

Prof. dr hab. Marek Rogatko
Katedra Fizyki Teoretycznej
Grupa Astrofizyki i Teorii Grawitacji
Uniwersytet Marii Curie-Skłodowskiej
w Lublinie

Lublin, 5.01.22

Recenzja pracy doktorskiej Lennarta Brockiego pt.
“Aspects of BMS Symmetry”.

Rozprawa doktorska zawiera 84 strony druku, składa się ze wstępu, pięciu rozdziałów, podsumowania, dodatku oraz spisu literatury. Rozprawa napisana została w języku angielskim.

Po ogólnym wprowadzeniu do tematu rozprawy doktorskiej i zasygnalizowaniu poruszanych w niej problemów, mgr L. Brocki w **rozdziale II** przedstawił najważniejsze idee dotyczące koncepcji symetrii asymptotycznej czasoprzestrzeni dla przypadku cztero i trójwymiarowej czasoprzestrzeni. Wprowadzono współrzędne Bondiego, algebrę BMS oraz opisano jej strukturę. Analizę symetrii BMS przeprowadzono wprowadzając cechowanie typu Bondiego. Przedyskutowano rozszerzenie algebry BMS o superrotację oraz fakt, że funkcja R_A nie jest ograniczona konforemnym równaniem Killinga. Rozszerzona algebra typu BMS zawiera nieskończoną liczbę subalgebr izomorficznych z algebrą Poincarego.

W dalszej części opisano ładunki związane z symetriami asymptotycznej czasoprzestrzeni. Rozdział II kończy dyskusja algebry BMS dla przypadku trójwymiarowej czasoprzestrzeni, gdzie narzucając warunki brzegowe dla asymptotycznych killingowskich wektorów opisujących supertranslacje i superrotacje, obliczono odpowiednie nawiasy Liego.

Część materiału zawartego w tym rozdziale opublikowano w pracy JHEP 02 (2021) 084.

W **rozdziale III** przedstawiono analizę asymptotycznych symetrii z punktu widzenia hamiltonowskiego sformułowania teorii Einsteina. W szczególności zwrócono uwagę na człony po-

wierzchniowe hamiltonianu, rozumiane jako ładunki typu Noether generowane asymptotycznymi symetriami. Autor uzupełnił analizę problemu przedstawioną w pracach Hanneaux et al. JHEP 03 (2018) 147, stosując formalizm 3+1 we współrzędnych Bondiego i rezygnując z warunku wyznacznikowego w cechowaniu. Zabieg ten pozwolił na uzyskanie szeregu interesujących rezultatów. Między innymi pokazano, że warunki znikania momentów sprzężonych implikują fakt, iż dopuszczalne są tylko takie czasoprzestrzenie dla których zachodzi skończona emisja promieniowania. Pokazano także, że asymptotyczne symetrie w nieskończoności przestrzennej stanowią szerszą klasę symetrii.

Rozdział IV rozprawy doktorskiej mgr. Brockiego poświęcony jest relacjom pomiędzy teorią grawitacji a teoriami cechowania. Aparatem matematycznym zastosowanym do rozważań był formalizm tetradowy. Mając na uwadze rezultat Wittena, mówiący, że $(2 + 1)$ -grawitacja jest równoważna teorii cechowania z grupą Poincarego, autor badał konstrukcję $(2 + 1)$ grawitacji z grupą BMS dla trzech wymiarów (opisaną w poprzednich rozdziałach pracy).

Ostatecznym wynikiem obliczeń było stwierdzenie, że symetrią cechowania w omawianej teorii jest grupa Poincarego z dodatkowymi supertranslacjaami.

W dalszej części rozdziału mgr L. Brocki rozważał uogólnienie poprzedniego problemu na przypadek trójwymiarowej grawitacji z ujemną stałą kosmologiczną. Grupę symetrii cechowania stanowiła grupa opisująca asymptotyczne symetrie czasoprzestrzeni dążącej w sposób asymptotyczny do trójwymiarowej czasoprzestrzeni typu anty de Sittera.

W **rozdziale V** mgr Brocki przedstawia konstrukcję tzw. κ -zdeformowanej symetrii BMS oraz własności zdeformowanych algebr. Przedstawia także motywację fizyczną, która stoi za konstrukcją matematyczną.

Na początku został opisany potrzebny do tego rodzaju konstrukcji aparat matematyczny związany z algebrami Hopfa. Autor pokazuje jak można otrzymać algebrę Hopfa z danej algebry Liego. W części dalsze rozdziału omawiane są szczegółowo κ -zdeformowane trój i czterowymiarowe BMS algebry. Po części matematycznej rozważań opisana jest interpretacja fizyczna wprowadzonych struktur matematycznych.

W **rozdziale VI** przedstawiono problemy związane z entropią czarnych dziur oraz paradoksem informacyjnym. W części pierwszej rozdziału opartej na pracy opublikowanej w Phys. Lett. B 797 (2019) 134887, dyskutowano podejście t'Hoofta do entropii czarnych dziur, tzw. model ściany cegieł ('brick wall'). Mgr Brocki wprowadzając do rozważań oddziaływanie zwrotne promieniowania Hawkinga na układ, oraz definiując pojęcie 'kwantowej ergosfery' jako rejonu

pomiędzy horyzontem zdarzeń a horyzontem pozornym, uzyskał standardowe wyrażenie na entropię czarnej dziury.

W części drugiej przedyskutowano podejście Hawkinga et al. (Phys. Rev. Lett. 116 (2016) 231301) do paradoksu informacyjnego, powiązane z symetriami BMS. Ciekawym rezultatem jest stwierdzenie (oparte na analizie κ -zdeformowanych symetrii BMS), że twierdzenie Bousso iż mody niosące ładunki BMS ewoluują trywialnie i rozprzegają się z modami ładunków Poincarego, jest niemożliwe.

Uwagi:

1. w pracy na stronie 6, przed wzorem (2.13), pomyłona jest numeracja,
2. na str. 44, 4 linijka od góry, zbyt czynnym wydaje się wyraz 'which',
3. str.78, drugi paragraf, 'wartości własne' wyraz powinien być napisany z małej litery.

Podsumowując stwierdzam, że mgr Lennart Brocki wykazał się bardzo dobrą znajomością zaawansowanych metod fizyki matematycznej, ogólnej teorii względności oraz teorii pola.

Uzyskał ciekawe wyniki dotyczące asymptotycznych symetrii i ich deformacji w ogólnej teorii względności, entropii czarnych dziur, oraz paradoksu informacyjnego i jego powiązań z symetrią typu BMS.

Treści zawarte w rozprawie doktorskiej odnoszą się częściowo do oryginalnych rezultatów badań doktoranta uzyskanych we współpracy ze swoim promotorem oraz profesorem A. Borowcem. Zostały one opublikowane w renomowanych czasopismach takich jak Journal of High Energy Physics i Phys. Lett. B, bądź są dostępne w postaci preprintów dostępnych w arXiv. Z tego względu moja pozytywna ocena pracy doktorskiej ma swoje potwierdzenie w opiniach specjalistów redakcyjnych przyjmujących prace do druku.

Mój końcowy wniosek jest oczywiście pozytywny i wnoszę o dopuszczenie mgr. Lennarta Brockiego do dalszego postępowania w przewodzie doktorskim.

