

Kecelaruan yang Teratur

Syarahan Perdana
Universiti Kebangsaan Malaysia
1998/99

Sharifah Barlian Aidid. 1998. *Kesan Unsur-unsur Surih Toksik kepada Tumbuhan*. ISBN 967-942-396-4

Alias Kamis. 1998. *Peranan Hormon Perumah dalam Jangkitan Parasit*. ISBN 967-942-410-3

Abu Bakar Nordin. 1998. *Peningkatan Pencapaian dalam Penjanaan Bakat*. ISBN 967-942-417-0

Osman Ali. 1998. *Peralihan Kesihatan: Perkembangan dan Iktibar*. ISBN 967-942-420-0

Kasmini Kassim. 1998. *Penderaan Emosi Kanak-kanak Trauma Terselindung*. ISBN 967-942-423-5

Abdul Salam Babji. 1998. *Sains Daging Terproses*. ISBN 967-942-427-8

Abdul Shukor Husin. 1998. *Ahli Sunnah Waljamaah: Pemahaman Semula*. ISBN 967-942-430-8

Tamby Subahan Mohd. Meerah. 1999. *Dampak Penyelidikan Pembelajaran Sains terhadap Perubahan Kurikulum*. ISBN 967-942-442-1

Lim Swee Cheng. 1999. *Kecelaruhan yang Teratur Beberapa Aspek Ketertiban dalam Sistem Stokastik*. ISBN 967-942-450-2

Kecelaruhan yang Teratur
Beberapa Aspek Ketertiban
dalam Sistem Stokastik

Lim Swee Cheng



Dipresentasikan sebagai Syarahan Perdana jawatan Profesor
Universiti Kebangsaan Malaysia, pada 4 November 1999
di Bilik Jumaah Universiti Kebangsaan Malaysia

PENERBIT UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA
BANGI • 1999

Cetakan Pertama / *First Printing*, 1999
Hak cipta / *Copyright* Universiti Kebangsaan Malaysia, 1999

Hak cipta terpelihara. Tiada bahagian daripada terbitan ini boleh diterbitkan semula, disimpan untuk pengeluaran atau ditukarkan ke dalam sebarang bentuk atau dengan sebarang alat juga pun, sama ada dengan cara elektronik, gambar serta rakaman dan sebagainya tanpa kebenaran bertulis daripada Penerbit UKM terlebih dahulu.

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical including photocopy, recording, or any information storage and retrieval system, without permission in writing from the Penerbit UKM.

Diterbitkan di Malaysia oleh / *Published in Malaysia by*
PENERBIT UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA
43600 UKM Bangi, Selangor D.E. Malaysia

Penerbit UKM adalah anggota / *is a member of the*
PERSATUAN PENERBIT BUKU MALAYSIA /
MALAYSIAN BOOK PUBLISHERS ASSOCIATION
No. Ahli / *Membership No.* 8302

Dicetak di Malaysia oleh / *Printed in Malaysia by*
Pusat Teknologi Pendidikan,
Universiti Kebangsaan Malaysia,
43600 Bangi, Selangor D.E.

Perpustakaan Negara Malaysia Data-Pengkatalogan-dalam-Penerbitan
Cataloguing-in-Publication-Data

Lim Swee Cheng
Kecelaruhan yang teratur/Lim Swee Cheng
Bibliografi: p
1. Quantum chaos 2. Chaotic behavior in systems
B. Judul.
503.12

ISBN 967-942-450-2

Abstrak

Ahli sains biasanya menganggap peristiwa/proses fluktuasi yang bersifat tidak teratur dan tidak dapat diramalkan sebagai hingar rawak, maka kaedah statistik kebarangkalian telah digunakan untuk menerangkannya. Banyak fenomenon yang tidak teratur dan kelihatan rawak telah dapat diterangkan dengan menggunakan persamaan berketentuan sahaja. Teori kalut berketentuan menunjukkan wujudnya perhubungan yang tidak ketara antara kerawakan dengan ketertiban dan keteraturan, kekompleksan dengan kesederhanaan, ketidakboleh-ramalan dengan penentuan. Pendek kata, teori kekalutan boleh dianggap sebagai satu kajian mengenai 'kecelaruan yang teratur' – teratur kerana sistemnya berketentuan, manakala yang bercelaru itu kerana hasil akhirnya tidak dapat diramalkan.

Sebaliknya kerawakan intrinsik yang mencirikan pelbagai hingar dalam alam semula jadi berbeza daripada fluktuasi dalam sistem kekalutan, terutama sekali puncanya. Pada amnya, hingar mematuhi persamaan pembeza stokastik yang kompleks, berbanding dengan persamaan pembeza berketentuan bagi kekalutan. Namun demikian, huraian tentang kedua-dua jenis fenomenon memerlukan sejenis geometri baru yang membenarkan dimensi bernilai pecahan dan geometri ini dikenali sebagai geometri pecacai (fraktal). Sekarang, teori kekalutan, hingar dan pecacai telah digunakan dalam hampir setiap cabang sains, termasuk kejuruteraan, perubatan, sains fizis, ekonomi dan sains sosial.

Fenomenon berfluktuasi juga wujud dalam dunia mikroskopik seperti atom dan zarah keunsuran. Penggabungan teori kekalutan ke dalam teori kuantum yang dipatuhi oleh objek mikroskopik merupakan satu cabaran kepada ahli fizik. Masalah utama ialah persamaan asas bagi mekanik kuantum – persamaan Schrödinger, adalah persamaan linear, tetapi kelakuan kalut hanya wujud dalam sistem yang bukan linear. Fluktuasi rawak sebagai hingar

latar belakang tersebar luas dalam dunia mikroskopik, terutamanya dalam vakum. Fluktuasi sebagai ciri hakiki vakum telah mengakibatkan beberapa kesan kuantum. Ia juga menjadi asas kepada satu formulasi alternatif bagi mekanik kuantum yang dikenali sebagai mekanik stokastik. Kaedah pengkuantuman baru untuk beberapa medan kuantum boleh diperolehi berdasarkan prinsip asas mekanik stokastik.

Abstract

Scientists used to regard random events and fluctuations in nature which are irregular and unpredictable as noise; and statistical/probabilistic methods are used to describe them. Many complex and irregular phenomena can actually be described by deterministic equations. The theory of deterministic chaos shows that there exists a subtle relation between randomness with orderliness and regularity, complexity with simplicity, unpredictability with determinism. Deterministic chaos can be regarded as a study of “orderly disorder” – orderliness because the system is deterministic; disorderliness because the final results are unpredictable.

On the other hand, the intrinsic randomness which characterizes various types of noises in nature are different from the fluctuations in chaotic systems. In general, noise satisfies complex stochastic differential equation, in contrast to the deterministic differential equation for chaos. Despite this, the description of both noise and chaos requires a new kind of geometry called fractal geometry which allows fractional dimension. Chaos, noise and fractal have now penetrated virtually every branch of the sciences, including engineering, medicine, physical and life sciences, economics and social sciences.

Fluctuating phenomena also exist in the microscopic world of atoms and elementary particles. The incorporation of chaos theory into quantum theory poses a challenge to physicists due to the fact that chaotic behaviour only exists in nonlinear system, whereas the basic equation of quantum theory – the Schrödinger equation, is a linear equation. Random fluctuations in terms of background noise are prevalent in the microscopic world, in particular fluctuations exist in vacuum. Such inherent vacuum fluctuations are responsible for several quantum effects. They also provide the basis to an alternative formulation of quantum

mechanics which is known as stochastic mechanics. New ways of quantizing various quantum fields can now be obtained based on the basic principle of stochastic mechanics.

*Para Ahli Majlis Universiti,
Para Ahli Senat Universiti,
Para Profesor,
Para Profesor Madya,
Para Pensyarah, Para Mahasiswa,
Para Tetamu Undangan,
dan hadirin yang dihormati sekalian,*

Pengenalan

Sejak zaman dahulu, manusia mendapati banyak perkara dalam alam semula jadi bukan sahaja tidak teratur dan dalam keadaan berfluktuasi, tetapi juga fenomenon itu banyak yang tidak dapat diramal. Tetapi, dalam kebanyakan kasus, setelah dilakukan pemerhatian generasi demi generasi, manusia mula memperolehi idea tentang ramalan ke atas beberapa fenomenon alam, antaranya hari suria, bulan qamari, tahun suria, air pasang dan air surut yang berlaku secara teratur atau ikut ketetapanya sendiri. Berdasarkan apa yang dipelajari, manusia menyedari kebanyakan fenomenon alam semula jadi memang mematuhi peraturan tertentu, malah mempunyai struktur yang teratur. Kesemua ini boleh juga diperolehi daripada pemerhatian dan eksperimen secara saintifik.

Pada awal abad ke-19, hukum mekanik klasik Newton yang berketentuan telah mendorong ahli sains Perancis Pierre Simon de Laplace, menyatakan bahawa masa hadapan alam semesta fisis ini pada prinsipnya boleh diramalkan sepenuhnya secara

mekanistik. Laplace menambah bahawa sekiranya boleh diketahui kedudukan dan halaju semua zarah dalam alam semesta, maka bolehlah diramalkan dengan tepat apa yang akan berlaku di alam ini pada masa hadapan. Namun, ketidakmampuan untuk berbuat demikian adalah disebabkan kelemahan atau keterbatasan pengetahuan kita bukan sahaja untuk memahami keadaan semasa bagi semua zarah yang ada di alam ini, tetapi juga untuk melakukan suatu pengiraan yang sebegitu besar.

Sehubungan itu, ingin disebut bahawa sebelum adanya komputer, kaedah statistik telah digunakan untuk menghitung pergerakan zarah-zarah dalam bilangan yang besar, seperti suatu sistem molekul gas. Pendekatan ini telah melahirkan bidang kajian yang dikenali sebagai fizik statistik. Sekalipun teknik statistik telah digunakan untuk melakukan pengiraan tentang dinamik molekul, kita masih beranggapan sistem fizis itu berketentuan sekiranya hukum evolusi dalam masa perubahan keadaan suatu sistem diketahui. Ahli sains ketika itu juga menganggap bahawa masalah mengenai dinamik molekul dapat diselesaikan dengan sepenuhnya dengan mesin pengiraan (komputer belum dicipta lagi) yang berkapasiti besar dalam suatu masa yang terhingga, walaupun penyelesaian itu kompleks.

Abad kedua puluh menyaksikan kejatuhan pandangan Laplace dengan penemuan dua teori baru, iaitu teori kuantum dan teori kekalutan. Teori kuantum yang bermula pada awal abad ke-20 adalah teori yang menggantikan mekanik klasik untuk menghuraikan alam mikroskopik seperti atom, elektron dan zarah-zarah keunsuran yang lain. Persamaan Newton telah digantikan dengan persamaan Schrödinger, sementara konsep kebarangkalian menjadi ciri asas dalam tafsiran fungsi gelombang (penyelesaian persamaan Schrödinger), walaupun persamaan Schrödinger itu masih tetap bersifat berketentuan. Punca kerawakan teori kuantum datang daripada kemustahilan melaksanakan dengan tepat ukuran serentak tentang kedudukan dan halaju sesuatu zarah mikroskopik. Ciri asas ini dinamakan prinsip ketakpastian Heisenberg adalah sifat intrinsik dalam dunia mikroskopik.

Punca kejatuhan pandangan Laplace juga datang daripada fizik klasik sendiri – penemuan teori kalut yang mengatakan bahawa kewujudan had yang tidak dapat disingkirkan dalam ramalan masa depan bagi sesuatu sistem yang memenuhi persamaan gerakan bukan linear. Sistem tidak linear yang berkelakuan kekalutan itu bergantung secara peka pada syarat awalnya, sehinggakan ketidaktepatan yang kecil dalam syarat tersebut akan mengakibatkan ralat yang besar dalam ramalan keadaan masa depan sistem itu. Ini boleh dianggap sebagai prinsip ketakpastian untuk dunia makroskopik.

Penulisan ini bertujuan memberi gambaran keseluruhan tentang beberapa pendekatan yang telah digunakan oleh ahli sains dalam mengkaji fenomenon alam semula jadi yang rawak dan yang tidak teratur. Tujuan utama berbuat demikian ialah untuk menunjukkan wujudnya ciri-ciri yang tetap dan teratur dalam kebanyakan fenomenon dan peristiwa yang kelihatan terjadi dengan rawak dan tidak teratur.

Kekalutan

Istilah “chaos” (kekalutan) telah digunakan untuk kali pertama dalam sebuah makalah saintifik pada 1975 (Li & Yorke 1975). Takrif saintifik bagi kekalutan ialah kelakuan stokastik atau rawak yang berlaku di dalam suatu sistem berketentuan. Konsep kekalutan bermula dengan kajian Henri Poincaré mengenai kestabilan sistem suria pada akhir abad ke-19. Daripada kajian itu, beliau mendapati pergerakan tiga atau lebih jasad di bawah pengaruh daya graviti merupakan satu masalah yang amat kompleks. Persamaan gerakan sistem itu tidak mempunyai penyelesaian yang mudah dan satu ralat kecil dalam keadaan awal akan menghasilkan satu ralat yang sangat besar pada keadaan akhir. Walaupun konsep kekalutan telah disisihkan oleh ahli sains setengah abad yang pertama kurun ini, tetapi kaedah

geometri dan topologi Poincare telah diperkembangkan oleh A.N. Kolmogorov, V.I. Arnold, S. Smale dan J. Moser dalam usaha masing-masing untuk menghasilkan pemahaman dengan lebih mendalam tentang mekanik klasik.

Kajian ke arah itu dipertingkatkan lagi dengan penciptaan komputer yang mempunyai kapasiti pemprosesan laju pada 1960-an yang membolehkan ahli sains menjalankan eksperimen berangka dan simulasi persamaan. Eksperimen dengan bantuan komputer menghasilkan penemuan penting dibuat oleh E. Lorenz (1963) ke atas kelakuan kalut dalam pola cuaca pada 1963. Hasil yang diperolehi untuk persamaan modelnya tidak mencapai keadaan keseimbangan atau keadaan berkala. Sebaliknya hasil itu terus berayun secara tidak teratur, juga tidak berkala. Selain itu, sekiranya simulasi tersebut dimulakan dengan dua syarat awal yang berbeza sedikit, akhirnya kelakuan atau sifat-sifat yang akan dihasilkan itu akan berbeza sama sekali.

