

Methodology of precision Monte Carlo development

Staszek Jadach impact as seen from mine 43 years long perspective

Z. Was*,

*Institute of Nuclear Physics, Polish Academy of Sciences, Krakow

(A) I need to cover more than these 43 years. Stanislaw's achievements before 1981 were essential for that, and his projects will continue. **Challenging call for me!**

(B) **Incomplete lists of** methodology domains, and projects:

1. (i) Phase space: symmetries (ii) matrix element preparation → factorizations (iii) program and development process design (iv) testing strategies (v) user interaction (vi) software tools (vii) partners and competitors
2. (i) FOWL (ii) GENRAP (iii) Mustraal (iv) Koralb (v) Lesko (vi) Tauola (vii) KoralZ, (viii) Lumlog (ix) Oldbab (x) Bhlumi (xi) Bhwide (xii) KKMC
3. Focus is on some of these points. Other, hopefully, will/were covered in other talks.

(C) No need to cover exponentiation, see today B.F.L. Ward talk.

- (D) Topics interwinded in many ways! Simplifications, biases inevitable; **apology**.

List of Monte Carlo programs: ^a

1. FOWL Program Staszek mentioned many times. Inspiration?
2. GENRAP Staszek's first published program
3. Mustraal $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-; 1(\gamma)$ LEP 1 energy
4. Koralb $e^+e^- \rightarrow l^+l^-; 1(\gamma)$ Petra energy
5. Lesko $ep \rightarrow eX$ program for Hera
6. Tauola τ lepton decay
7. KoralZ $e^+e^- \rightarrow f\bar{f} 1(\gamma)$ (later $n\gamma$) LEP 1 energy
8. Lumlog semianalytical calculation package for $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$
9. Oldbab $e^+e^- \rightarrow e^+e^- 1(\gamma)$
10. Bh lumi $e^+e^- \rightarrow e^+e^- n(\gamma)$ luminosity measurement acceptance
11. Bh wide $e^+e^- \rightarrow e^+e^- n(\gamma)$ wide angles Bhabla
12. KKMC $e^+e^- \rightarrow l\bar{f} n(\gamma)$ all energy range

^aImportant missing points mark: ★.

Phase space and Monte Carlo

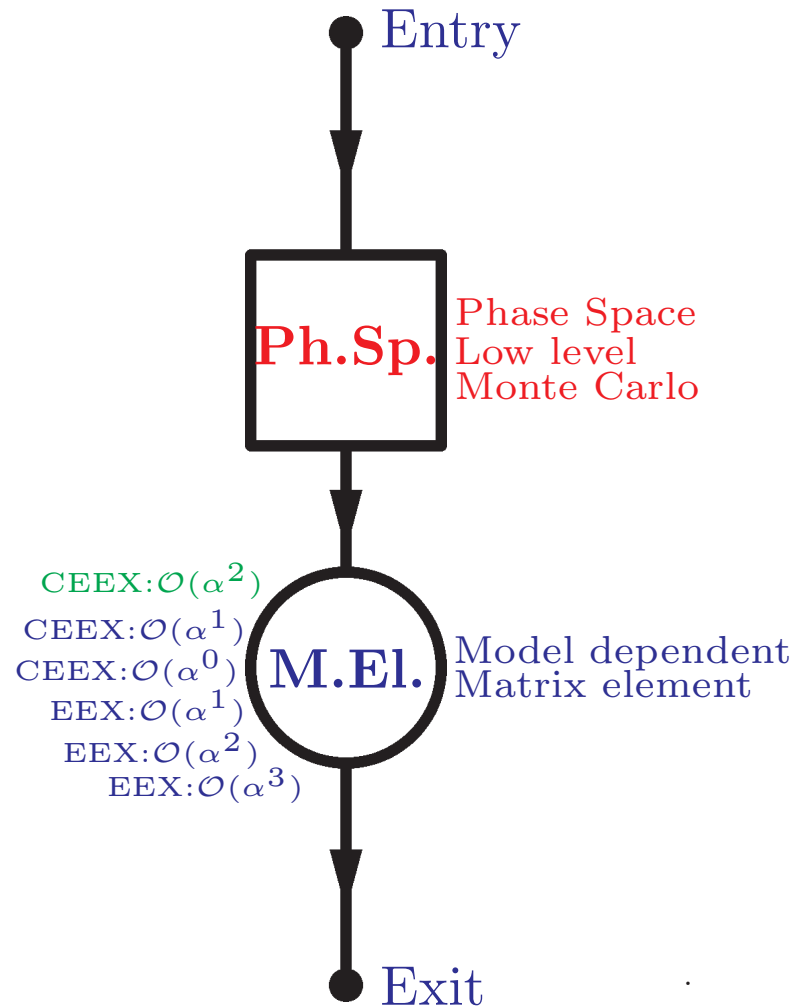
- (1) For the precision predictions and integration over acceptance regions for realistic observables, Monte Carlo techniques are indispensable. **Sounds trivial only now.**

Only analytical results are valuable, 1-dim fitting, MC → peripheral experimental activity.

- (2) Exact phase-space generation and explicit parametrization was the quality stamp^a established by Stanislaw Jadach
- (3) All approximations should be localized in matrix elements.
- (4) approximate matrix elements, but of explicit form, thus open for improvements.
- (5) Into such programs New Physics effects can be injected, ambiguities evaluation systematized.
- **I will break my plan and use example slide on KKMC Monte Carlo for $e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-(n\gamma)$ process (with τ decays).**

^aAdvantages of semi-communist Poland of 70's: particular freedom: in scientific work direction, long term projects accepted.

KKMC rigorous “matrix element \times full phase space” implementation



- Phase-space Monte Carlo simulator is a module producing “raw events” (including importance sampling for possible intermediate resonances/singularities)
- Library of Matrix Elements; input for “model weight”; independent module
- This was used extensively for LEP precision Monte Carlos.
- Earlier difficulties with the k_0 boundary. Consequence of defined perturbation order paradigm. Soft photons were integrated out and resulting function summed with the virtual corrections to cancel infrared singularities. The k_0 not too small or negative weight events, bad for the detector response.

