



TEMEL BİLİMLER ARAŞTIRMA ENSTİTÜSÜ  
ve  
ANKARA ÜNİ. HIZLANDIRICI TEKNOLOJİLERİ ENSTİTÜSÜ



## Parçacık Fiziği Veri Analizi Kış Okulu 2025 (TBAE PFVA'25)

### İçerik

- Giriş
- ALICE Deneyi
- Ölçüm Sonuçları
- İyileştirmeler
- Özet



# ALICE Deneyi

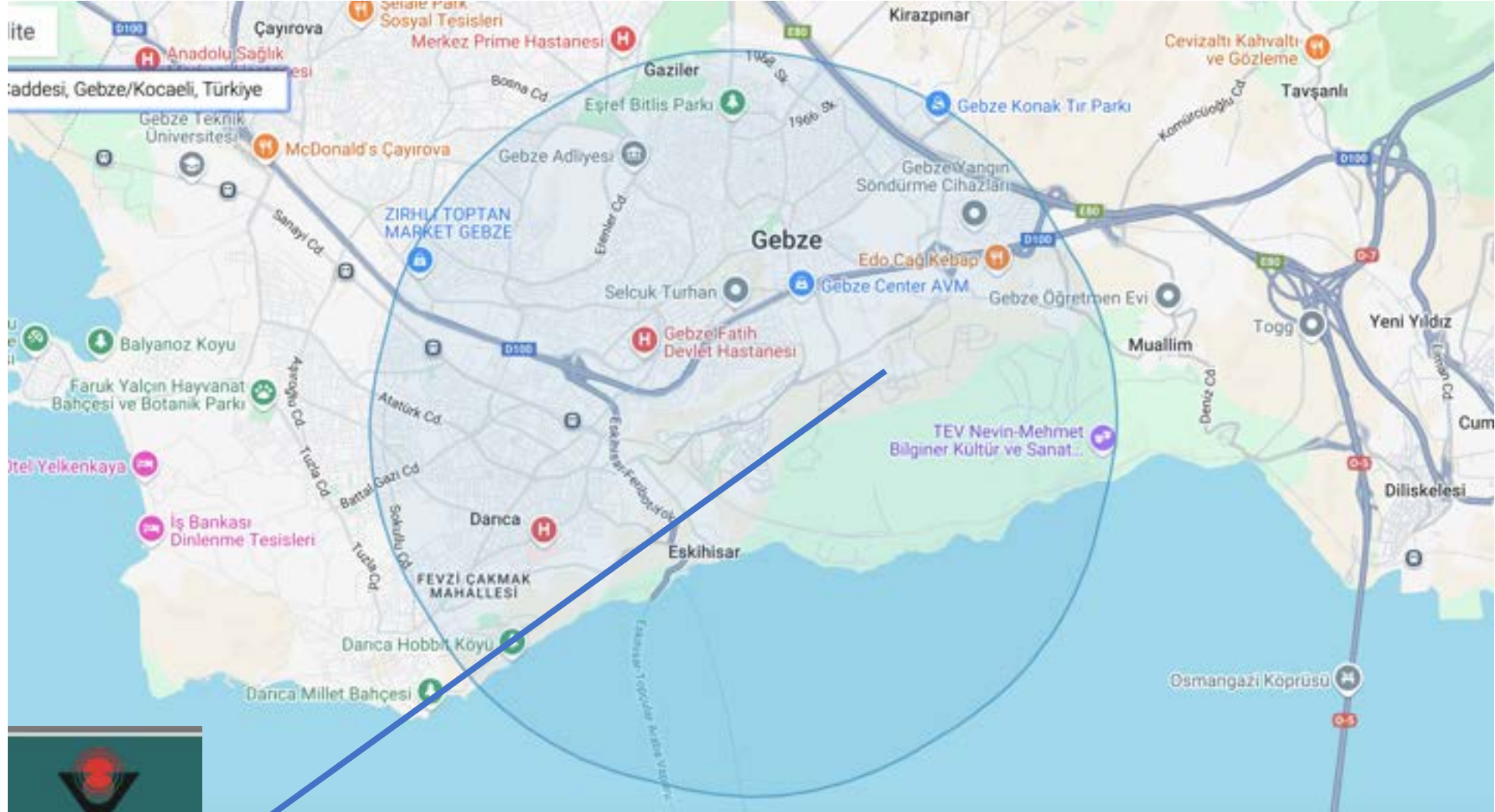
ALICE

Prof. Dr. Ayben Karasu Uysal  
Yıldız Teknik Üniversitesi  
Parçacık Fiziği Veri analizi Kış Okulu  
14 Şubat 2025



ALICE

# LHC Ne Kadar Büyük?





ALICE

# ALICE Kolaborasyonu

39 countries, 163 institutes, 1873 members



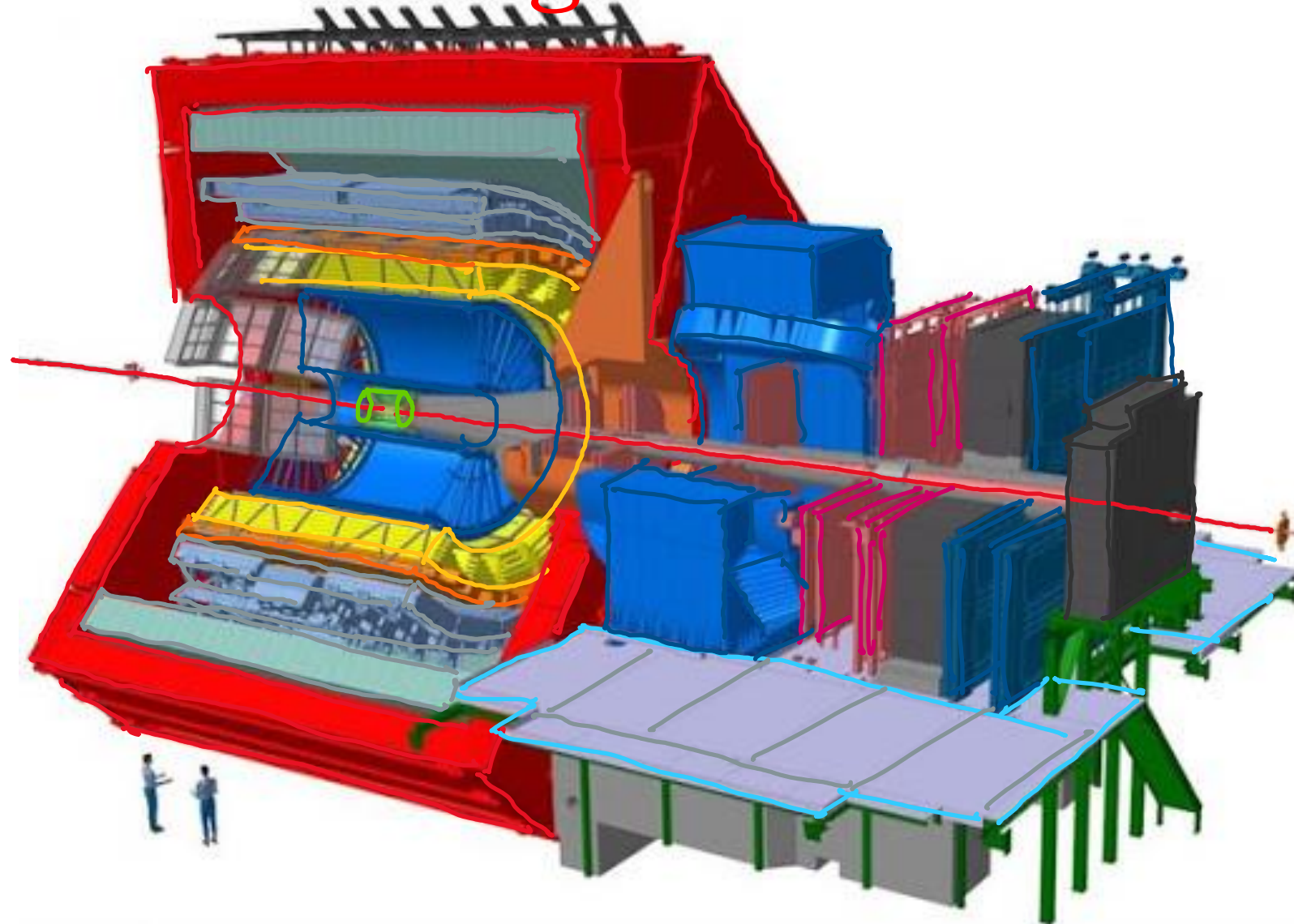
## TURKEY

ISTANBUL

- [Yildiz Technical University](#), [Greybook link](#), AYBEN KARASU UYSAL

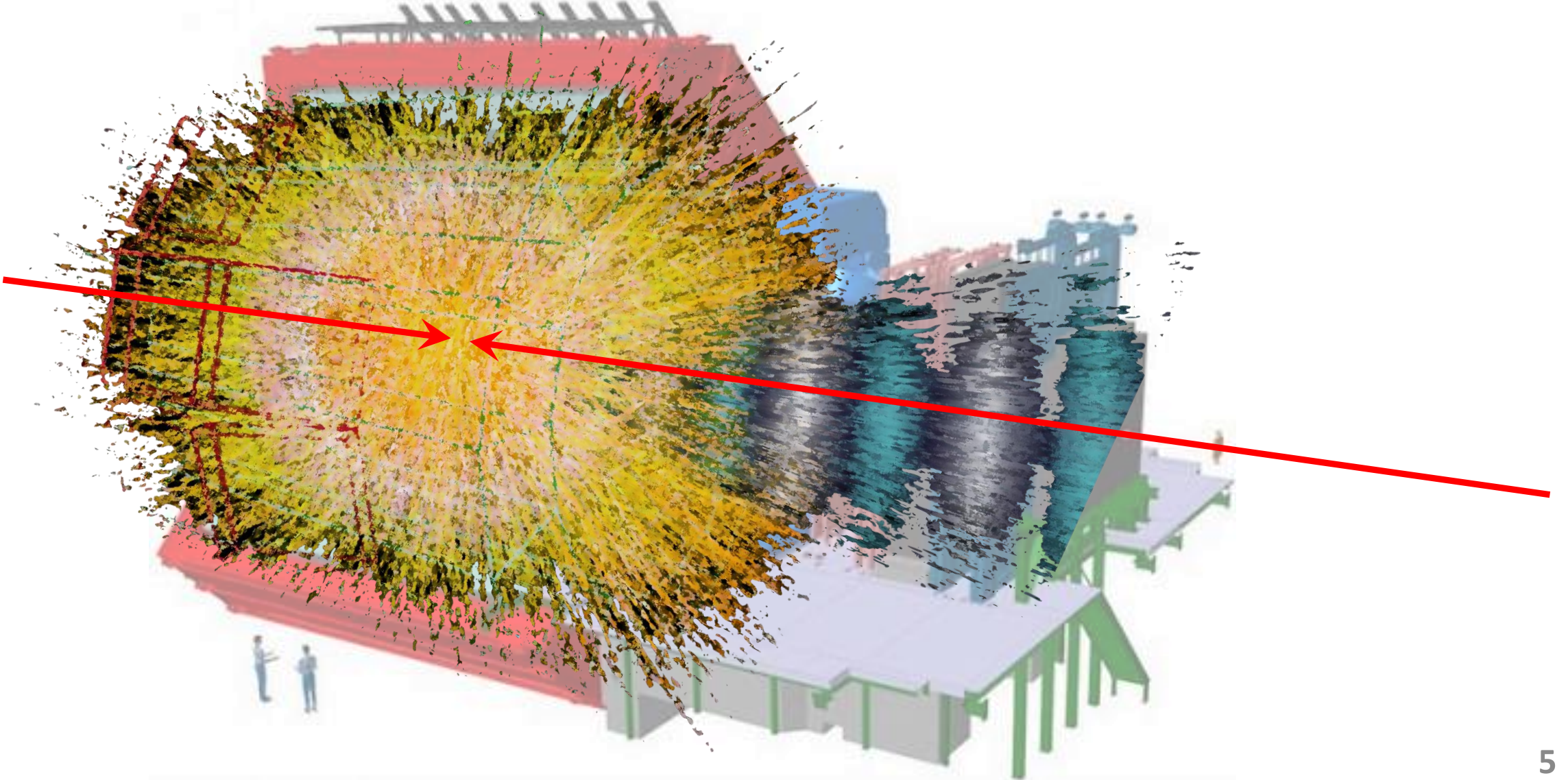
2013 yılından bu yana...

# ALICE: A Large Ion Collider Experiment





**ALICE**, güçlü kuvvetle etkileşen kuark-gluon plazmasının özelliklerini incelemek için özel olarak tasarlanmıştır.





# ALICE Kolaborasyonu

ALICE



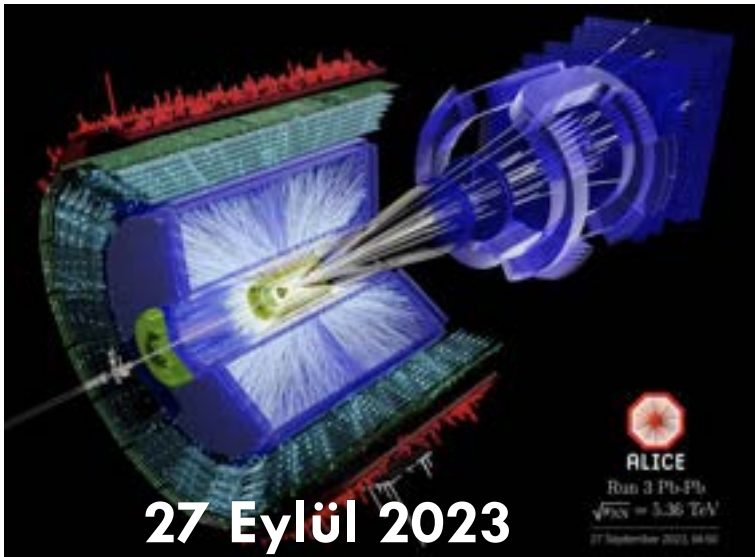
ALICE – 2001

## İnşa Dönemi

- 1990-1996: Tasarım
- 1992-2002: Ar&Ge
- 2000-2010: İnşa
- 2002-2007: Yükleme
- 2008-2010: İşletme/Test

## Veri Toplama

- 2010-2013: 1. Çalışma Dönemi  
2013-2014: 1. Kapanma Dönemi  
2015-2018: 2. Çalışma Dönemi  
2019-2022: 2. Kapanma Dönemi  
2022 → : 3. Çalışma Dönemi



27 Eylül 2023



ALICE

# QGP ve QCD'nin deneysel olarak araştırılması



En yüksek enerjili çarpışmalar:

- 13.6 TeV (pp)
- 8.16 TeV (p-Pb)
- 5.44 TeV (Xe-Xe)
- 5.36 TeV (Pb-Pb)



ALICE

# Ağır İyon Fiziği

## Amaç:

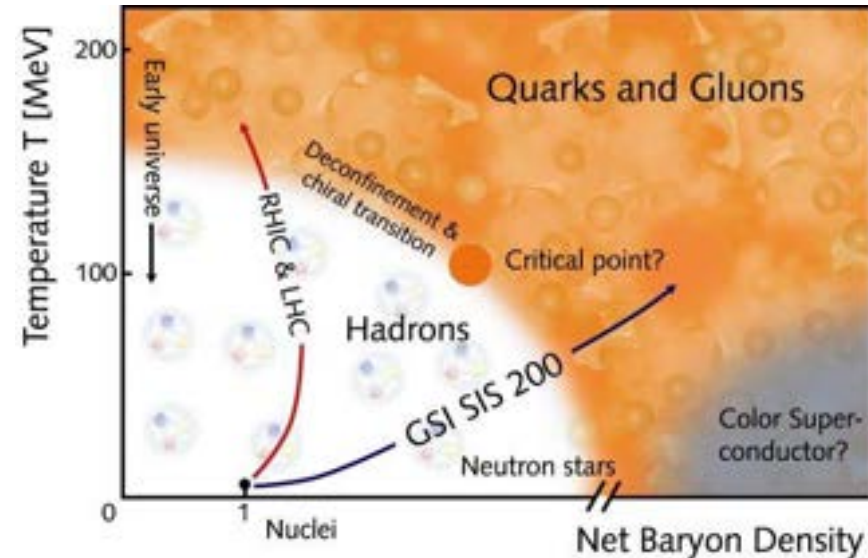
- **Aşırı koşullar** altındaki maddenin durumunu incelemektir.



Yüksek sıcaklık ve enerji yoğunluğu

- Maddenin **faz geçişine** uğraması beklenir.  
Hadronik madde → kuark ve gluonların ayırık fazı (QGP)
- Hadronik maddenin özelliklerinin ve faz diyagramının incelenmesidir.

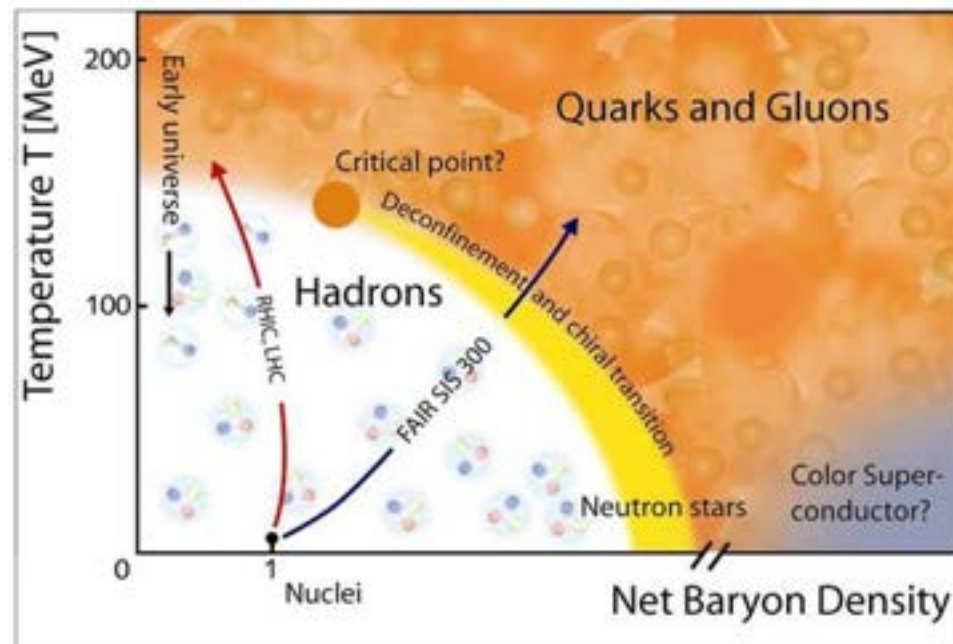
<b>Geçmiş :</b>	GSI	SIS	~2 GeV
	BNL	AGS	~5 GeV
	CERN	SPS	~20 GeV
<b>Bugün :</b>	BNL	RHIC	~200 GeV
	<b>CERN</b>	<b>LHC</b>	<b>~5 TeV</b>
<b>Gelecek :</b>	GSI	FAIR	~45 GeV





ALICE

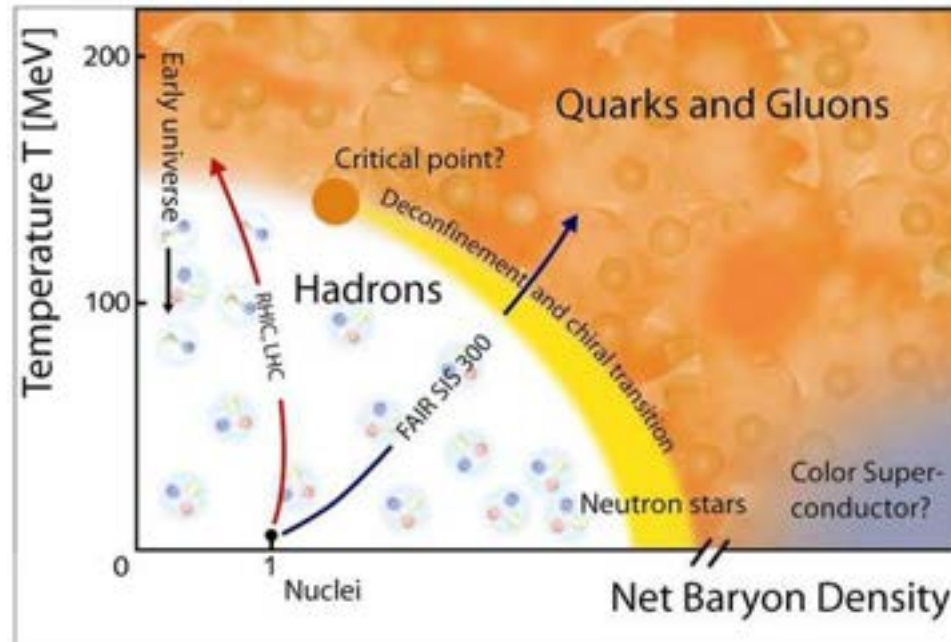
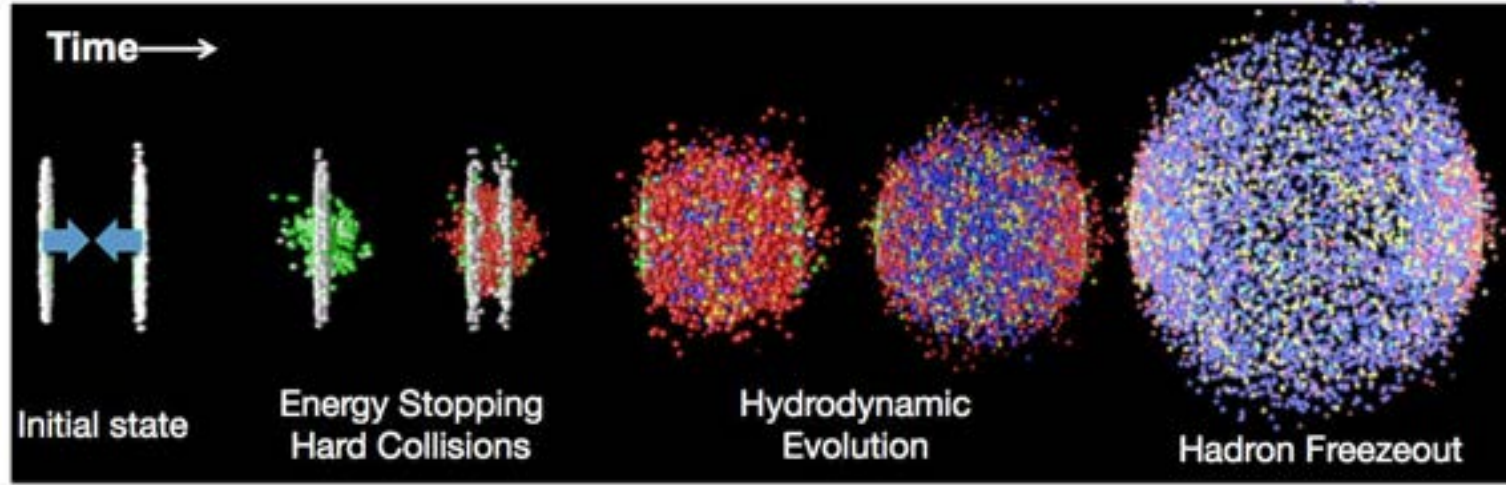
# Ağır İyon Çarpışmalarının Gelişimi