Implikasi daripada kajian itu ialah sistem alam semula jadi tersebut (iaitu atmosfera) tidak dapat diramalkan, kerana ralat yang kecil dalam pengukuran keadaan atmosfera semasa akan membesar dengan cepat sehingga menghasilkan ramalan yang salah pada akhirnya. Disebabkan syarat awal alam tidak dapat diketahui dengan tepat, hanya dengan ketepatan yang terhad, maka ramalan mestilah meleset untuk sebarang sistem tak linear yang berciri kekalutan untuk jangka masa panjang. Kepekaan bagi suatu sistem tak linear terhadap syarat-syarat awal itu telah dikenali sebagai “Kesan Rama-Rama” (butterfly effect).

Kriteria kuantitatif untuk kalut adalah seperti berikut. Pertimbangan sistem dinamik dengan evolusi masanya diberikan oleh satu persamaan pembeza berketentuan. Sebelum penemuan kekalutan, penyelesaian persamaan evolusi masa akan menghasilkan ramalan yang tidak terhingga, jika keadaan awal itu diketahui katakan $x(0)$. Menurut teori kalut, jika ralat bagi keadaan awal ialah $Dx(0)$, dan ralat bersepadannya pada masa t ialah $Dx(t) \sim Dx(0)e^{lt}$, maka sistem itu merupakan kalut jika $l > 0$, dan l dikenali sebagai eksponen Lyapunov. Ini bermakna sistem itu

bergantung secara sensitif pada syarat awal, jika perubahan dalam keadaan awal nilainya bertambah secara eksponen dengan t . Kemampuan meramal sistem kalut dihadkan kepada beberapa kali nilai $1/1$ sahaja. Misalnya kemampuan untuk meramal dalam sistem suria yang mematuhi persamaan gerakan Newton ialah beberapa juta tahun, tetapi hanya beberapa hari sahaja untuk meteorologi.

Kesemestaan: Ketertiban daripada Kekalutan

Salah satu hasil yang mengejutkan dalam teori kekalutan adalah penemuan ketertiban dan keringkasan yang bercorak sejagat yang tersembunyi dalam kelakuan yang tidak teratur dan rawak bagi suatu sistem dinamik yang kalut. Perbincangan selanjutnya menumpu perhatian kepada dua ciri semesta kalut, laluan kepada kekalutan dan geometri kalut.

Laluan Penggandaan kalaan kepada Kekalutan

Sepanjang tahun 1960-an, ahli ekologi matematik Robert May (1976) telah menjalankan satu atur cara berangka untuk mengkaji kelakuan suatu model populasi tahunan yang ringkas, berdasarkan persamaan perbezaan lojistik berikut:

$$x' = rx(1-x)$$

Di sini x ialah penduduk semasa, r mewakili parameter kadar pertumbuhan, dan x' pula penduduk untuk tahun hadapan. Persamaan ini asalnya digunakan sebagai model pertumbuhan penduduk berasaskan persaingan antara pembiakan diri dengan penyekatan.

Hasil kajian May itu boleh diterangkan dengan menggunakan rajah dwicabangan (Rajah 1) yang menghimpunkan semua maklumat penting dalam satu rajah.

1. Untuk nilai parameter r yang rendah, $0 < r < 1$, penduduk menjadi sifar atau pupus untuk jangka masa yang panjang.

2. Untuk $1 < r < 3$, paras atau nilai keseimbangan (keadaan mantap) turut meningkat dengan bertambahnya nilai parameter.
3. Apabila nilai r mencapai 3 (titik genting yang pertama), nilai mantap (iaitu garisan) akan membelah menjadi dua cabang seperti serampang peladang. Pembelahan ini merupakan suatu penduduk berubah dari kitaran satu-tahun ke kitaran dua-tahun. Penduduk mula berayun di antara dua nilai yang berbeza dalam tahun-tahun alternatif (kalaan-dua).
4. Proses pembelahan atau pendwicabangan berlaku semakin cepat apabila nilai r bertambah lagi, menghasilkan kalaan-empat, kalaan-lapan, kalaan-enam belas, dan seterusnya – pendwicabangan penggandaankalaan, menghasilkan lata penggandaankalaan;
5. Bagi parameter r melebihi $r = 3.569946$ keberkalaan digantikan oleh kekalutan. Di sini penggandaan kalaan menjadi tidak terhingga dan suatu keadaan yang diterima sebagai kawasan kalut telah tercapai.

Dalam sistem tersebut, kekalutan yang berlaku adalah hasil daripada banyak penggandaankalaan yang berturut-turut dalam corak penduduk yang berkitar. Dengan adanya sifat-sifat tersebut, maka peralihan kepada kalut ini dikatakan sebagai laluan penggandaankalaan kepada kekalutan.

Kesemestaan: Keteraturan daripada Kekalutan

Salah satu hasil yang mengejutkan dalam teori kekalutan adalah penemuan keteraturan dan keringkasan yang baru dalam kelakuan yang tidak teratur bagi suatu sistem dinamik yang kalut. Keteraturan yang pertama yang tidak diduga itu telah ditemui oleh Mitchell Feigenbaum (1978). Pada 1975, beliau melakukan eksperimen berangka untuk memahami persamaan pembezaan lojistik seperti yang dibincangkan di atas, setelah menumpukan perhatian pada kawasan sempadan di antara yang teratur dengan yang kalut. Peralihan ke kalut dalam kawasan ini adalah satu laluan penggandaan kalaan, iaitu pembelahan dua-kitaran kepada empat-kitaran, empat-kitaran kepada lapan-kitaran dan seterusnya. Beliau menemui kewujudan satu ketetapan yang tidak dijangka dalam sistem tersebut: penggandaan kalaan bukan hanya berlaku dengan lebih cepat, malah penggandaan itu berlaku semakin cepat dalam satu kadar yang malar – kadar ini menumpu secara geometri. Ini bermakna nilai antara r yang berturut-turut yang berlakunya dwicabangan adalah satu siri geometri dengan sebutan berturut-turut ini dibahagi oleh satu pemalar $d = 4.669$ (ketepatan paling baik yang boleh diperolehi dengan kalkulator tangan). Hasil ini memberi idea kepada beliau untuk mengatakan selanjutnya bahawa terdapat penskalaan dalam persamaan, iaitu wujud sesuatu dalam persamaan itu akan berulang dengan sendiri pada skala-skala yang berlainan di tempat-tempat yang berlainan, maka terdapatlah satu corak penskalaan. Beliau mendapati

penskalaan itu penting kerana beberapa sifat daripadanya itu telah diabadikan, walaupun semua benda yang lain dalam sistem itu telah berubah.

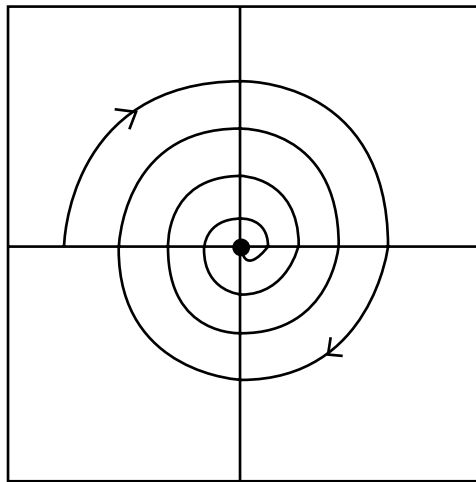
Sementara itu, Feigenbaum telah mengulangi pengiraan tersebut dengan menggunakan persamaan yang lain (sebagai contoh: $x' = r \sin px$). Pertukaran persamaan itu hanya akan sedikit sebanyak mengherotkan gambar dwicabangan. Tambahan kepada sifat kesemestaan corak kualitatif untuk peralihan kepada kalut melalui penggandaan kalaan, Feigenbaum telah mengemukakan satu lagi manifestasi kuantitatif bagi kesemestaan dalam teori kalut. Beliau mendapati bahawa nilai nisbah bagi penumpuan geometri d dalam penggandaan kalaan itu juga adalah semesta. Ia adalah satu nombor pemalar yang tak bersandar kepada model penduduk atau persamaan penduduk. Akhirnya Feigenbaum telah memperolehi teori kesemestaan dalam kekalutan berdasarkan idea kumpulan penormalan semula yang telah dicipta oleh Kenneth Wilson untuk fizik statistik (Wilson 1983). Ini juga ditahkikkan dalam eksperimen yang melibatkan perolakan bendalir, litar diod dan transistor, simpangan Josephon, tindakan balas kimia yang berayun dan sebagainya.

Berikutan hasil daripada penemuan Feigenbaum tersebut, terdapat banyak lagi 'senario' lain untuk memulakan kekalutan (misalnya pola keselaan dan kuasi-keberkalaan). Setiap satu laluan atau peralihan ke kekalutan ini bersifat semesta, memandangkan sistem yang berbeza akan mempamerkan corak yang sama (Cvitanovic 1989).

Geometri untuk Kekalutan: Penarik Aneh

Huraian tentang kekalutan biasanya dilakukan dalam ruang fasa. Bagi sistem dinamik mekanik, suatu titik di dalam ruang fasa

(ruang kedudukan dan momentum) akan mengandungi maklumat tentang kedudukan dan halaju. Sekiranya sistem itu berubah terhadap masa secara berterusan, titik-titik yang dilalui akan menghasilkan suatu trajektori atau orbit bagi sistem tersebut. Trajektori dalam ruang fasa bagi gerakan bandul misalnya adalah lingkaran-lingkaran yang menumpu ke arah dalam kepada satu titik (Rajah 2). Titik itu mewakili suatu keadaan mantap, iaitu keadaan tetap setelah bandul itu berhenti. Kita menamakan titik mantap itu penarik, yang akan menarik kesemua titik fana (atau titik tidak kekal) yang berada di persekitarannya apabila masa berubah.

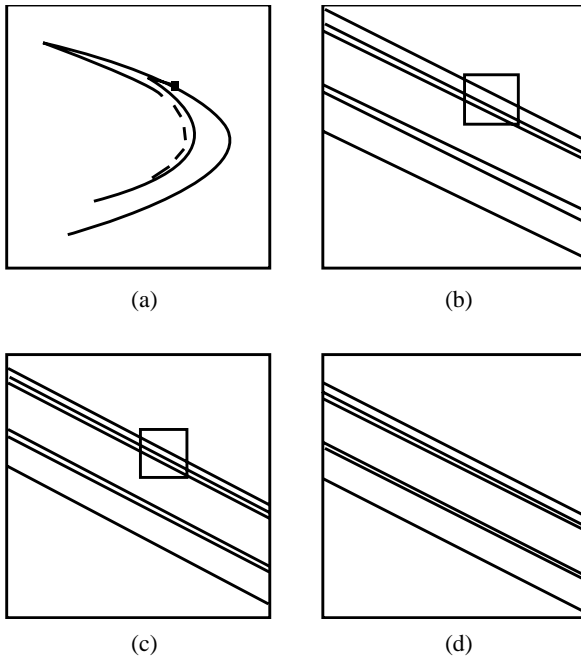


RAJAH 2 Penarik bagi satu bandul yang kehilangan tenaganya secara tetap disebabkan geseran, trakjetori itu berpilin ke dalam dan mencapai satu titik yang mewakili satu keadaan pegun

Dalam jangka masa yang pendek, sebarang titik yang terdapat di dalam ruang fasa boleh menggambarkan suatu kelakuan yang mungkin bagi suatu sistem dinamik. Tetapi dalam jangka masa yang panjang, kelakuan itu (dinamai kelakuan asimptot) mungkin hanya boleh diuraikan penarik-penarik sendiri. Penarik itu mungkin satu titik (seperti di dalam contoh bandul) atau beberapa

titik, atau satu garis atau satu kawasan yang berada di dalam ruang fasa. Penggambaran dinamik kekalutan sebagai geometri dalam ruang fasa juga dinamakan potret fasa. Untuk sistem kekalutan, istilah penarik aneh atau penarik kekalutan yang pertama kali diperkenalkan oleh David Ruelle (Ruelle & Takens 1971) ialah semua keadaan akhir yang mungkin ada dalam sistem kekalutan itu. Di sini kita tidak dapat meramal dengan tepat keadaan tertentu bila sistem itu akan berakhir, tetapi keadaan itu semestinya adalah salah satu keadaan di dalam penarik khusus yang dinamai penarik aneh.

Ciri lain tentang potret fasa kekalutan yang perlu ditegaskan ialah geometri bagi penarik anehnya itu tidak dapat digambarkan dengan geometri biasa (geometri Euklid). Untuk berbuat demikian geometri baru dibina yang dinamakan geometri fraktal atau geometri pecacai diperlukan (perbincangan tentangnya akan diberi dalam bahagiannya nanti). Sifat asas yang mengakibatkan penarik aneh menjadi satu objek pecacai (fraktal) ialah *keswaserupaan*. Secara kasar suatu objek dikatakan swaserupa jika bahagian-bahagiannya yang lebih kecil itu serupa dengan keseluruhan objek itu dari segi kualitatif. Contohnya ialah penarik aneh yang didapati oleh M. Hénon (1976) dengan menggunakan peta kuadratik lesapan. Rajah 3 menunjukkan penarik aneh dari peta Henon. Jika diperbesarkan trajektori sepanjang penarik itu dalam kotak pertama (Rajah 3(a)) hasilnya diberi oleh Rajah 3(b); pembesaran dilakukan sekali lagi bagi kotak kedua dalam Rajah 3(b) dan hasilnya ialah Rajah 3(c); pembesaran seterusnya akan memberi trajektori seperti dalam Rajah 3(d); dan hasil yang serupa akan diperolehi jika proses pembesaran ini diteruskan. Dalam darjah pembesaran bertambah itu, terdapat keserupaan untuk trajektori-trajektori yang diperbesarkan secara berturutan. Penarik kekalutan itu jelas bersifat swaserupa dan sifat itu merupakan satu lagi ciri semesta kelakuan kalut.



