

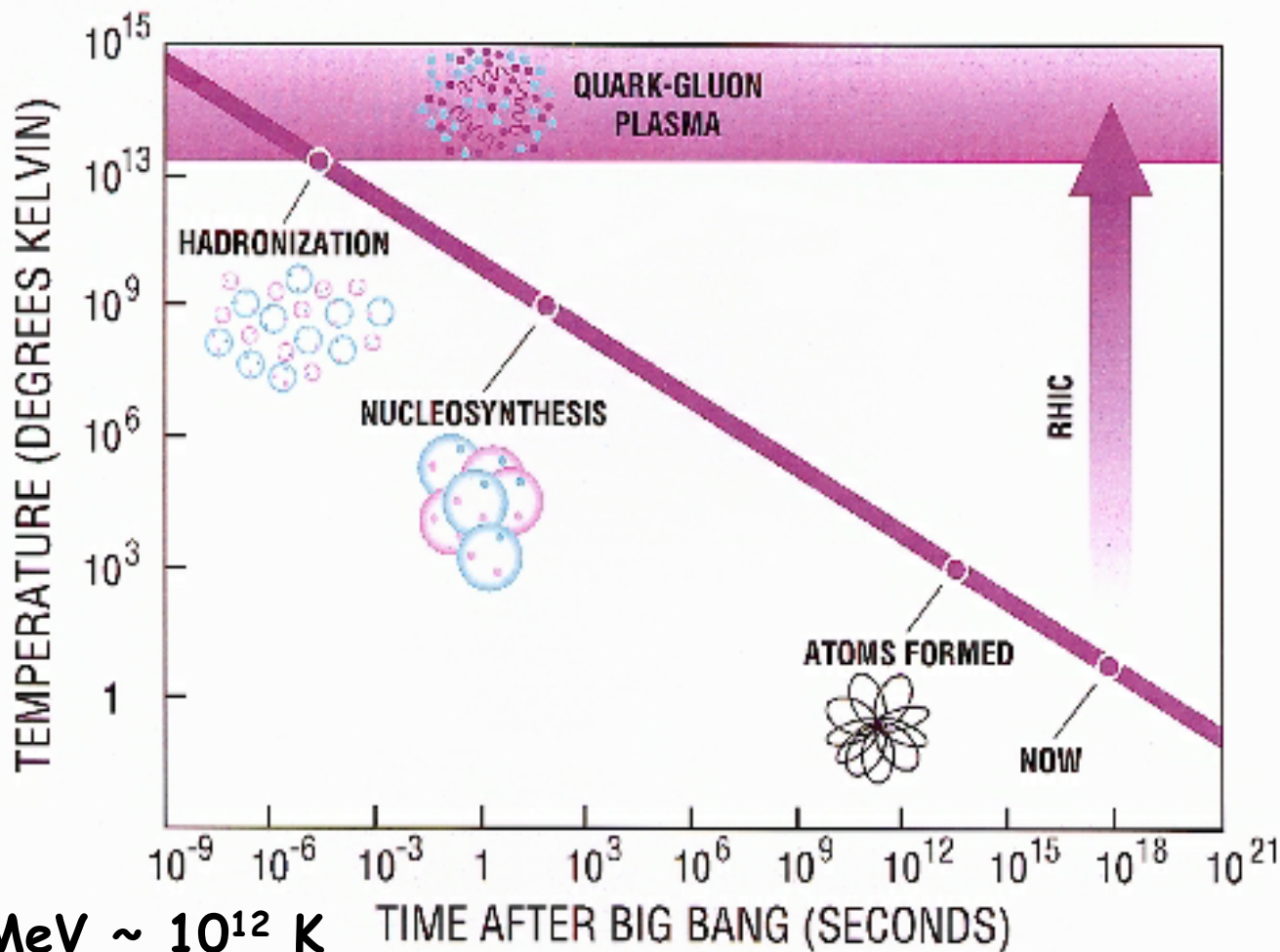
Fizyka zderzeń relatywistycznych ciężkich jonów

- Wykład 0: LHC – okno na Mikroświat
- Wykład 1: AA: Motywacja, cele fizyczne, akceleratorzy, eksperymenty
- Wykład 2: **Plazma kwarkowo-gluonowa**
- Wykład 3: Geometria zderzenia, stan początkowy-gęstość energii, produkcja entropii
- Wykład 4: Ewolucja systemu – efekty kolektywne
- Wykład 5: Procesy z dużym przekazem pędu
- Wykład 6: Eksperyment PHOBOS przy akceleratorze RHIC
- Wykład 7: Fizyka ciężkich jonów w eksperymencie ATLAS (LHC)

Plazma Kwarkowo-Gluonowa

- Krótka historia Wszechświata
- Stany skupienia materii
- Kwarki i gluony
- QGP - przejście fazowe, diagram fazowy
- Sygnatury plazmy kwarkowo-gluonowej
- Trochę historii:
SPS-eksperymenty, sygnały plazmy?

Temperatura w czasie ewolucji Wszechświata



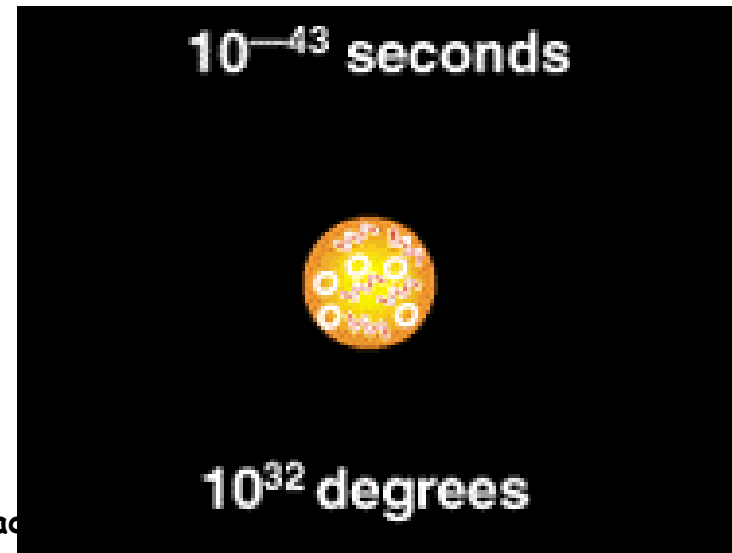
$T \sim 150 \text{ MeV} \sim 10^{12} \text{ K}$
 $1 \text{ eV} = 11,600 \text{ K}$

Krótką historia Wszechświata

10^{-43} s

- Nie potrafimy opisać Wszechświata w tej fazie.
- Wszechświat rozszerza się bardzo szybko (inflacja).
- Nerozróżnialne oddziaływania (unifikacja) są w równowadze z materią i antymaterią.

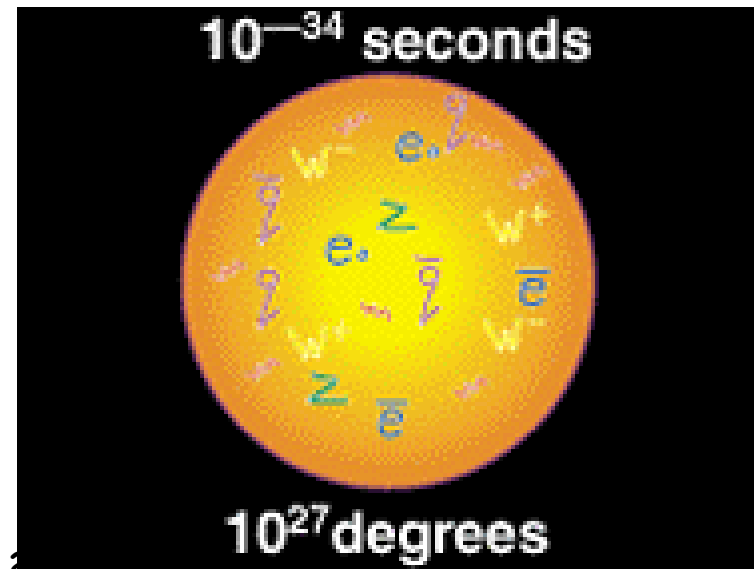
Temperatura 10^{32} K



$$\underline{10^{-34} \text{ s}}$$

- Dalsze rozszerzanie - maleje gęstość i temperatura.
- Oddziaływanie silne oddziela się od oddziaływań elektro-słabych.
- Materia w postaci **plazmy kwarkowo-gluonowej**.

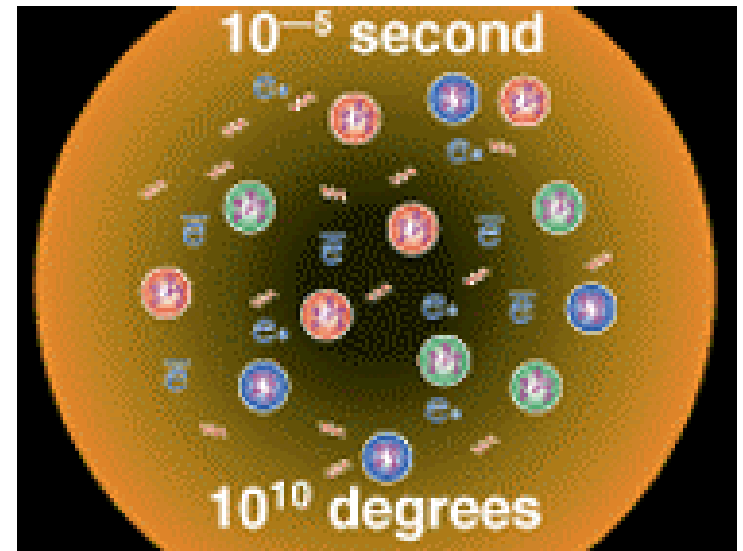
Temperatura 10^{27} K



10^{-5} s

- Kwarki łączą się w protony i neutrony (hadronizacja)
- Antymateria zaczyna zanikać - promieniowanie ma zbyt małą energię, aby ją wytwarzać.

