METODA FAST FORWARD UNTUK MEMPERCEPAT DINAMIKA KUANTUM ADIABATIK PADA SPIN TUNGGAL

Annisa Benggadinda, Iwan Setiawan

Pendidikan Fisika, Universitas Bengkulu, Indonesia

benggaannisa@gmail.com
iwansetiawan@unib.ac.id

Abstrak

Penelitian ini merupakan peneltian teoritik yang mengkaji literatur yang membahas metode percepatan dinamika kuantum secara adiabatik. Metode untuk mempercepat dinamika kuantum ini disebut metoda *fast forward*. Metode ini pertama kali di usulkan oleh Masuda dan Nakamura pada tahun 2010. Dalam metode ini, skema percepatan dibangun dengan memodifikasi Hamiltonian dengan menambahkan suku tambahan ke Hamiltonian awal yang disebut sebagai suku regularisasi. Hal ini dilakukan agar persamaan Schrodinger bergantung waktu tetap terpenuhi. Proses mempercepat dilakukan dengan menggunakan faktor penskalaan waktu yang bernilai besar dan parameter adiabatik yang menuju nol. Suku regularisasi Hamiltonian dapat diaplikasikan dengan menggunakan medan magnet yang disebut sebagai medan magnet penggerak. Pada penelitian ini metode *fast forward* diaplikasikan pada sistem spin tunggal yaitu dinamika spin yang bergerak pada keadaan awal *up* (atas) ke keadaan *down* (bawah) pada keadaan akhir. Metoda *fast forward* diaplikasikan dengan terlebih dahulu mendapatkan nilai eigen dari Hamiltonian sistem. Selanjutnya dengan meninjau keadaan energi terendah *(ground state)* didapatkan suku tambahan Hamiltonian serta medan magnet penggerak yang menjamin spin tunggal dapat bergerak dari keadaan awal ke keadaan akhir dalam waktu yang singkat. Suku regularisasi Hamiltonian dan medan magnet penggerak akan mempertahankan energi sistem tetap dalam keadaan energi ground state (yang dikenal sebagai keadaan adiabatik) selama proses mempercepat.

Kata kunci: Adiabatik, Dinamika Kuantum, Spin tunggal

Abstract

This research is a theoretical research that examines the literature that discusses the method of accelerating quantum dynamics adiabatically. This method for accelerating quantum dynamics is called the fast forward method. This method was first proposed by Masuda and Nakamura in 2010. In this method, the acceleration scheme is built by modifying the Hamiltonian by adding an additional term to the initial Hamiltonian which is called the regularization term. This is done so that the time-dependent Schrodinger equation remains fulfilled. The accelerating process is carried out by using a large time scaling factor and an adiabatic parameter that goes to zero. The Hamiltonian regularization term can be applied using a magnetic field called the driving magnetic field. In this study, the fast forward method is applied to a single spin system, namely the dynamics of the spin which moves from the initial up state to the down state in the final state. The fast forward method is applied by first obtaining the eigenvalues of the system Hamiltonian. Furthermore, by reviewing the lowest energy state (ground state) we get an additional Hamiltonian term and a driving magnetic field that ensures a single spin can move from its initial state to its final state in a short time. The Hamiltonian regularization term and the driving magnetic field will keep the system energy in the ground state energy state (known as the adiabatic state) during the accelerating process.

Keywords : Adiabatic, Quantum Dynamics, Single Spin

PENDAHULUAN

Zaman sekarang dengan sistem teknologi yang semakin canggih akan mempermudah segala urusan yang ada. Dalam proses memproduksi suatu produk seperti elektronik, otomotif, pabrik, dll (Masuda & Nakamura, 2008) (Del Campo & Kim, 2019), sangat dibutuhkan untuk mempersingkat waktu pembuatan produk tersebut (Vinjanampathy & Anders, 2016) (Setiawan, Kosasih, et al., 2019). Memanipulasi dan mengoptimalkan waktu pengerjaan suatu produk merupakan salah satu cara yang dapat dilakukan melalui waktu yang dipersingkat pada saat perancangan produk tersebut (Masuda & Nakamura, 2011) (Ruschhaupt & Muga, 2014), Telah ditemukan suatu metode yang tepat dan sesuai, agar dihasilkan produk dalam waktu yang singkat tanpa mengubah ciri dari sistem yang di tinjau (Setiawan, Gunara, et al., 2019).

