
Fritz Hasenöhrl – zapomniany prekursor Einsteina

Andrzej B. Więckowski*

Instytut Fizyki Uniwersytetu Zielonogórskiego; Instytut Fizyki Molekularnej PAN, Poznań

Abstrakt. W roku 1904 austriacki fizyk, Fritz Hasenöhrl, zauważył, że promieniowanie we wnętrzu ciała doskonale czarnego posiada masę. Dopiero rok później Albert Einstein wykazał równoważność masy i energii. W roku 1907, po śmierci Ludwiga Boltzmanna, Fritz Hasenöhrl został mianowany jego następcą, profesorem zwyczajnym fizyki teoretycznej na Uniwersytecie Wiedeńskim. Fritz Hasenöhrl był w bliskiej, trwałej przyjaźni z polskim fizykiem, Marianem Smoluchowskim. Poległ w roku 1915 na froncie austriacko-włoskim podczas walk o Tyrol.

Słowa kluczowe: historia fizyki, równoważność masy i energii, Albert Einstein, Marian Smoluchowski

Abstract. In 1904 the Austrian physicist Fritz Hasenöhrl demonstrated that the radiation in the cavity of a blackbody has mass. It wasn't until a year later that the Swiss physicist Albert Einstein also proved the equivalence of mass and energy. In 1907, after the death of Ludwig Boltzmann, Fritz Hasenöhrl, was appointed as his successor, full professor of theoretical physics at the University of Vienna. Fritz Hasenöhrl had a close, lasting friendship with the Polish physicist Marian Smoluchowski. He died in 1915 on the Austro-Italian front during the fighting for Tyrol.

Keywords: history of physics, equivalence of mass and energy, Albert Einstein, Marian Smoluchowski

Dane rodzinne

Fritz Hasenöhrl urodził się dnia 30 listopada 1874 w Wiedniu. Jego rodzicami byli: Viktor Hasenöhrl (historyk prawa, radca rządowy i adwokat dworski) oraz Gabriele Hasenöhrl *de domo* baronessa von Pidoll zu Quintenbach. Fritz miał jedną starszą siostrę (Gabriele).

W dniu 20 marca 1899 odbył się ślub Fritza Hasenöhrla z Ellą Brückner. Mieli dwoje dzieci (Viktor i Franziska).

Edukacja

Fritz Hasenöhrl początkowo pobierał naukę szkolną u nauczyciela domowego. W latach 1884–1892 uczęszczał do Gimnazjum Cesarsko-Królewskiej Akademii Tereziańskiej (Theresianum) w Wiedniu. Jego nauczycielem był Alois Höfler, filozof i pedagog. Dyrektorem Theresianum był jego wujek, Michael baron von Pidoll zu Quintenbach. Maturę zdał w roku 1892 odznaczony Złotym Medalem Nagrody Cesarskiej. Jeszcze przed maturą opublikował drobne doniesienie z geometrii pod tytułem *Elementarne obliczenia współczynników kierunkowych, powierzchni i długości cykloidy zwykłej* [1].

Działalność naukowa

W latach 1892-1897 Fritz Hasenöhrl studiował matematykę i fizykę na Wydziale Filozoficznym Uniwersytetu

Wiedeńskiego, gdzie wykładowcami byli m.in. matematyk Leopold Gegenbauer, fizycy Jožef Stefan, Ludwig Boltzmann, Franz Serafin Exner, Gustav Jäger oraz chemik Viktor von Lang. Na drugim roku studiów opublikował pracę seminaryjną z teorii liczb wykonaną pod kierunkiem Gegenbauera *O prawie wzajemności reszt kwadratowych* [2]. Poczynając od jesieni 1895 zgłębia znajomość fizyki teoretycznej, której wykład, po śmierci Jožefa Stefana w roku 1893, prowadzi Boltzmann. W czerwcu 1896 przedkłada do publikacji swoją pracę doktorską wykonaną pod kierunkiem Exnera *O współczynniku temperaturowym stałej dielektrycznej cieczy i równaniu Mossottiego-Clausiusa* [3]. W dniu 25 maja 1897 uzyskuje promocję na doktora filozofii. Od listopada 1898 do końca roku akademickiego 1899 przebywa z rekomendacji Boltzmanna na stażu naukowym na Uniwersytecie w Lejdzie, jako asystent u Heike Kamerlingh-Onnesa i Hendrika Lorentza. Za namową Lorentza poświęca się odtąd całkowicie fizyce teoretycznej. W dniu 9 listopada 1899 Boltzmann przedstawia Cesarskiej Akademii Nauk w Wiedniu do opublikowania pracę habilitacyjną Hasenöhrla *O pewnym problemie teorii potencjału* [4]. W dniu 14 grudnia 1899 w celu uzyskania *venia legendi* Hasenöhrl wygłasza wykład próbny pod tytułem *Zastosowanie rozwinięć funkcji kołowych, kulistych i innych w problemach fizyki matematycznej*.

