

Fizyka statystyczna w wysokoenergetycznych zderzeniach **jądrowych**

Viktor Begun

UJK, Kielce, Polska (8)

Enrico Fermi Ctr., Włochy (2)

FIAS, Frankfurt, Niemcy (8)

BITP, Kijów, Ukraina (37)

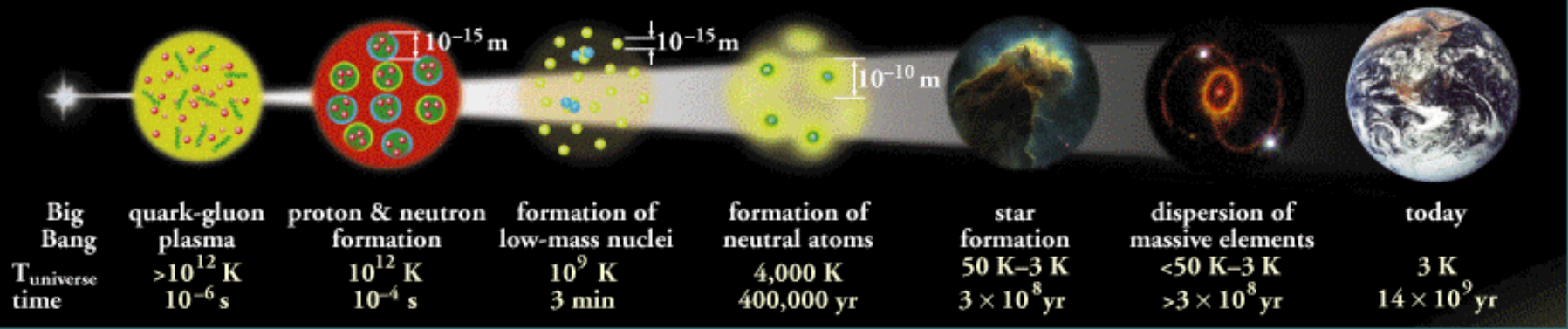
Motywacja

Po co nam zderzenia jądrowe?

- Możemy zbadać właściwości materii przy temperaturze **1.000.000** razy **większej** niż **na słońcu**, w warunkach podobnych do tych które były w pierwszych sekundach **po utworzeniu Wszechświata**

Expansion of the Universe

After the Big Bang, the universe expanded and cooled. At about 10^{-6} second, the universe consisted of a soup of quarks, gluons, electrons, and neutrinos. When the temperature of the Universe, T_{universe} , cooled to about 10^{12} K, this soup coalesced into protons, neutrons, and electrons. As time progressed, some of the protons and neutrons formed deuterium, helium, and lithium nuclei. Still later, electrons combined with protons and these low-mass nuclei to form neutral atoms. Due to gravity, clouds of atoms contracted into stars, where hydrogen and helium fused into more massive chemical elements. Exploding stars (supernovae) form the most massive elements and disperse them into space. Our earth was formed from supernova debris.



Po co nam zderzenia jądrowe?

Jest nas już 7 miliardów i potrzebujemy energii

- Spalanie dowolnych paliw może dać energię około Elektronowolta (**eV**) na atom paliwa, bo to jest energia **chemiczna**
- Odnawialnej energii nie wystarczy, bo w wielu krajach nie ma gór z dużymi rzekami, ani wiatru, ani słońca przez wiele dni w roku
- **Jądrowa** energia daje około Megaelektronowolta (**MeV**) na atom paliwa, co jest **1.000.000** razy **więcej** niż w procesie spalania
- Synteza **termojądrowa** może dać około **10 MeV** na atom paliwa
- Typowe **energie zderzeń jądrowych** to Giga-elektronowolt (**GeV**), co jest **1.000.000.000** razy **więcej** niż w procesie spalania



Ile kosztują zderzenia jądrowe?

• **LHC** – budowa – **7.5 miliardów** Euro, **CERN** budżet – **1 miliard** Euro na rok

• **~ 750.000 samochodów**
Volkswagen Golf z 2016 roku

• **~ 1400 czołgów** Leopard-2
(128 w Polskiej armii)

• **~ 780 kilometrów**
autostrad w Polsce



• **Igrzyska Olimpijskie**
– **50 miliardów** dolarów
(Zimowe 2014 roku)

• Program **Apollo** (1960–1975)
– **200 miliardów** dolarów
(w cenach 2015 roku)

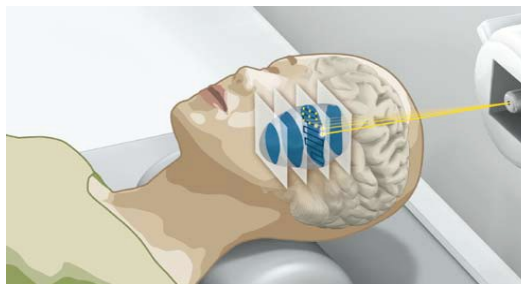
Jaka z tego korzyść?

Otrzymujemy nowe (spin-off) technologie

- Protokół **www** oraz pierwsza przeglądarka **internetowa** była zrobiona przez Tima Bernersoma-Lee, naukowca z CERNu
- **Leczenie raka** w chirurgicznie niedostępnych miejscach za pomocą terapii protonowej (m.in. **Kraków**) i hadronowej (**Heidelberg**)



<http://www.ifj.edu.pl/ccb>



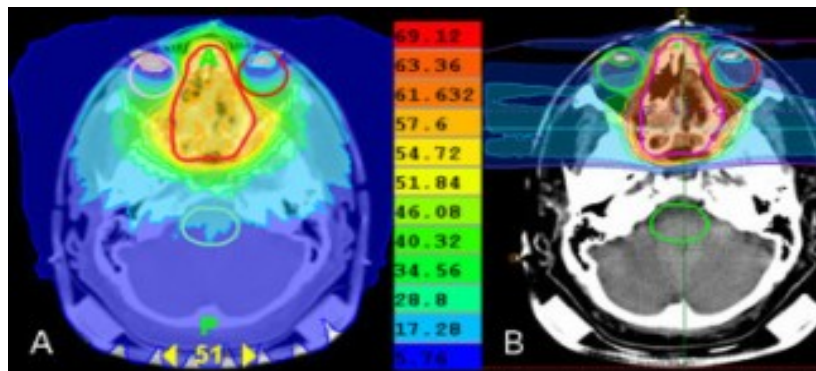
<https://www.heidelberg-university-hospital.com/diseases-treatments/tumor-diseases/radiation-therapy/>

Dlaczego terapia hadronowa?

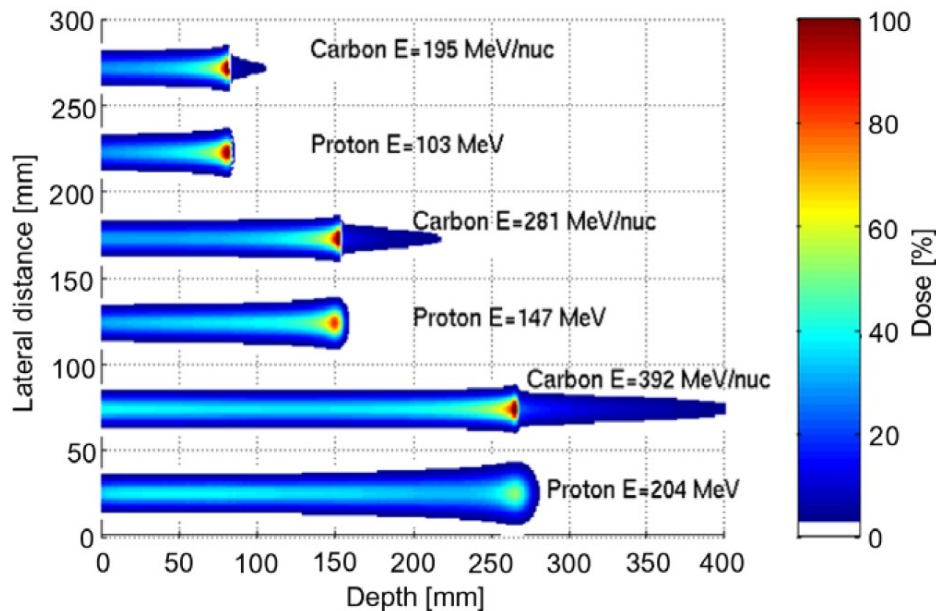
bo jest **skuteczniejsza** dla głęboko umieszczonych nowotworów

X-ray

protony



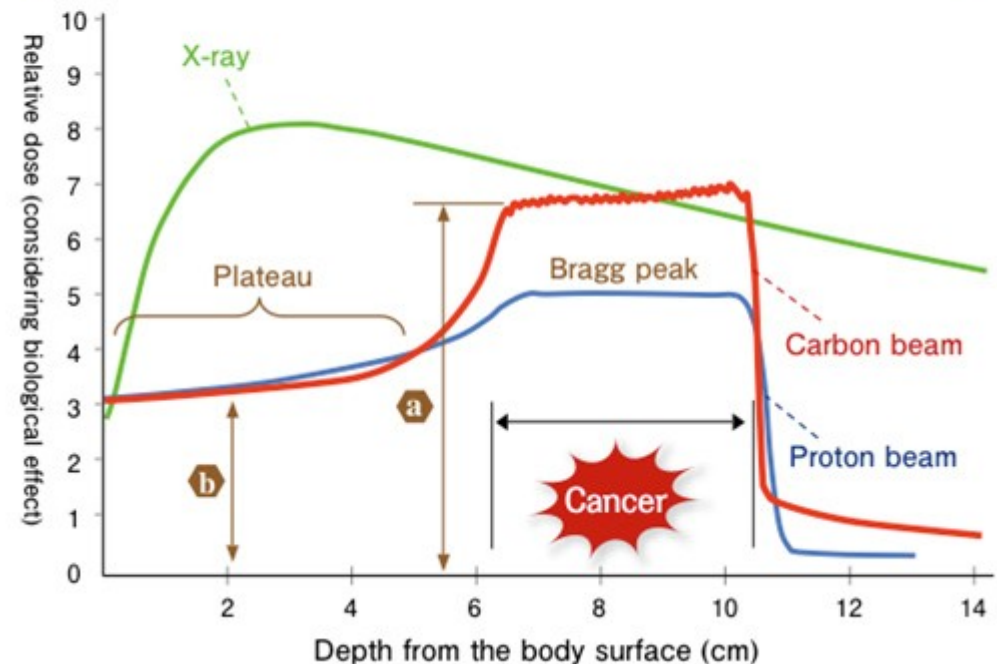
Kosaki et al., Radiat. Oncol. (2012)



