

## MODUL-1: PENGANTAR KE FISIKA KWANTUM

### 1. Pendahuluan

Salah satu pendapat Eddington<sup>1</sup> yang digarisbawahi oleh Schrodinger<sup>2</sup> adalah tentang gambaran hasil interaksi antara subjek pengamat dengan objek yang diamati, yaitu berupa bayang-bayang dari pertunjukan pengalaman kehidupan yang pernah dialami sang pengamat. Sebagai contoh, di antaranya, mencari-cari bayang-bayang tangannya yang tersembunyi di bawah bayang-bayang meja, atau mencari-cari bayang-bayang tumpahan tinta yang tersembunyi di bawah bayang-bayang lembar kertasnya. Kegiatan ilmuwan ini sangat berhubungan dengan dunia bayang-bayang sekalipun dalam kegiatannya yang terkini. Seorang ilmuwan tidak dapat membuat pernyataan yang faktual mengenai suatu objek tanpa melakukan komunikasi, dan melalui komunikasi inilah interaksi fisis berlangsung. Dalam proses mengamati suatu objek diperlukan misalnya sorotan suatu berkas cahaya sebagai media komunikasinya, yang dari pantulannya sang pengamat dapat menerima pertanda apakah langsung lewat mata atau instrumen pengamatan. Tentu saja seorang ilmuwan tidak dapat memperoleh pertanda apapun apabila objeknya terisolasi.

Objek kajian ilmu kealaman adalah realitas fisis, seperti akan dijelaskan pada Gambar-1. Yang bersifat kebendaan dari realitas fisis adalah materi dan energi, dan media interaksi di antara ketiganya adalah tentang gerak. Tujuan ilmu kealaman adalah untuk menelaah ketertiban alam yang tercermin dari sifat-sifat materi, energi dan gerak. Meniru ketertiban alam untuk kemaslahatan kehidupan adalah jalan pengamatan keilmuan untuk melahirkan teknologi. Secara timbal balik kemajuan teknologi akan menambah kemampuan pengamat dalam mempelajari objek kajiannya. Kemudian ternyata, keterbatasan upaya sang pengamat dalam mencerap pertanda dari ketertiban alam yang menyangkut materi, energi dan gerak, dapat berdampak pada kerusakan alam tempat sang pengamat berada. Sumber kerusakan ini berada pada kelemahan komunikasi antara sang pengamat dengan objek yang diamati. Oleh karena pengalaman ini, maka objek kajian ilmu kealaman yang lebih bersifat ke-serbautuhan-an (holisme) meluas menjadi materi, energi dan informasi, sedangkan pengetahuan tentang gerak tetap menjadi landasan utama dalam berkomunikasi karena informasi dapat dipaketkan melalui aliran materi, energi dan informasi.