ALICE

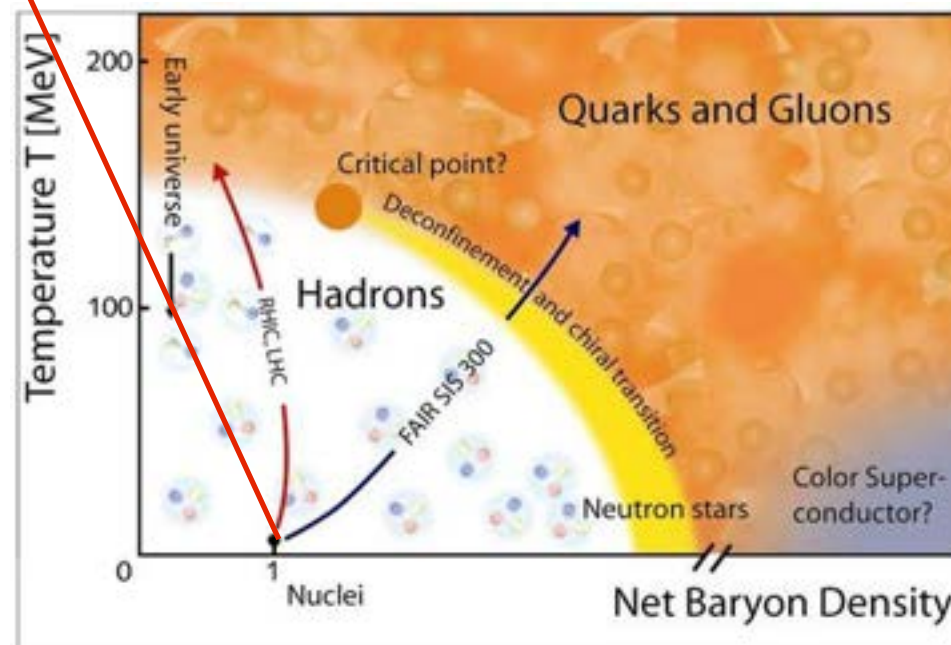
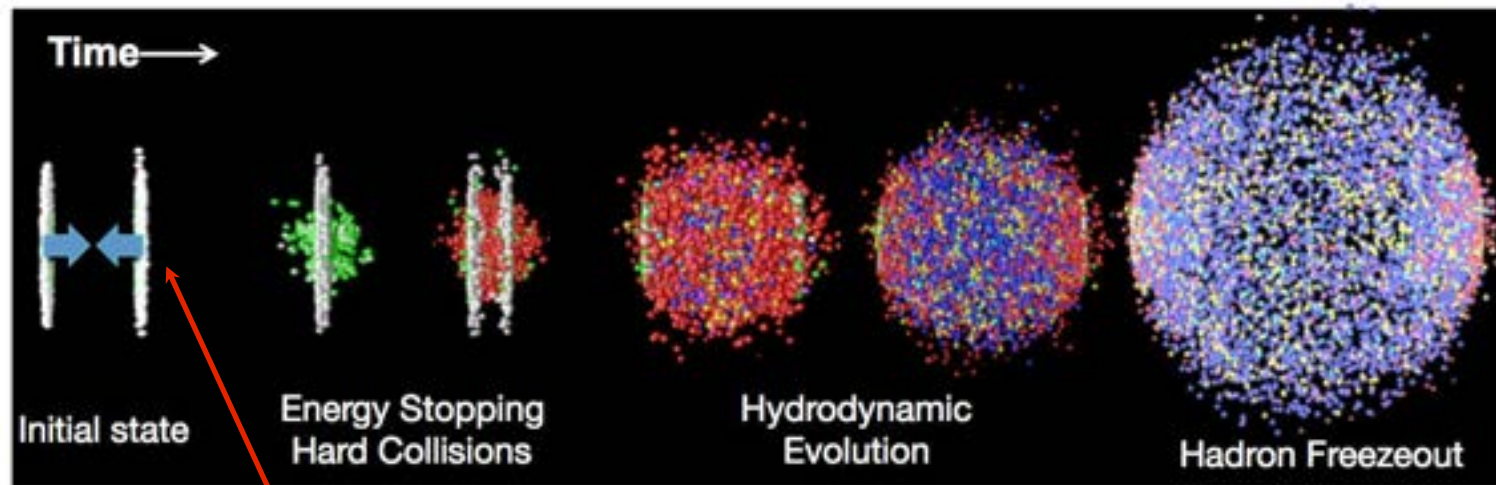
# Ağır İyon Çarpışmalarının Gelişimi