RAJAH 3 Penarik Henon, satu contoh penarik kekalutan (penarik aneh) yang menunjukkan sifat keswaserupaan yang dilakukan secara berterusan

Kesemestaan merupakan suatu sifat yang penting kerana dengan kewujudannya pelbagai sistem kalut yang berbeza-beza dapat dicirikan oleh satu sifat yang sepunya. Untuk kesemestaan Feigenbaum, sifatnya bukan hanya kualitatif, tetapi juga mempunyai aspek kuantitatif.

Pecacai

Geometri yang kita pelajari di sekolah adalah geometri Euklid yang hanya sesuai untuk menggambarkan bentuk ringkas seperti segitiga, bulatan, kon, poligon dan sebagainya. Namun, sebahagian besar objek dalam alam semula jadi mempunyai

bentuk yang jauh lebih kompleks. Sungai, pokok, gunung dan awan antara yang lain adalah jauh lebih rumit untuk diterangkan melalui geometri Euklid. Sehubungan itu, sejenis geometri baru telah dibina dan dinamai geometri pecacai (daripada pecahan dan kecaian). Geometri ini bukan hanya sesuai untuk menggambarkan objek yang berbentuk tidak sekata, seperti gunung dan awan, malah juga merupakan geometri untuk potret ruang fasa bagi sistem kalut. Di sini ingin ditegaskan bahawa geometri pecacai pada mulanya telah diperkembangkan untuk memahami geometri objek yang tak sekata dan statik, tetapi kemudian digunakan untuk sistem dinamik yang kalut dan rawak.

Istilah fraktal (fractal) yang dicipta oleh Benoit Mandelbrot (1982) pada 1970-an, bermodelkan kata sifat 'fractus' dalam bahasa Latin (yang menerbitkan 'fraction' dalam bahasa itu). Pada dasarnya ia mempunyai hubungan dengan pecahan dan serpihan, dengan makna 'tidak sekata/teratur atau berkecai'. Namun demikian, adalah susah untuk memberi takrifan dengan tepat dan umum bagi suatu objek fraktal. Oleh itu, takrif yang diperkatakan ini telah diterima sebagai sifat asas tentang fraktal, iaitu keswaserupaan: seluruh objek itu terdiri daripada bahagian yang serupa dengannya. Dengan kata lain, keswaserupaan adalah suatu sifat yang kelihatan serupa di bawah pembesaran yang berulang-ulang (Rajah 3).

Menurut geometri Euklid, dimensi untuk satu titik, garis, satah dan kubus masing-masing mempunyai nilai 0, 1, 2 dan 3. Dimensi satu objek pecacai berbeza dari objek Euklid kerana nilainya bukan integer, tetapi nombor pecahan. Sebagai contoh, dimensi lengkung yang bercerancang seperti garis pantai mengambil nilai antara 1 (nilai dimensi untuk garis lurus) dengan 2 (nilai dimensi bagi satu satah), bergantung pada darjah bengkang-bengkok garis pantai itu. Nilai dimensi pecahan ini akan bertambah dan menghampiri 2 jika tingkat bengkang-bengkok itu semakin membesar. Jadi, dimensi pecacai merupakan suatu sifat objek mengisi ruang seperti dimensi Euklid. Dimensi

pecacai yang lazim diterima dalam matematik ialah dimensi Hausdorff, tetapi dimensi ini tidak sesuai dari segi perhitungan nilainya. Bagi tujuan praktik, dimensi kotak biasanya digunakan sebagai dimensi pecacai kerana nilainya lebih mudah diperolehi dengan komputer.

Kajian menghitung dimensi pecacai untuk pelbagai bentuk bumi di Malaysia telah dilakukan dengan menggunakan kaedah dimensi kotak. Perhitungan tentang dimensi pecacai bagi beberapa pinggir pantai pulau, profil gunung dan rangkaian sungai di Malaysia telah dilakukan oleh seorang pelajar dalam projek tahun akhir (Lim Thong Leng 1994). Hasilnya adalah seperti berikut:

Pulau Tioman	:	$D = 1.10 \pm 0.01$
Pulau Pinang	:	$D = 1.11 \pm 0.02$
Pulau Langkawi	:	$D = 1.20 \pm 0.03$
Gunung Grik	:	$D = 1.17 \pm 0.30$
Gunung Lenggong	:	$D = 1.26 \pm 0.18$
Gunung Tahan	:	$D = 1.52 \pm 0.22$

Hasil itu konsisten dengan tahap ketaksekataan untuk ketiga-tiga pulau dan gunung, dengan Pulau Langkawi yang paling bercerancang dan profil Gunung Tahan yang paling tidak sekata.

Dimensi pecacai untuk rangkaian beberapa sungai dan jalan raya bagi Kuala Lumpur (1973 & 1993) dan Johor Bharu (1979 & 1986) dikaji oleh Lim Chee Hock (1999). Hasilnya adalah seperti yang berikut:

Sungai

Sungai Rajang	$D = 1.60 \pm 0.14$
Sungai Perak	$D = 1.57 \pm 0.15$
Sungan Kelantan	$D = 1.56 \pm 0.15$
Sungai Pahang	$D = 1.57 \pm 0.16$

Jalan Raya

Kuala Lumpur (1973)	$D = 1.54 \pm 0.16$
Kuala Lumpur (1993)	$D = 1.69 \pm 0.15$

Johor Bharu (1979) $D = 1.59 \pm 0.12$

Johor Bharu (1986) $D = 1.67 \pm 0.13$

Kepopularan dan minat orang ramai terhadap pecacai disebabkan teknologi komputer boleh digunakan untuk melakukan simulasi gunung-ganang pecacai, pokok-pokok pecacai dan pelbagai pemetaan matematik dalam grafik yang cantik (Peitgen & Richter 1986). Minat ahli sains kepada pecacai adalah disebabkan penggunaannya sebagai model untuk sistem fisis, selain disebabkan geometri bagi kekalutan dan beberapa jenis hingar rawak bersifat pecacai (Gouyet 1996).

Hingar: Fluktuasi Rawak dalam Alam Semesta

Konsep kerawakan atau kestokastikan boleh dianggap sebagai satu penghampiran untuk mencirikan pelbagai kelakuan yang tidak dapat dihuraikan dengan tepat. Sistem yang kompleks seperti gerakan molekul gas atau cecair, hubungan antara sebab dan kesan bagi peristiwa individu (misalnya pelanggaran antara dua molekul dalam sistem) tidak dapat ditentukan secara tepat tanpa sebarang ambiguiti, dan kelakuan terperinci sistem itu tidak boleh diramalkan. Kerawakan yang dianggap wujud secara hakiki atau intrinsik ini berbeza daripada kerawakan ketara untuk sistem kalut yang berketentuan.

Istilah hingar telah diterima bagi fluktuasi rawak hakiki yang wujud, sama ada dalam sistem alam semula jadi atau dalam sistem buatan manusia. Contoh hingar, termasuk isyarat radio dari angkasa lepas, hingar terma dalam litar elektrik, hingar tembakan dalam kefotokonduksian, hingar Flicker (atau hingar $1/f$) dalam tiub vakum dan lain-lain. Hingar dan isyarat rawak hanya boleh dihuraikan dengan menggunakan teori kebarangkalian. Idea kebarangkalian telah dipakai secara

sistematik dalam fizik untuk kali pertama dalam teori kinetik gas. Ini diikuti teori dinamik tentang gerakan Brown yang telah dikaji oleh Einstein (1905), Smoluchowski (1923) dan lain-lain. Fluktuasi seperti ini diwakili oleh satu proses stokastik yang bersesuaian kerana proses itu mematuhi satu persamaan pembeza stokastik (jika wujud), berbanding dengan persamaan pembeza berketentuan untuk proses bukan stokastik dan proses kekalutan. Secara ringkas, persamaan pembeza stokastik adalah persamaan pembeza yang mengandungi sebutan mewakili hingar. Misalnya persamaan Langevin yang dipatuhi oleh proses halaju gerakan Brown mengandungi satu sebutan hingar berkaitan dengan proses Wiener. Proses Wiener ialah proses stokastik yang mewakili gerakan Brown, dengan ketumpatan spektrumnya berkadaran kuasa-dua songsang frekuensi, $1/f^2$. Penyelesaian persamaan Langevin ialah proses Ornstein-Uhlenbeck (atau proses halaju gerakan Brown), dicirikan oleh ketumpatan spektrum yang berkadaran $1/(f^2 + c^2)$, dengan c sebagai pemalar. Kedua-dua proses ini merupakan proses Markov, yang mematuhi sifat Markov bahawa maklumat tentang proses tersebut pada masa depan tidak bersandar pada masa lepas jika maklumat pada masa kini diketahui. Proses Wiener dan proses Ornstein-Uhlenbeck memainkan peranan yang penting bukan hanya dalam fizik statistik, tetapi juga dalam teori kuantum, terutamanya dalam teori kuantum beraksiom.

Ciri asas beberapa jenis hingar yang biasanya dijumpa dalam fizik dibincangkan selanjutnya selepas ini. Untuk memudahkan penghuraian, perhatian ditumpu pada siri masa sebagai contoh untuk hingar. Hampir semua bidang kajian sains memerlukan pengumpulan data secara berturutan untuk suatu jangka masa yang tertentu. Siri data mengikut masa itu dinamai siri masa. Sifat asas bagi analisis siri masa melibatkan pengukuran yang berulang untuk fenomenon yang sama pada masa atau tempat yang berbeza. Oleh sebab itu, korelasi antara data yang berturut-turut mesti dipertimbangkan. Tujuan utama membuat analisis siri masa ialah untuk mendapatkan ramalan dan tafsiran (secara statistik), selain untuk ujian hipotesis model bagi sesuatu fenomenon/peristiwa.

Kaedah-kaedah yang biasa digunakan untuk membuat analisis siri masa (atau hingar secara umum) ialah kaedah stastitik dan kebarangkalian seperti analisis frekuensi, kuasa spektrum, korelasi untuk proses stokastik dan kalkulus stokastik. Alat matematik yang lazim digunakan termasuklah jelmaan Fourier, jelmaan Fourier pantas dan juga kaedah matematik yang baru iaitu analisis gelombang (wavelet analysis) (Daubechies 1992; Meyer 1993).

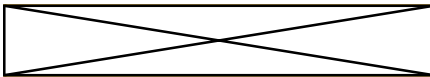
Analisis Fourier melibatkan penguraian suatu siri masa kepada komponen-komponen sinus dan kosinus dengan frekuensi dan amplitud yang berbeza, iaitu spektrum frekuensi. Hubungan antara maklumat tentang masa dan frekuensi sesuatu siri (peristiwa) itu boleh didapati melalui jelmaan Fourier. Masalah yang dihadapi dalam kaedah Fourier ini ialah maklumat yang terperinci untuk suatu siri masa hanya boleh diperolehi dengan menggunakan komponen Fourier yang berbilang besar. Kaedah jelmaan Fourier pantas diperkenalkan untuk mengatasi masalah tersebut. Keistimewaan kaedah jelmaan Fourier pantas ialah bilangan operasi yang perlu diproses oleh komputer boleh dikurangkan dengan banyaknya menggunakan algoritma tertentu untuk jelmaan Fourier diskret. Kelemahan analisis Fourier ialah kaedah ini tidak sesuai untuk isyarat dalam tempoh yang singkat atau isyarat yang runcing. Oleh itu, teori gelombang merupakan kaedah terbaru untuk menganalisis isyarat atau siri masa seperti itu. Analisis ini telah menggantikan gelombang sinus dan kosinus yang tidak terhingga dalam siri Fourier dengan gelombang kecil (yang bermula dan juga yang berhenti dalam jangka masa yang finit). Semua gelombang kecil ini (anak gelombang) boleh didapati daripada suatu gelombang asas (ibu gelombang) melalui transformasi anjakan dan translasi. Selain itu, analisis gelombang juga menjadi kaedah penting untuk pemprosesan isyarat, analisis data (siri masa), pemampatan imej dan sebagainya.

Kini, terdapat banyak teknik yang lazim digunakan untuk mencirikan proses rawak dan korelasinya, seperti autokorelasi atau kovarians, ketumpatan spektrum dan sebagainya. Fungsi kovarians K ialah suatu ukuran kuantitatif mengenai bagaimana fluktuasi suatu kuantiti $X(t)$ menghubungkankaitkan di antara masa t dengan $t + \tau$:

$$K(t, t + \tau) = \langle X(t)X(t + \tau) \rangle$$

dengan $\langle \dots \rangle$ melambangkan purata sampel. Bagi satu proses stokastik yang pegun, kovarians bersandar hanya pada τ , iaitu $K(\tau)$. Kovarians dan ketumpatan spektrum S suatu proses stokastik bukan yang tidak bersandaran. Bagi proses yang pegun seperti proses Ornstein-Uhlenbeck, kedua-dua kuantiti ini dikaitkan melalui jelmaan Fourier. Pada amnya, kovarians dan spektrum bagi proses yang bukan pegun tidak mempunyai hubungan yang terus atau ringkas.