Suit et al., Radiat. Oncol. (2010)

- protony jest łatwiej otrzymać i skupić
- wiązki jonów węgla mają silniejsze maksimum gęstości jonizacji

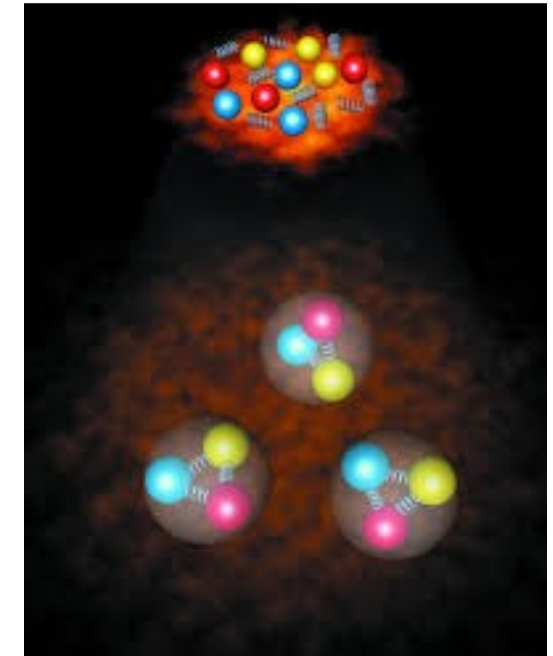
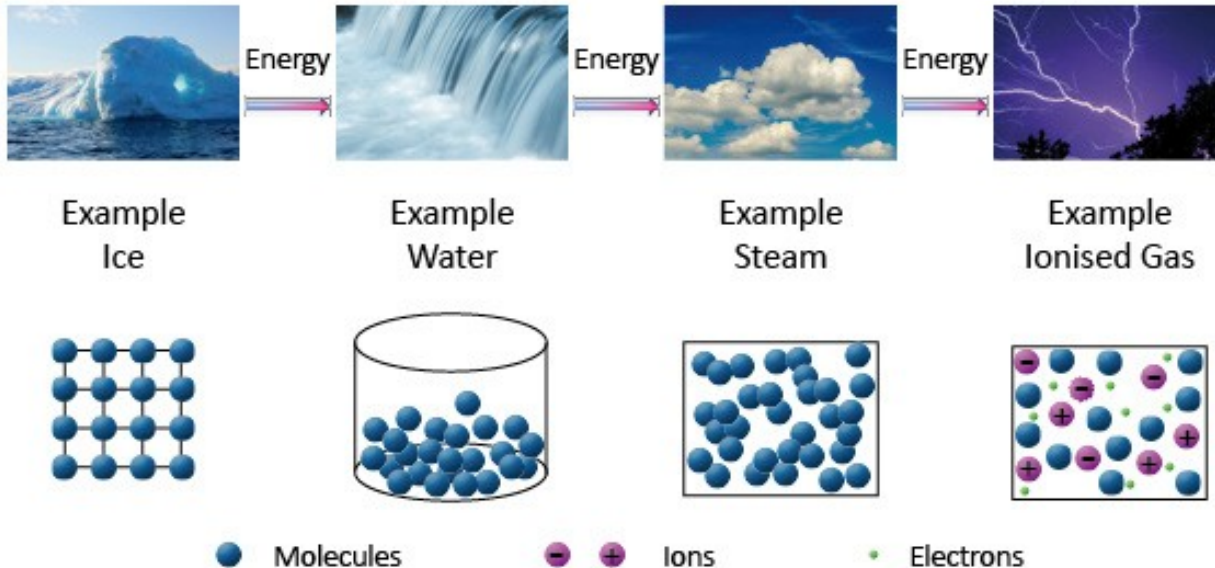
When the ratios of peak to plateau (a/b) are compared while considering biological effect, the carbon beam has the largest value.



Plazma Kwarkowo-Gluonowa

Stany skupienia materii

Ciało stałe → Ciecz → Gaz → Plazma → Plazma Kwarkowo-Gluonowa (**QGP**)



ADD HEAT

Temperatury charakterystyczne

0 °C (273 K)

373 K

647 K

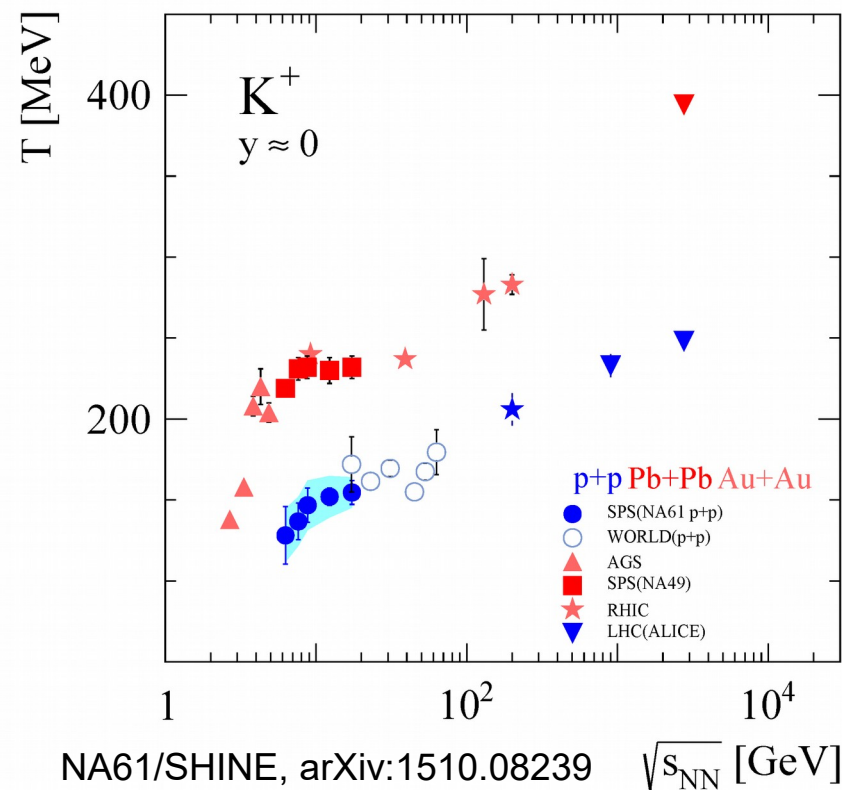
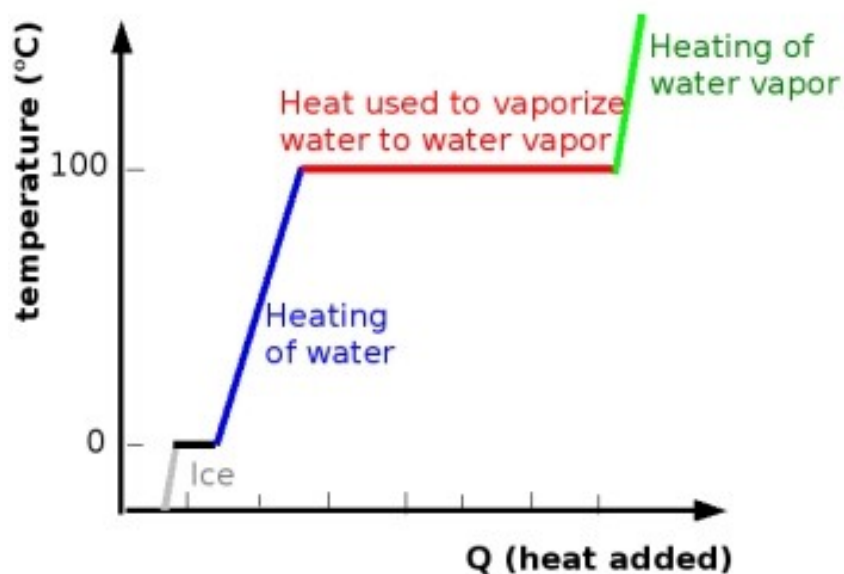
~ 10² - 10⁸ K

> 10¹² K

W 1978 roku po raz pierwszy E. Shuryak użył nazwy – plazma kwarkowo-gluonowa, Yad. Fiz. (1978)

Gdzie tworzy się QGP ?

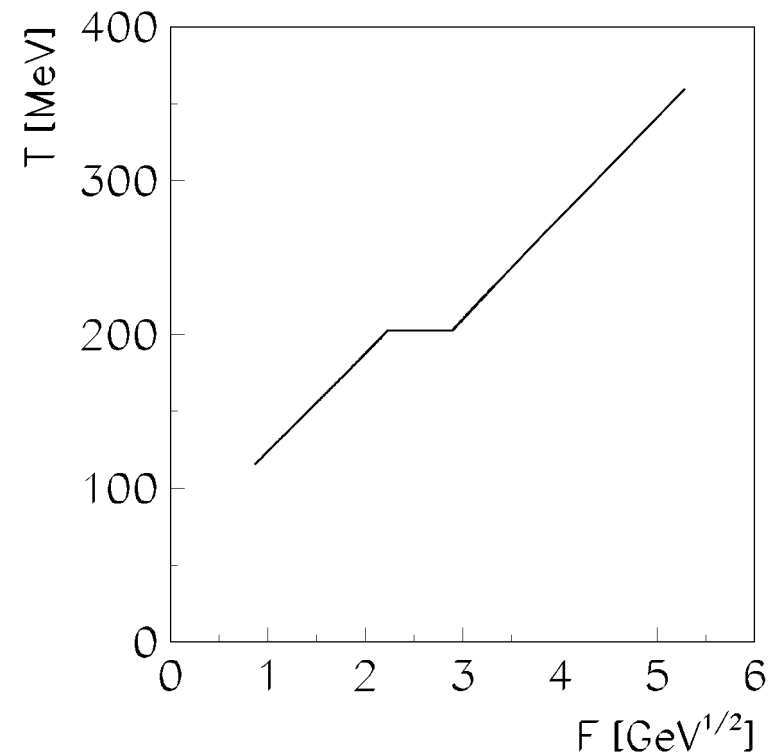
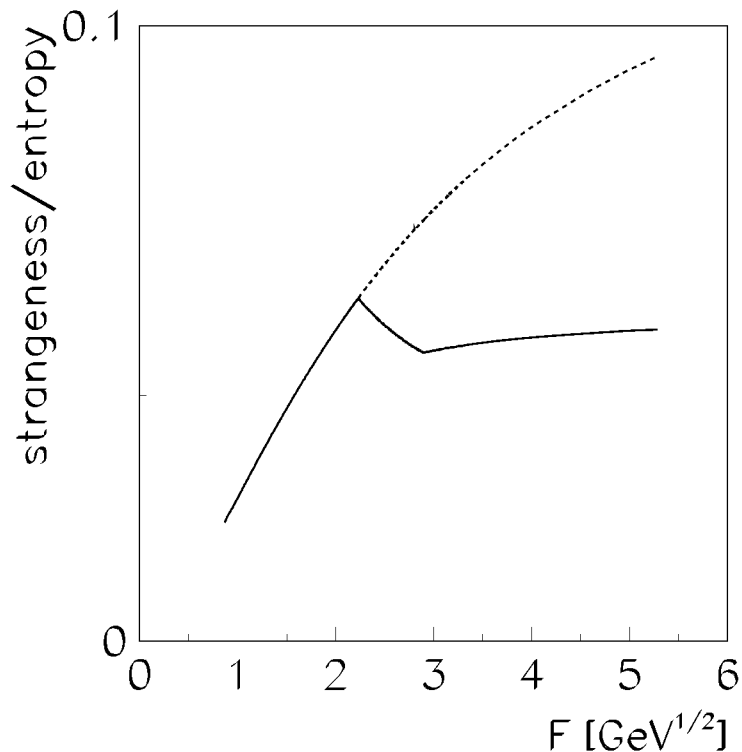
- W 2000 roku **CERN** ogłosił pośrednie dowody istnienia nowego stanu materii na akceleratorze **SPS**
- W 2010 roku Brookhaven National Laboratory (akcelerator **RHIC**) ogłosił utworzenie plazmy kwarkowo-gluonowej w temperaturze ok. $4 \cdot 10^{12}$ K
- **NA49** uważa, że QGP pojawia się już **przy niskich energiach SPS**



