

do jej stworzenia na podstawie pojęcia kwantowych pól są w tej chwili tylko dosyć pustym przypuszczeniem.”<sup>308</sup>

Pierwsze teoretyczne prace z fizyki cząstek i wysokich energii w Polsce wykonywali Jerzy Rayski w Krakowie, Jan Łopuszański i Jan Rzewuski we Wrocławiu oraz Wojciech Królikowski i Józef Werle w Warszawie. Prace Rayskiego dotyczyły propozycji unitarnych wielowymiarowych i nielokalnych teorii. Łopuszański napisał kilka prac na temat teorii kaskad. Rzewuski zajmował się m.in. macierzą  $S$ . Królikowski rozpoczął badania nad klasyfikacją cząstek elementarnych i symetrami oddziaływań silnych i słabych.

Józef Werle (1923–1998) był absolwentem Uniwersytetu Poznańskiego. Po roku asystentury na Uniwersytecie Jagiellońskim przeniósł się w 1950 r. do UW i tu został asystentem Infelda. Zajmował się najpierw mezonową teorią sił jądrowych, a potem ogólną relatywistyczną teorią oddziaływań wielocząstkowych. W 1960 r. objął kierownictwo nowo utworzonej Katedry Teorii Jądra i Reakcji Jądrowych, w której wbrew jej nazwie zajmowano się nie tylko siłami i reakcjami jądrowymi, lecz także problematyką cząstek elementarnych. Kierownikiem drugiej nowej Katedry Teorii Cząstek Elementarnych został Wojciech Królikowski, który uzyskał doktorat pod opieką Wojciecha Rubinowicza. Królikowski zajmował się początkowo teorią promieniowania i elektrodynamiką kwantową. Badał problem stanów związanych, a w latach 1955–1957 napisał wraz z Janem Rzewuskim (wtedy już profesorem Uniwersytetu Wrocławskiego) kilka prac o relatywistycznym równaniu falowym dla układu dwu cząstek Diraca, wynikającym z elektrodynamiki kwantowej. Pod koniec lat pięćdziesiątych zaczął pracować nad problemami związanymi z klasyfikacją znanych w owym czasie leptonów i hadronów oraz ich oddziaływań. W latach 1960–1961 starał się rozszerzyć pojęcie izospinu na znane wtedy leptony: neutrino, elektron i mion, co doprowadziło do hipotezy, że musi istnieć w przyrodzie jeszcze drugie neutrino skojarzone w oddziaływaniach słabych z mionem.

W 1969 r. z Zakładu Teorii Cząstek Elementarnych został wydzielony osobny Zakład Fizyki Teoretycznej Wysokich Energii, którego kierownictwo objął Białkowski, a jego współpracownikami byli Zygmunt Ajduk, Wiesław Macek, Stefan Pokorski i Grzegorz Rohoziński. Ich badania skupiały się na teorii oddziaływań silnych, przede wszystkim na modelach teoretycznych procesów produkcji wielu cząstek w zderzeniach hadronów przy wysokich energiach. Białkowski z grupą młodych teo-

retyków kontynuował badania nad związkami dyspersyjnymi i ideą bootstrapu i rozwijał badania nad fenomenologią oddziaływań silnych w ramach efektywnych modeli teoretycznych, takich jak model multiperyferyczny, model cząstki wiodącej, model biegunów Reggego odkrytych w 1959 r., strukturą deuteronu, efektami cieniowymi w rozpraszaniu i tzw. metodą Glaubera.

W następnych latach pojawiło się wielu uzdolnionych młodych teoretyków, którzy rozwijali także badania fenomenologiczne silnie powiązane z doświadczeniem. Modelami mechanizmu zderzeń przy wysokich energiach zajmowali się Wiesław Czyż, Andrzej Kotański i Józef Namysłowski w Krakowie oraz Józef Werle, Andrzej Krzywicki i Ryszard Rączka w Warszawie. Inni teoretycy warszawscy (Grzegorz Białkowski, Andrzej Jurewicz, Leszek Łukaszuk, Michał Świącki i Jerzy Wrzecionko) badali zastosowanie związków dyspersyjnych. Ponadto Andrzej Deloff, Jerzy Szymański i Jerzy Wrzecionko rozwijali teorię hiperjąder.

Józef Werle wyrażał opinię, że: „Prace polskie stały, średnio rzecz biorąc, na dobrym światowym poziomie i odstęp dzielący nasze ośrodki od przodujących ośrodków zagranicznych uległ dalszemu zmniejszeniu.”