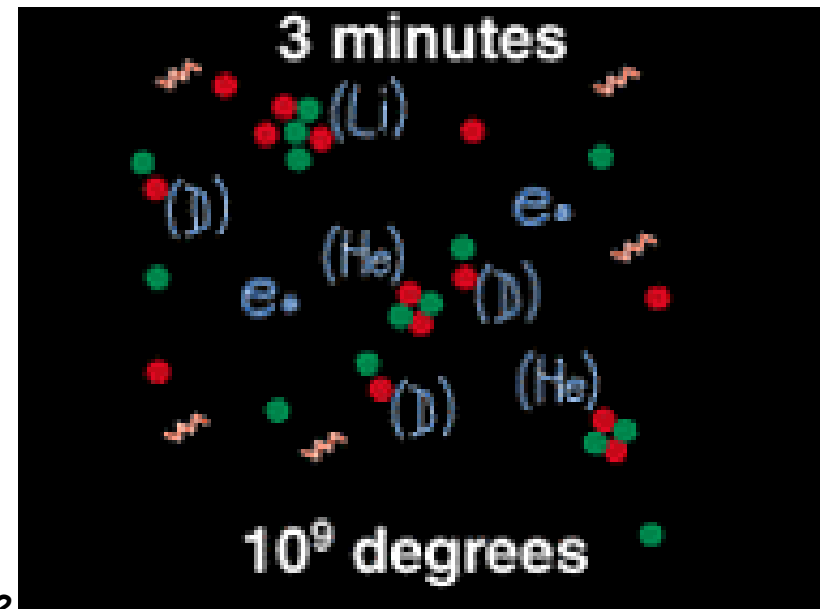
Temperatura 10^{10} K



3 minuty

- Protony i neutrony tworzą lekkie jądra (D, He, Li).
- Ustala się zawartość lekkich izotopów we Wszechświecie.

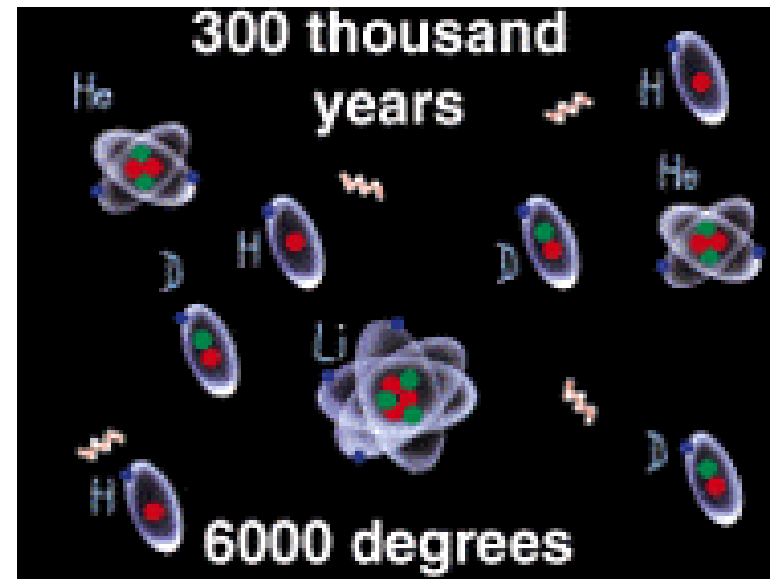
Temperatura 10^9 K



300 000 lat

- Powstają atomy - elektrony zostają wychwycone przez jądra.
- Materia staje się przezroczysta dla fotonów.
- Z tego okresu pochodzi obserwowane obecnie promieniowanie reliktowe.

Temperatura 6000 K



1 000 000 000 lat

- Powstawanie galaktyk i gwiazd.
- Synteza jądrowa w gwiazdach - powstawanie pierwiastków ciężkich.

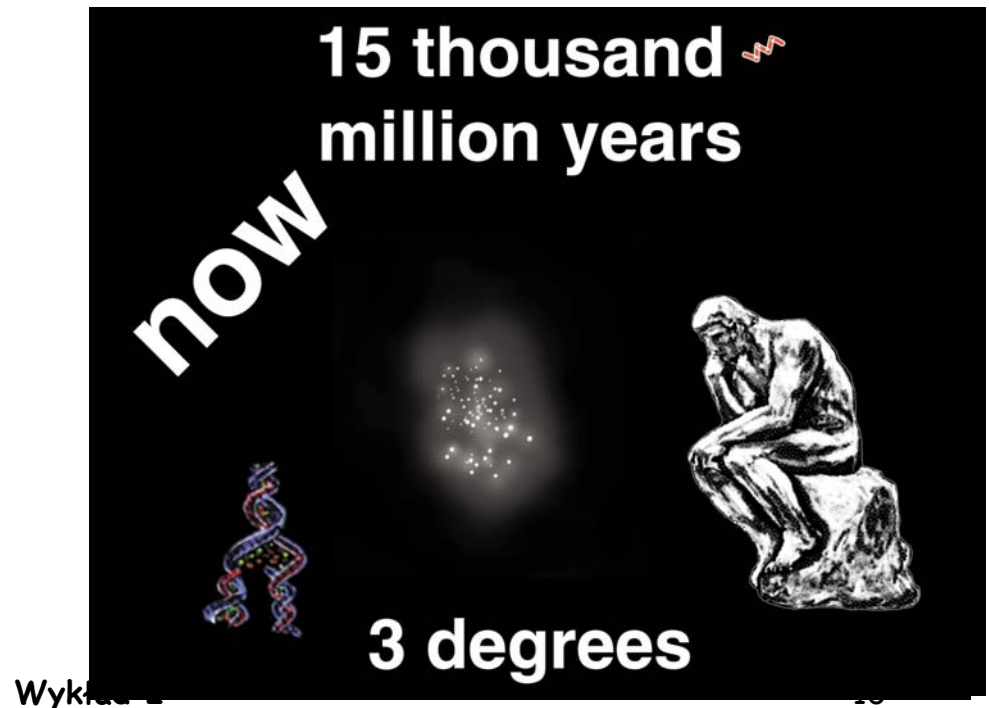
Temperatura 18 K



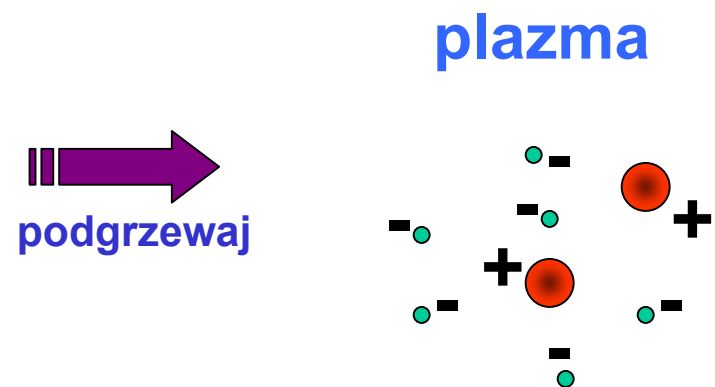
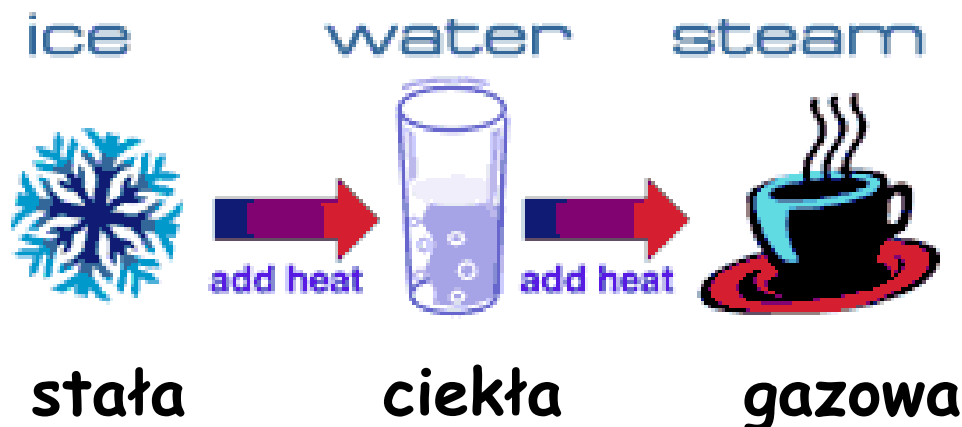
15 000 000 000 lat