Computer Physics Communications 9 (1975) 297–304
© North-Holland Publishing Company

RAPIDITY GENERATOR FOR MONTE-CARLO CALCULATIONS OF CYLINDRICAL PHASE SPACE

S. JADACH

Institute of Physics, Jagellonian University, Cracow, Poland

Received 1 November 1974

PROGRAM SUMMARY

Title of program: GENRAP

Catalogue number: AAUO

Program obtainable from: CPC Program Library, Queen's University of Belfast, N. Ireland (see application form in this issue)

Computer: CDC 7600; *Installation:* CERN, Geneva, Switzerland

Operating system: SCOPE 2.0

Programming language used: ANSI FORTRAN

High speed storage required: 6000 words

No. of bits in a word: 60

Overlay structure: None

No. of magnetic tapes required: None

Other peripherals used: Card reader, line printer

No. of cards in combined program and test deck: 300

Card punching code: ANSI

Keywords: Nuclear, high energy, hadrons, phase-space, Monte-Carlo, rapidity, integration, importance sampling.

Nature of physical problem

Analysis of high energy collisions of hadrons in the framework of many theoretical models needs numerical evaluation of multi-dimensional integrals over Lorentz invariant phase space. In practice, the only method of evaluating them exactly is the Monte-Carlo method. However, if we use methods of random generation of points in the phase space known up to now, the time of evaluation of these integrals increases not only with the number of particles, but also very rapidly with energy and Monte-Carlo calculations of phase space integrals for laboratory momentum over a thousand GeV/c are practically impossible.

Method of solution

The time of Monte-Carlo evaluation of integrals can be shortened by the importance sampling method [1]. The first step in solving the problem of importance sampling for calculation of the Lorentz invariant, cylindrical phase space was done by proposing the method of generation of the transverse momenta in a limited region [2]. However, even when this method is applied, the calculation time increases appreciably with increasing energy.

We present here a new method of solving this problem [3]. We propose to generate rapidity variable instead of longitudinal momenta [4], or some kind of intermediate masses [5]. When this method is applied the calculation time for a fixed number of outgoing particles remains nearly constant when the energy increases.

Restriction on the complexity of the problem
This program has a very good importance sampling for purely cylindrical phase space, i.e. for phase space with transverse momentum cut-off only. Deviations of the model from purely cylindrical phase space may decrease the efficiency of the program. The efficiency also decreases with increasing number of particles.

Typical running time
The generation time of one event is approximately proportional to the number of particles. However, at low energies there is a number of zero-weight events. The time of generation of one zero-weight event is shorter than that of non-zero-weight event. For example, the generation time of one event for 10 particles, for CDC 7600 computer at CERN is 2.3×10^{-4} sec, and is nearly the same as in the case of a typical phase space Monte-Carlo program like FOWL [6].

Unusual features of the program

The number of particles is limited to less than 18, but this can be easily increased. GENRAP is a subprogram and the driving program should supply it with the total energy in the centre-of-mass, the number and masses of outgoing particles. CERN Library FOWL [6] program may be used as a driving program.

- **Start:** The oldest Monte Carlo program Staszek was mentioning was phase space generator **FOWL** by F. James, Cern program library W505, this was referenced in **GENRAP** paper: S. Jadach, “Rapidity Generator for Monte Carlo Calculations of Cylindrical Phase Space” *Comp. Phys. Commun* 9 (1975) 297
- important because experience with pre-samplers and multi-particle final states.
- Only few details known to me, guesses from short scattered Staszek’s comments. All that was happening before my times. May be Janusz Chwastowski know something? Or may be somebody else?

Lesson from Staszek: old projects should help organize work on the new ones.

(ii) matrix element preparation

- Two example early papers:

QED RADIATIVE CORRECTIONS TO ELECTRON - POSITRON ANNIHILATION INTO HEAVY FERMION Frits A. Berends, R. Kleiss, S. Jadach, Z. Was (Nov, 1982)
Acta Phys.Polon.B 14 (1983) 413

QED O (α^3) RADIATIVE CORRECTIONS TO THE REACTION $E^+ E^- \rightarrow \tau^+ \tau^-$ INCLUDING SPIN AND MASS EFFECTS. (ERRATUM) S. Jadach, Z. Was (1984) Acta Phys.Polon.B 15 (1984) 1151, Acta Phys.Polon.B 16 (1985) 483 (erratum)

- careful choice of reference frames ! We had our time, no pressure from grant applications etc.
- **Mixed blessing** : algebraic language SCHOONSHIP. Long formulas could be controlled. But if program used alone, difficult to get short, useful for intuition build formulas.

Lesson from Staszek:

Long 1000+

terms formula give equally good results, why get them shortened to few terms only.

• What a loss of time I thought. All, except tests, by hand, every detail watched twice.

• Nonetheless I profit till now.

• I never got time to understand dynamic continuation of these analytic short functions, from massive fermions to ultra-relativistic regime. ★ Consequences for: factorizations, underlying events? Issues of many variables analytic functions?

• Change of Poland social environment prevented that.

The image shows handwritten mathematical derivations from a paper. It includes several equations and explanatory text. Key elements include:
- A note: "where [1]. The magnetic part of the vertex correction vanishes in the ultrarelativistic limit, so only the part arising from the produced fermion pair should be considered."
- Equation (2.10): $Re F_2(\mu) = -\frac{25}{16\pi} Q^2 \frac{\mu^2}{\sqrt{s}} \gamma$
- Equation (2.11): $\frac{d\sigma^B}{d\Omega} = \frac{25}{16\pi} Q^2 Q^2 N_c \beta (1+c^2+\mu^2) Q Q \frac{2}{\sqrt{s}}$
- Equation (2.12): $D(c) = 2Re \left\{ Li_2 \left(\frac{-x}{1-y} \right) - Li_2 \left(\frac{x-y}{1-y} \right) - Li_2 \left(\frac{x+y}{1-y} \right) + Li_2 \left(\frac{x}{1-y} \right) + \ln^2 \left| \frac{x}{1-y} \right| - Re Li_2(x^2) + \frac{1}{2} \ln^2(x^2) - \ln(x^2) \ln(-x^2) \right\}$
- Equation (2.13): $x = (1-c)/\sqrt{1-c^2}$, $y = \frac{1}{2} \left[\sqrt{1-c^2} + \frac{\mu^2}{1-c^2} \right]$, $\omega = 2-2c-\mu^2$
- Equation (2.14): $\frac{d\sigma^{B0c}}{d\Omega} = \frac{25}{16\pi} Q^2 Q^2 N_c \beta Q Q \frac{2}{\sqrt{s}} \cdot [(1+c^2+\mu^2) 4 \ln(1-c) \ln \frac{\omega}{2} + \frac{1}{2} B(c) - (c \rightarrow -c)]$
- Equation (2.15): $B(c) = \tilde{A}(c) [4+c - \frac{2c^2}{1-c^2} (3-c)] - \tilde{B} [2c+\mu^2] - \tilde{C} c - \tilde{D} c [4 - \frac{2c^2}{1-c^2} - \frac{2\mu^2}{1-c^2}] + \ln \frac{\omega}{\mu^2} [-c + \frac{\mu^2}{1-c^2} (3-c)] + \ln \frac{\omega}{\mu^2} [-c - \frac{\mu^2}{1-c^2} (3-c) - \frac{2\mu^2}{1-c^2}]$
- Equation (2.16): $\tilde{A}(c) = 2 \ln \frac{1+c}{2} + \ln \frac{1-c}{1-c^2} + \ln \frac{1}{\mu^2}$, $\tilde{B}(c) = \ln^2 \frac{1+c}{2} - 2 Li_2 \left(\frac{c}{1-c^2} \right) - \frac{1}{2} \ln^2 \frac{3}{1-c^2} - \frac{1}{2} \ln^2 \frac{1}{\mu^2}$, $\tilde{C} = \ln^2 \frac{1}{\mu^2} + \frac{2}{3}$, $\tilde{D} = \frac{1}{3} \left[\gamma^2 + 4 Li_2 \left(\frac{-1}{1-c^2} \right) - \frac{2}{3} \right]$
- Equation (2.17): $S^{A'}(c) = Q Q^2 \frac{2}{\sqrt{s}} \left\{ (1+c^2+\mu^2) [4 \ln(1-c) \ln \frac{\omega}{2} + D(c) + \frac{1}{2} B(c)] \right\}$