- Nagroda Nobla za odkrycie QGP nie została jeszcze przyznana, co oznacza, że nie ma zgody, gdzie dokładnie QGP się pojawia

Przewidywanie rogu i schodka

- Pokazano, że **stosunek dziwności do entropii** zmienia nachylenie, kiedy energia zderzenia rośnie
- Wiemy, że **temperatura** powinna być **stała** w przypadku przemiany fazowej pierwszego rzędu

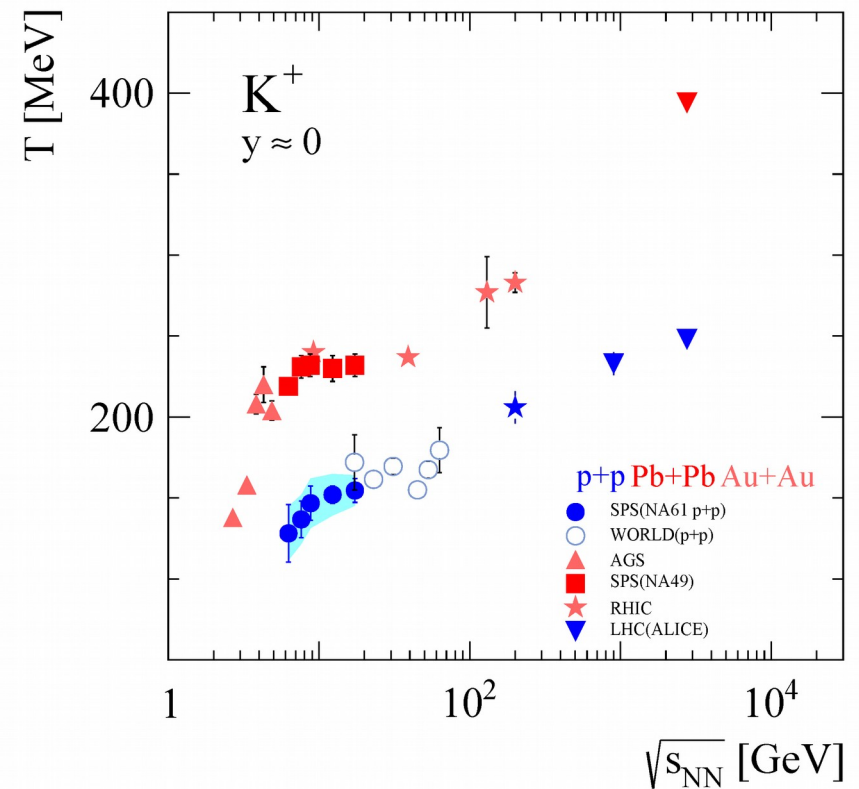
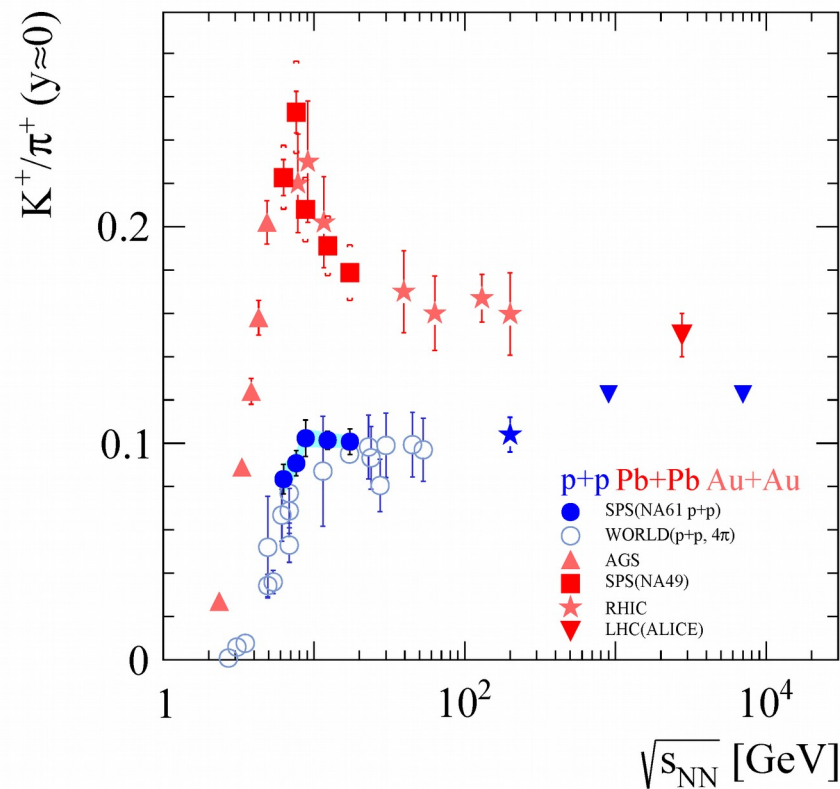


Gazdzicki, Gorenstein, Acta Phys. Polon. B (1999), hep-ph/9803462

- Dodatkowo przypuszcza się, że stosunek jest niemonotoniczny, czyli ma róg

Eksperymentalne potwierdzenie

- **Stosunek** najlżejszych dziwnych cząstek - **kaonów**, do najliczniejszych cząstek (entropia) - **pionów** ma **ostry róg** dokładnie tam, gdzie przewidywano
- **Temperatura** jest **stała** przy **SPS** i rośnie wolniej przy większych energiach, tak jakby ogrzewany **system zmienił się**

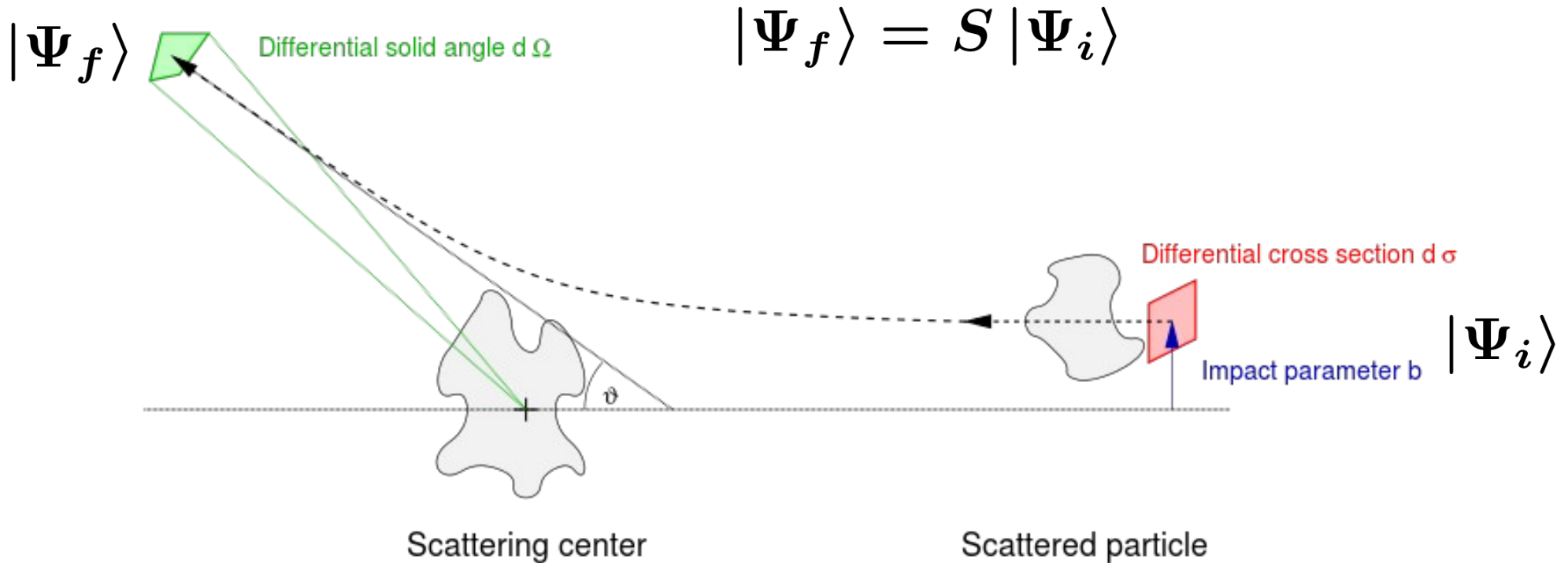


NA49 Collaboration, Phys. Rev. C (2008), arXiv:0710.0118; arXiv:1510.08239

- Niezależne pomiary na **RHIC** potwierdzają wyniki SPS

Jak to obliczyć ?

