Od czarnych dziur do nowych zjawisk zależnych od czasu

Michał P. Heller

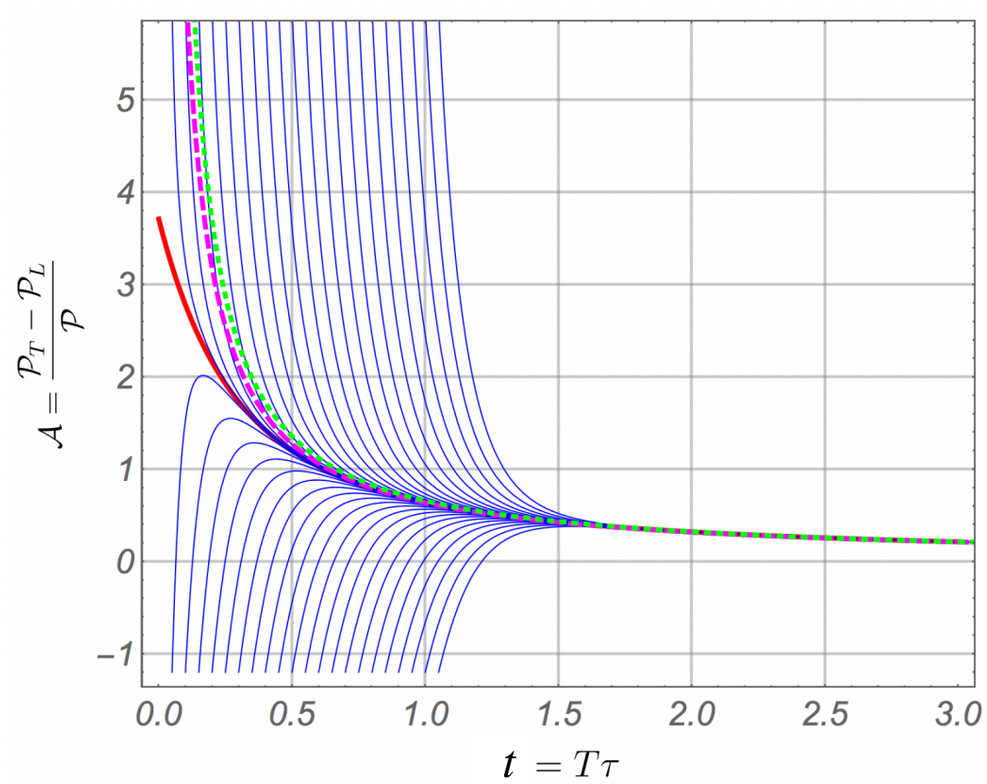
GHENT UNIVERSITY

Funded by the European Union

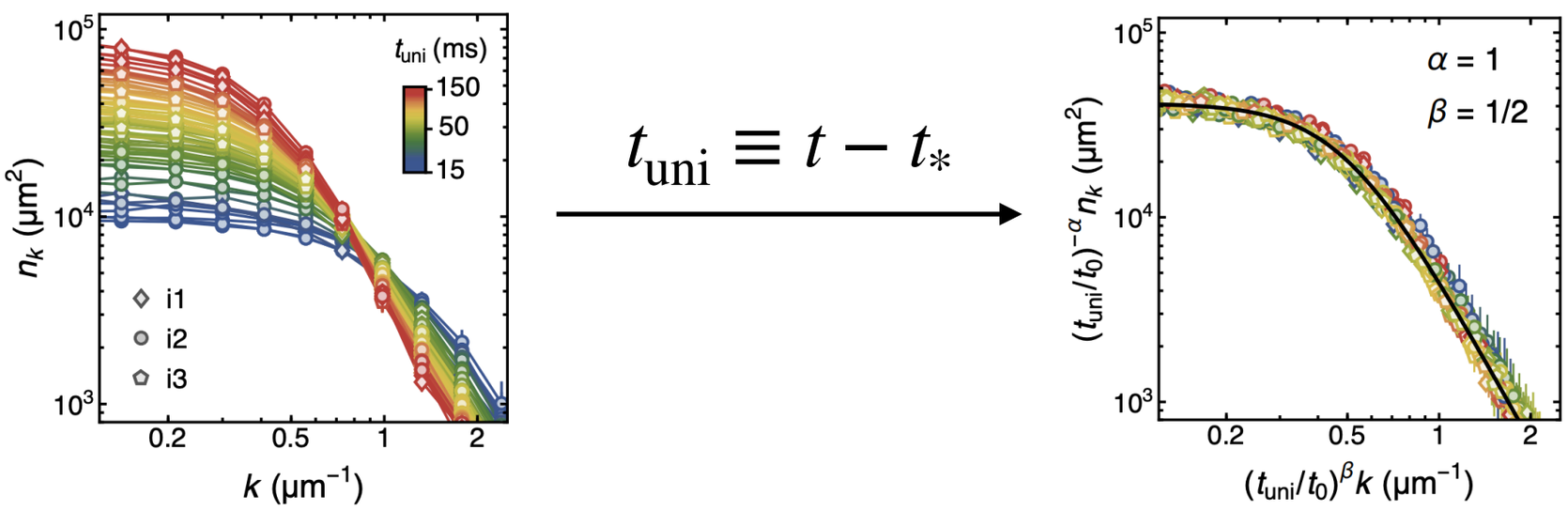
European Research Council
Established by the European Commission

Opowieść od dwóch wykresach

2015:



2023:



Wstęp

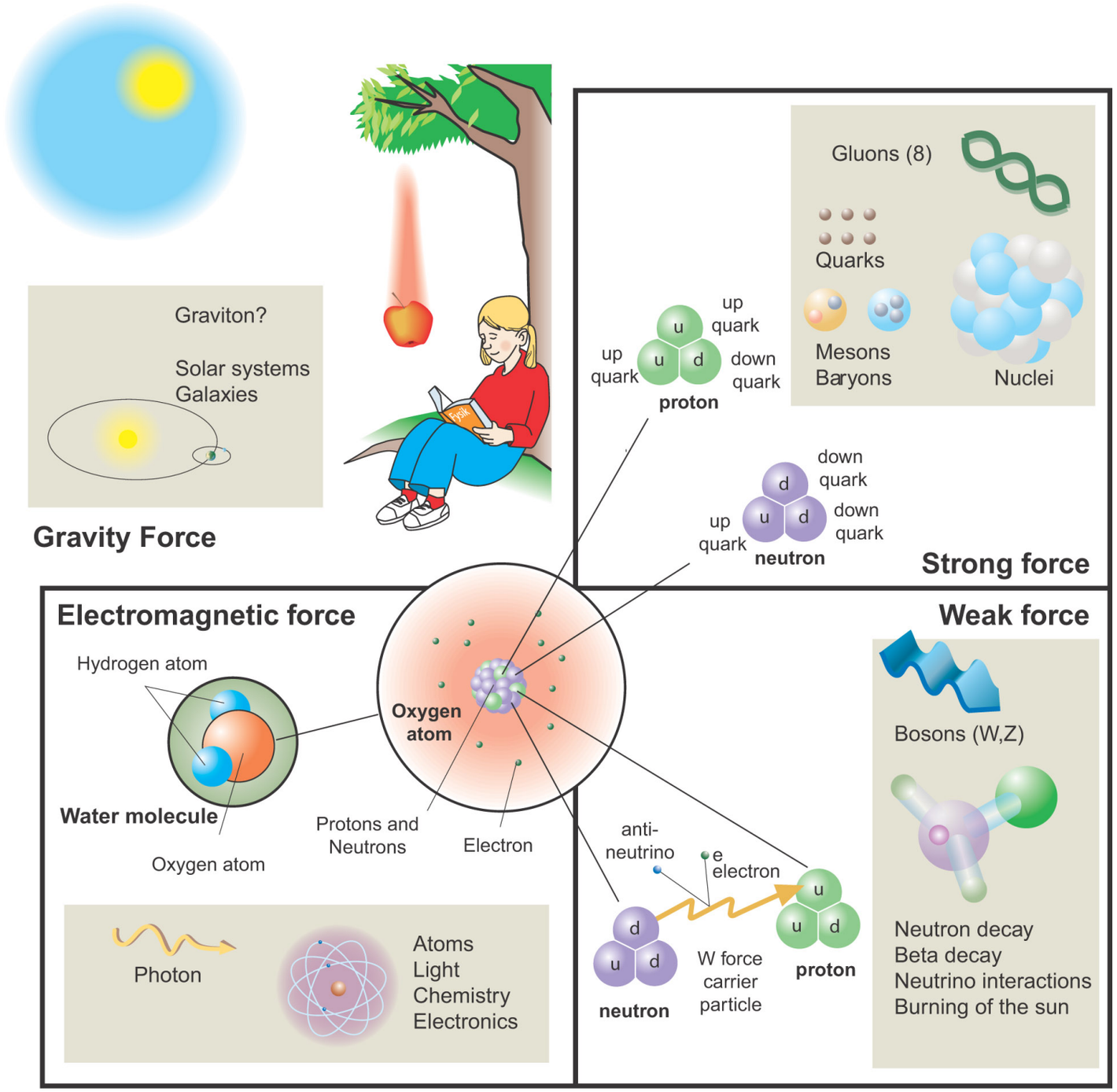
Oddziaływania elementarne

grawitacja

oddziaływanie silne

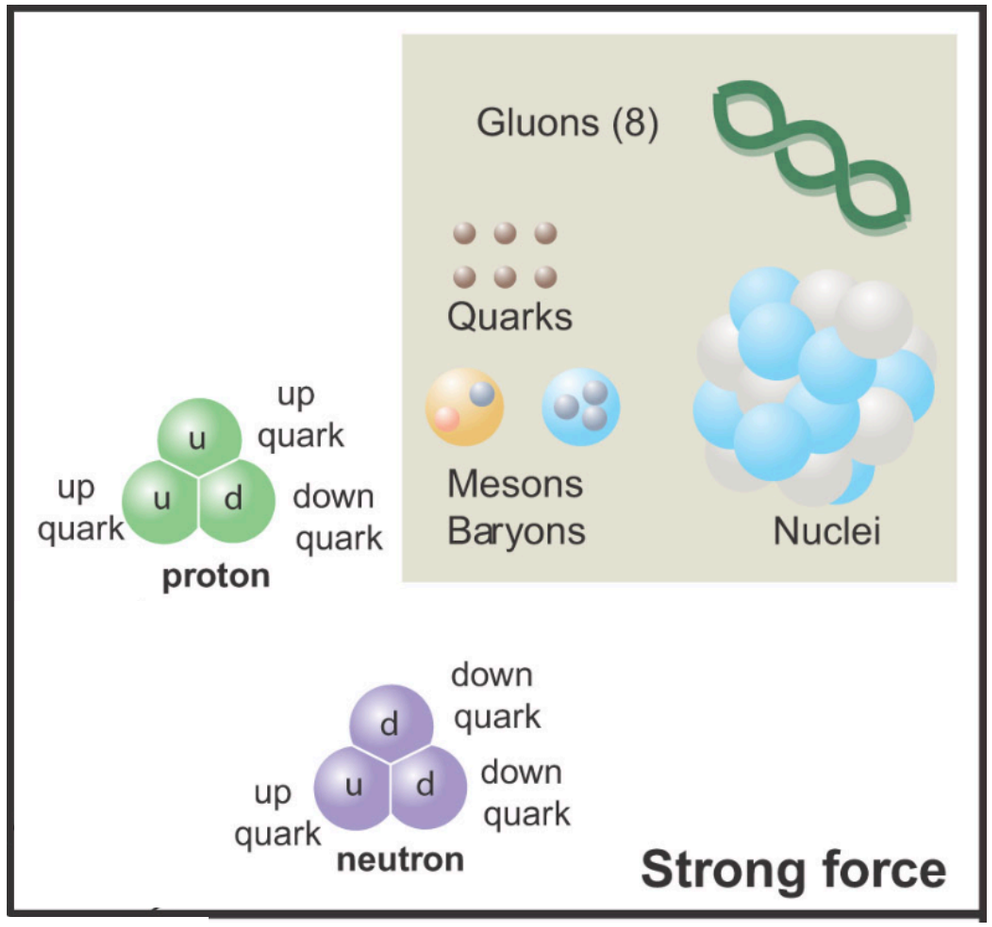
oddziaływanie elektro-magnetyczne

oddziaływanie słabe

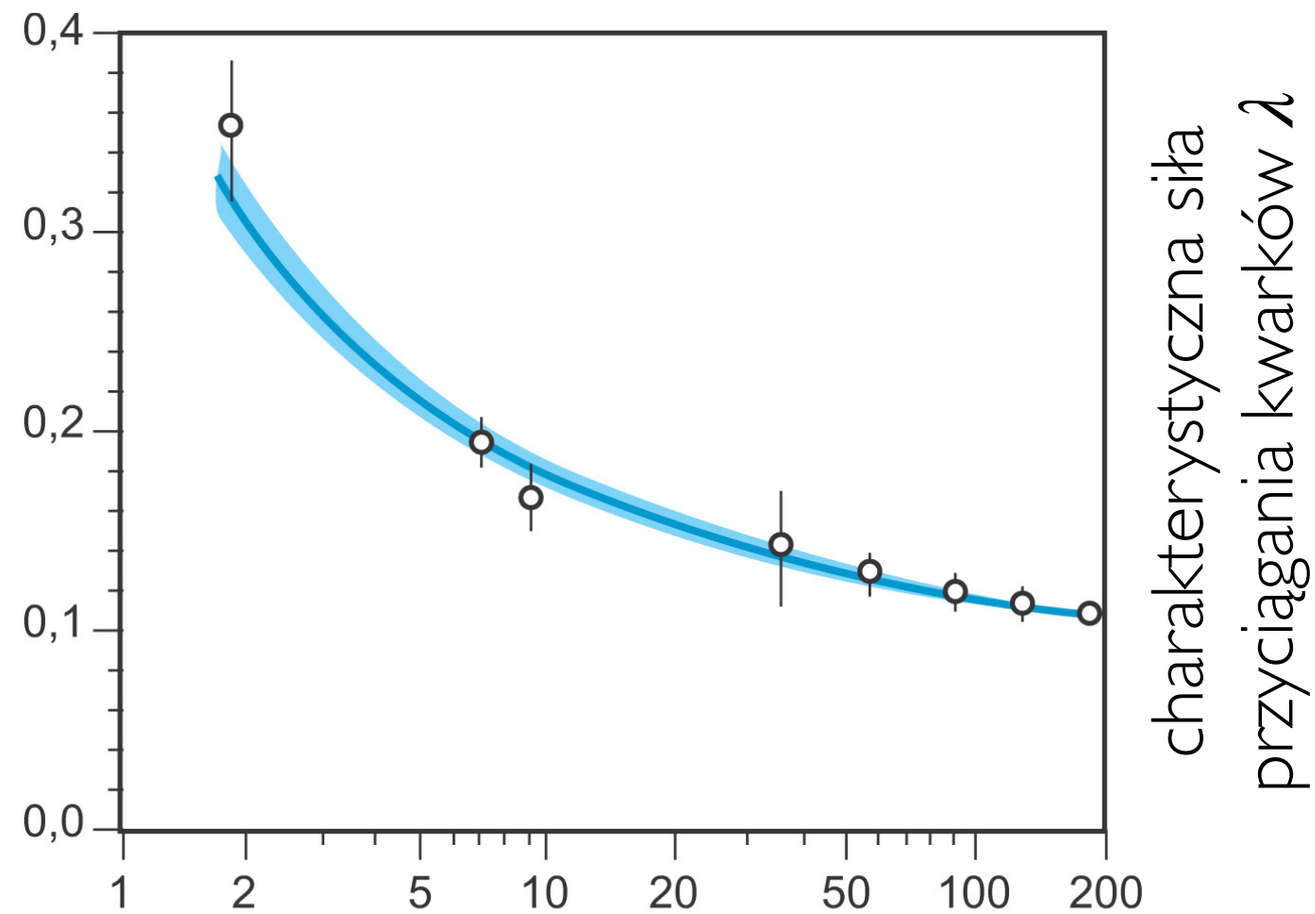


źródło: nobelprize.org

Oddziaływanie silne



źródło: nobelprize.org



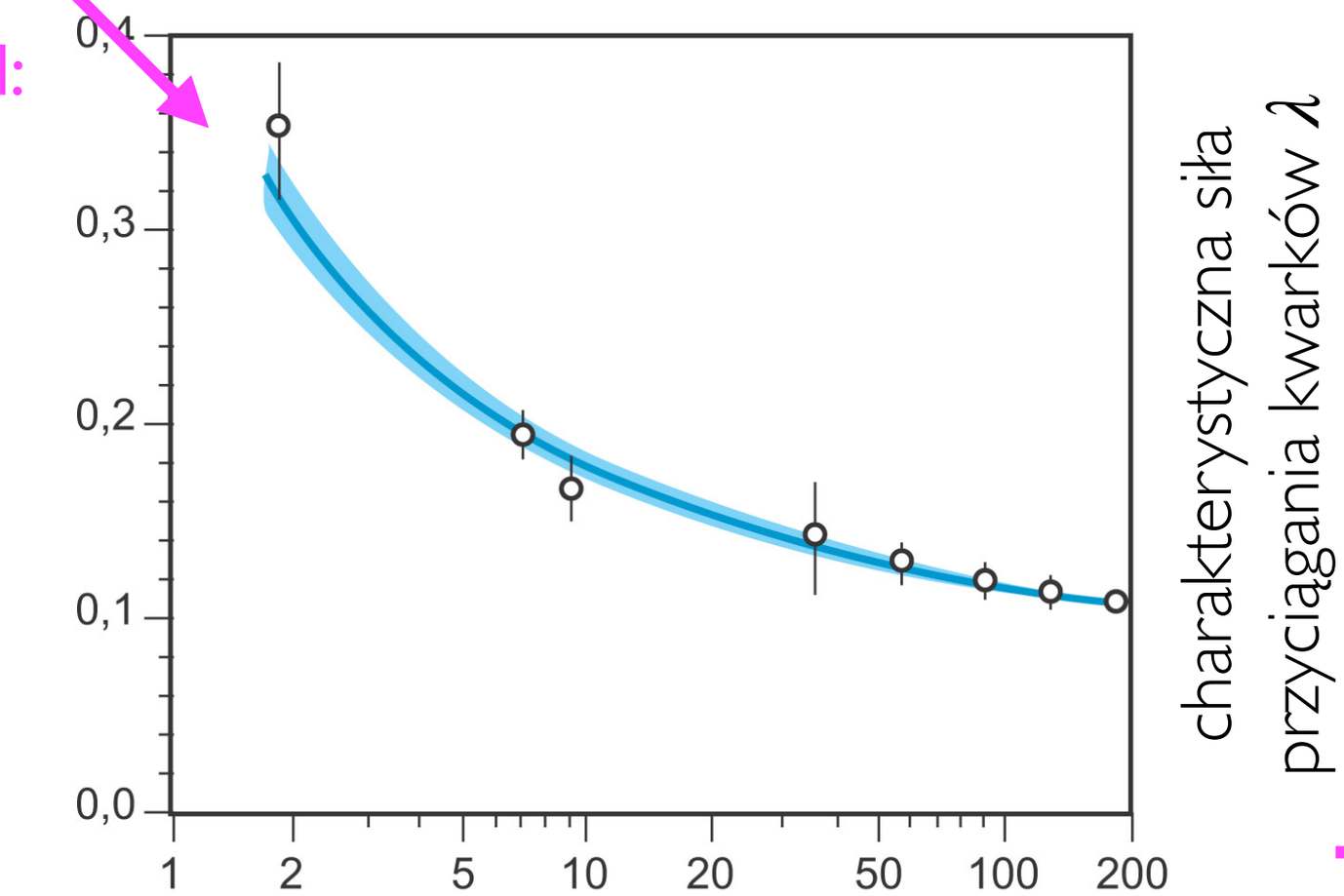
odwrotność charakterystycznego dystansu

lub charakterystyczna energia

Oddziaływania silne potrafią być naprawdę silne

uwięzienie kwarków w protonach, neutronach itd:

(1 z 7 problemów milenijnych)



odwrotność charakterystycznego dystansu

lub charakterystyczna energia

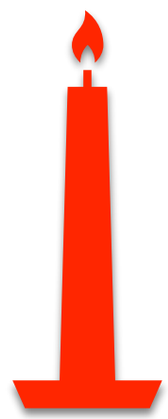
asymptotyczna swoboda (1973)

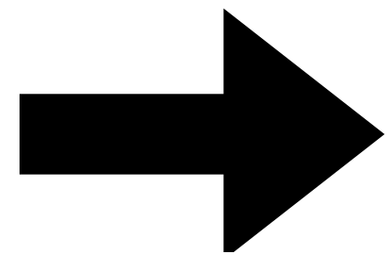
2004

Nowy stan skupienia: plazma kwarkowo-gluonowa

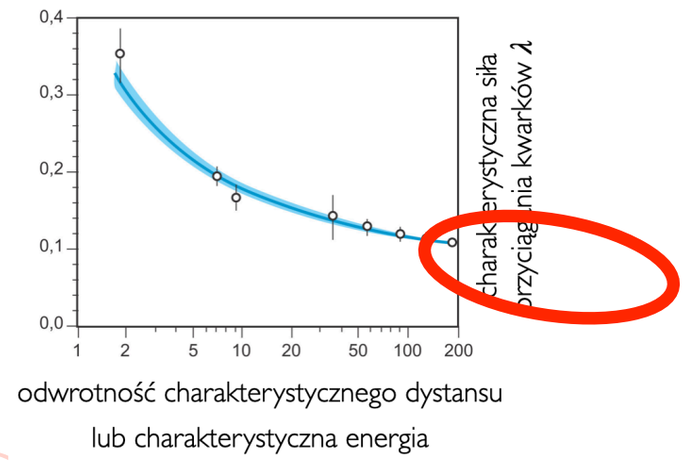
codzienna materia gdzie
kwarki i gluony uwiezione są
w protonach i neutronach
w jądrach atomowych

Kluczowa idea:
(Shuryak 1978)





protony, neutrony
topnieją i uwalniają
kwarki i gluony

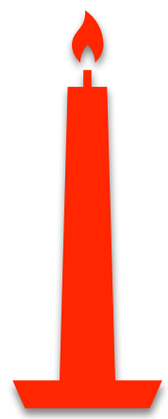


temperatury >
kilku trylionów
(1,000,000,000,000) °C
≈ 100,000 goręcej niż w
centrum słońca i 100,000,000
niż na jego powierzchni

Nowy stan skupienia: plazma kwarkowo-gluonowa

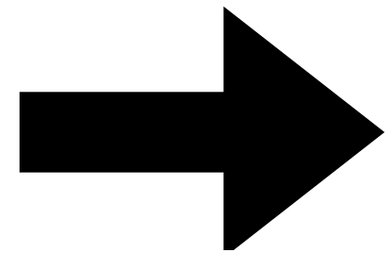
codzienna materia gdzie
kwarki i gluony uwiezione są
w protonach i neutronach
w jądrach atomowych

Kluczowa idea:
(Shuryak 1978)

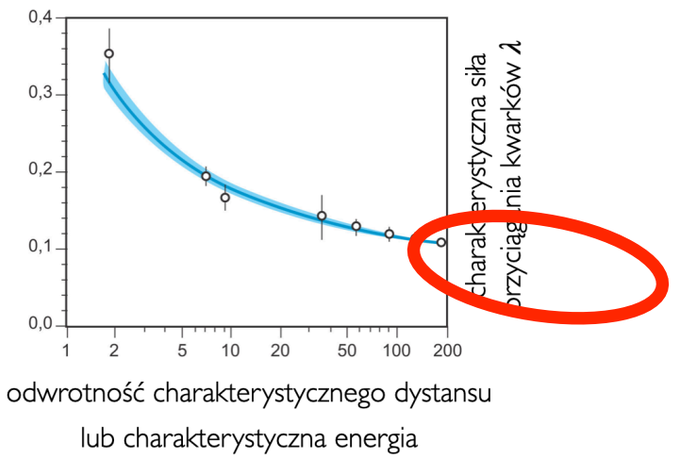


temperatury >
kilku trylionów
(1,000,000,000,000) °C

≈ 100,000 goręcej niż w
centrum słońca i 100,000,000
niż na jego powierzchni



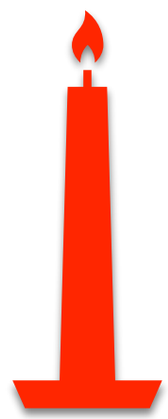
protony, neutrony
topnieją i uwalniają
kwarki i gluony



Nowy stan skupienia: plazma kwarkowo-gluonowa

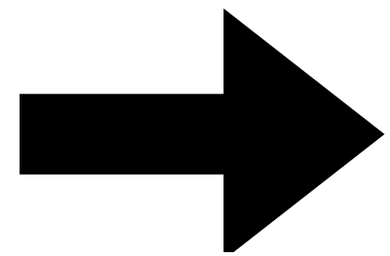
codzienna materia gdzie
kwarki i gluony uwiezione są
w protonach i neutronach
w jądrach atomowych

Kluczowa idea:
(Shuryak 1978)

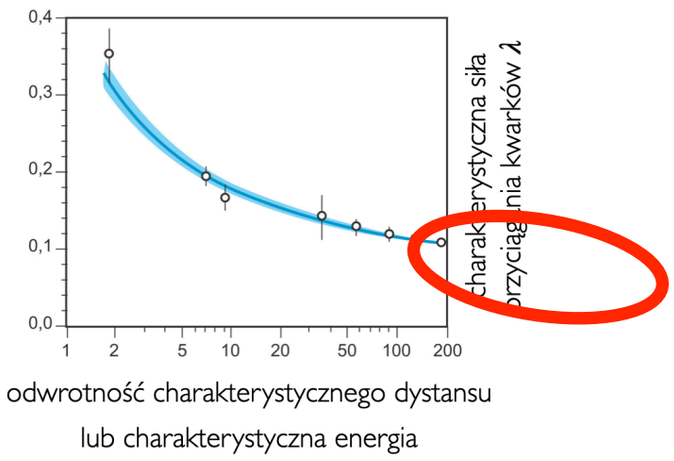


temperatury >
kilku trylionów
(1,000,000,000,000) °C

≈ 100,000 goręcej niż w
centrum Słońca i 100,000,000
niż na jego powierzchni



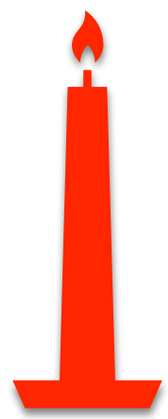
protony, neutrony
topnieją i uwalniają
kwarki i gluony



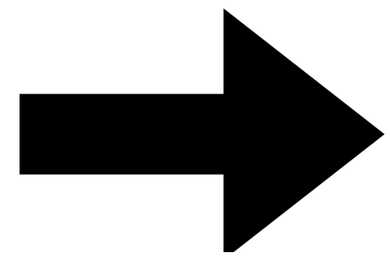
Nowy stan skupienia: plazma kwarkowo-gluonowa

codzienna materia gdzie
kwarki i gluony uwiezione są
w protonach i neutronach
w jądrach atomowych

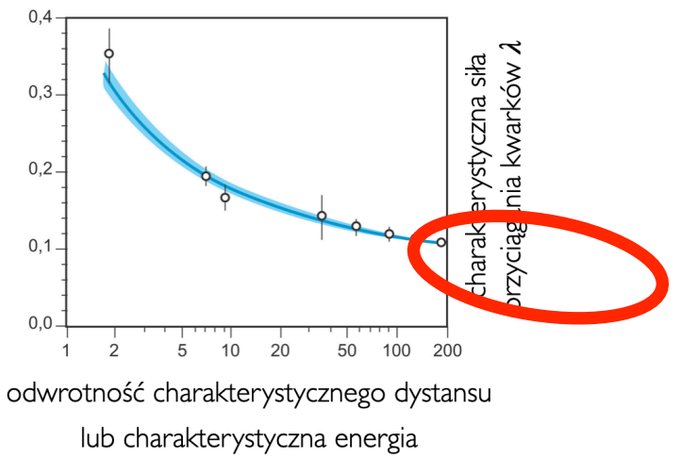
Kluczowa idea:
(Shuryak 1978)



temperatury >
kilku trylionów
(1,000,000,000,000) °C



protony, neutrony
topnieją i uwalniają
kwarki i gluony

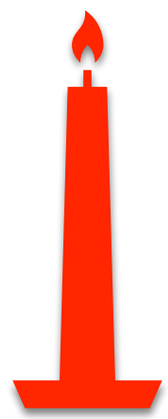


Tak ekstremalne warunki panowały w naturze tylko w bardzo wczesnym
Wszechświecie około 0.0000000001 do 0.000001 sekundy po Wielkim Wybuchu

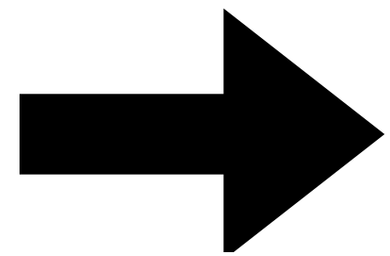
Nowy stan skupienia: plazma kwarkowo-gluonowa

codzienna materia gdzie
kwarki i gluony uwiezione są
w protonach i neutronach
w jądrach atomowych

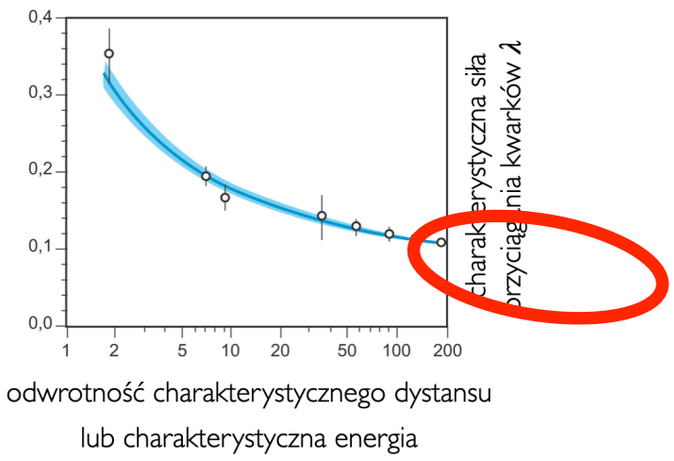
Kluczowa idea:
(Shuryak 1978)



temperatury >
kilku trylionów
(1,000,000,000,000) °C



protony, neutrony
topnieją i uwalniają
kwarki i gluony



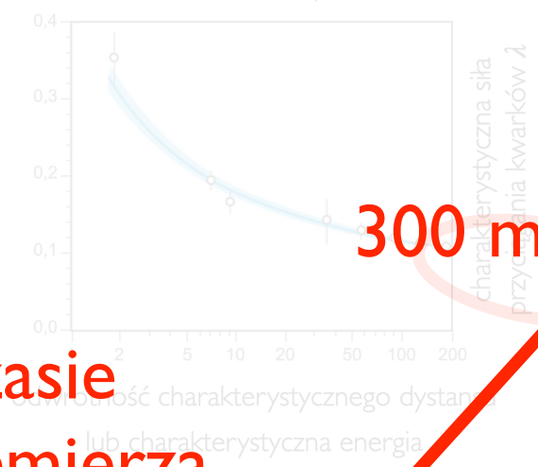
Ekspansja Wszechświata szybko schłodziła plazmę kwarkowo-gluonowa, która zamieniła się w protony, neutrony itd

Nowy stan skupienia: plazma kwarkowo-gluonowa

codzienna materia gdzie
kwarki i gluony uwiezione są
w protonach i neutronach
w jądrach atomowych

Kluczowa idea:
(Shuryak 1978)

protony, neutrony
topnieją i uwalniają
kwarki i gluony



30 centymetrów

300 metrów

temperatury >
kilku trylionów
(1,000,000,000,000) °C

w tym czasie
światło przemierza
w próżni

Tak ekstremalne warunki panowały w naturze tylko w bardzo wczesnym
Wszechświecie około 0.0000000001 do 0.000001 sekundy po Wielkim Wybuchu

Pytanie

Czy plazma kwarkowo-gluonowa jest

jednorodna?

izotropowa?