### 2. Pendewasaan Mekanika Klasik

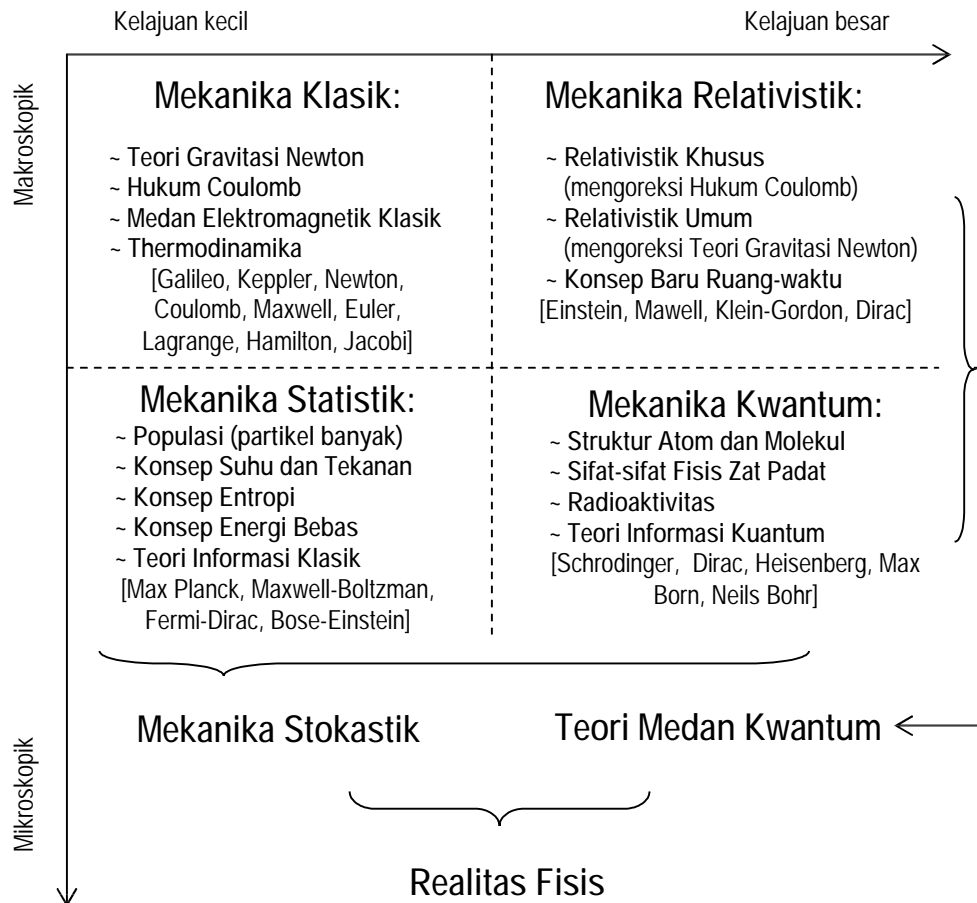
Pernyataan bagi realitas gerak suatu benda memerlukan dimensi ruang dan waktu, yaitu berapa lama waktu yang diperlukan benda tersebut untuk menempuh suatu jarak perpindahan tempat. Walaupun sudah terbiasa dengan gejala fisis seperti itu, tetapi dapat saja timbul pertanyaan mana yang lebih dulu harus dikonsepsikan: [1] apakah benda harus terlebih dahulu tercipta, kemudian disediakan ruang dan waktu ? [2] ataukah ruang dan waktu terlebih dahulu tercipta kemudian benda ditempatkan di dalamnya ?. Pertanyaan ini pada awal abad ke-20 menjadi hangat terutama

---

<sup>1</sup> Eddington, A.S., (1940), The Nature of Physical World, Cambridge Univeristy Press.

<sup>2</sup> Schrödinger, E., (1993), What is Life ? with Mind and Matter and Autobiographical Sketches, Canto, pp.121-122.

bagi pengembangan teori tentang asal-usul jagat raya ini. Tampaknya pada masa kehidupan Sir Isaac Newton di abad ke-17 kedua pertanyaan itu belum menjadi amunisi dalam aktualisasinya, tetapi aktualisasi kreativitasnya lebih dicurahkan pada upaya mengkonstruksi hukum-hukum tentang gerak berdasarkan dokumen tertulis dari Galileo dan Kepller.



Gambar-1. Teropong terhadap realitas fisis memerlukan sejumlah perangkat lunak: mekanika klasik, mekanika statistik, mekanika stokastik, mekanika relativistik, mekanika kuantum, atau teori medan kuantum, tergantung pada elstisitas sorotan apakah pada kelajuan tinggi atau rendah, apakah pada wilayah makroskopis atau mikroskopis, dan apakah bagi partikel tunggal atau banyak.