z wykorzystaniem teorii rozpraszania i chromodynamiki kwantowej



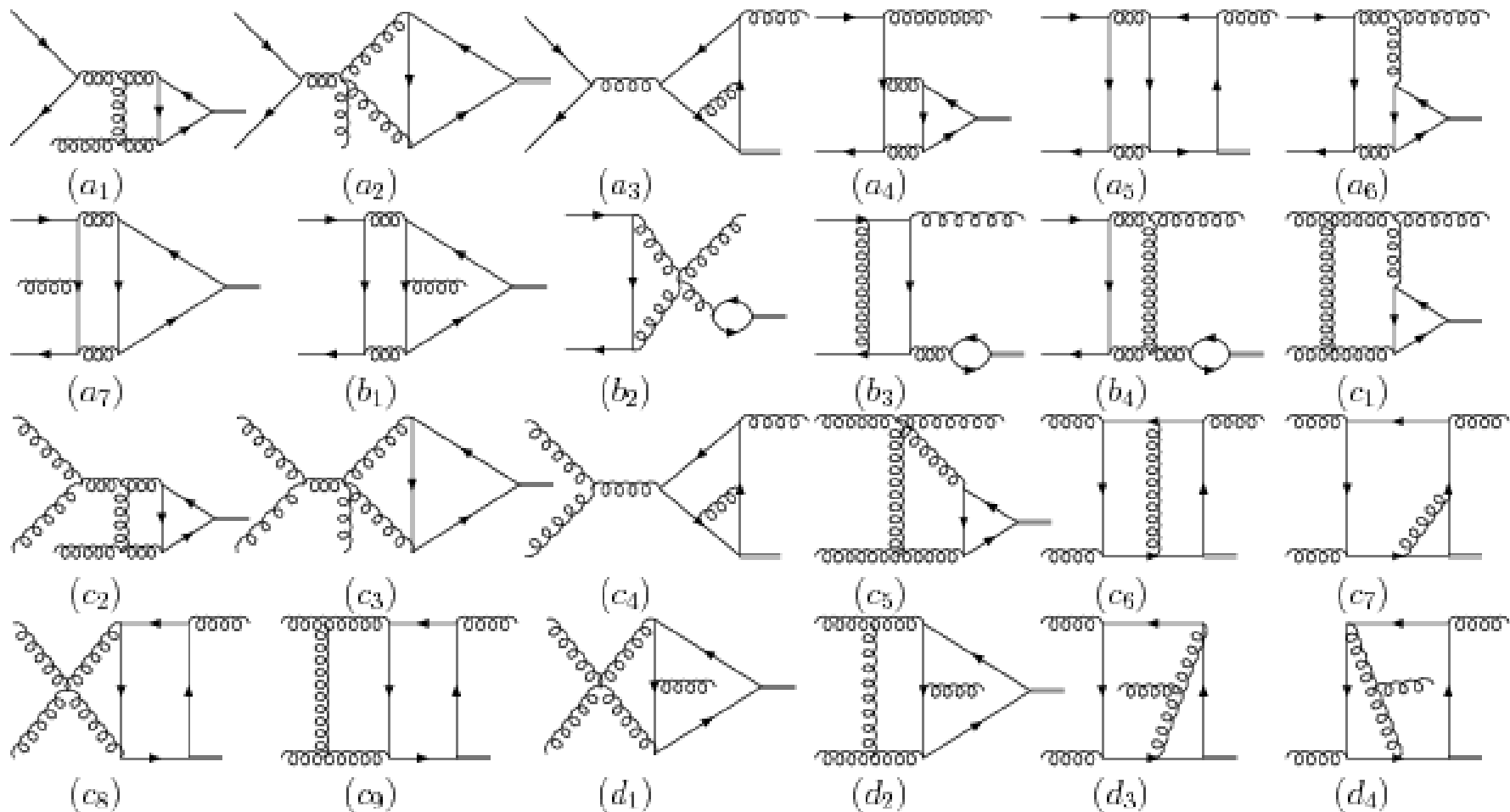
$$S_{fi} = \delta_{fi} - 2\pi i \delta(E_f - E_i) \delta(p_i - p_f) T_{fi}$$

delta Diraca zachowanie energii pędu

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = (2\pi)^4 m_f m_i \frac{p_f}{p_i} |T_{fi}|^2$$

T_{fi} może być obliczony za pomocą diagramów Feynmana

Typowe diagramy Feynmana



Bin Gong et al. Phys. Rev. D (2011) arXiv:1009.3839 [hep-ph]

Dość kłopotliwa procedura, która **nie działa dla** „miękkich” cząstek o niskich pędach, które stanowią około **90%** wszystkich **cząstek** tworzonych w wysokoenergetycznych zderzeniach jądrowych

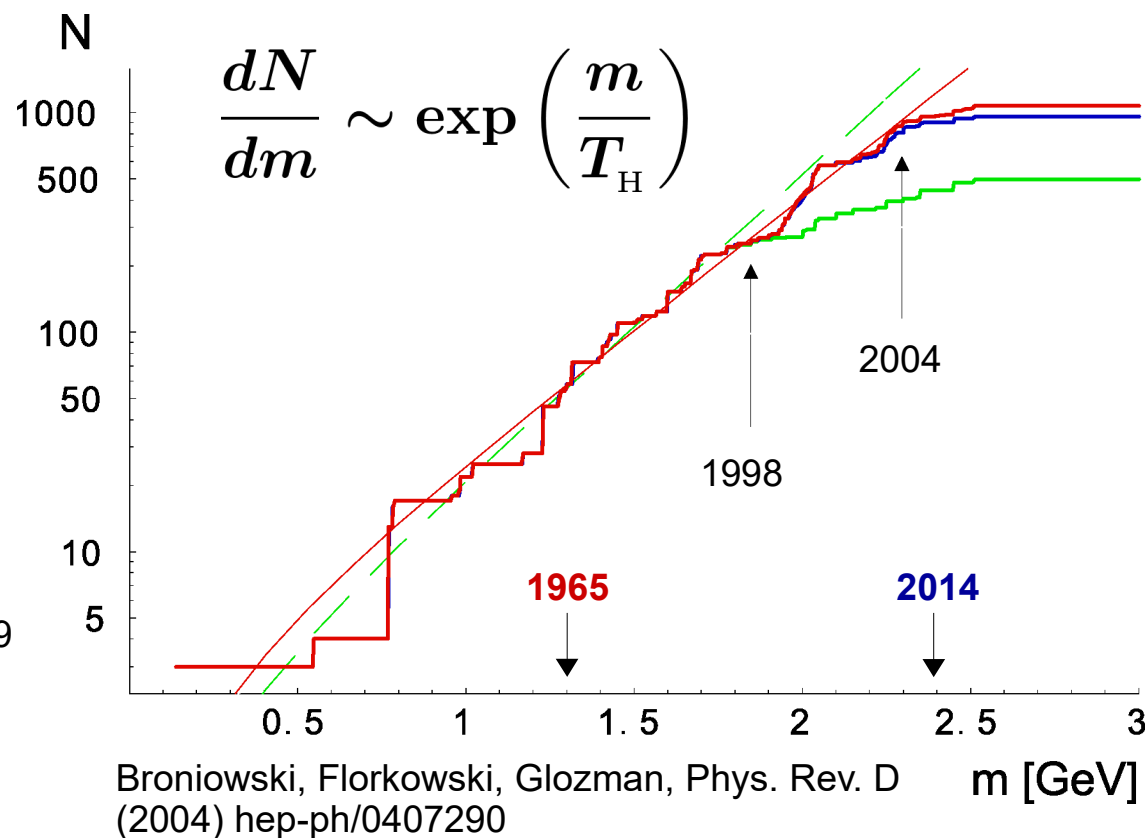
Model Termalny

Temperatura Hagedorna



<http://cerncourier.com/cws/article/cern/28919>

Hagedorn, Nuovo Cim. Suppl. (1965)



- Skumulowana liczba cząstek oddziałujących silnie rośnie **wykładniczo** wraz z masą
- Parametr w mianowniku w przybliżeniu równa się **160 MeV**, co jest blisko masy najbliższej cząstki – **mezonu pi**
- Ten parametr nazywa się **graniczną temperaturą Hagedorna**, ponieważ materia hadronowa nie może jej przekroczyć, bo zaczyna wrzeć tworząc nowe cząstki

Promieniowanie Hawkinga



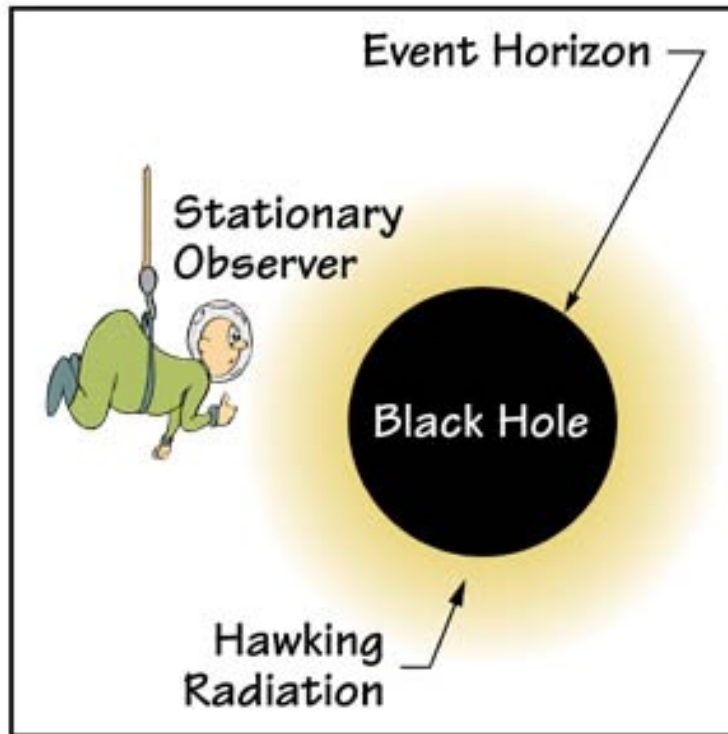
<http://www.universetoday.com/115307/hawking-radiation-replicated-in-a-laboratory/>

- **Czarne dziury mogłyby emitować promieniowanie** w sposób, w jaki emituje promieniowanie ciało **doskonale czarne**, czyli poprzez wysyłanie fotonów o pewnej energii (temperatury)