ALICE

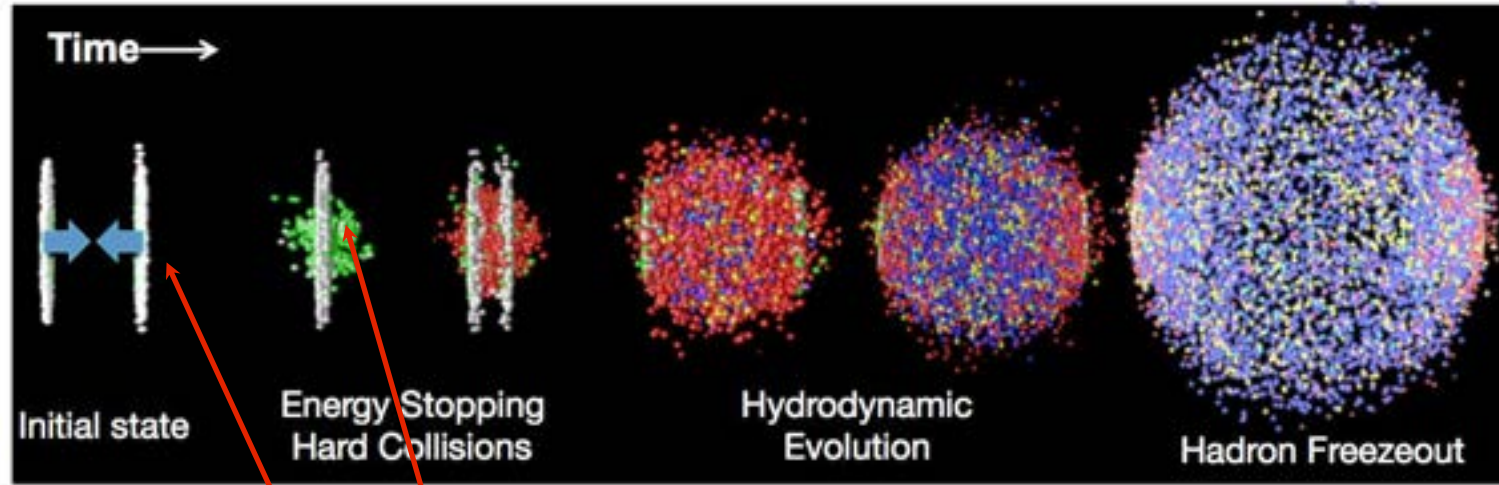
# Ağır İyon Çarpışmalarının Gelişimi



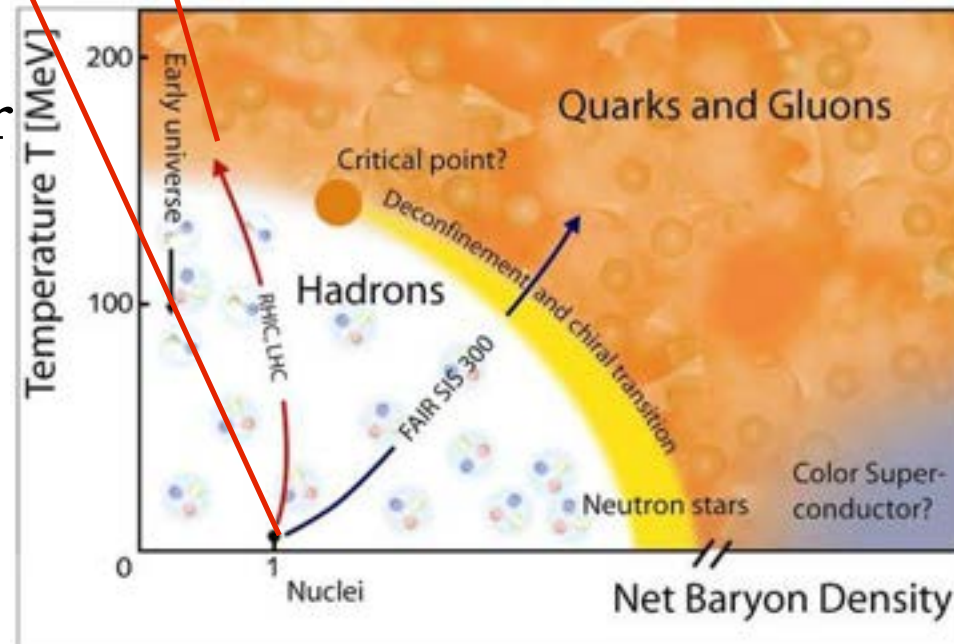


ALICE

# Ağır İyon Çarpışmalarının Gelişimi



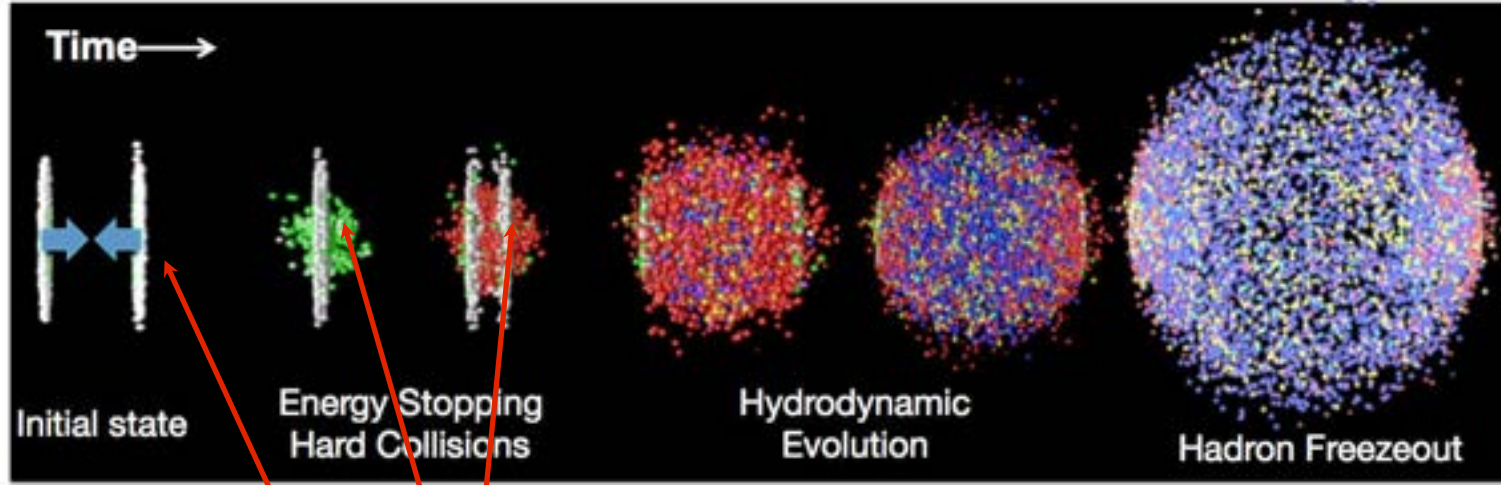
Sert saçılmalar





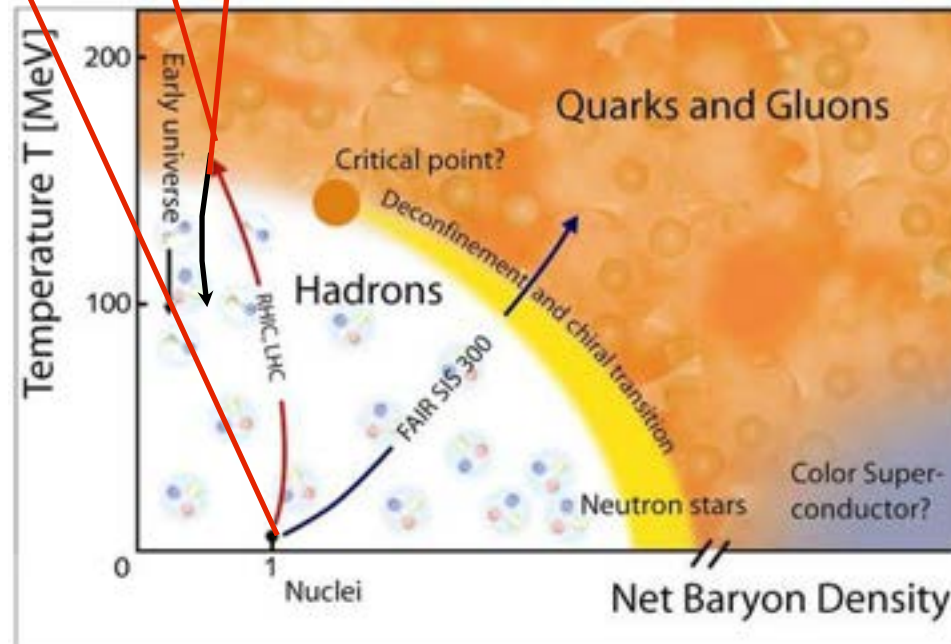
ALICE

# Ağır İyon Çarpışmalarının Gelişimi



Sert saçılmalar

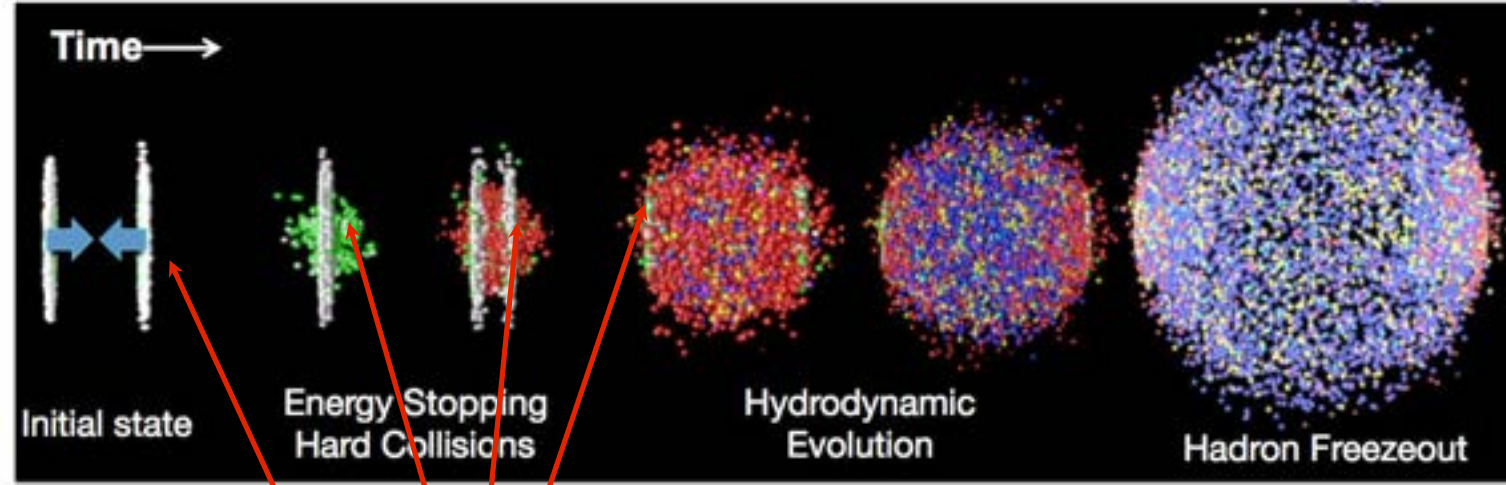
Termalizasyon





ALICE

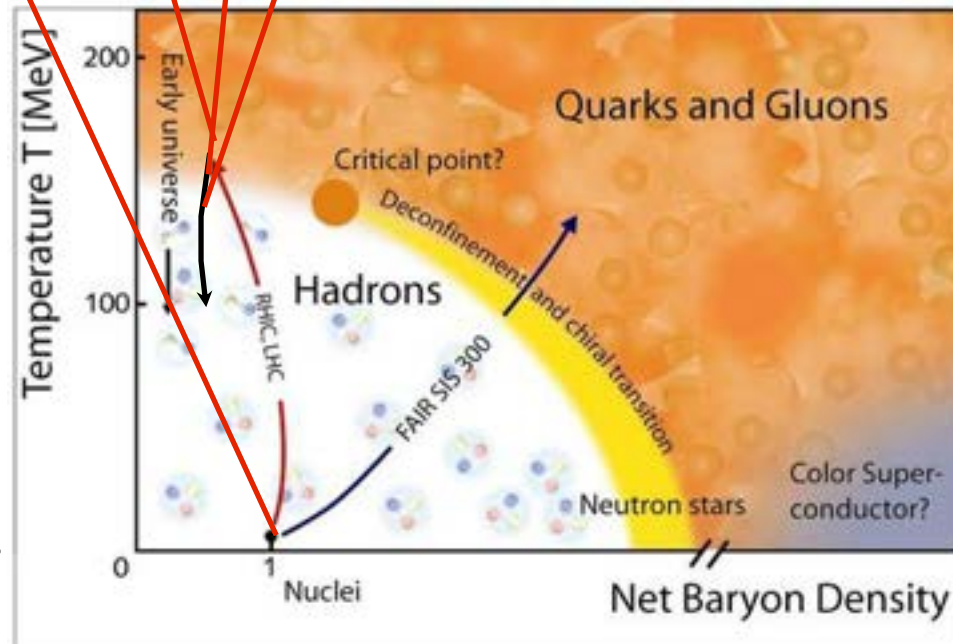
# Ağır İyon Çarpışmalarının Gelişimi



Sert saçılmalar

Termalizasyon

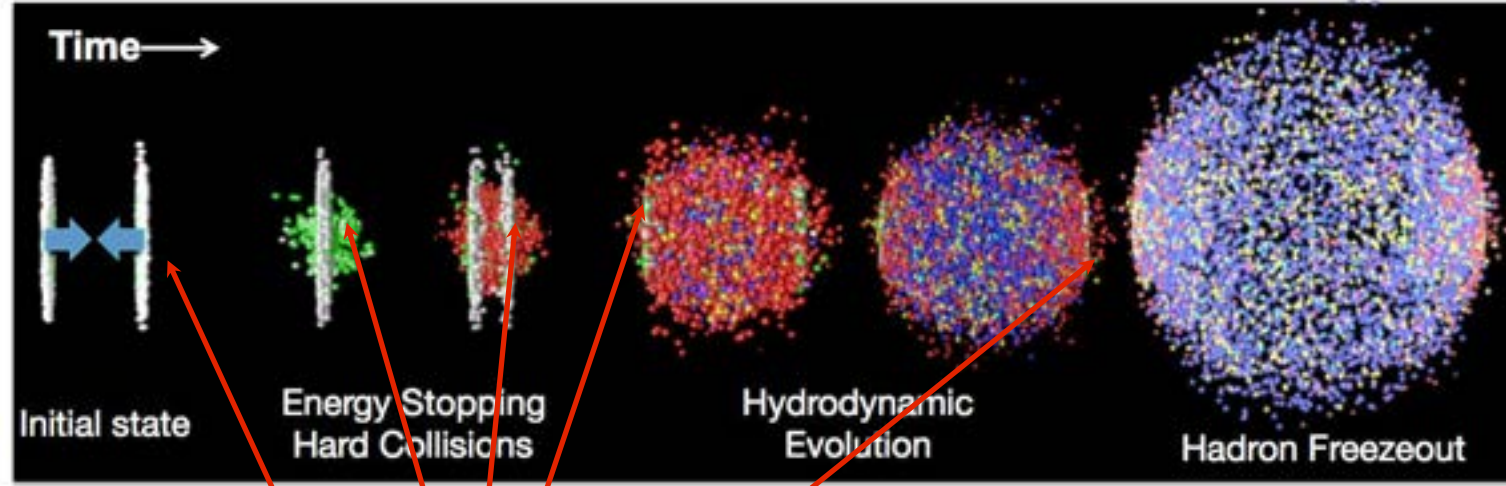
Hidrodinamik akış





ALICE

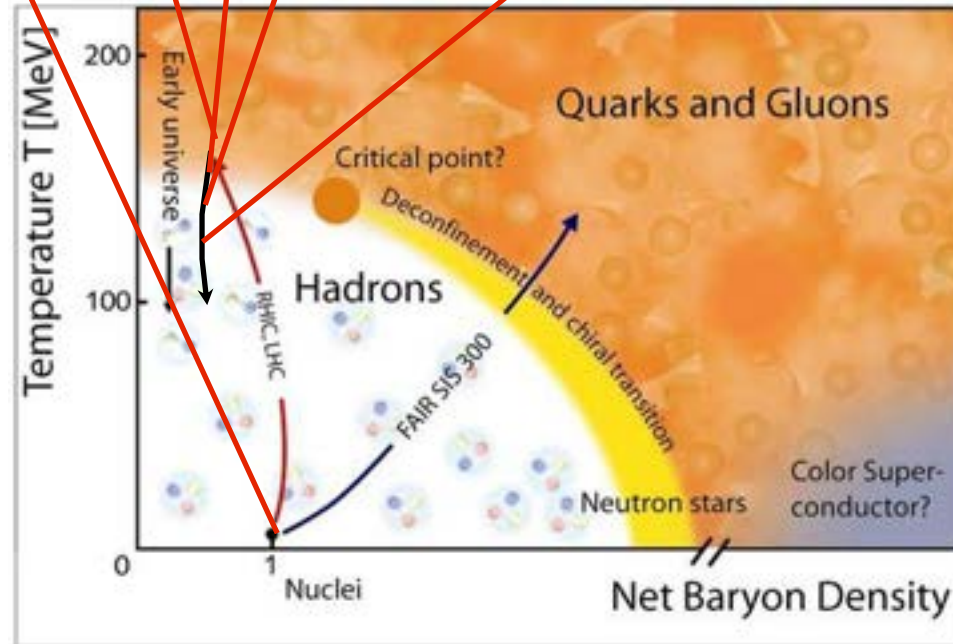
# Ağır İyon Çarpışmalarının Gelişimi



Sert saçılmalar

Termalizasyon

Hidrodinamik akış

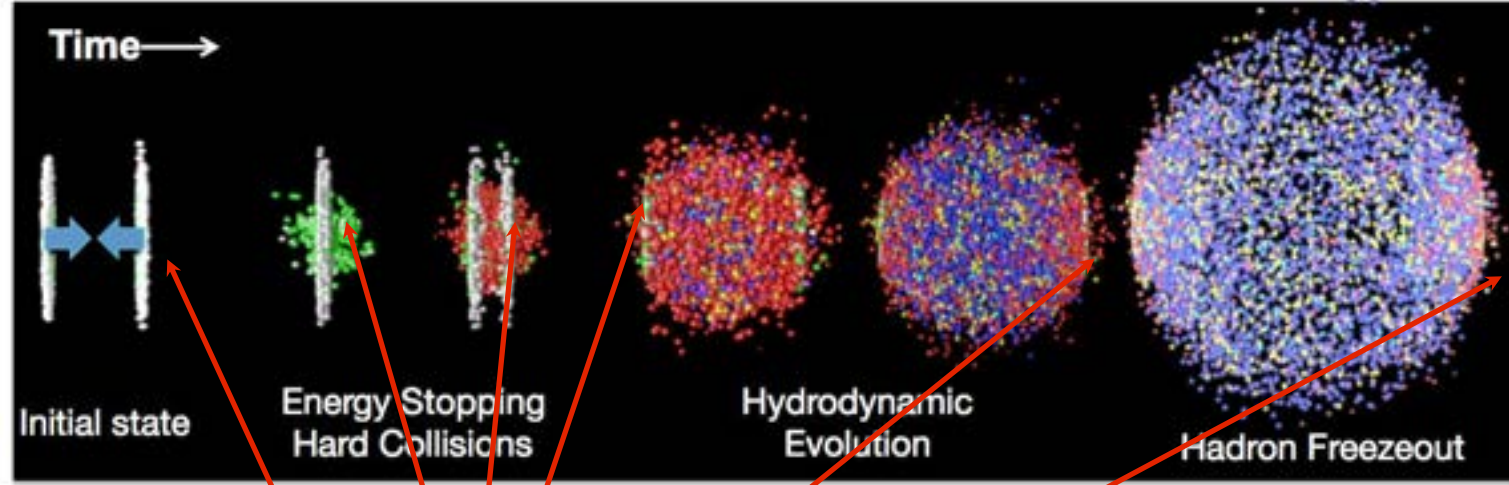


Kimyasal donma  
(parçacık oranları)



ALICE

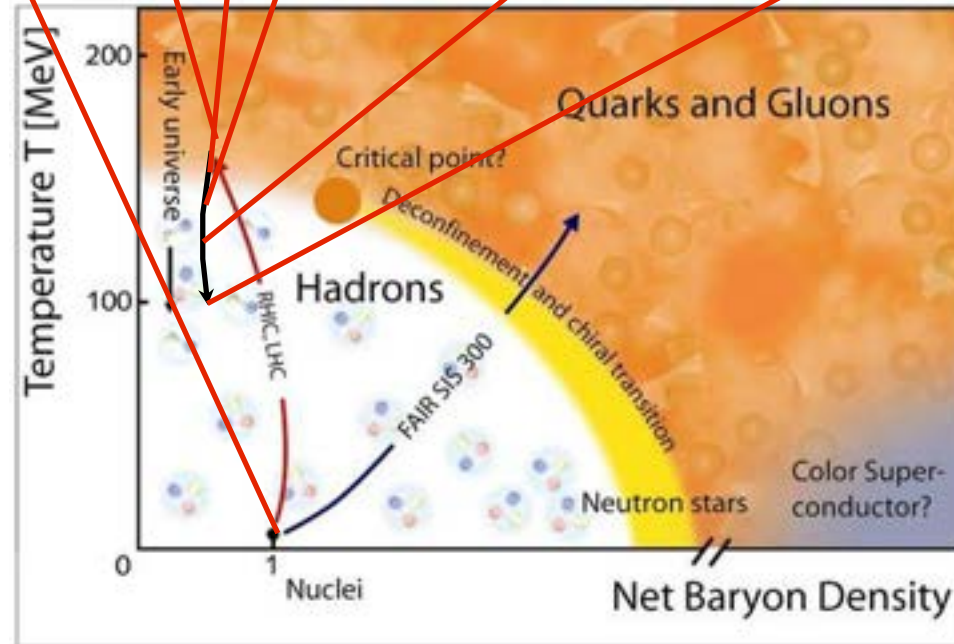
# Ağır İyon Çarpışmalarının Gelişimi



Sert saçılmalar

Termalizasyon

Hidrodinamik akış



Kimyasal donma  
(parçacık oranları)

Kinetik donma  
(momentum dağılımları)



ALICE

# Neler Öğrenilebilir?

Sistem Boyutu



## 1-) proton-proton (pp) Çarpışmaları

- Düşük momentumlu çarpışmalar (Soft QCD)
- MC modellerinin ayarlanması (tuning)
- Pb-Pb çarpışmaları için referans veri



ALICE

# Neler Öğrenilebilir?

Sistem Boyutu



## 1-) proton-proton (pp) Çarpışmaları

- Düşük momentumlu çarpışmalar (Soft QCD)
- MC modellerinin ayarlanması (tuning)
- Pb-Pb çarpışmaları için referans veri



## 2-) proton-Kurşun (p-Pb) Çarpışmaları

- Hacimsel ve parçacık yoğunluğu bakımından ara bölge
- Herhangi bir kolektif davranış gözlenebilir mi?
- Kontrol



ALICE

# Neler Öğrenilebilir?

Sistem Boyutu



## 1-) proton-proton (pp) Çarpışmaları

- Düşük momentumlu çarpışmalar (Soft QCD)
- MC modellerinin ayarlanması (tuning)
- Pb-Pb çarpışmaları için referans veri



## 2-) proton-Kurşun (p-Pb) Çarpışmaları

- Hacimsel ve parçacık yoğunluğu bakımından ara bölge
- Herhangi bir kolektif davranış gözlenebilir mi?
- Kontrol



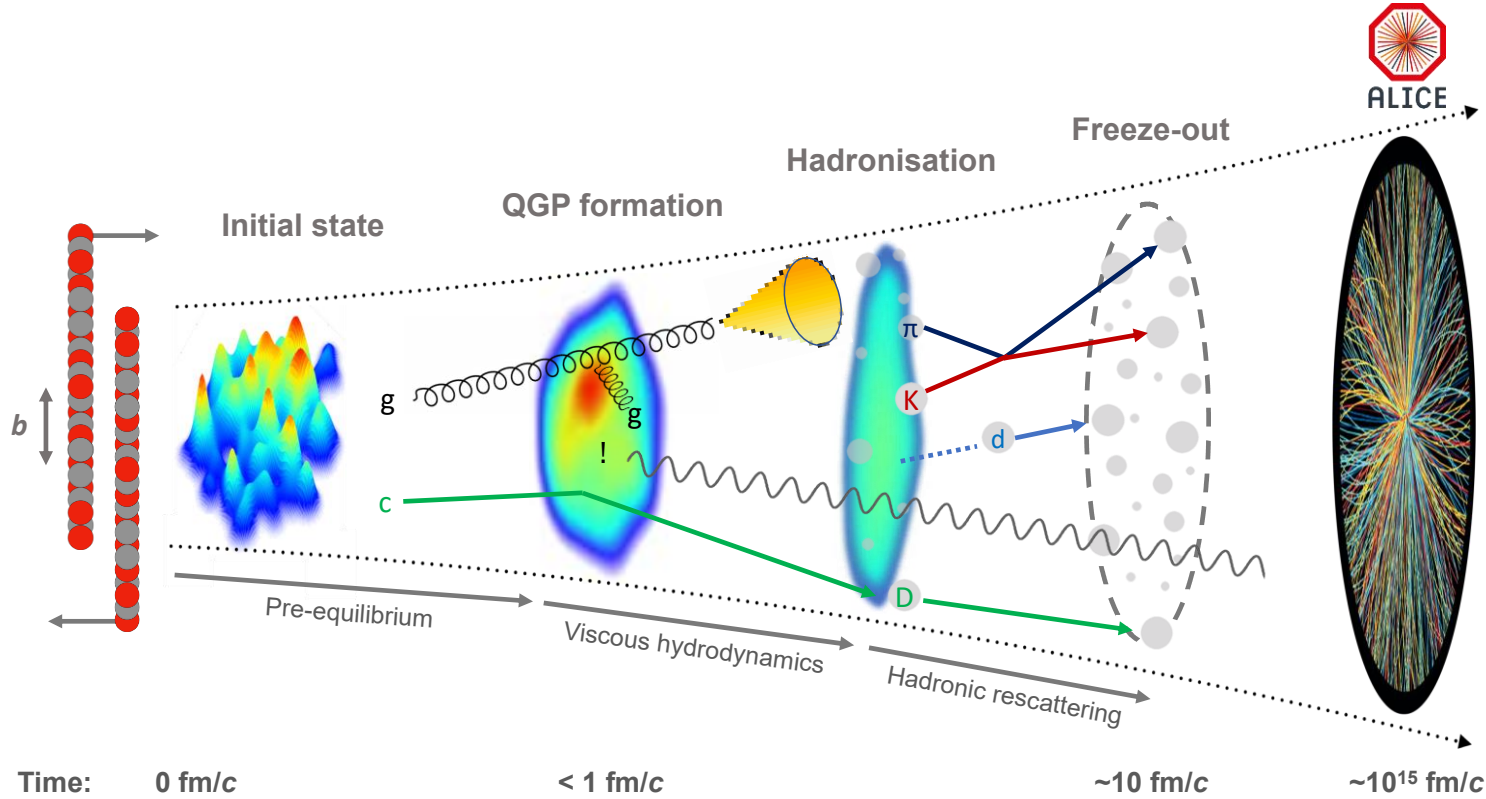
## 3-) Kurşun-Kurşun (Pb-Pb) Çarpışmaları

- Hacimsel özellikler
- Kolektif davranışlar
- Hadronizasyon
- Partonik enerji kaybı

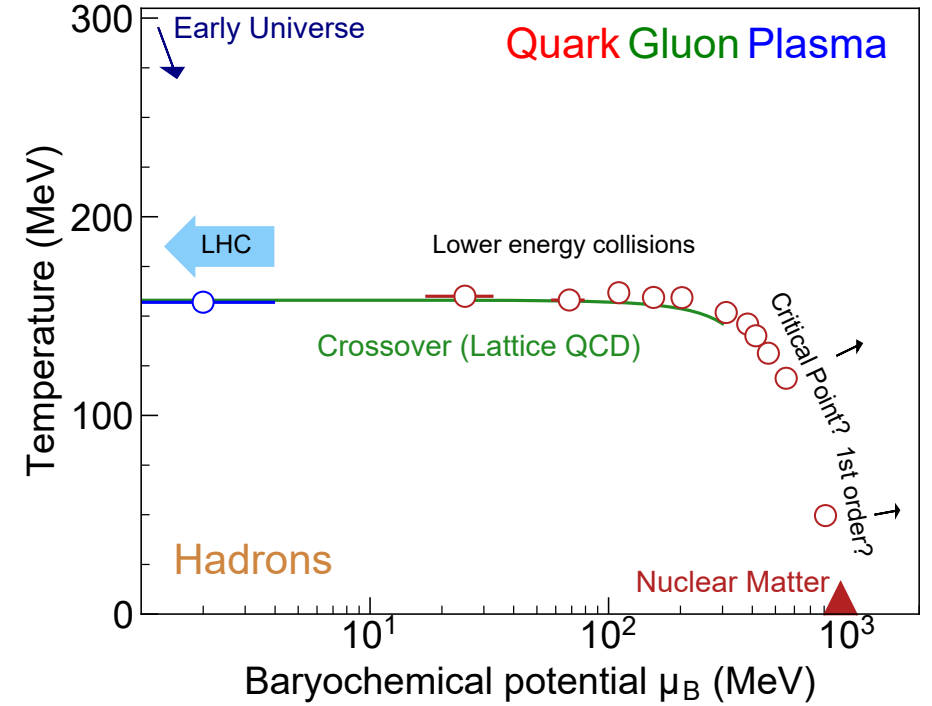


ALICE

# LHC'deki Rölativistik Ağır İyon Çarpışmaları



Ağır iyon çarpışmalarının gelişimi

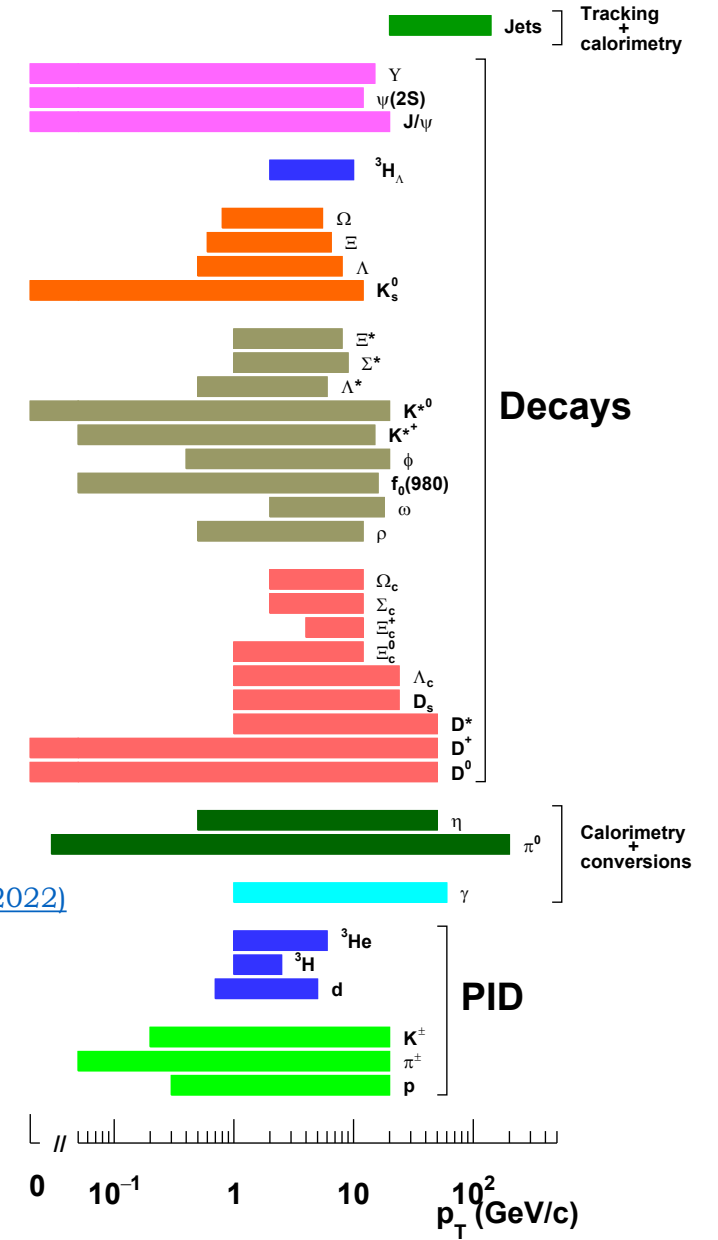
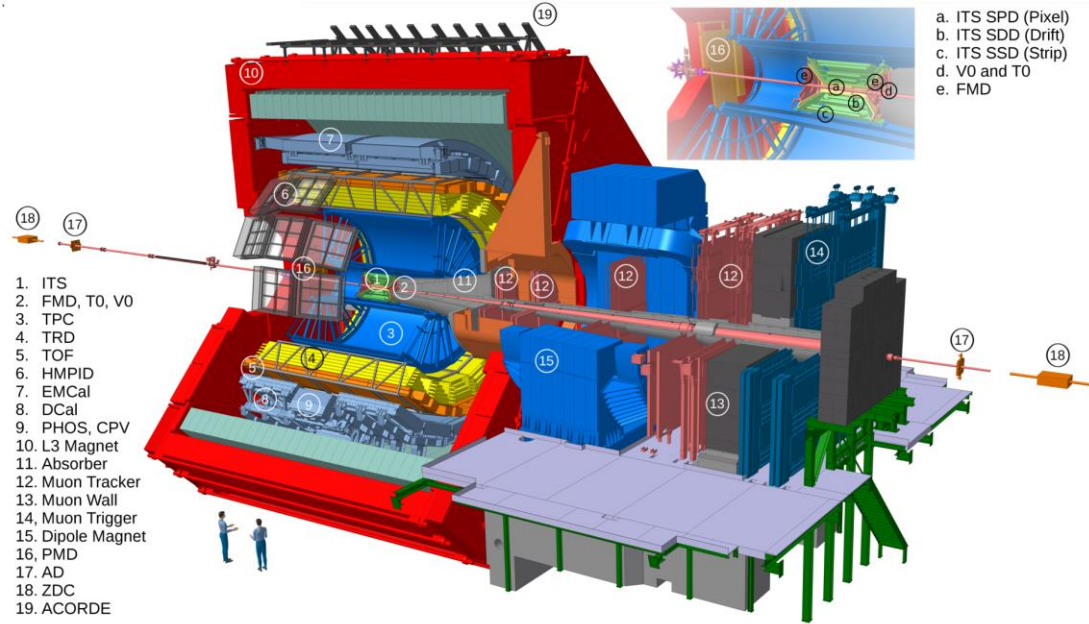


QCD faz diyagramı

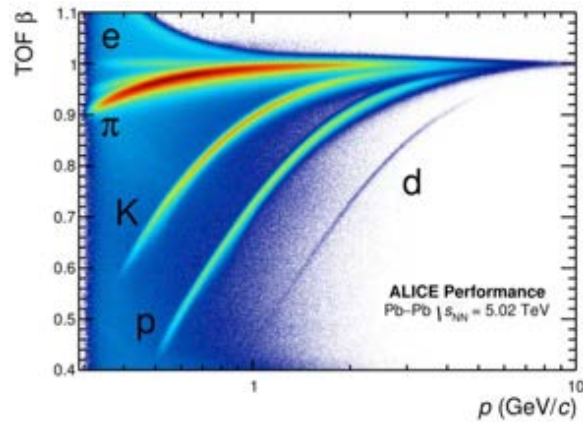
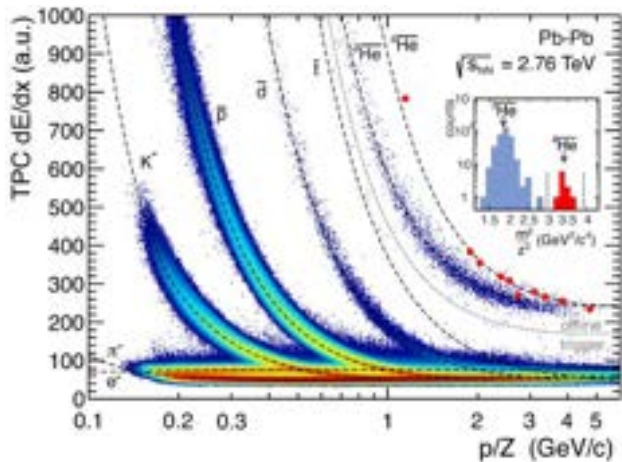


ALICE

# ALICE Dedektörü



Orta rapidite bölgesinde düzgün kabul ve mükemmel parçacık tanımlama yeteneği.