Proses aktualisasi Newton merupakan proses kreatif yang dimilikinya dalam kegiatan 'mencipta' sebagai bagian dari bakat bawaan (genetika) dan karena pergaulan kebudayaan (memetika). Melalui aspek personal, Newton telah memperlihatkan berbagai wujud kreativitasnya dalam mengajukan kaidah-kaidah matematika. Melalui aspek kebudayaan, Newton telah dapat

menjelaskan hukum-hukum Kepler<sup>3</sup> lebih lanjut yang berbasis kepada teori gravitasinya. Yang tersisa adalah inkonsistensi hukum-hukum Newton, yaitu: [1] bahwa konsep ruang dan waktu masih merupakan wadah bagi materi untuk eksis di dalamnya. Waktu berjalan dengan mutlak bagi kerangka gerak manapun, [2] konsep massa diam mengarah kepada perubahan percepatan saja apabila terdapat gaya yang berpengaruh, [3] perumusan menjadi tidak simetris bagi kerangka yang berbeda, [4] memulai penelaahan setelah permasalahan terbagi secara parsial.

### 3. Langkah Mekanika Klasik Ke Arah Konsep Ruang-Waktu dengan Mekanika Relativistik

Sir Isaac Newton berjasa dalam mengoreksi, mendefinisikan ulang, dan melakukan berbagai penyesuaian terhadap penjelasan Galileo dan Kepler, kemudian Einstein melanjutkan pemikiran Newton dengan pengujian, perbaikan dan perluasan hukum-hukum dasarnya tentang gerak dengan melibatkan alam semesta secara keseluruhan dalam dwikaryanya yang dikenal dengan teori relativitas khusus dan umum. Barulah kemudian Hawking dengan para kosmologis lainnya dapat menghasilkan penjelasan modern tentang gravitasi dan beberapa gaya interaksi lainnya yang menjadi perhatian para kosmologis.

Postulat yang terpenting dalam teori relativitas Einstein adalah bahwa kecepatan cahaya itu bersifat absolut (mutlak) tidak bergantung dari mana ia dilihat dan dari mana ia terpancar: apakah dari kerangka acuan yang ini atau itu yang keduanya memiliki gerak relatif. Sehingga berakibat pada konsep ruang-waktu yang relatif dan konsep massa-energi yang saling dapat dipertukarkan. Dengan begitu maka kata tanya '*kapan ?*' dan '*di mana ?*' menjadi satu kata tanya '*mana ?*' dalam koordinat ruang-waktu (4 dimensi) karena keduanya terkait. Dalam tinjauan ruang Minkowski koordinat ruang-waktu 4-dimensi dalam kerangka bergerak dan dalam kerangka diam memiliki sifat simetri, bahwa kerangka tinjauan boleh berbeda, tetapi struktur pemikiran yang diungkapkan dalam formula tidak ada perbedaan.

Hawking dan Penrose sependapat dengan Einstein bahwa posisi-posisi (titik-titik) dalam peta cakrawala ruang-waktu satu sama lain saling memiliki keterkaitan. Dengan kata lain, dua peristiwa dapat terhubung satu sama lain melalui komunikasi cahaya atau dengan sinyal yang memiliki kecepatan sedikit di bawah kecepatan cahaya. Peristiwa dulu di situ dengan peristiwa kini di sini satu sama lain terhubung. Jarak antara di situ dan di sini, dan kurun antara dulu dan kini, menyatu dalam suatu metrik lintasan berdimensi empat mengikuti transformasi Lorentz. Dalam teori relativitas, dua buah muatan yang melakukan interaksi Coulomb tidak lagi instant seperti pada mekanika klasik, tetapi satu sama lain berkomunikasi terlebih dulu dengan masing-masing gelombang elektromagnetik. Oleh alasan ini, Hukum Coulomb menjadi gugur. Begitu pula harus terjadi pada interaksi gravitasi Newton sehingga perlu diperbaiki. Dengan begitu, maka konsep interaksi ini akan membentuk konsep mengenai ruang-waktu bersama dengan kehadiran materi.

---

<sup>3</sup> Hukum-hukum Kepler: (1) Orbit setiap planet berbentuk ellips dan matahari berada pada salah satu titik apinya; (2) Pada selang waktu yang sama, jejari orbit menyapu areal yang sama; (3) Pangkat dua dari perioda setiap planet berbanding lurus dengan pangkat tiga dari jejari orbitnya.