Rajah 4 menunjukkan sampel proses rawak dan ketumpatan spektrumnya. Hingar putih $W(t)$ pada Rajah 4 adalah yang paling rawak – satu proses yang tidak mempunyai korelasi dalam masa. Ini bermakna data pada masa depan tidak bersandar pada data pada masa lalu. Korelasinya $K(\tau)$ berkadaran fungsi delta Dirac $\delta(\tau)$ (satu fungsi teritlak dengan nilai sifar di mana-mana kecuali pada titik $\tau = 0$, di mana nilainya adalah tak terhingga) dan ketumpatan spektrumnya $S(f) = \text{pemalar}$, itu bererti ia mempunyai kuasa yang sama untuk semua frekuensi, seperti cahaya putih. Kamiran hingar putih terhadap masa menghasilkan gerakan Brown (atau proses Wiener) $X(t) = \int_0^t W(t)dt$ seperti yang ditunjukkan dalam rajah 4. $X(t)$ bersepadan kepada resapan rawak untuk zarah, dan jarak purata yang dilalui dalam jangka masa t mematuhi hukum resapan biasa seperti berikut:



Walaupun pengetahuan tentang hingar putih dan gerakan Brown telah difahami dengan baik dari segi fizik dan juga matematik, pengetahuan itu hanya dapat digunakan untuk mencirikan beberapa fenomena fluktuasi dalam alam semula jadi. Kebanyakan fenomena dalam alam ini (juga muncul dalam elektronik, corak cuaca, hidrologi, geologi, astronomi, fisiologi, biologi, trafik, ekonomi dan muzik) dan siri masanya merupakan hingar $1/f$ yang mempunyai ketumpatan spektrum yang berkadaran songsang dengan suatu kuasa frekuensi, $S(f) \propto 1/f^a$ dengan $1 < a < 3$

(Gouyet 1996). Ini bermakna siri masa atau isyarat berkaitan dengan sistem tersebut adalah siri masa (atau isyarat) pecacai.


hingar putih

hingar $1/f$


gerakan Brown atau hingar $1/f^2$

masa

RAJAH 4 Beberapa jenis hingar, $X(t)$, perubahan rawak satu kuantiti dalam masa (a) Hingar putih; (b) hingga $1/f$ dan (c) gerakan Brown atau perjalanan rawak

Model matematik yang paling berkesan untuk menghurai hingar $1/f^a$ ialah gerakan Brown pecahan (Mandelbrot & Ness 1968). Ia adalah pengitlakan kepada gerakan Brown dan telah digunakan sebagai model bagi proses dengan ingatan jangka panjang (kebersandaran julat panjang pada masa lalu). Kebanyakan pecacai rawak telah menggunakan gerakan Brown pecahan sebagai penghampiran. Gerakan Brown pecahan boleh didapati dengan melakukan kamiran pecahan yang bersesuaian pada gerakan Brown. Secara ringkas, kamiran pecahan yang perlu digunakan untuk tujuan tersebut melibatkan suatu kamiran dalam bentuk $\int_0^t (t-s)^b dW(s)$, dengan b suatu nombor pecahan. Dengan dua pilihan had-had kamiran ini dua jenis gerakan Brown pecahan boleh didapati (Sithi, 1994). Hubungan di antara kedua-dua jenis gerakan Brown pecahan telah diberikan oleh Lim & Sithi (1994a) dan ciri ketumpatan spektrumnya telah dikaji oleh Sithi & Lim (1995). Di sini, gerakan Brown pecahan berindeks H , $X_H(t)$ dianggap sebagai suatu proses rawak dengan tokokannya yang mempunyai sifat seperti yang berikut:  dan ketumpatan spektrum bersepadan dengannya ialah

$$\langle \langle \text{rectangle with diagonal lines} \rangle \rangle, \text{ dengan } a = 2H + 1$$

Apabila $H \rightarrow 0$, gerakan Brown pecahan $X_H(t)$ pun menuju kepada hingar $1/f$. Manakala apabila $H = 1/2$, $X_H(t)$ menjadi gerakan Brown biasa dengan  (Lim & Sithi 1996).

Siri masa yang diwakili oleh gerakan Brown pecahan boleh digambarkan dengan menggunakan geometri pecacai yang mempertimbangkan bentuk siri masa yang tidak sekata itu. Gerakan Brown pecahan mematuhi sifat swaserupa secara statistik dengan $X_H(t)$ dan $X_H(at)/a^H$ mempunyai taburan berstatistik yang sama. Dimensi pecacai untuk gerakan Brown pecahan ialah $D = 2 - H$. Jadi, parameter atau eksponen Hurst H menghuraikan “kekesatan” untuk $X_H(t)$. Oleh kerana $0 < H < 1$, maka julat nilai

dimensi pecacai ialah $1 < D < 2$. Untuk gerakan Brown dengan $H = 1/2$, dimensi pecacainya ialah $D = 3/2$.

Analisis siri masa dalam tempoh 20 tahun (1976-1996) untuk beberapa parameter cuaca di Petaling Jaya dan Cameron Highlands telah dilakukan dengan kaedah analisis Fourier pantas (Chan Shook Yee 1997). Hasil kajian awalnya menunjukkan bahawa suhu purata harian di kedua-dua tempat itu mempunyai spektrum $1/f$. Kajian yang lebih teliti (dengan menggunakan analisis julat penskalaan semula Hurst atau analisis R/S) tentang siri masa suhu, taburan hujan, kelajuan angin purata dan juga jumlah purata zarah terampai dalam udara telah juga dijalankan Lim Ean San (1999). Siri masa ekonomi dan kewangan di Malaysia seperti harga saham dan komoditi harian dan kadar tukaran mata wang asing juga telah dilakukan dengan hasilnya yang mengesahkan semua siri masa itu merupakan siri masa pecacai (Lim Chee Meng 1999; Rajan 1999).

Contoh lain tentang penerapan pecacai rawak ialah dalam mekanik rekahan. Indeks Hurst H yang menentukan dimensi pecacai sesuatu bahan akan memberi darjah kekasaran permukaan yang disebabkan oleh retakan dan rekahan. Kajian retakan dalam mekanik rekahan itu penting, terutama daripada aspek sifat tentang bahan dan kejuruteraannya. Kebanyakan profil retakan yang dicerapi itu nyata menunjukkan nilai dimensi fraktal dalam nilai julat dari 1.1 hingga 1.3. Gerakan Brown pecahan boleh digunakan untuk mencapai nilai dimensi tersebut (Sithi & Lim 1994b). Untuk mendapatkan gambaran dinamik tentang perambatan sesuatu retakan, persamaan pembeza pecahan yang bersesuaian perlu digunakan. Model pertumbuhan fraktal (di sini profil retakan) seperti ini adalah tidak mencukupi. Tetapi, pergantungan retakan kepada pelbagai parameter fizis seperti parameter yang menentukan kekalutan bahan itu menyukarkan kajian retakan yang berpandukan kepada hanya satu model semata-mata. Sehubungan itu, telah timbul pendapat bahawa teori yang lebih lengkap untuk retakan dan rekahan mesti

mengambil kira aspek berketentuan (mungkin kekalutan berketentuan) dan juga aspek rawak. Gabungan kedua-dua aspek itu memang wajar untuk mencirikan objek buatan manusia (contohnya: bangunan) yang wujud di alam semula jadi.

Masalah yang dihadapi penyelidik dalam kajian tentang dinamik bagi sistem yang tidak berkala dan kompleks ialah keperluan untuk memastikan sama ada fluktuasi yang dicerapi itu mewakili hingar rawak atau keadaan kekalutan berketentuan atau satu gabungan kedua-dua itu. Tafsiran tentang asas dinamik bagi sistem kompleks yang tidak berkala merupakan satu masalah rumit. Fenomenon kompleks dalam alam semula jadi yang berkelakuan kekalutan biasanya juga mengandungi hingar usikan atau hingar latar belakang, dan hingar ini perlu disingkirkan untuk mendapatkan gambaran yang sebenar mengenai kelakuan kekalutannya. Jadi, kajian rapi tentang fenomena yang berkelakuan fluktuasi memerlukan analisis kedua-dua aspek, iaitu kekalutan dan hingar.

Kekalutan dan Hingar dalam Dunia Mikroskopik

Daripada perbincangan di atas, didapati bahawa fenomena yang tidak bertertib dan rawak berlaku dalam pelbagai sistem makroskopik. Objek mikroskopik seperti atom mematuhi hukum fizik kuantum yang sangat berbeza daripada teori fizik bagi objek makroskopik. Jadi, adalah munasabah untuk menjangka penghuraian kelakuan berfluktuasi dalam dunia mikroskopik juga memerlukan konsep dan pendekatan yang berlainan. Dalam bahagian berikut idea asas tentang kekalutan dalam sistem mikroskopik akan diterangkan. Fluktuasi rawak yang wujud sebagai ciri hakiki dalam vakum merupakan punca untuk beberapa fenomena kuantum. Konsep fluktuasi vakum ini juga menjadi asas untuk satu formulasi alternatif teori kuantum yang dikenali

sebagai mekanik stokastik. Pelbagai teori medan kuantum boleh diperolehi dengan menggunakan kaedah pengkuantuman mekanik stokastik.

Kekalutan dalam Mekanik Kuantum: Kekalutan Kuantum

Mekanik kuantum adalah teori yang boleh menghuraikan kelakuan dunia mikroskopik bagi atom dan molekul. Keadaan fizis dalam mekanik kuantum diwakili fungsi gelombang dan persamaan evolusi masanya ialah persamaan Schrödinger – satu persamaan linear dan berketentuan. Penyelesaiannya pada umumnya adalah sekata: berkala atau kuasi-berkala. Walau bagaimanapun persamaan Schrödinger tidak mampu untuk mempunyai kepekaan yang ekstrem terhadap syarat awal – sifat yang menakrifkan kekalutan dalam sistem kalsik yang tak linear. Oleh sebab itu, sifat kalut dalam mekanik klasik kelihatan tidak begitu sesuai untuk dihubungkan dengan kalut dalam sistem kuantum, atau untuk mempertimbangkan kekalutan kuantum. Bagaimanakah kekalutan klasik yang mempunyai sifat tidak teratur boleh menyesuaikan diri dengan fenomenon yang sekata dan berbentuk gelombang pada skala atom?

Sebelum penemuan kekalutan, hubungan antara mekanik klasik (regim teratur dan bukan kalut) dengan mekanik kuantum adalah melalui prinsip kesepadanan Bohr. Menurut prinsip kesepadanan Bohr, mekanik klasik itu terkandung di dalam mekanik kuantum sehingga mencapai had yang objeknya mempunyai saiz yang jauh besar daripada saiz atom. Soalan yang timbul sekarang ialah bagaimana kelakuan kalut dinamik klasik itu menunjukkan dirinya dalam mekanik kuantum? Istillah “kekalutan kuantum” telah diterima untuk menerangkan masalah-masalah yang berkaitan dengan kelakuan kuantum bagi sistem klasik yang kalut (Casati & Chirikov 1995; Blumel & Reinhardt 1997).

Richard Feynman telah menunjukkan bahawa mekanik kuantum boleh dirumuskan berasaskan mekanik klasik dengan bantuan kamiran lintasan (Feynman & Hibbs 1965). Kaedah Feynman boleh digunakan untuk mengkaji hubungan di antara dinamik kuantum dengan klasik apabila berlakunya kekalutan pada sistem klasik. Walau bagaimanapun, hubungan klasik-kuantum ini tidaklah langsung disebabkan fungsi gelombang kuantum tidak dapat mewakili sistem kalut. Oleh itu, kita perlu mempertimbangkan sifat-sifat lain untuk mendapatkan hubungan ini.

Atom Rydberg – apa-apa juga atom yang mempunyai satu elektron dalam suatu keadaan dengan tenaga yang tinggi (iaitu dengan nombor kuantum utama yang tinggi) – didapati sesuai untuk mengkaji hubungan ini. Atom Rydberg terdapat dalam regim semiklasik, maka munasabahlah digunakan teori mekanik klasik bergabung dengan hukum mekanik kuantum untuk menemui kesepadanan kuantum-klasik.

Apabila diletakkan dalam medan magnet yang kuat, semua atom Rydberg berkelakuan kalut. Dalam regim semiklasik yang nombor kuantumnya besar dan ketumpatan keadaan-eigennya tinggi, fluktuasi statistik paras tenaganya memang berbeza secara nyata daripada yang wujud dalam sistem teratur dan bukan kalut. Oleh itu, untuk mendapatkan tanda-tanda kalut, wajarlah diperiksa statistik paras tenaga atom itu. Tugas utama sekarang adalah untuk meramal kelakuan klasik dari struktur kuantum. Kaedah matematik daripada Gutzwiller (1990) boleh digunakan untuk menerangkan gerakan klasik dengan spektrum tenaga daripada eksperimen. Medan magnet boleh menghasilkan kekompleksan dalam spektrum tenaga. Pembengkokan paras tenaga menyebabkan penentuan nombor kuantum untuk paras tenaga secara individu adalah susah, jika bukan mustahil. Itulah sebabnya ketidakbolehan kita memberi nombor kuantum kepada paras tenaga dikatakan salah satu tanda kekalutan kuantum (Blumel & Reinhardt 1997).

Daripada kekalutan, kita mendapat bahasa sepunya untuk membolehkan perbincangan tentang sistem yang kelihatan tidak

berkaitan seperti elektron balistik dalam struktur semikonduktor mesoskopik, atom helium dan atom Rydberg dalam medan luar yang kuat itu dapat dilakukan. Kesemua sistem ini mempunyai satu sifat yang umum – sistem klasik sepadan yang kekalutan. Kekalutan menandakan kewujudannya dalam spektrum tenaga dengan sifat-sifat spektrumnya yang amat serupa untuk semua sistem ini (iaitu sifat kesemestaannya). Sifat kalut juga berlaku dalam sistem kuantum yang lain. Di sini ingin ditegaskan bahawa sekiranya matematik bagi mekanik kuantum dapat dikendalikan dengan lebih baik, banyak fenomenon yang sekata secara setempat, tetapi kekalutan keseluruhannya dapat ditemui.

Kekalutan juga mempunyai pengaruh yang sangat kuat ke atas mekanik kuantum bagi atom dan molekul. Walaupun tidak ada keraguan yang besar tentang mekanik kuantum sebagai suatu teori yang sah untuk sistem fizik pada skala atom, mekanik klasik telah kembali sebagai teori yang relevan bagi sistem atom dan molekul melalui pemulihan kaedah semiklasik. Walaupun mekanik kuantum telah memberitahu kita supaya tidak menggambarkan zarah atom yang bergerak dalam orbit-orbit yang tetap dan jitu untuk menghuraikan ciri-ciri asas bagi spektrum mekanik kuantum, tetapi orbit-orbit itu masih dapat digunakan untuk huraian ciri-ciri asas spektrum tenaganya melalui kaedah semiklasik (Kleppner 1997).

Fluktuasi Vakum

Perbincangan sebelum ini adalah tentang kelakuan kekalutan dan fluktuasi rawak bagi sistem dinamik semula jadi atau buatan manusia. Dalam bahagian ini saya ingin menerangkan bahawa fluktuasi berlaku bukan hanya dalam sesuatu medium bahan fizis tertentu, tetapi fluktuasi juga wujud di dalam vakum!