- Chwila obecna

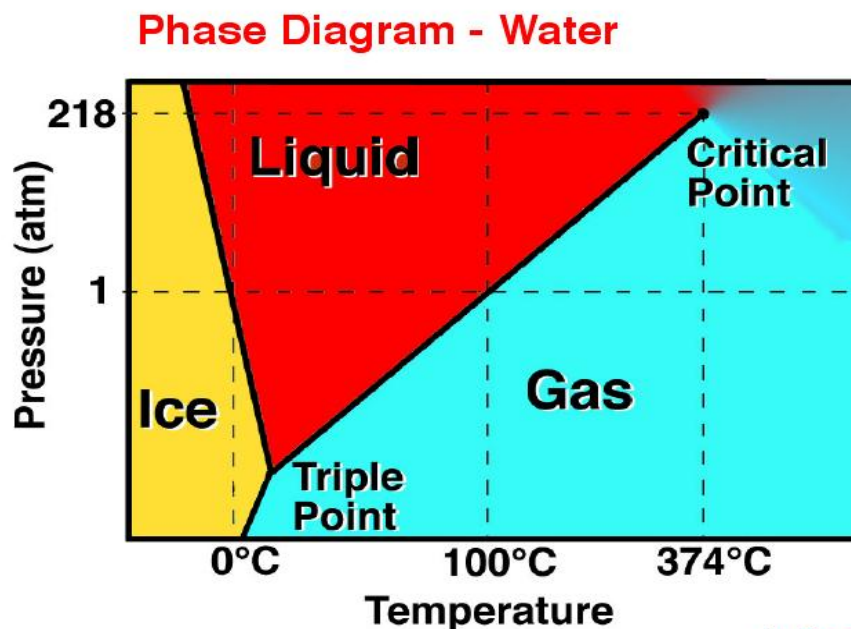
Temperatura 2,7 K



Fazy zwykłej materii

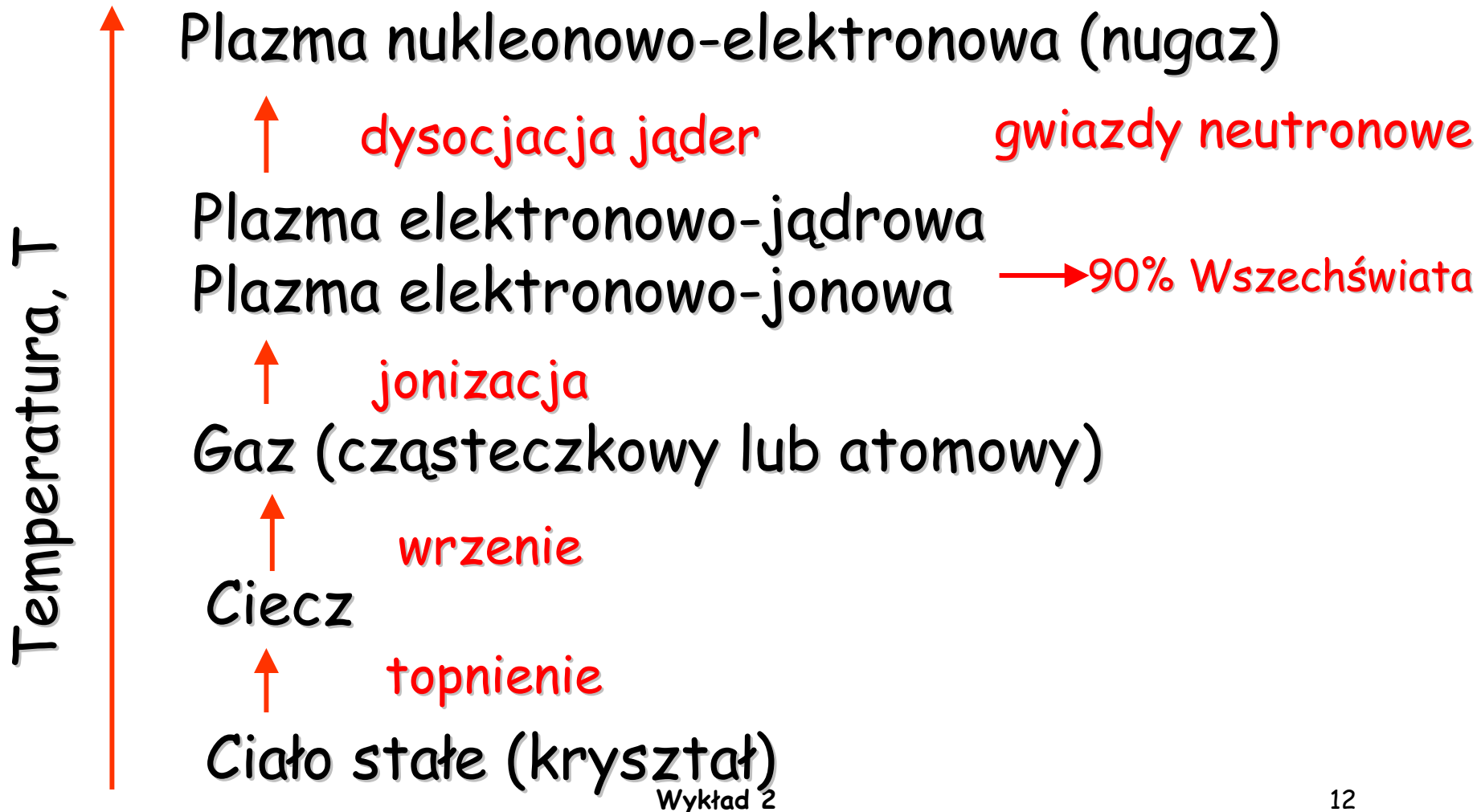


Gaz elektronowy



Oddziaływania elektromagnetyczne są odpowiedzialne za stany fazowe zwykłej materii.

Stany skupienia (fazy) materii



Czy to już koniec?

Nukleony posiadają strukturę! **kwarki + gluony**

Co się stanie, gdy „podgrzejemy” nukleony lub mezony?

nukleony → „biały” gaz kwarkowo-gluonowy
o niezerowej liczbie barionowej

mezony → „biały” gaz kwarkowo-gluonowy
o zerowej liczbie barionowej

Temperatura, T

Plazma kwarkowo-gluonowa (QGP)

↑ dysocjacja nukleonów lub mezonów

Plazma nukleonowo-elektronowa (nugaz)

↑ dysocjacja jąder gwiazdy neutronowe

Plazma elektronowo-jądrowa

Plazma elektronowo-jonowa → 90% Wszechświata

↑ jonizacja

Gaz (cząsteczkowy lub atomowy)

↑ wrzenie

Ciecz

↑ topnienie

Ciało stałe (kryształ)

Kwarki i gluony

M. Gell-Mann - wszystkie cząstki można złożyć z kwarków
(qqq, qqbar)

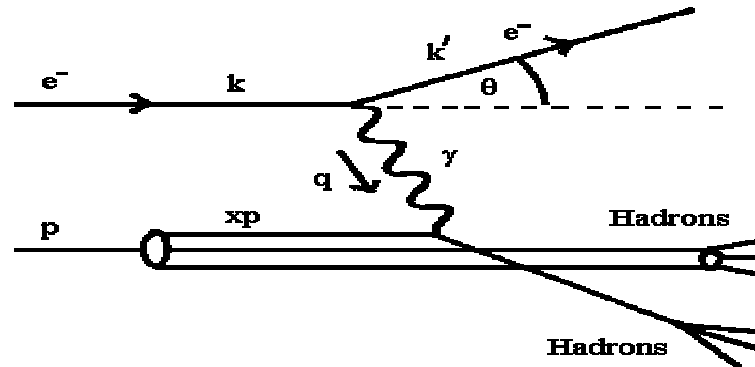
Obiekty matematyczne czy fizyczne?
Dlaczego ich nie widać???

Potencjał kwark-antykwar

$$V(r) = -\frac{\alpha}{r} + \sigma \cdot r$$

Oddziaływanie silne znika na
małych odległościach
(asymptotyczna
swoboda)

Rozpraszanie głęboko-nieelastyczne

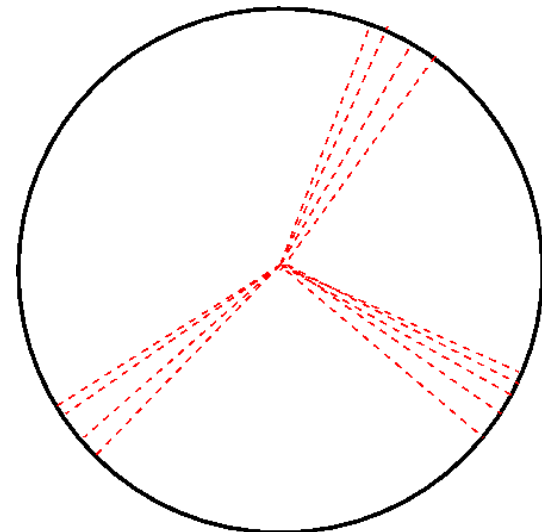
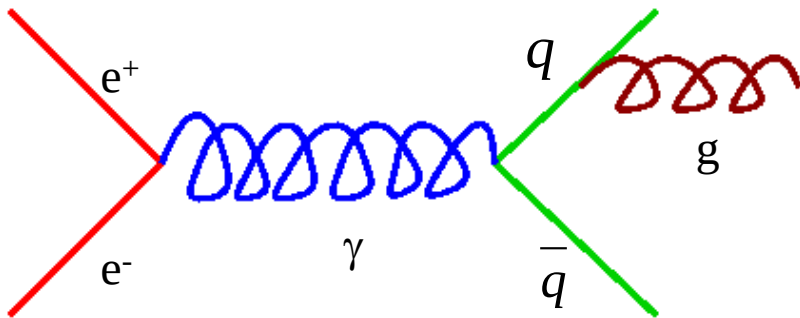
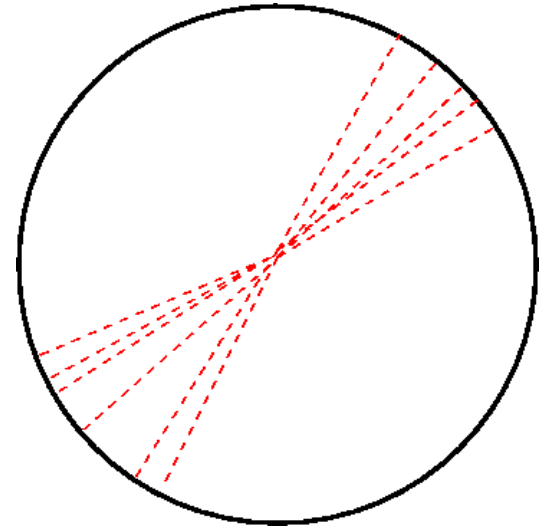
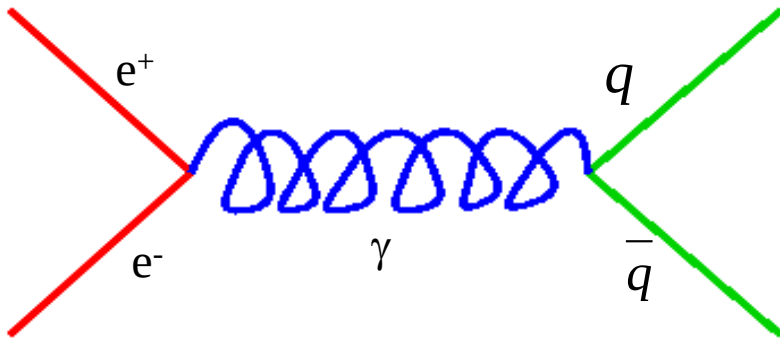


DIS (elektron+proton) - proton ma strukturę,
3 ziarna o ładunkach $2/3$, $2/3$ i $-1/3$

Kwarki niosą tylko połowę pędu nukleonu...

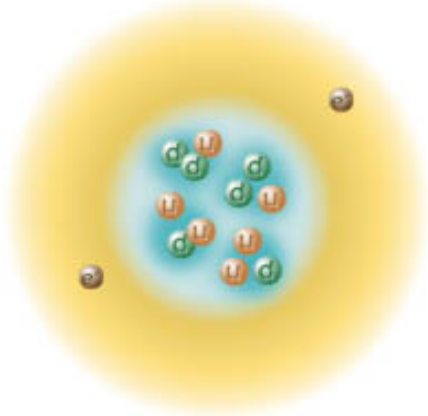
Muszą istnieć cząstki zapewniające oddziaływania między kwarkami i niosące połowę pędu cząstki - gluony.