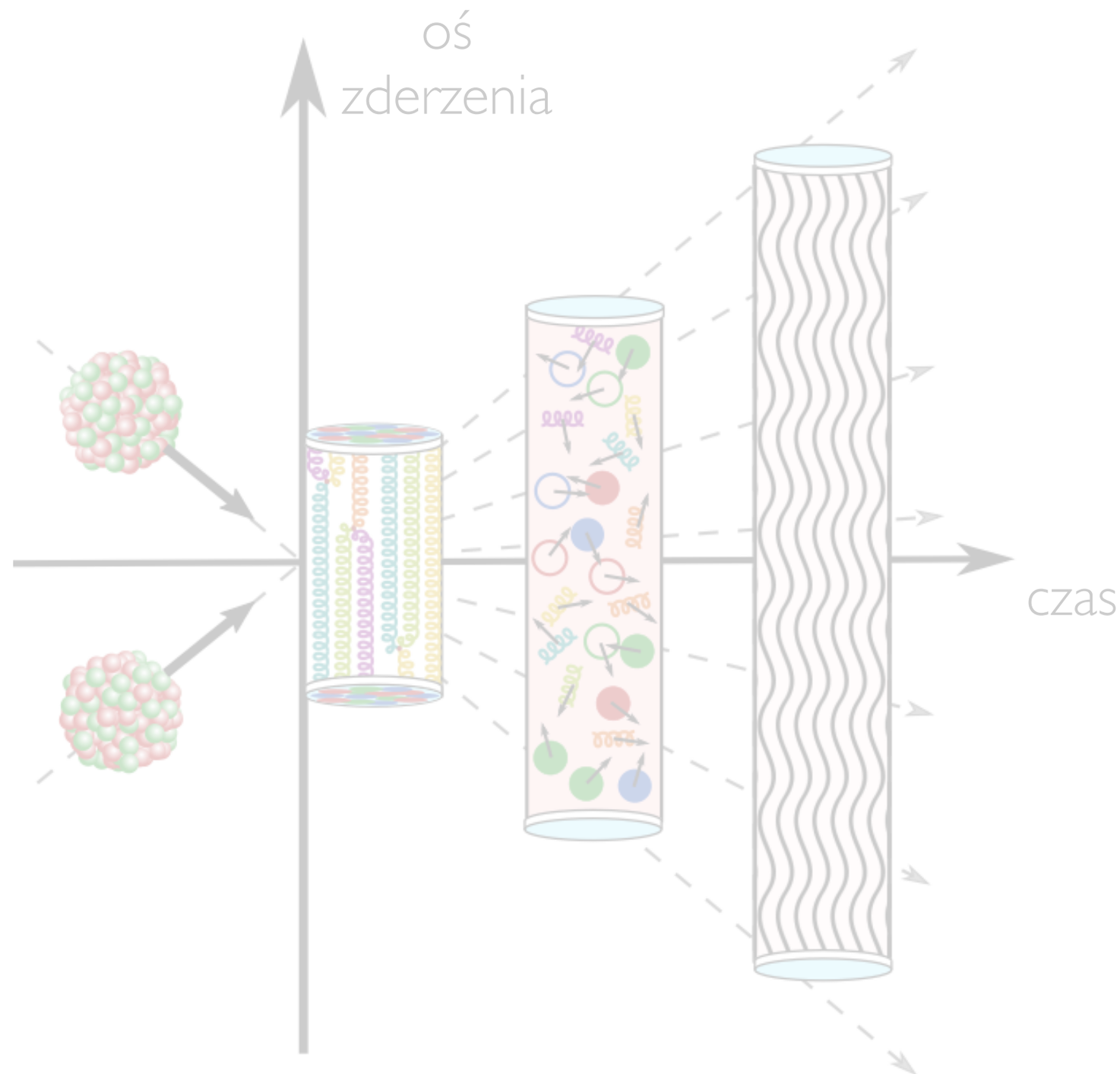
zmienia się w czasie?

Jak stworzyć plazmę kwarkowo-gluonową?

Kluczowa idea:

(T.D. Lee 1974)

Byłoby interesujące zbadać nowe zjawiska poprzez dystrybucję dużej ilości energii lub dużej gęstości jądrowej na stosunkowo dużej objętości.



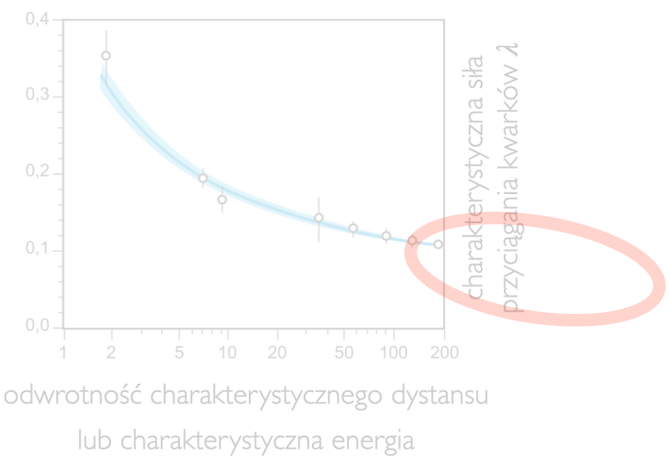
Nowy stan skupienia: plazma kwarkowo-gluonowa

codzienna materia gdzie
kwarki i gluony uwiezione są
w protonach i neutronach
w jądrach atomowych

Kluczowa idea:
(Shuryak 1978)

temperatury >
kilku trylionów
(1,000,000,000,000) °C

protony, neutrony
topnieją i uwalniają
kwarki i gluony



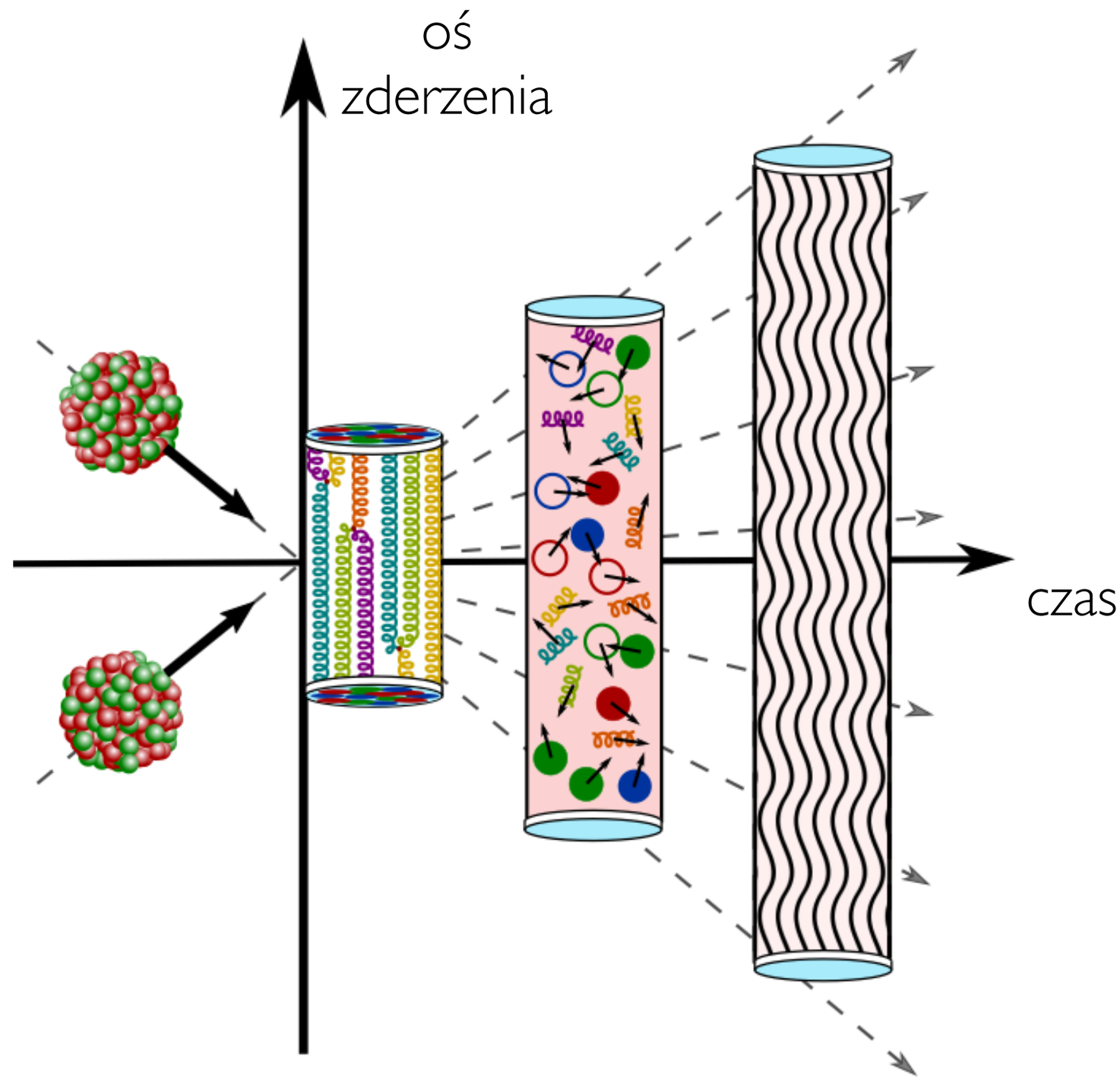
Tak ekstremalne warunki panowały w naturze tylko w bardzo wczesnym
Wszechświecie około 0.0000000001 do 0.000001 sekundy po Wielkim Wybuchu

Jak stworzyć plazmę kwarkowo-gluonową?

Kluczowa idea:

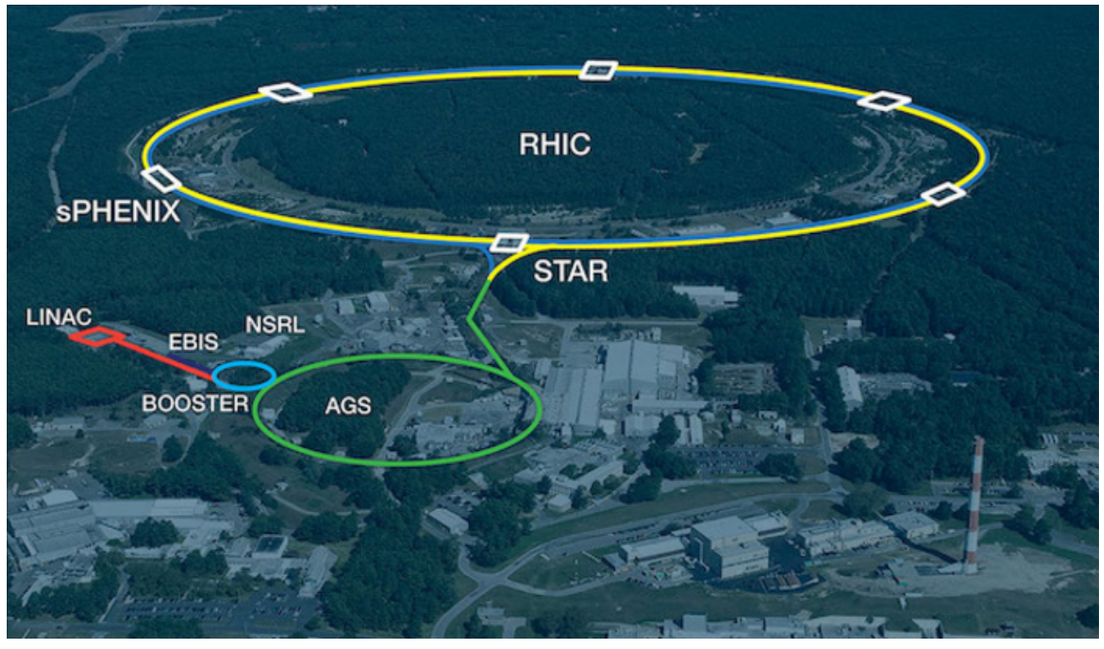
(T.D. Lee 1974)

Byłoby interesujące zbadać nowe zjawiska poprzez dystrybucję dużej ilości energii lub dużej gęstości jądrowej na stosunkowo dużej objętości.