1154

In the last formula the index $i = 1, 2, 3$ numbers the three components of \vec{w}_1 in the rest frame of the τ^+ lepton and the $k = 1, 2, 3$ numbers the axes in the rest system of the τ^- lepton. In both rest frames the third axis is the spin quantisation axis as in the definition of α_1 and α_2 and the first axis is defined to be perpendicular to the reaction plane i.e. along τ -vector. In (2.5) the absence of terms linear in w_k like $\sum_k R_{0k}^0 w_k^2$ and $\sum_k R_{i0}^0 w_i^1$ means that each τ^\pm separately is not polarized in the lowest order. There are, however, correlations between w_1 and w_2 which are controlled by the matrix R_{ik}^0 . We extend the matrix R_{ik}^0 to R_{ab}^0 with $a, b = 0, 1, 2, 3$ obtaining

$$R_{ab}^0 = \begin{bmatrix} 1+c^2+M^2s^2, & 0, & 0, & 0 \\ 0, & -(1-M^2)s^2, & 0, & 0 \\ 0, & 0, & (1+M^2)s^2, & 2Mcs \\ 0, & 0, & 2Mcs, & 1+c^2-M^2s^2 \end{bmatrix}. \quad (2.6)$$

In order to calculate the matrix R_{ab}^0 as given by equation (2.6) directly from our spin amplitudes defined in Eq. (2.3), we have to translate the bispinor indices in the joint density matrix given by

$$\begin{aligned} \varrho_{\alpha_1\bar{\alpha}_1\alpha_2\bar{\alpha}_2}^0 &= \frac{1}{4} \sum_{\lambda_1\lambda_2} M_{\lambda_1\lambda_2\alpha_1\alpha_2}^0 (M_{\lambda_1\lambda_2\bar{\alpha}_1\bar{\alpha}_2}^0)^* \\ &= \frac{1}{2} U^2 \left[|\alpha_+\bar{\alpha}_+| + \alpha_+\bar{\alpha}_+c^2 + M^2s^2\alpha_-\bar{\alpha}_- - \frac{i}{2}(\alpha_+\bar{\alpha}_- - \alpha_-\bar{\alpha}_+)2Mcs \right] \end{aligned} \quad (2.7)$$

into vector indices a and b , see (2.6). The answer may be read off from Eq. (2.4) by substituting in the operator $A_\pm(p, w)$ as polarisation vectors the three space-like vectors $\hat{e}_1 = (0, 1, 0, 0)$, $\hat{e}_2 = (0, 0, 1, 0)$ and $\hat{e}_3 = (0, 0, 0, 1)$ and comparing the results with the bispinor quantities $u(p, \alpha)\bar{u}(p, \bar{\alpha})$ in the τ rest frame, $p = (M, 0, 0, 0)$, α being the spin projection onto \hat{e}_3 . The result is

$$\begin{aligned} A_+(p, \hat{e}_1) - A_+(p, 0) &= \tilde{A}_+(p, e_1) = u(p, +)\bar{u}(p, -) + u(p, -)\bar{u}(p, +), \\ A_+(p, \hat{e}_2) - A_+(p, 0) &= \tilde{A}_+(p, e_2) = iu(p, -)\bar{u}(p, +) - iu(p, +)\bar{u}(p, -), \\ A_+(p, \hat{e}_3) - A_+(p, 0) &= \tilde{A}_+(p, e_3) = u(p, +)\bar{u}(p, +) - u(p, -)\bar{u}(p, -), \end{aligned} \quad (2.8)$$

and in addition

$$A_+(p, 0) = \tilde{A}_+(p, 0) = u(p, +)\bar{u}(p, +) + u(p, -)\bar{u}(p, -).$$

Similarly A_- can be expressed in terms of $v(p, \alpha)\bar{v}(p, \bar{\alpha})$, see Appendix A. In practice, instead of employing directly the relations (2.8) to translate the sixteen elements of the joint density matrix in spinor notation into the sixteen elements of R_{ab} we rather introduce some sort of vocabulary which maps factors like $|\alpha_+\bar{\alpha}_+|$, $\alpha_+\bar{\alpha}_+$ etc. into elements of R_{ab} . For instance $\varrho_{\alpha_1\bar{\alpha}_1\alpha_2\bar{\alpha}_2} = \frac{1}{2}U^2|\alpha_+\bar{\alpha}_+|$ yields the non-zero elements $R_{00} = 1$, $R_{11} = -1$, $R_{22} = 1$, $R_{33} = 1$; all other elements vanish. The complete set of the relations of this type is also