Kesatuan ukuran jarak-kurun dalam cakrawala ruang-waktu diakui oleh Friedman (1922), setelah menyelesaikan persamaan Einstein, sebagai sesuatu yang memiliki sifat mengembang (*expanding universe*). Bahkan grup lainnya dari Rusia (1963) sampai kepada pendapat yang menyatakan bahwa alam semesta ini tidak hanya berkembang tetapi juga menyusut, sehingga alam semesta ini bernasib kembang-kempis, paling tidak pada saat-saat permulaan. Hawking dan Penrose lebih mementingkan awal kejadiannya, yaitu bahwa alam semesta ini berasal dari suatu titik ketiadaan/kelenyapan (singularitas). Tidak hanya energi dan materi, tetapi juga ruang dan waktu semuanya memiliki permulaan dari suatu titik yang sama<sup>4</sup>.

Implikasi dari transformasi Lorentz bermanfaat dalam perumusan kuantitas mekanika lainnya, seperti gaya, momentum dan energi dengan menggunakan waktu jagat (*proper time*). Penggunaan waktu jagat (*proper time*) sangat membantu menyelesaikan masalah saling tuding antara pengamat dengan menggunakan jamnya masing-masing pada kerangka bergerak dan diam, yang menyatakan bahwa lawannya yang memiliki waktu mulur ketimbang pengalamannya. Di sinilah pemikiran menunjukkan bahwa kebenaran sangat tergantung pada konteks dan kompleksitas benda-benda langit lainnya, selisih antara satu pendapat dengan pendapat lain ditelusuri pada lintasan jagat (*world line*) yang dapat berupa masalah perkara waktu (*time-like*) atau berupa perkara berbau ruang (*space-like*).

#### 4. Langkah Mekanika Klasik Ke Arah Jagat Mikroskopik Melalui Mekanika Kwantum

Mekanika kwantum (*Quantum Mechanics*) adalah mekanika yang dapat memberikan penjelasan tentang perilaku materi dan cahaya dalam skala atomik (sistem mikroskopik), yaitu skala yang tidak merupakan wilayah pengalaman biasa manusia. Pada mulanya orang frustrasi dengan menyangka bahwa perilaku zarah terkadang bersifat materi, terkadang bersifat gelombang, bahkan terkadang tidak bersifat kedua-duanya atau memang memiliki perilaku dualisme, yaitu berperilaku sebagai materi dan cahaya secara serempak atau tergantung pada alat ukur yang mendeteksinya. Tekateki ini dicerahkan oleh sederetan nama, yaitu E. Schrödinger, W. Heisenberg, dan M. Born pada sekitar '*kurun tonggak sejarah*' mekanika kwantum, yaitu: tahun 1926 ~ 1927. Pencerahan itu, bagi R. Feynman (1963) tetap merupakan misteri karena tidak akan dapat ditemukan realitasnya dalam pengalaman manusia<sup>5</sup>, oleh karena itu ia mengatakan bahwa:

In reality, it contains the only mystery. We cannot make the mystery go away by 'explaining' how it works. We will just tell you how it works. In telling you how it works we will have told you about the basic peculiarities of all quantum mechanics.

Walaupun mekanika kwantum mengkaji dunia misteri menurut skala kemampuan deteksi mata, tetapi interaksi manusia dengan dunia misteri tersebut semakin akrab seperti pengembangan model atom dan inti atom, perilaku kelistrikan & kemagnetan, dan aneka gejala mikroskopik

---

<sup>4</sup> Apakah mereka yang kafir itu tidak mengetahui bahwa langit dan bumi itu dahulunya segumpal kabut. Lalu keduanya Kami ceraikan. Selanjutnya, semua benda hidup Kami jadikan dari air, mengapa mereka tidak beriman juga ? [QS Al-Anbiya, 21:30].