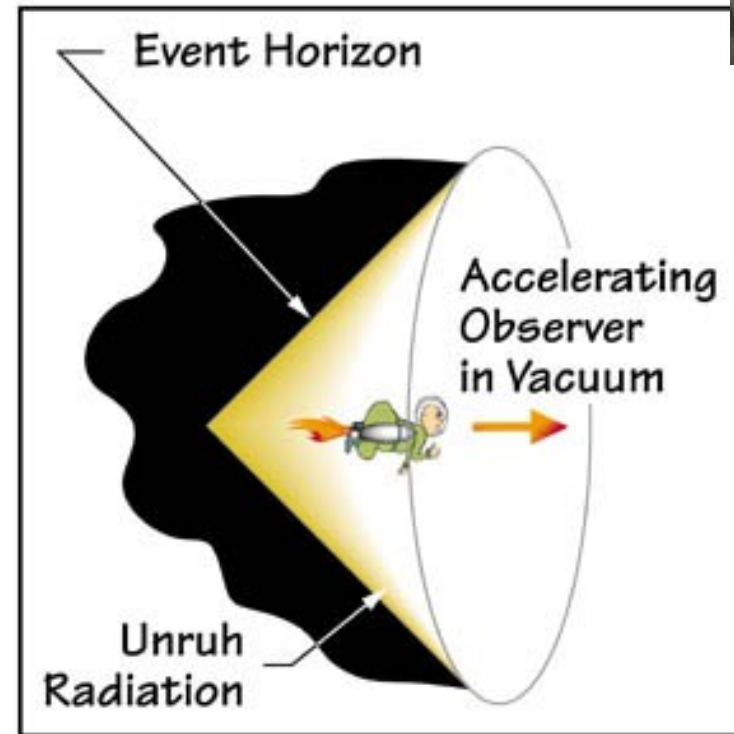
$$T_{\text{Hw}} = \frac{1}{8\pi M} \simeq 6 \cdot 10^{-8} \text{K} \frac{M_{\odot}}{M}$$

Promieniowanie Unruha

EVENT HORIZONS: From Black Holes to Acceleration



A stationary observer outside the black hole would see the thermal Hawking radiation.

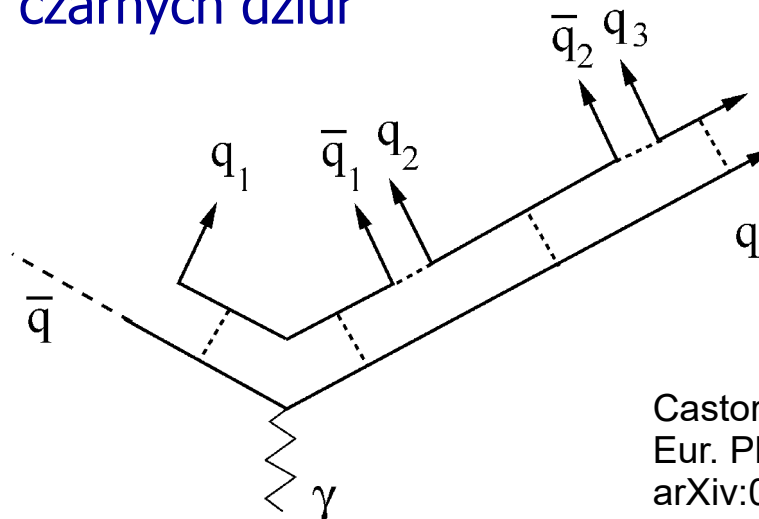
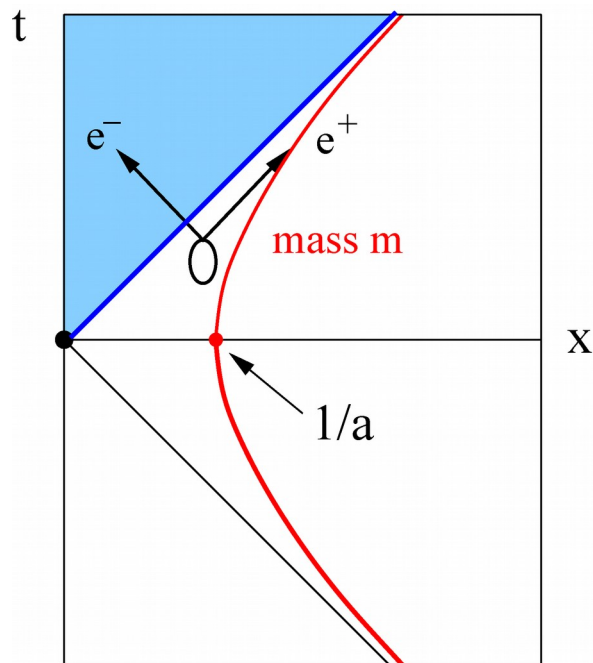


An accelerating observer in vacuum would see a similar Hawking-like radiation called Unruh radiation.

- Obserwator poruszający się z przyspieszeniem widzi elektromagnetyczną próżnię kwantową jako przestrzeń wypełnioną **promieniowaniem ciepłym** w **równowadze termodynamicznej**

Temperatura Unruha-Hawkinga

- Zasada uwięzienia koloru kwarków i gluonów **tworzy horyzont zdarzeń**, podobny do horyzontu zdarzeń czarnych dziur



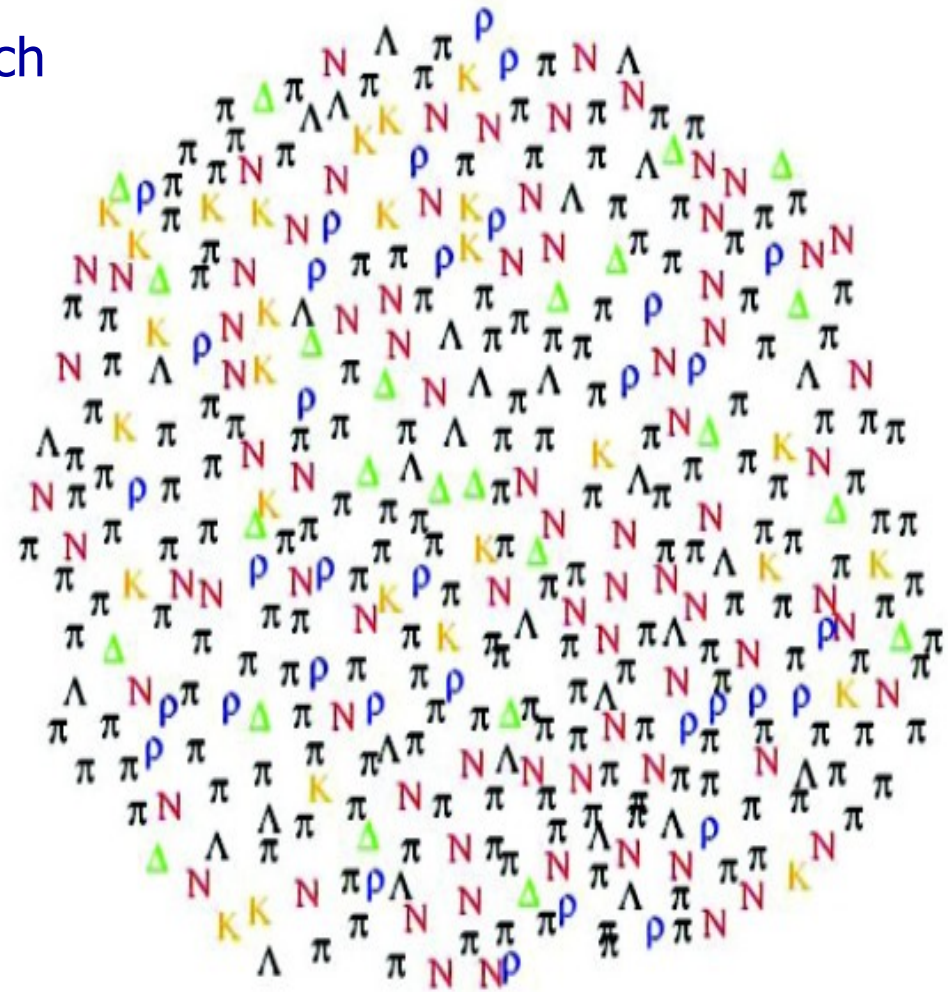
Castorina, Kharzeev, Satz,
Eur. Phys. J. C (2007)
arXiv:0704.1426

$$T_{U-H} = \sqrt{\frac{\sigma}{2\pi}} \simeq 160 \text{ MeV}$$

- Informacja nie jest przesyłana, więc promieniowanie jest **termiczne**
- Temperatura jest określona przez **napięcie struny** między **kwarkami** albo **gluonami** na powierzchni horyzontu zdarzeń
- Temperatura Unruha-Hawkinga **numerycznie** jest **zbliżona** do temperatury **Hagedorna!**

Model gazu hadronowego (HRG)

- Po zderzeniu tworzy się układ z wszelkich istniejących hadronów.
- Ilość pewnych sortów hadronów jest wyznaczona przez **temperaturę**, **objętość** i **potencjały chemiczne**, odpowiadające ładunkom, które zachowują się w oddziaływaniach silnych – ładunek **elektryczny Q** , ładunek **barionowy B** i **dziwność S**
- Dwa parametry są kasowane, ponieważ znamy początkowe ładunki Q , B , S , i zakładamy się, że układ jest jednorodny, czyli znamy **Q/B** i wiemy że **$S=0$**
- Parametry** znajduje się poprzez **dopasowanie** teoretycznie **obliczonych** i eksperymentalnie **zmierzonych** krotności **cząstek**



