BUKU RANCANGAN PENGAJARAN (BRP)

MATA KULIAH

TEORI MEDAN KUANTUM

oleh

Handhika Satrio Ramadhan, Ph.D.

Program Studi S1 Fisika
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Indonesia
Depok

Desember 2017

PENGANTAR

Buku Rancangan Pembelajaran (BRP) berisi rencana-rencana pembelajaran selama satu semester, disusun untuk digunakan sebagai acuan pembelajaran mata kuliah Teori Medan Kuantum di Program Studi S1 Fisika FMIPA UI. Mata kuliah Teori Medan Kuantum ini diselenggarakan pada semester 7 program studi sarjana Fisika untuk kelompok bidang peminatan Fisika Nuklir dan Partikel Teoretik. Mata kuliah ini mewajibkan telah lulusnya mata kuliah Mekanika Klasik, Medan Elektromagnetik 1, Teori Medan Klasik, Mekanika Kuantum 1 dan Mekanika Kuantum 2 sebagai prasarat.

Di kuliah ini, mahasiswa akan mempelajari kuantisasi medan-medan fundamental di alam. Mahasiswa juga akan belajar memformulasikan medan-medan tersebut dalam bahasa yang (relativistik). Porsi terbesar kuliah ini akan dialokasikan untuk membahas mengenai medan skalar, gauge dan medan fermion. Selain kuantisasi mereka, kuliah ini juga akan membahas tentang simetri (baik ruang-waktu maupun internal). Secara khusus, penekanan akan difokuskan pada teori-teori yang invarian terhadap simetri global maupun lokal, Abelian maupun non-Abelian.

Buku Rancangan Pengajaran ini disusun sebagai acuan dalam proses pembelajaran, baik bagi dosen maupun mahasiswa sehingga materi dapat tersampaikan dengan baik dan tujuan pengajaran mata kuliah ini dapat dicapai.

Depok, November 2017

Handhika Satrio Ramadhan, Ph.D.

I. InformasiUmum

1.	Nama Program Studi / JenjangStudi	:	Fisika / S1
2.	Nama Mata Kuliah	:	Teori Medan Kuantum
3.	Kode Mata Kuliah	:	SCFI604413
4.	Semester Ke-	:	7
5.	Jumlah SKS	:	4 SKS
6.	MetodePembelajaran	:	Kelas Interaktif
7.	Mata Kuliah yang MenjadiPrasyarat	:	Mekanika Klasik, Teori Medan Elektromagnetik, Teori Medan Klasik, Mekanika Kuantum 1, Mekanika Kuantum 2
8.	MenjadiPrasyaratuntuk Mata Kuliah	:	Skripsi
9.	Integrasi Antara Mata Kuliah	:	Tidakada
10.	DosenPengampu	:	Handhika Satrio Ramadhan, Ph.D.
11.	Deskripsi Mata Kuliah	:	Teori relativitas khusus, formulasi Lagrangian dan Hamiltonian untuk sistim kontinu, teorema konservasi untuk sistim kontinu dan tensor energi-momentum. Lagrangian dari medan relativistik klasik seperti medan skalar dan medan elektromagnetik. Lagrangian medan fermion. Simetri internal. Transformasi global. Transformasi lokal. Quantum Electrodynamics (QED). Transformasi grup non-Abelian. Renormalisasi.