Terdapat penelitian yang bertujuan untuk mempercepat proses dinamika dalam dunia mikroskopik dalam waktu yang lebih singkat. Pada penelitian ini telah dikembangkan konsep mempercepat dinamika kuantum dengan mempertahankan karakteristik dari level energi sistem yang disebut dinamika kuantum adiabatik. Percepatan yang dilakukan disebut dengan *fast forward* yang artinya adalah merangkai atau memproduksi suatu peristiwa dengan mempersingkat skala waktu seperti proyeksi film cepat di layar (Nakamura et al., 2017). Dalam hal ini para peneliti juga mengembangkan pada proses mempercepat waktu secara adiabatik yaitu yang disebut sebagai konsep *shortcuts to adiabaticity* (Traps et al., 2021) (Palmero et al., 2016) (Alamos & Alamos, n.d.) (Jarzynski, 2013) (Cabedo-Olaya et al., 2020). Pada beberapa tahun terkahir banyak juga peneliti dibidang teoritis dan eksperimen mengembangkan metode *fast forward* pada sistem relativistik (Deffner, 2016) (Yahalom, 2018).

Penelitian sebelumnya dikemukakan dan dikembangkan pengembangan konsep mempercepat dinamika kuantum adiabatic (Hartmann et al., 2020) pada sistem relativistik oleh Masuda dan Nakamura yaitu teori *fast forward* yang membahas tentang percepatan dinamika kuantum adiabatik (Masuda & Nakamura, 2010). Pada teori ini telah menggunakan metode yang dirumuskan dalam representasi koordinat persamaan Schoodinger (Pedersen et al., 2016) (Takahashi, 2014). Teori ini kembangkan dan bertujuan untuk mempersingkat waktu dinamika kuantum secara adiabatik (Patra & Jarzynski, 2021), dengan menggunakan faktor perskalaan waktu dengan nilai yang besar dalam dinamika kuasi adiabatik (Takahashi, 2019). Konsep untuk mempertahankan karakteristik selama dipercepat dilakukan dengan konsep regularisasi yaitu dengan menambahkan suku ke Hamiltonian (Hegade et al., 2021) (Wang et al., 2016) (E Torrontegui et al., 2012). Metode mempercepat dinamika kuantum adiabatik (Erik Torrontegui et al., 2013) (Iram et al., 2021), dapat digunakan untuk memindahkan elektron tanpa mengubah sifat asli dari elektron tersebut dengan menggunakan waktu yang lebih singkat dari biasanya dengan cara menambahkan regularisasi ke Hamiltonian awalnya, dan pada metode *fast forward* bisa mempercepat sistem kuantum apapun untuk mencapai suatu target yang telah dirancang secara adiabatik dan mempersikat waktu (Taras et al., 2021) dengan cara mempercepat dinamika kuantum. Teori ini dikembangkan lebih lanjut untuk mempercepat pergerakan dinamika kuantum secara adiabatik (Chen et al., 2010). Peneliti sebelum nya juga mengembangkan dengan versi yang lebih sederhana yaitu dari formalisme *fast forward* dalam kasus umum partikel bermuatan yang berada di medan elektromagnetik (Kiely et al., 2015).

Pada penelitian ini akan mengembangkan skema *fast forward* dalam dinamika kuantum adiabatik, dengan penelitian yang dilakukan meninjau spin tunggal. Dinamika spin yang bergerak pada keadaan awal ke arah *up* (Keatas) akan bergerak kearah *down* (Kebawah). Proses bergeraknya spin tunggal dari *up* ke *down* ini akan dipercepat dengan menambahkan medan magnet penggerak.

METODE FAST FORWARD PADA DINAMIKA KUANTUM ADIABATIK

Untuk tinjauan singkat kita akan membahas tentang teori dinamika kuantum adiabatik (Setiawan et al., 2017). Mari kita asumsikan keadaan adiabatik tergantung waktu persamaan schroodinger

$$\Psi_0\left(R(t)\right) = \mathrm{C(R)}e^{-\frac{i}{\hbar}\int_0^t E\,(R(t\prime))dt\prime}\, e^{i\xi(R(t\prime))} \quad (1)$$

dengan

$$R \equiv R(t) = R_0 + \epsilon t \quad (2)$$

Adalah parameter adiabatik dengan $\in \ll 1$. dan ξ adalah fase adiabatik. $\mathrm{C(R)}$adalah komponen spinor. Untuk memenuhi gerak adiabatik, kita harus mengatur Hamiltonian.

