasla daha fazla baskılandığını gösterir.} \\ >1 \rightarrow \psi(2S)'nin \text{ çarpışma sisteminde } J/\psi'ye \text{ kıyasla daha fazla üretildiğini gösterir.} \end{cases}$$

$\sigma_{\psi(2S)}$: $\psi(2S)$ durumunun üretim kesiti

$\sigma_{J/\psi}$: J/ψ durumunun üretim kesiti

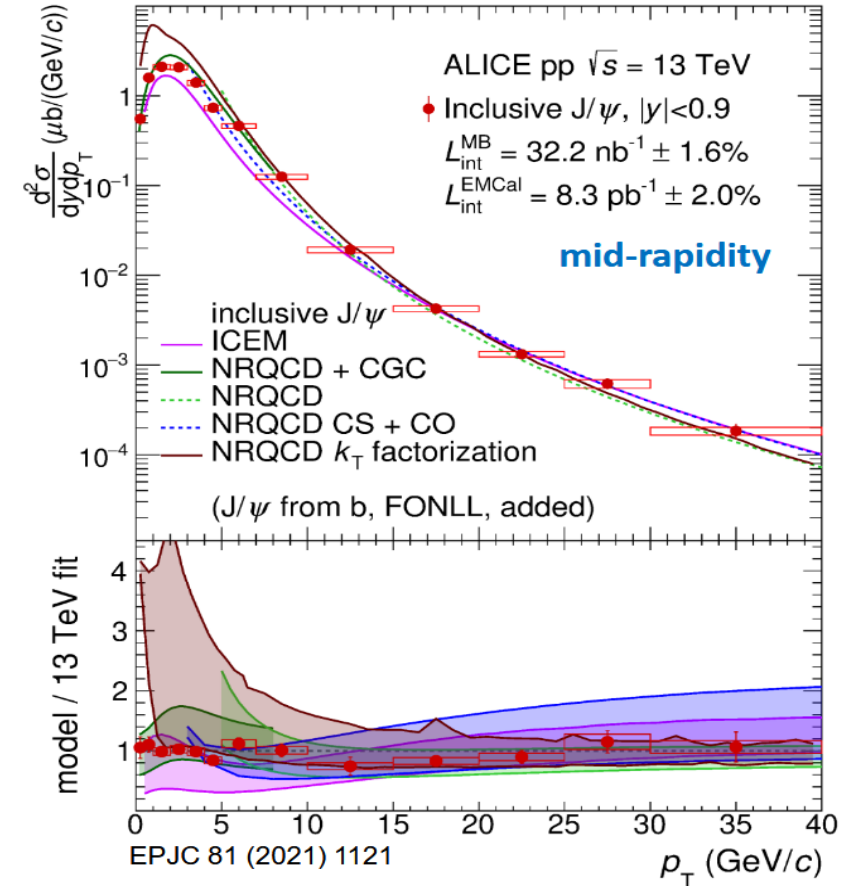
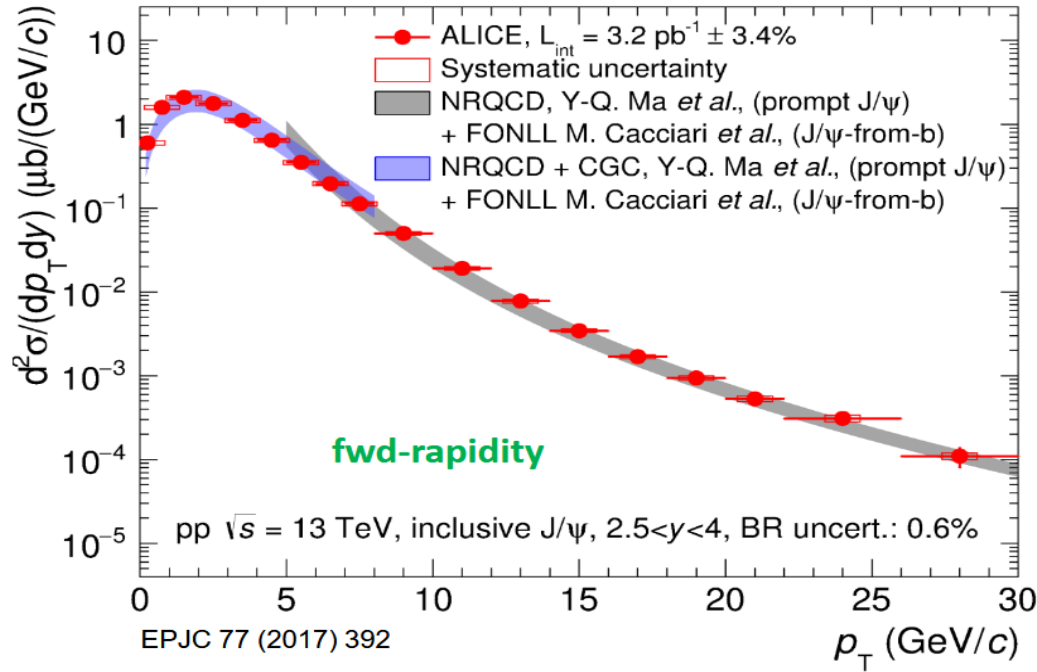
ALICE Güncel Kuarkonyum Ölçümleri