II. CapaianPembelajaran Mata Kuliah (CPMK) dan Kemampuan pada AkhirTahapPembelajaran (Sub-CPMK)

A. CPMK

Setelah mengikuti mata kuliah ini, mahasiswa diharapkan mampu memahami kuantisasi medan-medan fundamental melalui formalisme *second quantization*. Mahasiswa juga mampu menarik hubungan antara simetri suatu Lagrangian dengan kuantitas kekal, secara khusus antara invariansi terhadap transformasi fase (baik global maupun gauge) dan kekekalan muatan Noether. Diharapkan pula mahasiswa memahami konsep invariansi terhadap transformasi U(1) (Abelian) yang menjadi dasar bagi teori QED (*quantum electrodynamics*), maupun transformasi non-Abelian yang menjadi dasar bagi *Standard Model*. Terakhir, mahasiswa diharapkan memahami formalisme *Path Integral* sebagai alternatif dalam mengkuantisasi medan, mengenal dasar-dasar teknik renormalisasi, dan menyadari pentingnya konsep Perusakan Simetri secara Spontan (*Spontaneous Symmetry Breaking*) dalam unifikasi interaksi-interaksi fundamental di alam.

B. Sub-CPMK

1. Memahami transformasi Lorentz (C1)
2. Memformulasikan konsep elektrodinamika Maxwell secara kovarian (C2)
3. Mengenal konsep Lagrangian dan prinsip aksi minimum untuk sistem yang kontinu (C1)
4. Menurunkan persamaan gerak dari Lagrangian untuk medan elektromagnetik (Maxwell) dan medan scalar (Klein-Gordon) (C3)
5. Mengenal medan Dirac (Fermion) (C1)
6. Menjelaskan hubungan antara simetri dengan kuantitas yang kekal, dalam kerangka teorema Noether (C3)
7. Memahami tensor energi momentum (C3)
8. Mengenal konsep transformasi gauge (C1)

9. Memformulasikan Lagrangian medan skalar yang invarin terhadap transformasigauge (Abelian maupun non-Abelian) (C2)
10. Memahami teori elektrodinamika kuantum (*quantum electrodynamics*) (C1)
11. Melakukan kuantisasi kanonik dan medan-medan fundamental (C3)
12. Memahami metode *Feynman Path Integral* dan aturan Feynman sebagai metode alternatif mengkuantisasi medan (C3)
13. Memahami teori perturbasi dan teorema Wicks (C3)
14. Menggambar diagram Feynman untuk proses-proses sederhana (C2)
15. Menghitung matriks-S dan penampang lintang dari beberapa proses (reaksi) sederhana (C3)
16. Memahami mengapa renormalisasi perlu dilakukan, dan mampu melakukan normalisasi terhadap perhitungan-perhitungan dari reaksi-reaksi sederhana (C3)
17. Memahami dasar-dasar Kromodinamika Kuantum (*Quantum Chromodynamics*) dan *Standard Model* (C1)
18. Menarik hubungan antara fenomena transisi fasa dan konsep perusakan simetri secara spontan (*spontaneous symmetry breaking*) (C2)
19. Memformulasikan mekanisme Higgs (C3)

III. RencanaPembelajaran

Minggu Ke	Sub-CPMK	Bahan Kajian	MetodePembelajaran	Waktu yang Dibutuhkan	PengalamanBelajar (*O-L-U)	BobotPenerapan Sub-CPMK Pada MK (%)	IndikatorPencapaian Sub-CPMK	Referensi
1	1	Teori Relativitas Khusus: Transformasi Lorentz, Invarian-4, Grup Lorentz, Aljabar dan kalkulus tensor	Kuliah tatap muka	2 x 50 menit	70% O, 15% L, 15% U	6	Menjelaskan konsep teori relativitas khusus secara kualitatif dan teknis menggunakan kalkulus tensor	1 dan 2
2	2	Eelektrodinamika Maxwell: Potensial-4, Tensor medan Maxwell, Formulasi kovarian persamaan Maxwell, Kebebasan Gauge	Kuliah tatap muka	2 x 50 menit	70% O, 15% L, 15% U	6	Menjelaskan bentuk kovarian persamaan Maxwell	1 dan 2
3	3	Formulasi Lagrangian: Lagrangian sistem yang kontinu, prinsip aksi minimum, Lagrangian medan skalar dan persamaan gerak Klein-Gordon	Kuliah tatap muka	2 x 50 menit	70% O, 15% L, 15% U	6	Menjelaskan penggunan Lagrangian dalam teori medan	1 dan 2
4	4	Lagrangian medan Maxwell, simetri dan teori grup, teorema Noether, tensor energi momentum.	Kuliah tatap muka	2 x 50 menit	70% O, 15% L, 15% U	6	Menjelaskan Lagrangian medan Maxwell, simetri, teorema Noether, dan tensor energi momentum	1 dan 2
5	5	Invariansi Gauge:Transformasi global, transformasi lokal, simetri gauge	Kuliah tatap muka	2 x 50 menit	70% O, 15% L, 15% U	6	Menjelaskan konsep transformasi global, lokal, dan simetri gauge	1 dan 2
6	6	Invariansi gauge: Teori gauge Abelian, Teori gauge non-Abelian, Teori Yang-	Kuliah tatap muka	2 x 50 menit	70% O, 15% L, 15% U	10	Menjelaskan teori gauge Abelian, teori gauge non-Abelian,	1 dan 2