*ORCID: 0000-0002-7161-1963



Fritz Hasenöhl (Wikimedia).

Od 13 marca 1900 Hasenöhl zostaje dopuszczony do wykładania na Wydziale Filozoficznym Uniwersytetu w Wiedniu jako wykładowca nieetatowy (*Privatdozent*). W semestrze letnim 1900 prowadzi serię dwugodzinnych wykładów zatytułowanych *Elementy teorii funkcji kulistej, ze szczególnym uwzględnieniem jej zastosowania w problemach fizyki teoretycznej*. Słuchaczami jego wykładu są m.in. Felix Ehrenhaft, Paul Ehrenfest i Gustav Herglotz. W lipcu 1904 zostaje opublikowana rozprawa *O teorii promieniowania poruszających się ciał* [5]. Za tę pracę, na wniosek Boltzmana, otrzymuje od Cesarskiej Akademii Nauk w Wiedniu Nagrodę Haitingera. Dnia 24 lutego 1906 Hasenöhl zostaje mianowany profesorem nadzwyczajnym w Wyższej Szkole Technicznej w Wiedniu.

W roku 1906, po samobójczej śmierci Ludwiga Boltzmana, kolegium profesorskie poszukiwało jego godnego następcy. Głównymi kandydatami byli Max Planck i Wilhelm Wien. Obaj uczeni stali na szczycie nowoczesnych badań w dziedzinie fizyki, lecz udzielili odpowiedzi odmownej. Na trzecim miejscu jako kandydat był rozpatrywany Fritz Hasenöhl. Był on znany z oryginalności myśli i jego młody wiek (32 lata) dawał nadzieję, że stanie się on w przyszłości wiodącym naukowcem w Wiedniu. W dniu 27 września 1907 cesarz Franciszek Józef I mianuje Fritza Hasenöhla profesorem zwyczajnym fizyki teoretycznej na Uniwersytecie Wiedeńskim. W dniu 1 października 1907 Hasenöhl rozpoczyna czteroletni cykl wykładów z fizyki teoretycznej (8 semestrów po 5 godzin tygodniowo). Dzięki dobrze przygotowanym oraz jasno i entuzjastycznie przedstawionym wykładom udaje mu się w następnych latach zgromadzić krąg uzdolnionych studentów, wśród których są m.in. Ludwig Flamm, Friedrich Kottler, Karl Wolf, Erwin Schrödinger, Anton Rella, Hans Thirring i Karl Herzfeld.

Fritz Hasenöhl był promotorem prac doktorskich wybitnych uczonych. Według *Mathematics Genealogy Project* oraz *Physics Tree* byli to (w kolejności chronologicznej):

1909 – Ludwig Flamm – zajmował się mechaniką kwantową i ogólną teorią względności, był profesorem, dziekanem i rektorem na Uniwersytecie Technicznym w Wiedniu, członek rzeczywisty Austriackiej Akademii Nauk.

1910 – Erwin Schrödinger – twórca słynnego równania Schrödingera, współtwórca mechaniki kwantowej, Erwin Schrödinger wraz z Paulem Dirakiem otrzymali Nagrodę Nobla z fizyki w roku 1933, był profesorem w Jenie, Stuttgarcie, Wrocławiu, Zurychu, Berlinie, Oksfordzie, Dublinie i Wiedniu, członek Bawarskiej Akademii Nauk, Royal Society, American Academy of Arts and Sciences.