Acceptance **down to $p_T = 0$**

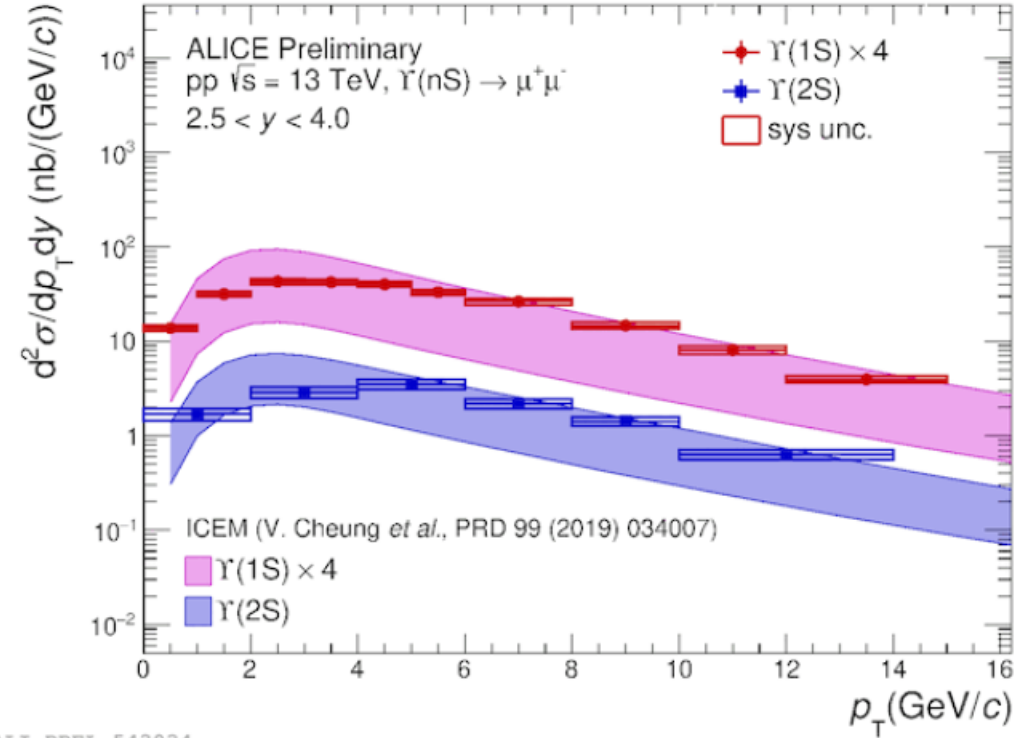
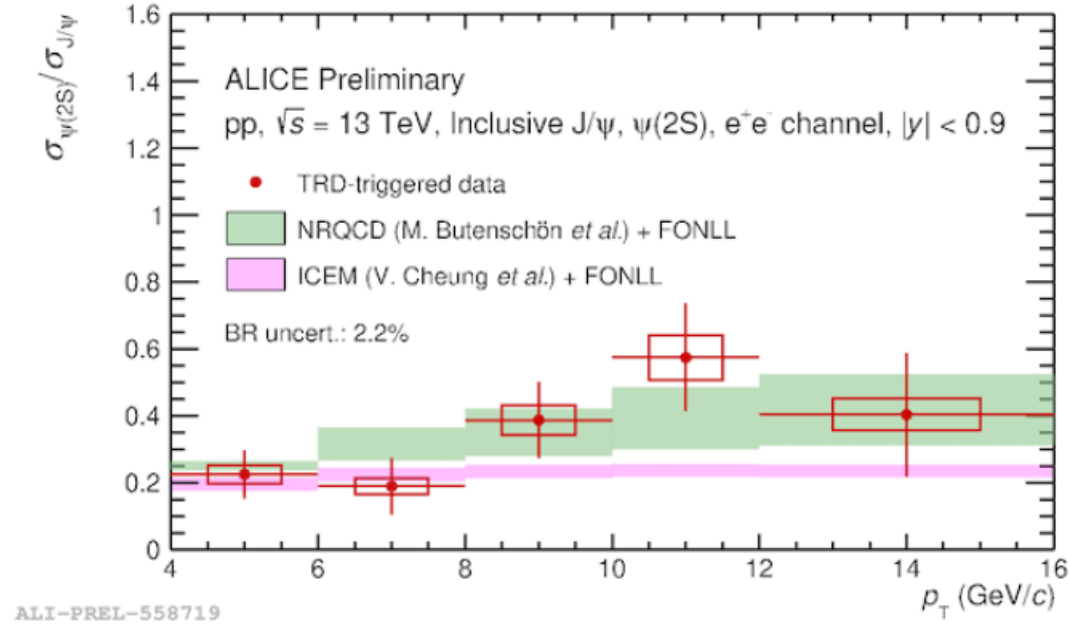
pp arpışmaları Kuarkonyum lümleri

pp Çarpışmaları Kuarkonyum Ölçümleri: J/ψ



- J/ψ üretimi $p_T = 0$ 'a kadar ölçüldü.
- Hem mid-rapidity hem de forward-rapidity verileri, NRQCD ve FONLL ile iyi uyumlu.