(Particle Data Group),  
Prog. Theor. Exp. Phys. 2022, 083C01 (2022)

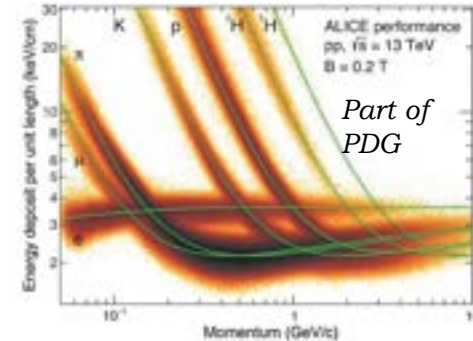


Figure 35.15: Energy deposit versus momentum measured in the ALICE TPC.



ALICE

# Toplanan Veri Seti

Sistem	Yıl	Kütle Merkezi Enerjisi (TeV)	Toplam Işınlık
Pb-Pb	2010, 2011	2.76	75 mb <sup>-1</sup>
	2015, 2018	5.02	800 mb <sup>-1</sup>
Xe-Xe	2017	5.44	0.3 mb <sup>-1</sup>
p-Pb	2013	5.02	15 nb <sup>-1</sup>
	2016	5.02, 8.16	3 nb <sup>-1</sup> , 25 nb <sup>-1</sup>
p-p	2009-2013	0.9, 2.76, 7, 8	200 mb <sup>-1</sup> , 100 nb <sup>-1</sup> , 1.5 pb <sup>-1</sup> , 2.5 pb <sup>-1</sup>
	2015, 2017	5.02	1.3 pb <sup>-1</sup>
	2015-2018	13	136 pb <sup>-1</sup>

Run 3 – 13.6 TeV’de 700 milyar pp olayı toplandı.  
2023 – 30 pb<sup>-1</sup>

2023: 5 hafta Pb-Pb çarpışması.  
2023 – 3.25 nb<sup>-1</sup>

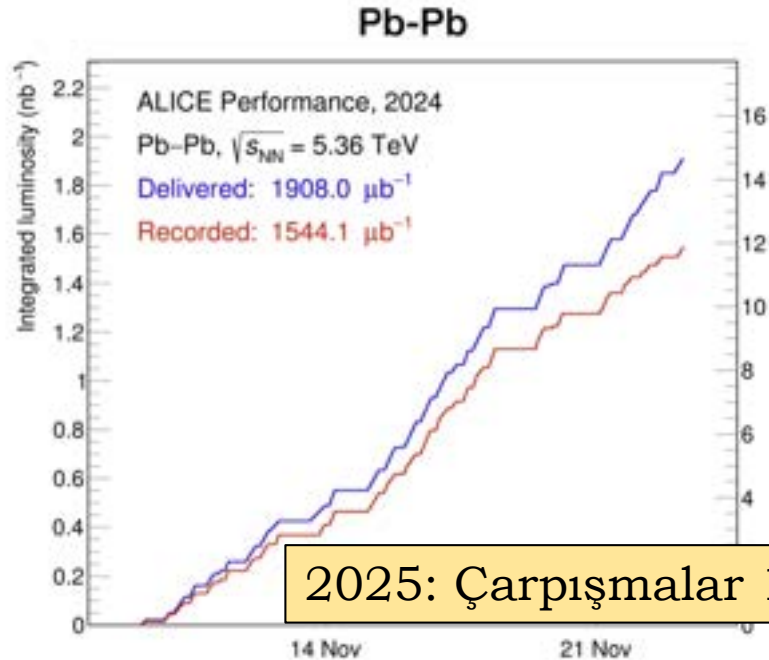
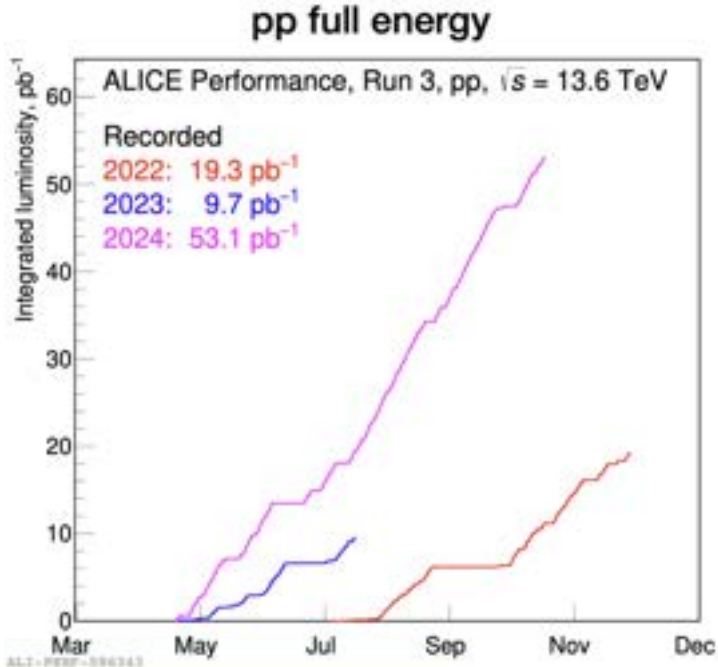
2024: çarpışmalar 8 Mart’ta başladı.



ALICE

# 2024 Yılı Toplanan Veri Seti

- 2024 Pb-Pb:  $1.6 \text{ nb}^{-1}$  pp:  $53 \text{ pb}^{-1}$  kaydedildi.
- 50 kHz etkileşim hızında kararlı Pb-Pb çarpışmaları
  - Veri hızı  $\sim 700 \text{ GB/sn}$
  - 2024 yılında 12 milyar Pb-Pb çarpışması kaydedildi
- 500 kHz'de kararlı pp çalışması
- %80 veri toplama verimliliği
- Dedektör genel olarak kararlı, kabul edilebilir arka plan seviyeleriyle
  - Bazı TPC bölgelerinde hız bağımlılığı gözlemlendi ve araştırılıyor.



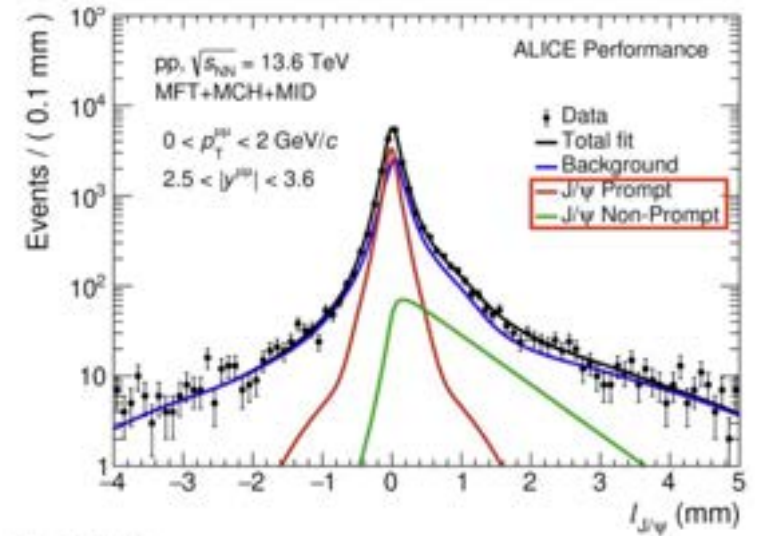
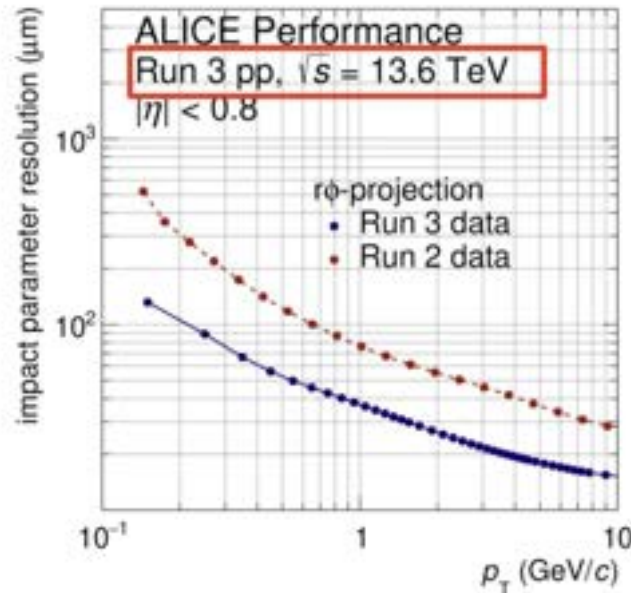
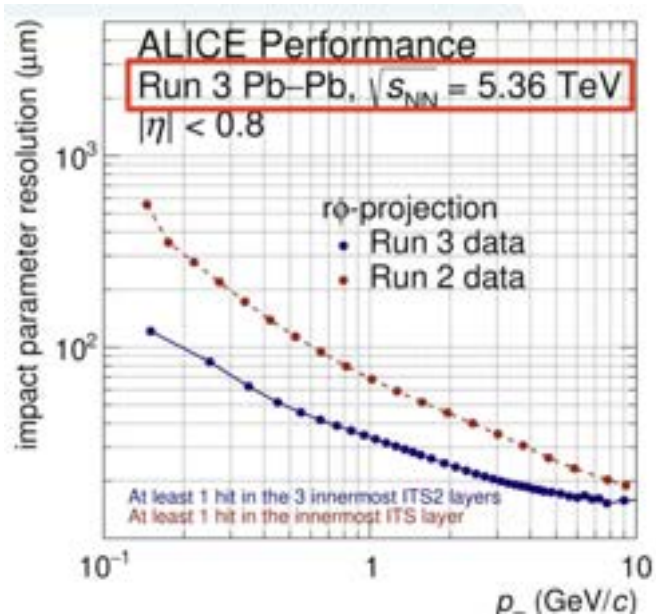
2025: Çarpışmalar 13 Mart'ta başlayacak.



ALICE

# Run 3 Vertex Belirleme Performansı

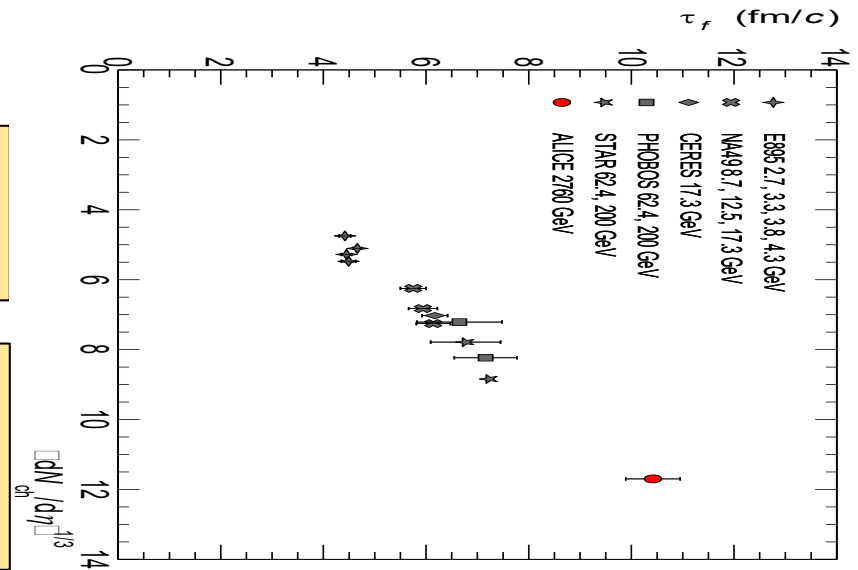
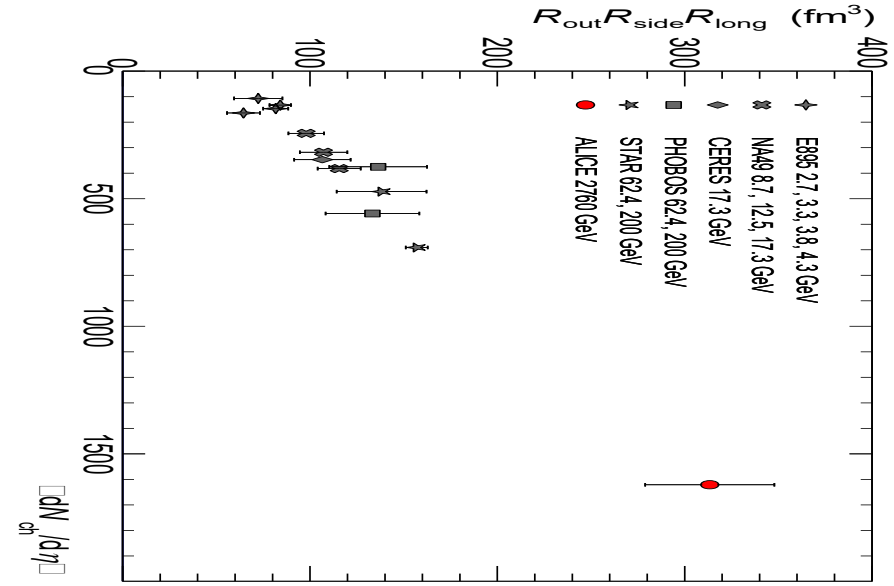
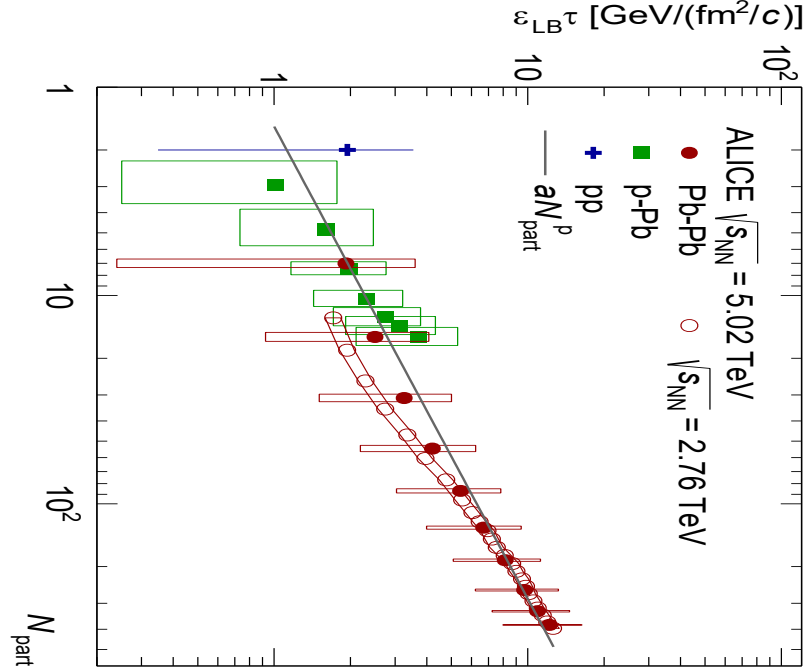
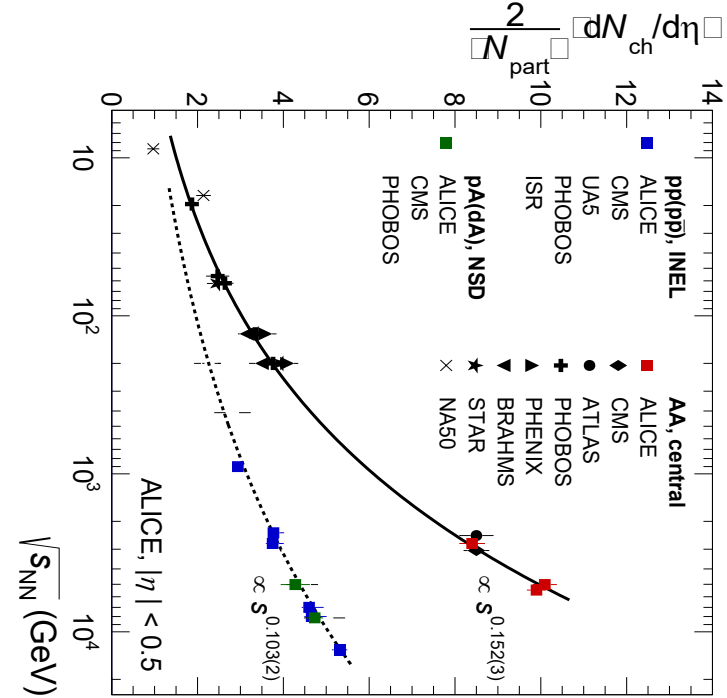
- Orta rapidite enine yönlendirme, Run 2'ye göre **2 kat daha iyi**
- Orta rapidite boylamasına yönlendirme, Run 2'ye göre **6 kat daha iyi**
- MFT kullanılarak ileri bölgede ikincil vertex belirleme





ALICE

# Multiplisite, enerji yoğunluğu, boyut & zaman



Oluşum zamanı  $\sim 1$  fm/c,  
 $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  TeV 'deki 0-5% Pb-Pb  
 çarpışmalarında  $\varepsilon = 12.3 \pm 1.0$  GeV/fm<sup>3</sup>.

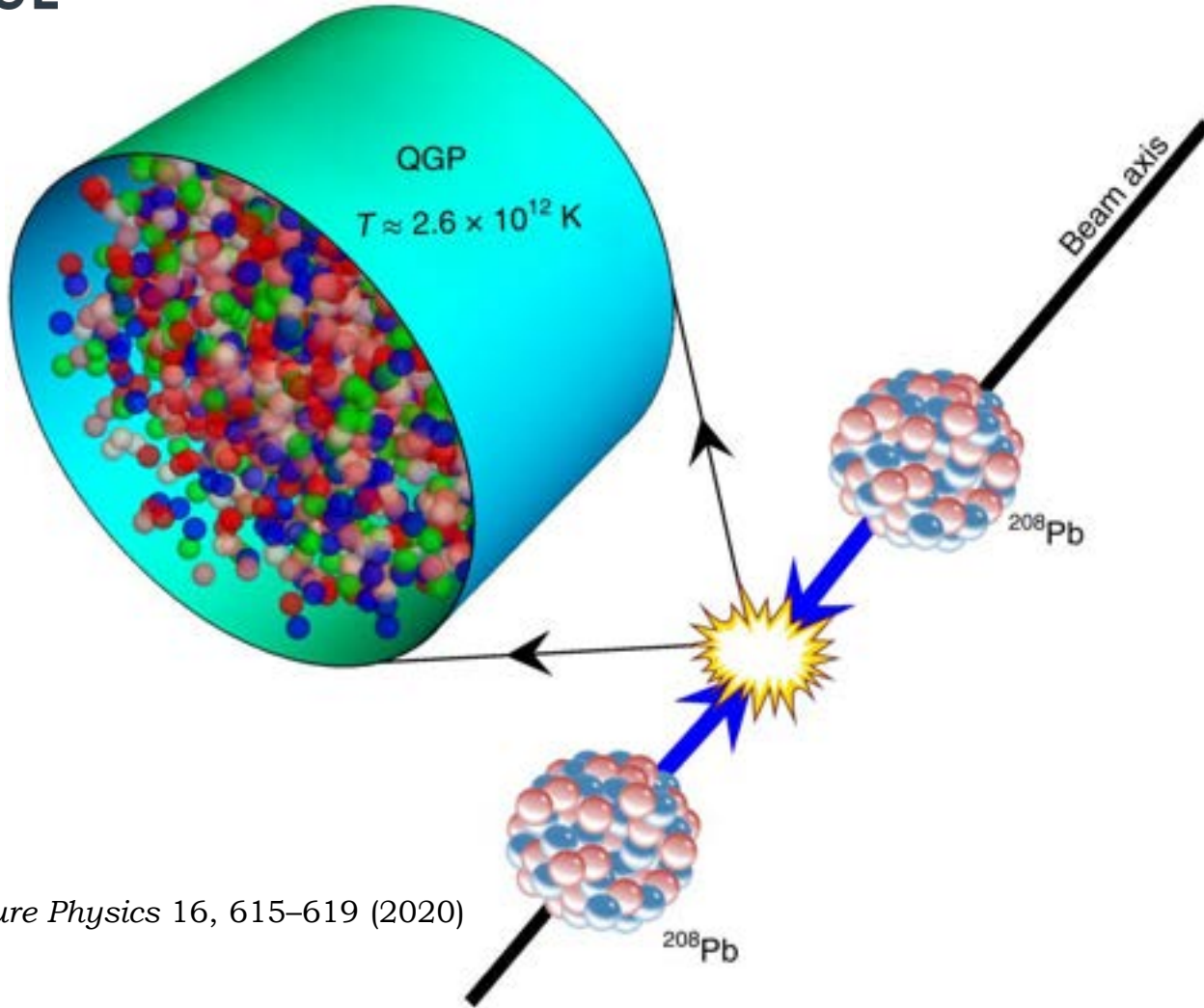
- RHIC'ten LHC'ye - **homojenlik bölgesi** ~ **iki kat daha geniş**.
- Orta rapidite bölgesindeki pilyonlar için ayrılma zamanı  $\sim 40\%$  daha uzun.

- pp çarpışmalarından **daha güçlü enerji bağımlılığı**
- Ağır iyon çarpışmaları başlangıç demet enerjisini parçacık üretimine transfer etmekte **pp'den daha etkindir**.