1911 – Hans Thirring – interesował się ogólną teorią względności, wynalazł fotokomórkę selenową, był profesorem w Wiedniu, w czasie II wojny światowej przymusowo urlopowany pracował w przemyśle.

1914 – Karl Herzfeld – zajmował się fizyką kwantową i statystyczną oraz chemią fizyczną, był profesorem w Monachium, na Johns Hopkins University w Baltimore i Catholic University of America w Waszyngtonie, członek American Academy of Arts and Sciences, otrzymał liczne doktoraty honorowe.

W roku 1910 Hasenöhl zostaje mianowany członkiem-korespondentem Cesarskiej Akademii Nauk w Wiedniu. W latach 1911 i 1913 jest uczestnikiem pierwszego i drugiego Kongresu Solvaya w Brukseli. Kongresy Solvaya gromadziły wówczas tylko zaproszonych najwybitniejszych tytanów fizyki i chemii przełomu XIX i XX wieku.

Spis najważniejszych prac Fritza Hasenöhrla można znaleźć pod adresem: https://de.wikisource.org/wiki/Friedrich_Hasen%C3%B6hl.

Równoważność masy i energii

Począwszy od roku 1880 wielu fizyków, jak Joseph John Thomson, Oliver Heaviside, George Frederick Charles Searle, Wilhelm Wien, Henri Poincaré, Max Abraham i Hendrik Lorentz używało pojęcia *masy elektromagnetycznej*. Oznaczało ono, że pole elektromagnetyczne wnosi pewien udział do masy naładowanej cząstki. Związek ten dany był wzorem $m = (4/3)E/c^2$ (w dzisiejszej notacji), gdzie m jest masą, E energią promieniowania, a c prędkością światła w próżni.

W roku 1904 Fritz Hasenöhl, poza wspomnianą wyżej rozprawą [5], opublikował w czasopiśmie *Annalen der Physik* pracę *O teorii promieniowania w poruszających się ciałach* [6].

Hasenöhl tworząc swoją teorię przeprowadził następujące rozumowanie. Gdy powierzchnia wysyłająca promieniowanie porusza się ze stałą prędkością w tym samym kierunku co promieniowanie, to w celu przezwyciężenia ciśnienia wywieranego przez to promienio-

wanie przez nią wysyłane, powierzchnia ta musi ciągle wykonywać pracę, która zamienia się również w energię promieniowania. Tak więc z poruszającej się w tym sensie powierzchni wychodzi o tę ilość energii więcej niż z powierzchni spoczywającej. Natomiast gdy powierzchnia porusza się w kierunku przeciwnym do kierunku wysyłanego promieniowania, to promieniowanie to wykonuje stale pracę i wtedy z poruszającej się powierzchni wychodzi o tę ilość energii mniej niż z powierzchni spoczywającej. Z drugiej strony, gdy absorbująca powierzchnia porusza się w taki sposób, że umyka przed padającym na nią promieniowaniem, to promieniowanie to wykonuje ciągle pracę, stąd powierzchnia ta może zaabsorbować mniej promieniowania o ekwiwalent tej pracy, to znaczy zamienić na wewnętrzną zawartość ciepła. Gdy natomiast absorbująca powierzchnia porusza się przeciw padającemu promieniowaniu, to musi być wykonywana z zewnątrz praca przeciwko ciśnieniu promieniowania. Praca ta może pojawić się w absorbującej powierzchni tylko jako ciepło. W tym wypadku powierzchnia absorbuje więcej ciepła o ilość wykonanej pracy.

Hasenöhrl zastosował powyższe rozumowanie do opisu zachowania się promieniowania w poruszającej się wnęce. Oprócz promieniowania dostarczonego przez ścianki wnęki, musi w tej wnęce znajdować się również energia promieniowania, która jest uzyskana z pracy mechanicznej i zostanie znowu w pracę mechaniczną zamieniona. Ta energia promieniowania jest uzależniona od ruchu wnęki. Jej ilość, jak wykazał Hasenöhrl, jest proporcjonalna do kwadratu prędkości układu (w pierwszym przybliżeniu), zwiększa więc pozornie energię kinetyczną układu. Zachodzą więc warunki, które są analogiczne do ruchu elektronu. Podobnie jak tam zostało wprowadzone pojęcie *masy elektromagnetycznej*, można też tutaj mówić o *masie pozornej*, która jest uzależniona od promieniowania; *masa elektromagnetyczna* proporcjonalna jest do energii potencjalnej (statycznej) nieruchomego elektronu, analogicznie *masa pozorna* uzależniona od promieniowania jest proporcjonalna do zawartości energii w nieruchomej wnęce. Współczynnik proporcjonalności jest w obydwu wypadkach tego samego rzędu wielkości. Skoro zawartość ciepła każdego ciała składa się częściowo z energii promieniowania, także każde ciało musi posiadać taką pozorną, zależną od temperatury masę, która dodaje się do masy w sensie zwyczajnym.