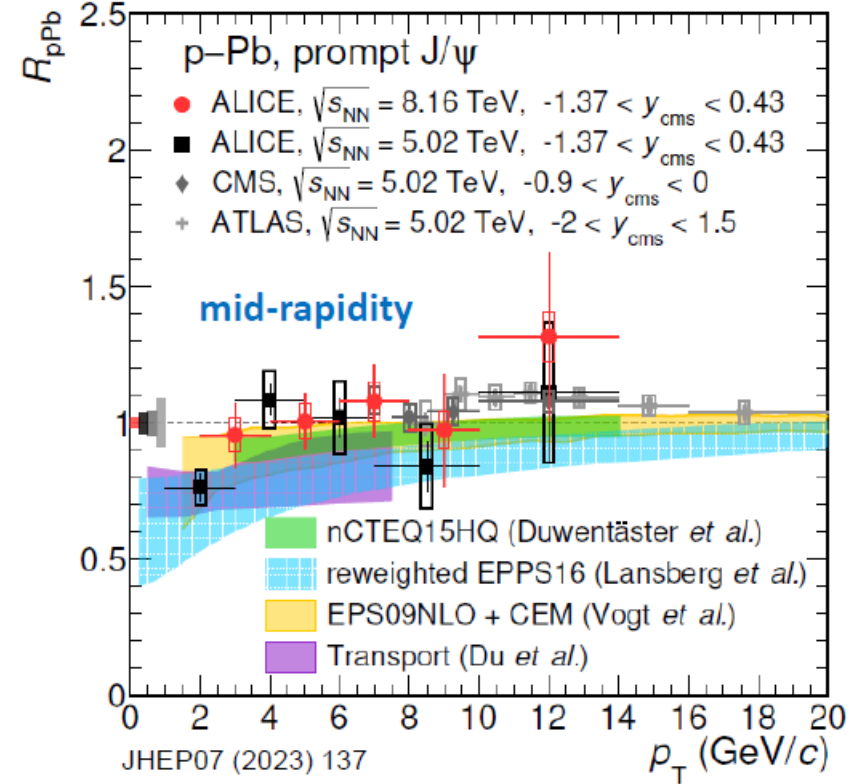
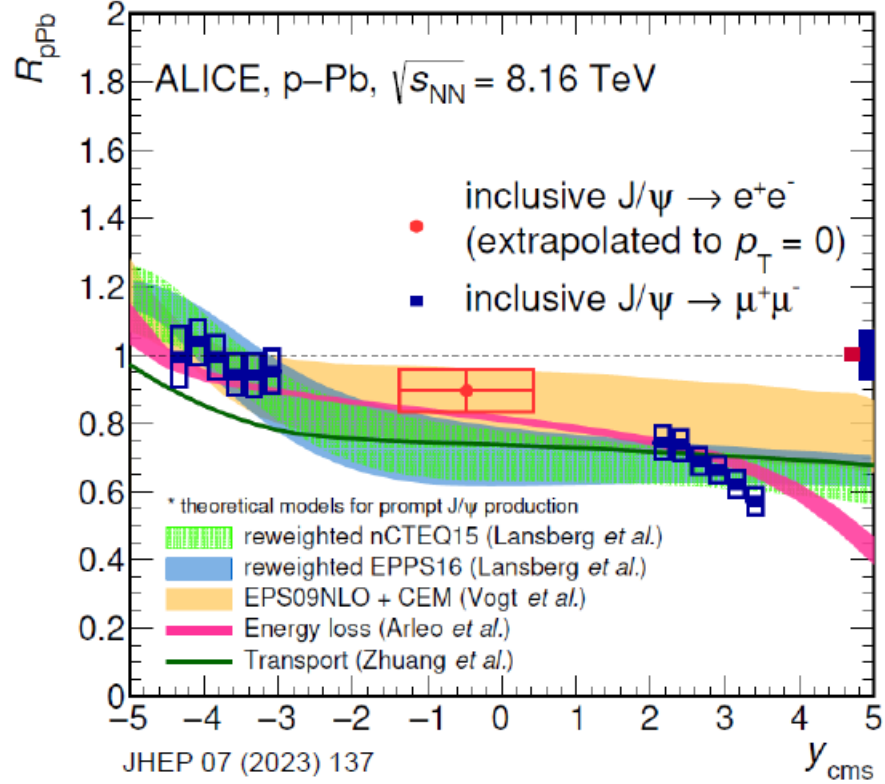
pp Çarpışmaları Kuarkonyum Ölçümleri: J/ψ , $\Upsilon(1S)$, $\Upsilon(2S)$



- $\psi(2S)/J/\psi$ oranı NRQCD ile iyi açıklanabiliyor.
- $\Upsilon(1S)$ ve $\Upsilon(2S)$ üretimleri forward rapidity bölgesinde $p_T = 0$ 'a kadar ölçüldü.
- Modellerle uyum yüksek.