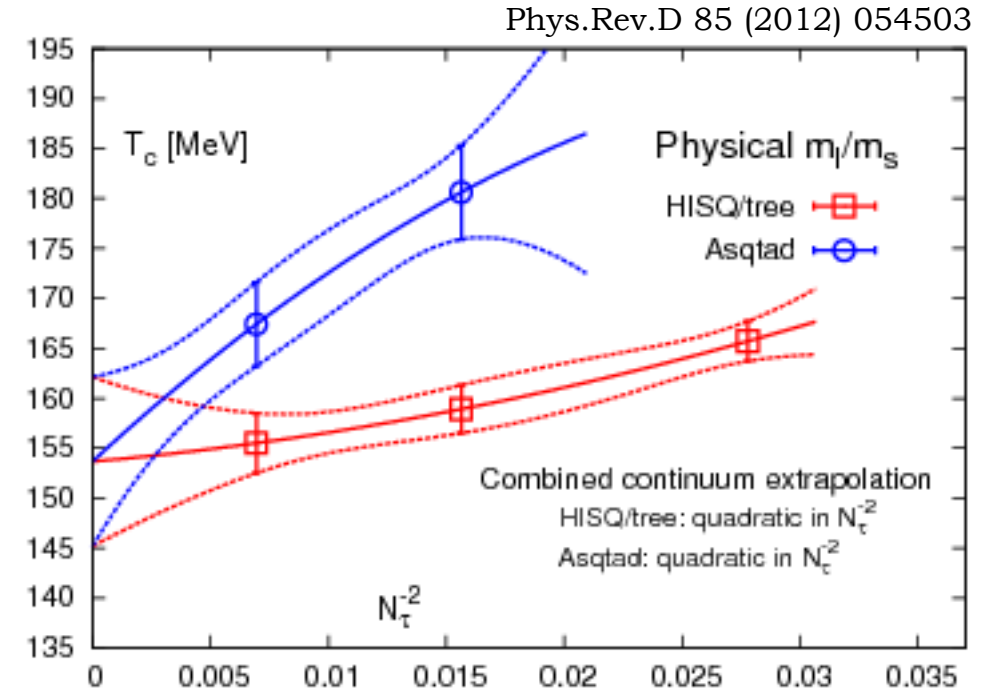


ALICE

# ALICE ile LHC'de Ölçülen Sıcaklıklar



*Nature Physics* 16, 615–619 (2020)



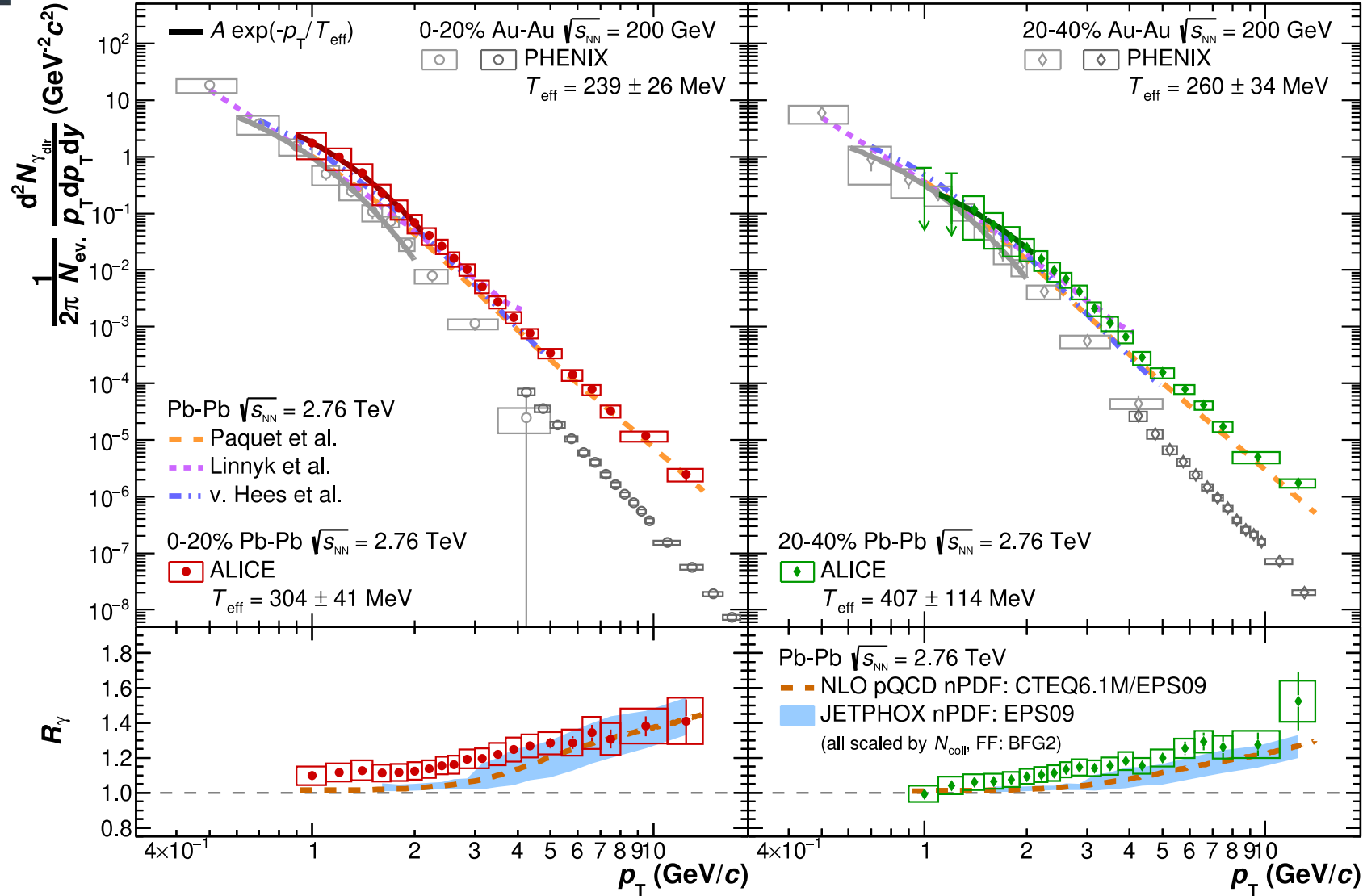
Latis QCD – geçiş sıcaklığı  
 $T_c = 156.5 \pm 1.5 \text{ MeV}$

Phys. Lett. B 795 (2019) 15–21



ALICE

# ALICE'te doğrudan fotonlarla sıcaklık ölçümleri



Etkin sıcaklık ~ 300-400 MeV.

LQCD  $T_c$  (154 MeV) den çok daha yüksek.

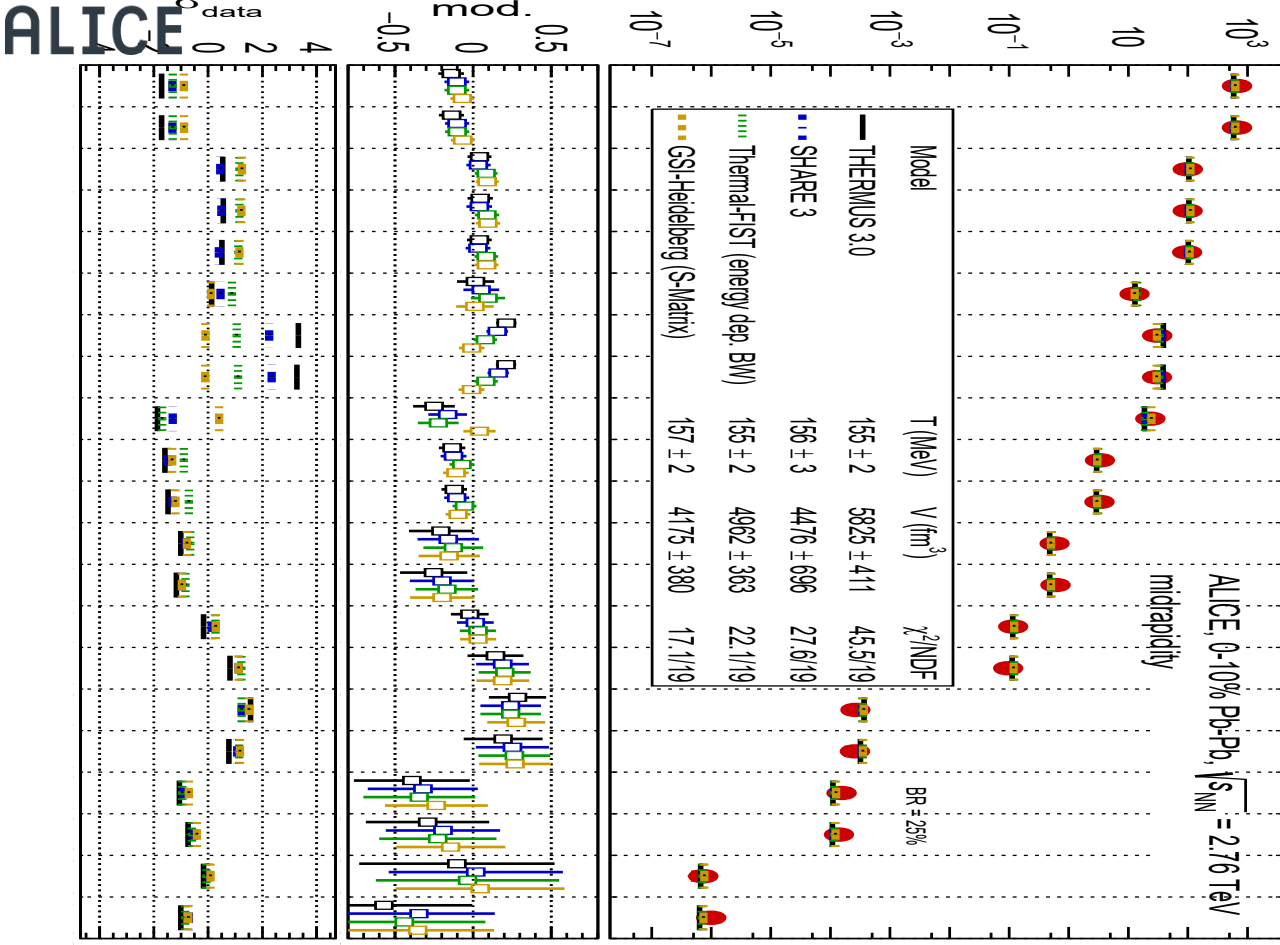
LHC'de QGP oluşumu.

Foton spektrumu radyal akış etkisiyle kaymıştır.

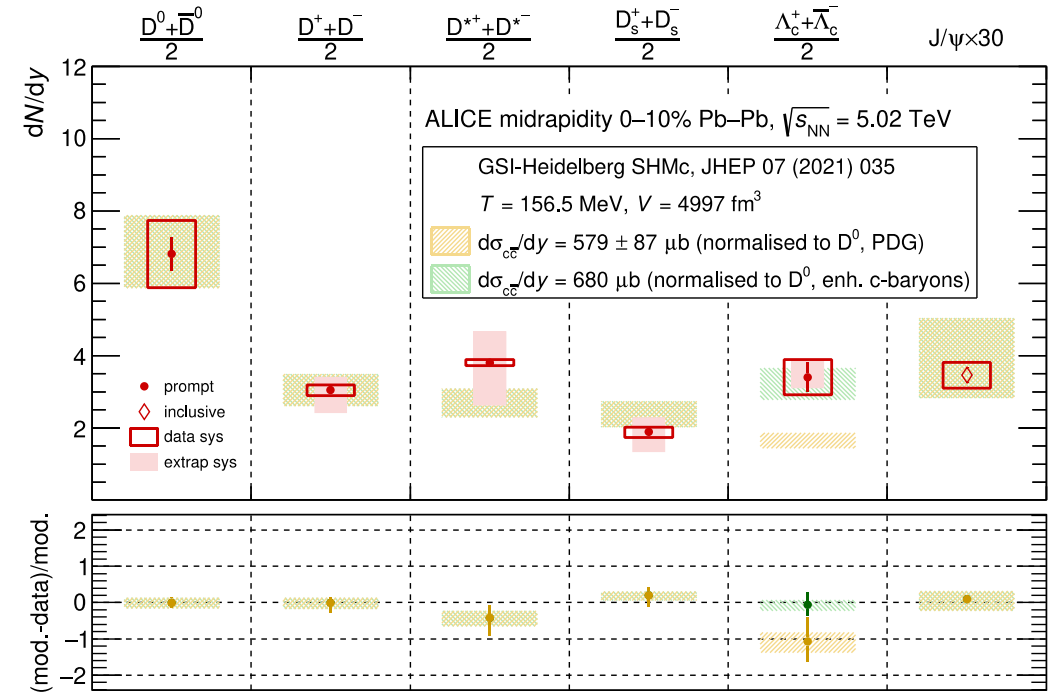
Bu ölçümün dilepton invariant kütle spektrumu ile yapılması planlanmaktadır.



# Parçacık ürünlerinden elde edilen sıcaklık – kimyasal donma noktası



ALICE, 0-10% Pb-Pb,  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  TeV, midrapidity

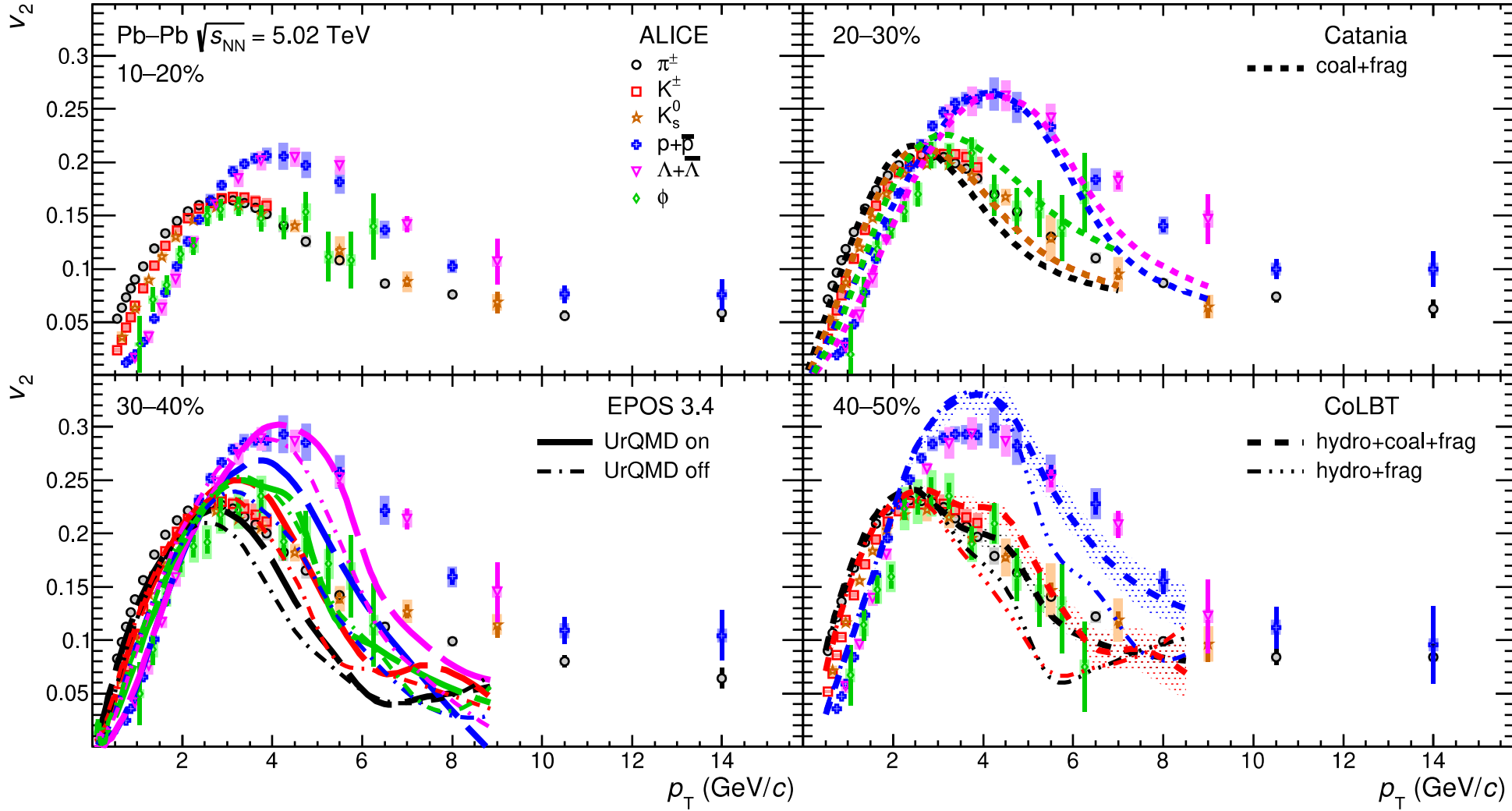


İnelastik çarpışmaların sonlandığı sıcaklık ~ 155 MeV.  
Kimyasal donma ve kuark-hadron geçişi yakın sıcaklıklarda olduğu belirlenmiştir.



ALICE

# Kollektif etkiyle kütle sıralaması ve baryon-mezon ayrışması



Düşük enine momentum değerlerinde kütle sıralaması – Hidrodinamik model ile uyumludur.

Orta enine momentum değerlerinde baryon-mezon farklılığı Partonların hadronları oluşturması modeliyle uyumludur.





ALICE

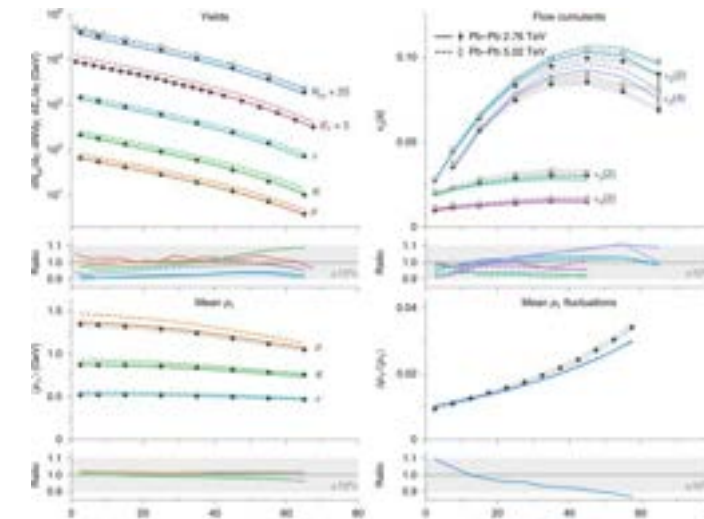
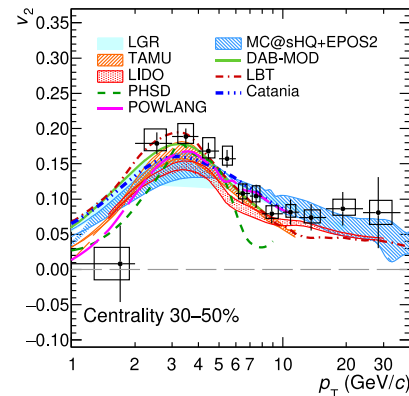
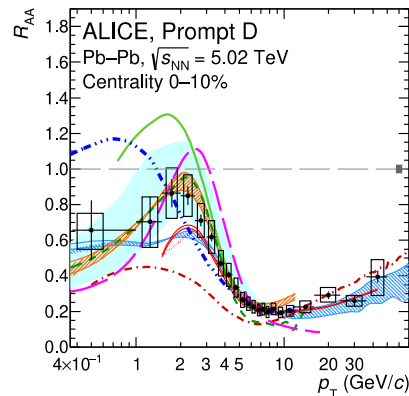
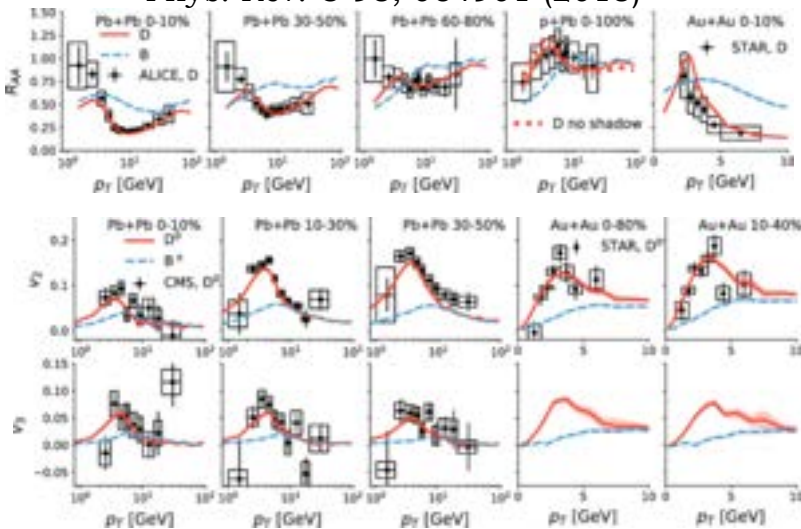
# Kuark-Gluon Plazmasının taşınım özellikleri (ALICE verisi ile)

- ❑ Süzme/kayma (Shear) viskozitesi (iç sürtünme etkisi)
- ❑ Toplu (Bulk) viskozite (hacimsel değişimlere karşı davranış)
- ❑ Difüzyon katsayısı (hareket etme hızı)
- ❑ Jet taşınım katsayısı (jetlerin ortam içinde enerji kaybetme hızı)