Rozważając ciśnienie promieniowania fali elektromagnetycznej we wnęce ciała doskonale czarnego, Hasenöhrl wyprowadza wzór na *masę pozorną* w postaci $m = (8/3)E/c^2$, gdzie E jest energią promieniowania zawartą w spoczywającej wnęce, a c jest prędkością światła w próżni. Max Abraham zwrócił jednakże uwagę na błąd rachunkowy popełniony w tych pracach i w roku

1905 Hasenöhrl opublikował w *Annalen der Physik* sprostowanie [7] podając poprawiony wzór na *masę pozorną* w postaci $m = (4/3)E/c^2$. Wzór ten jest identyczny ze wzorem na poprzednio podaną *masę elektromagnetyczną*. Ponadto Hasenöhrl wywnioskował, że związek ten zachodzi dla każdej formy promieniowania cieplnego, a więc dla każdego ciała w temperaturze większej od 0 K, a masa wzrasta wraz z temperaturą.

Dopiero w roku 1905 Albert Einstein w dwóch fundamentalnych pracach *O elektrodynamice poruszających się ciał* [8] i *Czy bezwładność ciała zależy od zawartej w nim energii?* [9] sformułował zasady teorii względności oraz równoważności masy i energii. Symbolem tych zasad stał się w latach późniejszych słynny wzór $E = mc^2$, który napisany w postaci $m = E/c^2$ jest podobny do wzoru Hasenöhrla.

W dniach 19-25 września 1909 odbył się w Salzburgu 81 Kongres Towarzystwa Niemieckich Przyrodników i Lekarzy (*Gesellschaft Deutscher Naturforscher und Ärzte*). W sekcji fizyki (i matematyki) tego Kongresu Fritz Hasenöhrl wygłosił referat pod tytułem *O przekształceniu energii kinetycznej w promieniowanie* [10]. W dyskusji nad tym referatem głos zabrali Albert Einstein i Max Planck. W dniu 21 września 1909 Albert Einstein wygłosił na tym Kongresie historyczny przełomowy dla fizyki wykład pod tytułem *O rozwoju naszych poglądów na istotę i budowę promieniowania* [11]. Podczas burzliwej dyskusji obszerny komentarz wygłosił Max Planck. Wykład Einsteina w Salzburgu był w ogóle jego pierwszym wystąpieniem publicznym na kongresie.

O znaczeniu odkrycia Hasenöhrla mogą świadczyć wypowiedzi ówczesnych fizyków. W roku 1910 Max Planck powiedział: *Na to, że promieniowanie wnęki posiada bezwładność, jako pierwszy zwrócił uwagę F. Hasenöhrl* [12]. Natomiast Wolfgang Pauli napisał w roku 1935: *Promieniowanie w poruszającej się wnęce. Ten przypadek ma znaczenie historyczne, ponieważ wystarczy go rozpatrywać tylko na gruncie elektrodynamiki, nawet bez teorii względności. Wówczas dochodzi się nieodzownie to tego, żeby poruszającej się energii promieniowania przypisać pęd, a więc również masę bezwładną. Jest rzeczą ciekawą, że ten rezultat został znaleziony przez Hasenöhrla jeszcze przed powstaniem teorii względności* ([13]; s. 697).