Odkrycie gluonów - PETRA

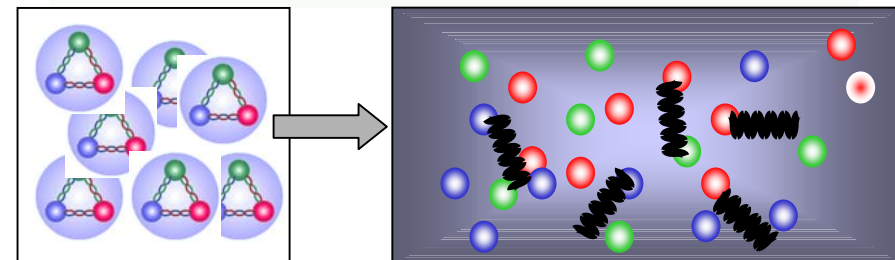
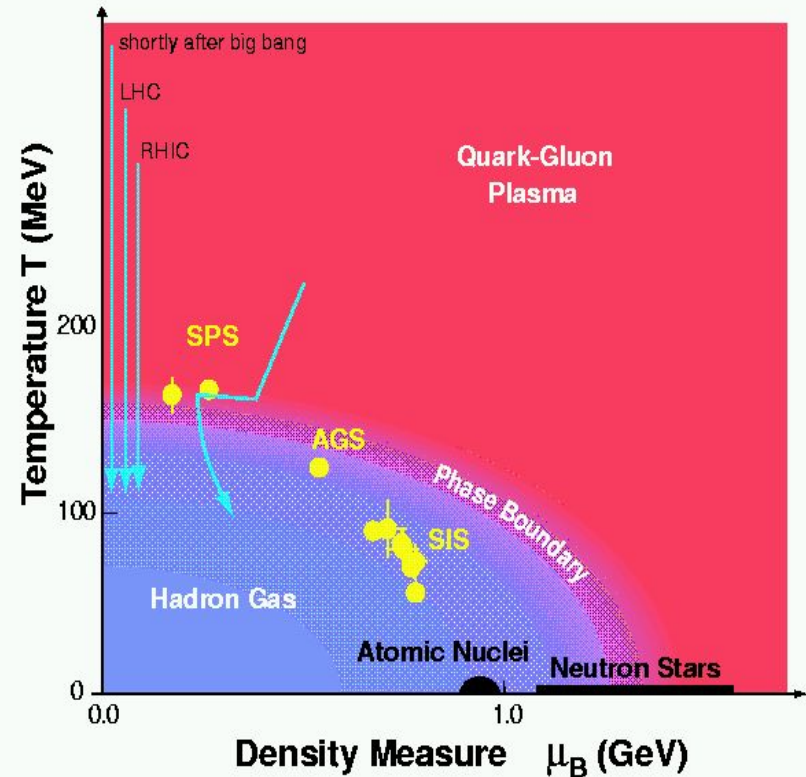


Fazy materii silnie oddziaływującej

Analogiczne stany do stanów zwykłej materii!



- Jądra zachowują się jak ciecz
- Nukleony zachowują się jak gaz
- **Plazma kwarkowo-gluonowa**
 - "Jonizacja" nukleonów przez podgrzewanie
 - "Kompresja" nukleonów , zwiększanie gęstości



Przemiany fazowe

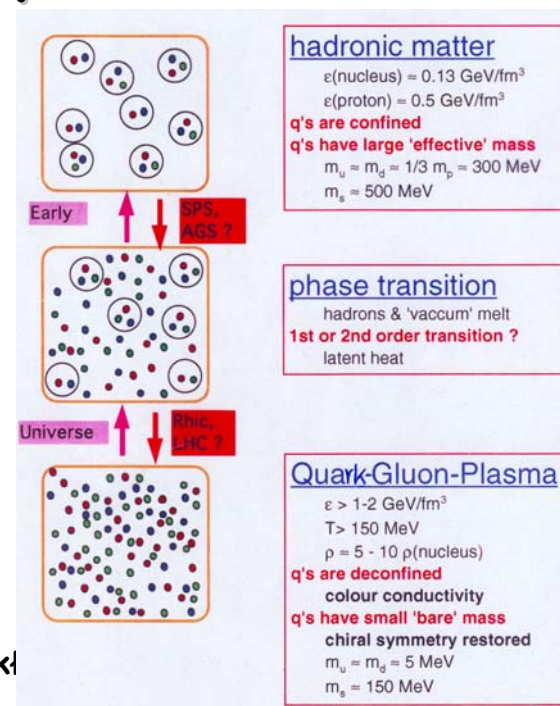
Pierwszego rodzaju:

- skokowa zmiana funkcji stanu np. energii wewnętrznej, entropii

Drugiego rodzaju:

- skokowa zmiana pochodnej funkcji stanu, np. ciepła właściwego czy współczynnika rozszerzalności cieplnej

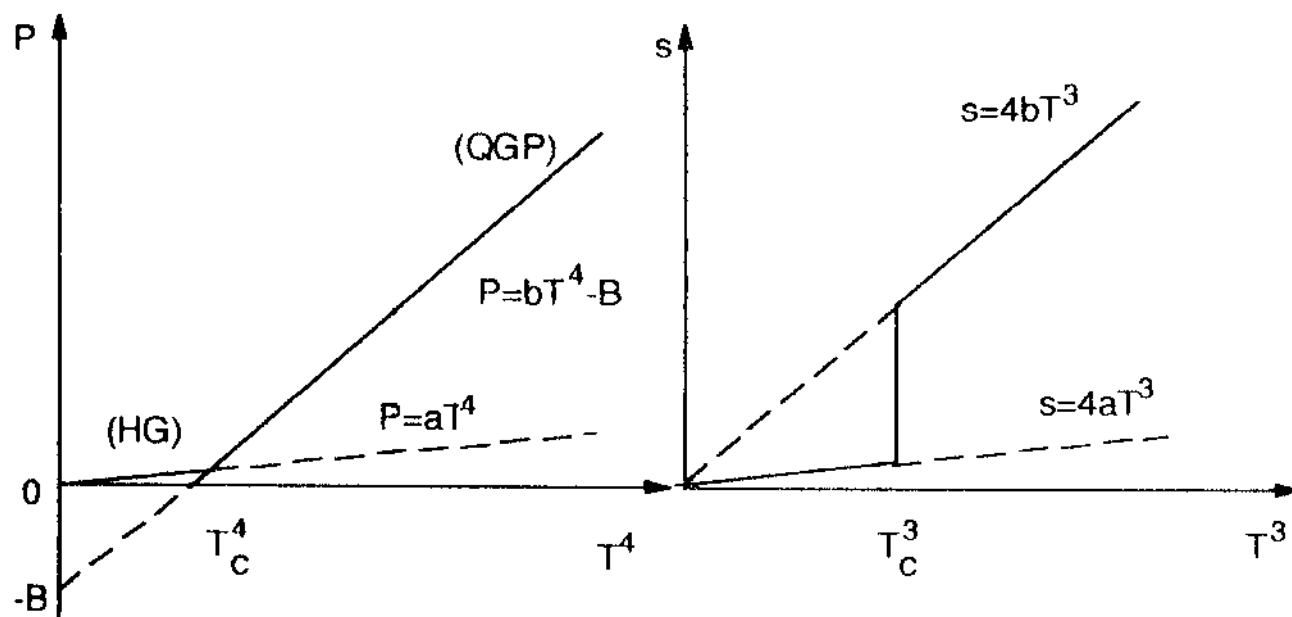
Jakiego rodzaju jest przejście
materia hadronowa -
plazma kwarkowo-
gluonowa?



Model „worków”

Wizualizacja uwięzienia kwarków:

- Elastyczny worek, w którym kwarki mogą się poruszać swobodnie, jeżeli nie staramy się ich wydobyć z worka.
- Jeżeli chcemy wyciągnąć kwark z worka, to worek usztywnia się i nie pozwala na to.



Lagranżjan QCD

$$\mathcal{L}_{\text{QCD}} = \sum_j \bar{q}_j^k (i\gamma^\mu (D_\mu)_{kl} - m_j \delta_{kl}) q_j^l - \frac{1}{4} F_{\mu\nu}^a F_a^{\mu\nu}$$

q_j^k - pola kwarkowe; j - zapach (m_j); k - kolor

γ^μ - macierze Diraca

D_μ - pochodna kowariantna

F - tensory siły pól gluonowych

$$(D_\mu)_{kl} = \delta_{kl} \partial_\mu + i \frac{g_s}{2} \cdot \sum_\alpha \lambda_{kl}^\alpha A_\mu^\alpha$$

$$\alpha_s = g_s / 4\pi$$

stała sprzężenia oddziaływań silnych

$$\alpha_s(Q^2) = \frac{4\pi}{\beta_0 \ln(Q^2 / \Lambda^2)}$$

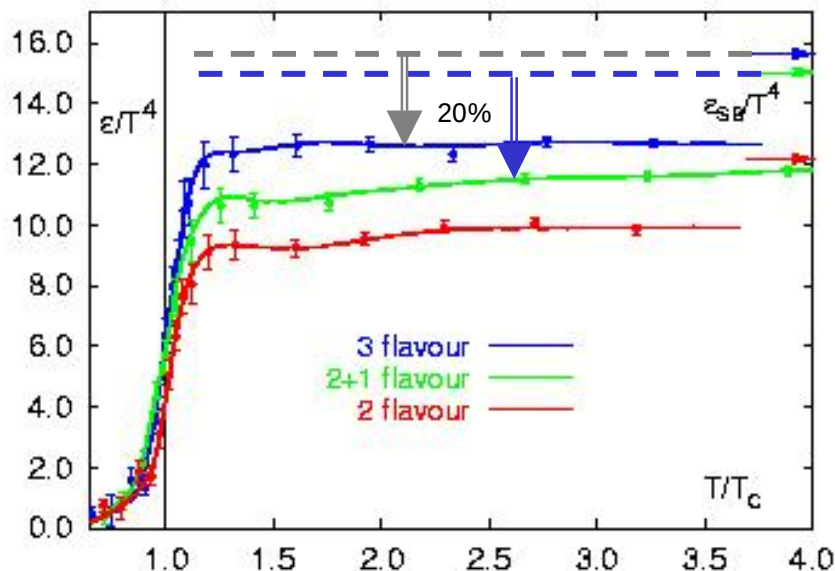
$$\beta_0 = 11 - \frac{2}{3} n_f$$

QCD na sieciach:

$\mathcal{L}_{\text{QCD}}$ zdefiniowany na dyskretnej sieci czaso-przestrzennej

QCD: przewidywania dla zderzeń A+A

Rachunki QCD na sieciach:



- Zmienne termodynamiczne osiągają 80% wartości charakterystycznej dla idealnego gazu nie oddziałujących cząstek (granica Stefan-Boltzmann'a).