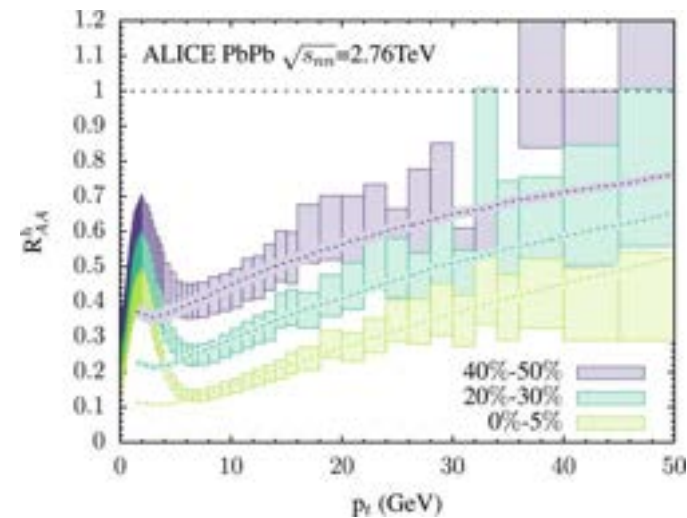
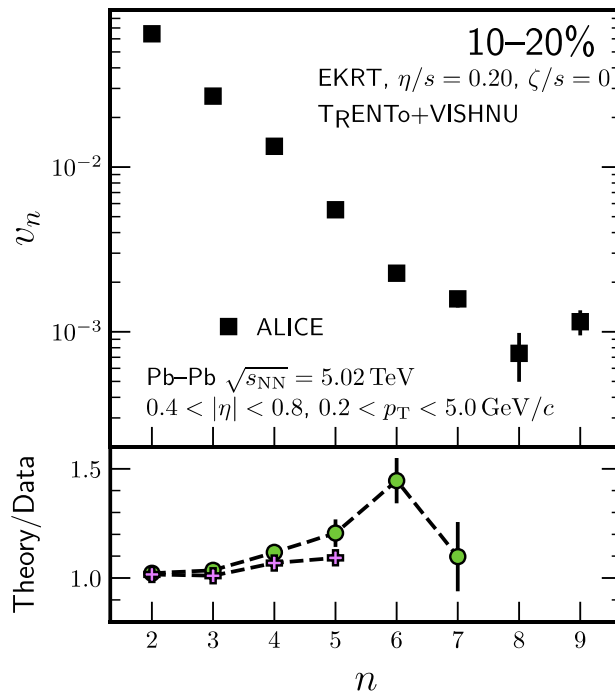
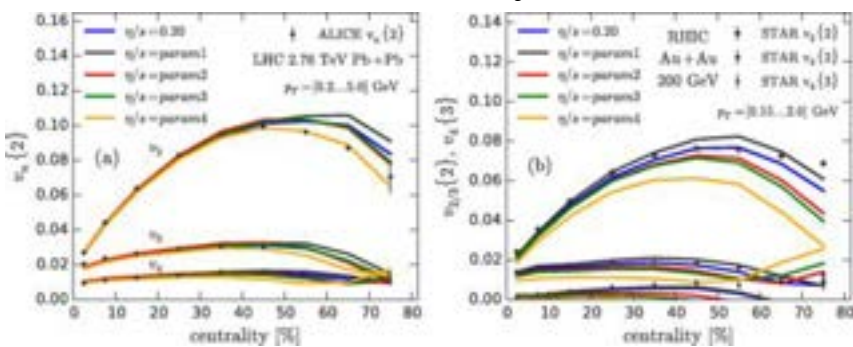
# Teori ve ALICE verisi

Nature Physics 15, pages 1113–1117 (2019)

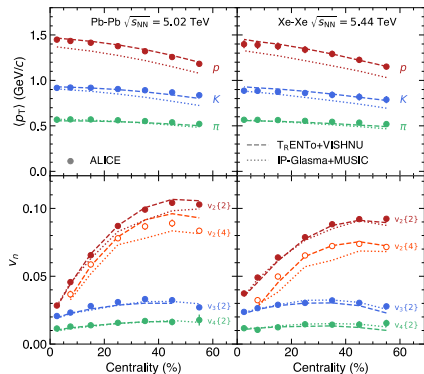
Phys. Rev. C 98, 064901 (2018)



Phys. Rev. C 93, 024907 (2016)



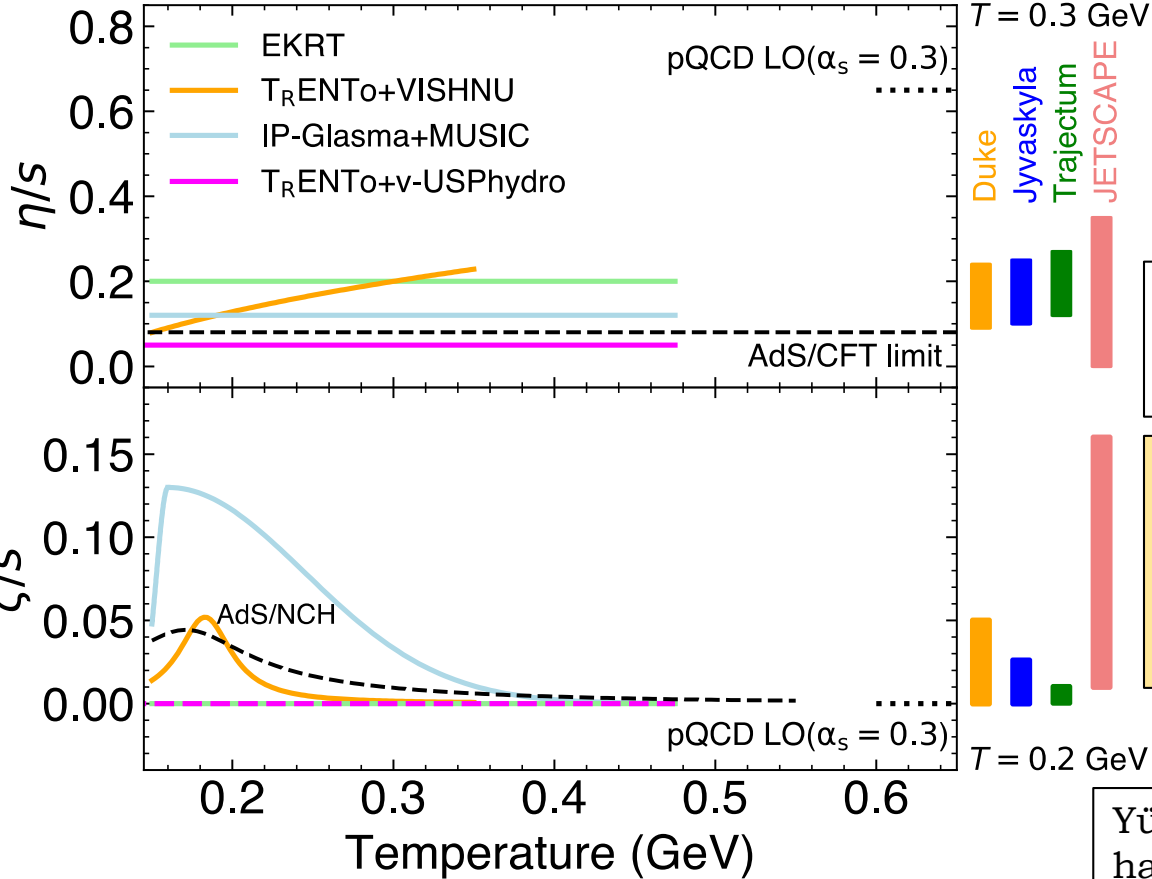
Physics Letters B 816, 136251 (2021)





ALICE

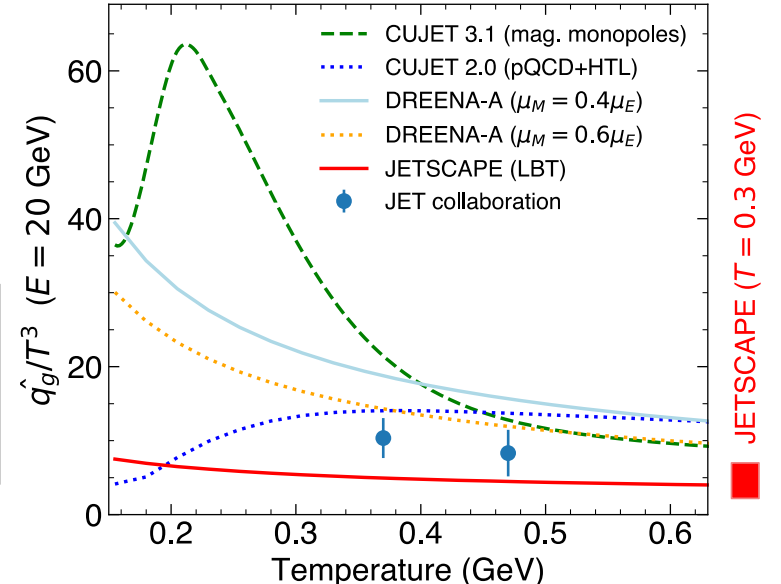
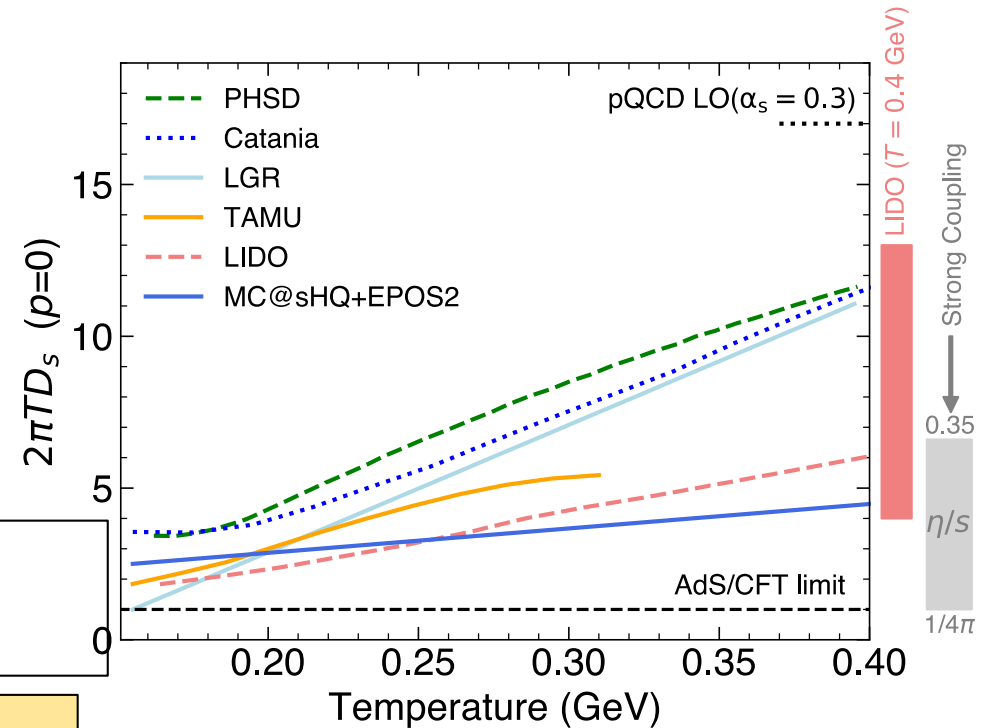
# Taşınım özellikleri



D-mezon  $v_2$  ve  $R_{AA}$  ölçümleri kullanılmıştır.

Kuvvetli etkileşme ile çiftlenmiş mükemmel sıvı

Yüksek enine momentumlu hafif ve büyüğü hadronların  $R_{AA}$  ve  $v_n$  ölçümleri kullanılmıştır.



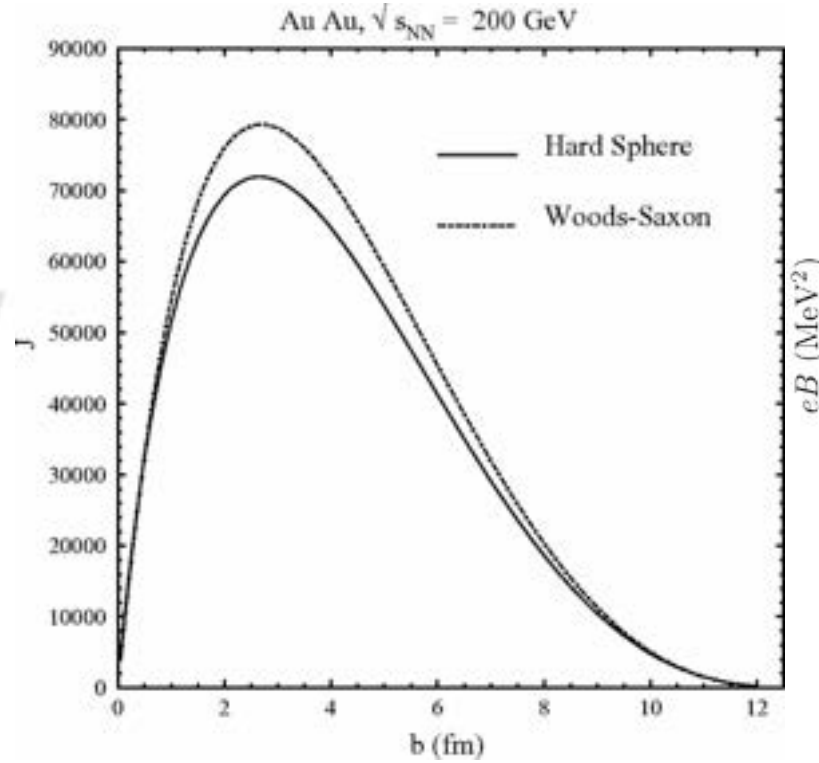
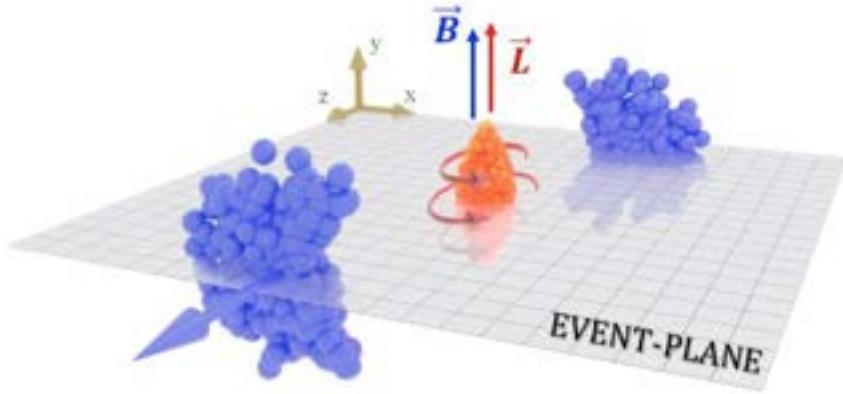
ALICE tarafından yapılan anizotropik akış ve spektrum ölçümleri kullanılmıştır

Grafiklerin sağ tarafındaki aralıklar, Bayesian analizlerinden elde edilen %90 güven aralıklarını temsil etmektedir.

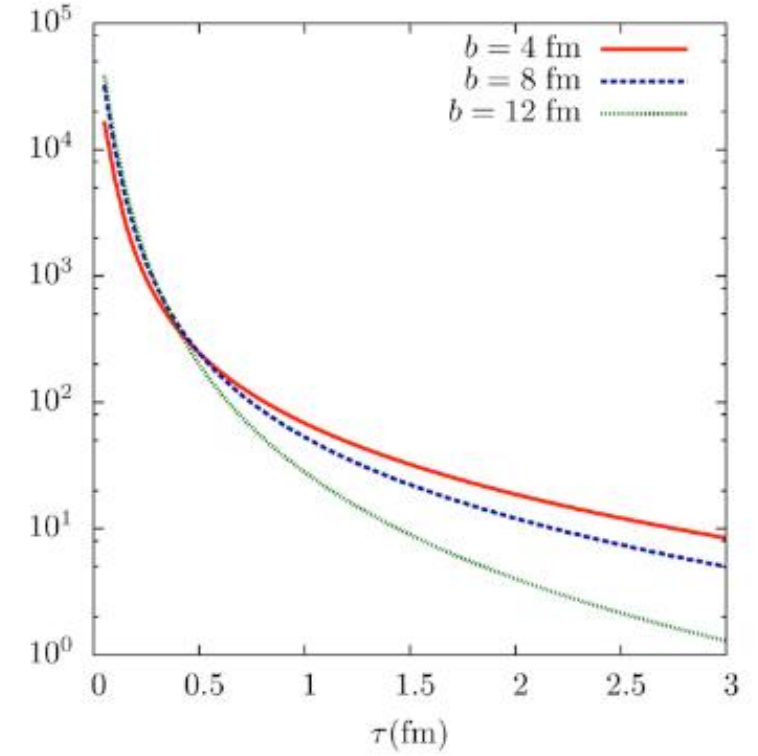


ALICE

# Yüksek başlangıç manyetik alanı ve açısal momentum



Phys. Rev. C 77, 024906 (2008)



Nuclear Physics A 803 (2008) 227-253

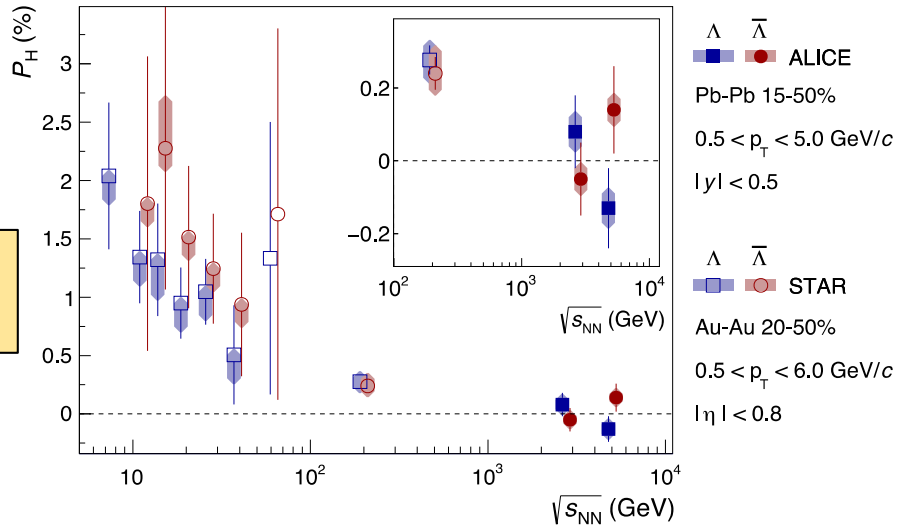
*Kuark-gluon plazmanın başlangıç açısal momentumu, parçacık spektrumunun azimutal anizotropisini (eliptik akım) artırmalıdır.*



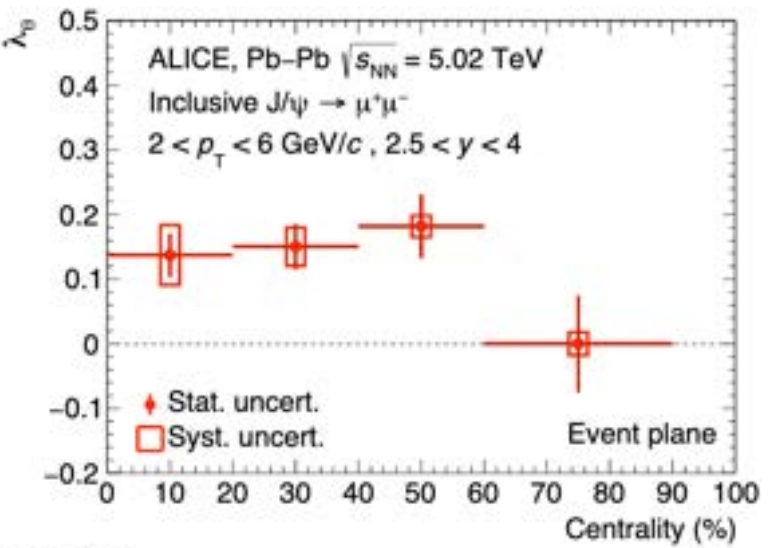
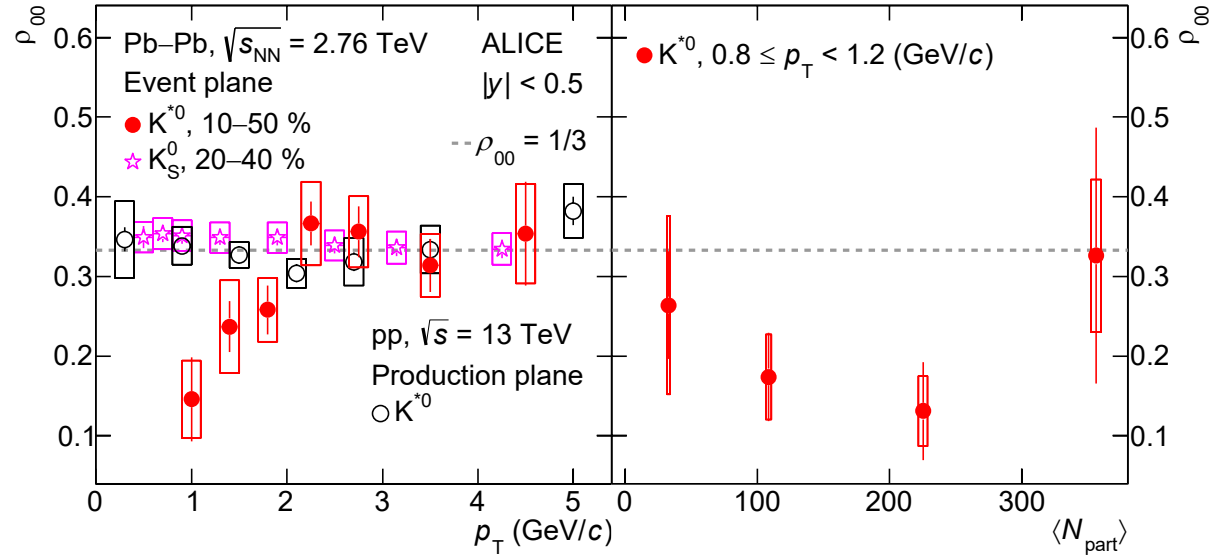
ALICE

# Manyetik alan ve açisal momentumun etkileri

Hiperon polarizasyonu

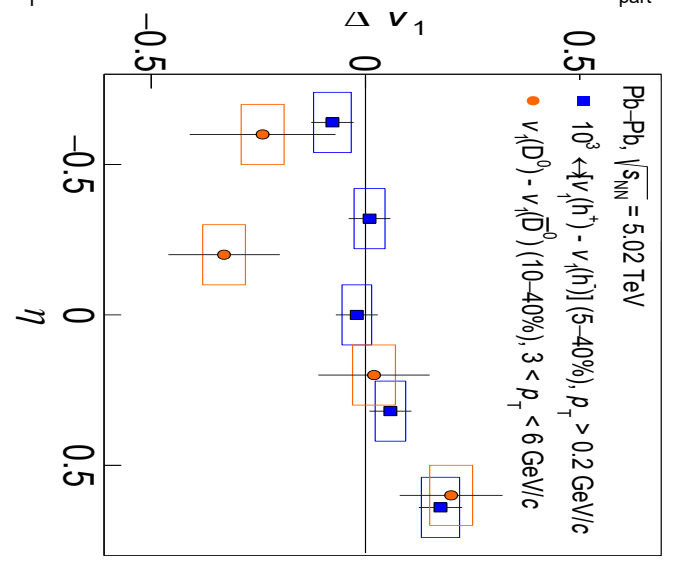


Vektör mezonların spin hizalaması



Vektör mezonların spin hizalaması

Büyülü hadronların v1 değerlerinde yüke bağlı olarak farklılık gözlemlenmiştir.