Biasanya vakum dikenali sebagai kekosongan atau keadaan yang kosong. Ia dikatakan wujud di dalam suatu ruang jika tiada sebarang benda di dalamnya. Namun demikian, saintis

menganggap vakum itu apa saja yang tinggal dalam suatu kawasan ruang setelah segala-galanya dikeluarkan dengan sepenuhnya berdasarkan kaedah eksperimen. Dengan kata lain, vakum adalah kekosongan ruang yang boleh dicapai secara eksperimen. Tidak ada sebarang kawasan ruang akan menjadi kosong walaupun semua jirim termasuk gas di dalamnya telah dikeluarkan, kerana di dalam ruang itu masih terdapat sinaran, seperti sinaran terma dan sinaran elektromagnet. Sinaran terma boleh dihilangkan dengan menyejukkan kawasan vakum tersebut. Walaupun kawasan itu boleh disejukkan sehingga mencapai suhu sifar Kelvin (iaitu suhu yang paling rendah), tetapi naik turun atau fluktuasi sinaran elektromagnet, sinaran tolok warna atau sinaran kromodinamik kuantum dan lain-lain masih boleh wujud. Sinaran yang berubah-ubah secara rawak dalam ruang vakum pada suhu sifar mutlak yang dinamakan sebagai sinaran titik sifar adalah sifat hakiki yang wujud di dalam alam semula jadi dan sinaran ini tidak dapat dihilangkan atau dihapuskan. Berdasarkan pandangan moden itu, maka vakum adalah lain daripada tafsiran sebagai kawasan yang kosong tanpa sebarang sifat. Sebaliknya, vakum mempunyai struktur yang kompleks kerana banyak kejadian yang bersifat fizis boleh berlaku di dalamnya (Milloni 1994; Mostepanenko, Trunov & Znajek 1997).

Struktur asas vakum seperti ini boleh dianggap sebagai hasil daripada suatu prinsip asas dalam mekanik kuantum – prinsip ketakpastian Heisenberg. Satu versi bagi prinsip ketakpastian menyatakan bahawa adanya hubungan antara ketaktentuan terhadap tenaga yang dibebaskan semasa peristiwa itu berlaku dengan ketaktentuan tentang masa kejadian tersebut untuk apa-apa juga peristiwa fizis. Ini bermakna bahawa hasil darab daripada ketaktentuan tenaga DE dan ketaktentuan masa Dt bagi suatu peristiwa fizis itu tidak boleh kurang daripada suatu pemalar berangka seperti berikut: $DEDt \cdot \Delta$ dengan $\Delta = h/2p$, dan h adalah pemalar Planck. Peristiwa yang berlaku dalam waktu selang yang amat singkat mempunyai ketaktentuan tentang tenaganya yang besar. Oleh itu, dalam waktu selang yang sangat

singkat, wujudlah suatu kebarangkalian yang besar bagi suatu vakum kuantum itu mempunyai sedikit tenaga titik sifar.

Tenaga titik sifar bagi suatu vakum boleh dinyatakan dalam proses ciptaan dan pemusnahan spontan suatu zarah dan anti-zarahnya, atau kemunculan dan kehilangan medan elektromagnet (atau medan kromodinamik) dalam pelbagai kawasan ruang. Perubahan sedemikian bagi medan kuantum itu dikenali sebagai fluktuasi vakum. Zarah-zarah yang terhasil dengan cara ini (melalui persamaan Einstein bagi hubungan antara tenaga E dan jisim m , yakni $E = mc^2$, di mana c adalah laju cahaya) hanya wujud untuk waktu selang yang amat singkat, kerana zarah itu akan dimusnahkan hampir sebaik saja ianya diciptakan. Fenomenon ketakpastian ini menjelma di dalam fluktuasi tenaga vakum: sekiranya naik turun tersebut adalah besar nilainya maka masa hayat zarah itu lebih singkat. Zarah-zarah ini dinamakan zarah maya kerana tidak dapat dikesan secara terus.

Selain penciptaan/pemusnahan spontan, beberapa kesan fluktuasi vakum juga diketahui telah wujud. Kesan-kesan yang disebabkan oleh fluktuasi medan vakum adalah berikut:

1. Kesan Anjakan Lamb (Willis Lamb 1947)

Pembetulan paras tenaga atom (secara spesifik keadaan teruja atom hidrogen) yang telah dapat diramalkan dengan teori elektrodinamik kuantum. Anjakan Lamb adalah akibat fluktuasi vakum di antara nukleus atom hidrogen dan elektron yang mengorbit nukleus.

2. Kesan Casimir (Hendrik Casimir 1948)

Dua plat logam pantulan yang mengganggu struktur vakum kuantum dalam ruang di antara plat-plat itu, dan menghasilkan daya tarikan di antara kedua plat itu (Lamoreaux 1997).

3. Pancaran Spontan

Berlakunya pancaran sinaran apabila satu atom mengalih secara spontan ke suatu paras tenaga yang lebih rendah. Saling tindakan di antara atom dengan vakum mengaruh/merangsang pancaran spontan.

Kesemua kesan fluktuasi vakum di atas telah ditahkikkan secara eksperimen.

Di sini ingin ditegaskan bahawa fluktuasi kuantum yang berlaku dalam satu kawasan yang amat kecil itu mempunyai kesan yang drastik kepada sifat ruang dan masa. Konsep tentang ruang dan masa perlu diubah sama sekali apabila jarak atau skala yang dipertimbangkan adalah dalam skala ^a 10-33sm (skala atau jarak Planck). Berdasarkan teori kerelatifan am dan prinsip ketakpastian, fluktuasi untuk topologi dan kedimensian ruang-masa pada skala Planck adalah amat besar sehingga konsep tentang *sebelum* dan *selepas* tidak lagi mempunyai makna – masa hilang artinya!

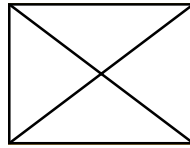
Idea tentang fluktuasi vakum dan tenaga titik sifar berkemungkinan besar akan memainkan peranan yang penting dalam perkembangan fizik pada masa depan (Yam 1997). Beberapa ahli fizik menganggap bahawa vakum akan menjadi satu bidang kajian utama dalam fizik pada abad ke-21. Peter Milonni dari Los Alamos National Laboratory, USA, misalnya mengatakan bahawa “vakum mempunyai berbagai-bagai kesan dan aktiviti di seluruh julat dari mikroskopik ke kosmos”. Selain itu, Harold E. Puthoff, pengarah Institute for Advanced Studies, Austin, USA, pula berpendapat bahawa “abad ke-21 mungkin merupakan zaman tenaga titik sifar”. Beliau dan rakannya percaya tentang tenaga daripada vakum yang kelihatan merupakan sumber yang tidak akan kunjung habis itu akan dapat dimanfaatkan. Tetapi pandangan itu telah dipersoalkan oleh Stefan Weinberg, seorang ahli fizik dan pemenang Hadiah Nobel. Sehubungan itu, beberapa ahli kosmologi juga telah mencadangkan satu hipotesis tentang vakum dan tenaganya yang akan memainkan peranan utama dalam penciptaan struktur alam semesta. Mereka telah membuat spekulasi bahawa tenaga vakum yang tinggi pada permulaan alam semesta itu mungkin telah mencetuskan Deguman Besar.

Mekanik Stokastik

Fluktuasi vakum merupakan satu fenomenon kuantum, iaitu kelakuannya tidak dapat dihuraikan dengan lengkap oleh teori

fizik klasik. Satu soalan sewajarnya timbul: bolehkah teori kuantum dirumuskan berdasarkan konsep fluktuasi vakum? Di sini saya ingin menerangkan beberapa percubaan untuk membina satu formulasi alternatif bagi teori kuantum dengan bantuan konsep fluktuasi vakum.

Satu ciri yang agak ganjil sifatnya telah wujud dalam teori kuantum sejak penemuan teori itu. Persamaan Schrödinger adalah persamaan dinamik asasi dalam mekanik kuantum dan ia merupakan suatu persamaan berketentuan. Walaupun mekanik kuantum bergantung kuat pada konsep kebarangkalian dari segi taksiran fizis, tetapi kekurangan penggunaan secara terus konsep dan teknik kebarangkalian seperti proses rawak, persamaan kebezaan stokastik, nilai jangkaan bersyarat dan lain-lain lagi itu merupakan kelemahan dalam perumusan mekanik kuantum lazim. Pencarian perumusan stokastik bagi mekanik kuantum telah bermula sejak penemuan persamaan Schrödinger pada tahun 1926 (Schrödinger 1931). Ahli fizik, termasuk Erwin Schrödinger sendiri, telah tertarik hati kepada keserupaan antara persamaan Schrödinger dengan persamaan resapan yang ada kaitan dengan teori gerakan Brown yang telah dirumuskan oleh Einstein (1905) dan Smoluchowski (1923). Usaha yang dilakukan untuk mencari penjelasan tentang persamaan Schrödinger itu didorong juga oleh perasaan tidak berpuas hati para ahli sains dengan tafsiran lazim iaitu tafsiran ortodoks Copenhagen tentang mekanik kuantum. Albert Einstein, Louis de Broglie dan Schrödinger, tiga pengasas teori mekanik kuantum, adalah antara ahli fizik yang terkenal yang tidak menerima tafsiran lazim, iaitu tafsiran Copenhagen. Sebelum dilanjutkan perbincangan tentang formulasi stokastik untuk mekanik kuantum, ingin ditunjukkan hubungan formal antara teori kuantum dan teori resapan. Satu keserupaan yang formal antara satu zarah bebas dalam mekanik kuantum dengan satu zarah klasik yang mengalami gerakan Brown boleh diperolehi melalui hubungan antara persamaan Schrödinger dengan persamaan resapan. Jika satu penyelajaran analisis pembolehubah masa t kepada nilai khayalan it dilakukan, didapati bahawa



(Persamaan Schrödinger)

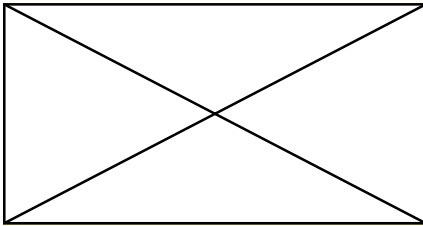
(Persamaan Resapan)

dengan m = jisim zarah bebas, dan \hbar = pemalar resapan. Kedua-dua persamaan itu adalah serupa melalui kesepadanan berikut: $i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \psi$. Perhatikan bahawa langkah penyelarajaran analisis masa adalah setara dengan putaran Wick, supaya ruang-masa Minkowski (dengan masa nyata) menjadi ruang-masa Euklid (dengan masa khayalan) selepas putaran tersebut. Berlatar belakang penerangan itu, dapatlah kita ketahui bahawa persamaan resapan sebagai persamaan Schrödinger dalam ruang-masa Euklid. Beberapa percubaan awal telah dilakukan untuk mendapatkan formulasi stokastik tentang mekanik kuantum. Misalnya de Broglie (1926) telah mencadangkan satu tafsiran alternatif untuk mekanik kuantum. Beliau menerangkan tentang keperluan unsur stokastik di dalam teorinya berdasarkan idea Einstein dengan melibatkan suatu jenis gerakan yang serupa dengan gerakan Brown untuk sifat dinamik zarah dalam fizik kuantum. Idea de Broglie itu telah memberi ilham kepada Bohm dan Vigier (1954) yang selanjutnya mencadangkan kewujudan pembolehubah tersembunyi atau 'cecair sub-kuantum' yang didapati telah menyebabkan sifat stokastik daripada zarah dalam mekanik kuantum. Sehubungan itu kajian oleh Imre Féynes (1952), seorang ahli fizik dari Hungary, merupakan satu lagi usaha yang serius untuk mendapatkan satu formulasi stokastik untuk mekanik kuantum. Teori Féynes itu yang berdasarkan Lagrangian dalam konteks proses gerakan Brown, telah menggunakan prinsip tindakan terkecil. Beliau telah juga menerbitkan banyak hasil kajian yang didapati konsisten dengan mekanik kuantum dalam formalisme ruang Hilbert. Namun, beberapa ahli fizik lain, termasuk Kershaw (1964), telah meneruskan kajian Féynes yang tidak lengkap itu.

Sebelum saya menerangkan dengan lebih teliti tentang formulasi stokastik teori kuantum, adalah perlu ditekankan mengenai perbezaan di antara teori stokastik untuk mekanik kuantum berdasarkan gerakan Brown klasik yang dinamai mekanik stokastik, dan satu teori kuantum untuk gerakan Brown yang dikenali sebagai mekanik kuantum stokastik (Parthasarathy 1992). Dalam penulisan ini hanya formulasi yang pertama akan dibincangkan.

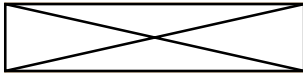
Pada tahun 1966, seorang ahli matematik di Universiti Princeton, Edward Nelson (1966, 1967, 1985) telah juga membangkitkan semula kesedaran para ahli sains tentang formulasi stokastik bagi mekanik kuantum. Beliau telah menunjukkan bahawa sekiranya kita menganggap setiap zarah boleh melakukan gerakan stokastik yang khas dalam ruang tatarajah (konfigurasi), andaian itu berkemungkinan dapat menerbitkan pergerakan zarah untuk memenuhi persamaan Schrödinger dan juga yang sebaliknya. Menurut Nelson lagi, punca kerawakan ini datangnya daripada medan latar belakang yang diwujudkan oleh keadaan fluktuasi vakum kuantum yang mungkin berasal daripada sumber elektromagnet kuantum, kromodinamik kuantum, graviti dan lain-lain.

Huraian tentang evolusi masa bagi suatu sistem dinamik itu memerlukan adanya persamaan yang melibatkan terbitan masa supaya kuantiti dinamik seperti halaju dan pecutan dapat ditakrifkan. Terbitan masa lazim (d/dt) itu tidak wujud dalam beberapa proses stokastik yang penting. Misalnya, terbitan masa untuk proses gerakan Brown boleh dikatakan hampir tidak wujud di mana-mana. Oleh itu, perlu dicari takrifan alternatif yang lebih sesuai untuk menerangkan konsep dinamik, seperti halaju dan pecutan yang takrifannya memabitkan terbitan terhadap masa peringkat pertama dan kedua. Elok sekiranya dapat dipertimbangkan proses stokastik $X(t)$ dengan X sebagai koordinat bagi zarah pada masa t . Sehubungan itu, Nelson telah memperkenalkan terbitan ke hadapan $D_+X(t)$ dan terbitan ke belakang $D_-X(t)$ seperti yang berikut:



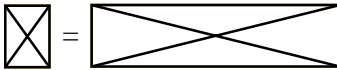
dengan E_t sebagai nilai jangkaan bersyarat terhadap keadaan sistem pada masa t . Jika $X(t)$ mempunyai terbitan lazim terhadap

masa \square , maka didapati



Secara umumnya, $D_+ X(t)$ tidak sama dengan $D_- X(t)$

Nelson selanjutnya memberi satu takrifan yang baru untuk pecutan stokastik $a(t)$ seperti yang berikut:



Hukum Newton kedua $F = ma$ dianggap sah jika pecutan stokastik itu digunakan.