Hamiltonian sistem dapat di ubah (di regularisasi) menjadi :

$$H_0^{reg} = H_0 + \in \widetilde{\mathcal{H}}_n$$

Dengan $\widetilde{\mathcal{H}}$ merupakan suku tambahan dari Hamiltonian awal. Persamaan untuk mendapatkan $\widetilde{\mathcal{H}}$ ditulis sebagai,

$$\widetilde{\mathcal{H}}_n\mathrm{C(R)} = i\hbar\boldsymbol{\partial}_{\mathrm{R}}\mathrm{C(R)} - i\hbar\left(\mathrm{C}^\dagger\boldsymbol{\partial}_{\mathrm{R}}\mathrm{C}\right)\mathrm{C(R)} \quad (3)$$

yang merupakan persamaan inti dari metode ini (Setiawan et al., 2017). Di sini $\widetilde{\mathcal{H}}_n$ adalah suku Hamilton regularisasi yang bergantung pada tingkat energi ke-n.

Fast forward Hamiltonian untuk menjamin gerak adiabatik yang dipercepat. Persamaan untuk maju cepat Hamiltonian ditulis sebagai (Setiawan et al., 2017). Didapatkan melalui persamaan Schroodinger berikut.

$$\begin{aligned} i\hbar\frac{\partial\,\Psi_{FF}}{\partial t} &= \partial\left(v(t)\widetilde{\mathcal{H}}_n\left(R\big(\Lambda(t)\big)\right)\right. \\ &\qquad \left. +\ H_0\left(R\big(\Lambda(t)\big)\right)\right)\Psi_{FF} \\ &= H_{FF}\,\Psi_{FF} \end{aligned} \quad (4)$$

H_{FF} adalah *fast forward* Hamiltonian dan $\widetilde{\mathcal{H}}_n$ adalah suku regularisasi yang diperoleh dari persamaan (3) untuk menghasilkan skema *fast forward* dalam sistem spin.

METODE FAST FORWARD PADA SPIN TUNGGAL

Sebagai contoh sederhana, ditinjau dinamika adiabatik dari spin tunggal di medan magnet digerakkan secara adiabatik dari arah z ke $-z$ arah sementara besarnya tetap konstan. Medan magnet ini ditulis sebagai :

$$\mathbf{B} = B\begin{pmatrix}\sin\theta(t)\cos\varphi \\ \sin\theta(t)\sin\varphi \\ \cos\theta(t)\end{pmatrix}, \quad (5)$$

dengan,

$$\theta(t) = R(t) = \epsilon t \quad (6)$$

Dan $\varphi = \mathrm{Konstant}$,Hamiltonian pada sistem ini diberikan oleh

$$H\big(R(t)\big) = \frac{1}{2}\boldsymbol{\sigma}.\mathbf{B}$$

dengan $\boldsymbol{\sigma}$ merupakan matriks pauli,

$$\sigma_1 = \sigma_x = \begin{pmatrix}0 & 1\\ 1 & 0\end{pmatrix}$$

$$\sigma_2 = \sigma_y = \begin{pmatrix}0 & -i\\ i & 0\end{pmatrix}$$

$$\sigma_3 = \sigma_z = \begin{pmatrix}1 & 0\\ 0 & -1\end{pmatrix}$$

Sehingga

$$H\big(R(t)\big) = \frac{B}{2}\begin{pmatrix}\cos R(t) & \sin R(t)\, e^{-i\varphi} \\ \sin R(t)\, e^{i\varphi} & -\cos R(t)\end{pmatrix} \quad (7)$$