		Mills					Teori Yang-Mills	
7	6	Kuantisasi kanonik: Momentum Konjugat, operator jumlah partikel, relasi komutasi untuk medan Klein-Gordon riil, kompleks, Dirac, dan medan gauge	Kuliah tatap muka	2 x 50 menit	70% O, 15% L, 15% U	10	Memformulasikan persamaan kuantisasi kedua dan konsep medan kuantum	1 dan 2
8	**Ujian Tengah Semester**							
9	6	Path Integral: Path Integral pada mekanika kuantum, teori perturbasi dan matriks S, generating functional, aturan Feynman	Kuliah tatap muka	2 x 50 menit	70% O, 15% L, 15% U	10	Memformulasikan Feynman Path Integral dan penggunaannya dalam mekanika kuantum	1 dan 2
10	6	Medan yang berinteraksi: 2-point function, n-point function, diagram Feynman.	Kuliah tatap muka	2 x 50 menit	70% O, 15% L, 15% U	10	Menjelaskan penggunaan diagram Feynman	1 dan 2
11	7	Penampang lintang hamburan, teori medan skalar φ^4, Quantum Electrodynamics	Kuliah tatap muka	2 x 50 menit	70% O, 15% L, 15% U	10	Menghitung penampang lintang hamburan, menjelaskan teori medan skalar, dan elektrodinamika kuantum	1 dan 2
12	7	Renormalisasi: Divergensi pada teori medan kuantum, regularisasi dimensional	Kuliah tatap muka	2 x 50 menit	70% O, 15% L, 15% U	6	Menjelaskan divergensi pada teori medan kuantum, regularisasi dimensional	1 dan 2
13	7	Renormalisasi: Ekspansi loop, *Counter terms*	Kuliah tatap muka	2 x 50 menit	70% O, 15% L, 15% U	4	Menjelaskan ekspansi loop dan *Counter terms*	1 dan 2
14	7	Perusakan simetri secara spontan: Kondisi Vakum, Transisi Fasa	Kuliah tatap muka	2 x 50 menit	70% O, 15% L, 15% U	6	Menjelaskan konsep perusakan simetri secara spontan	1 dan 2
15	8	Perusakan simetri secara spontan: teorema Goldstone, mekanime Higgs	Kuliah tatap muka	2 x 50 menit	70% O, 15% L, 15% U	4	Menjelaskan perusakan simetri dan terjadinya mekanisme Higgs	1 dan 2

16	**UjianAkhir Semester**

*) O : Orientasi
L : Latihan
U : UmpanBalik

Referensi:

1) Lewis H. Ryder, *Quantum Field Theory*, Cambridge University Press.
2) Michael E. Peskin and Daniel V. Schroeder, *Introduction to Quantum Field Theory*, Addison-Wesley Publising.