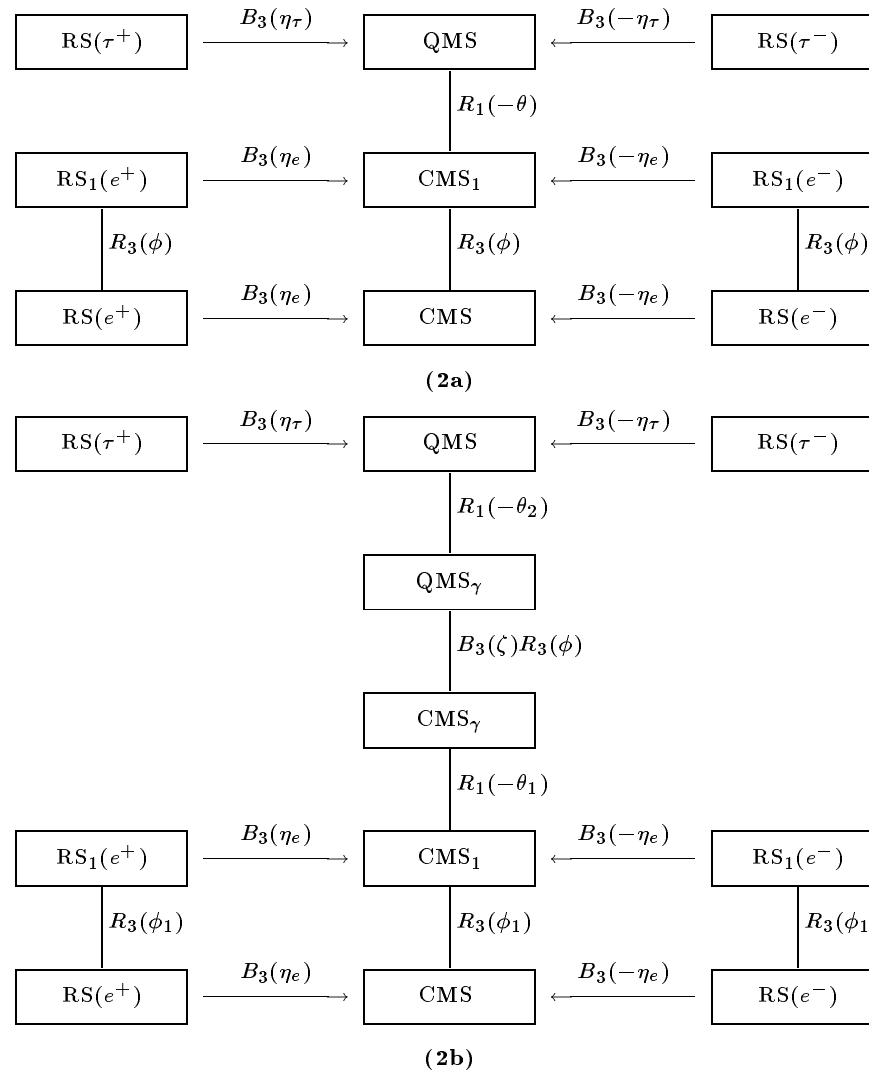
Lesson from Staszek:

- Use vector or spinor indices is equivalent and in both cases formulas are short if proper frames are chosen.
- Formulas based on aggregated spinor degrees of freedom are slightly shorter.
- Vector degrees easier for intuition and thus ques for optimal variables
- Spinor representation reappeared later, with Kleiss-Stirling spinor techniques. Universality OK, but unfriendly for intuition.
- ★ interferences partial cancellation, time-position representation massive vs masless calculations, beyond N^n counting.

(ii) matrix element preparation

Reference frames for spin phenomenology

Figure 2



(ii) matrix element preparation

10

These reference frame trees, established in 80's remain useful till now. It match geometry of Lorentz group, its representations and explore properties of field theory amplitudes. Not only of first order but of higher as well.

These reference frame trees were always in background: (i) in design (ii) in tests (iii) in use for phenomenology, e.g. in design of optimal variables for some physics quantities of particular interest.

The properties which are behind choice of these reference frames break with $\mathcal{O}(\alpha^2)$ non-enhanced corrections. That is $\sim 0.01\%$ QED and $\sim 1\%$ level for QCD.

In KKMC different organization is used, it was imposed because of Kleiss-Stirling spin amplitude techniques (on one side) and complexity of numerous cases for multi-particle final states (on the other). But previously accumulated experience was useful so much!

S. Jadach, B.F.L. Ward, Z. Was, *Global positioning of spin GPS scheme for half spin massive spinors* Eur.Phys.J.C 22 (2001) 423-430

Implicitly I have addressed the following projects from my list: (iii) Mustraal (iv) Koralb (v) Tauola (vii) KoralZ, (xii) KKMC

Lesson from Staszek: they need to be dealt together

In construction of Monte Carlo, properties of phase space and matrix elements can not be separated. **they need to match. It is obvious matrix elements represent forms on curved space (phase space can be understood as tower of manifolds connected by triangulation-like relations induced by infrared singularity cancellations)**

One has to construct (if precision is at stake) tower of theories/models:

- (i) Independently of approximation level they need to be controlled in all details
- (ii) Only controlled things can be improved and final ambiguities evaluated.
- (iii) Ultimate solution of KKMC Bhlumi generators was exploiting the fact that QED can be expanded starting from eikonal level (**not! from eikonal approximation**).
- (iv) At eikonal level conformal symmetry is helpful both for matrix element and for phase space representation.
- (v) Eikonal level QED can be solved to all orders and can be implemented into Monte Carlo generation as crude level generator.

(i)phase-space (ii) matrix element preparation

12

(vi) Up to second order it matches structure of enhancements present in complete QED or even Standard Model processes (for many interesting processes at least).

(vii) Beyond that level further effort on fundamental things including such topological issues like manifold triangulation will be needed. C-W complexes may be?

Lesson from Staszek: control approximations exactly

- For long years, people used to say, why do we need to control technicalities if we are missing larger effect due to limited perturbation order.
- That is true, from short time perspective, inevitable if you work under pressure e.g. from post doc applications.
- Staszek was always devoted to detail and different way was followed. Before I will concentrate on work on luminosity prediction.
- Note that similar strategies were for systematic error control and correlated event samples for: ● KORALZ ZW, Stanislaw Jadach, Phys.Rev.D 41 (1990) 1425 ● KandY *The Monte Carlo program KoralW version 1.51 and the concurrent Monte Carlo KoralW and YFSWW3 with all background graphs and first order corrections to W pair production* S. Jadach, M. Skrzypek, B.F.L. Ward, ZW Comp.Phys.Comm. 140 (2001) 475
- Luminosity calculations and Bhlumi project was of the highest precision ever. It was one of essentials for OPAL and ALEPH luminosity measurements, reached sub premille precision level.
- → BHLUMI generator.