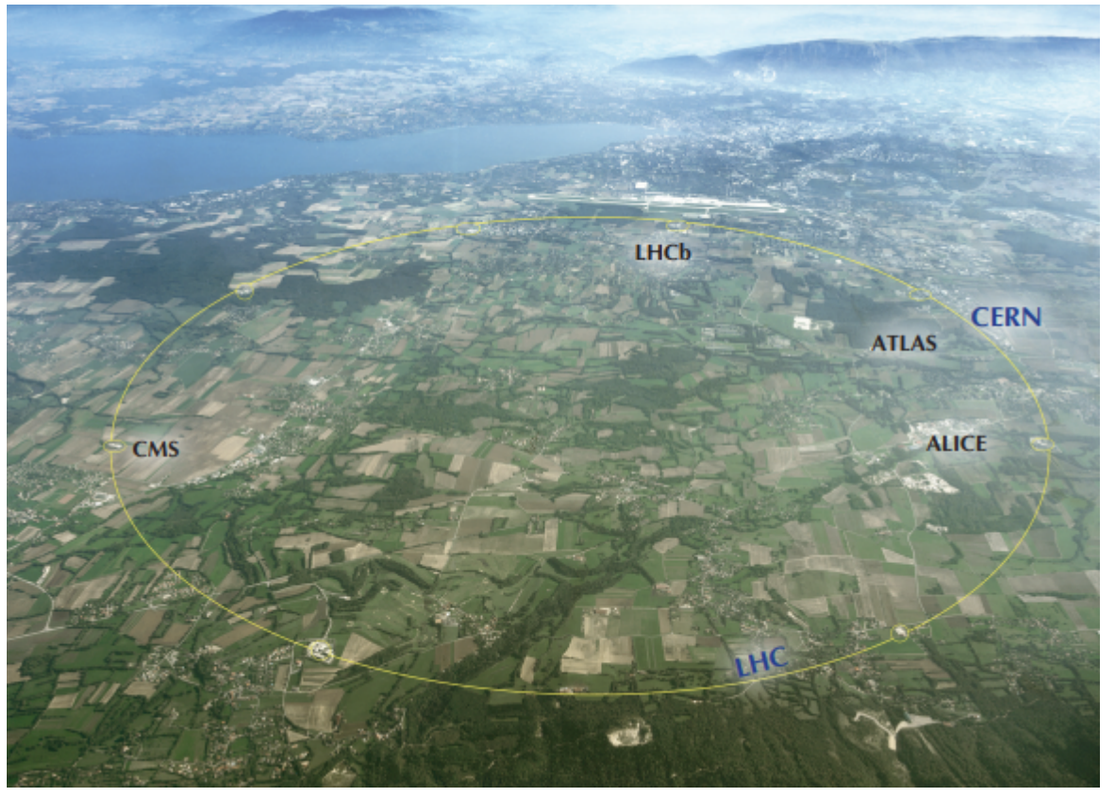


Plazma kwarkowo-gluonowa w laboratorium

Akcelerator RHIC w
Brookhaven National Lab
pod Nowym Jorkiem: 2000+

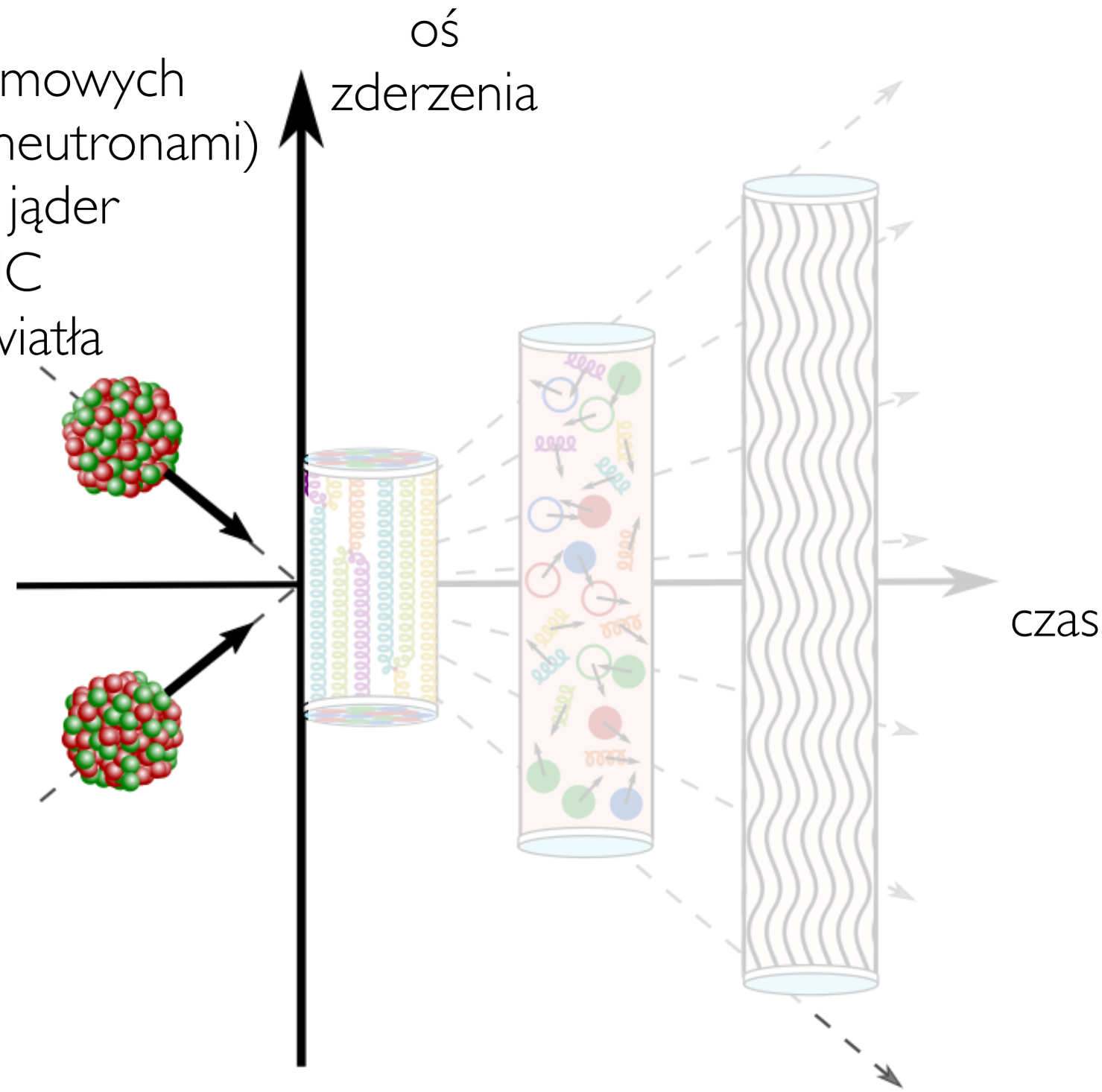


Akcelerator LHC w CERNie
pod Genewą: 2010+

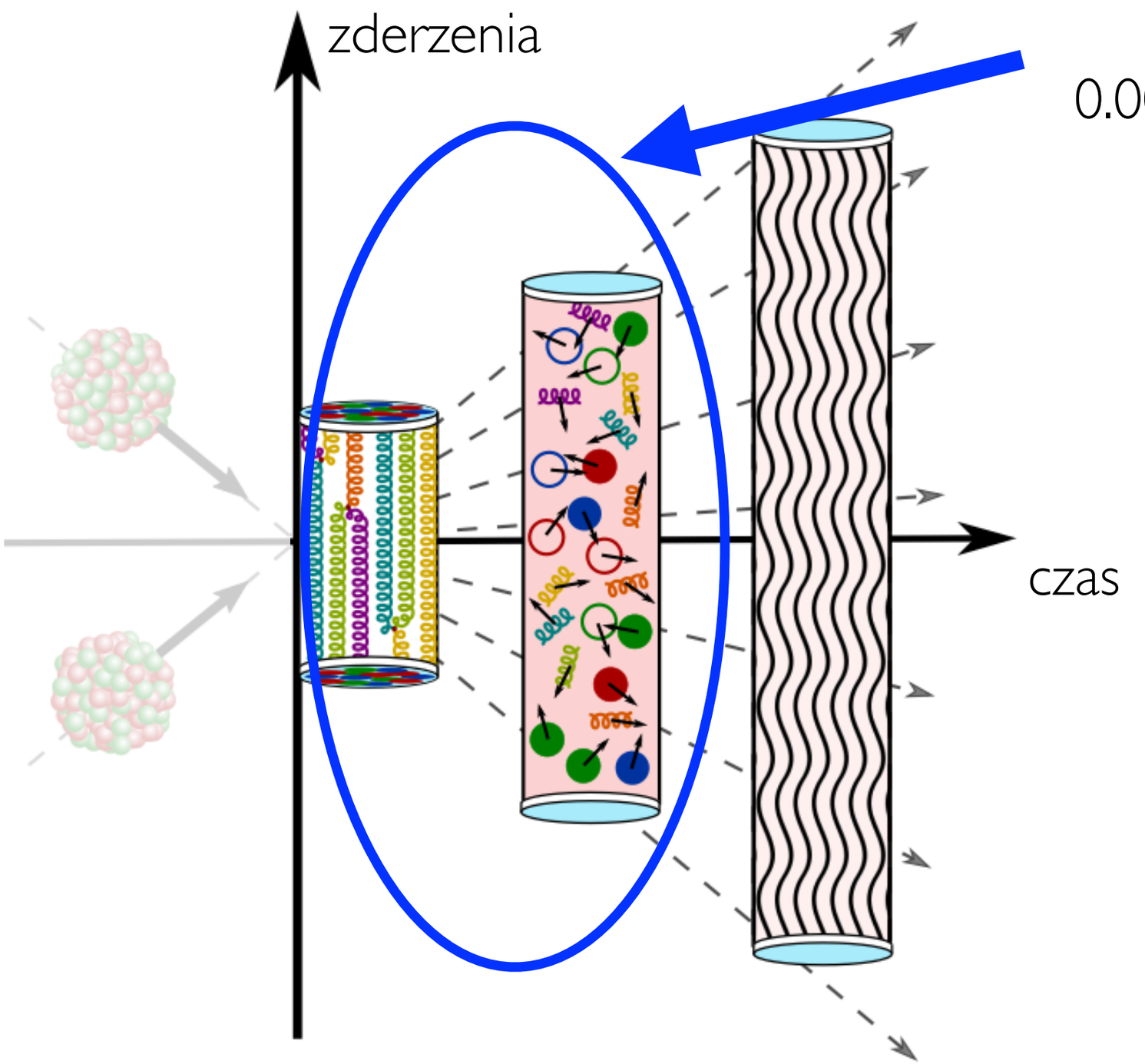


Plazma kwarkowo-gluonowa w laboratorium

zderzenia ciężkich jąder atomowych
(np. złota z 79 protonami i 79 neutronami)
a później także lżejszych jąder
rozpędzonych w RHIC
do 99.95% prędkości światła

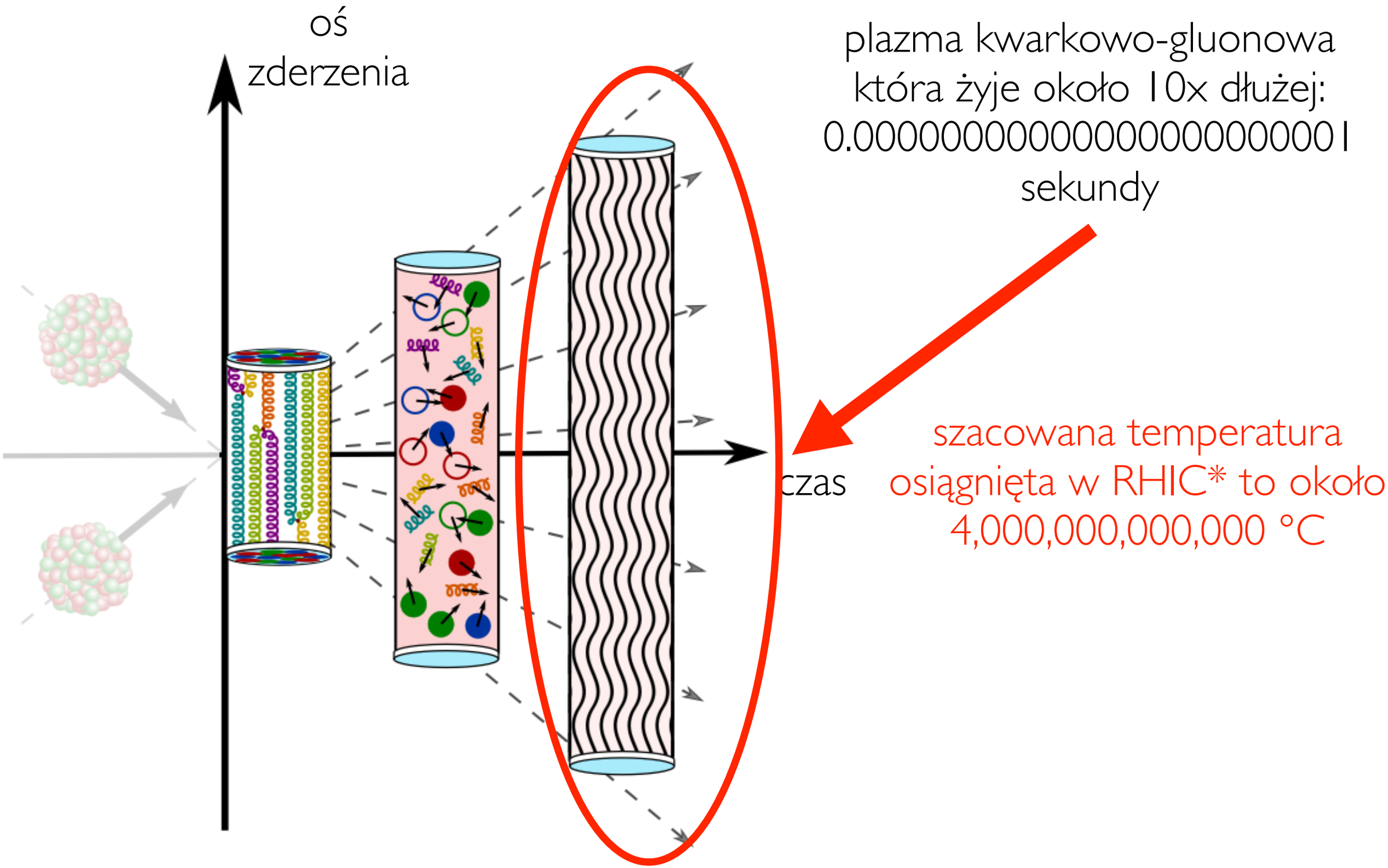


Plazma kwarkowo-gluonowa w laboratorium



ekstremalnie dynamiczna sytuacja trwająca 0.00000000000000000000001 sekundy

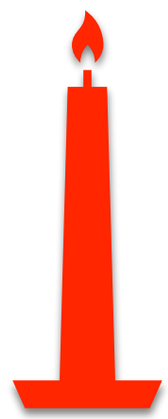
Plazma kwarkowo-gluonowa w laboratorium



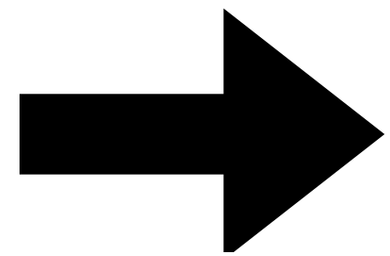
Nowy stan skupienia: plazma kwarkowo-gluonowa

codzienna materia gdzie
kwarki i gluony uwiezione są
w protonach i neutronach
w jądrach atomowych

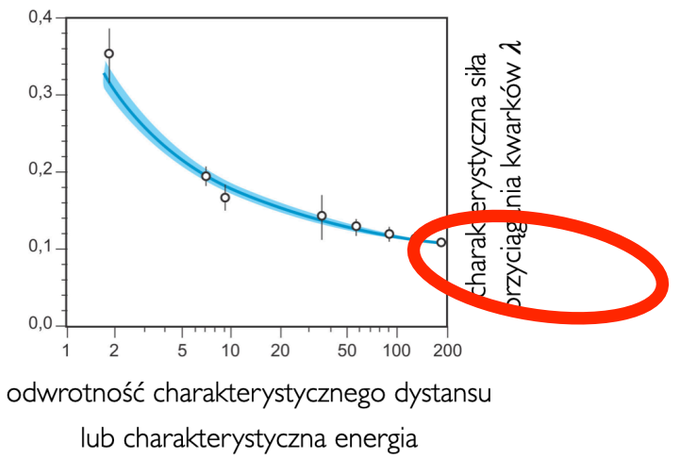
Kluczowa idea:
(Shuryak 1978)



temperatury >
kilku trylionów
(1,000,000,000,000) °C

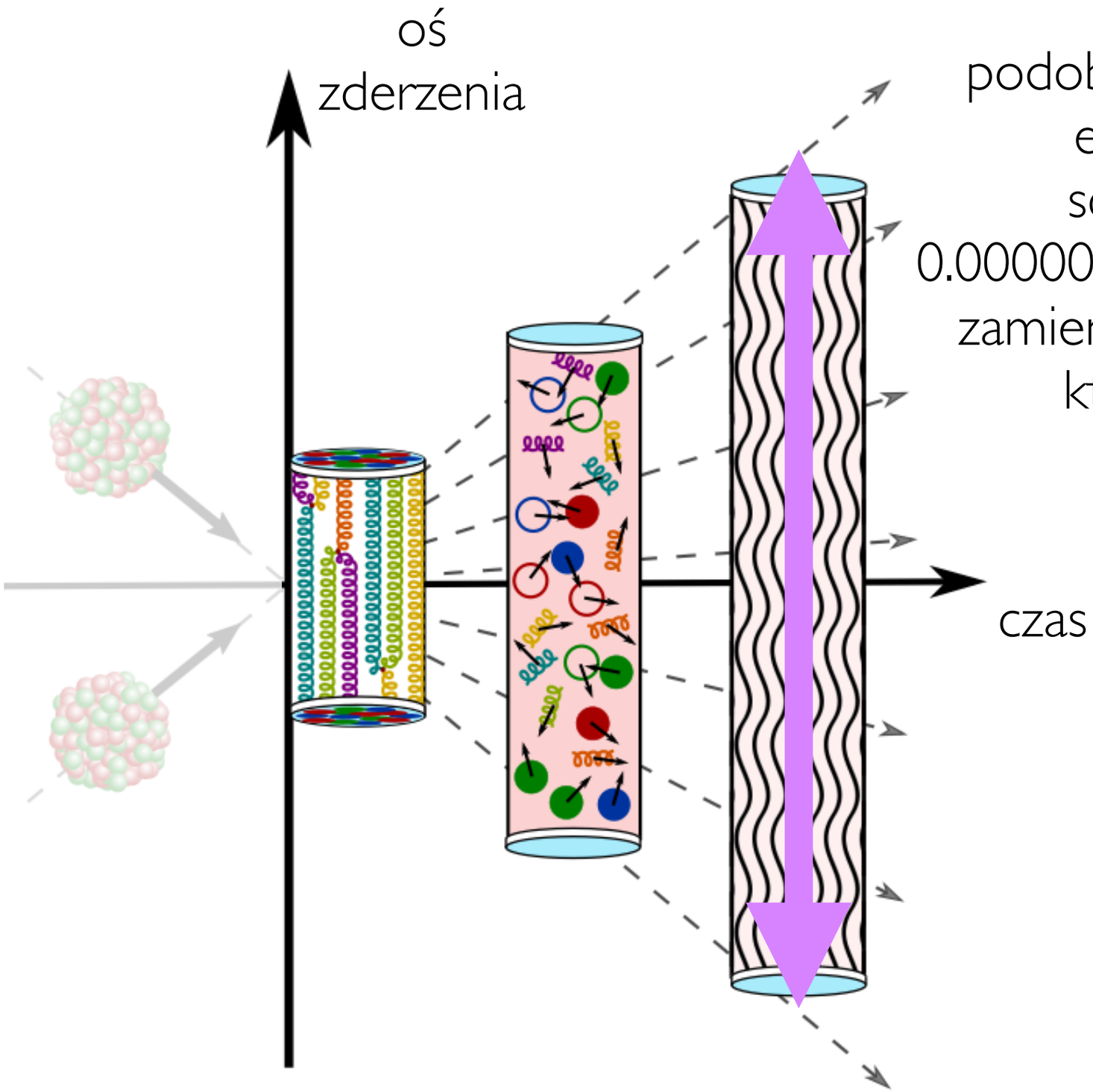


protony, neutrony
topnieją i uwalniają
kwarki i gluony



Ekspansja Wszechświata szybko schłodziła plazmę kwarkowo-gluonowa, która zamieniła się w protony, neutrony itd