Nilai eigen dari matriks pada persamaan (7) adalah $\lambda_\pm = \pm\frac{B}{2}$, dan keadaan eigennya ditulis sebagai

$$\Psi_0^+ = \begin{pmatrix}\mathrm{C}_1^+ \\ \mathrm{C}_1^+\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}\cos\frac{R(t)}{2} \\ e^{i\varphi}\sin\frac{R(t)}{2}\end{pmatrix} \quad (8)$$

dan

$$\Psi_0^- = \begin{pmatrix} C_1^- \\ C_1^- \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e^{-i\varphi}\sin\frac{R(t)}{2} \\ -\cos\frac{R(t)}{2} \end{pmatrix}$$
(9)

Sekarang kita memilih salah satu keadaan Ψ_0^+ dengan λ_+, dan mempertimbangkan dinamika adiabatik. Dengan $\xi = 0$. Fungsi gelombang yang berevolusi secara adiabatik adalah :

$$\Psi_0(t) = \begin{pmatrix} \cos\frac{R(t)}{2} \\ e^{i\varphi}\sin\frac{R(t)}{2} \end{pmatrix} e^{-\frac{iB}{2\hbar}t}$$
(10)

Dengan meninjau $\widetilde{\mathcal{H}}_{ij}$ pada persamaan (3) adalah matriks $(\widetilde{\mathcal{H}}_{11} = \widetilde{\mathcal{H}}_{22})$ dan Hermitian $(\widetilde{\mathcal{H}}_{21}^* = \widetilde{\mathcal{H}}_{12})$, Persamaan (3) merupakan persamaan aljabar linier rank = 2 untuk dua variabel yang tidak diketahui $(\widetilde{\mathcal{H}}_{11} = \widetilde{\mathcal{H}}_{22})$. Kita dapat menyelesaikan Persamaan (3) untuk $\widetilde{\mathcal{H}}$ sebagai $\widetilde{\mathcal{H}}_{11} = 0$ dan $\widetilde{\mathcal{H}}_{12} = -\frac{\hbar}{2}(\sin\varphi + i\cos\varphi)$. Sehingga suku tambahan dari Hamiltonian dapat ditulis sebagai

$$\mathcal{H} = v(t)\widetilde{\mathcal{H}} = \begin{pmatrix} 0 & -v(t)\frac{\hbar}{2}(\sin\varphi + i\cos\varphi) \\ -v(t)\frac{\hbar}{2}(\sin\varphi - i\cos\varphi) & 0 \end{pmatrix} \quad (11)$$

Serta *fast forward* Hamiltonian dituliskan sebagai:

$$H_{FF} = \begin{pmatrix} \frac{B}{2}\cos R(\Lambda(t)) & \frac{B}{2}\sin R(\Lambda(t))e^{-i\varphi} - v(t)\frac{\hbar}{2}(\sin\varphi + i\cos\varphi) \\ \frac{B}{2}\sin R(\Lambda(t))e^{i\varphi} - v(t)\frac{\hbar}{2}(\sin\varphi - i\cos\varphi) & -\frac{B}{2}\cos R(\Lambda(t)) \end{pmatrix}$$
(12)

Fungsi gelombang *fast forward* ditulis sebagai:

$$\begin{pmatrix} \cos\frac{R(\Lambda(t))}{2} \\ e^{i\varphi}\sin\frac{R(\Lambda(t))}{2} \end{pmatrix} e^{-\frac{iB}{2\hbar}t} \quad (13)$$

Dari Persamaan (7) dan Persamaan (12), diperoleh medan magnet penggerak sebagai:

$$B_x^{FF} = B\sin\Big(R\big(\Lambda(t)\big)\Big)\cos\varphi - v(t)\hbar\sin(\varphi)$$

$$B_y^{FF} = B\sin\Big(R\big(\Lambda(t)\big)\Big)\sin\varphi - v(t)\hbar\cos(\varphi)$$

$$B_z^{FF} = B\cos\Big(R\big(\Lambda(t)\big)\Big) \quad (14)$$

dimana

$$\Lambda(t) = \int_0^t \alpha(t')\,dt'$$

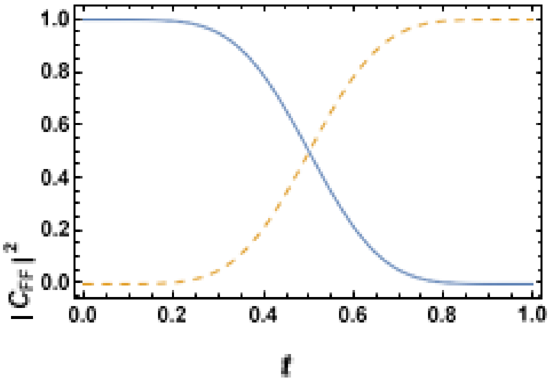
dan

$$\alpha(t) = \bar{\alpha} - (\bar{\alpha} - 1)\cos\left(\frac{2\pi}{T_{FF}}t\right)$$