<sup>5</sup> Dialah yang menciptakan langit dan bumi dengan benar. Dan benarlah perkataan-Nya di waktu Dia mengatakan 'Kun fayakuun' dan ditangan-Nya-lah segala kekuasaan di waktu sangkakala ditiup. Dia mengetahui yang ghaib dan yang nampak. Dan Dialah Yang Maha Bijaksana lagi Maha Mengetahui, [QS Al-An'aam, 6:73].

lainnya. Dalam bahasan mekanika kuantum, informasi tentang perilaku zarah terkumpul dalam atau dapat diperoleh dari apa yang disebut dengan '*fungsi-diri*' (*eigenfunction*). Bentuk *fungsi-diri* suatu zarah berupa fungsi gelombang (sinusoid). Dalam tampilan satu dimensi, fungsi gelombang merambat ke kanan, sedangkan pasangannya merambat ke kiri. Dalam tampilan dua dimensi, fungsi gelombang menyebar ke luar, sedangkan pasangannya merasuk ke dalam. Dalam tampilan tiga dimensi, fungsi gelombang memancar ke luar, sedangkan pasangannya menguncup ke dalam. Perkalian antara fungsi gelombang dan pasangannya menghasilkan nilai probabilitas (peluang) bagi kuantitas posisi (koordinat dalam ruang), kuantitas gerak (momentum linier, sudut, spin atau total), dan kuantitas energi. Sehingga salah satu hasil kajian dari mekanika kuantum adalah mencari nilai rata-rata dari kuantitas fisis (posisi, momentum, dan energi) bagi suatu zarah yang sedang diamati.

Setiap objek pengamatan (*observable quantities: position, momentum, and energy*) mengenai perilaku suatu zarah akan diwakili oleh suatu operator yang apabila beroperasi pada fungsi-dirinya, maka dapat memberikan informasi tentang kuantitas fisis yang diinginkan operator. Langkah berikutnya adalah mencari nilai rata-rata beserta simpangan pengukurannya (kesalahannya) melalui nilai probabilitas yang diperoleh dari perkalian antara fungsi-diri dan pasangannya. Nilai simpangan ditentukan melalui penghitungan akar kwadrat rata-rata atau '*root mean square*' dalam statistik. Terdapat kenyataan bahwa kesalahan (simpangan) dari hasil pengukuran kuantitas momentum dibatasi oleh kesalahan dalam pengukuran kuantitas posisi. Pernyataan itu bermakna bahwa jika terjadi penyusutan simpangan dalam pengukuran kuantitas gerak akan mengakibatkan pembesaran simpangan dalam pengukuran posisi dan begitu pula sebaliknya. Fenomena ketidak-tentuan ini diungkapkan sebagai prinsip ketidakpastian W. Heisenberg.

Kondisi *gerak bebas* suatu zarah dalam suatu ruang memiliki arti bahwa dalam ruang tersebut tidak terdapat pengaruh medan apapun, sehingga energi yang menguasai zarah tersebut adalah hanya energi kinetik dan geraknya memiliki lintasan yang lurus. Ketika gerak suatu zarah telah dipengaruhi oleh suatu medan, maka lintasan geraknya akan (dapat) membelok, menghambur (*scattering*), atau terperangkap menjadi gerak melingkar. Peran mekanika kuantum dalam hal ini berupaya mencari persamaan gerak zarah yang sedang diamati dengan memperhatikan energi potensial dari medan yang mempengaruhinya. Persamaan gerak bagi zarah yang diamati itu dikenal sebagai persamaan Schrödinger.

Persamaan Schrödinger diekspresikan dalam bentuk persamaan diferensial paling tidak termasuk ke dalam kategori orde kedua dan bersifat linier. Solusi persamaan Schrödinger adalah *fungsi-diri* dari zarah yang sedang dalam pengamatan. Seperti telah dijelaskan sebelumnya, dari bentuk *fungsi-diri* itulah berbagai informasi mengenai perilaku gerak zarah dapat diperoleh. Dalam tinjauan energi, bentuk persamaan Schrödinger bagi zarah elektron yang dipengaruhi oleh medan inti atom merupakan proses beroperasinya operator energi total (Hamiltonian) yang menghasilkan *nilai-diri* (*eigen value*) yang berhubungan dengan tingkatan atau aras-aras atau petala-petala tempat elektron mengelilingi inti atom.