Plazma kwarkowo-gluonowa w laboratorium



podobnie jak po Wielkim Wybuchu
ekspansja w laboratorium
schładza materię, która po
0.00000000000000000000001 sekundy
zamienia się w protony, neutrony itd
które z kolei obserwowane
są w detektorach

Plazma kwarkowo-gluonowa w laboratorium

Kluczowa zaobserwowana własność:

Brookhaven National Laboratory Newsroom Media & Communications Office

Newsroom | Photos | Videos | Fact Sheets | Lab History | News Categories

Contact: Karen McNulty Walsh, (631) 344-8350, or Peter Genzer, (631) 344-3174

share:

RHIC Scientists Serve Up 'Perfect' Liquid

New state of matter more remarkable than predicted — raising many new questions

April 18, 2005

TAMPA, FL — The four detector groups conducting research at the Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) — a giant atom "smasher" located at the U.S. Department of Energy's Brookhaven National Laboratory — say they've created a new state of hot, dense matter out of the quarks and gluons that are the basic particles of atomic nuclei, but it is a state quite different and even more remarkable than had been predicted. In peer-reviewed papers summarizing the first three years of RHIC findings, the scientists say that instead of behaving like a gas of free quarks and gluons, as was expected, the matter created in RHIC's heavy ion collisions appears to be more like a *liquid*.

Plazma kwarkowo-gluonowa w laboratorium

Brookhaven National Laboratory Newsroom Media & Communications Office

Newsroom Photos Videos Fact Sheets Lab History News Categories

Contact: Karen McN[illegible] 3174 Share:

RHIC Scientists Serve Up 'Perfect' Liquid

New state of matter more remarkable than predicted — raising many new questions

April 18, 2005

TAMPA, FL — The four detector groups conducting research at the Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) — a giant atom "smasher" located at the U.S. Department of Energy's Brookhaven National Laboratory — say they've created a new state of hot, dense matter out of the quarks and gluons that are the basic particles of atomic nuclei, but it is a state quite different and even more remarkable than had been predicted. In peer-reviewed papers summarizing the first three years of RHIC findings, the scientists say that instead of behaving like a gas of free quarks and gluons, as was expected, the matter created in RHIC's heavy ion collisions appears to be more like a *liquid*.

Kluczowa zaobserwowana własność:

plazma kwarkowo-gluonowa w RHIC (jak również w LHC) zachowuje się jak doskonały płyn

Plazma kwarkowo-gluonowa w laboratorium

Brookhaven National Laboratory Newsroom Media & Communications Office

Newsroom Photos Videos Fact Sheets Lab History News Categories

Contact: Karen M 3174 Share:

Kluczowa zaobserwowana własność:

plazma kwarkowo-gluonowa w RHIC (jak również w LHC) zachowuje się prawie jak płyn doskonały

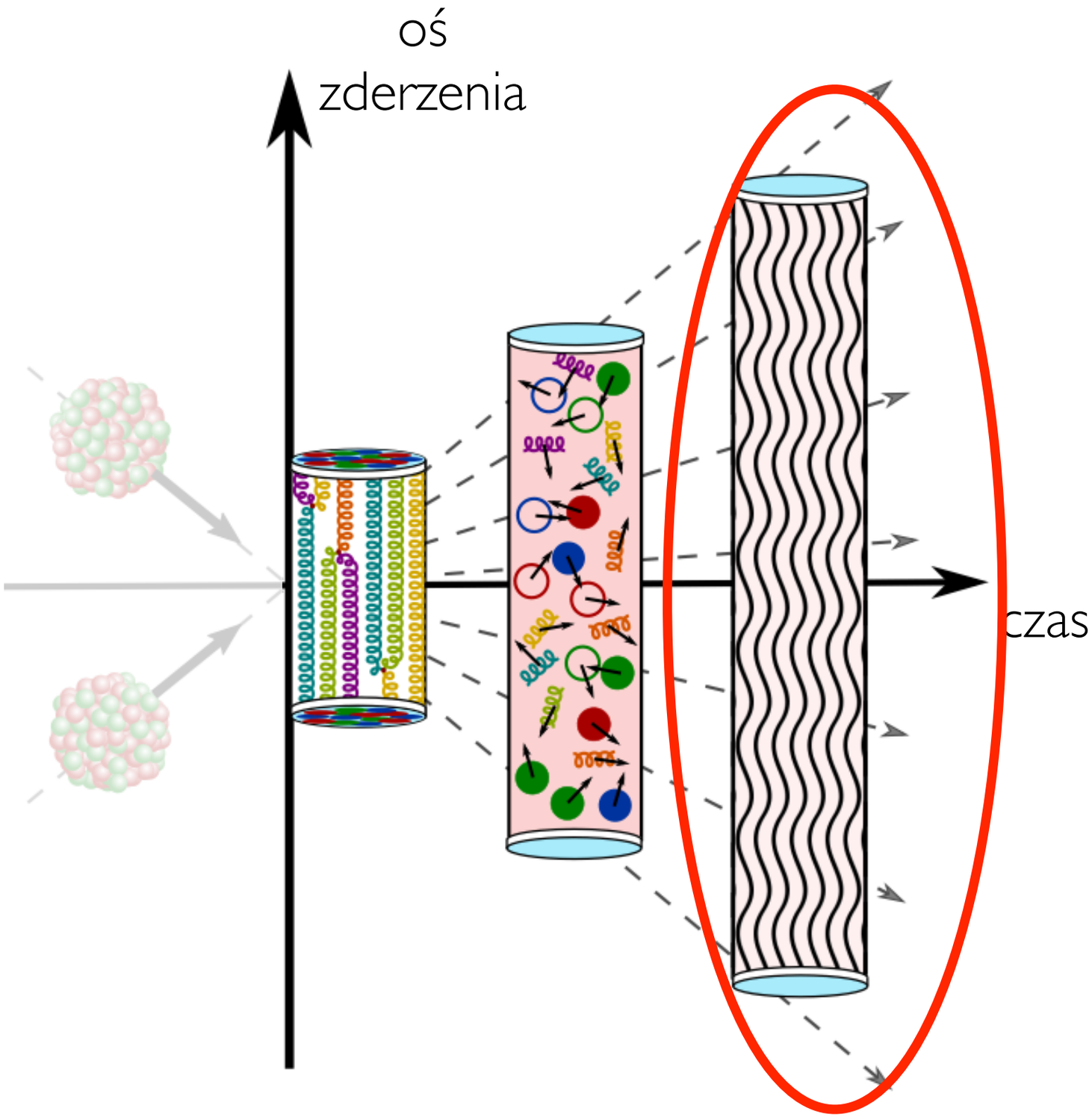
RHIC Scientists Serve Up 'Perfect' Liquid

New state of matter more remarkable than predicted — raising many new questions

April 18, 2005

TAMPA, FL — The four detector groups conducting research at the Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) — a giant atom "smasher" located at the U.S. Department of Energy's Brookhaven National Laboratory — say they've created a new state of hot, dense matter out of the quarks and gluons that are the basic particles of atomic nuclei, but it is a state quite different and even more remarkable than had been predicted. In peer-reviewed papers summarizing the first three years of RHIC findings, the scientists say that instead of behaving like a gas of free quarks and gluons, as was expected, the matter created in RHIC's heavy ion collisions appears to be more like a *liquid*.

Plazma kwarkowo-gluonowa w laboratorium



ekspandująca kropla cieczy wielkości rzędu jądra atomowego!

Co to oznacza?

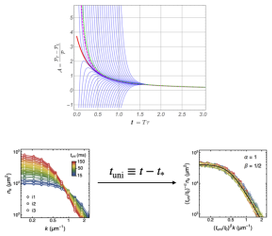
Ciecz = zjawisko kolektywne, wymagające mikroskopowo oddziaływań

Gdy oddziaływania są za słabe, ciecz płynie fatalnie (jej lepkość jest "duża")

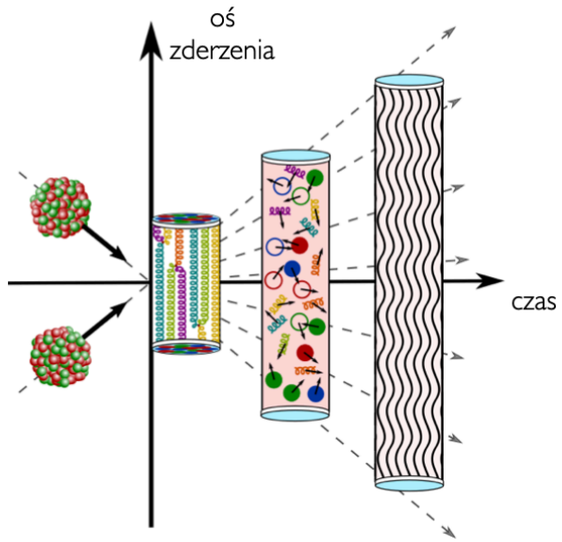
Gdy nie ma oddziaływań między cząstkami, nie ma w ogóle sensu mówić o płynie

Kluczowa konsekwencja: RHIC i LHC stworzyły silnie sprzężoną plazmę kwarkowo-gluonową

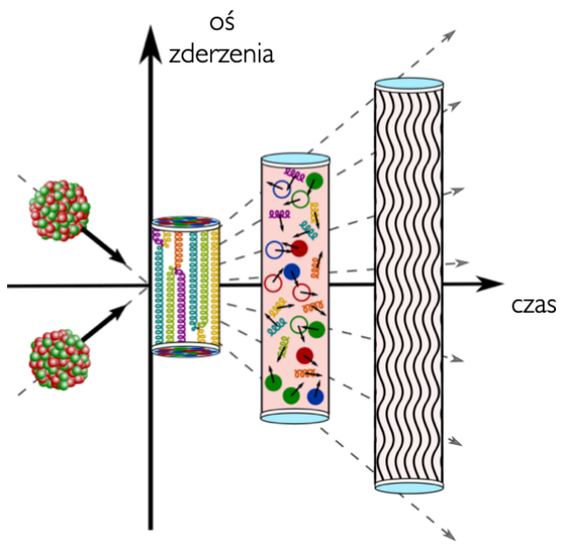
Problemy motywujące



Standardowe podejście do opisu teoretycznego



:



$\approx$ układ bardzo słabo oddziałujących cząstek
i kolejne przybliżenia w potęgach* λ
(brzmi o wiele prościej niż jest w rzeczywistości)

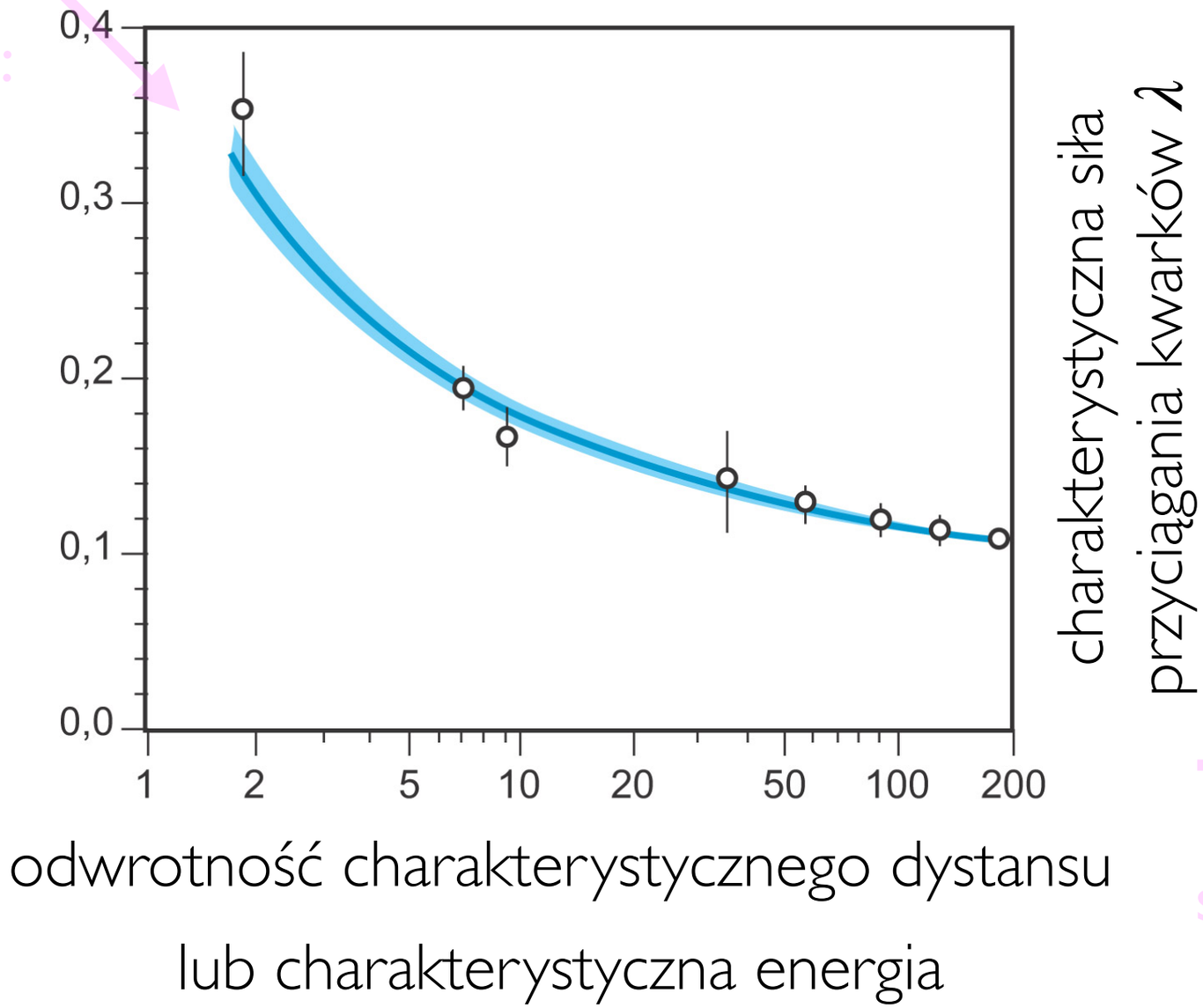
By lepiej zrozumieć jak w wyniku zderzenia w RHIC lub LHC może powstawać silnie sprzężony płyn kwarków i gluonów, potrzebna była zmiana paradygmatu