Kesemua itu mengandaikan bahawa setiap zarah sebagai satu proses resapan $X(t)$ dalam ruang konfigurasi, lebih-lebih lagi ia mematuhi persamaan Langevin bagi proses resapan dengan pemalar pembauran $\square = \sqrt{2m}$. Nelson telah juga menunjukkan bahawa proses $X(t)$ ini juga memenuhi persamaan Schrödinger (Nelson 1966, 1967).

Perumusan stokastik untuk mekanik kuantum yang diterangkan di atas telah dinamakan sebagai mekanik stokastik dan kaedah pengkuantuman itu selanjutnya dikenali sebagai pengkuantuman stokastik. Pada amnya, prinsip asas mekanik stokastik, tidak mempunyai sebarang andaian tertentu tentang sumber kestokastikan atau daya stokastik yang wujud. Pelbagai idea yang amat berbeza antara satu dengan lain telah dicadangkan,

seperti pelanggaran zarah vakum 'zeron', fluktuasi pelbagai daya vakum (daya elektromagnet, daya graviti), dan fluktuasi metrik ruang-masa. Selain fluktuasi medan titik sifar, hipotesis yang menyatakan bahawa sumber kestokastikan itu berasal dari fluktuasi geometri ruang-masa memang merupakan satu cadangan yang sangat menarik. Menurut teori kerelatifan am Einstein, tenaga dari vakum mesti sentiasa berubah-ubah sehingga ia mengakibatkan fluktuasi dalam metrik ruang-masa pada jarak yang amat kecil, katakan pada skala Planck ($\sim 10^{-33}$ cm). Selain itu, sekiranya diterima teori graviti kuantum, maka fluktuasi kuantum dalam ruang-masa yang tidak dapat disingkirkan itu amatlah besar pada jarak skala Planck, dan ia menghasilkan satu topologi ruang-masa yang berkait-ganda. Kesimpulan yang serupa juga telah dicadangkan dalam teori tetali dalam fizik zarah keunsuran – satu kesimpulan yang konsisten dengan teori kerelatifan am dan teori kuantum.

Masalah lain yang berkait dengan formulasi stokastik telah dicadangkan oleh Schrödinger: jika ketumpatan kebarangkalian awal dan akhir satu proses resapan itu telah diketahui, apakah proses penentuan dalam yang paling mungkin? Iaitu beliau hendak meramal keadaan pada masa pertengahan (penyelesaian penentuan dalam) jika kedua-dua data pada masa lepas dan depan diberikan. Masalah ini telah diselesaikan oleh Jamison (1974) dan Zambrini (1986). Mereka telah membangunkan satu teori yang lebih lengkap dengan menggunakan proses Bernstein – proses penentuan dalam (Lim 1991). Teori ini memberi formulasi baru untuk mekanik kuantum Euklid, satu formulasi mekanik kuantum dengan pembolehubah masa mengambil nilai khayalan (Nagasawa 1993; Aebi 1996). Sungguhpun formulasi Euklid dan mekanik stokastik merupakan dua teori yang dekat, tetapi perbezaan utamanya ialah sekiranya dalam teori pertama masa adalah khayalan tetapi dalam teori kedua masa adalah nyata.

Baru-baru ini satu pendekatan alternatif yang berdasarkan andaian bahawa ruang-masa bersifat pecacai telah dicadangkan oleh Nottale (1993). Dengan menggunakan hipotesis ruang-

masa tidak terbezakan dan merupakan pecacai, formulasi ini dapat menjelaskan asal proses gerakan Brown dalam mekanik kuantum yang mempunyai dimensi pecacai $3/2$, tanpa keperluan sinaran atau fluktuasi latar belakang seperti tenaga titik sifar. Selain itu, mekanik stokastik juga boleh diperluaskan kepada medan kuantum, atau sistem kuantum kontinum dengan darjah kebebasan yang tak terhingga. Pengkuantuman stokastik untuk medan yang paling mudah, iaitu medan skalar (jisim $m = 0$ dan spin $s = 0$) telah dilakukan oleh Guerra dan Ruggiero (1973). Untuk tujuan itu, medan skalar klasik dianggap terdiri daripada satu sistem pengayun harmonik dalam satu isipadu V . Pengkuantuman telah dilakukan untuk setiap pengayun menurut prinsip mekanik stokastik dengan andaian bahawa pengayun itu merupakan proses resapan Markov dalam ruang konfigurasi. Medan stokastik itu telah diperolehi selepas had $\hbar \rightarrow 0$ dilakukan (Guerra & Ruggiero 1973). Satu hasil yang di luar jangkaan telah diperolehi: pengkuantuman stokastik bagi satu medan dalam ruang-masa Minkowski menghasilkan satu medan kuantum dalam ruang-masa Euklid. Ini mungkin dapat memberi erti fizik bagi medan kuantum Euklid dalam teori medan kuantum beraksiom (Lim 1980a, 1986).

Pengkuantuman untuk medan dengan spin bukan sifar adalah lebih sukar. Ini disebabkan kewujudan komponen medan yang bukan fizik. Untuk medan dengan jisim $m = 0$ dan spin $s = 1$ (iaitu medan meson vektor atau medan Proca), satu daripada empat komponennya adalah bukan fizik. Biasanya komponen ini boleh dihapuskan melalui satu syarat subsidiari. Pengkuantuman stokastik hanya boleh dilakukan terhadap ketiga-tiga komponen medan yang fizik, tetapi perlu mengambil kira syarat subsidiari supaya komponen yang bukan fizik itu dapat dipulih semula selepas pengkuantuman (Lim 1980c).

Apabila jisim menjadi sifar, zarah dengan spin $s = 1$ ialah foton dan medan berkaitan ialah medan elektromagnet. Jika vektor empat A_m , dengan $m = 0, 1, 2, 3$, digunakan untuk

mewakili medan keupayaan foton, dua komponennya perlu dilenyapkan kerana medan foton hanya mempunyai dua komponen fizis. Langkah ini boleh dilaksanakan secara lengkap dengan menggunakan syarat tolak seperti tolak Coulomb (syaratnya

ialah $A_0 = 0$ dan \square). Pilihan tolak biasanya bergantung

kepada bagaimana syarat tolak dapat memudahkan perhitungan terlibat. Tetapi bukan semua syarat tolak dapat melenyapkan kedua-dua komponen yang bukan fizis, misalnya syarat Lorentz

dengan $\square = 0$. Pengkuantuman stokastik untuk keupayaan

elektromagnet adalah lebih kompleks dan bergantung kepada pilihan syarat tolak. Bagi keupayaan vektor dalam tolak Coulomb, pengkuantuman stokastik boleh dilakukan dengan cara serupa dengan medan skalar kerana hanya dua komponen fizis wujud dalam tolak itu (Lim 1982). Bagi beberapa jenis tolak yang tertentu, seperti tolak paksi-masa atau temporal dengan syarat $A_0 = 0$, kaedah berikut boleh digunakan untuk melaksanakan pengkuantuman stokastik (Lim 1984a, 1984b). Medan keupayaan elektromagnet boleh dihuraikan dalam komponen melintang dan komponen membujur (komponen ini yang mengandungi keadaan yang bukan fizis), dan syarat tolak hanya berkesan untuk komponen membujur. Pengkuantuman stokastik boleh dilakukan selepas mengambil kira syarat tolak. Kaedah ini juga adalah sah dengan sedikit pengubahsuaian) untuk tolak alir dengan syarat

$A_0 = \square$, Z ialah satu fungsian \square yang tidak mengandungi sebutan terbitan masa (Lim 1988b, 1988c); dan tolak paksi-ruang dengan syarat tolak $A_3 = 0$ (Lim 1990, 1993a). Tolak yang kovarian seperti tolak Lorentz, komponen A_0 dan \square dari keupayaan elektromagnet dapat dipisahkan dan pengkuantuman perlu dilakukan secara berasingan (Lim & Ng Chee Mang 1994). Yang menarik ialah kaedah mekanik stokastik telah membolehkan kita memperoleh hasil pengkuantuman secara lebih mudah

berbanding dengan kaedah lazim. Sebagai contoh, perambat bagi foton (dan juga gluon - zarah pembawa bagi medan Yang-Mills atau medan kromodinamik) dalam pelbagai tolok boleh didapati secara mudah (Lim 1994b). Kaedah ini juga membenarkan satu tafsiran stokastik tentang kesingularan yang wujud dalam perambat foton/gluon dengan tolok paksi-masa dan paksi-ruang (Lim 1993b, 1993c, 1993d).

Teori medan kuantum pada suhu positif yang tradisional menggunakan pendekatan masa khayalan atau Euklid (Das 1997), dan formulasi ini juga merupakan yang paling mudah. Pendekatan Euklid telah digunakan secara luas untuk penghitungan kuantiti statik pada suhu tinggi tetapi kaedah ini tidak sesuai untuk penghitungan pada suhu rendah. Bagi tujuan kedua, formulasi masa nyata perlu digunakan (Das 1997). Di sini ingin dinyatakan bahawa pengkuantuman medan pada suhu positif juga boleh dilaksanakan berdasarkan prinsip mekanik stokastik (Lim 1982, 1985b). Medan stokastik yang dihasilkan itu hanya boleh dikaitkan dengan medan kuantum pada suhu positif menurut formulasi lazim. Percubaan untuk menghubungkan medan stokastik ini dengan satu teori baru medan kuantum pada suhu finit (iaitu teori medan terma) telah tidak berjaya (Lim 1987a, 1987b, 1988). Percubaan tersebut telah menggunakan pemalar resapan sebagai satu parameter tanpa melakukan penjelmaan Bogoliubov yang diperlukan dalam teori medan terma (Umezawa *et al.* 1982). Jadi, kemungkinan adalah besar penjelmaan Bogoliubov itu juga perlu dilaksanakan dalam formulasi stokastik untuk mendapatkan medan terma stokastik.

Satu cabaran besar dihadapi ahli fizik pada masa kini ialah untuk membina satu formulasi yang sempurna tentang teori medan graviti kuantum - gabungan teori kuantum dengan teori kerelatifan am Einstein. Zarah berkaitan dengan medan graviti ialah graviton yang mempunyai jisim $m = 0$ dan spin $s = 2$. Pelbagai teori telah dicadangkan tentang perambatan graviton dalam ruang-masa, misalnya teori Kaluza-Klein yang memerlukan

ruang-masa berdimensi lima, teori supertetali yang melibatkan ruang-masa dengan dimensi sepuluh dan dua puluh enam. Masalah ini masih belum diselesaikan secara lengkap walaupun kajian intensif telah dijalankan oleh beberapa pakar dalam bidang ini. Oleh kerana teori medan kuantum perlu diambil kira tentang fluktuasi ruang-masa, maka kaedah stokastik mungkin boleh memberikan sedikit bantuan. Sebagai percubaan awal, pengkuantuman berdasarkan mekanik stokastik telah dilakukan untuk medan graviti dalam penghampiran linear atau penghampiran medan lemah (Lim 1983). Hasil yang didapati adalah serupa dengan pengkuantuman stokastik medan tensor elektromagnet bebas (Guerra & Loffredo 1981; Lim 1981b) kecuali medan tensor dengan pangkat empat yang mewakili tensor Riemann yang mewakili medan tensor graviti dalam vakum perlu digunakan, manakala medan tensor elektromagnet adalah tensor dengan pangkat dua (Lim 1997, 1998). Langkah yang seterusnya ialah menggabung teori kerelatifan am dengan mekanik stokastik. Proses resapan dan persamaan pembeza stokastik dalam ruang-masa yang lengkung perlu dipertimbangkan. Masalah ini sangat rumit dan pada masa ini belum lagi ada sebarang perkembangan yang menarik.

Pada masa ini, mekanik stokastik masih belum berkembang ke tahap yang boleh diterima sebagai satu teori alternatif kepada teori kuantum lazim. Untuk beberapa masalah yang tertentu, seperti medan elektromagnet dalam pelbagai tolok, kajian mekanik stokastik itu telah memberi kaedah pengkuantuman yang lebih mudah berbanding dengan kaedah yang lazim. Pengkuantuman stokastik telah digunakan untuk teori kuantum bukan setempat (Lim 1986b). Tafsiran stokastik juga dapat menjelaskan beberapa sifat, misalnya kesingularan dalam perambat medan elektromagnet dan gluon.

Masalah terbuka yang penting dalam mekanik stokastik adalah di antaranya:

1. Keperluan untuk mendapat satu makna kebarangkalian tentang pecutan stokastik.

2. Mendapatkan teori medan stokastik bagi medan Fermi yang mempunyai spin separuh-integer dengan menggunakan teori resapan biasa.
3. Mendapatkan teori elektrodinamik dan kromodinamik kuantum yang lengkap berdasarkan mekanik stokastik.
4. Bagaimana mekanik stokastik dapat digabungkan dengan teori kerelatifan am.

Sebelum masalah ini dapat diselesaikan dengan sempurna, formulasi mekanik stokastik tidak boleh diterima sebagai satu teori alternatif bagi teori kuantum lazim.

Istilah pengkuantuman stokastik juga telah digunakan untuk kaedah pengkuantuman dengan evolusi proses stokastik itu berlaku dalam suatu masa rekaan yang boleh dianggap sebagai dimensi kelima tambahan kepada empat dimensi ruang-masa yang fizis. Perumusan ini dikenali sebagai pengkuantuman stokastik Parisi-Wu (Parisi & Wu 1981), dan menurut kaedah ini, penyelesaian persamaan Langevin dalam masa rekaan bagi proses resapan memberi hasil yang sama dengan teori kuantum apabila proses itu bersantai ke keadaan keseimbangan dengan masa rekaan mengambil nilai tak terhingga. Kaedah pengkuantuman Parisi-Wu juga sah untuk medan meson vektor (Lim 1983b) dan medan keupayaan elektromagnet dalam tolok paksi (Lim 1985a). Walaupun formulasi ini telah memberi beberapa kebaikan, ia masih merupakan satu kaedah matematik untuk membantu kita melakukan penghitungan dalam teori kuantum tanpa tafsiran fizik yang sebenar.