Uzyskanie temperatury za pomocą HRG

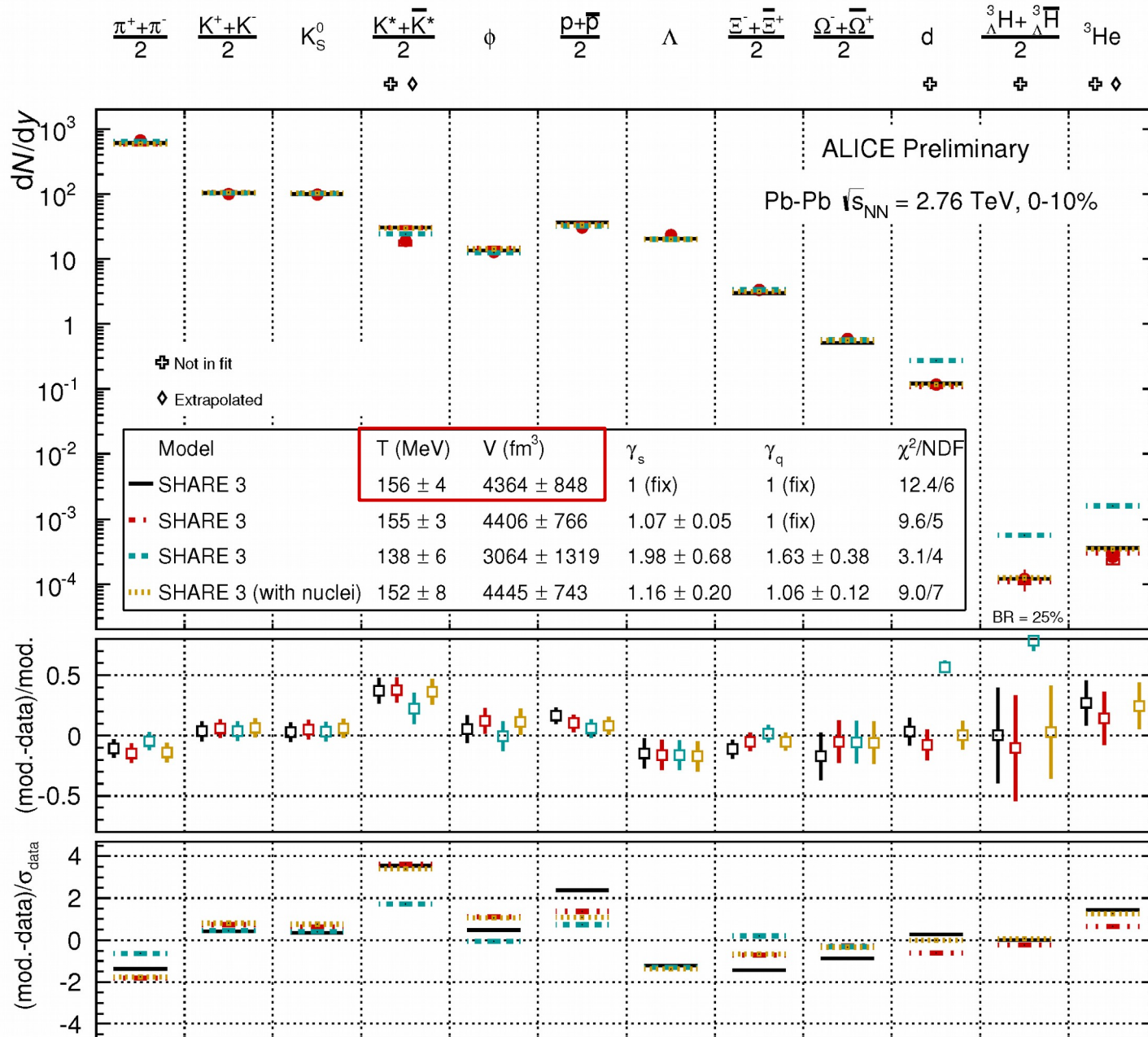
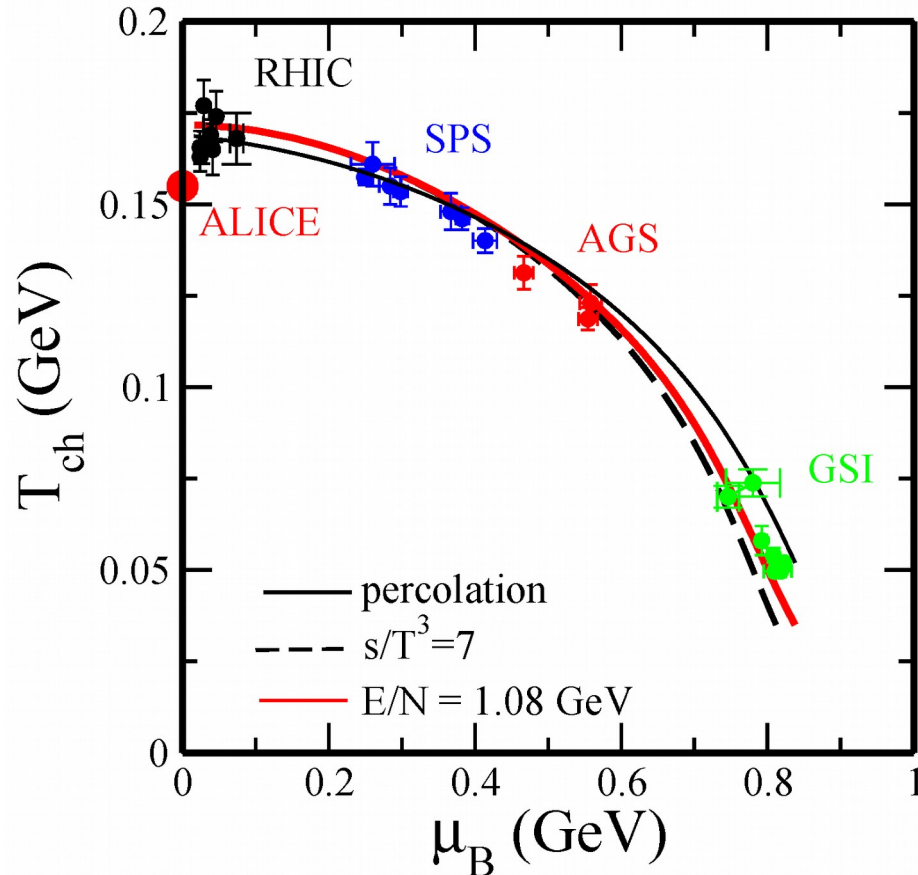
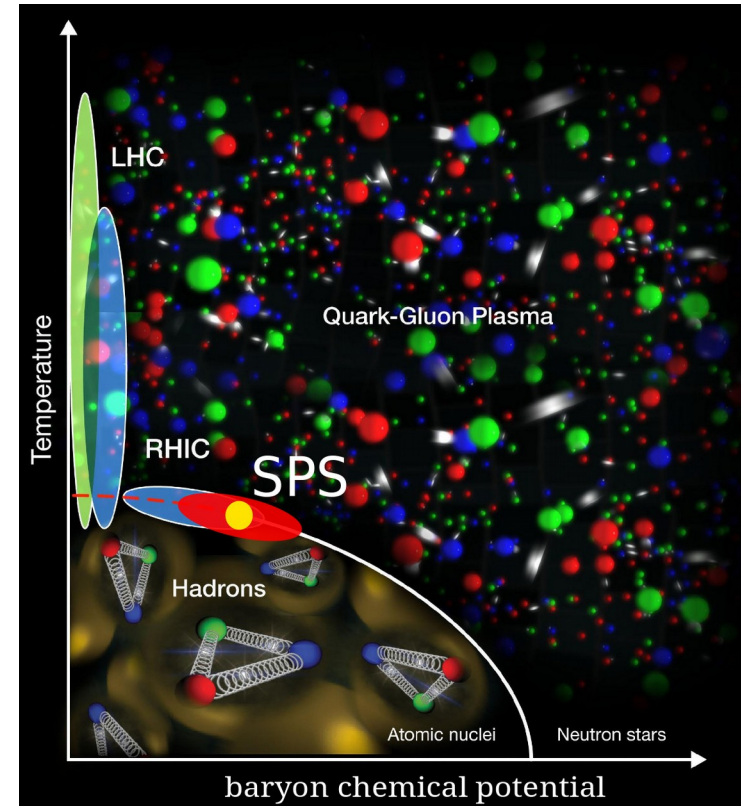


Diagram fazowy materii oddziałującej silnie

w modelu HRG



w mediach



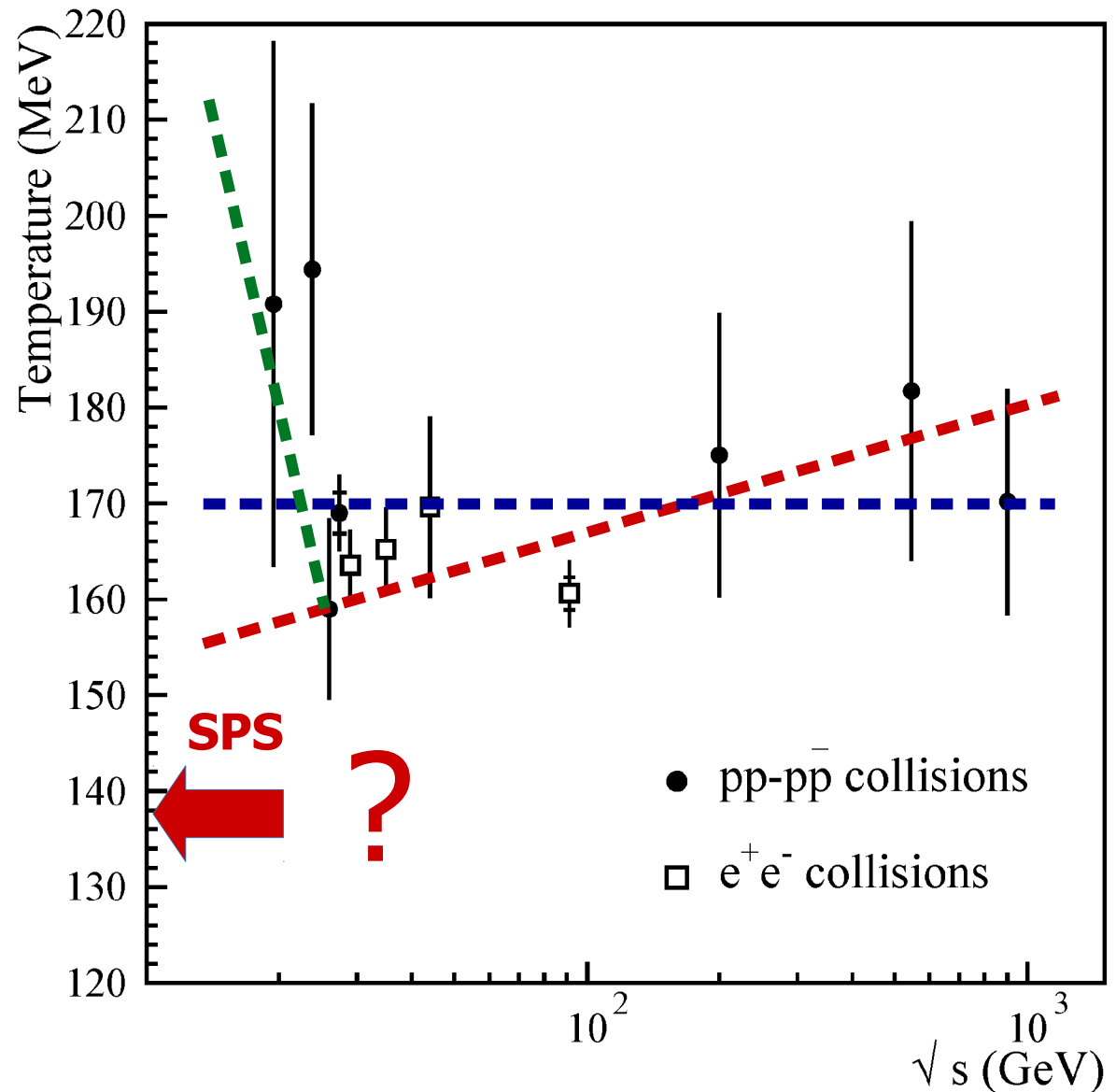
Cleymans, Redlich, et. al., Phys. Rev. C (2006), hep-ph/0511094;
Cleymans EPJ Web Conf. (2015), arXiv:1412.7045