Oddziaływania silne potrafią być naprawdę słabe

uwięzienie kwarków w protonach, neutronach itd:

(1 z 7 problemów milenijnych)

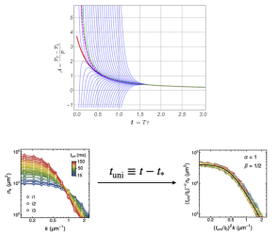
≈ układ bardzo słabo oddziałujących cząstek i kolejne przybliżenia w potęgach* λ



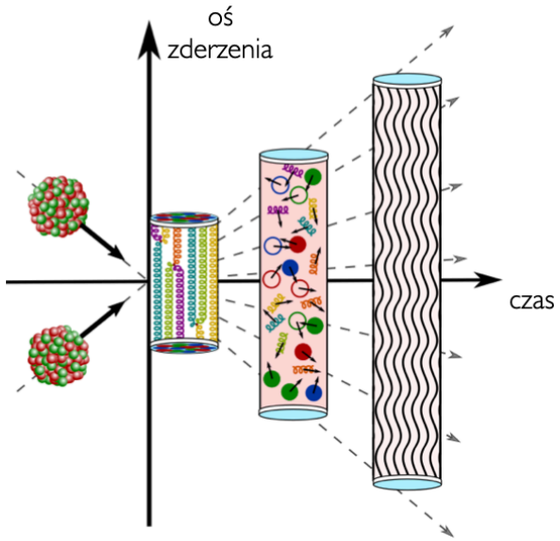
akcelerator rodem z Sci-Fi

asymptotyczna swoboda (1973) 2004

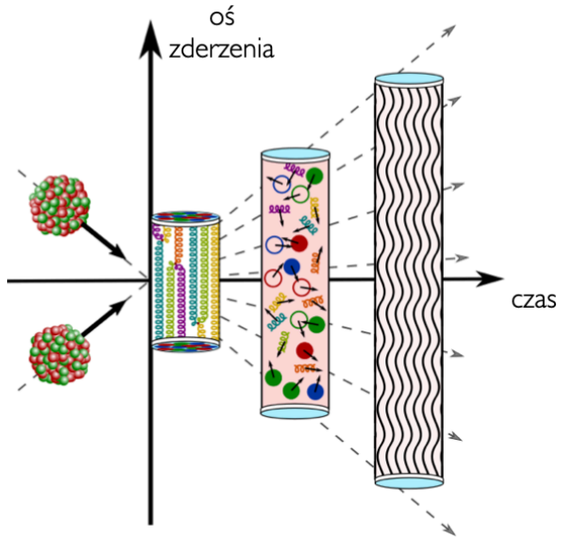
Problemy motywujące



Standardowe podejście do opisu teoretycznego



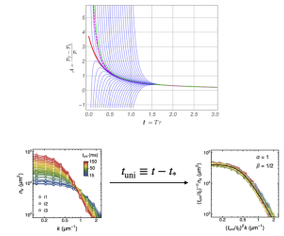
:



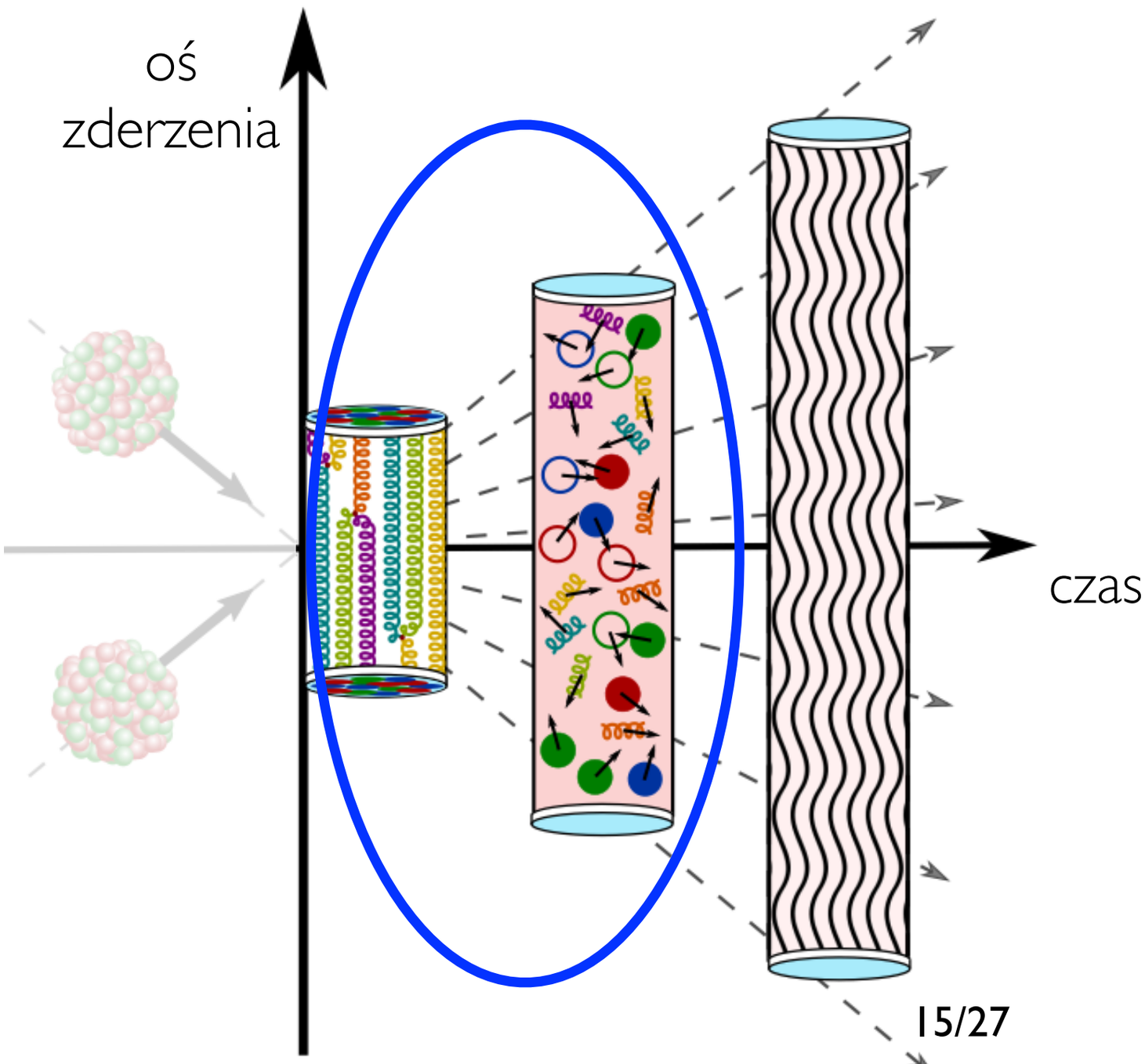
$\approx$ układ bardzo słabo oddziałujących cząstek
i kolejne przybliżenia w potęgach* λ
(brzmi o wiele prościej niż jest w rzeczywistości)

By lepiej zrozumieć jak w wyniku zderzenia w RHIC lub LHC może powstawać silnie sprzężony płyn kwarków i gluonów, **potrzebna była zmiana paradygmatu**

Problemy motywujące



Żeby **lepiej zrozumieć** jak w wyniku zderzenia może powstawać silnie sprzężony płyn kwarków i gluonów, potrzebna była zmiana paradygmatu



czy?

jak długo?

właściwości?

Od czarnych dziur
do nowych zjawisk
zależnych od czasu

Zmiana paradygmatu

układ bardzo słabo oddziałujących cząstek
i kolejne przybliżenia w potęgach* λ

↓ Maldacena 1997

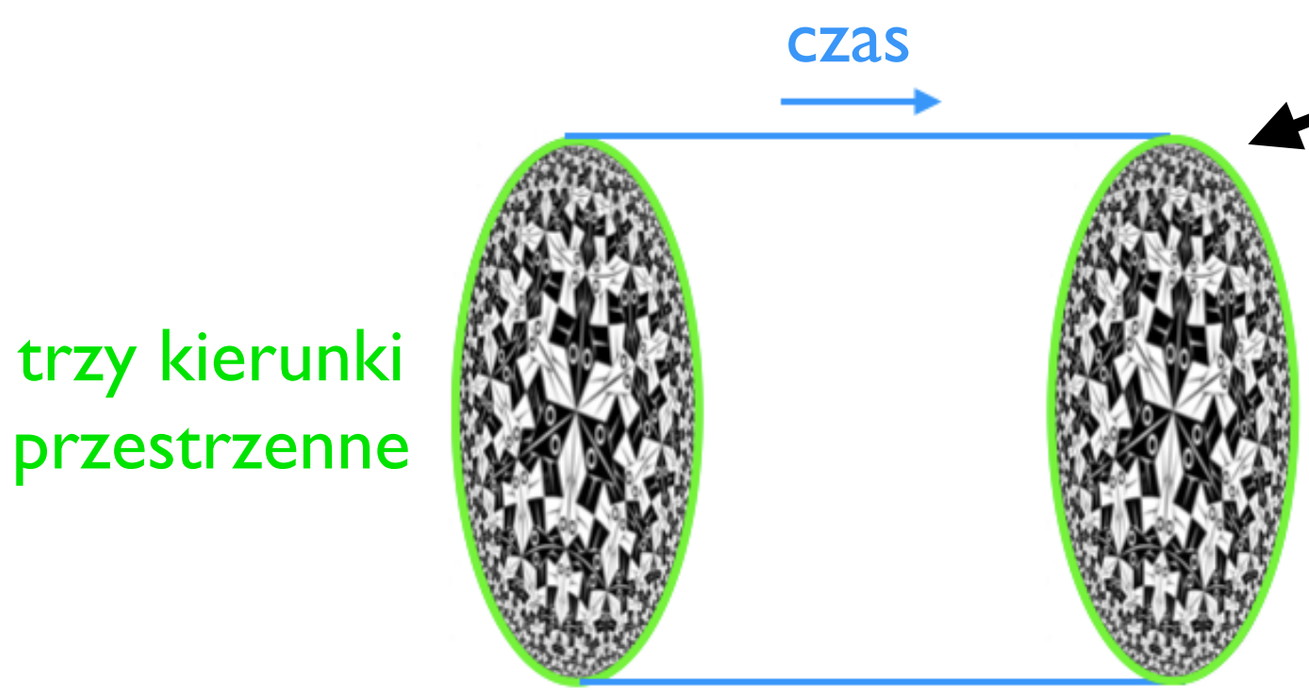
podobne do oddziaływań silnych układy w których sprzężenie jest
nieskończenie duża i pojęcie indywidualnych cząstek traci sens

↓

nowy paradygmat i nowy język

Holografia grawitacyjna Maldacena 1997

podobne do oddziaływań silnych układ w którym moc oddziaływania jest nieskończenie duża i pojęcie indywidualnych cząstek traci sens żyje tutaj

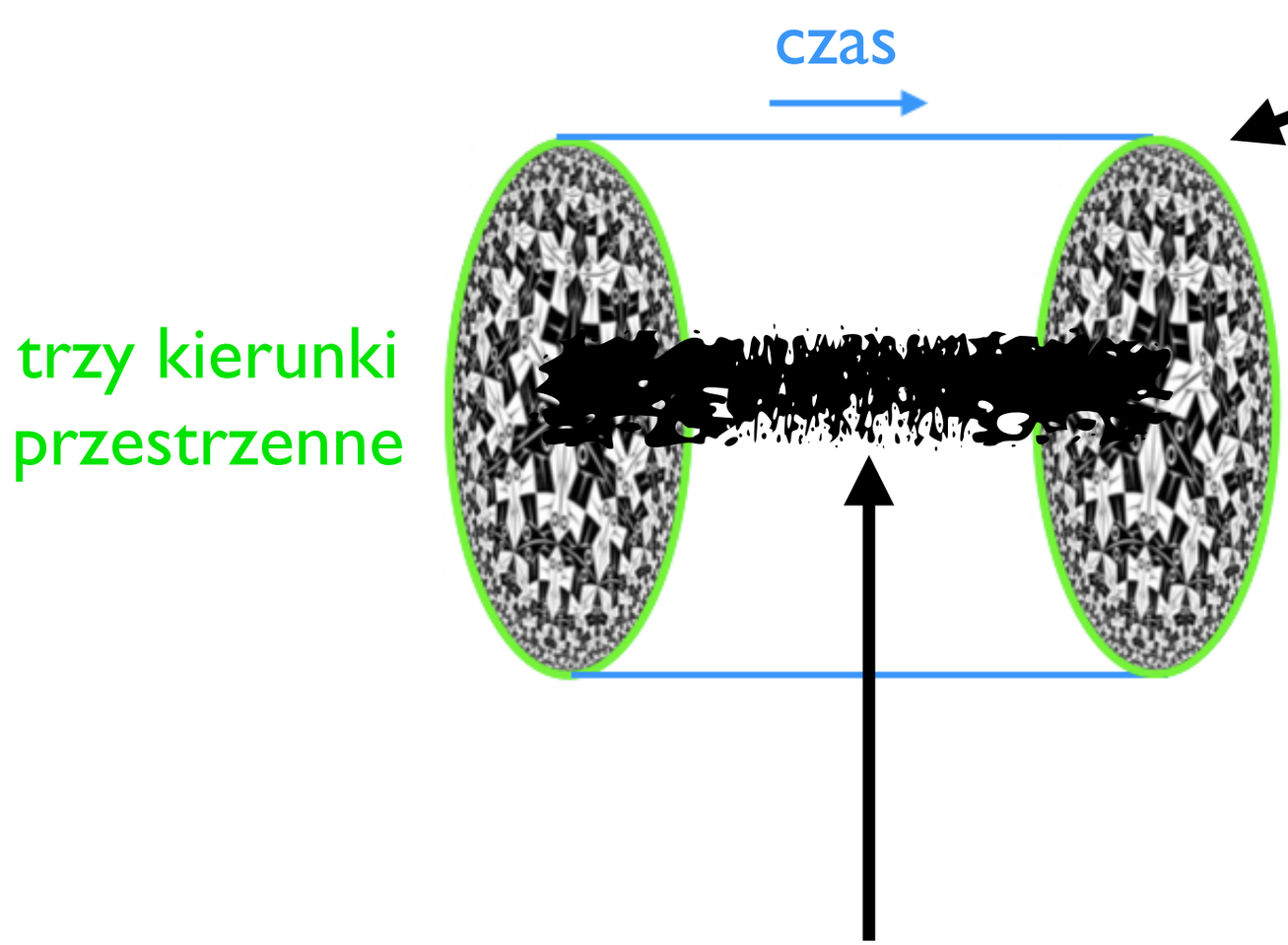


jego "hologram" to pięciowymiarowy wszechświat który wygląda jak gigantyczne pudełko, którego powierzchnia to czas i trzy kierunki przestrzenne

Hologram “plazmy kwarkowo-gluonowej”