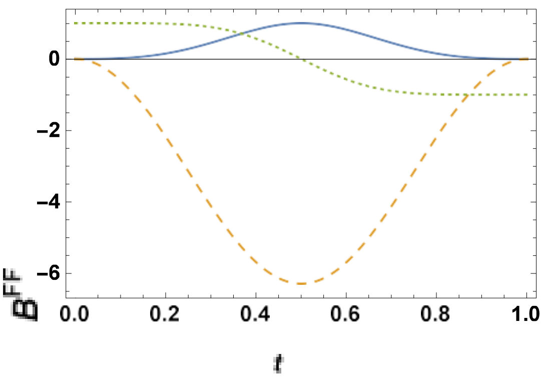
Pada konsep *fast forward*, arah medan magnet berubah menjadi arah yang berlawanan dalam waktu T_F. Kondisi awal ditetapkan sebagai

$$\Psi_{FF}(t = 0) = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (15)$$

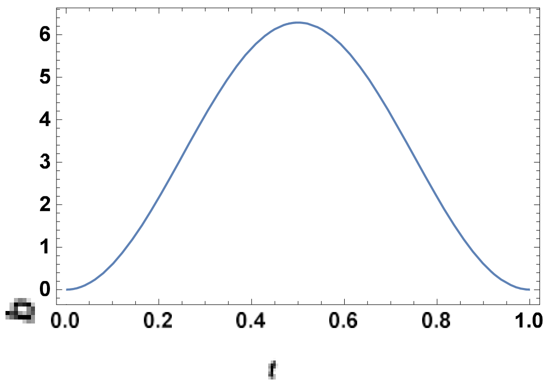
Arah spin digerakkan oleh medan magnet B_{FF} sehingga berubah ke arah $\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$ di keadaan akhir. dalam gambar 1, digambarkan dinamika keadaan spin : $\left|C_1^{FF(t)}\right|^2$ dan $\left|C_2^{FF(t)}\right|^2$. Parameter dipilih sebagai $\bar{v} = \pi, T_F = 1.0$, $\varphi = 0$, $R_0 = 0, R(T_F) = \pi$ dan $B = 1$.



Gambar 1. Ketergantungan waktu $\left|C_1^{FF}\right|^2$ (Garis lurus) dan $\left|C_2^{FF}\right|^2$ (Garis putus-putus)



(a)



(b)

Gambar 2. Putaran rotasi dengan $=0$. Parameternya sebagai $\bar{v}=\pi$, $T_F=1.0$, $\varphi=0.0$, $R_0=0.0$, $R(T_F)=\pi$ dan $=1$: (a) medan magnet total $B^{FF}=B_x^{FF}$ (Garis lurus), B_y^{FF} (Garis putus-putus), B_z^{FF} (Garis titik putus-putus) ; (b) pada medan magnet penggerak $b=(0,b_y,0)$.

Medan magnet bergerak dari arah z ke arah $-z$, $\bar{b}=v(t)\hbar(-\sin\varphi,-i\cos\varphi,0)$ adalah medan magnet tambahan untuk menjamin perubahan gerak adiabatik. Ini terkonfirmasi bahwa spin bergerak dari arah *up* (atas) ke arah *down* (bawah) pada saat posisi terakhir T_F. Keadaan spin menjadi stasioner setelah terjadi percepatan. Pada penelitian ini juga menegaskan ketelitian yang didapatkan (*fidelity*) antara $\Psi_{FF}(t)$ dan $\Psi_0(\Lambda(t))$ adalah satu.