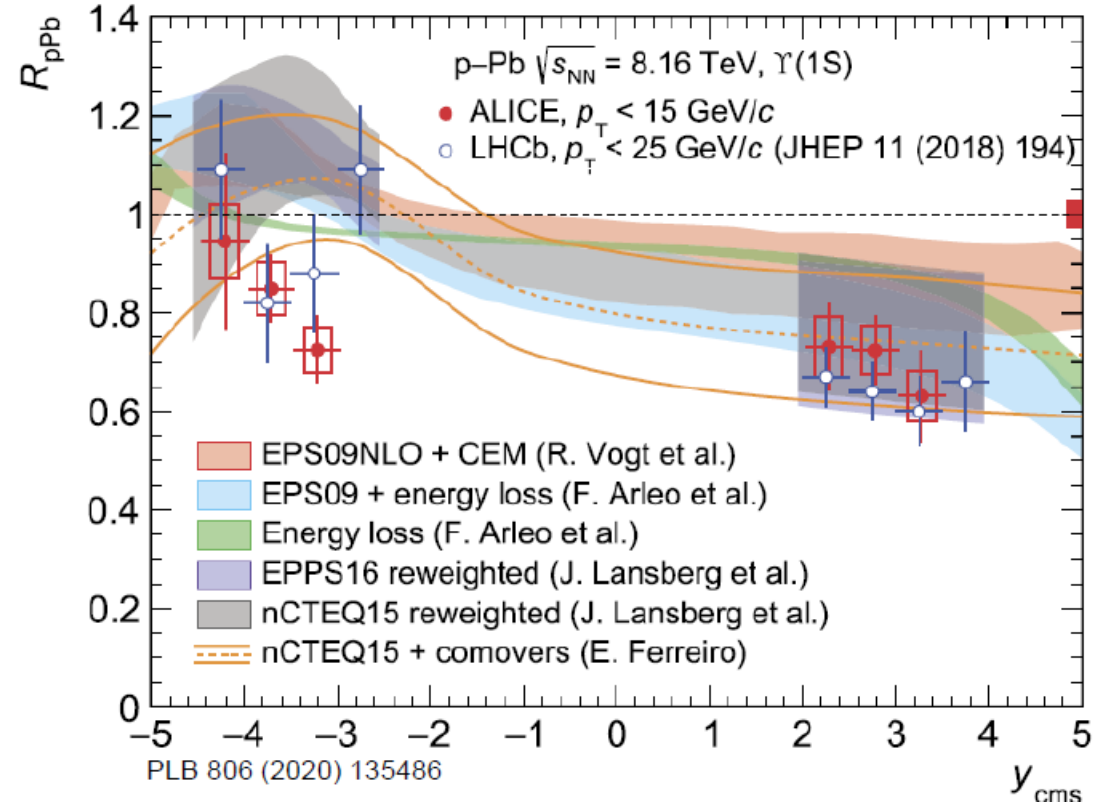
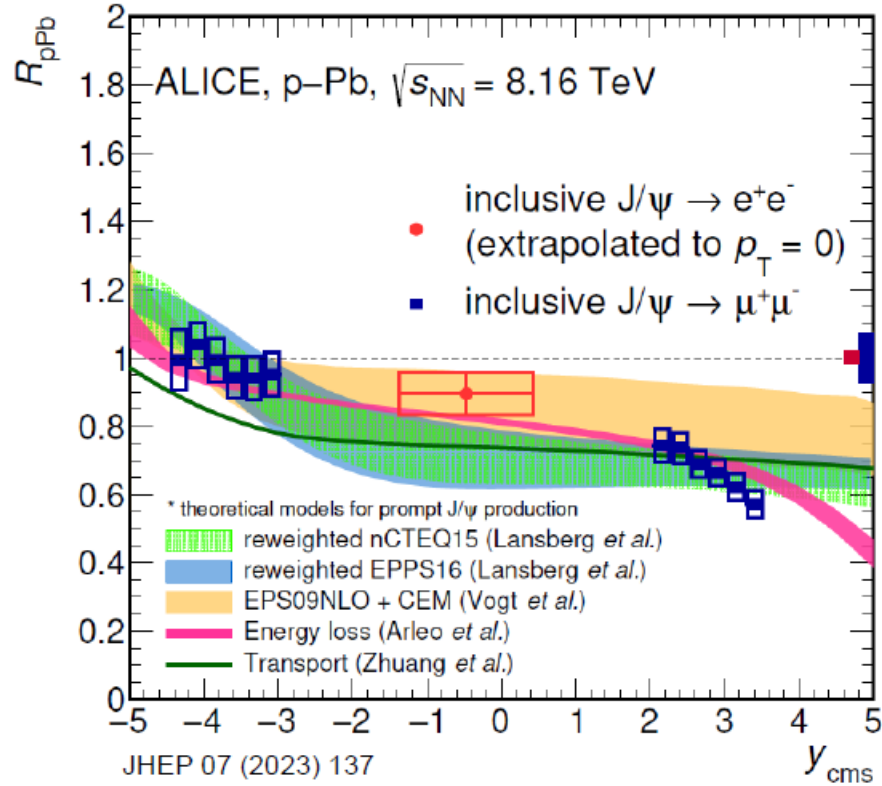
p-Pb arpışmaları Kuarkonyum lümleri