Einstein pernah bertanya kepada W. Heisenberg di Berlin pada tahun 1926: '*What was the philosophy underlying your kind of very strange theory? The theory looks quite nice, but what did*

*you mean only observable quantities.*' W. Heisenberg menjawab bahwa ia tidak percaya lagi pada keberadaan orbit elektron, tetapi lebih percaya kepada keberadaan jejak-jejak dalam kamar kabut. Kemudian Einstein menimpali: *'But you must realize that it is completely wrong.'* W. Heisenberg menjawab lagi: 'Tetapi kenapa, sementara hal ini tidak benar sedangkan anda menggunakannya ? Einstein mengatakan bahwa: *'I may have used it, but still it is nonsense !'* W. Heisenberg menyimpulkan bahwa pembicaraan itu menegaskan bahwa pendapat Einstein tentang *observables quantities* adalah sebagai berikut:

Observation means that we construct some connections between a phenomenon and our realization of the phenomenon. There is something happening in the atom, the light is emitted, the light hits the photographic plate, we see the photographic plate and so on and so on. In this whole course of events between the atom and your eye and your consciousness you must assume that everything works as in the old physics. If you would change the theory concerning the sequence of events then of course the observation would be altered.

Bagi W. Heisenberg, penegasan Einstein tersebut sangat bermanfaat dalam penelitian selanjutnya bersama dengan Niels Bohr. Penegasan itu sekaligus mengingatkan bahwa akan sangat membahayakan apabila hanya meneliti tentang '*observable quantities*', padahal di samping semua kuantitas yang dapat diamati secara langsung, akan banyak hal pula yang dimungkinkan untuk dapat teramati secara tidak langsung. Akhirnya W. Heisenberg mengakui bahwa: *' This was that one should not stick too much to one special group of experiments; ones should rather try to keep in touch with all the developments in all the relevant experiments so that one should always have the whole picture in mind before one tries to fix a theory in mathematical or other languages.'*

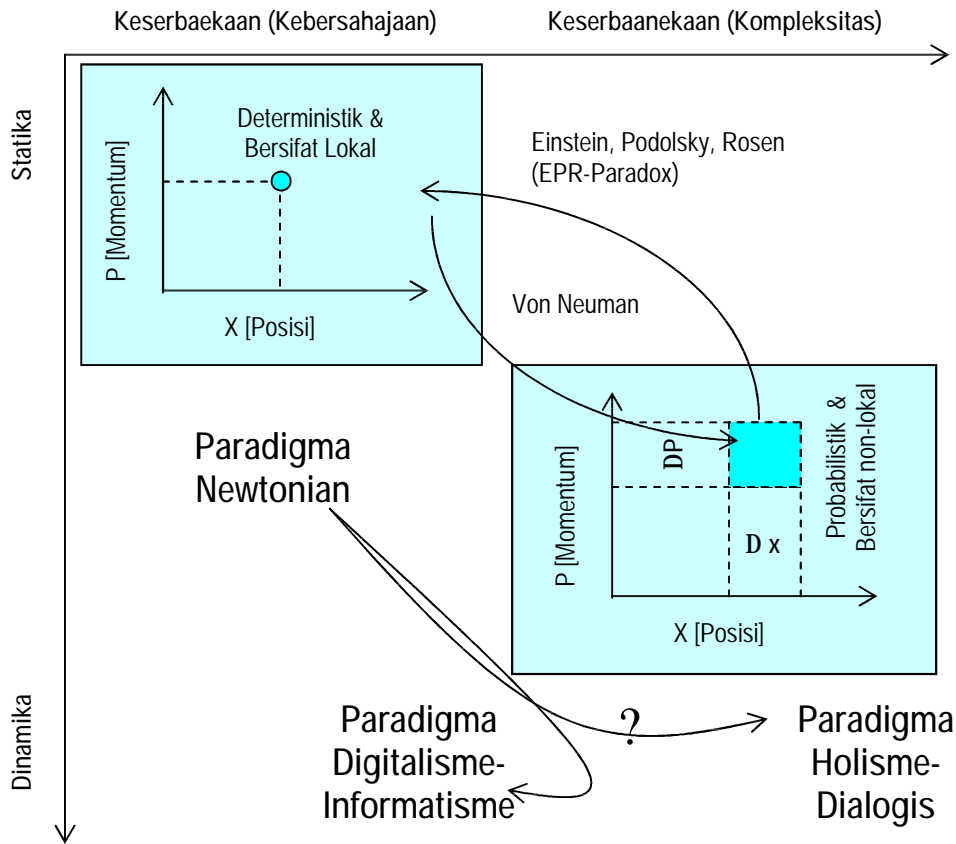
## 5. Hikmah Perkembangan Ilmu Kealaman Pada Kehidupan dan Penghidupan