SIMPULAN

Telah dilakukan penelitian dengan menggunakan metoda *fast forward* dan mengaplikasikannya pada sistem spin tunggal yang bertujuan mempercepat dinamika gerak spin. Pada penelitian ini telah didapatkan suku regularisasi Hamiltonian dan medan magnet penggerak yang dapat mempercepat waktu yang dibutuhkan untuk mengubah arah spin, dari arah ↑*up* $\binom{1}{0}$ pada keadaaan awal $(t=0)$ ke keadaan ↓*down* $\binom{0}{1}$ pada keadaan akhir. Dengan menambahkan suku tambahan Hamiltonian dan medan magnet penggerak, medan magnet ini disebut sebagai medan magnet penggerak menjamin spin tunggal dapat bergerak dari arah z ke $-z$ dalam waktu yang singkat dan bergerak secara adiabatik yaitu dengan tetap mempertahankan keadaan energi sistem yaitu pada keadaan dasar (*ground state*). Selama proses mempercepat berlangsung.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Program Studi Pendidikan Fisika Fakults Keguruan dan Ilmu Pendidikan (FKIP) Universitas Bengkulu yang telah memberikan izin kepada penulis untuk mengikuti kegiatan MBKM (Merdeka Belajar Kampus Merdeka) penelitian dimana artikel ini merupakan salah satu luarannya.

DAFTAR PUSTAKA

Alamos, L., & Alamos, L. (n.d.). *Shortcuts to adiabaticity by counter-diabatic driving*. 1–5.

Cabedo-Olaya, M., Muga, J. G., & Martínez-Garaot, S. (2020). Shortcut-to-adiabaticity-like techniques for parameter estimation in quantum metrology. *Entropy*, *22*(11), 1–13. https://doi.org/10.3390/e22111251

Chen, X., Ruschhaupt, A., Schmidt, S., Del Campo, A., Guéry-Odelin, D., & Muga, J. G. (2010). Fast optimal frictionless atom cooling in harmonic traps: Shortcut to adiabaticity. *Physical Review Letters*, *104*(6), 1–4. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.104.063002

Deffner, S. (2016). Shortcuts to adiabaticity: Suppression of pair production in driven Dirac dynamics. *New Journal of Physics*, *18*(1). https://doi.org/10.1088/1367-2630/18/1/012001

Del Campo, A., & Kim, K. (2019). Focus on Shortcuts to Adiabaticity. *New Journal of Physics*, *21*(5). https://doi.org/10.1088/1367-2630/ab1437

Hartmann, A., Mukherjee, V., Niedenzu, W., & Lechner, W. (2020). Many-body quantum heat engines with shortcuts to adiabaticity. *Physical Review Research*, *2*(2), 23145. https://doi.org/10.1103/physrevresearch.2.023145

Hegade, N. N., Paul, K., Ding, Y., Sanz, M., Albarrán-Arriagada, F., Solano, E., & Chen, X. (2021). Shortcuts to Adiabaticity in Digitized Adiabatic Quantum Computing. *Physical Review Applied*, *15*(2), 1–11. https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.15.024038

Iram, S., Dolson, E., Chiel, J., Pelesko, J., Krishnan, N., Güngör, Ö., Kuznets-Speck, B., Deffner, S., Ilker, E., Scott, J. G., & Hinczewski, M. (2021). Controlling the speed and trajectory of evolution with counterdiabatic driving. *Nature Physics*, *17*(1), 135–142. https://doi.org/10.1038/s41567-020-0989-3

Jarzynski, C. (2013). *Generating shortcuts to adiabaticity in quantum and classical dynamics*. 1–5.

Kiely, A., Mcguinness, J. P. L., Muga, J. G., & Ruschhaupt, A. (2015). *Fast and stable manipulation of a charged particle in a Penning trap*. *48*. https://doi.org/10.1088/0953-4075/48/7/075503

Masuda, S., & Nakamura, K. (2008). *Fast-forward problem in quantum mechanics*. 1–9. https://doi.org/10.1103/PhysRevA.78.062108

Masuda, S., & Nakamura, K. (2010). Fast-forward of adiabatic dynamics in quantum mechanics. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, *466*(2116), 1135–1154. https://doi.org/10.1098/rspa.2009.0446

Masuda, S., & Nakamura, K. (2011). *Acceleration of adiabatic quantum dynamics in electromagnetic fields*. *043434*, 1–11. https://doi.org/10.1103/PhysRevA.84.043434

Nakamura, K., Khujakulov, A., Avazbaev, S., & Masuda, S. (2017). *Fast forward of adiabatic control of tunneling states*. *062108*, 1–12. https://doi.org/10.1103/PhysRevA.95.062108

Palmero, M., Wang, S., Li, J., & Muga, J. G. (2016). *Shortcuts to adiabaticity for an ion in a rotating radially-tight trap Shortcuts to adiabaticity for an ion in a rotating radially-tight trap*.