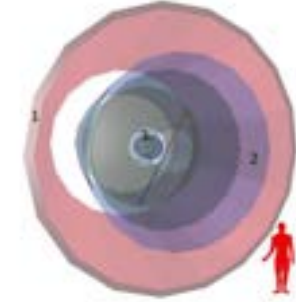






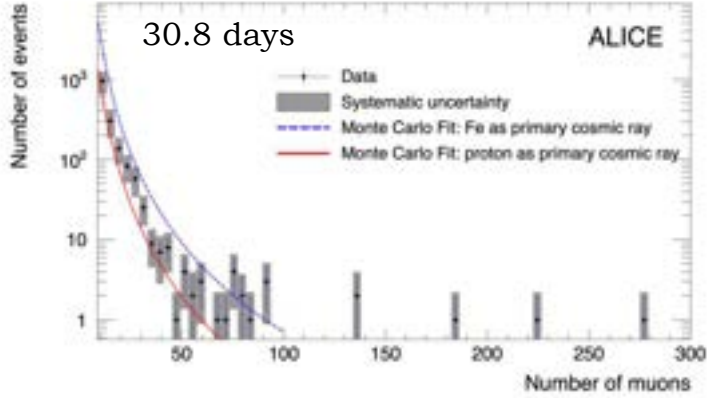
ALICE

# Kuark Gluon Plazması çalışmalarının ötesine geçmek



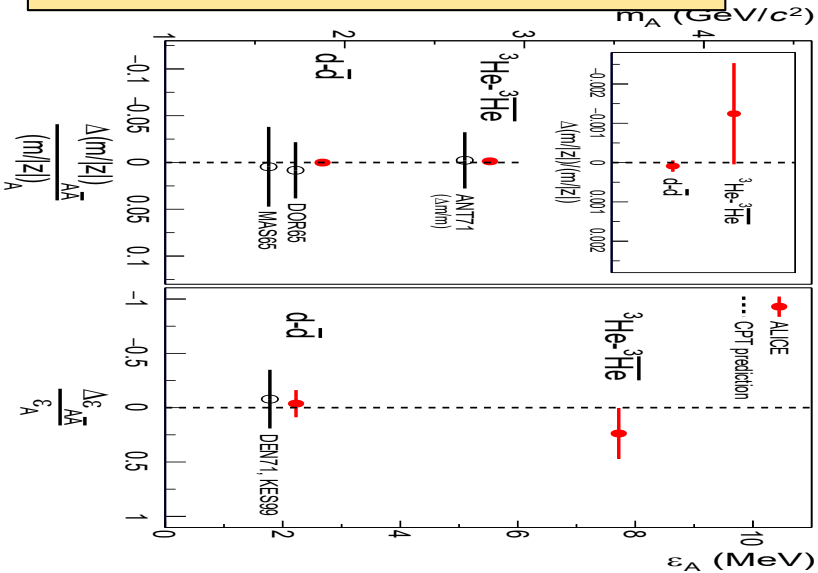
JCAP 01 (2016) 032

## Kozmik ışınlar



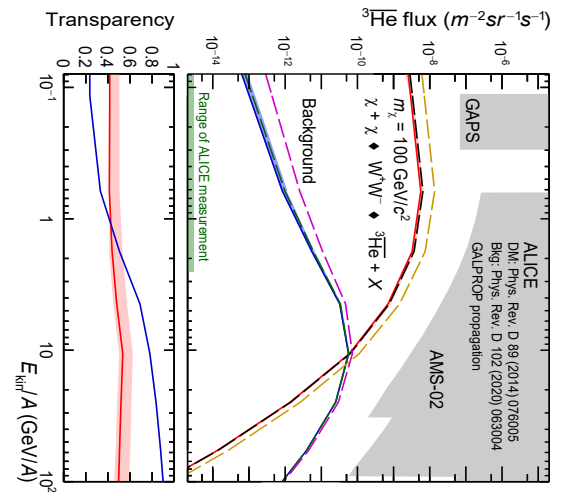
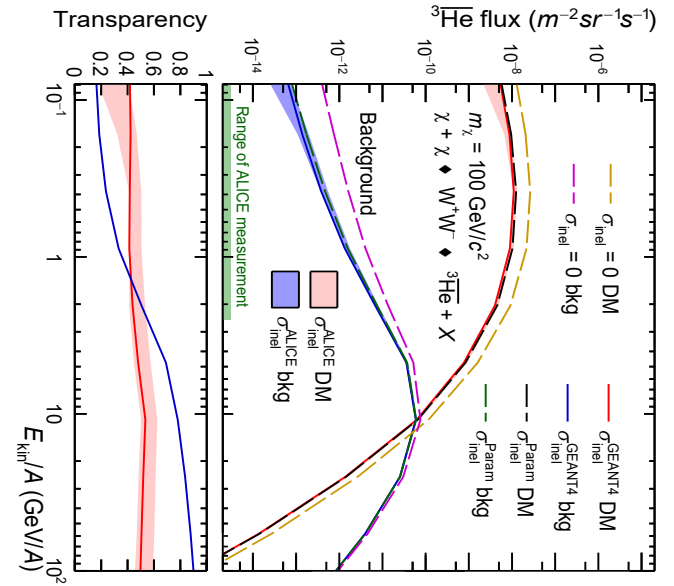
ALICE, yeraltında 52 metre derinliğinde bulunur. 28 metre kalınlığındaki üst yataklar kaya ile örtülüdür. Üst atmosferdeki kozmik ışın etkileşimleri tarafından üretilen müonları tespit edebilir.

## Temel simetrileri test etmek



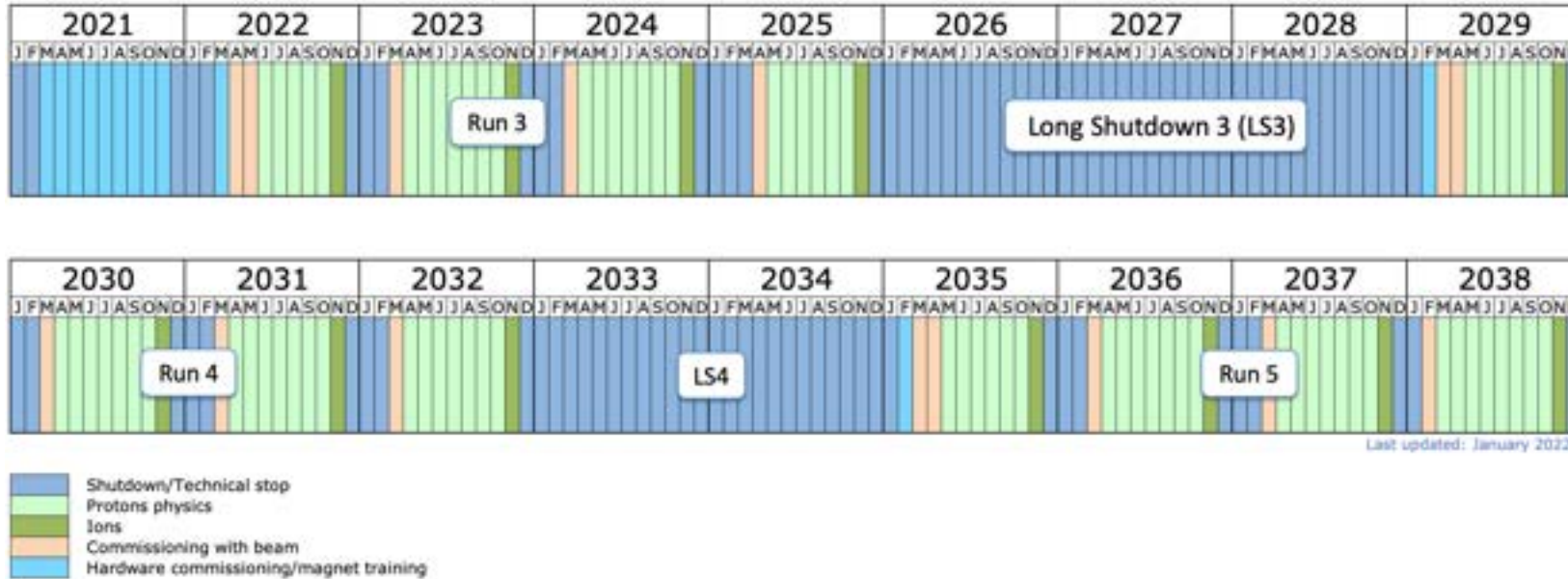
## Kozmik karanlık madde

Çekirdek sektöründe CPT invariyansı için en katı deneysel kısıtlama belirlenmiştir.

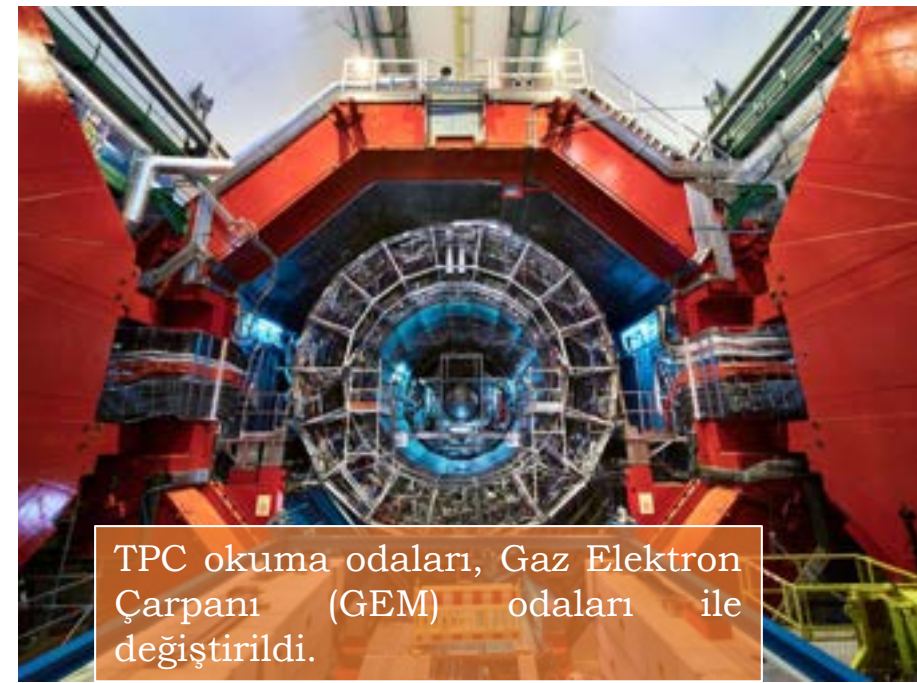


# ALICE 2 - Run 3

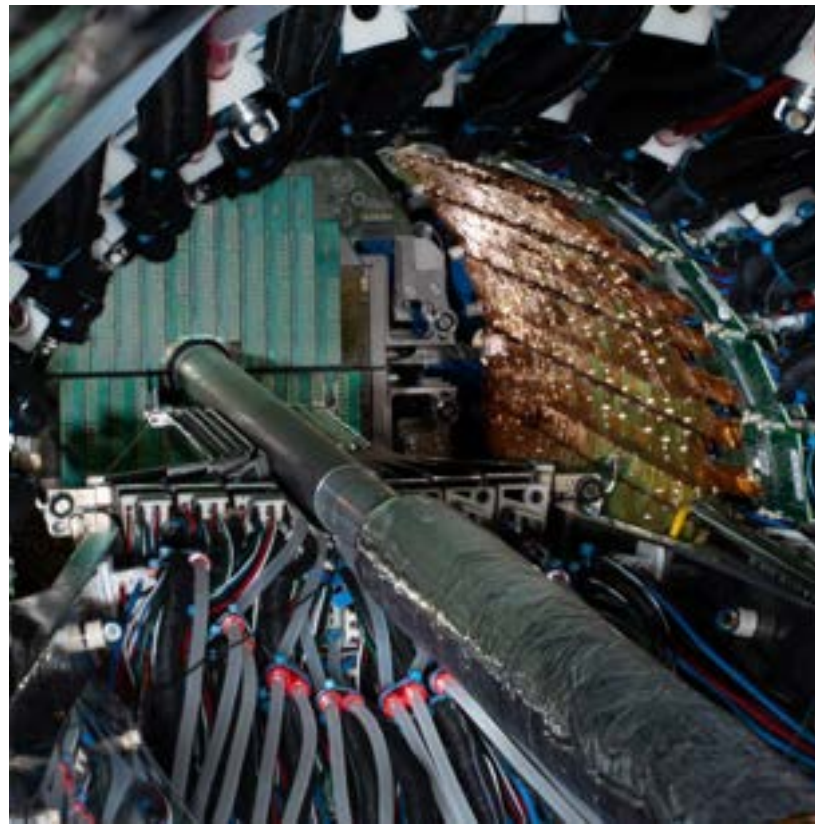
ALICE kolaborasyonu, LHC'nin 2. uzun kapanışı (2019-2021) sırasında alt dedektörlerin büyük bir güncellemesini gerçekleştirdi ve LHC'nin 3. (2022-2025) ve 4. (2029-2032) çalışma dönemleri için hazır hale getirdi.



ALICE Collaboration, B. Abelev et al.,  
 "Upgrade of the ALICE Experiment:  
 Letter Of Intent", *J.Phys. G*41 (2014)  
 087001



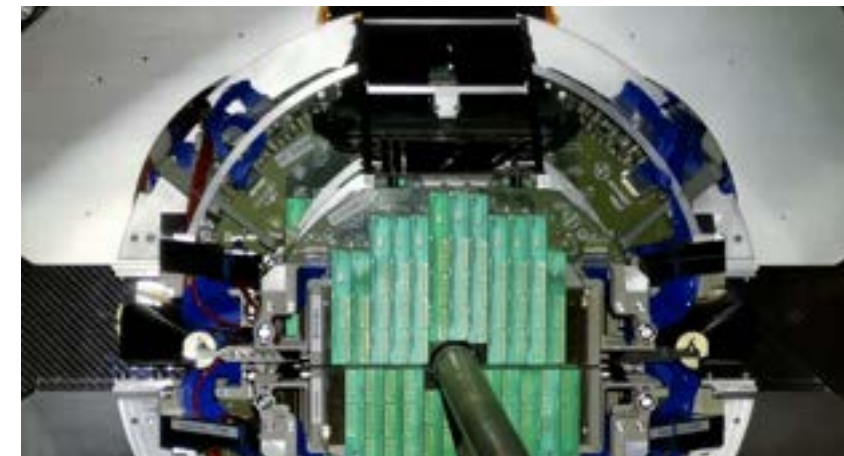
TPC okuma odaları, Gaz Elektron Çarpanı (GEM) odaları ile değiştirildi.



ITS – 7 katmanlı Monolitik Aktif Piksel sensörleri (MAPS) ile değiştirildi. En iç tabakanın yarıçapı 39 mm'den 23 mm'ye düşürülmüştür. Malzeme kalınlığı %1.15'ten %0.35'e düşürülmüştür. Bu iyileştirmelerle izlerin çözünürlüğü enine düzlemde 3 kat, boyuna düzlemde ise 6 kat artmıştır.

Pb-Pb etkileşmeleri için hızında maksimum 50 kHz'ye kadar sürekli okuma yapabilmektedir.

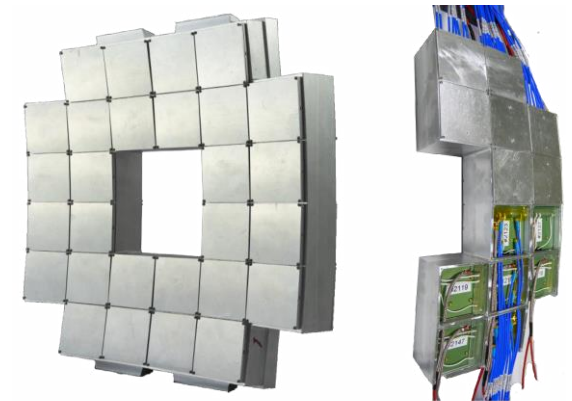
Veri okuma, sıkıştırma ve işleme için yeni bir entegre Çevrimiçi-Çevrimdışı sistem (O2) geliştirilmiştir.

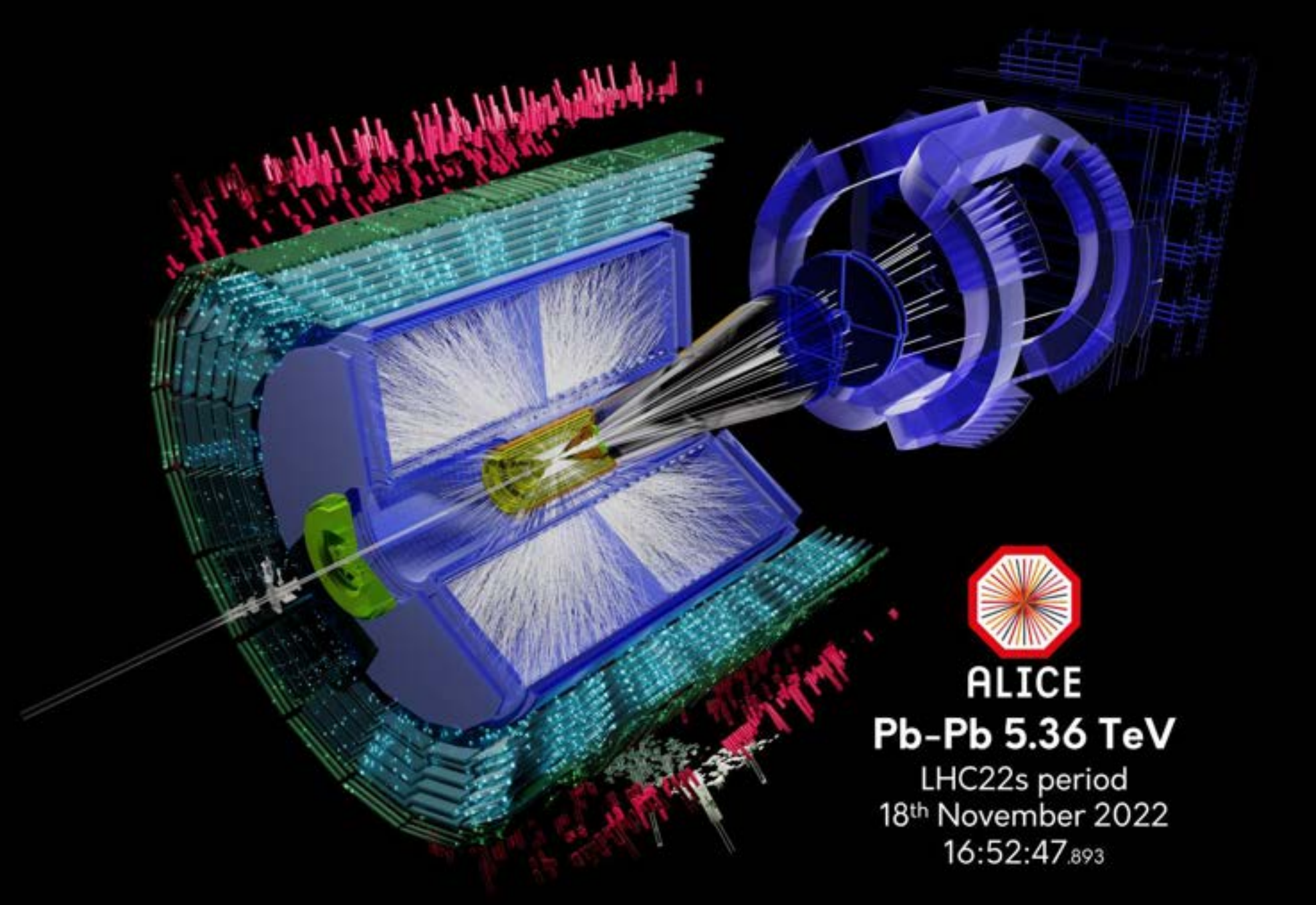


Yeni bir İleri Müyon İzleyicisi (MFT) kuruldu, bu izleyici, ITS'e benzer şekilde MAPS ile donatılmış beş çift taraflı algılama diski içermektedir.