Luminosity: overall normalization of the cross section

- When LEP experiments were to start, it was expected that precision of luminosity measurement will be about 2%.
- The demanded precision of Monte Carlo programs was thus about 0.5%
- Thanks to development on exponentiation, far higher precision for theoretical predictions was possible.
- **But why do it?** On Staszek side; it was first, just because it was possible.
- It was of importance for number of neutrinos including heavy neutrinos, for Standard Model tests including renormalizability.
- Because Staszek previous achievements, convincing precision delivery, Lumi detectors were constructed. First of ALEPH, later of OPAL.
- That was **great success**, worth long presentation in itself.
- Instead I will say just few words on how precision was evaluated.

Luminosity: quest for precision

- At start, always there is analytical (semi-analytical) calculation. Approximate acceptance does not require Monte Carlo. That was the case of luminosity too.
- Soon it turned out that it was not anymore true. Some detector effects were implemented with the first order Monte Carlo which we called Oldbab as it became part of the tests. To avoid k_0 bias, some region of phase space for bremsstrahlung photons were integrated over and results combined with virtual corrections.
- The price was systematic ambiguity. For 2% precision level that was acceptable bias.
- But in some region (distinguishable by the detector) that would mean locally negative cross section.
- For theoretical calculation aiming at getting fixed order result, we could overcome that, with the help of introduction of negative weight events. Of course simulation had to be used for simplified observables only.
- Combination of semi-analytical and fixed order calculation, was useful. Use of correlated samples was useful, but awkward, solution. Of limited precision/flexibility too.

- But even once Bhlumi, luminosity Mote Carlo based on exponentiation was written, such correlated samples, fixed order structure function simulations offered essential test tool. Numerous comparisons were fundamental. Approach based on three categories of precision: (i) statistical precision (ii) technical precision (iii) physics precision, was established.
- At the end, Staszek could provide the tool helpful to encourage work on lumi- detector.
- Detectors were build. What was first, promise of precision theory predictions or of start for detector work, is not clear to me, nor it is important.
- Example of inter-inspiration for theory and detector work.

The last Staszek demand for me:

prepare third order QED (triple bremsstrahlung part) of matrix element in a form suitable for installation into KKMC.

First step in that direction completed: *Collinearly enhanced realizations of the Yennie-Frautschi-Suura (YFS) MC approach to precision resummation theory* **S.**

Jadach, B.F.L. Ward, Z.W, Phys.Lett.B 848 (2024) 138361

But this is first step of long road only. Further steps include:

- double bremsstrahlung β_3 of YFS, with mixed real-virtual parts.
- contact interaction expansion for t -channel boson exchange. Beware of charged Higgs ghosts contributions to $e^+e^- \nu_e \bar{\nu}_e \gamma\gamma\gamma$.
- higher order QCD corrections, running α_{QED} : both s- and t- channel; check if unitarity not damaged by complex boson mass schemes.
- Will differential geometry, topological expansion, triangulation theory, CW complexes, formalisms be needed? Conformal symmetry not only for phase space and eikonal parts of ME, but for systematization of non-leading parts of ME?

I was talking about aspects necessary for long living projects developed like the ones of Staszek which remain competitive for more than 4 decades now.

How to convince community of future users and developers to follow?

For children development one needs: father, mother, the whole village and teachers too.

For Monte Carlo phenomenology projects one need to accumulate experience of:

- Mathematical, phase space geometry side too.
- Perturbative results represented in useful form.
- Software development and test strategies, software organization.
- How to assure work stability.

Important (keep in mind projects like FCC), so much better precision will be required soon.

New solutions will require third order matrix elements in a form matching exclusive exponentiation, so dominant higher than third order parts can be included too. What about two loop electroweak effects, complex masses vs. unitarity constraints. What about separating out QED from whole SM and what about parametric ambiguities.

Work with new people smooth for some time, but become challenging for long term perspective like FCC. Educated/trained people choose other careers; often outside physics.

In facing all these challenges Staszek will be missing a lot!

Therefore, send not to know

For whom the bell tolls,

It tolls for thee.

Let us do what we can for Staszek's work to continue into new horizons.

From Curriculum vitae of Stanislaw Jadach

Prof. Stanisław Jadach zatrudniony w IFJ PAN od lutego roku 1992-go, najpierw na stanowisku docenta, a po nadaniu w roku 1994-tym przez Prezydenta RP tytułu profesora, pozostaje do dziś na stanowisku profesora zwyczajnego. W okresie poprzedzającym zatrudnienie w IFJ PAN prof. Jadach pracował w latach 1971-92 na Uniwersytecie Jagiellońskim w Krakowie, kolejno jako doktorant, adiunkt i docent. Prof. Stanisław Jadach legitymuje się wybitnym dorobkiem w dziedzinie teoretycznej fizyki cząstek elementarnych, jak też w pokrewnej dziedzinie informatyki stosowanej. Są to osiągnięcia szeroko znane na arenie międzynarodowej. W wielu przypadkach zapoczątkował one nowe metody prowadzenia badań naukowych, które bezpośrednio przyczyniły się do najważniejszych odkryć w fizyce cząstek elementarnych w ostatnich trzech dziesięcioleciach. Dobry wgląd w ogrom dorobku prof. Jadacha dają dane bibliometryczne. Prof. Jadach według bazy SPIRES, która jest najbardziej wiarygodna dla dziedziny fizyki cząstek elementarnych, jest współautorem 228 prac, a z pominięciem raportów konferencyjnych 158 artykułów w czasopiśmie recenzowanych. Pomijając autocytacje, prace te osiągnęły odpowiednio 10681 i 9303 cytacji. Tak zwany H-index dla tych prac jest odpowiednio 48 i 45. Z tego 6 prac w czasopiśmie osiągnęło już 500-1200 cytacji (bez autocytacji) i liczby te ciągle rosną. Tematyka pracy naukowej prof. Jadacha ewoluowała od oddziałów jądrowych (lata 1970-79) do oddziałów elektrosłabych (1980-dzisiaj), zgodnie zresztą z głównym nurtem wielkich odkryć w tej dziedzinie. Jego praca doktorska w tematyce produkcji wielu cząstek w ówczesnie najwyższych energiach w roku 1974 i odpowiednia publikacja w *Physics Letters* została określona w podsumowaniu głównej cyklicznej międzynarodowej konferencji fizyki wysokich energii ICHEP (1974) jako jedno z ważnych osiągnięć fizyki cząstek elementarnych. Od czasu stypendium rocznego w Saclay CEA we Francji w roku 1980-tym zainteresowania naukowe prof. Jadacha przeniosły się na wiele lat na tematykę oddziałów elektromagnetycznych i słabych w eksperymentach na zderzaczach elektron-pozytron w najwyższych energiach w ośrodkach DESY (Hamburg) oraz CERN (Genewa). W latach 80-tych Model Standardowy unifikujący oddziaływanie elektromagnetyczne i słabe był już sformułowany, ale jego dokładna weryfikacja eksperymentalna odbyła się dopiero w latach 90-tych w eksperymentach na zderzaczach elektron-pozytron LEP w CERN. Porównanie