Stephen Boughn i Tony Rothman [14] w celu zrozumienia błędów popełnionych przez Hasenöhrla, dokonali ich nowoczesnej, relatywistycznej analizy. Według autorów zagadnienie to zawiera wiele kontrowersji, a wcześniejsze prace innych autorów na temat eksperymentu myślowego (*Gedankenexperiment*) Hasenöhrla są niepoprawne i zwodnicze. Komentarz do pracy autorów [14] opublikował Philip Ball [15]. Boughn [16] dokonał wnikliwej współczesnej analizy wyniku Hasenöhrla na tle ówczesnego stanu fizyki. Konkluzja

Hasenöhrle, że przyspieszenie promieniowania ciała doskonale czarnego przez siły zewnętrzne spełnia wzór $F = (4/3)(E/c^2)a$, jest poprawna [16]. Wyniki Hasenöhrle i Einsteina porównał także Randy Wayne [17].

Służba wojskowa

W roku 1894 Hasenöhrle przerwał na jeden rok tok studiów i służył w Pułku Dragonów nr 4 w Wiener Neustadt. Tam mieszkał u swojego kolegi, Hugo von Hofmannsthal, pisarza i poety. Na Boże Narodzenie 1896 otrzymał nominację na stopień podporucznika Pułku Dragonów nr 4.

W roku 1914 melduje się dobrowolnie do służby wojskowej. W roku 1915 zostaje przydzielony do Twierdzy Kraków jako referent fizyko-techniczny. Otrzymuje Medal Zasługi Wojskowej *Signum Laudis* (Znak Zasługi).

Oburzony wypowiedzeniem wojny Austro-Węgrom przez Włochy (23 maja 1915), które zgłosiły roszczenia terytorialne, poprosił o przeniesienie do Tyrolu. Otrzymuje przydział do Górnoaustriackiego Pułku Piechoty nr 14. W dniu 19 lipca 1915 jako dowódca kompanii odpiera atak wojsk włoskich na szczyt Monte Piano. Zostaje ciężko ranny w prawe ramię, ale mimo to kieruje dalej skuteczną obroną szczytu przeciwko przeważającym siłom włoskim [18]. Przez ponad 2 miesiące przebywa w Szpitalu Rezerwy w Salzburgu. Zostaje odznaczony Wojskowym Krzyżem Zasługi III klasy i awansowany na stopień porucznika.

Ponownie zostaje skierowany na front austriacko-włoski. W dniu 7 października 1915 podczas walk w rejonie Vielgereuth (Folgaria) koło Trydentu zostaje odłamkiem granatu śmiertelnie ranny w głowę. Cesarz Franciszek Józef I przesłał wdowie telegram kondolencyjny (który doszedł wcześniej niż wiadomość z frontu). Pogrzeb odbył się 10 października 1915 na cmentarzu miejscowym w Vielgereuth. Zmarły został pośmiertnie odznaczony Orderem Korony Żelaznej z Dekoracją Wojenną. W listopadzie 1915 ciało zostało przeniesione na cmentarz Altmünster w Gmunden.

Stefan Meyer opublikował wspomnienie pośmiertne o Fritzu Hasenöhrle [19].

W dniu 26 lutego 1916 na Uniwersytecie Wiedeńskim odbyła się uroczystość wspomnieniowa ku czci Fritza Hasenöhrle zorganizowana przez Akademickie Stowarzyszenie Niemieckich Matematyków i Fizyków (Akademischer Verein deutscher Mathematiker und Physiker). Przemówienia okolicznościowe wygłosili Hans Thirring oraz Alois Höfler.

W roku 1933 Erwin Schrödinger podczas ceremonii wręczenia mu Nagrody Nobla z fizyki oddał hołd pamięci Fritza Hasenöhrle oświadczając: *Damals fiel Hasenöhrle, und ein Gefühl sagt mir, daß sonst sein Name heute an*

der Stelle des meinen stünde. (Wtedy Hasenöhrle poległ i jakieś uczucie mówi mi, że to jego nazwisko stałoby dzisiaj na miejscu mojego.) ([20] s. 87).