Akhir sekali, ingin ditegaskan bahawa wujudnya satu lagi perumusan alternatif kepada teori elektrodinamik kuantum yang berdasarkan fluktuasi vakum, khususnya tenaga titik sifar elektromagnet. Menurut teori elektrodinamik klasik, medan klasik lenyap sekiranya tidak ada punca/sumber seperti cas elektrik. Ini adalah satu syarat sempadan untuk teori klasik ini. Sementara itu, satu teori baru telah diperolehi dengan melakukan

pengubahsuaian kepada syarat sempadan supaya satu medan fluktuasi yang mempunyai tenaga titik sifar $\hbar\omega$ per mod. Teori ini dinamai elektrodinamik stokastik atau elektrodinamik rawak (Cetto & de la Pena 1996). Walaupun teori ini berjaya memperoleh banyak hasil seperti yang terdapat dalam teori lazim, namun teori ini masih tidak dapat diterima sebagai alternatif yang serius bagi menggantikan elektrodinamik kuantum yang lazim.

Perspektif dan Kesimpulan

Pada masa lepas, ahli sains dan jurutera menganggap bahawa hingar latar belakang dan kelakuan kekalutan yang rawak sebagai gangguan dan ketidakkawalan bagi sesuatu sistem dinamik. Mereka mencuba seboleh-bolehnya untuk meminimumkan hingar latar belakang dalam alat dan juga mengelakkannya daripada sistem kekalutan. Keadaan seperti ini telah berubah masa kini. Perspektif semasa ialah kekalutan dalam pelbagai sistem bukan sahaja dapat dikawal, tetapi kewujudan kekalutan juga boleh membawa kebaikan. Sebagai contoh, kelakuan kekalutan telah digunakan oleh saintis NASA untuk mengawal orbit kapal angkasa. Gerakan yang melibatkan tiga jasad, iaitu bumi, bulan dan kapal angkasa adalah satu sistem kekalutan, dengan memperkenalkan sedikit usikan satu perubahan yang besar dihasilkan. Jadi, pembetulan orbit kapal angkasa boleh dilakukan dengan hanya sedikit tenaga sahaja.

Baru-baru ini, eksperimen tentang litar elektronik kekalutan menunjukkan adanya kemungkinan untuk melakukan komunikasi dengan menggunakan kalut. Gregory Van Wiggeren & Rajarshi Roy (1998) telah menggunakan laser kekalutan untuk menjana isyarat kompleks yang diperlukan untuk sistem komunikasi masa kini. Sistem laser kekalutan itu dapat mengsinkronisasikan satu penghantar dan penerima, lantas menghantar data dalam bentuk kod rahsia.

Penerapan kalut lain, termasuk menstabilkan denyutan jantung yang eratik, menaikkan kuasa laser dan mensinkronisasi output daripada litar elektronik. Pada masa ini saintis dan jurutera menerima kelakuan kekalutan dalam pelbagai sistem dinamik dengan pandangan yang lebih positif (Gauthier 1998).

Begitu juga untuk hingar, penemuan satu ciri baru - resonans stokastik menunjukkan bahawa hingar latar belakang boleh menghasilkan kebaikan. Banyak sistem fizik dan biologi - daripada litar elektronik kepada sel saraf - sebenarnya dapat berfungsi dengan lebih berkesan dengan adanya hingar rawak. Resonans stokastik adalah satu fenomenon yang berasaskan kepada konsep di mana hingar latar belakang boleh menguatkan isyarat yang lemah supaya dapat dikesan (Gammaitoni *et al.* 1998).

Kemungkinan yang memberangsangkan ialah penemuan tentang peranan yang dimainkan oleh resonans stokastik dalam neurologi baru-baru ini. Neuron biasanya mengalami isyarat rawak dan berketentuan. Kesan resonans stokastik telah dibuktikan sudah wujud dalam neuron udang krai pada 1993. Oleh sebab hampir semua sistem deria beroperasi sebagai pengesan ambang, contoh daripada udang krai menunjukkan bahawa kecekapan untuk mengesan isyarat lemah boleh dipertingkatkan dengan menambahkan hingar luaran. Namun demikian, penyelidikan selanjutnya masih diperlukan untuk memastikan sama ada resonans stokastik mempunyai penggunaan dalam neurofisiologi.

Kini fenomenon resonans stokastik telah ditemui dalam banyak sistem fizikal. Antaranya laser, diod terowong dan peranti interferens kuantum yang superkonduksian (SQUID). Walau bagaimanapun, resonans stokastik mungkin mempunyai penggunaan lain seperti dalam analisis isyarat, peranti elektronik dan magnetik masa depan. Generasi baru alat tak linear yang mungkin dapat diperolehi dengan hingar tidak lagi merupakan satu gangguan. Ia sebaliknya telah memberi sumbangan membina dalam pelaksanaannya.

Dalam penulisan ini, beberapa ciri asas kalut berketentuan, hingar rawak dan geometri fraktal, serta hubungan antaranya telah dibincangkan. Walaupun fenomenon kekalutan dan hingar nampaknya tidak berkaitan antara satu dengan lainnya, namun kelakuan kedua-duanya adalah bercelaru dan tidak sekata. Ketaksekataan itu mempunyai punca yang sangat berbeza, kerana yang satunya berdasarkan persamaan berketentuan, manakala yang lain itu mematuhi persamaan stokastik. Walaupun perbezaan itu jelas, tetapi terdapat keserupaan antara kedua-duanya sehingga boleh dihurai dengan menggunakan geometri pecacai. Sehingga kini, penerapan kalut, hingar dan pecacai sangat meluas. Tetapi, penerapan perlu dilakukan dengan berhati-hati supaya betul-betul wajar dan sesuai. Ini disebabkan pemahaman kita tentang bagaimana ketiga-tiganya itu saling mempengaruhi masih belum lengkap. Oleh itu, kajian selanjutnya dalam teori dan eksperimen untuk ketiga-tiga bidang perlu diteruskan agar dapat memperbaiki pengetahuan kita mengenai struktur dan mekanismenya. Arah kajian masa depan perlu meliputi bidang seperti teori kekompleksan dan kegentingan berswa-organisasi yang tidak disentuh dalam syarahan ini. Walau bagaimanapun, kedua-dua tajuk ini mempunyai hubung kait yang rapat dengan teori kalut dan pecacai. Tujuan utama semua kajian itu adalah untuk memperolehi ramalan sedalam mungkin tentang proses yang tidak sekata dan tidak teratur (Novak 1998).

Trend baru teori pecacai ialah analisis multipecacai (multifraktal). Pengitlakan ini memerlukan indeks Hurst H yang lebih umum dalam gerakan Brown pecahan, misalnya indeks itu dijadikan satu fungsi masa $H(t)$ (Lim 1997). Langkah ini penting kerana indeks itu membenarkan dimensi pecacai berubah dengan masa, seklain boleh digunakan untuk menggambarkan proses yang lebih kompleks, seperti siri masa dengan corak setempatnya yang berubah mengikut masa. Contoh ini merupakan pengitlakan tentang konsep pecacai kepada multipecacai yang menghasilkan model yang lebih realistik. Generalisasi yang lain untuk perjalanan rawak pecacai yang penting ialah 'penerbangan

Levy' atau perjalanan rawak Levy yang boleh digunakan untuk membuat model tentang sistem-sistem tak linear, kekalutan, bersifat pecacai dan bergelora (Klafter et al. 1996, Tsallis 1997). Trend baru dalam kajian fluktuasi rawak ialah penerapan kaedah kalkulus pecahan, untuk mendapatkan persamaan pembeza pecahan stokastik yang dipatuhi oleh proses hingar yang tertentu. Pendekatan ini sangat berguna untuk rumusan model dalam sains. Tetapi, kaedah kalkulus pecahan stokastik ini belum lagi digunakan dalam teori kuantum walaupun potensinya adalah besar.

Tulisan ini telah memberikan perhatian besar kepada fluktuasi atau hingar yang paling asas sekali, iaitu fluktuasi vakum dan kesannya mungkin akan memainkan peranan yang penting dalam penyelidikan asas fizik pada masa hadapan. Trend umum penyelidikan sains masa hadapan akan merupakan percubaan untuk mengawal kalut dan hingar yang bertujuan untuk memperolehi penerapan yang lebih luas, selain untuk memperolehi keterbitan dan sifat kesemestaan baru yang mungkin wujud daripada ketaksekataan dalam fenomenon alam semula jadi.

Penghargaan

Saya ingin merakamkan setinggi-tinggi penghargaan kepada Universiti Kebangsaan Malaysia yang telah memberi kepercayaan dan peluang kepada saya sebagai pensyarah dan penyelidik. Ucapan terima kasih juga dirakamkan kepada saudara Ding Choo Ming, Roslan Abd. Shukor, Shaharir Mohamad Zain, Shahidan Radiman dan Sithi Muniandy yang telah membaca dan memberi komen selain cadangan masing-masing untuk memperbaiki draf pertama manuskrip ini. Demikian juga kepada saudara Hishamuddin Zainuddin dan Wan Ahmad Tajuddin Wan Abdullah yang telah berbincang dengan saya tentang beberapa perkara. Saya juga ingin mengucapkan terima kasih kepada

Puan Zainah Basir yang telah membantu dalam penaipan manuskrip ini. Akhir sekali, saya ingin mengucapkan terima kasih kepada Puan Faizah Ahmad yang menguruskan penerbitan syarahan perdana ini. Sebarang kelemahan dan kesalahan yang ada, adalah tanggungjawab saya sendiri.

Rujukan

- Aebi, R. 1996. *Schrödinger Diffusion Processes*. Boston: Birkhauser-Verlag.
- Blumel, R. & Reinhardt, W.P. 1997. *Chaos in Atomic Physics*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Bohm, D. & Vigier, J.P. 1954. Model of the causal interpretation of quantum theory in terms of a fluid with irregular fluctuations. *Phys. Rev.* 96: 208-216.
- Casati, G. & Chirikov, B. 1995. *Quantum Chaos, Between Order and Disorder*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Casimir, H.B.G. 1948. On the attraction between two perfectly conducting plates. *Proc. Kon. Nederl. Akad. Wet.* 51: 793-796.
- Cetto, A.M. & de la Pena, L. 1996. *The Quantum Dice. An Introduction to Stochastic Electrodynamics*. Dordrecht: Kluwer.
- Chan Shook Yee. 1997. *Penentuan Sifat-sifat Kerawakan dan Korelasi Antara Jumlah Zarah Terampai Dengan Beberapa Parameter Meteorologi*. (Tesis Projek Tahun IV, UKM).
- Cvitanovic, P. 1989. *Universality in Chaos* (2nd ed.). Bristol: Adam Hilger.
- Das, A. 1997. *Finite Temperature Field Theory*. Singapore: World Scientific.
- de Broglie, L. 1926. The new undulatory mechanics. *Compt. Rend. Acad. Sci. Paris* 183: 272-274.
- Daubechies, I. 1992. *Ten Lectures on Wavelets*. Philadelphia: SIAM.
- Einstein, A. 1905. Die von der molekularkinetischen theorie der wärme geforderte bewegung von in ruhenden flüssigkeiten suspendierten teilchen. *Annalen der Physik* 17:549-560.
- Feigenbaum, M.J. 1978: Quantitative universality for a class of nonlinear transformations. *J. Stat. Phys.* 19:25-32.
- Fényes, 1952. Eine wahrcheinlichkeits-theoretische begründung und interpretation der quantenmechanik. *Zeitschrift für Physik* 132:81-106.
- Feynman, R.P. & Hibbs, A.R. 1965. *Quantum Mechanics and Path Integrals*. New York: McGraw-Hill.
- Gammaitoni, L. *et al.* 1998. Stochastic resonance. *Rev. Mod. Phys.* 70: 223-287.

- Gauthier, D.J. 1998. Chaos has come again. *Science* 279:1156-1157.
- Gouyet, J-F. 1996. *Physics and Fractal Structures*. New York: Springer.
- Guerra, F. & Loffredo, M.I. 1980. Stochastic Equations for Maxwell field. *Lett. Nuovo Cimento* 27: 41-45.
- Guerra, F. & Ruggiero, P. 1973. A new interpretation of the Euclidean-Markov field in the framework of physical Minkowski space-time. *Phys. Rev. Letters* 31: 1022-1025.
- Gutzwiller, M.C. 1990. *Chaos in Classical and Quantum Mechanics*. New York: Springer-Verlag.
- Hénon, M. 1976. A two-dimensional mapping with a strange attractor. *Commun. Math. Phys.* 50: 69-77.
- Jamison, B. 1975. The Markov processes of Schrödinger. *Z. Wahrsch. Verw. Geb.* 32: 323-331.
- Kershaw, D. 1964. Theory of hidden variables. *Phys. Rev.* B136: 1850-1856.
- Kleppner, D. 1997. "The cat and the moon": Chaos and high precision. *Am. J. Phys.* 65:816-821.
- Klafter, J., Shlesinger, M.F. & Zumofen, G. 1996. Beyond Brownian motion. *Phys. Today* 49(2): 33-39.
- Lamb, W.E., JR. & Retherford, R.C. 1947: Finite structure of the hydrogen atom by a microwave method. *Phys. Rev.* 72: 241-243.
- Lamoreaux, S.K. 1997. Demonstration of Casimir force in the 0.6 to 6mm range. *Phys. Rev. Letters* 78: 5-8.
- Li, T. & Yorke, J.A. 1975. Period three implies chaos. *Amer. Math. Monthly* 82: 985-992.
- Lim Chee Hock, 1999. *Dimensi Fraktal bagi Rangkaian Jalan Raya Dua Bandaraya dan Beberapa Sungai Utama di Malaysia*. (Tesis Projek Tahun III, 1999).
- Lim Chee Meng, 1999. *Analisis Siri Masa Ekonomi Untuk Beberapa Kaunter Saham dan Komoditi dalam Sektor Perlombongan*. (Tesis Projek Tahun III, 1999).
- Lim Eng San, 1999. *Analisis Siri Masa Beberapa Parameter Meteorologi dan Jumlah Zarah Terampai*. (Tesis Projek Tahun III, 1999).
- Lim, S.C. 1980a. Brownian motion and quantum theory. *Buletin Fizik Malaysia* 1:204-212.
- Lim, S.C. 1980b. Euclidean electromagnetic field as Ito's random current. *Letters in Math. Phys.* 4: 465-467.
- Lim, S.C. 1980c. Some remarks on Nelson's stochastic field. *Phys. Letters* 79A: 13-15.