Początek lat siedemdziesiątych ubiegłego stulecia przyniósł wydarzenia o przełomowym znaczeniu dla fizyki cząstek elementarnych i wysokich energii. W doświadczeniach z rozpraszaniem elektronów na protonach wykonanych z wykorzystaniem akceleratora w Stanford (USA) odkryto partonową strukturę nukleonów (Jerome Friedman, Henry Kendall i Richard Taylor uzyskali za to Nagrodę Nobla z fizyki). Model kwarków zaproponowany w 1964 r. przez Murraya Gell-Manna i traktowany jako ciekawostka, zaczął być odtąd traktowany jako możliwy klucz do wyjaśnienia zjawisk w fizyce cząstek. Nowymi osiągnięciami w teorii były: powstanie modelu oddziaływań elektrosłabych Glashowa-Weinberga-Salama, skonstruowanie chromodynamiki kwantowej (*Quantum Chromodynamics* – w skrócie QCD) przez Gell-Manna wraz z Haraldem Fritzschem i Heinrichem Leutwylerem (przy wykorzystaniu wcześniejszych prac Yoichiro Nambu), a następnie odkrycie ciężkiego leptonu  $\tau$  (i pośrednio neutrino  $\tau$ onowego), kolejno trzech ciężkich kwarków  $c$ ,  $b$  i  $t$  oraz wektorowych bozonów pośredniczących  $W^\pm$ ,  $Z$  i gluonów  $g$ . W ten sposób uformował się tak zwany Model Standardowy oddziaływań fundamentalnych. Stało się jasne, że teoria macierzy  $S$  nie może pretendować do teorii oddziaływań elementarnych. Istotną dla dalszego poznania podstawowych praw budowy materii okazała się struktura kwarkowa hadronów i oddziaływanie między kwarkami. Powiązanie badań doświadczalnych i teoretycznych nabrało nowego wymiaru.

<sup>308</sup> J. Werle, *Teoria cząstek elementarnych*, [w:] *Energia jądrowa w Polsce w latach 1961–1963*, red. Józef Hurwic, PWN, Warszawa 1966, s. 99–103.

Z wyników uzyskanych w tamtym okresie warto wymienić artykuły Stefana Pokorskiego (pierwszego doktora Białkowskiego) napisane z Leonem Van Hove.<sup>309</sup> Opracowali oni model klastrów do produkcji wielorodnej i podali jego uzasadnienie bazujące na strukturze kwarkowo-gluonowej hadronów. Wyniki te stały się standardowym elementem fenomenologii procesów produkcji. Na początku lat osiemdziesiątych Pokorski, wraz ze swoimi doktorantami i młodymi współpracownikami, rozpoczął intensywne badania w kierunku teorii pól z cechowaniem dla oddziaływań fundamentalnych Modelu Standardowego i jego rozszerzeń. W wyniku jego wieloletnich wykładów powstała ważna monografia poświęcona teorii pól z cechowaniem.<sup>310</sup>

Badania tej grupy były początkowo poświęcone teorii oddziaływań silnych – chromodynamice kwantowej (QCD). Jan Kalinowski, Maria Krawczyk i Tomasz Taylor opublikowali kilka ważnych prac opartych na rachunkach perturbacyjnych w QCD, głównie dla procesów produkcji cząstek z dużym pędem poprzecznym. W pracy Wojciecha Furmańskiego, Roberto Petronzio i Pokorskiego<sup>311</sup> po raz pierwszy rozszerzono rachunek perturbacyjny w QCD na obszar podczerwony w zmiennej Feynmana  $x = M/Q$ .

Od śmierci Białkowskiego w 1989 r. Zakładem Fizyki Teoretycznej Wysokich Energii kierował Pokorski. Badania miały szeroki zakres: od analiz fenomenologicznych w ramach Modelu Standardowego aż do formalnych aspektów teorii oddziaływań elementarnych. Model Standardowy został wielokrotnie sprawdzony z ogromną dokładnością w bardzo szerokim zakresie energii i przeszedł pomyślnie wszystkie testy. Mimo to powszechnie sądzi się, że jest on tylko efektywną teorią pewnego fragmentu głębszej, jeszcze nieznannej teorii. Model Standardowy nie wyjaśnia przecież obserwowanych hierarchii mas kwarków i naładowanych leptonów, pochodzenia mas neutrin i dominacji materii nad antymaterią we Wszechświecie, jak również istnienia tzw. ciemnej materii. Badania nad Modelem Standardowym dotyczyły więc także w znacznym stopniu jego możliwego rozszerzenia, zwłaszcza pomysłów uwzględniających supersymetrię, dodatkowe wymiary przestrzenne lub nowe oddziaływania silne.