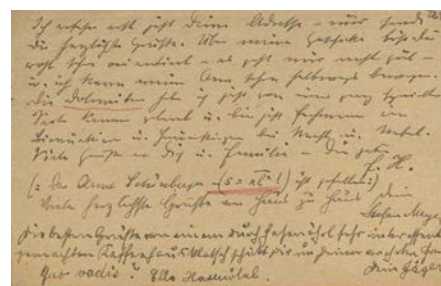
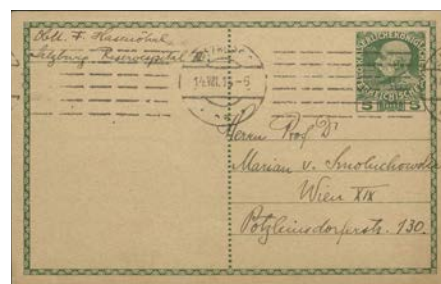
Od września 2015 w Austriackiej Centralnej Bibliotece Fizyki (Österreichische Zentralbibliothek für Physik) w związku ze stuleciem śmierci Fritza Hasenöhrle można było zwiedzić okolicznościową wystawę.

Z inicjatywy wnuczki Moniki Elbel w dniu 7 października 2015 w setną rocznicę śmierci Fritza Hasenöhrle zostało odprawione w kościele przy cmentarzu Altmünster w Gmunden nabożeństwo w jego intencji.

Hasenöhrle i Smoluchowski

Podczas studiów na Uniwersytecie Wiedeńskim, a być może już podczas nauki szkolnej w Theresianum, Fritz Hasenöhrle i Marian Smoluchowski nawiązali bliskie więzi przyjaźni, które przetrwały do końca ich życia. Wspomniany już wyżej nauczyciel obydwu uczniów w Theresianum, Alois Höfler, powiedział: *Hasenöhrle był moim najlepszym uczniem, Smoluchowski zaś, najnajlepszym* [21]. Autor tejsze biografii na s. 265 wspomina, że drogi obu fizyków rozeszły się w 1915 roku w związku z różnicą zdań na tle narodowościowym. Miało to ponoć duży wpływ na odrzucenie kandydatury Mariana Smoluchowskiego na objęcie katedry w Wiedniu.¹

Zachowały się 182 strony listów i kopert napisanych przez Hasenöhrle do Smoluchowskiego z lat 1893-1915 [22]. Dowiadujemy się z nich na przykład o ich wspólnych wspinaczkach wysokogórskich. Dodatkowo można



Kartka pocztowa wysłana przez Fritza Hasenöhrle do Mariana Smoluchowskiego dnia 14 sierpnia 1915 ([22]; s. 587)

1. Autor niniejszego artykułu nie zgadza się z tą opinią, ponieważ nie znalazł żadnej wypowiedzi Hasenöhrle lub Smoluchowskiego, która by istnieniem takiego konfliktu potwierdzała (przyp. red.).

na podstawie korespondencji prześledzić kolejne adresy zamieszkania oraz podróże Smoluchowskiego i Hasenöhrla.

14 sierpnia 1915 Fritz Hasenöhrl (na 54 dni przed śmiercią) napisał ze Szpitala Rezerwy w Salzburgu kartkę pocztową z pozdrowieniami dla Mariana Smoluchowskiego i jego rodziny. Smoluchowski znajdował się w tym czasie w Wiedniu. Hasenöhrl w pogodnym nastroju pisał, że już może poruszać zranionym ramieniem i wspomina Dolomity. Na kartce pocztowej dołączyły się z serdecznymi pozdrowieniami trzy osoby. Stefan Meyer zawiadamiał, że Schönberger poległ. Gustav Jäger pisał, że to Hasenöhrl urządził to spotkanie przy kawie (*Kaffeehausklatsch*), Ella Hasenöhrl dopisała zaś: *Quo vadis?* ([22]; s. 587).

Arnold Sommerfeld we wspomnieniu pośmiertnym o Marianie Smoluchowskim pisze: *Bliska przyjaźń łączyła go z Hasenöhrl'em, który poległ w roku 1915 na wyżynie Lafraun jako bezpośrednia ofiara wojny; obydwu połączyły nie tylko zainteresowania naukowe, ale jednakowe umiłowanie i odczucie muzyki oraz wierne koleżeństwo podczas wypraw górskich i uprawiania sportu narciarskiego* [23].