- Gwałtowny wzrost gęstości energii, ϵ (T) przy temperaturze

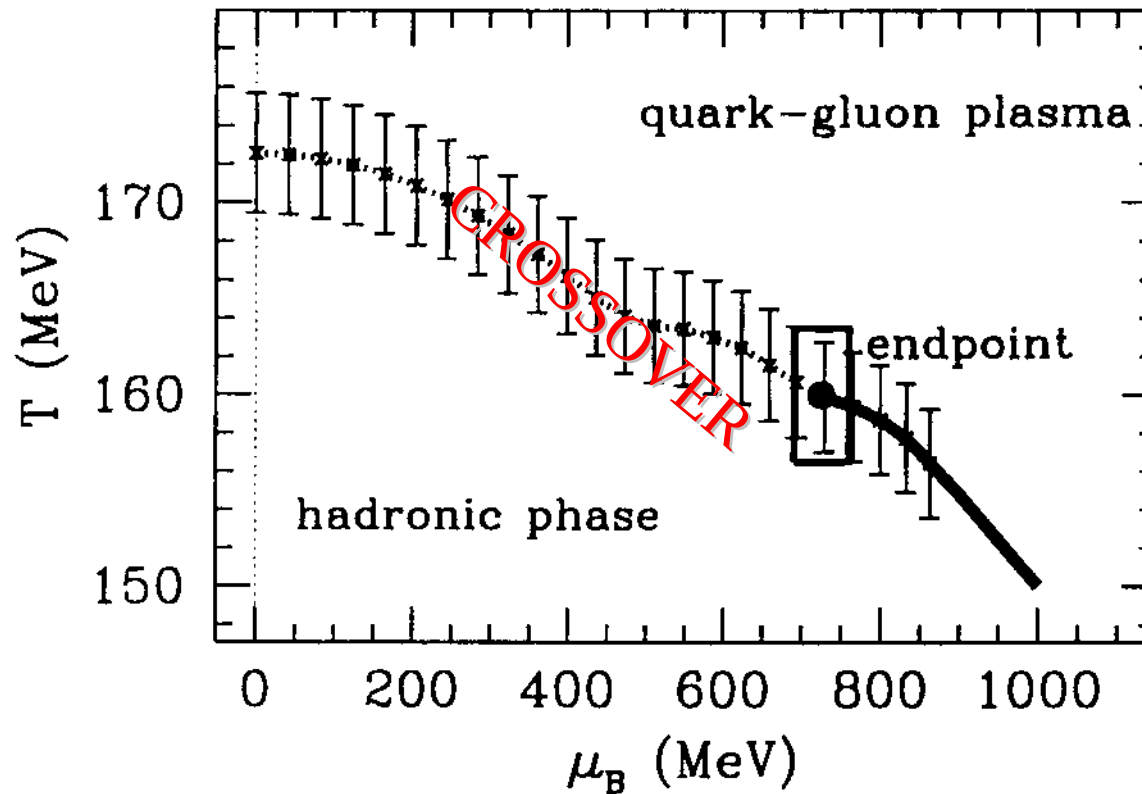
$$T_{\text{crit}} = 191 \pm 8 \text{ MeV}$$

$$\epsilon_{\text{crit}} = 0.7 \pm 0.2 \text{ GeV/fm}^3$$

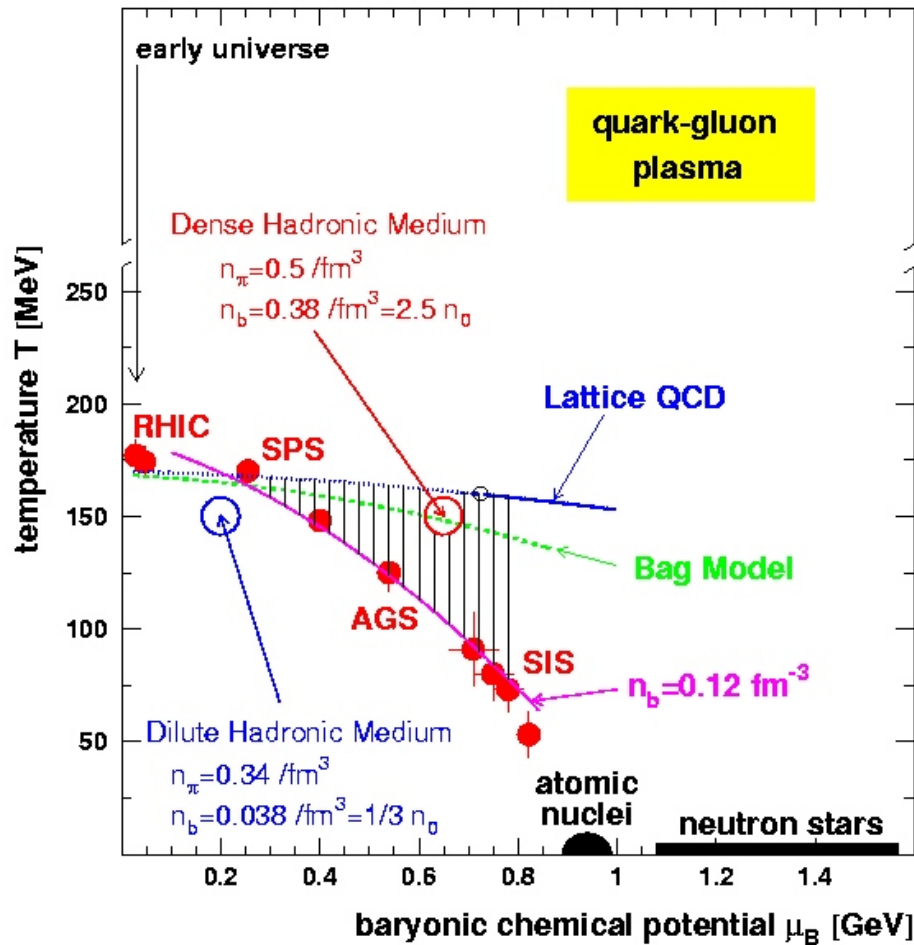
- Wzrost gęstości energii jest związany ze wzrostem liczby stopni swobody
- Materia istnieje w dwóch różnych fazach powyżej i poniżej T_{crit} , ϵ_{crit} .

***Kreacja nowego stanu materii,
tzw. Plazmy Kwarkowo-Gluonowej (QGP),
złożonego ze swobodnych kwarków i gluonów***

QCD na siatkach



QCD na siatkach



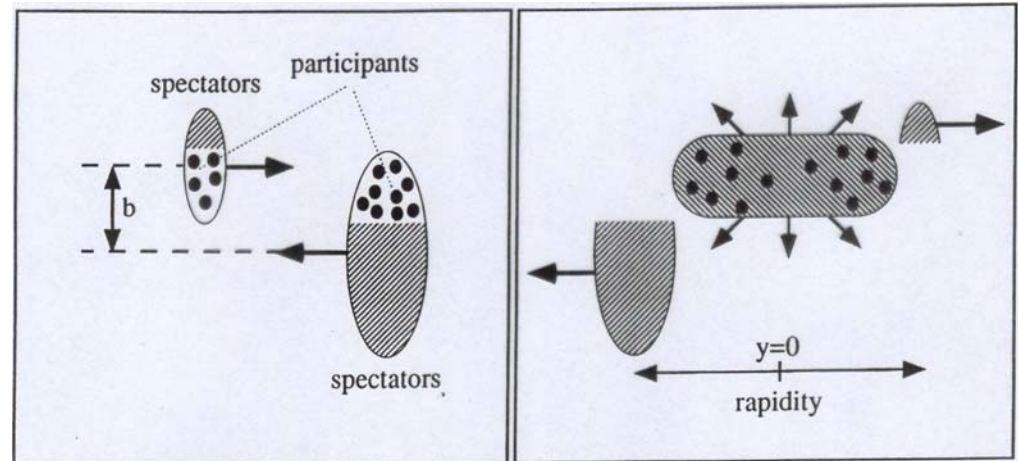
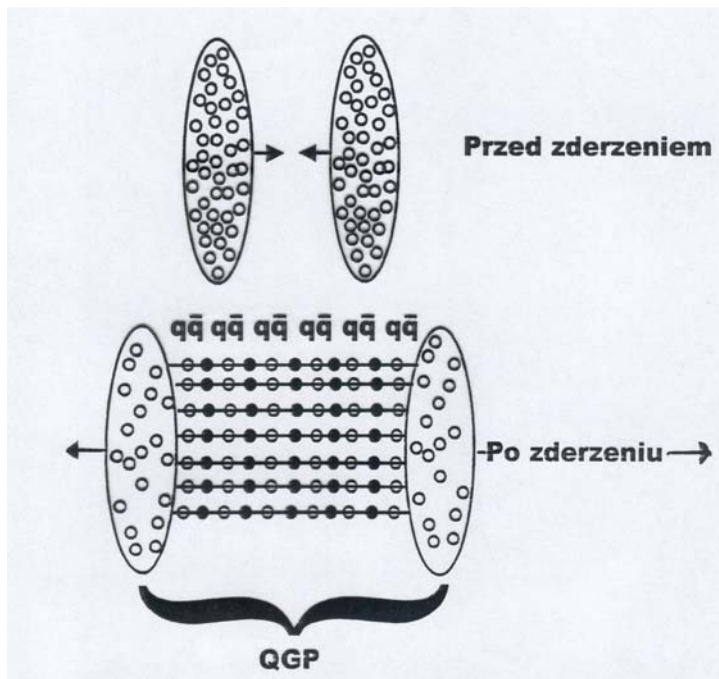
Raczej crossover niż klasyczne przejście fazowe

Poszukiwania QGP

Najlepiej „sprasować” obiekty zawierające wiele kwarków



jądra atomowe



Jak szukamy plazmy kwarkowo-gluonowej?

Sygnały formacji plazmy kwarkowo-gluonowej

Sygnatura	Badany proces	Eksp. obserwacje
Globalne własności	Gęstość stanu początkowego	Krotności produkowanych cząstek, gęstość energii
Tłumienie produkcji mezonów wektorowych J/Ψ , (upsilon)	Cieniowanie par $c\bar{c}$ przez otaczające kwarki	Tłumienie prawdopodobieństwa produkcji J/Ψ
Wzmocnienie produkcji powabnych cząstek	Fuzja gluonów na pary $c\bar{c}$	Energetyczne pojedyncze leptony, pary leptonów, rozpady mezonów D
Emisja termicznych γ , i l^+l^-	Anihilacja par $q\bar{q}$	Pary leptonów o niskich energiach, nisko-energetyczne fotony

Sygnały formacji plazmy kwarkowo-gluonowej

Sygnatura

Badany proces

Eksp. obserwacje

Masy mezonów

Przywrócenie symetrii chiralnej dla ϕ i ρ mezonów

Modyfikacje masy i szerokości kanałów rozpadu

Wzmocniona produkcja dziwności

Produkcja dodatkowych dziwnych kwarków w plazmie.