W badaniach nad rozszerzeniem Modelu Standardowego światowy rozgłos zyskała praca<sup>312</sup> Stefana Pokor-

<sup>309</sup> S. Pokorski, L. Van Hove, *Independent production of particle clusters: a third general feature of high energy hadron collisions?*, APP, **B5**, s. 229 (1974); S. Pokorski, L. Van Hove, *High energy hadron-hadron collisions and internal hadron structure*, Nucl. Phys., **B86**, s. 243 (1975).

<sup>310</sup> S. Pokorski, *Gauge Field Theories*, Cambridge University Press, 1987.

<sup>311</sup> W. Furmański, R. Petronzio, S. Pokorski, *Heavy flavour multiplicities at very high energies*, Nucl. Phys., **B155**, s. 253 (1979).

<sup>312</sup> Ch.T. Hill, S. Pokorski, J. Wang, *Gauge invariant effective Lagrangian for Kaluza-Klein modes*, Phys. Rev., **D64**, s. 105005 (2001).

skiego z Christopherem Hillem i Jing Wangiem, w której wykazano, że ewentualne istnienie w przyrodzie dodatkowych wymiarów przestrzennych może być opisane w sposób dualny przez teorię z dodatkowymi symetriaми cechowania w czterowymiarowej czasoprzestrzeni. Koncepcji tej, znanej pod nazwą dekonstrukcji dodatkowych wymiarów, został nawet poświęcony artykuł w dziale *Science* w „New York Times” (26 VI 2001). Idea dekonstrukcji być może pozwoli na lepsze zrozumienie mechanizmu naruszenia symetrii elektroslabej.

Bardzo użytecznym narzędziem do opisu obserwowanych cech oddziaływań cząstek przy wysokich energiach stał się tzw. addytywny model kwarków. Przyjmowano w nim proste, lecz dość naiwne założenie, że oddziaływania między hadronami są sumą oddziaływań kwarków w nukleonach (złożonych z trzech kwarków) i mezonach (złożonych z dwóch kwarków). Ten naiwny model, w którym zaniedbywano złożoną strukturę cząstek, tłumaczył, dlaczego stosunek przekrojów czynnych oddziaływań nukleon–mezon i nukleon–nukleon jest w przybliżeniu równy 2/3.

Teoretycy krakowscy, Andrzej Białas i Kacper Zalewski, oraz ich współpracownicy opublikowali wtedy serię prac, w których wykorzystywali addytywny model kwarków do wyprowadzenia prostych reguł dotyczących danych doświadczalnych.<sup>313</sup> Prace te przez lata cieszyły się dużym zainteresowaniem i były cytowane.

Badania oddziaływań cząstek o wielkiej energii z jądrami atomowymi wykazywały, że krotność produkowanych cząstek jest większa niż w zderzeniach nukleon–nukleon, ale nie rośnie lawinowo, jak można by się spodziewać, gdyby wewnątrz jądra była wytwarzana kaskada: cząstki produkowane w zderzeniu z pierwszym nukleonem powinny oddziaływać z kolejnymi nukleonami. Hipoteza kaskady wewnątrzjądrowej została obalona przez pomiary.

Andrzej Białas, Wiesław Czyż<sup>314</sup> i Marek Błeszyński zaproponowali w 1976 r. model tzw. zranionych nukleonów.<sup>315</sup> W modelu tym przyjęto założenie, że przyczynki

<sup>313</sup> A. Białas, K. Zalewski, *Systematics of the relations following from the quark model (I). Relations between differential cross sections*, Nucl. Phys., **B6**, s. 449–464 (1969); A. Białas, K. Zalewski, *Systematics of the relations following from the quark model (II). Constrains on decay distributions of resonances*, Nucl. Phys., **B6**, s. 465–477 (1969); A. Białas, K. Zalewski, *Systematics of the relations following from the quark model (III). Comparison of decay distributions of resonances produced in different reactions*, Nucl. Phys., **B6**, s. 478–482 (1968); A. Białas, A. Guła, B. Muryn, K. Zalewski, *Systematics of the relations following from the quark model (IV). Photo-production*, Nucl. Phys., **B6**, s. 483–486 (1968); A. Kotański, K. Zalewski, *A simple model of presenting joint decay distributions for pairs of resonances*, Nucl. Phys., **B4**, s. 559–572 (1968).

<sup>314</sup> A. Białas, Wiesław Czyż, 2 V 1927 – 8 IV 2017, Rocznik Polskiej Akademii Umiejętności, Rok 2016/2017, Kraków 2017, s. 223–226.

<sup>315</sup> A. Białas, M. Błeszyński, W. Czyż, *Multiplicity distributions in nucleus-nucleus collisions at high energies*, Nucl. Phys., **B111**, s. 461 (1976); ta praca uzyskała już ponad 900 cytowań.