Literatura

- [1] F. Hasenöhrl, Elementare Berechnungen des Richtungskoeffizienten, der Fläche und der Länge der gemeinen Zykloide. *Österr. Mittelschule* 6 (II), (1892).
- [2] F. Hasenöhrl, Über das quadratische Reciprocitätsgesetz, *Anz. Koenigl. Akad.* 31 (IX), 74–76 (1894).
- [3] F. Hasenöhrl, Über den Temperaturcoefficienten der Dielektricitätsconstante in Flüssigkeiten und die Mosotti–Clausius'sche Formel. *Sitzber. Kaiserl. Akad. Ila* 105, 470–475 (1896).
- [4] F. Hasenöhrl, Über ein Problem der Potentialtheorie. *Sitzber. Kaiserl. Akad. Ila* 108, 1667–1693 (1899).
- [5] F. Hasenöhrl, Zur Theorie der Strahlung bewegter Körper. *Sitzber. Kaiserl. Akad. Ila* 113, 1039–1055 (1904).
- [6] F. Hasenöhrl, Zur Theorie der Strahlung in bewegten Körpern. *Ann. Phys.–Leipzig* 320 (12), 344–370 (1904).
- [7] F. Hasenöhrl, Zur Theorie der Strahlung in bewegten Körpern. Berichtigung. *Ann. Phys.–Leipzig* 321 (3), 589–592 (1905).
- [8] A. Einstein, Zur Elektrodynamik bewegter Körper. *Ann. Phys.–Leipzig* 322 (10), 891–921 (1905).
- [9] A. Einstein, Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig? *Ann. Phys.–Leipzig* 323 (13), 639–641 (1905).
- [10] F. Hasenöhrl, Über die Umwandlung kinetischer Energie in Strahlung. *Phys. Z.* 10 (22), 829–830 (1909).
- [11] A. Einstein, Über die Entwicklung unserer Anschauungen über das Wesen und die Konstitution der Strahlung. *Phys. Z.* 10 (22), 817–825 (1909); *Phys. Bl.* 25 (9), 386–391 (1909).
- [12] M. Planck, *Acht Vorlesungen über theoretische Physik, gehalten an der Columbia University in the City of New York im Frühjahr 1909*, S. Hirzel, Leipzig 1910.
- [13] W. Pauli jr, Relativitätstheorie. w: *Encyklopädie der mathematischen Wissenschaften mit Einschluss ihrer Anwendungen*, 5. Bd., Physik, red. V. A. Sommerfeld, 2. T., B. G. Teubner, Leipzig 1904–1922, (4), 539–776.
- [14] S. Boughn, T. Rothman, Hasenöhrl and the Equivalence of Mass and Energy. (2011). arXiv:1108.2250.
- [15] Ph. Ball, Did Fritz Hasenöhrl derive $E = mc^2$ before Einstein? *Phys. World* 24 (10), 13 (2011).
- [16] S. Boughn, Fritz Hasenöhrl and $E = mc^2$. *Eur. Phys. J. H* 38 (2), 261–278 (2013).
- [17] R. Wayne, The Equivalence of Mass and Energy: Blackbody Radiation in Uniform Translational Motion. *Afr. Rev. Phys.* 10, 0001 (2015).
- [18] H. Kirchner, X./14 – The 10th March Battalion of Infantry Regiment 14 in the Dolomites in the summer of 1915. w: *Austro–Hungarian Army*. http://www.austro-hungarian-army.co.uk/10_14.html#_edn4
- [19] S. Meyer, Fritz Hasenöhrl †. *Phys. Z.* 16, 429–433 (1915).
- [20] E. Schrödinger, [Autobiographical sketch], w: *Les Prix Nobel en 1933*. Nostedt & Söner, Stockholm 1935, 86–88.
- [21] A. Teske, *Marian Smoluchowski, życie i twórczość*, PWN, Warszawa 1955.
- [22] Fritz Hasenöhrl. w: *Korespondencja Mariana Smoluchowskiego z lat 1893–1917*. Tom 3, Ferguson–Hasenöhrl, Jagiellońska Biblioteka Cyfrowa, Kraków, 411–592. <https://jbc.bj.uj.edu.pl/dlibra/publication/555263/edition/548263/content>.
- [23] A. Sommerfeld, Zum Andenken an Marian von Smoluchowski. *Phys. Z.* 18 (22), 533–539 (1917).