- Temperatury znajdują się na wspólnej linii, zwanej **linią chemicznego wymroźenia** (freeze-out) – bo ilości cząstek nie zmieniają się po opuszczeniu fazy kwarkowo-gluonowej – zamrażają się na wyjściu

Najnowsze wyniki

Temperatura w zderzeniach protonów

- **HRG** dobrze **opisuje** ilości cząstek utworzonych nawet w takich małych systemach jaki tworzą się w zderzeniach **p+p** lub **e⁺e⁻**
- **Temperatura** w p+p jest **wysoka**, z **niejasnym zachowaniem** przy energiach **SPS**



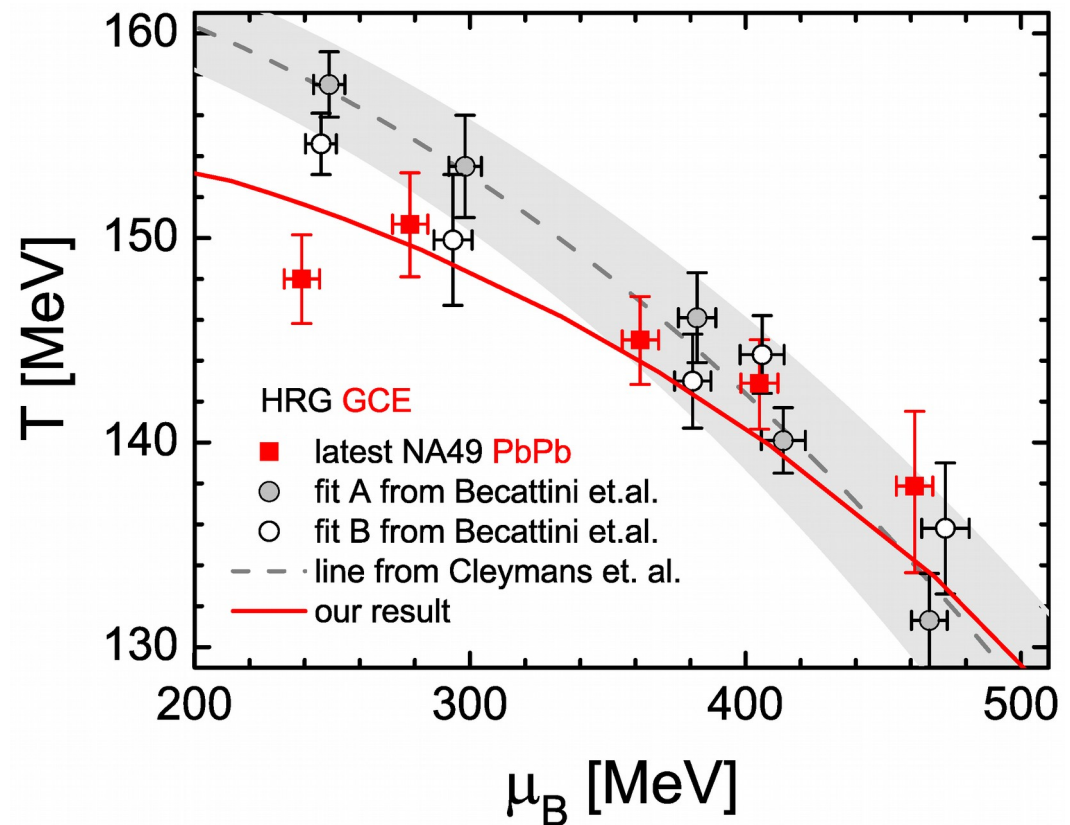
Becattini, Heinz Z. Phys. C (1997), hep-ph/9702274

Nowa linia wymrożenia

Zmiana linii chemicznego wymrożenia jest połączeniem dwóch czynników:

- rozszerzenie listy cząstek zarejestrowanych przez NA49, z 5 do 18 cząstek
- zmiany krotności i błędów pomiarowych już zmierzonych cząstek

Zmiana maksymalnej masy rezonansu, który jest uwzględniony w tabeli cząstek, pokazuje, że **włączenie ciężkich** niedawno odkrytych **rezonansów** może **zmniejszyć** wyliczoną **temperaturę** do **10 MeV**



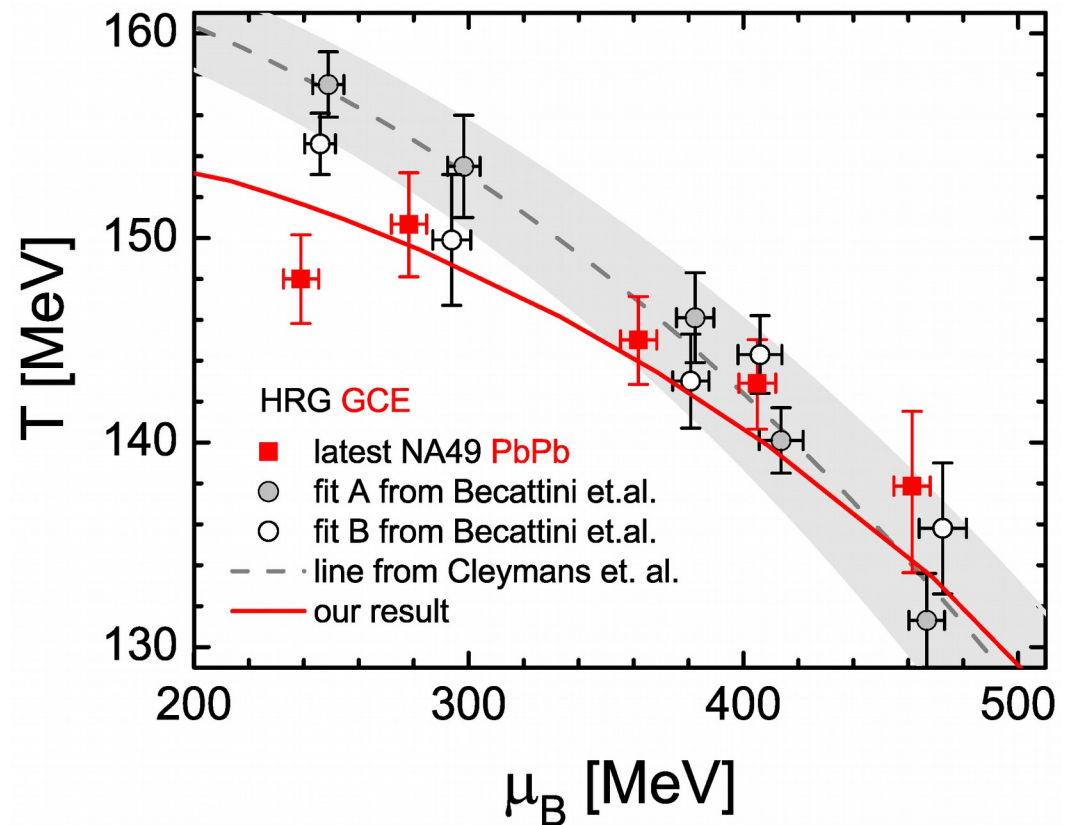
Cleymans, Oeschler, Redlich, Wheaton, Phys. Rev. C (2006), hep-ph/0511094;

Becattini, Manninen, Gazdzicki, Phys. Rev. C (2006), hep-ph/0511092;

Begun, Vovchenko, Gorenstein, arXiv:1512.08025

Nowa linia wymrożenia

- **Zmiana** temperatury jest **większa dla większej energii** zderzenia
- Problem ze swobodnie rozpowszechnianym online kodem dla obliczeń w HRG – **THERMUS** został znaleziony i **poprawiony**
- THERMUS nie brał pod uwagę wkładu od rozpadu rezonansu, jeżeli ten rezonans był wśród cząstek zmierzonych. Stało się tak, ponieważ zmierzone cząstki musiały być oznaczone jako stabilne, co wykluczało możliwość ich rozpadu
- Ten efekt **mógł dać** nawet o **25% mniej** cząstek, ϕ , $K^*(892)$, $\Lambda(1520)$ i dlatego wyższą temperaturę



Cleymans, Oeschler, Redlich, Wheaton,
Phys. Rev. C (2006), hep-ph/0511094;

Becattini, Manninen, Gazdzicki,
Phys. Rev. C (2006), hep-ph/0511092;