IV. RancanganTugas dan Latihan

MingguKe	Nama Tugas	Sub-CPMK	Penugasan	Ruang Lingkup	Cara Pengerjaan	Batas Waktu	Luaran Tugas yang Dihasilkan
2	Tugas Mandiri 1	1, 2	Soal	Teori Relativitas Khusus dan elektrodinamika Maxwell	Tugas individu di rumah (PR)	1 minggu	Lembar Tugas Mandiri
4	Tugas Mandiri 2	3, 4, 5	Soal	Formulasi Lagrangian: Lagrangian dan prinsip aksi minimum untuk medan klasik, persamaan gerak medan skalar (Klein-Gordon), teorema Noether, tensor energi momentum, teori medan gauge	Tugas individu di rumah (PR)	1 minggu	Lembar Tugas Mandiri
6	Tugas Mandiri 3	6, 7, 8, 9	Soal	Transformasi gauge: Transformasi global dan lokal, teori gauge U(1) (Abelian), transformasi gauge non-Abelian, teori gauge SU(2) (Yang-Mills)	Tugas individu di rumah (PR)	1 minggu	Lembar Tugas Mandiri
10	Tugas Mandiri 4	10, 11, 12, 13, 14, 15	Soal	Kuantisasi kanonik dan interaksi medan: Kuantisasi medan skalar, vektor, dan spinor. Formulasi Path Integral 2-point function,QED	Tugas individu di rumah (PR)	3 minggu	Lembar Tugas Mandiri
13	Tugas Mandiri 5	16, 17	Bahan bacaan sesuai referensi	Renormalisasi teori medan skalar 4-phi. Renormalisasi teori elektrdinamika kuantum	Tugas kelompokberanggotakan 3-4 orang	2 minggu	Lembar Tugas Mandiri
14	Tugas Mandiri 6	18, 19	Soal	Perusakan simetri spontan: Transisi fasa dan mekanisme Higgs	Tugas individu di rumah (PR)	1 minggu	Hasil presentasi dalam bentuk *power point*

V. KriteriaPenilaian (Evaluasi Hasil Pembelajaran)

BentukEvaluasi	Sub-CPMK	Instrumen/JenisAsesmen	Frekuensi	BobotEvaluasi (%)
TugasMandiri	1-4	Lembarjawaban	6	20
TugasKelompok	5-6	Lembarpenilaian	2	20
Ujian Tengah Semester	1-3	Lembarjawaban	1	30
UjianAkhir Semester	4-6	Lembarjawaban	1	30
Total				**100**

VI. Rubrik

A. Kriteria Nilai Esai

Nilai	KualitasJawaban
100	Jawaban sangat tepat, semua pengertian dan komponen utama lengkap
76-99	Jawaban cukup tepat, pengertian dan komponen utama hampir lengkap
51-75	Jawaban kurang tepat, pengertian dan komponen utama kurang lengkap
26-50	Jawaban sangat kurang tepat, pengertian dan komponen utama sangat kurang lengkap
<25	Jawaban salah

VII. Lampiran: Contoh Soal Ujian

1. Turunkan persamaan Maxwell yang kovarian dari Aksi dengan menggunakan Prinsip Aksi Terkecil!
2. Gambarkan diagram Feynman untuk orde pertama untuk hamburan elektron-positron!.
3. Buktikan bahwa medan Goldstone tak bermassa tidak eksis ketika perusakan simetri secara spontan terjadi pada teori gauge!