p-Pb Çarpışmaları Kuarkonyum Ölçümleri: J/ψ



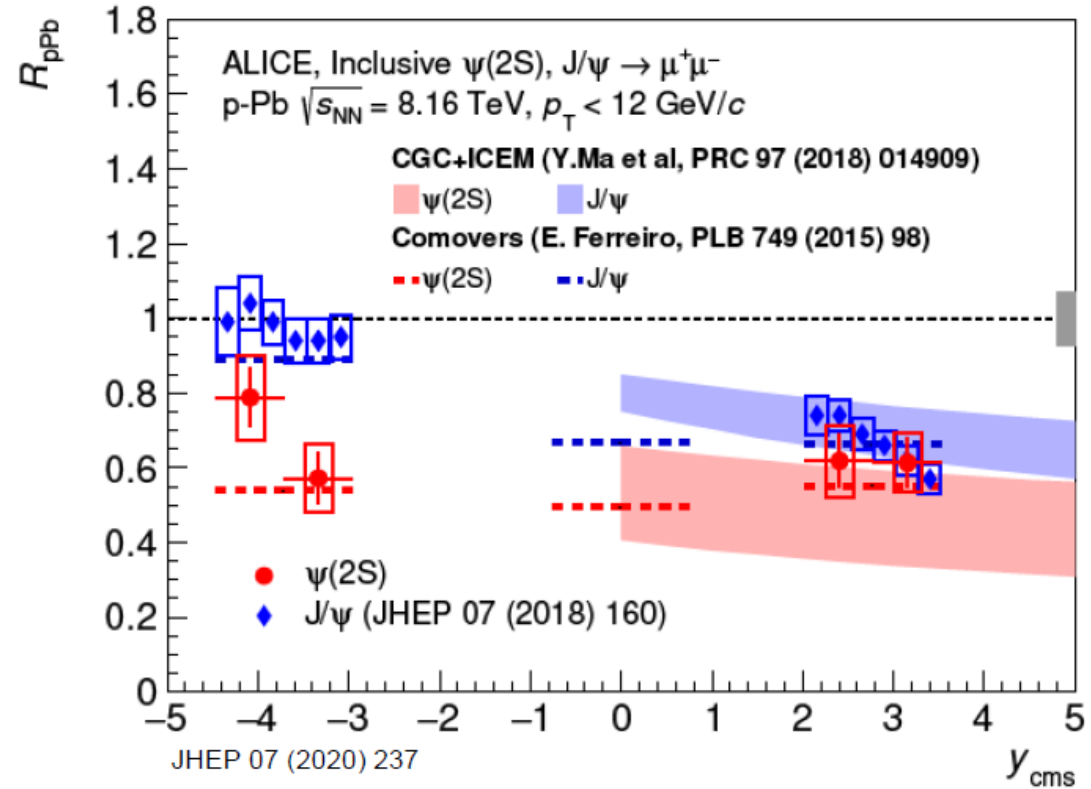
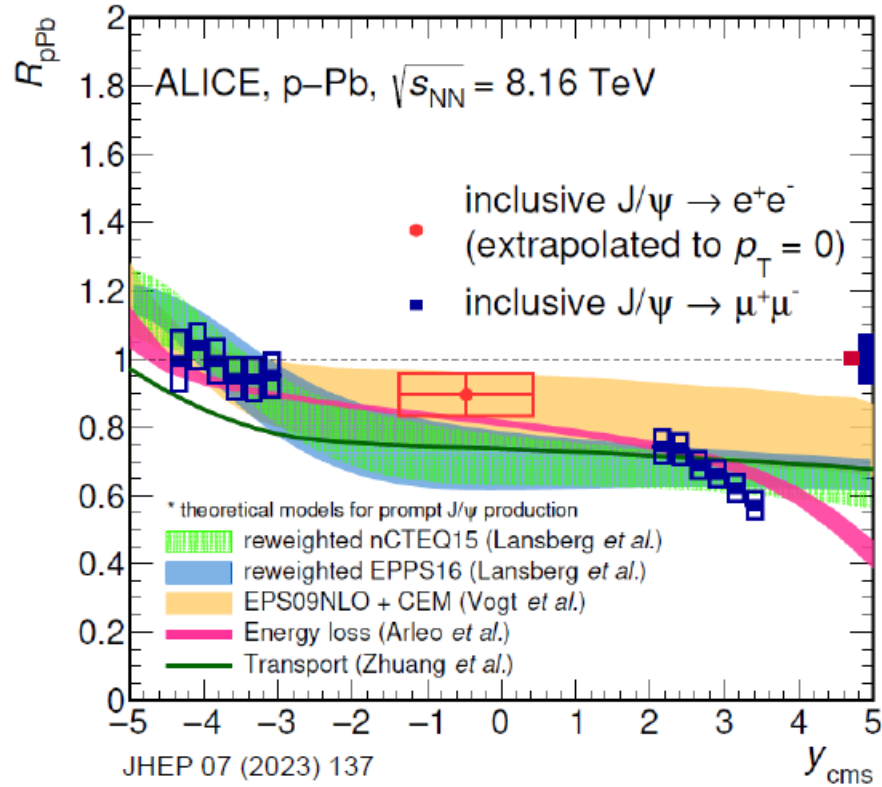
- J/ψ üretiminde hafif bir bastırma gözlemlenmiştir.
- J/ψ üretiminde hadronizasyon sonrası ortam etkileri (final-state interactions) çok azdır veya ihmal edilebilir düzeydedir.