Çerenkov ve sintilatör dedektörlerinden oluşan yeni bir Hızlı Etkileşme Tetikleme (FIT) dedektörü. Demet borusu etrafına ileri rapidite bölgesine eklendi.





**ALICE**

**Pb-Pb 5.36 TeV**

LHC22s period

18<sup>th</sup> November 2022

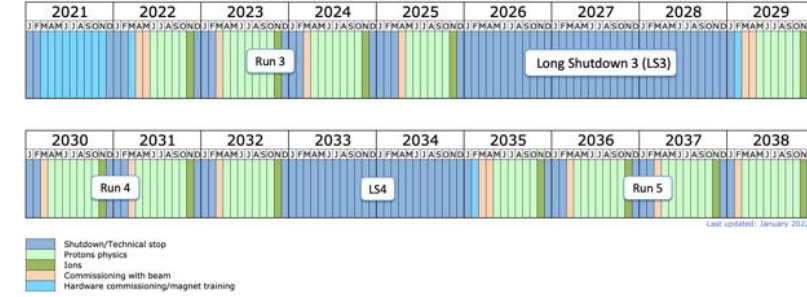
16:52:47.893

Yükseltilmiş ALICE Dedektörü, LHC'nin 3. Çalışma döneminin başlangıcından bu yana veri toplamaktadır.

Temmuz 2022 tarihinde  $\sqrt{s} = 13.6$  TeV enerjili proton-proton çarpışma verilerini toplamaya başladı.

Toplanan olay miktarı  $\sim 7 \times 10^{11}$

# ALICE 2 - Run4



Deneyin fiziksel etki alanını Run 4'te daha da artırmak için- 3. uzun kapanış sırasında (2026 – 2028) planlananlar

❑ İç İzleme sistemi için yeni bir iç oda.

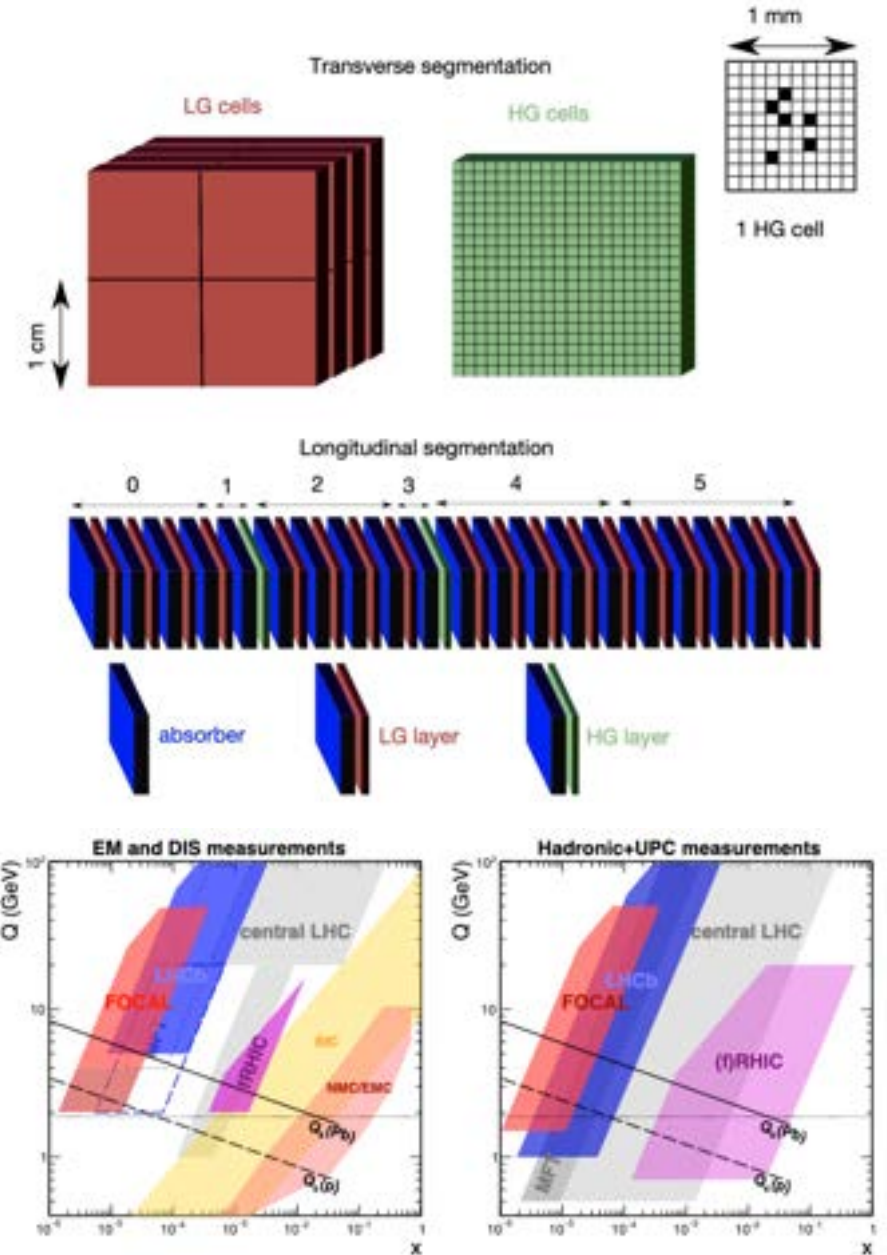
❑ Optimize foton algılaması için ileri bölge kalorimetresi.



ALICE

# FOCAL

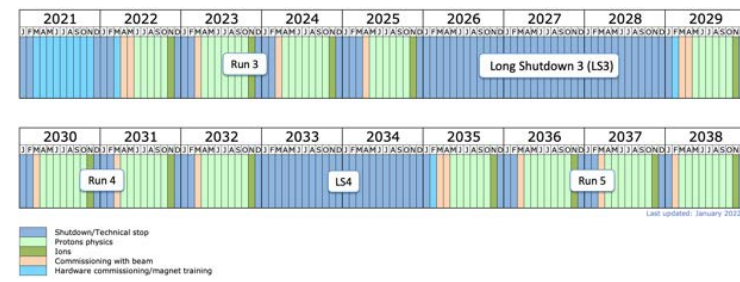
- $(3.4 < \eta < 5.8)$  bölgesinde yüksek okuma hızlı yeni bir elektromagnetik kalorimetre, varolan kalorimetre ile birleştirildi.
- Gerekli olan hassasiyet, MAPS ve standart silikon ped okuma düzlemlerinin bir kombinasyonu kullanılarak elde edildi.
- Bu kalorimetre ile kurşun çekirdeğinde gluon parton dağılım fonksiyonları, lineer olmayan QCD evrimi ve doygunluk etkileri çalışılmaktadır.
- FoCal dedektörünün fizik programı ileri bölge di-hadron korelasyonları, jet oluşumu, ve ileri bölge p-Pb ve Pb-Pb çarpışma ölçümlerini de kapsamaktadır.





ALICE

# ALICE@RUN-5 & 6



**Yüksek-hassasiyetli b kuark ölçümleri**- parton taşınımı, kollektif akış ve hadronizasyon ile ilgili sıkı bir bağlantı kurmak için.

**DD korelasyonları** - Farklı ortam içi enerji kaybı rejimleri arasındaki ayrımı yapmak ve büyüü kuarkların izotropik davranışın nedenini anlamak için.

**Çoklu-büyüü baryonlar, P-dalgası kurkonyum, egzotik hadronlar** – Hadron oluşumu

Elektromanyetik radyasyonun **Azimutal asimetrisi**.

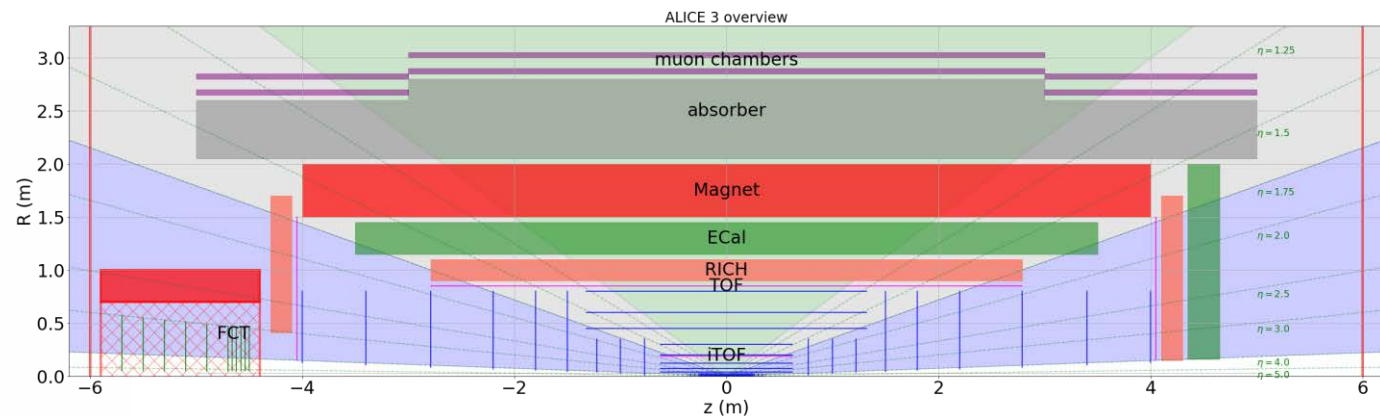
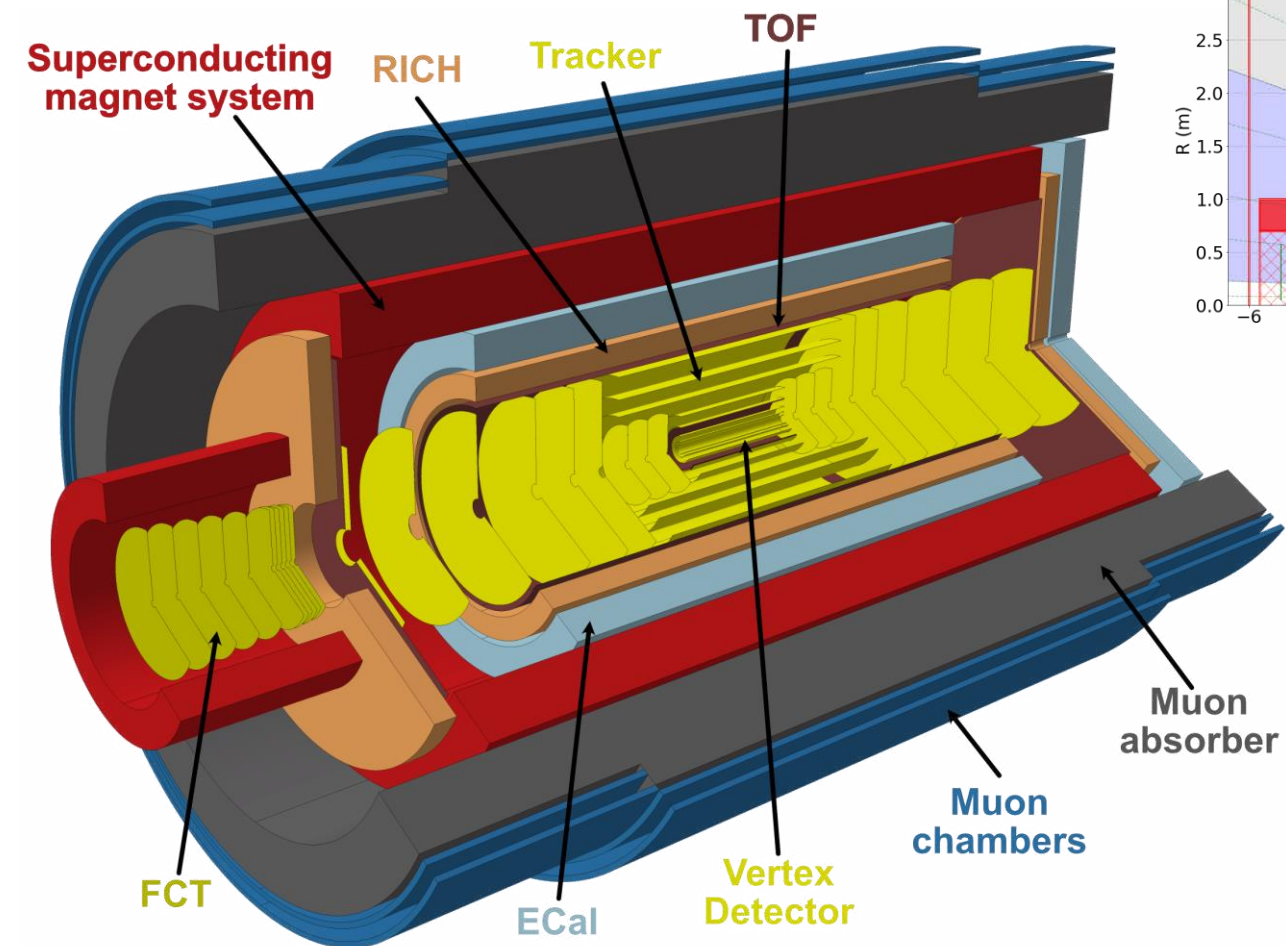
**Kiral simetri restorasyonu**.

**Küçük sistemlerde toplu hareketler**.

Observables	Kinematic range
Heavy-flavour hadrons	$p_T \rightarrow 0,$ $ \eta  < 4$
Dielectrons	$p_T \approx 0.05$ to $3 \text{ GeV}/c,$ $M_{ee} \approx 0.05$ to $4 \text{ GeV}/c^2$
Photons	$p_T \approx 0.1$ to $50 \text{ GeV}/c,$ $-2 < \eta < 4$
Quarkonia and exotica	$p_T \rightarrow 0,$ $ \eta  < 1.75$
Ultrasoft photons	$p_T \approx 1$ to $50 \text{ MeV}/c,$ $3 < \eta < 5$
Nuclei	$p_T \rightarrow 0,$ $ \eta  < 4$

Bu dönemde gerçekleşecek en yüksek LHC enerjilerindeki Pb-Pb çarpışmaları için toplanacak ışınlık değerinin  $35 \text{ nb}^{-1}$ , pp için ise  $18 \text{ fb}^{-1}$  olması hedeflenmektedir.

# ALICE 3 - Run 5 and 6



Component	Observables	Barrel ( $ \eta  < 1.75$ )	Forward ( $1.75 <  \eta  < 4$ )	Detectors
Vertexing	(Multi-)charm baryons, dielectrons	Best possible DCA resolution, $\sigma_{DCA} \approx 10 \mu\text{m}$ at $p_T = 200 \text{ MeV}/c$ , $\eta = 0$	Best possible DCA resolution, $\sigma_{DCA} \approx 30 \mu\text{m}$ at $p_T = 200 \text{ MeV}/c$ , $\eta = 3$	retractable Si-pixel tracker: $\sigma_{\text{sil}} \approx 2.5 \mu\text{m}$ , $R_{\text{sil}} \approx 5 \text{ mm}$ , $X/X_0 \approx 0.1\%$ for first layer
Tracking	(Multi-)charm baryons, dielectrons, photons ...	$\sigma_{p_T}/p_T \approx 1 - 2\%$		Silicon pixel tracker: $\sigma_{\text{sil}} \approx 10 \mu\text{m}$ , $R_{\text{sil}} \approx 80 \text{ cm}$ , $L \approx \pm 4 \text{ m}$ , $X/X_0 \approx 1\%$ per layer
Hadron ID	(Multi-)charm baryons	$\pi/K/p$ separation up to a few $\text{GeV}/c$		Time of flight: $\sigma_{\text{tof}} \approx 20 \text{ ps}$ RICH: $n \approx 1.006 - 1.03$ , $\sigma_n \approx 1.5 \text{ mrad}$
Electron ID	Dielectrons, quarkonia, $\chi_{c1}(3872)$	pion rejection by 1000x up to 2-3 $\text{GeV}/c$		Time of flight: $\sigma_{\text{tof}} \approx 20 \text{ ps}$ RICH: $n \approx 1.006 - 1.03$ , $\sigma_n \approx 1.5 \text{ mrad}$
Main ID	Quarkonia, $\chi_{c1}(3872)$	reconstruction of $J/\psi$ at rest, i.e. muons from $p_T \sim 1.5 \text{ GeV}/c$ at $\eta = 0$		steel absorber: $L \approx 70 \text{ cm}$ muon detectors
ECal	Photons, jets	large acceptance		Pb-Sci sampling calorimeter
ECal	$Z_0$	high-resolution segment		PbWO <sub>4</sub> calorimeter
Soft photon detection	Ultra-soft photons	measurement of photons in $p_T$ range 1-50 $\text{MeV}/c$		Forward conversion tracker based on silicon pixel tracker

# Özet (seçilmiş sonuçlar)

*LHC'deki Kuark Gluon Plazmasının termodinamik ve küresel özellikleri nelerdir?*

1. LHC, Kuark Gluon Plazmasını oluşturmak için gereken koşulları fazlasıyla sağlamaktadır.
2. Başlangıç QGP sıcaklığı  $\sim T_{pc} = 155\text{--}158$  MeV'de gerçekleşen ayrışma sıcaklığından 5 kat daha yüksektir.
3. En yüksek QGP enerji yoğunlukları  $\sim 1$  fm/c zamanında  $12$  GeV/fm<sup>3</sup>.
4. Donma hacmi yaklaşık  $7000$  fm<sup>3</sup> ve RHIC enerjilerinde ölçülenden iki kat daha yüksek.

*Planlanmış heyecan verici bir dizi güncelleme var - ALICE'den heyecan verici sonuçları takip etmeye devam edin.*

# Özet (seçilmiş sonuçlar)

*LHC'deki Kuark Gluon Plazmasının termodinamik ve küresel özellikleri nelerdir?*

1. LHC, Kuark Gluon Plazmasını oluşturmak için gereken koşulları fazlasıyla sağlamaktadır.
2. Başlangıç QGP sıcaklığı  $\sim T_{pc} = 155\text{--}158$  MeV'de gerçekleşen ayrışma sıcaklığından 5 kat daha yüksektir.
3. En yüksek QGP enerji yoğunlukları  $\sim 1$  fm/c zamanında  $12 \text{ GeV}/\text{fm}^3$ .
4. Donma hacmi yaklaşık  $7000 \text{ fm}^3$  ve RHIC enerjilerinde ölçülenden iki kat daha yüksek.

*QGP'nin hidrodinamik ve taşıma özellikleri nelerdir?*

1. Sistem, QGP sıcaklık ölçeğinde güçlü kuvvetle çiftlenmiştir.
2. Entropi yoğunluğu üzerinden elde edilen kayma viskozitesi ( $\eta/s$ ) değerleri  $1/4\pi < \eta/s < 0.3$  bölgesindedir.
3. Büyülü kuarkların uzaysal difüzyon katsayısı  $D_s$   $1.5 < 2\pi D_s(T)T < 4.5$  aralığındadır. QGP içindeki büyümlü kuarkların düşük momentum bölgesinde güçlü kuvvetle çiftlendiğinin kanıtıdır.

*Planlanmış heyecan verici bir dizi güncelleme var - ALICE'den heyecan verici sonuçları takip etmeye devam edin.*

# Özet (seçilmiş sonuçlar)

*LHC'deki Kuark Gluon Plazmasının termodinamik ve küresel özellikleri nelerdir?*

1. LHC, Kuark Gluon Plazmasını oluşturmak için gereken koşulları fazlasıyla sağlamaktadır.
2. Başlangıç QGP sıcaklığı  $\sim T_{pc} = 155-158$  MeV'de gerçekleşen ayrışma sıcaklığından 5 kat daha yüksektir.
3. En yüksek QGP enerji yoğunlukları  $\sim 1$  fm/c zamanında  $12 \text{ GeV}/\text{fm}^3$ .
4. Donma hacmi yaklaşık  $7000 \text{ fm}^3$  ve RHIC enerjilerinde ölçülenden iki kat daha yüksek.

*QGP'nin hidrodinamik ve taşıma özellikleri nelerdir?*

1. Sistem, QGP sıcaklık ölçeğinde güçlü kuvvetle çiftlenmiştir.
2. Entropi yoğunluğu üzerinden elde edilen kayma viskozitesi ( $\eta/s$ ) değerleri  $1/4\pi < \eta/s < 0.3$  bölgesindedir.
3. Büyülü kuarkların uzaysal difüzyon katsayısı  $D_s$   $1.5 < 2\pi D_s(T)T < 4.5$  aralığındadır. QGP içindeki büyümlü kuarkların düşük momentum bölgesinde güçlü kuvvetle çiftlendiğinin kanıtıdır.

*QGP, hadron oluşumunu nasıl etkiler?*

1. İstatistiksel hadronizasyon modelleri, çeşitli ve ağır çeşnili hadronların ürün miktarlarını açıklayabilmektedir.
2. Kimyasal donma noktası sıcaklığı  $156 \text{ MeV}$  civarındadır. Bu durum kimyasal dengenin QGP hadronize olduktan sonra devam ettirelemeyeceğinin bir işaretidir.
3. Rezonans parçacık ve femtoskopik yarıçap ölçümleri hadronik fazın uzamış bir süreç olduğunu göstermektedir.
4. Bütün parçacıklar tek bir donma noktasında değil, farklı sıcaklıklarda oluşmaktadır.

*Planlanmış heyecan verici bir dizi güncelleme var - ALICE'den heyecan verici sonuçları takip etmeye devam edin.*



Çok daha fazla sonuç!!!!

The ALICE experiment:  
**A journey through QCD**

ALICE, Eur. Phys. J. C 84 (2024) 813



ALICE

# Teşekkürler