Begun, Vovchenko, Gorenstein, arXiv:1512.08025

Nowa linia wymrożenia

- Szary pas to parametryzacja

$$T_{A+A} = \frac{a - b \mu_B^2 - c \mu_B^4}{d}$$

$$\mu_B = \frac{d}{1 + e \sqrt{s_{NN}}}$$

Cleymans, Oeschler, Redlich, Wheaton,
Phys. Rev. C (2006), hep-ph/0511094

- Nasza analiza daje

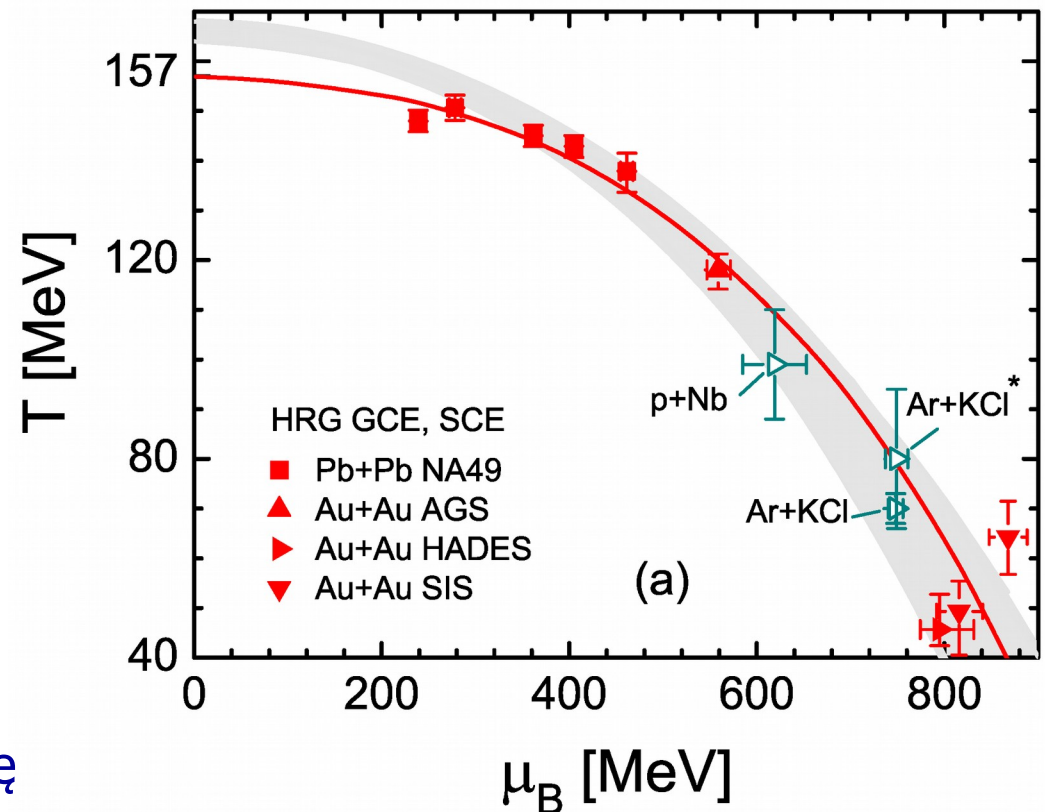
$$a=0.157 \text{ GeV}, \quad b=0.087 \text{ GeV}^{-1},$$

$$c=0.092 \text{ GeV}^{-3}, \quad d=1.477 \text{ GeV},$$

$$e=0.343 \text{ GeV}^{-1}$$

- Dla **LHC przewiduje** to temperaturę **T=157 MeV**, co jest najbliżej do zaskakujących rezultatów otrzymanych z analizy danych LHC w HRG

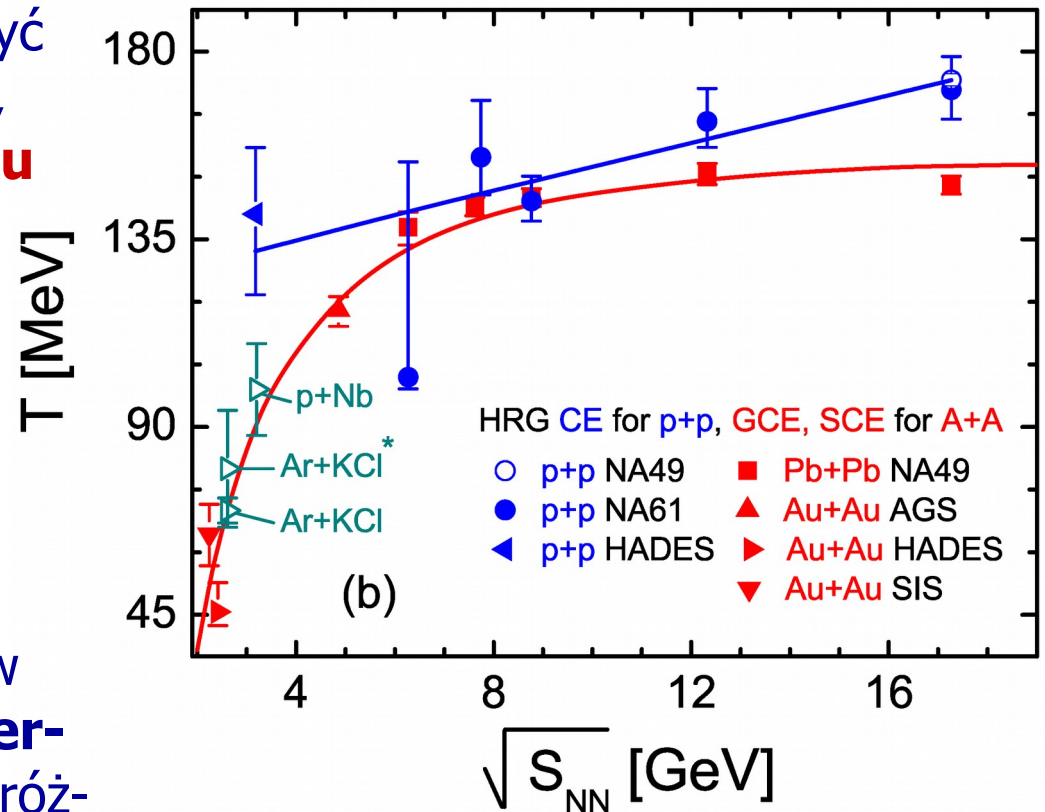
- Niezależna analiza **p+Nb** ta **Ar+KCl** zderzeń przez kolaboracją **HADES** pokazuje, że temperatury otrzymane w zderzeniach proton-jądro oraz w zderzeniach jąder o nierównych rozmiarach są **podobne** do temperatur w zderzeniach Pb+Pb



Begun, Vovchenko, Gorenstein, arXiv:1512.08025

Temperatura w zderzeniach protonów

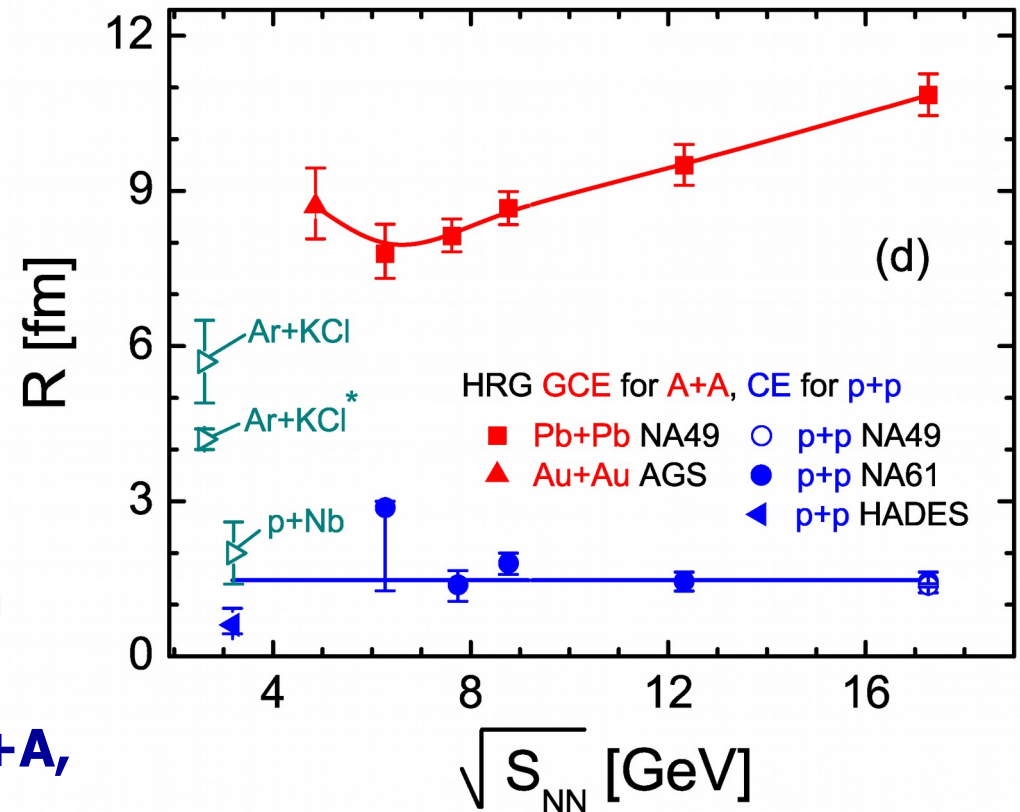
- Dla opisu małych systemów musi być wykorzystany **zespół kanoniczny**, czyli **zasada zachowania ładunku** musi być spełniona **dokładnie**
- **Temperatura** w **p+p** powoli rośnie ze wzrostem energii zderzenia od **130 MeV** do **170 MeV**
- **Największa różnica** temperatur w p+p i w A+A jest **przy niskich energiach**, co może być konsekwencją różnych mechanizmów tworzenia cząstek
- **Najmniejszy zestaw** rejestrowanych cząstek musi zawierać **sześć cząstek** – trzy cząstki, które posiadają **trzy ładunki**, zachowywane w zderzeniach cząstek, oraz odpowiednie **antycząstki**



Begun, Vovchenko, Gorenstein, arXiv:1512.08025

Wielkość systemu w zderzeniach p+p

- **Proton** $\sim 1.3 \text{ fm}$ $\sim 1.3 \cdot 10^{-15} \text{ m}$
Jądro Pb $\sim 7 \text{ fm}$
- W zderzeniu **p+p** mamy system z promieniem $\sim 1.6 \text{ fm}$ nie zależnie od energii zderzenia
- W zderzeniu **A+A** promień systemu rośnie z energią od $\sim 7 \text{ fm}$ do **11 fm**
- **Możemy** wyraźnie rozróżnić **p+p**, **p+A**, **A+A**, zderzenia



Begun, Vovchenko, Gorenstein, arXiv:1512.08025

- **Standardowy HRG** zakłada, że utworzone cząstki mają **własny rozmiar** równy **zero**, co jest wymuszonym założeniem, bo nie mamy informacji o rozmiarach cząstek, za wyjątkiem pionów, kaonów, i protonów. Ale **skutki są poważne**, na przykład to, że objętość systemu jest większa o objętość utworzonych cząstek.

Podsumowanie

- Możemy zbadać **właściwości materii** w warunkach podobnych do tych, które były **w pierwszych sekundach** po utworzeniu **Wszehświata**
- Cena: **budowa LHC – 7.5 miliardów Euro, budżet CERNu – 1 miliard Euro na rok**
- Podczas badań były **odkryte** protokół **www** i **nowy sposób leczenia raka**
- Model **gazu hadronowego** pozwala opisać materię hadronową i wyliczyć **temperaturę** i **objętość** stworzonego układu

Dziękuję za uwagę!