Zwiększona krotność mezonów i barionów zawierających dziwne kwarki.

Straty energii q/g w gęstym ośrodku (jet quenching)

Własności ośrodka przez który przechodzą q/g .

Spadek produkcji jetów o dużych pędach.

Zachowanie kolektywne

Czy stan QGP jest w równowadze termicznej ?

Krotności hadronów
Anizotropie azymutalne

Sygnały formacji plazmy kwarkowo-gluonowej

Sygnatura

Badany proces

Eksp. obserwacje

Fluktuacje w rozkładach produkowanych cząstek

Krople plazmy

Struktura w rozkładach kątowych hadronów

Czas emisji hadronów

Hadrony emitowane powoli jeżeli czas życia fazy mieszanej jest długi

Korelacje dwucząstkowe, pomiary interferometrii HBT.

Występowanie fluktuacji izospinowych

Przywrócenie symetrii chiralnej (gwałtowne)

Nietypowy stosunek naładowanych do neutralnych nisko-energetycznych pionów.

CERN - akcelerator SPS

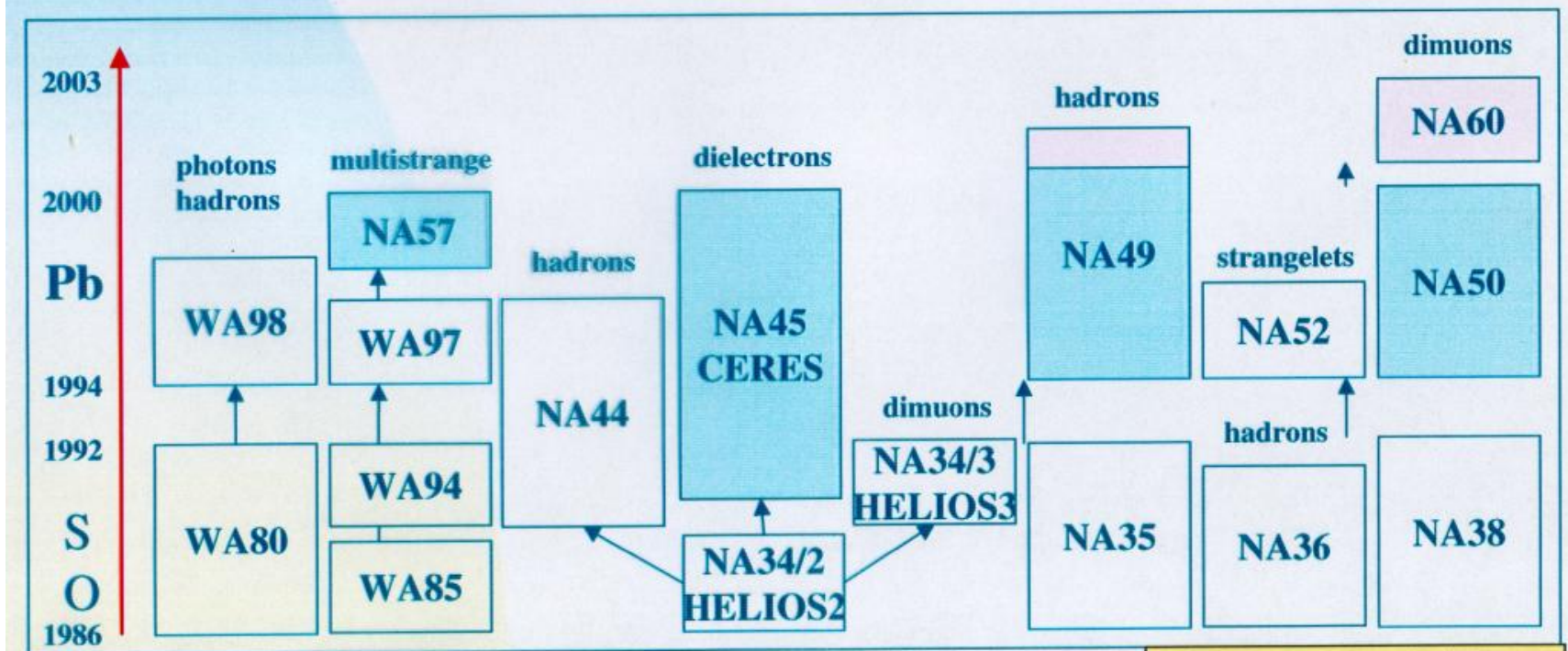
- Supersynchrotron protonowy jest akceleratorem kołowym o obwodzie 6 kilometrów. Został zbudowany do przyspieszania protonów. Następnie używany był jako akcelerator ciężkich jonów a obecnie do wstępnego przyspieszania protonów przed wstrzyknięciem ich do akceleratora LHC.
- Jako zderzacz protonów i antyprotonów w latach 80-tych dostarczył CERN-owi jednego z najwspanialszych momentów - pierwszej obserwacji cząstek W i Z, czyli nośników słabych oddziaływań.
- SPS przyspiesza jony ołowiu (z 208 nukleonami w jądrze ołowiu) do energii 160 GeV na nukleon, pozwalając na badanie plazmy kwarkowo-gluonowej, która mogła istnieć zaraz po Wielkim Wybuchu.

CERN-SPS: eksperymenty na stałej tarczy

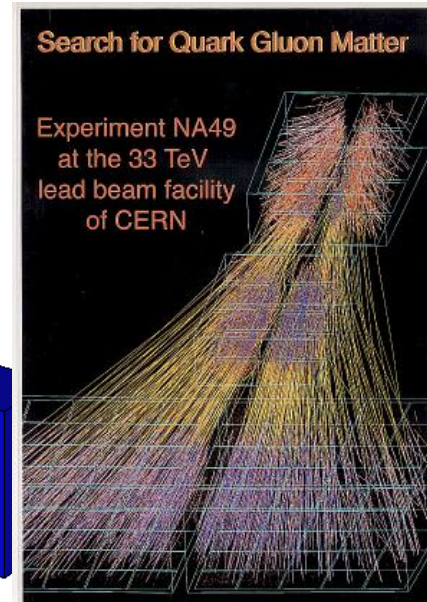
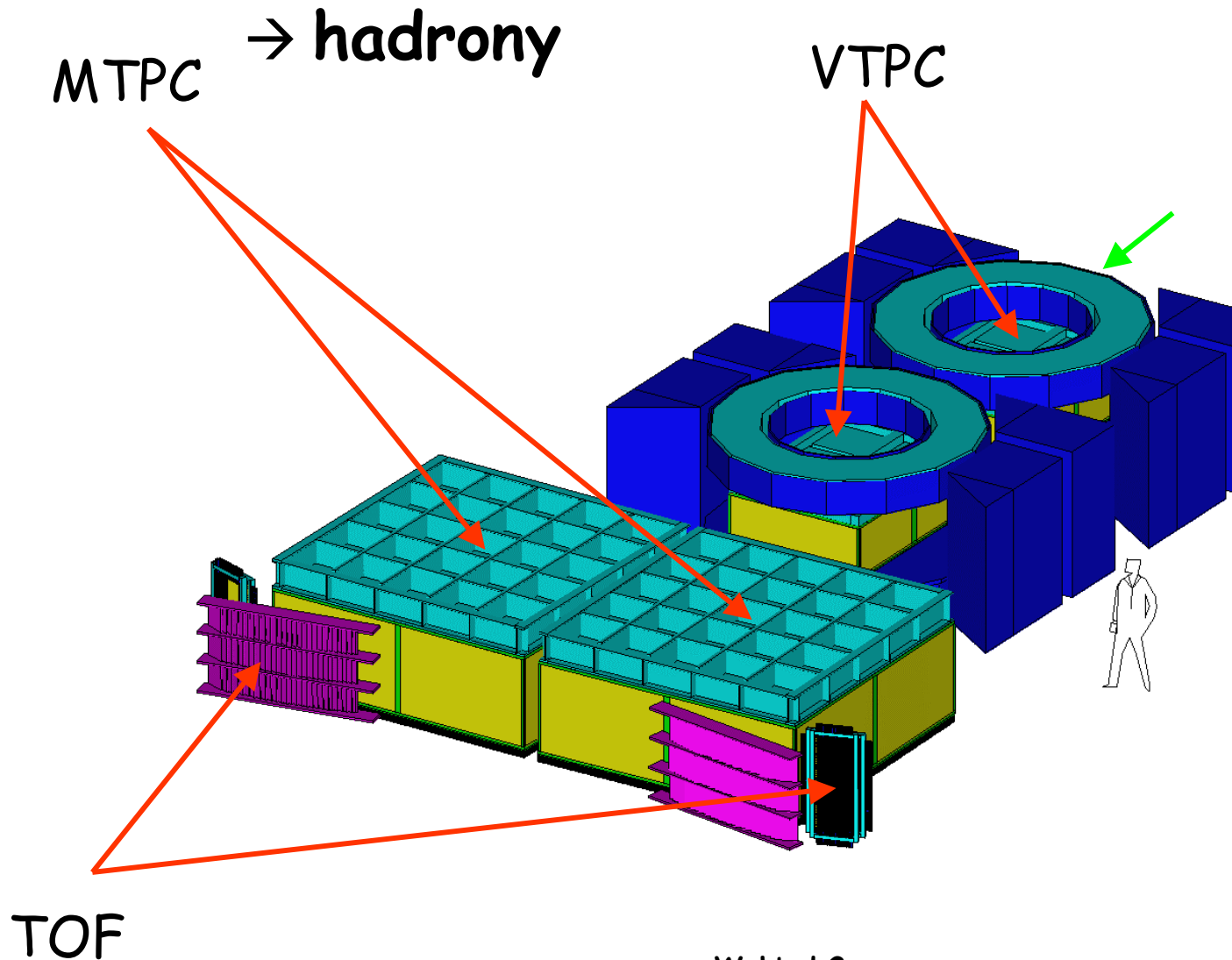
The SPS Experiments

- 1986 - 1987 : Oxygen @ 60 & 200 GeV/nucleon
- 1987 - 1992 : Sulphur @ 200 GeV/nucleon
- 1994 - 2000 : Lead @ 40, 80 & 158 GeV/nucleon
- 2002 - 2003 : Indium and Lead @ 158 GeV/nucleon