elektronicznych danych z czterech olbrzymich i skomplikowanych detektorów z przewidywaniami teoretycznymi wymaga \mathcal{L} a skomplikowanego oprogramowania zarówno do symulacji detektora jak też do obliczeń teoretycznych w ramach Modelu Standardowego (MS) dla wielu rodzajów procesów w zderzeniu elektron-pozytron. Problemem, który zagraża \mathcal{L} wykonalności ca \mathcal{L} ej analizie danych w LEP, by \mathcal{L} o to, że w roku 1988, tuż przed startem eksperymentów LEP, by \mathcal{L} o to że wszystkie istniejące wtedy obliczenia największych numerycznie poprawek radiacyjnych, czyli związanych z emisją fotonów, w postaci która nadawa \mathcal{L} aby się do analizy danych (z użyciem symulacji stochastycznej) by \mathcal{L} y oparte na obliczeniach perturbacyjnych 1-go rzędu i mia \mathcal{L} y precyzje oko \mathcal{L} o 1Z powyższej pracy, inspirowanej przez klasyczną pracę Yennie-Frautschi-Suury (1961) wywodzi się d \mathcal{L} uga seria prac i narzędzi informatycznych do obliczeń perturbacyjnych w modelu standardowym dla potrzeb eksperymentów LEP wykonanych przez prof. Jadacha i jego wspó \mathcal{L} pracowników (obecnie już profesorów Zbigniewa Wąsa, Macieja Skrzypka, Wies \mathcal{L} awa P \mathcal{L} aczka), oraz we wspó \mathcal{L} pracy z grupą prof. B.F.L. Warda z Knoxville. Powyższe obliczenia zosta \mathcal{L} y użyte w czterech eksperymentach LEP dla wszystkich procesów zderzeń, kluczowych dla ustalenia zgodności Modelu Standardowego z danymi. Odb \mathcal{L} o się to w warunkach silnej konkurencji z innymi grupami fizyków teoretycznych z Europy i świata. W warsztatach poprzedzających pierwszą fazę LEP1 w roku 1989 i drugą fazę LEP2 w roku 1996 bra \mathcal{L} o udział \mathcal{L} oko \mathcal{L} o 200 fizyków teoretycznych proponujących kilkanaście alternatywnych obliczeń i programów do obliczeń przewidywań MS, dla procesu produkcji i rozpadu bozonu Z, procesu Bhabha, procesu produkcji i rozpadu pary bozonów W i Z, ale zawsze okazywa \mathcal{L} o się, że proponowane przez prof. Jadach i jego wspó \mathcal{L} pracowników rozwiązania uwzględniające produkcję wielu fotonów by \mathcal{L} y najlepsze, obliczenia te by \mathcal{L} y najbardziej precyzyjne i prawie ca \mathcal{L} a analiza danych doświadczalnych LEP z okresu 1989-2002 opiera się niemal wy \mathcal{L} ącznie na nowatorskich rachunkach w ramach Modelu Standardowego dostarczonych przez prof. Jadacha i jego kilku wspó \mathcal{L} pracowników (wyjątkiem by \mathcal{L} o jedynie finalne dopasowanie parametrów MS do danych oraz analiza czysto hadronowych stanów finalnych). Najważniejsze z tych obliczeń i narzędzi informatycznych dotyczy \mathcal{L} y pomiaru świetlności LEP przy pomocy procesu Bhabha, produkcji pary leptonów i kwarków (w szczególności produkcji i rozpadu ciężkich leptonów tau), produkcji i rozpadów pary ciężkich bozonów W i Z, czyli praktycznie wszystkich najważniejszych procesów obserwowanych

w eksperymentach LEP. Znaczenie w/w eksperymentów w LEP i odpowiednich obliczeń teoretycznych by \mathcal{L}_0 fundamentalne – w pierwszej fazie LEP zweryfikowano, że MS jest renormalizowalną teorią pola, tak jak kwantowa elektrodynamika, a w drugiej fazie, przy pomocy procesu produkcji par WW potwierdzono tę renormalizowalność, a także potwierdzona została \mathcal{L}_0 struktura grupy cechowania zunifikowanej teorii. Powyższe rezultaty zostały \mathcal{L}_0 (pośrednio) uhonorowane nagrodami Nobla (1999) dla fizyków, którzy wcześniej zaproponowali Model Standardowy. Zbyteczne by \mathcal{L}_0 by podkreślanie ważności Modelu Standardowego dla zrozumienia podstawowych praw Natury rządzących mikroświatem i wczesną historią naszego Wszechświata. Jakiego by \mathcal{L}_0 \mathcal{L}_0 ród \mathcal{L}_0 w/w sukcesów? Najważniejszym \mathcal{L}_0 ród \mathcal{L}_0 em konkurencyjności i sukcesów by \mathcal{L}_0 innowacyjność, ciąg \mathcal{L}_0 wychodzenie poza ustalony stan wiedzy i metodologii i atakowanie problemów, które uchodzi \mathcal{L}_0 w środowisku fizyki teoretycznej za nierozwiązywalne. Na przykład, uważano powszechnie, że stosowalność przybliżenia miękkiego fotonu jest zawężona do wielu fotonów o bardzo małych energii i nie da się w sposób konsystentny powiązać rozkładów jednego lub dwóch energetycznych fotonów z rozkładami dowolnej liczby miękkich fotonów. Tymczasem ten problem został w pracy prof. Jadach w r. 1989 rozwiązany, a nawet zostały podane dwa rozwiązania, w r. 1989 dla rozkładów prawdopodobieństwa (różniczkowych przekrojów czynnych), a później z r. 1999 na poziomie amplitud spinowych. Podobnie, w r. 1996-tym uznano, w czasie warsztatów w CERN z udziałem kilkudziesięciu fizyków teoretyków, że jedyny sposób na uzyskanie precyzyjnego przewidywania dla produkcji pary bozonów W jest rachunek perturbacyjny 1-go rzędu dla całego procesu produkcji i rozpadu WW na 4 fermiony, który był niewykonalny przed zakończeniem eksperymentów LEP2 do roku 2000 (taki rachunek został ostatecznie ukończony dopiero około r. 2005.) Tymczasem niewykonalne zostały wykonane – dzięki inteligentnemu połączeniu osobnych rachunków 1-go rzędu dla procesów produkcji i rozpadu pary WW udało się osiągnąć dokładność rachunku 0.5%. Tak samo, ponieważ obliczenia poprawek radiacyjnych elektrodynamicznych (QED) uchodziły za bardzo skomplikowane, a z drugiej strony obliczenia spinowych efektów korelacyjnych podłużnych i poprzecznych w całym procesie produkcji i rozpadu dwóch leptonów tau też były bardzo skomplikowane, więc uważano, że nie da się zrobić obliczeń, które równocześnie uwzględniają oba efekty w całym procesie produkcji i rozpadu w jednym rachunku. Tymczasem dzięki zastosowaniu techniki perturbacyjnej