p-Pb Çarpışmaları Kuarkonyum Ölçümleri: J/ψ , $\Upsilon(1S)$



- J/ψ üretiminde hafif bir bastırma gözlemlenmiştir.
- J/ψ üretiminde hadronizasyon sonrası ortam etkileri (final-state interactions) çok azdır veya ihmal edilebilir düzeydedir.
- Benzer sonuçlar $\Upsilon(1S)$ içinde geçerlidir.

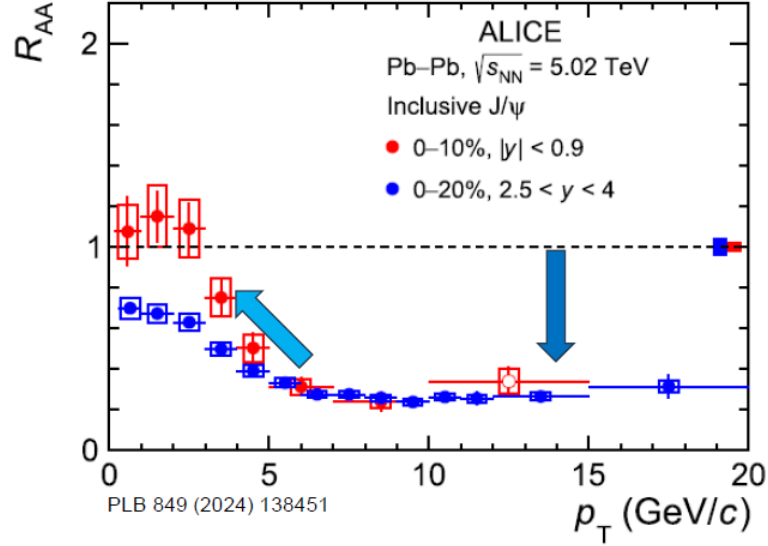
p-Pb Çarpışmaları Kuarkonyum Ölçümleri: J/ψ , $\psi(2S)$



- J/ψ üretiminde hafif bir bastırma gözlemlenmiştir.
- J/ψ üretiminde hadronizasyon sonrası ortam etkileri (final-state interactions) çok azdır veya ihmal edilebilir düzeydedir.
- $\psi(2S)$, p-Pb çarpışmalarında daha fazla baskılanmıştır. Hadronizasyon sonrası ortam etkileri ile açıklanabilir.