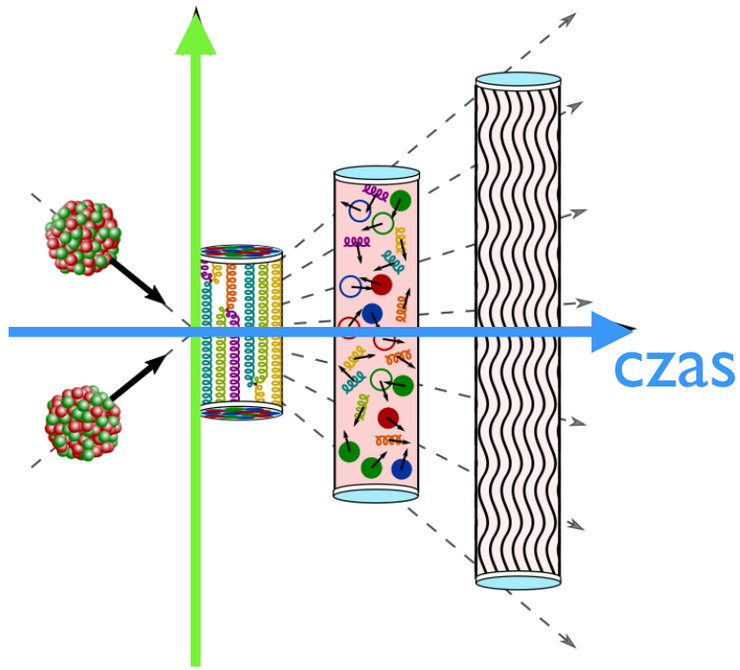
Witten 1998

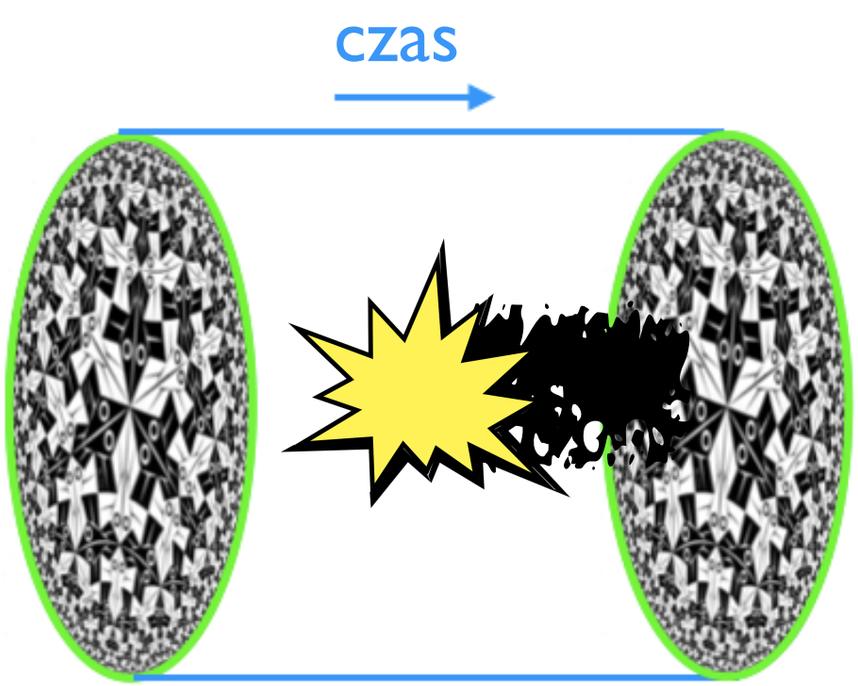
“plazma kwarkowo-gluonowa”



jej “hologram” to czarna dziura w pięciowymiarowym wszechświecie

Holografia zderzenia: idea





Od czarnych dziur

do nowych zjawisk

zależnych od czasu:

atraktor hydrodynamiczny

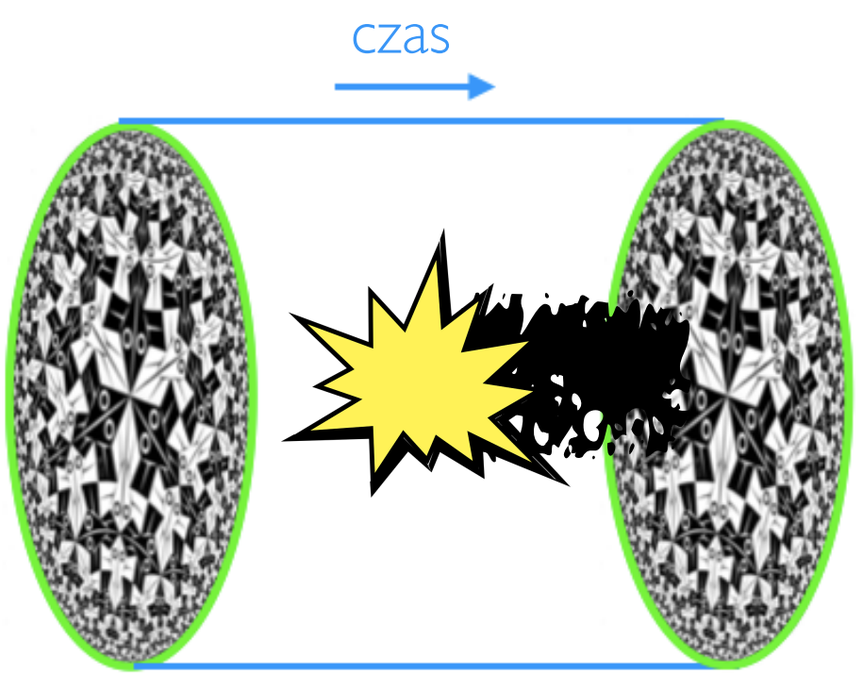
Holografia zderzenia: konsekwencje

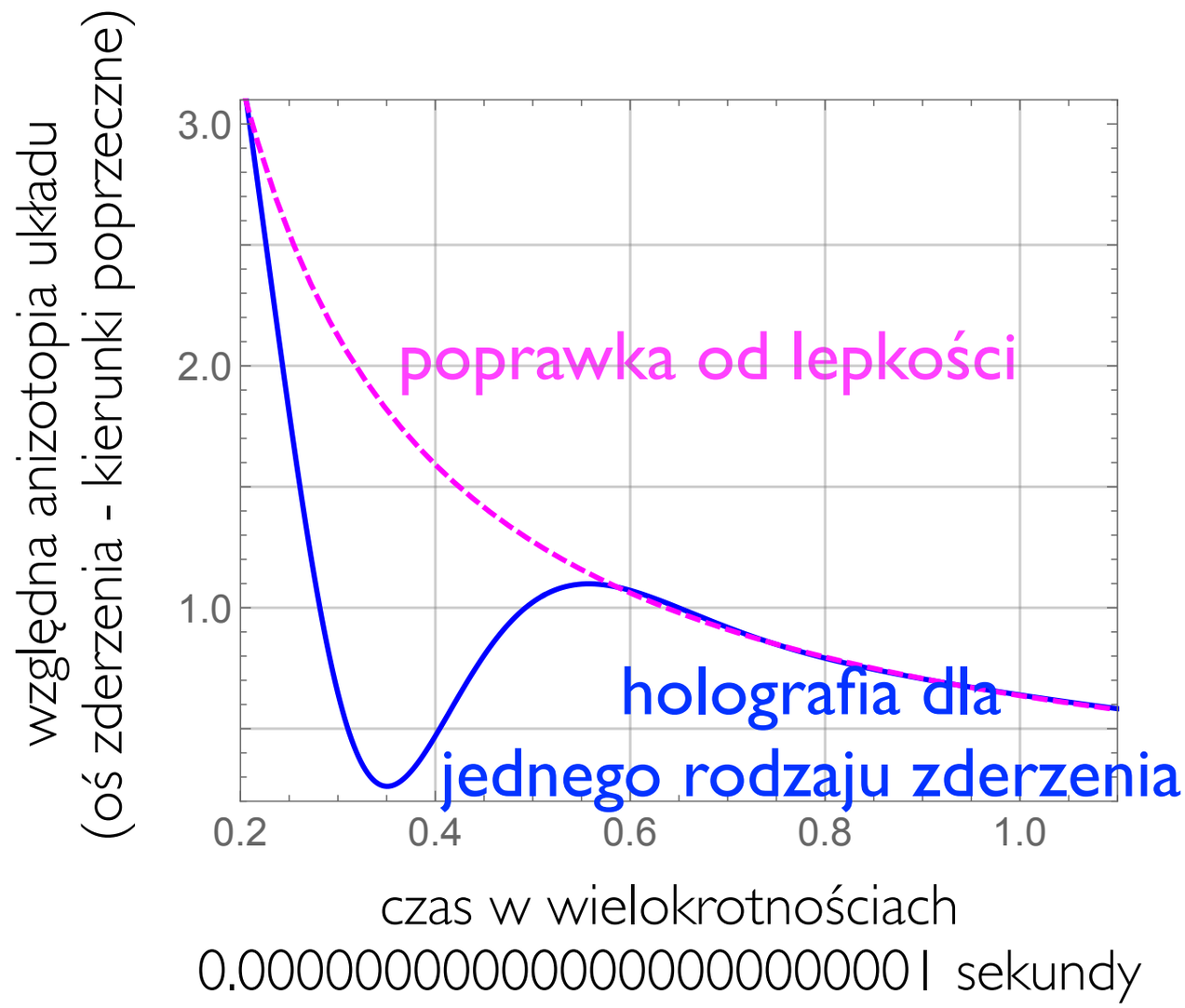
PRL **108,** 201602 (2012) PHYSICAL REVIEW LETTERS week ending 18 MAY 2012

Characteristics of Thermalization of Boost-Invariant Plasma from Holography

Michal P. Heller*
Instituut voor Theoretische Fysica, Universiteit van Amsterdam, Science Park 904, 1090 GL Amsterdam, The Netherlands

Romuald A. Janik† and Przemysław Witaszczyk‡
Institute of Physics, Jagiellonian University, Reymonta 4, 30-059 Kraków, Poland





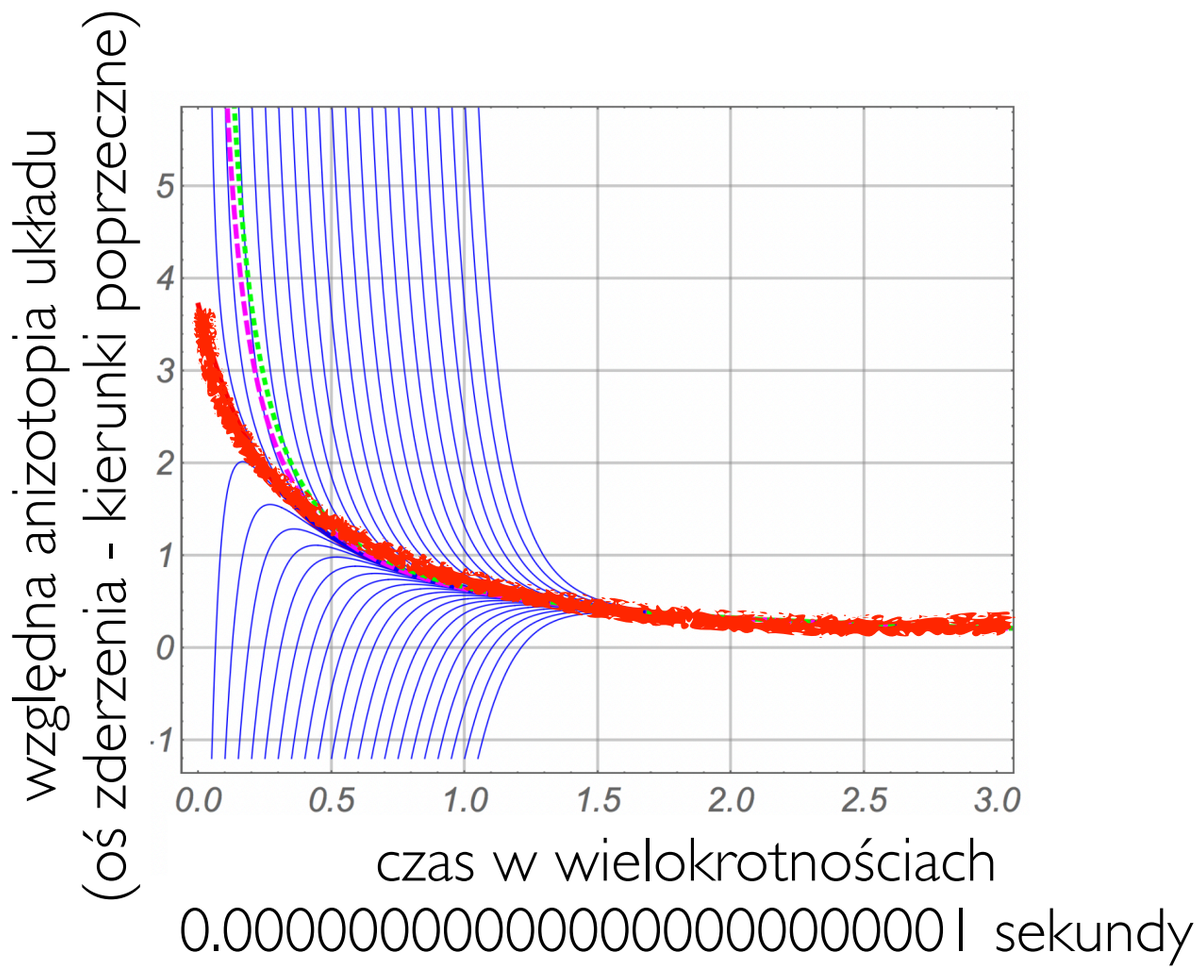
Przewidywanie eksperymentalne: plazma kwarkowo-gluonowa rodzi się anizotropowa i pozostaje taka przez większość swojej ewolucji

Atraktor hydrodynamiczny

PRL 115, 072501 (2015) PHYSICAL REVIEW LETTERS week ending 14 AUGUST 2015

Hydrodynamics Beyond the Gradient Expansion: Resurgence and Resummation

Michal P. Heller[1,2,*] and Michał Spaliński[2,3,†]
[1]Perimeter Institute for Theoretical Physics, Waterloo, Ontario N2L 2Y5, Canada
[2]National Centre for Nuclear Research, Hoża 69, 00-681 Warsaw, Poland
[3]Physics Department, University of Białystok, Lipowa 41, 15-424 Białystok, Poland
(Received 30 March 2015; published 14 August 2015)



Zmiana perspektywy: zamiast myślenia o opisie w języku płynu, lepkości itd, anisotropowa plazma kwarkowo-gluonowa jest efektem działania **atraktora**