And proton beams for
pp and pA reference
studies

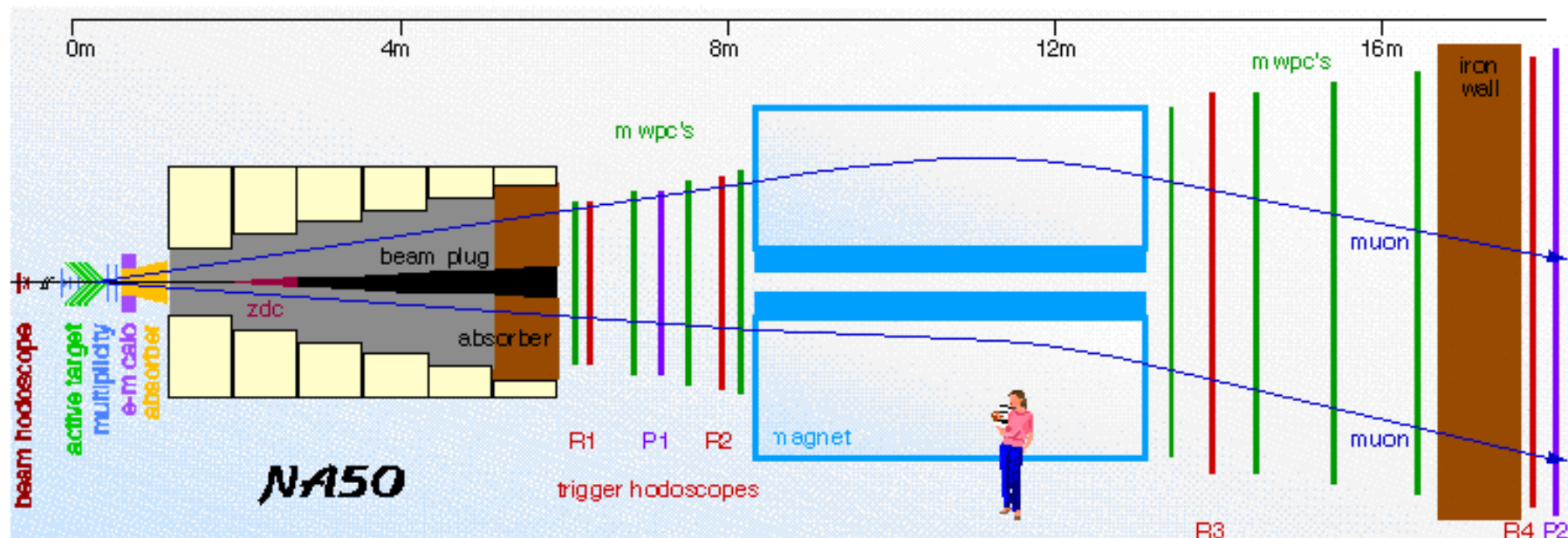


CERN - SPS eksperyment NA49



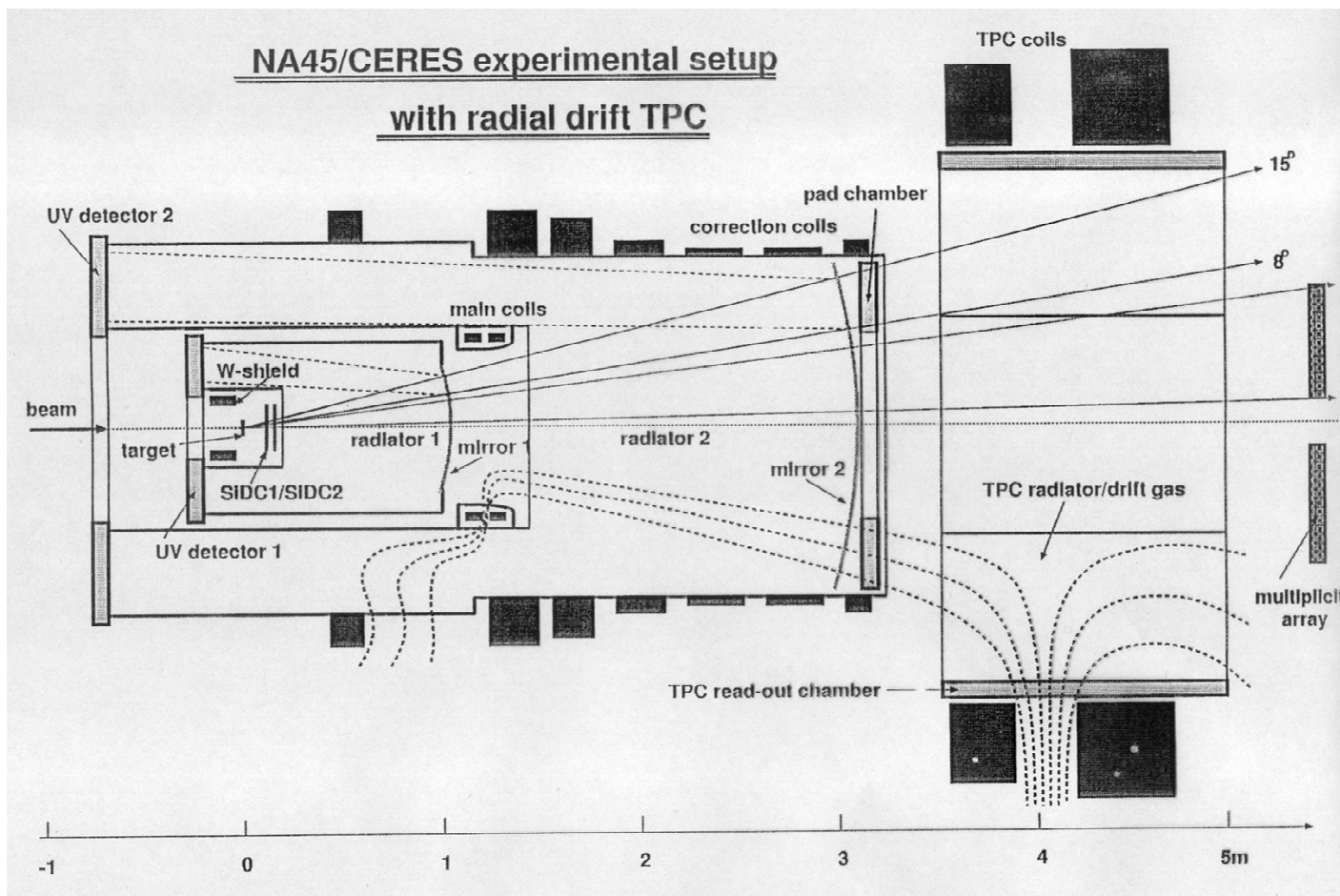
CERN - SPS eksperyment NA50

$$\rightarrow \mu^+ \mu^-$$



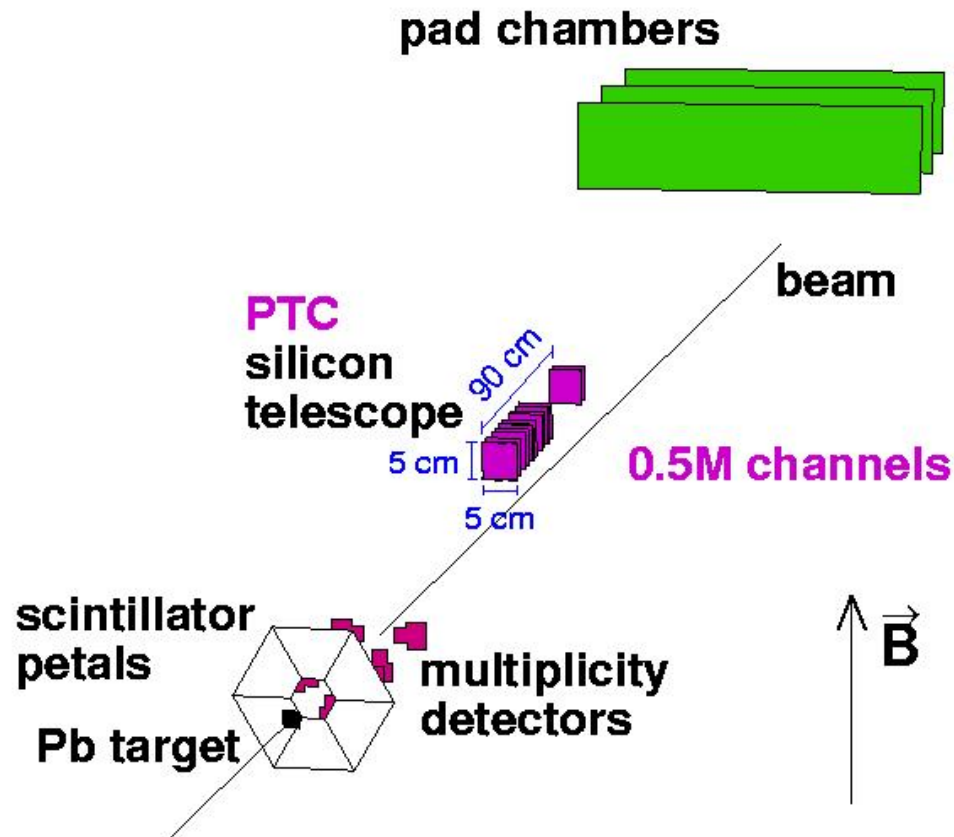
CERN - SPS eksperyment NA45/CERES

$\rightarrow e^+e^-$



CERN - SPS eksperyment WA97

→ Dziwne hadrony ($S=1,2,3$)



CERN - SPS: odkrycie plazmy?

Tuż przed uruchomieniem akceleratora RHIC!



**Evidence for a New State of Matter:
An Assessment of the Results from the CERN Lead Beam Programme
Ulrich Heinz and Maurice Jacob
Theoretical Physics Division, CERN, CH-1211 Geneva 23, Switzerland
nucl-th/000242**

Wzmocnienie produkcji dziwnych hadronów

Strangeness enhancement & chemical equilibration

- (1) Hadron yields compatible with chemical equilibrium at

$$T_{chem} = 168 \text{ MeV} \approx T_{had}$$

pre-established chemical equilibrium

statistical hadronization of quarks & gluons

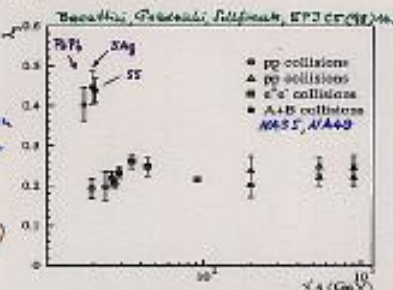
(U. H. AM97, R. Stock, T. B. A. 95, 20)



- (2) Global strangeness enhancement by factor 2

rapid strangeness production before or during hadronization

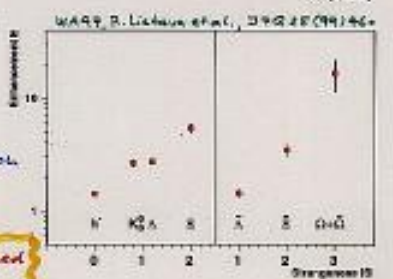
(Kafetski + Müller, '82; Eumyri et al., Primak, Knell et al., '88-'90)



- (3) Large specific enhancement factors at y_{cm} (PbPb vs pBe) for multistrange hadrons

statistical hadronization

(Kafetski '94, Bialas '98)



(1)-(3) cannot be explained by hadronic FSI!