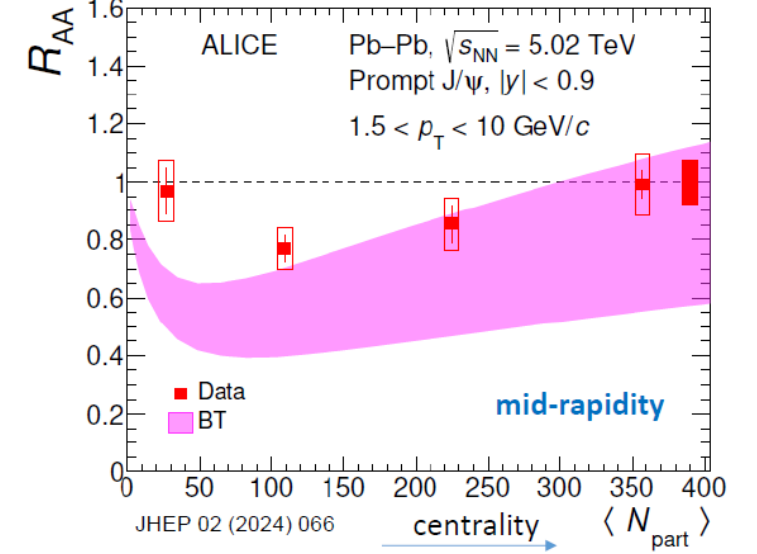
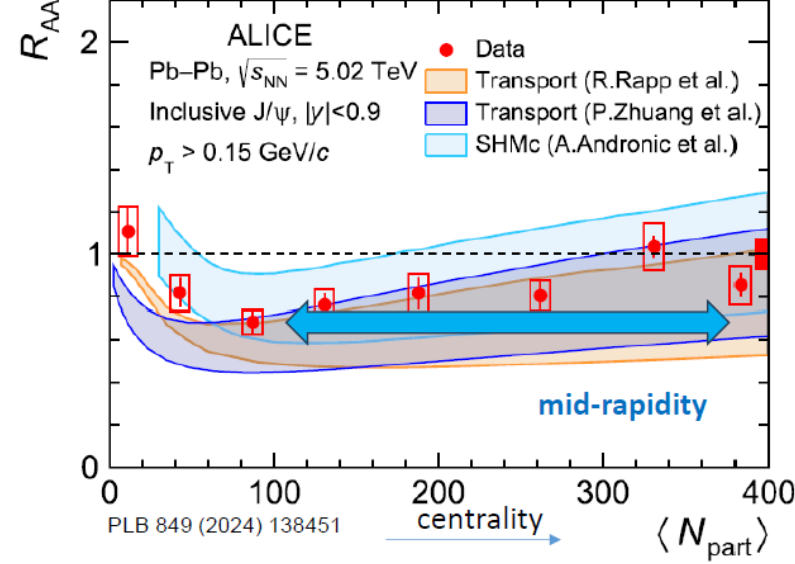
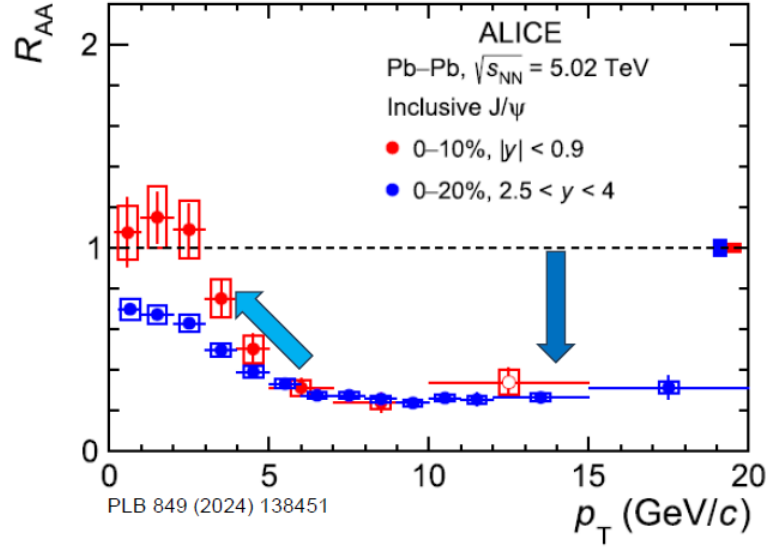
Pb-Pb arpışmaları Kuarkonyum lümleri

Pb-Pb Çarpışmaları Kuarkonyum Ölçümleri: J/ψ , $\Upsilon(1S)$



- Özellikle J/ψ için düşük p_T bölgesinde R_{AA} yükseliyor \rightarrow yeniden üretim (regeneration) etkisi

Pb-Pb Çarpışmaları Kuarkonyum Ölçümleri: J/ψ



- Özellikle J/ψ için düşük p_T bölgesinde R_{AA} yükseliyor \rightarrow yeniden üretim (regeneration) etkisi
- $N_{part} > 100$ için J/ψ bastırması sabit kalıyor \rightarrow Yeniden üretimin etkili olduğu bölge.
- Sonuçlar, taşıma (transport) modelleri ve istatistiksel hadronizasyon modelleri ile uyumlu.