wielocząstkowe macierzy gęstości i opracowaniu inteligentnego algorytmu symulacji stochastycznej (Monte Carlo) udało się w/w cel osiągnąć, najpierw w latach 80-tych dla rachunków perturbacyjnych QED 1-go rzędu, a później w latach 90-tych dla dowolnego rzędu. Jedną z ważniejszych prac z okresu eksperymentów w LEP była praca prof. Jadacha z prof. G. Altarelli i prof. R. Barbieri z roku 1992-go w której podana została analiza danych LEP z uwzględnieniem elektrosłabych poprawek radiacyjnych MS. W latach 2004-2017, w związku z tym, że główny front badawczy fizyki cząstek przeniósł się do eksperymentów na nowym zderzacz proton-proton Large Hadron Collider (LHC) w CERN, prof. Jadach wraz ze swoimi współpracownikami opracowali szereg nowych metod rachunkowych w dziedzinie perturbacyjnych technik w ramach Chromodynamiki Kwantowej. Zgodnie z tradycją poprzedniego okresu zaatakowane zostały tematy uważane przez środowisko teoretyczne za nierozwiązywalne. W szczególności jednym z paradygmatów panujących od roku 1975-go było to, że tak zwany kaskadowy model partonowy (QCD parton shower) dla symulacji wielokrotnej emisji gluonów i kwarków ze zderzających się protonów nie może być w opisany przez prosty mechanizm typu Markowa, ale musi być użyty algorytm wstecznej ewolucji (backward evolution) z użyciem uprzednio przygotowanych i zapisanych rozkładów partonowych. W pracach prof. Jadacha i jego współpracowników została opracowana i zaimplementowany nowy algorytm (constrained Markovian algorithm) typu Markowa, w którym nie ma potrzeby użycia predefiniowanych rozkładów partonowych. Inna nowatorska metoda w obliczeniach QCD to opracowana i opublikowana w kilku pracach przez prof. Jadacha i jego grupę metoda uwzględniania poprawek 1-go rzędu w ewolucyjnych jądrach (NLO kernels) w kaskadzie partonowej. W ostatnich latach ukazały się też kilka prac prof. Jadacha z młodszym pokoleniem współpracowników, w których została zaproponowana nowa metoda połączenia tak zwanego twardego procesu w perturbacyjnym rzędzie NLO z kaskadą partonową, znacznie prostsza i efektywniejsza niż dwie inne znane i stosowane metody. Do jej użycia zostały zdefiniowane i opracowane rozkłady partonowe w nowym "fizycznym" schemacie faktoryzacji. Powyższe metody najlepiej nadają się do opisu danych produkcji ciężkich bozonów W i Z oraz bozonu Higgsa i została ona zaimplementowana w wersji 7.1 programu HERWIG używanego bezpośrednio w analizie danych LHC. Dane LHC będą jeszcze analizowane przez następne dziesięciolecie, więc metoda ta będzie zapewne użyta w przyszłych zaawansowanych analizach. W

ostatnich latach, od roku 2016 prof. Jadach wrócił do zagadnień związanych z fizyką zderzaczy elektron-pozytron, biorąc bardzo aktywny udział w pracach przy projektowaniu od strony teorii oddziaływań elektromagnetycznych i sferach akceleratora FCC-ee rozważanego jako następny duży projekt w ośrodku CERN. W szczególności jest ko-edytorem i współautorem dużego opracowania wieloautorskiego opublikowanego w r.2018, analizującego potrzeby nowych rachunków teoretycznych dla potrzeb FCCee. Prof. Jadach jest też współautorem trzech prac prezentujących nowe rachunki perturbacyjne dla potrzeb FCC-ee które ukazały się ostatnio – dwie z nich, na temat pomiaru świetlności (luminosity) przy pomocy procesu Bhabha i na temat procesu produkcji bozonu Higgsa w FCCee już ukazały się w czasopiśmie. Trzecia praca, zawierająca obliczenia wysokiej precyzji (100 razy dokładniejszych niż w LEP) efektów interferencji QED w asymetrii ładunkowej dla potrzeb super-precyzyjnego pomiaru stałej elektromagnetycznej QED jest w trakcie recenzji. Są to kluczowe prace dla potrzeb projektowania przyszłego FCC-ee. Prof. Jadach jedynym autorem narzędzia informatycznego FOAM do symulacji rozkładów wielowymiarowych, które wraz z pakietem ROOT jest częścią biblioteki Ubuntu, najpopularniejszą na świecie dystrybucją systemu operacyjnego Linux (być może jest to najbardziej rozpowszechniony na świecie kod komputerowy polskiego autorstwa). Jest on autorem lub współautorem ponad 20 programów komputerowych publikowanych od roku 1975 w Computer Physics Communications. Powyższy opis osiągnięć w pracy badawczej prof. Jadach można i należy uzupełnić dodatkowymi informacjami na temat uczestnictwa i organizacji konferencji naukowych, działalności dydaktycznej, kierownictwa grantów badawczych, współpracy międzynarodowej, nagród i wyróżnień. Prof. Jadach jest inicjatorem i stałym członkiem "International Advisory Board" cyklicznej (co 2 lata) naukowej konferencji międzynarodowej RADCOR, najważniejszej i największej (około 200 uczestników) konferencji w dziedzinie praktycznych metod Kwantowej Teorii Pola w fizyce cząstek elementarnych, odbywającej się co 2 lata w innym kraju Europy, Ameryki i Azji. Jego rola była kluczowa w przekształceniu tej konferencji z jednorazowej w cykliczną, po tym jak została ona zorganizowana w r.1996 przez niego w Krakowie. Prof. Jadach wygłasza też kilkakrotnie referaty plenarne na tej konferencji, a w roku 2002 (Shonan Village, Japonia) wygłasza referat podsumowujący całą konferencję. Prof. Jadach jest też od kilkunastu lat stałym członkiem komitetu organizacyjnego corocznej konferencji międzynarodowej