Conclusions

- Hyperon transverse mass spectra
 - agree with the expected thermal+flow character
 - show the effect of early decoupling of Ω^- , in agreement with microscopic calculations
- Hyperon yields
 - confirm quantitatively the chemical equilibrium in all measured strange baryon and antibaryon abundances in Pb-Pb interactions (QGP prediction)
 - enhancement in Pb-Pb vs p-Be increases with strangeness:

Ω^- abundance x15 from p-Be to Pb-Pb

For multistrange baryons, no hadronic microscopic model has predicted a strangeness enhancement leading to chemical equilibration. Additions of ad-hoc new effects have not been successful in reproducing the Ω enhancement.

$$\sim e^{-m/kT}$$

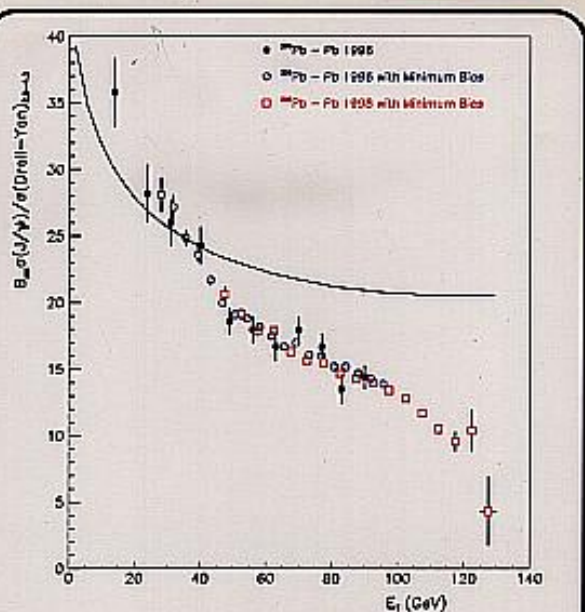
$$m_{HG} \approx 500 \text{ MeV}$$

$$m_{QGP} \approx 150 \text{ MeV}$$

Tłumienie produkcji J/ψ

J/ψ - stan rezonansowy $c\bar{c}$

Torino May 10-15, 1999 C. Cserb, for the NA60 Collaboration



NA50 @ QM99

QM99

CONCLUSIONS (II)

The measured measured J/ψ suppression pattern:

- Rules out the available conventional models based on hadronic confined matter

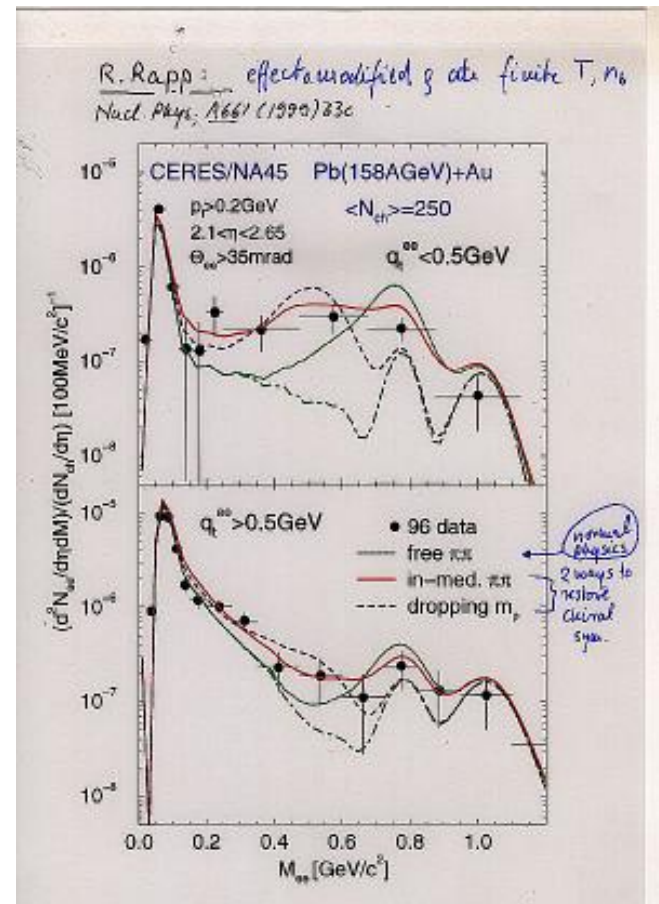
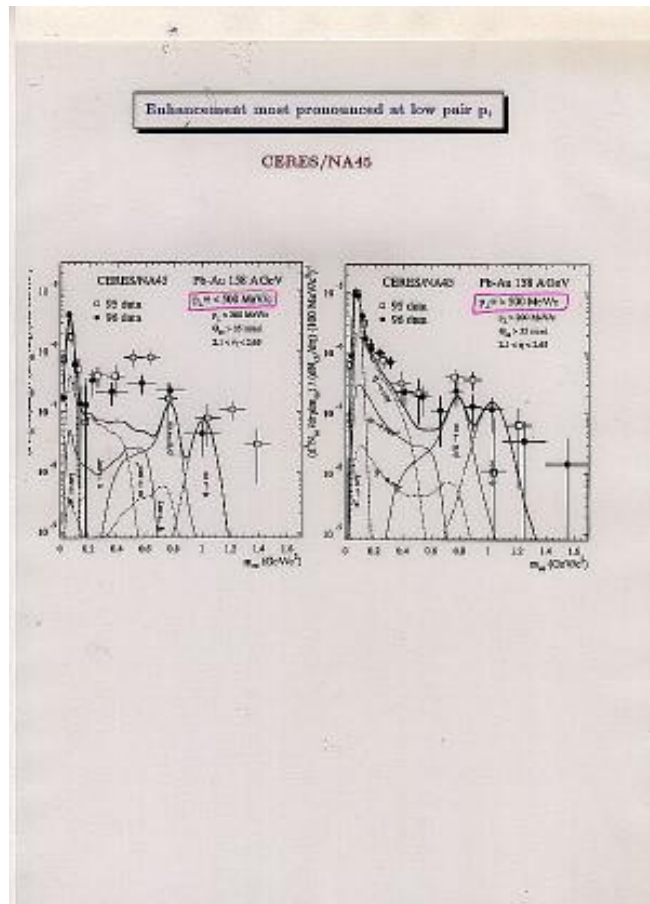
- Can be understood in case of successive "melting" of the χ , then J/ψ charmonium bound states (which are indistinguishable in our "gamma-blind detector")

- Provides evidence for a change of state of matter inducing the observed charmonium "melting" mechanism as predicted by quark-gluon deconfinement

Potencjał oddziaływania $c\bar{c}$ może być ekranowany obecnością licznych ładunków kolorowych

Analogia - ekranowanie Debye'a potencjału kulombowskiego

Anomalne wzmocnienie produkcji e^+e^-



Do opisu danych wymagana jest modyfikacja masy i szerokości w gęstym, gorącym medium

CERN - SPS: odkrycie plazmy?

Summary

1. A new state of matter, at about $20 \times E_{\text{hadron}}$, has been created.
It behaves collectively, leading to a gigantic explosion of the collision fireball ($V_{\perp}^{\text{exp}} > 0.5c$).

→ "The Little Bang"

2. This state exhibits features which cannot be understood in terms of conventional hadronic interactions: $\propto$ chemical equilibrium, strangeness enhancement, J/ψ suppression

They require strong interactions, with large inelastic cross sections, in a state of $\approx 2.4 \text{ GeV/fm}^3$, and they are consistent with expectations from a plasma of deconfined quarks and gluons.

3. The hadron abundances appear to provide a snapshot of the predicted quark-hadron transition at $T_{\text{had}} \approx 170 \text{ MeV}$.

→ "primordial hadrosynthesis"

There is no question that these exciting observations constitute a quantum jump in our understanding of matter at extremely high temperatures and densities and testify to the great success of the CERN heavy-ion program.

In spite of the above, the evidence is not enough to prove, beyond reasonable doubt, the creation of "Quark-Gluon Plasma!"

Missing Pieces:

Theory:

- A complete, consistent, dynamical theory of HCs which includes quark-gluon d.o.f. and the quark-hadron transition and explains all data. (May be easier at RHIC/LHC than at SPS.)
- Elimination of other "non-conventional" early stage mechanisms (color ropes, baryon junctions, ...) → pp, pA, AA

STS

Experiment:

- Energy threshold for quark deconfinement? SPS
- System size threshold for collective behavior and chemical/thermal equilibration? SPS
- Open vs. hidden charm (normalization of J/ψ) STS, RHIC/LHC
- Measurement of "GPD structure functions" by direct electromagnetic radiation RHIC/LHC
- Probing the QGP with hard probes (jet quenching, jet asymmetry, open beauty, $X,Y,\dots$) RHIC/LHC

The higher energies of RHIC and LHC are needed to complete the picture and provide a full characterization of the Quark-Gluon Plasma.

CERN - SPS: odkrycie plazmy?

A common assessment of the collected data leads us to conclude that we now have compelling evidence that a new state of matter has indeed been created, at energy densities which had never been reached over appreciable volumes in laboratory experiments before and which exceed by more than a factor 20 that of normal nuclear matter. The new state of matter found in heavy ion collisions at the SPS features many of the characteristics of the theoretically predicted quark-gluon plasma.

ALE

**Większość sygnatur z SPS nie wytrzymała 'znaku' czasu!
Obserwowane sygnały mogą być alternatywnie wytłumaczone
bez kreacji plazmy kwarkowo-gluonowej.**

Perspektywy poszukiwania QGP w zderzaczach

Pb+Pb, $b < 0.5$ fm

	SPS	RHIC	LHC
E_{cm} [GeV]	17	200	5500
dN_{ch}/dy	500	700	1300-4000
ε [GeV/fm ³]	≈ 2.5	$\gg 3.5$	$\approx 15-40$
τ_{QGP}	< 1	≈ 1	$\approx 4.5-12$