A. Ujian Akhir Semester

UJIAN AKHIR SEMESTER – FISIKA MODERN

Departemen Fisika FMIPA UI

Hari/tgl	: Selasa, 20 Desember 2016	Dosen : Dr. Vivi Fauzia
Waktu	: 120 menit	Sifat : Open sheet (A4 bolak balik)

Diketahui : Energi tingkat dasar E_o = 13.606 eV = 2.1799 x10^{-18} J

Bohr magneton $\mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e} = 9.2740 \times 10^{-24}$ J/T $= 5.7884 \times 10^{-5}$ eV/T

h 6.6261×10^{-34} J · s

4.1357×10^{-15} eV · s

k 8.62×10^{-5} eV/K

c 2.9979×10^{8} m/s, 1 atomic mass unit 1.661×10^{-27}

1. Elektron dalam sebuah atom hidrogen berada di keadaan eksitasi 3d bertransisi radiatif ke tingkat energi 2p.
   a. (5 poin) Gambar tingkat energi 3d dan 2p dalam satu diagram tingkat energi jika berada dalam ruang dengan medan magnet luar B = 0, tanpa memperhitungkan interaksi spin orbit.
   b. (10 poin) Tentukan energi (dalam E_o) yang dihasilkan jika terjadi transisi radiatif pada kondisi (a).
   c. (5 poin) tunjukkan pemisahan tingkat energi 3d dan 2p dalam satu diagram tingkat energi dan hitung setiap energinya jika berada dalam ruang dengan medan magnet luar B=2T, tanpa memperhitungkan interaksi spin orbit.
   d. (5 poin) Sebutkan syarat transisi yang diperbolehkan pada kondisi (c) dan tunjukkan dalam diagram tingkat energi diatas.
   e. (5 poin) Tentukan energi (dalam E_o dan μ_B) yang dihasilkan jika terjadi transisi radiatif pada kondisi (c).
   f. (10 poin) Tunjukkan pemisahan tingkat energi 3p dan 2p dalam diagram tingkat energi jika berada dalam ruang dengan medan magnet luar B =0 dengan memperhitungkan interaksi spin orbit.
   g. (5 poin) Sebutkan syarat transisi yang diperbolehkan pada kondisi (i) dan tunjukkan dalam diagram tingkat energi diatas.
   h. (10 poin) tunjukkan pemisahan tingkat energi 3d dan 2p dalam satu diagram tingkat energi jika berada dalam ruang dengan medan magnet luar B=2T dengan memperhitungkan interaksi spin orbit.
   i. (5 poin) Sebutkan syarat transisi yang diperbolehkan pada kondisi (i) dan tunjukkan dalam diagram tingkat energi diatas.

Table [illegible]

Molecule	Frequency (Hz), $n = 0$ to $n = 1$	Force Constant (N/m)
HF	8.72×10^{13}	970
HCl	8.66×10^{13}	480
HBr	7.68×10^{13}	410
HI	6.69×10^{13}	320
CO	6.42×10^{13}	1860
NO	5.63×10^{13}	1530

From G. M. Barrow, *The Structure of Molecules*, New York, Benjamin (1963).

2. Dengan menggunakan data pada *Table 1*, tentukan:
   a. (5 poin) Jarak antara tingkat energi vibrasi molekul diatomik CO.
   b. (5 poin) Temperatur yang diperlukan untuk mengeksitasi secara termal tingkat energi vibrasi ini, jika molekul dianggap sebagai osilator satu dimensi.

   Dengan mengabsorpsi gelombang elektromagnetik tertentu, molekul CO mengalami transisi tingkat energi rotasi dari keadaan ℓ'=3 ke ℓ=2 sebesar 1.43×10^{-3} eV. Jika diketahui massa atom C=12.00u dan massa atom O=15.99u Tentukan:
   c. (5 pon) Panjang gelombang foton yang diperlukan untuk eksitasi tersebut.
   d. (5 poin) momen inersia molekul CO.
   e. (5 poin) Jarak rata-rata antara pusat atom O dan atom C.

3. (15 poin) Asumsikan seluruh ^{206}Pb dalam sampel tambang uranium adalah hasil dari peluruhan ^{238}U dengan waktu paruh ^{238}U adalah $4,5 \times 10^{9}$ tahun dan perbandingan ^{206}Pb / ^{238}U adalah 0,6. Tentukan umur tambang tersebut.