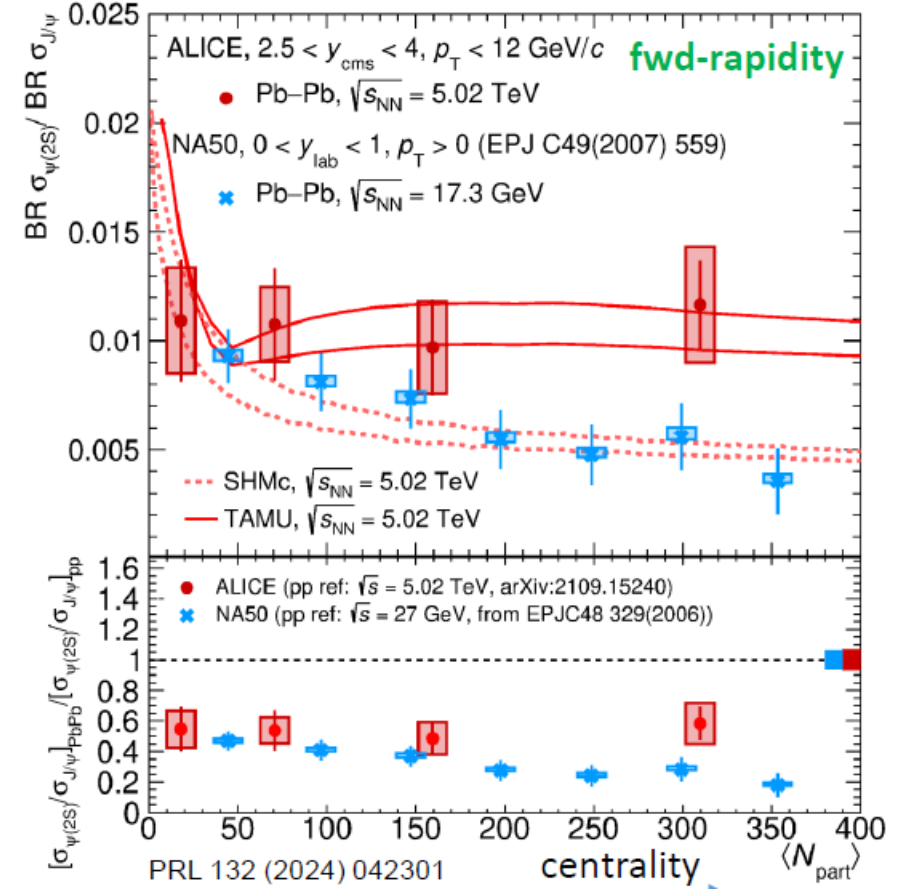
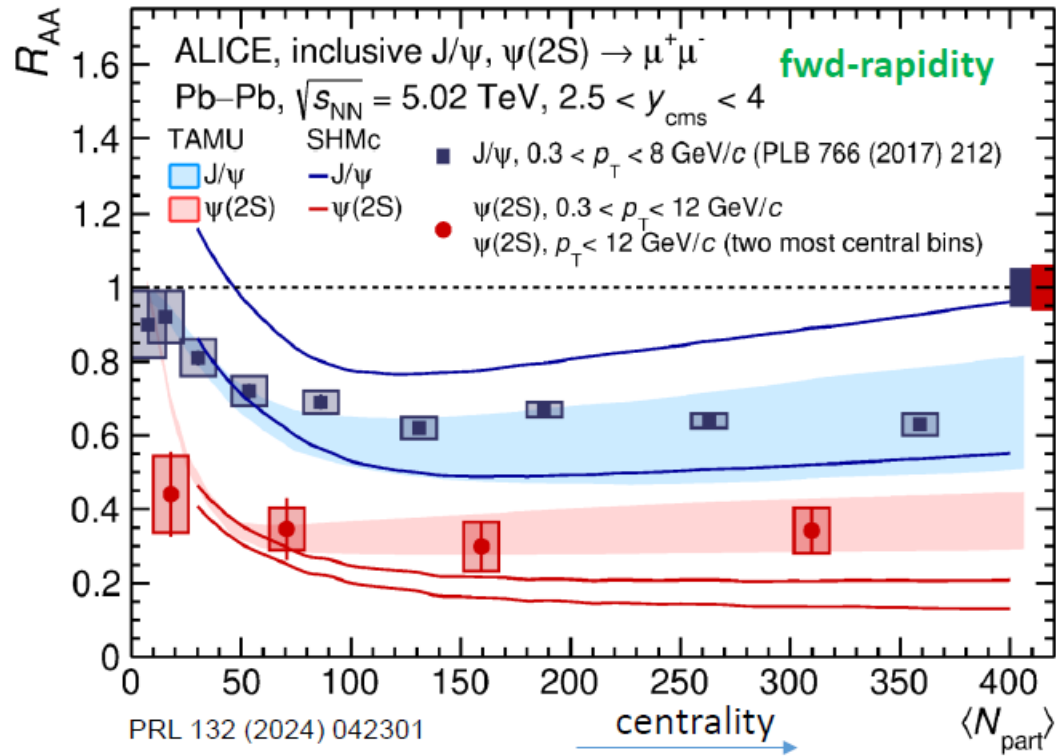
Transport:

PRC 89 (2014) 054911
PLB 664 (2008) 253
CPC 43 (2019) 124101
NPA 943 (2015) 147

Stat. hadr:

PLB 797 (2019) 134836
Nat. 561 (2018) 321

Pb-Pb Çarpışmaları Kuarkonyum Ölçümleri: $\psi(2S)$



- $\psi(2S)$, J/ψ 'ye kıyasla daha fazla bastırılmış \rightarrow sıralı bastırılma (sequential suppression)
- $\psi(2S)/J/\psi$ oranı, farklı yeniden üretim modelleri arasında ayırım yapmada kullanılabilir!

Özet- ALICE Deneyi Güncel Kuarkonyum Sonuçları

- Kuarkonyumlar (J/ψ , $\psi(2S)$, Υ), ağır kuark-antikuark çiftlerinden oluşan bağ durumlarıdır ve QGP ortamının termometresi olarak kullanılır.

pp çarpışmaları:

- J/ψ ve $\psi(2S)$ üretim kesitleri NRQCD ile uyumludur.
- $\psi(2S)/J/\psi$ oranı, p_T bağımlılığı açısından iyi modellenmektedir.

p-Pb çarpışmaları:

- J/ψ için hafif bastırma gözlenmiştir.
- $\psi(2S)$ için daha belirgin bastırma görülmekte \rightarrow final-state etkileri önemli olabilir.

Pb-Pb çarpışmaları:

- J/ψ ve Υ üretimi bastırılmıştır \rightarrow QGP varlığına işaret eder.
- $\psi(2S)$, J/ψ 'ye göre daha fazla bastırılıyor \rightarrow sıralı bastırma (sequential suppression)!

*Bu alışmalar **2025TENMAK(CERN) A5.H3.F2-03** ve **Yıldız Teknik Üniversitesi FBA-2024-6089** projeleri kapsamında desteklenmektedir.*