- Lim, S.C. 1982. Stochastic processes associated to transverse electromagnetic potential at positive temperature. *Buletin Fizik Malaysia* 3: 175-181.
- Lim, S.C. 1983a. Nelson's stochastic quantization of linearized gravitational field and its Markovian structure. *Letters in Math. Phys.* 7 : 469-478.
- Lim, S.C. 1983b. Stochastic massive spin-one field. *Phys. Letters* 135B: 417-422.
- Lim, S.C. 1984a. Stochastic quantization of electromagnetic potential in temporal gauge. *J. Fizik Malaysia* 5: 161-164.
- Lim, S.C. 1984b. Gluon propagator in temporal gauge: A simple derivation based on stochastic mechanics. *Phys. Letters* 149B: 201-203.
- Lim, S.C. 1985a. Stochastic formulations of Maxwell field in temporal gauge. *Phys. Rev.* D33: 1384 -138.
- Lim, S.C. 1985b. Stochastic field at finite temperature. *Proceedings International Symposium on Particle and Nuclear Physics*, Beijing, China. Singapore: World Scientific.
- Lim, S.C. 1986a. The connection between stochastic vector meson field and the Euclidean vector field. *Phys. Rev.* D33: 2496-2497.
- Lim, S.C. 1986b. Nonlocal stochastic field. *Proceedings of 14th International Colloquium on Group Theoretical Methods in Physics*, Seoul, Korea. Singapore: World Scientific.
- Lim, S.C. 1987a. Stochastic formulation of quantum field at finite temperature. *Proceedings Third International Conference on Path Integrals from meV to MeV*, Bangkok, Thailand. Singapore: World Scientific.
- Lim, S.C. 1987b. Finite temperature field from stochastic mechanics. *Phys. Letters* 188b: 239-245.
- Lim, S.C. 1988a. Propagator in the fully fixed temporal gauge. *Phys. Rev.* D37: 3765-3767.
- Lim, S.C. 1988b. Quantization of a gauge field in the temporal-like gauge based on stochastic mechanics. *Zeitschrift für Physik C: Particles & Fields* 41: 159-166.
- Lim, S.C. 1988c. Quantization of a gauge field based on stochastic mechanics. *Proceedings Third Asia Pacific Physics Conference*, Hong Kong.
- Lim, S.C. 1988d. Stochastic quantization of scalar field at zero and positive temperature. *J. Fizik Malaysia* 10: 103-106.
- Lim, S.C. 1989. An alternative quantization scheme for a gauge field in the spatial axial gauge. *J. Fizik Malaysia* 10: 55-58.

- Lim, S.C. 1990. Stochastic quantization in axial gauges. *Letters in Math. Phys.* 19: 115-120.
- Lim, S.C. 1991. Medan tolak sebagai titian Brown. *Laporan Teknik FSFG* 5: 123-128.
- Lim, S.C. 1992. Time-translation noninvariance of gauge field in the temporal gauge. *Proceedings Fifth Asia Pacific Physics Conference*, Kuala Lumpur.
- Lim, S.C. 1993a. Some properties of a gauge field in axial gauges. *Proceedings First Rencontre du Vietnam, Particle Physics and Astrophysics, Hanoi, Vietnam*. Cif-sur-Yvette: Editions Frontieres.
- Lim, S.C. 1993b. Time-translation noninvariance of the propagator in the $A_0 = 0$ gauge. *Phys. Rev. D*48: 2957-2960.
- Lim, S.C. 1993c. Pengkuantuman medan tolak dalam tolak paksi. *Prosiding Dua Dekad Penyelidikan Sains Bahan, Tenaga dan Hasil Tabii*. UKM, Bangi.
- Lim, S.C. 1993d. Stochastic interpretation for the propagators in the temporal gauge. *Phys. Letters* B317: 392-398.
- Lim, S.C. & Ng Chee Mang. 1994. Nelson's stochastic quantization of a gauge field in the Lorentz gauge. *Prosiding Persidangan Fizik Kebangsaan*, Kuala Lumpur.
- Lim, S.C. & Sithi, V.M. 1994. Spectral properties of Riemann-Liouville fractional Brownian motion. Sixth Asia-Pacific Physics Conference, Brisbane, Australia.
- Lim, S.C. 1995. Some properties of one-sided fractional Brownian motion. 19th IUPAP International Conference on Statistical Physics, Xiamen, China.
- Lim, S.C. & Sithi, V.M. 1995. Asymptotic properties of the fractional Brownian motion of Riemann-Liouville type. *Phys. Letters A* 206: 311-317.
- Lim, S.C. & Sithi, V.M. 1996. Some properties of one-sided fractional Brownian motion. In *Advances in Theoretical Physics*: 200-209 (edited by Bernido, C.C. & Bernido, Victoria) Research Center for Theoretical Physics, Jagna.
- Lim, S.C. 1996. Anomalous diffusion in terms of one-sided fractional Brownian motion. *Proceedings National Physics Conference*, Serdang.
- Lim, S.C. 1997a. Comment on stochastic equations for spin-2 fields in the quasi-Maxwellian formulation. *Phys. Letters* A225:35-363.
- Lim, S.C. 1997b. On a class of multifractional Brownian motion. *Proceedings Seventh Asia Pacific Physics Conference*, Beijing, China.
- Lim, S.C. 1998. Stochastic massless spin-2 field. *Current Topics in Physics*, vol. 2: 693-698. Singapore: World Scientific.

- Lim, S.C. & Sithi, V.M. 1999. On some generalizations of fractional Brownian motion. Submitted for publication.
- Lim Thong Leng, 1994. *Struktur Fraktal Tentang Bentuk Muka Bumi Malaysia*. (Tesis Projek Tahun IV, UKM).
- Lorenz, E.N. 1963. Deterministic non-periodic flow. *J. Atmos. Sci.* 20: 130-141.
- Mandelbrot, B. & Ness, J.W. Van 1968. Fractional Brownian motions, fractional noises and applications. *SIAM Review* 10: 422-437.
- Mandelbrot, B. 1982. *The Fractal Geometry of Nature*. San Francisco:Freeman.
- Meyer, Y. 1993. *Wavelets: Algorithms and Applications*. Philadelphia: SIAM.
- Milonni, P.W. 1994. *The Quantum Vacuum*. San Diego: Academic Press.
- Mostepanenko, V.M., Trunov, N.N. & Znajek, R.L. 1997. *The Casimir Effects and Its Applications*. Oxford: Clarendon Press.
- Nagasawa, M. 1993. *Schrödinger Equations and Diffusion Theory*. Boston: Birkhauser Verlag.
- Namiki, M. 1992. *Stochastic Quantization*. New York: Springer-Verlag.
- Nelson, E. 1966. Derivation of the Schrödinger equation from Newtonian mechanics. *Phys. Rev.* 150: 1079-1085.
- Nelson, E. 1967. *Dynamical Theories of Brownian Motion*. Princeton: Princeton University Press.
- Nelson, E. 1985. *Quantum Fluctuations*. Princeton: Princeton University press.
- Nottale, L. 1993. *Fractal Space-Time and Microphyscs: Towards a Theory of Scale Relativity*. Singapore: World Scientific.
- Novak, M.M. 1998. *Fractals and Beyond: Complexities in Sciences*. Singapore: World Scientific.
- Parisi, G. & Wu, Y.S. 1981. Perturbation theory without gauge fixing. *Scientia Sinica* 24: 483-496.
- Parthasarathy, K.R., 1992. *An Introduction to Quantum Stochastic Calculus*. Basel: Birkhäuser Verlag.
- Peitgen, H-O. & Richter, P.H. 1986. *The Beauty of Fractals*. New York: Springer-Verlag.
- Rajan Murgan, 1999. *Analisis Siri Masa Ekonomi untuk Beberapa Saham Syarikat dan Komoditi dalam Sektor Pertanian*. (Tesis Projek Tahun IV, 1999).
- Reynaud, S. et. al. 1997. *Quantum Fluctuations*. Amsterdam: Elsevier Science.

- Ruelle, D. & Takens, F. 1971. On the nature of turbulence. *Commun. Math. Phys.* 20: 167-192.
- Schrödinger, E. 1931. Über die Umkehrung der Naturgesetze. *Berliner Sitzungsberichte* 144-153.
- Sithi, V.M. 1994. *Beberapa Ciri Serta Kegunaan Gerakan Brown Pecahan* (Tesis Ijazah Sarjana, UKM).
- Sithi, V.M. & Lim, S.C. 1994a. Beberapa ciri dan kegunaan gerakan Brown pecahan Riemann-Liouville. *Laporan Teknik FSFG*. Jilid 4: 126-134.
- Sithi, V.M. & Lim S.C. 1994b. Modelling of fracture profiles based on sample paths of generalized Brownian motion. *Prosiding Persidangan Fizik Kebangsaan* 93, Kuala Lumpur: 282-288.
- Sithi, V.M. & Lim, S.C. 1995. On the spectra of Riemann-Liouville fractional Brownian motion. *J. Phys. A: Math. Gen.* 28: 2995-3003.
- Smoluchowski, M.V. 1923. *Abhandlung Über die Brownsche Bewegung und Verwandte Erscheinungen*. Leipzig: Akademii-Verlag.
- Tsallis, C. 1997. Lévy distribution. *Phys. World* 10(7): 42-45.
- Umezawa, H., Matsumoto, H. & Tachiki, M. 1982. *Thermo Field Dynamics and Condensed States*. Amsterdam: North Holland.
- Wiggeren, G.D. Van & Roy, R. 1998. Communication with chaotic lasers. *Science* 279: 1198-1200.
- Wilkinson, P.B. et. al. 1996. Observation of 'scarred' wavefunctions in a quantum well with chaotic electron dynamics. *Nature* 380: 608-610.
- Wilson, K.G. 1983: The renormalization group and critical phenomena. *Rev. Mod. Phys.* 55: 583-600.
- Yam, P. 1997. Exploring zero-point energy. *Sci. American* 277 (No. 6): 82-87.
- Zambrini, J.C. 1986. Stochastic mechanics according to E. Schrödinger. *Phys. Rev. A* 33: 1532-1548.

Lim Swee Cheng

Lim Swee Cheng dilahirkan pada 1947 di Tangkak, Johor. Beliau mendapat pendidikan awal di sekolah Rendah Cina Chee Meng di kampungnya. Kemudian, beliau meneruskan pelajaran di Sekolah Menengah Ledang di Tangkak sehingga SPM dan Sekolah Tinggi Muar sehingga lulus STP pada 1968. Pada tahun yang sama, beliau memasuki Universiti Malaya di bawah tajaan biasiswa Sultan Ismail, Johor sehingga berjaya dikurniakan ijazah B.Sc (Hons) pada 1971 dan beliau telah dilantik menjadi tutor di Jabatan Fizik, Universiti Kebangsaan Malaysia di Jalan Pantai Baru, Kuala Lumpur. Pada 1972, beliau melanjutkan pengajian pasca-siswah di University of London dan dikurniakan ijazah PhD pada 1975.

Beliau telah dilantik sebagai pensyarah pada 1975, dinaikkan ke pangkat Profesor Madya pada 1980 dan seterusnya ke jawatan Profesor pada 1991 hingga sekarang.

Bidang penyelidikan beliau ialah penerapan kaedah stokastik dalam fizik kuantum, khususnya teori medan kuantum. Kini, beliau giat menjalankan penyelidikan dalam siri masa fraktal/fraktal-berganda dan penggunaan model stokastik dalam sistem fizis.

Beliau telah dipilih sebagai “Associate Fellow of International Centre for Theoretical Physics” untuk 1981-1985 dan Alexander van Humboldt Research Fellow pada 1987-1988. Beliau juga pernah menjadi saintis pelawat/saintis jemputan ke International Centre for Theoretical Physics (ICTP), European Organization for Nuclear Research/European Laboratory for Particle Physics (CERN), dan Forschungszentrum Bielefeld-Bochum-Stochastik (BiBoS). Sementara itu, beliau juga pernah dianugerahkan geran penyelidikan daripada UNESCO, selain dilantik menjadi pakar perunding untuk UNESCO.

Selain itu, beliau telah juga memegang beberapa jawatan yang berlainan dalam organisasi peringkat kebangsaan dan juga antarabangsa, termasuk sebagai ahli majlis di Institut Fizik Malaysia (IFM), Persatuan Sains Malaysia; editor *Jurnal Fizik Malaysia* (IFM), ketua editor *Buletin Fizik* (IFM) dan *Berita Fizik IFM*; ketua editor *Asian Physics Education Network (AS-PEN) Newsletter*; ketua editor *Asia Pacific Physics News* (sebuah buletin yang ditaja ICTP, UNESCO dan Japanese Physical Society). Buat masa kini, beliau adalah felo kepada Institut Fizik Malaysia, ahli majlis Association of Asia Pacific Physical Societies (AAPPS), setiausaha ASEAN Institute of Physics, penasihat kepada Regional Center for Theoretical Physics (Phillipines), ahli Advisory Committee of Indonesian Journal of Physics, ketua editor *AAPPS Bulletin*, dan juga pakar pengulas *Mathematical Review* (American Mathematical Society).

Beliau juga aktif dalam mengelola beberapa persidangan peringkat kebangsaan dan antarabangsa, bermula dengan menjadi setiausaha kepada National Physics Conference pada 1979 dan yang terkini sebagai pengerusi jawatankuasa penganjur International Conference on Frontiers in Quantum Physics pada 1997. Selain menjadi penyunting untuk beberapa prosiding persidangan fizik dan pengarang/pengarang bersama beberapa buah buku, beliau telah juga menghasilkan beberapa makalah di peringkat kebangsaan dan antarabangsa.