Patra, A., & Jarzynski, C. (2021). Semiclassical fast-forward shortcuts to adiabaticity. *Physical Review Research*, *3*(1). https://doi.org/10.1103/physrevresearch.3.013087

Pedersen, J. K., Fedorov, D. V., Jensen, A. S., & Zinner, N. T. (2016). Quantum single-particle properties in a one-dimensional curved space. *Journal of Modern Optics*, *63*(18), 1814–1828. https://doi.org/10.1080/09500340.2015.1116634

Ruschhaupt, A., & Muga, J. G. (2014). Shortcuts to adiabaticity in two-level systems: Control and optimization. *Journal of Modern Optics*, *61*(10), 828–832. https://doi.org/10.1080/09500340.2013.846431

Setiawan, I., Eka Gunara, B., Masuda, S., & Nakamura, K. (2017). Fast forward of the adiabatic spin dynamics of entangled states. *Physical Review A*, *96*(5), 1–11. https://doi.org/10.1103/PhysRevA.96.052106

Setiawan, I., Gunara, B. E., & Nakamura, K. (2019). Fast forward of adiabatic spin dynamics : An application to quantum annealing model in triangle spin systems. *Journal of Physics: Conference Series*, *1245*(1). https://doi.org/10.1088/1742-6596/1245/1/012077

Setiawan, I., Kosasih, J. S., Gunara, B. E., & Nakamura, K. (2019). *PROSIDING SNIPS 2017 Dinamika Kuantum Adiabatik Dipercepat Pada Sistem 2 Spin*. *November*.

Takahashi, K. (2014). Fast-forward scaling in a finite-dimensional Hilbert space. *Physical Review A - Atomic, Molecular, and Optical Physics*, *89*(4), 1–7. https://doi.org/10.1103/PhysRevA.89.042113

Takahashi, K. (2019). Hamiltonian engineering for adiabatic quantum computation: Lessons from shortcuts to adiabaticity. *Journal of the Physical Society of Japan*, *88*(6). https://doi.org/10.7566/JPSJ.88.061002

Taras, A. K., Tuniz, A., Bajwa, M. A., Ng, V., Dawes, J. M., Poulton, C. G., & De Sterke, C. M. (2021). Shortcuts to adiabaticity in waveguide couplers–theory and implementation. *Advances in Physics: X*, *6*(1). https://doi.org/10.1080/23746149.2021.1894978

Torrontegui, E, Mart, S., Ruschhaupt, A., & Muga, J. G. (2012). *Shortcuts to adiabaticity : Fast-forward approach*. *013601*, 1–6. https://doi.org/10.1103/PhysRevA.86.013601

Torrontegui, Erik, Ibáñez, S., Martínez-Garaot, S., Modugno, M., del Campo, A., Guéry-Odelin, D., Ruschhaupt, A., Chen, X., & Muga, J. G. (2013). Shortcuts to Adiabaticity. *Advances in Atomic, Molecular and Optical Physics*, *62*(September), 117–169. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-408090-4.00002-5

Traps, I., Semimetals, W., & Roychowdhury, A. (2021). *Time-Rescaling of Dirac Dynamics : Shortcuts to Adiabaticity in*. 1–13.

Vinjanampathy, S., & Anders, J. (2016). Quantum thermodynamics. *Contemporary Physics*, *57*(4), 545–579. https://doi.org/10.1080/00107514.2016.1201896

Wang, Z., Xia, Y., Chen, Y. H., & Song, J. (2016). Fast CNOT gate via shortcuts to adiabatic passage. *Journal of Modern Optics*, *63*(19), 1943–1951. https://doi.org/10.1080/09500340.2016.1181219

Yahalom, A. (2018). The fluid dynamics of spin. *Molecular Physics*, *116*(19–20), 2698–2708. https://doi.org/10.1080/00268976.2018.1457808