EPIPHANY w Krakowie oraz ważnej cyklicznej międzynarodowej konferencji "Parton Shower and Resumation" (PSR), którą współorganizowałam w roku 2015 w Krakowie. Ważną rolę prof. Jadacha w organizacji współpracy międzynarodowej jest współorganizacja oraz czynne uczestnictwo w wielu warsztatach roboczych w CERN trwających każdorazowo kilka miesięcy zakończonych konferencją z udziałem typowo kilkudziesięciu fizyków z wielu krajów członkowskich CERN, i opracowaniem obszernego raportu. Prof. Jadach był kilkakrotnie jednym z głównych koordynatorów tego typu przedsięwzięcia w CERN latach 1989, 1995-96, 1999-2000, 2003 i współautorem lub/ oraz edytorem finalnego raportu. Ostatnio, 2017-18, jest on współorganizatorem warsztatów na temat fizyki w akceleratorze FCC-ee, rozważnym jako następny duży projekt w CERN, którego rezultatem jest opublikowany ponad 300-stronicowy raport (2018). Podobnie, prof. Jadach był też koordynatorem grupy roboczej "Monte Carlo event generators" w ramach serii warsztatów ECFA-DESY w latach 1998-2001, zakończonego publikacją "TESLA Technical Design Report". Prof. Jadach brał aktywny udział, wygłaszając referaty, w ciągu ostatnich trzech dekad typowo w co najmniej 3-4 międzynarodowych konferencjach i innego rodzaju spotkaniach każdego roku. Najlepszą ilustracją tej aktywności konferencyjnej i wykładowej są 83 prezentacje w wersji elektronicznej z wystąpień wygłoszonych na zaproszenie na konferencjach międzynarodowych, warsztatach tematycznych i seminariach, głównie w instytutach zagranicznych, z okresu ostatnich 20 lat (1998-2018) zamieszczone na publicznej stronie internetowej w IFJ PAN: <http://nz42.ifj.edu.pl/user/jadach/> Prof. Jadach był zapraszany na wizyty przynajmniej kilkutygodniowe praktycznie do wszystkich znaczących na świecie laboratoriów i instytutów w dziedzinie fizyki cząstek w Europie, USA i Japonii, takich jak KEK (Tsukuba), SLAC (Stanford), Fermilab (USA), CERN, DESY, Max Planck Institut w Monachium, CEA Saclay, Uniwersytet VI w Paryżu, IPP Durham, IJB Dubna, Demokritos w Atenach. Na dłuższe stypendia 6-12 miesięcy prof. Jadach był zapraszany trzykrotnie do CERN (Genewa), DESY Hamburg, DESY Zeuthen, MPI Monachium, UTK Knoxville USA, dwukrotnie do CEA Saclay oraz do Rutherford Laboratory (Chilton, Anglia). Ważną częścią działalności organizatorskiej w nauce prof. Jadach był kierowanie projektami finansowanymi ze środków krajowych i europejskich. Prof. Jadach był od momentu powstania KBN w roku 1992 niemal bez przerwy kierownikiem kolejnych grantów przyznanych przez KBN albo NCN. Aktualnie jest głównym wykonawcą projektu 2016/23/B/ST2/03927

finansowanego przez NCN na temat fizyki FCC-ee. W latach 2004-2008 kierowałam dużym grantem MTKD-CT-2004-510126 serii "Transfer of knowledge" 6-go programu ramowego (prawie 2 mln euro) zrealizowanego w całości w IFJ PAN. W latach 1996-2006 prof. Jadach był koordynatorem polskiego węzła (nodu) w kolejnych dużych grantach serii "Marie Curie RTN" w których uczestniczyło około 10 instytutów w różnych krajach europejskich, gdzie w skład polskiego węzła wchodził IFJ PAN, Uniwersytet Warszawski i Uniwersytet śląski. (Przed przystąpieniem Polski do UE był to możliwe jako tzw. "associate node"). W latach 2004-06 prof. Jadach koordynował też polskim udziałem w grantie NATO nr.PST.CLG.980342 programu CLG, z udziałem IFJ PAN i instytutów w Dubnej, Knoxville i Nowosybirsku. Byłam też wykonawcą i czynnym uczestnikiem w kilku innych projektach finansowanych w ramach współpracy międzynarodowej (np. IN2P3) lub z programów unijnych. Działalność dydaktyczna prof. Jadacha obejmuje wykłady kursowe oraz prowadzenie ćwiczeń dla studentów, praktycznie ze wszystkich dziedzin fizyki w czasie zatrudnienia w Instytucie Fizyki Uniwersytetu Jagiellońskiego w latach 1972-1992. Ponadto w późniejszym okresie prof. Jadach prowadził kilkakrotnie dla studentów IFJ wykłady specjalistyczne z fizyki cząstek elementarnych. Prof. Jadach wypromował 5 doktorantów i jednego magistranta. Wyróżnienia wynikające z prowadzenia badań naukowych prof. Jadach obejmują dwie najbardziej prestiżowe nagrody w Polsce w dziedzinie fizyki: Nagrodę im. Marii Skłodowskiej-Curie w dziedzinie fizyki przyznaną przez Polską Akademię Nauk w roku 2003 oraz Nagrodę im. Mariana Mięśowicza w dziedzinie fizyki przyznaną przez Polską Akademię Umiejętności w Krakowie, również w roku 2003. W roku 2018 prof. Jadach został wybrany na członka korespondenta Polskiej Akademii Umiejętności w Krakowie.