Sifat deterministik dan lokal yang berbasis pada mekanika klasik (Newtonian) dan sifat probabilistik dan non-lokal yang berbasis pada mekanika kuantum dipetakan pada sumbu keserbaakaan-keserbaanekaan dan sumbu statika-dinamika, seperti pada Gambar-2. Paradigma holisme-dialogis (HD) membawa logika berpikir ke arah '*deep ecology*'<sup>6</sup>, sedangkan Digitalisme-Informatisme (DI) membawa logika berpikir ke arah '*bioregionalism*'<sup>7</sup>. Kedua paradigma ini berupaya memperbaiki inkonsistensi paradigma Newtonian, yaitu yang membawa logika berpikir berubah-ubah dari satu tempat ke tempat lain (tidak simetris) dengan titik akhir analisis (penyimpulan) berada pada wilayah sempit yang mengesampingkan keterkaitannya dengan wilayah lain. Dalam hubungannya dengan kata '*development*'<sup>8</sup>, ketiga paradigma tersebut akan membentuk fleksibilitas sistem operasional yang berbeda terutama dalam menghadapi gelombang perubahan.

<sup>6</sup> Wawasan ekologi mendalam (*deep ecology*) adalah ekologi dengan orientasi/wawasan lingkungan hidup berbasis metafisis dan spiritual terdalam dan kokoh (Rudolf Bahro [?]).

<sup>7</sup> The goal of an alternative bioregional economic development structure would be to make each individual bioregion as internally self-reliant across as broad a spectrum of production as possible (Aberley in P.E. Perkins, 1998).

<sup>8</sup> Memiliki kesepadanan dengan pengembangan yang memanfaatkan sumberdaya dalam wilayah sendiri, dan dengan pembangunan yang memanfaatkan sumberdaya dalam dan luar wilayah sendiri.



Gambar-2 Peta paradigma Newtonian, Digitalisme-Informatisme (DI) dan Holisme-Dialogis (HD) dalam wilayah keberlakuan mekanika klasik dan kuantum.

## 6. Penutup

Berkembangnya mekanika kuantum memudahkan pandangan yang bersifat mekanistik, kemutlakan, deterministik, dan parsial. Fenomena alam tidak lagi dipandang sebagai dinamika yang linier, mutlak dan deterministik. Berkat kompleksitas permasalahan, maka fenomena alam dipandang sebagai dinamika non-linier, nisbi dan probabilistik. Hubungan sebab-akibat menjadi tidak tunggal, seperti keadaan masa kini tidak hanya disebabkan oleh satu-satunya sejarah masa lalu yang teralami, begitu pula keadaan masa depan tidak harus sesuai dengan perkiraan skenario masa kini, mungkin saja meleset. Berkat jaringan interkoneksi yang kompleks, maka fenomena alam tidak lagi ditinjau secara parsial, tetapi harus ditinjau secara menyeluruh. Sebagai kenyataan dewasa ini paradigma ilmu pengetahuan (telah) mulai bergeser dari reduksionisme menuju holisme. Hal ini memberikan arah kepada kecenderungan kajian dari yang monodisiplin, menjadi multidisiplin, transdisiplin, atau interdisiplin.