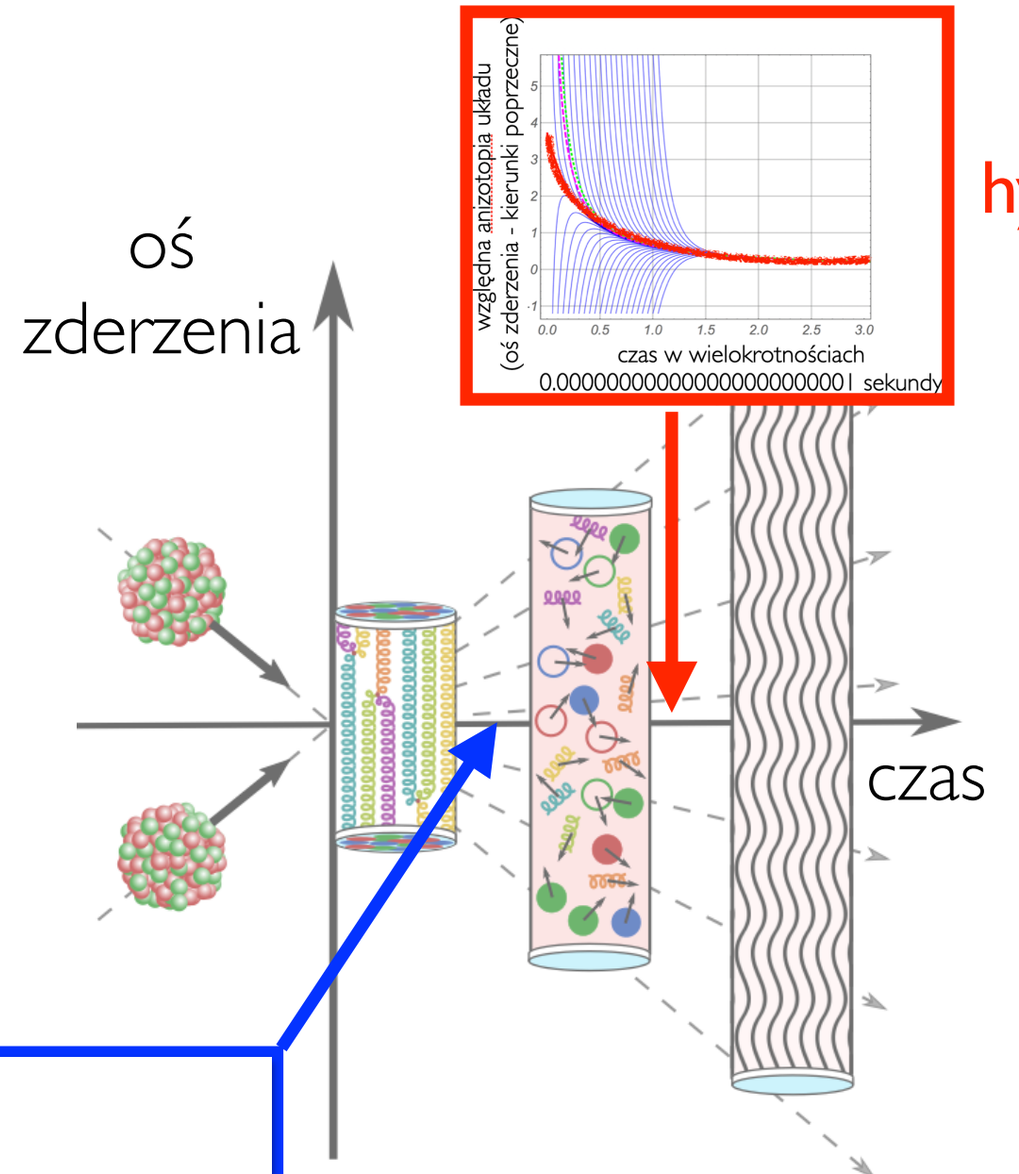
Od czarnych dziur

do nowych zjawisk

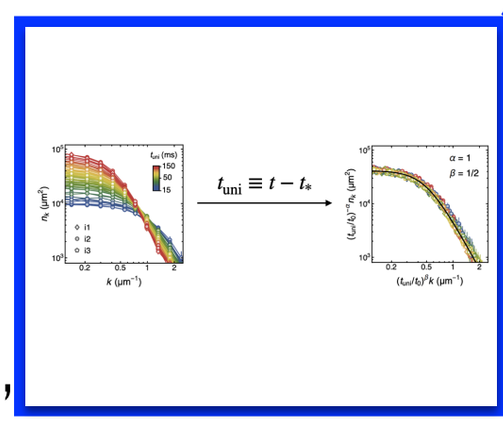
zależnych od czasu:

przedskalowanie

Atraktory w zderzeniach jąder



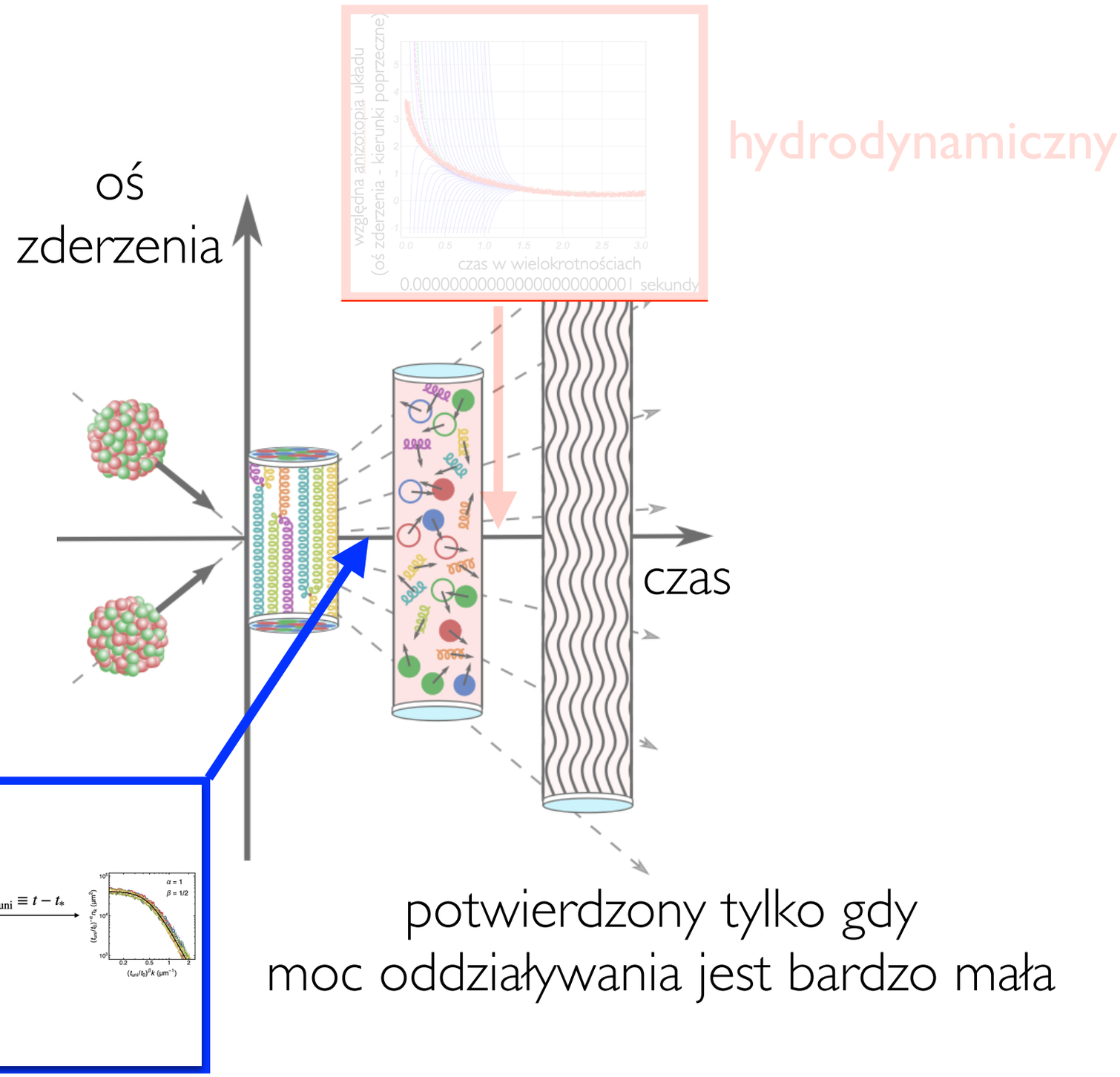
hydrodynamiczny



skalujący*

Berges, Boguslavski, Schlichting, Venugopalan 2013

Atraktor z akceleratora rodem z Sci-Fi



skalujący*

potwierdzony tylko gdy
moc oddziaływania jest bardzo mała

Berges, Boguslavski,
Schlichting, Venugopalan
2013

Atraktor skalujący i przedskalowanie

$$n(t, |\vec{k}|) \longrightarrow t^{\alpha_\infty} \times n_S\left(t^{\beta_\infty} |\vec{k}|\right)$$

PHYSICAL REVIEW LETTERS **132,** 071602 (2024)

Prescaling Relaxation to Nonthermal Attractors

Michal P. Heller,[1,†] Aleksas Mazeliauskas,[2,‡] and Thimo Preis[2,*]
[1]*Department of Physics and Astronomy, Ghent University, 9000 Ghent, Belgium*
[2]*Institut für Theoretische Physik, Universität Heidelberg, 69120 Heidelberg, Germany*

(Received 30 August 2023; revised 21 December 2023; accepted 29 January 2024; published 15 February 2024)

Kluczowa idea : zachowanie samopodobne musi samo wybrać sobie co rozumie za czas 0

$$t^{\alpha_\infty} \to (t - t_*)^{\alpha_\infty} \equiv \boxed{t^{\alpha(t)}} \qquad t^{\beta_\infty} \to (t - t_*)^{\beta_\infty} \equiv \boxed{t^{\beta(t)}}$$

Wprowadzenie t_* znacząco rozszerza stosowalność atraktora skalującego

Potwierdzenie w INNYM eksperymencie

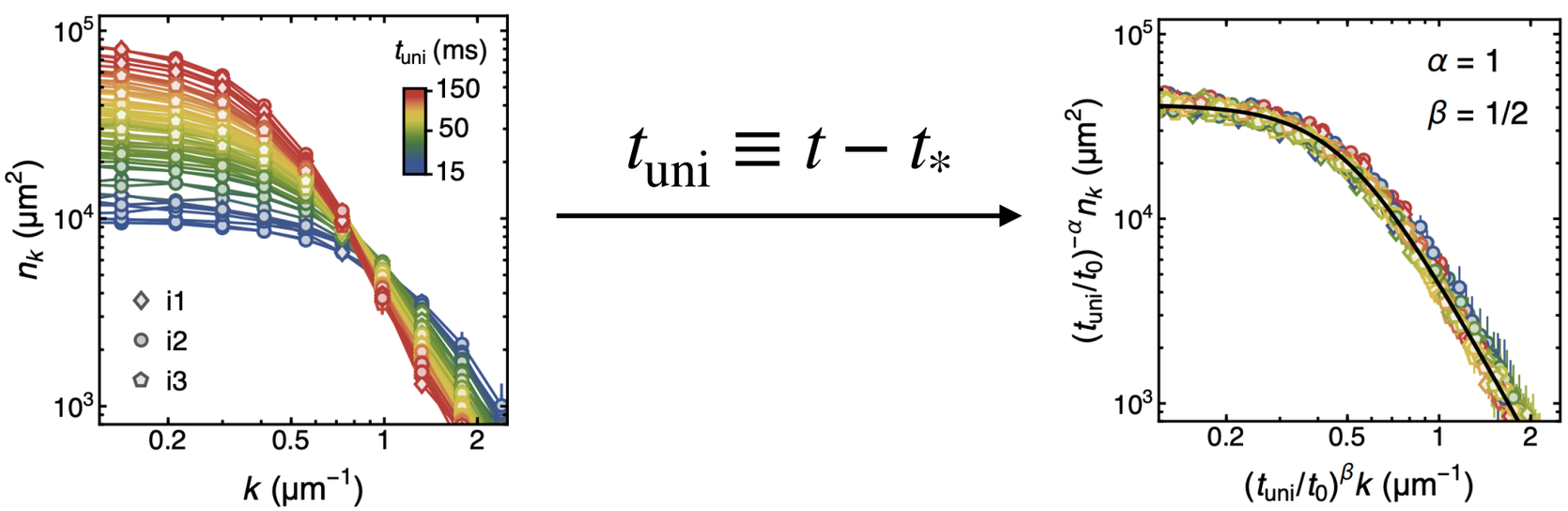
arXiv > cond-mat > arXiv:2312.09248

Condensed Matter > Quantum Gases

[Submitted on 14 Dec 2023 (v1), last revised 1 Feb 2024 (this version, v2)]

Universal Coarsening in a Homogeneous Two-Dimensional Bose Gas

Martin Gazo, Andrey Karailiev, Tanish Satoor, Christoph Eigen, Maciej Gałka, Zoran Hadzibabic

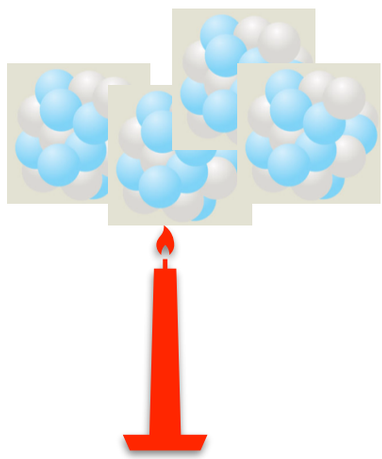


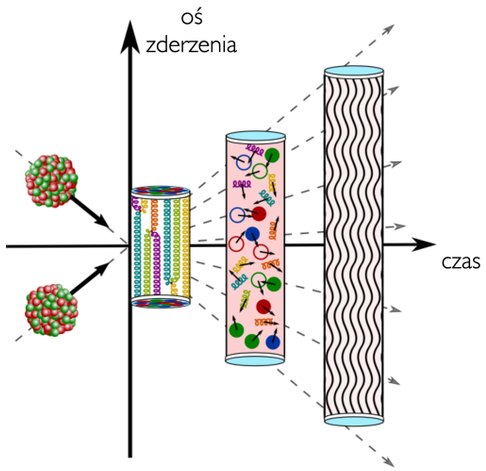
Podsumowanie

Podsumowanie

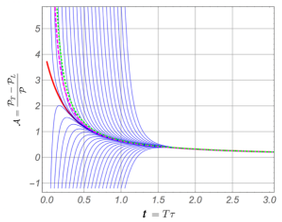
Nowy stan materii na Ziemi: (silnie sprzężona) plazma kwarkowo-gluonowa

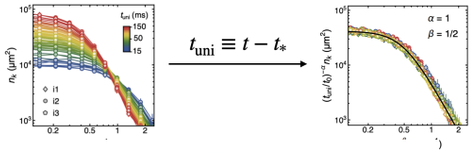
Jedyny sposób jej realizacji: zderzenia przy wielkich energiach

Życzenie*: 

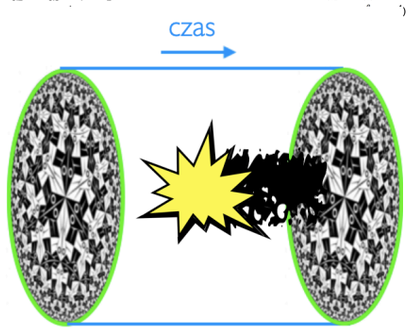
Rzeczywistość: 

Nowe zjawiska zależne od czasu: usystematyzowanie mechanizmów prowadzących do plazmy kwarkowo-gluonowej w języku uniwersalności (atraktorów)





(Pewne) Czarne dziury: modele oddziaływań silnych w reżimie mocnych sprzężeń w języku holografii



Co dalej?

Czy atraktor skalujący
istnieje przy silnym sprzężeniu?

Jakie zjawiska fizyczne
sprawiają, że atraktor skalujący istnieje?

Funded by
the European Union

European Research Council
Established by the European Commission

Czy atraktor skalujący i hydrodynamiczny
są dwoma różnymi przejawami bardziej fundamentalnego zjawiska?

Co dalej?

Czy atraktor skalujący
istnieje przy silnym sprzężeniu?

Jakie zjawiska fizyczne
sprawiają, że atraktor skalujący istnieje?

Funded by
the European Union

European Research Council
Established by the European Commission

Czy atraktor skalujący i hydrodynamiczny
są dwoma różnymi przejawami bardziej fundamentalnego zjawiska?

Co dalej?

Czy atraktor skalujący
istnieje przy silnym sprzężeniu?

Jakie zjawiska fizyczne
sprawiają, że atraktor skalujący istnieje?

Funded by
the European Union

European Research Council
Established by the European Commission

Czy atraktor skalujący i hydrodynamiczny
są dwoma różnymi przejawami bardziej fundamentalnego zjawiska?